



www.viserdata.com

自然科学研究

NATURAL SCIENCE RESEARCH

季
刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 3041-0584(online) 3041-0576(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

谷歌学术收录期刊



2026 **1**

第3卷 总第8期

COMPANY INTRODUCTION

公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd.)成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



自然科学研究

Natural Science Research

2026年·第3卷·第1期（总第8期）

主办单位：Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N：3041-0584 (online)

3041-0576 (print)

数据库收录：中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

谷歌学术收录期刊

发行周期：季刊

收录时间：3月

期刊网址：www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱：viser-tech@outlook.com

地 址：195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,

Singapore 168976

学术主编：马伟芳

学术副主编：Ajmal Khan

安 宁 安俊明

蔡懿苒 甘银波

张学东 吕貽忠

曹 婷 骆 辉

责任编辑：肖书杰

美工编辑：李 亚 Anson Chee

定 价：SGD 20.00



本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点；作者文图责任自负，如有侵犯他人版权或者其他权利的行为，本刊概不负连带责任。版权所有，未经许可，不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人：稿件凡经本刊使用，如无电子版或书面的特殊声明，即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

《Natural Science Research》即《自然科学研究》期刊由新加坡Viser Technology Ptd Ltd主办，国际标准刊号：ISSN 3041-0584 (online) 3041-0576 (print)。《自然科学研究》是一本关注自然科学领域最新进展的国际中文期刊，主要刊登自然科学各学科领域的基础研究和应用基础研究方面的高水平、有创造性和重要意义的最新研究成果论文，以促进学术交流与成果转化，文章被权威网站全文收录。

该刊支持思想创新、学术创新，倡导科学，繁荣学术，集学术性、思想性为一体，旨在为了给世界范围内的科学家、学者、科研人员提供一个传播、分享和讨论自然科学领域内不同方向问题与发展的交流期刊。

目 录



CONTENTS

学术争鸣

产品化与数字化在航天领域的协同发展 张书玮 刘 伟 郭鑫宇 1

畜牧业科学

EKM 型益生菌饲料对畜禽生产性能、健康及粪便碳排放的影响研究 李 燕 王国光 翟喜东 5

化学科学

微化工技术及其应用研究 周恒君 李永华 刘傲翔 唐 明 毕中霖 程 源 9

AES-6800 全谱电弧发射光谱仪对比一米平面光栅摄谱仪测定银、硼、锡元素的优势研究 李 艳 14

苯并三氮唑醇与 TBP 在菜籽油中的摩擦学性能 王宗斌 熊丽萍 何忠义 18

电解水制氢技术研究进展与发展建议 任楠楠 23

生态与环境

冷却塔水分回收难点、技术分析及发展展望 贡延滨 梁全部 张 建 庄国强 李 萌 邢 絮
杨文娟 李国忠 27

可再生能源开发利用中的生态环境保护问题研究 葛怀鹏 徐忠友 宁志平 31

生物科学

靶向肠道生物活性细菌纳米复合体的构建策略与功能机制研究进展 蓝春梅 陈宴希 姜红辛 冯 颖 莫婷婷
黄诗言 廖艳娟 35

生物炭作为热敷材料的应用潜力与性能研究 韩丽娜 陈玉芬 郭一泽 吕喆淼 孟妍柳钰 张梦玥 王嘉戈
毛宇航 王 静 40

材料科学

光合细菌-纳米复合体调控水产养殖微生态的作用机制与应用效能研究进展 陈宴希 蓝春梅 姜红辛 冯 颖
莫婷婷 黄诗言 廖艳娟 陈万林 44

光电信息与计算机

基于人工智能的油脂加工企业安全风险智能识别与预警研究 周 伟 冯延杰 50

产品化与数字化在航天领域的协同发展

张书玮 刘 祎 郭鑫宇*

北京航天万源科技有限公司, 北京 100176

[摘要]当前航天正处在由传统的研制方式向现代化产业转变的关键阶段, 而产品化与数字化是推动这一转型的两个重要方面, 在提高航天器研制水平上发挥着重要作用。本文对航天产品化所包含的标准、模块化、系列化进行了分析, 同时对航天数字化所涉及的数据、模型、智能进行探讨, 最后总结二者结合所带来的优势即一致性目标、互相配合的过程、成倍的效果。在此基础上, 本文提出基于数字孪生的产品全生命周期管理、模块化产品线和数字化研制平台的一体化、数据标准化及产品数据包的高度集成、智能算法使能产品自主运维与迭代更新四种主要融合方式。同时, 给出了从顶层规划、技术创新、组织协调以及生态环境建设四个方面促进其协同发展的一些建议。

[关键词]航天产品化; 航天数字化; 协同发展; 数字孪生

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19391

中图分类号: F426.5

文献标识码: A

The Synergistic Development of Productization and Digitization in the Aerospace Field

ZHANG Shuwei, LIU Yi, GUO Xinyu*

Beijing Aerospace Wanyuan Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: Currently, the aerospace industry is at a critical stage of transitioning from traditional development methods to modern industries, and productization and digitization are two important aspects driving this transformation, playing an important role in improving the level of spacecraft development. This article analyzes the standards, modularity, and serialization involved in aerospace productization, and explores the data, models, and intelligence involved in aerospace digitization. Finally, it summarizes the advantages of combining the two, namely consistency goals, collaborative processes, and exponential effects. On this basis, this article proposes four main integration methods: product lifecycle management based on digital twins, integration of modular product lines and digital development platforms, data standardization and high integration of product data packages, and intelligent algorithms enabling independent operation and iterative updates of products. At the same time, some suggestions were given to promote its coordinated development from four aspects: top-level planning, technological innovation, organizational coordination, and ecological environment construction.

Keywords: aerospace productization; digitalization of aerospace; collaborative development; digital twin

目前, 我国航天事业发展进入高频率发射、高负荷研制以及高难度任务同时进行的新时期, 在此情况下传统的以单件定制为主的航天研制方式已难以满足日益缩短的研发周期、不断提升的成本管控及不变甚至更高的产品质量可靠性的需求。而产品化和信息化是促进我国航天事业改革发展的两条重要途径, 正在改变我国航天科研生产的基本思路。产品化是以标准化、模块化、系列化来实现知识重用和规模化发展; 信息化是以数据、模型、智能化来进行全方位、全过程、全领域仿真和有效管理。二者呈现深度结合、互相促进的良好互动发展态势, 在推动中国航天事业发展方面有重大意义。

1 航天领域产品化与数字化的内涵与关系

1.1 航天产品化的核心: 标准化、模块化与系列化

航天产品化是以航天器研制由以往的“定制化”向“货架式”转变为基础, 利用知识重用提高工作效率的过程, 它包含三个方面: 标准化、模块化以及系列化。其中标准化是产品化的基础, 在此基础上制定统一的标准及规定, 打破各种型号之间界限, 中国航天科技集团公司第九研究院就曾对本单位涉及的主要专业产品进行总结归纳, 共整理出 191 种产品型谱, 淘汰将近 60%, 精简约 20%, 编制涉及多个方面的型谱, 总计有 2875 种规格^[1]。模块化是产品化的必然选择, 指把一个复杂的系统划分为若干具

有明确功能且相互之间有良好的接口。上海空间电源研究所提出“模块级、板卡级、固定项加配置项”思路，在一个平台上不同类型的电源控制器可根据客户需求通过不同标准模块进行搭配从而加快新产品研发速度。系列化是产品化的价值拓展，在相同产品平台上形成不同能力等级的产品族。五院在系统级优秀产品研制过程中，采取一致新型系统结构与外观设计，研制出技术领先、结构简洁、产品型号统一的系统级优秀产品设计方案。系列化的优点是，在不增加内部多样性的基础上满足外部不同需求。

1.2 航天数字化的核心：数据、模型与智能

航天数字化是在虚拟空间中建立对真实航天器全面模拟，数据、模型、智能是其三个主要组成部分，而数据是最基础组成单位，在八院 149 厂的质量数据包系统开发过程中，“工艺技术状态数据”“物资配套质量数据”“生产过程质量数据”“综合质量信息文档”，即围绕这四大业务领域开展相关工作形成对应质量主题域数据模型，实现 100% 的产品实物 BOM 即时生成能力，极大提高过去需花费一周时间完成人工编写报表效率至一天以内即可完成。模型是数字化的重要表现形式。八院 509 所将各种专业技术手段进行融合形成了一套“以模型代替文档、仿真保证质量、系统化理念重塑流程”的数字化设计理念，在此之上定义了一个标准的接口信号模型，使得各个子系统信号内容以及接口都是一致的，消除了信息孤岛现象。智能化是数字化更高层次的表现形式。一院 12 所开发出思源软件工厂平台，“天玄”航天领域的大模型被引入到智能化工具链里面，在软件的需求分析、设计中的问题预测、测试用例的设计以及对于比较复杂的故障进行排除等方面进行了广泛的应用。智能化的意义在于让数字化系统由原来的单纯的数据记录者转变为现在的能够提供帮助的意见提供建议的人。

2 产品化与数字化协同发展的内在逻辑

2.1 目标一致性：提升效率、可靠性与经济可承受性

产品化与数字化虽然方式不同，但是它们的目的是是一致的。从产品化的角度看，效率提高源于知识复用，771 所开展的产品化工作使得宇航集成电路设计时间和生产工艺时间都降低 25%，并且问题发生率降低了 27%。而从数字化的角度看，效率提高是由于信息透明度提升，509 所开发的 AIT 设计制造协同研制系统实现了总装单位与设计师之间数据可即时共享，从而大幅度提升了工作效率。而对于可靠性的改善，产品化是通过对成熟的设计进行固化来避免因变化带来的质量问题，而数字化则是利用模拟仿真尽早发现潜在的问题。在经济上，产品化是大量采购

而降低元器件的成本，数字化是减少实物试验从而节约资源。目标一致使得产品化和数字化有天然的合作要求。

2.2 过程互补性：数字化设计推动产品化架构，产品化平台积累数字化资产。

一方面，数字化设计手段对产品化架构的设计起到支持作用。509 所在建立一个统一接口信号模型基础上，让电缆网设计就像导航一样，从起点对应信号连接器，做到“从设计到实施”无缝对接，使得模块化设计中接口一致性问题大大减少。另一方面，产品化平台有利于数字化资产积累。149 厂在阀类上固定 100 个参数并将其固定到 PDM 系统内，便于后续生产中需要这些信息进行传递。二者相互促进，形成良性互动。

2.3 效能倍增性：协同创造敏捷、柔性智能的新型研制范式

当产品化与数字化由分离到融合时会产生 $1+1>2$ 的效果。敏捷是指对于任务需求的快速反应，12 所思源软件工厂提供了一套统一的软件开发平台以及一系列预制化的软件产品，在此基础上开发一套系统设计工具链使整个设计过程只需要几个小时即可完成。柔性是指在研制过程中可以根据需要灵活变更，上电所建设了一个可以实时监测并准确控制的综合产品集成平台实现了需求和资源之间的对应。智能是系统的自我进化的能力，通过对研制及使用过程中的大量信息进行不断学习，产品化平台能够自动发现设计问题并能够预知可能出现的问题。效能倍增性即产品化提供可以被数字化的“骨架”，而数字化给产品化带来不断进化“灵魂”。

3 协同发展的关键路径与融合点

3.1 基于数字孪生的产品全生命周期管理

数字孪生是产品化与数字化融合的最佳方式，在设计上数字孪生能够把产品的几何、非几何以及管理的信息都进行统一表示从而使得设计时的问题可以在前期就被发现；而在制造过程中，数字孪生是对设计模型进行再加工和完善，根据不同工序要求定义加工设备的信息、工装信息、工艺信息等^[2]。509 所进行的 AIT 设计制造协同研制就是数字孪生在制造方面的具体体现。在运维期间，数字孪生体可以对实物产品进行在轨精确仿真，509 所建立了高保真、超实时数字孪生体，在轨的姿态轨道控制、电源平衡、热控平衡等工作情况均能一一对应。

3.2 模块化产品线与数字化研制平台的统一

模块化产品线和数字化研制平台的一体化是达到“产品线即平台、平台即产品线”。上海空间电源研究所 28V 不调节母线平台为基础开发出 28V 不调节母线平台系列

电源产品：以 42V 不调节母线平台为基础开发出 42V 不调节母线平台系列电源产品；以 28V 全调节母线平台为基础开发出 28V 全调节母线平台系列电源产品；以 12V 不调节母线平台为基础开发出 12V 不调节母线平台系列电源产品，都可以针对不同的总体快速研制。509 所建立了基于 MBD 的数字化协同平台，在该平台上可以实现不同单位之间基于三维模型的协同设计及综合应用，形成统一、开放、共享的研究生产和管理环境。二者结合之后，工程师在平台上可直接选择产品线中的标准模块进行组合设计，而平台自动进行接口兼容性和功能仿真等。

3.3 数据标准化与产品数据包的深度融合

数据标准化是为了实现不同型号、不同单位间数据交换而制定统一标准。149 厂在数据结构化与标准化基础上进行工艺基础建设，在院所规定数据规范以及标准接口下，与院所合作建立起数据双方流通渠道，实现院内各所间数据包业务交流共享。产品数据包融合之前零散质量记录成为完整体系。149 厂实现实时数据流传输，水平连接设计、工艺、生产、检验、试验、现场、质量，垂直贯通总装、分系统、组件、材料来源信息。数据标准化让产品数据包可以流通到各个系统当中，而产品数据包又使得数据标准化具有实际应用价值。

3.4 智能算法赋能产品自主运维与升级

智能算法使得产品化与数字化进一步扩展到运维层面，在空间无人系统运维方面，研究人员提出了“云-边-场”的三层结构，云端负责大规模数据存储以及强大计算能力，边缘端利用联邦学习完成模型融合工作，现场端进行实时数据获取并进行主动故障诊断。“天玄”大模型接入智能化工具链之后，在软件需求分析、设计缺陷预测以及测试用例改进等方面都取得了良好效果。而智能算法对于产品的意义在于让产品具有不断学习并且不断提升自我的能力，让产品化平台不再是一个死板货柜，而是一个可以随时变化的知识库。

4 推进协同发展的策略

4.1 顶层设计策略：制定一体化发展规划与标准体系

促进产品化与数字化共同发展，在顶层规划上首先要有一致方向与路径。航天企业要编制包括产品化与数字化两方面的总体方案，确定共同发展的短期目标、重点工作以及资源配置等。

在规划过程中，要充分认识产品化与数字化之间接口及相互依赖性，不能孤立进行产品化和数字化工作。九院在开展产品化工作中，制定了一系列如产品型谱管理、产

品成熟度定级管理、通用产品模块选用管理等规章制度及文件，共计 115 项，为产品化工作顺利开展奠定坚实基础。

标准体系建设是顶层设计的重要组成部分，在此基础上，航天企业应根据企业的实际情况以及产品的特点和要求，在国家和行业标准基础上制定出包括产品接口标准、数据交换标准、模型表示标准、产品质量标准等一套完整的标准体系^[3]。509 所正在进行数字孪生模型的设计、集成以及测试的标准规范的研究工作，以期建立标准化分层模型资产库来支撑数字卫星的大批量生产和交付。统一的整体规划能够使大家达成一致的认识，防止因局部最优而造成整体最差的情况发生。

4.2 技术融合策略：建设以数字主线为核心的一体化平台

技术融合是产品化、数字化协同发展的重要保障，主要工作是以数字主线为核心搭建一体化平台，打通产品定义数据、生产过程数据以及在轨运维数据之间的壁垒。所谓数字主线就是连接产品整个生命周期各个部分的数据关系，让数据能够从需求开始一直延伸到设计、从设计再到生产、最后从生产一直到运行的过程都能够顺利流通。509 所在努力打造覆盖协同设计、协同研制、测试验证、在轨管理的全过程数字化环境，做到全流程体系协同、全要素产品攻坚克难及全方位在轨服务支持，这也就是数字主线所要求的内容。

一体化平台建设需坚持“统一架构、分步实施、持续改进”。上电所依据 AOS 指南优化自身生产管理系统，在顶层层面定义业务域及其相互间的关系，进行端到端的梳理工作，形成符合业务架构发展的制度体系。同时，在平台建设中要解决影响整体协同的主要问题，逐步扩大范围，提高平台的成熟度以及可用性。

4.3 组织管理策略：构建跨域协同团队与敏捷管理流程

航天企业应尝试建立跨域协同团队，打破专业壁垒以及部门间的隔阂。五院在进行系统级优秀产品研制过程中，首次提出专业技术组、新平台项目组以及管理变革组协同工作机制，在研制工作、产品质量控制、人员配备、企业管理、供应链管理方面制定了相关制度^[4]。而九院积极鼓励各分部建设以产品首席专家为依托的产品团队，组建了一支近 3000 人的产品化技术专家队伍，在促进协同方面起到了重要作用。

4.4 生态构建策略：培育开放协同的产业创新生态

建立开放协同的产业创新生态，实现上下游企业、科研院所、用户单位之间资源互通有无。上海空间电源研究

所以商业航天的供应链管理为突破口,开展基于供应链的科研生产方式,在低附加值环节进行外包,让专业的人做专业的事情。九院与所厂合作开展与总体或者用户单位一对一“结对子”的方式进行合作,693厂与用户单位结对子后形成22种产品系列,21项接口标准,产品型号规格减少约44%,促进开放协同的产业创新生态,需要航天企业由原来的封闭自给自足转变为开放的生态环境整合。

5 结束语

产品化与数字化融合发展是解决航天面临的高密度任务需求以及推动高质量发展的重要途径。从本文的研究可以看出,产品化以标准化、模块化、系列化为基础给数字化提供稳定的目标及基础,而数字化利用其数据、模型、智能化又反过来促进产品化的不断完善和发展。二者目标相同,在过程上互相配合,在效果上相得益彰,形成了快速、灵活、智能化的新一代航天生产方式。同时,伴随着未来数字孪生、人工智能、云边结合的发展,产品化与数

字化的结合将会越来越紧密。航天企业要以顶层设计为龙头、以技术融合为手段、以组织变革为基础、以生态建设为依托,推动两大体系建设同步发展,助力航天强国建设蓬勃发展。

【参考文献】

- [1]赵智丽,刘开平.新时代背景下航天领域预算管控与稽核模式的数字化转型探索[J].航天工业管理,2025(9):9-12.
- [2]凌绪强.我国航天领域数字化转型发展总体构想研究[J].航天技术与工程学报,2024,1(2):1-7.
- [3]季晓菲,岳晓飞,崔钰,等.航天领域三维数字化存档研究与应用实践[J].航天工业管理,2022(6):65-68.
- [4]凌绪强.我国航天领域数字化转型发展总体构想研究[J].航天技术与工程学报,2024,1(2):1-7.

作者简介:张书玮(1993.8—),毕业院校:北京工业大学,所学专业:机械工程,当前就职单位:北京航天万源科技有限公司,职务:工程师,职称级别:中级。

EKM 型益生菌饲料对畜禽生产性能、健康及粪便碳排放的影响研究

李 燕 王国光 翟喜东

包头轻工职业技术学院，内蒙古 包头 014000

[摘要]本研究旨在系统评价一种基于“药食同源”理念设计的新型复合益生菌饲料（EKM 型）对畜禽生产性能、健康指标及粪便碳排放的综合效应。EKM 型饲料以酿酒酵母菌、乳酸菌和枯草芽孢杆菌为核心益生菌，协同甘草、黄芪等中药提取物复配而成。试验结果显示：在草食动物（牛、羊、母马）中，饲喂该饲料可显著提升养分消化吸收率 30% 以上，并大幅改善整体健康水平，其中母马发情率与受孕率显著提高，孕马血清关键生物活性物质含量达到 70,000 IU/L 以上；在单胃动物（猪、鸡）中，饲料消化率提高 40%，消化道与呼吸道疾病发病率降低 60%。环境效益分析表明，EKM 型饲料能显著抑制粪便恶臭气体排放，草食动物粪便中氨气与甲烷浓度低于 1ppm，猪鸡粪便中硫化氢与氨气浓度低于 10ppm，表现出明显的减排效果。综上，EKM 型益生菌饲料通过调节肠道微生态平衡，实现了促进营养吸收、增强动物健康、改善畜产品品质的多重目标，同时有助于减少养殖环境污染、降低生产成本，为畜牧业绿色可持续发展提供了可行的饲料解决方案。

[关键词]益生菌饲料；EKM 型；消化吸收率；疾病防控；粪便气体减排；药食同源；畜牧业可持续发展

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19392

中图分类号: S831.5

文献标识码: A

Study on the Effects of EKM Probiotic Feed on Livestock and Poultry Production Performance, Health, and Fecal Carbon Emissions

LI Yan, WANG Guoguang, ZHAI Xidong

Baotou Light Industry Vocational Technical College, Baotou, Inner Mongolia, 014000, China

Abstract: This study aims to systematically evaluate the comprehensive effects of a new type of composite probiotic feed (EKM type) designed based on the concept of "medicine food homology" on the production performance, health indicators, and fecal carbon emissions of livestock and poultry. EKM type feed is composed of brewing yeast, lactic acid bacteria, and *Bacillus subtilis* as the core probiotics, combined with traditional Chinese medicine extracts such as licorice and astragalus. The experimental results showed that feeding this feed can significantly improve nutrient digestion and absorption rate by more than 30% in herbivorous animals (cattle, sheep, and mare), and significantly improve overall health level. Among them, the estrus rate and conception rate of mare were significantly increased, and the content of key bioactive substances in the serum of pregnant horses reached 70000 IU/L or more; In monogastric animals (pigs and chickens), feed digestibility increased by 40%, and the incidence rate of digestive tract and respiratory diseases decreased by 60%. Environmental benefit analysis shows that EKM feed can significantly suppress the emission of foul odor gases from feces. The concentrations of ammonia and methane in herbivorous animal feces are less than 1 ppm, and the concentrations of hydrogen sulfide and ammonia in pig and chicken feces are less than 10 ppm, demonstrating significant emission reduction effects. In summary, EKM probiotic feed achieves multiple goals of promoting nutrient absorption, enhancing animal health, and improving livestock product quality by regulating gut microbiota balance. At the same time, it helps reduce environmental pollution and production costs in animal husbandry, providing a feasible feed solution for green and sustainable development of animal husbandry.

Keywords: probiotic feed; EKM type; digestive absorption rate; disease prevention and control; reduction of fecal gas emissions; medicine and food share the same origin; sustainable development of animal husbandry

引言

随着畜牧业规模化发展，饲料资源短缺、养殖环境污染（特别是温室气体与恶臭气体排放）、动物健康问题及

抗生素滥用等挑战日益凸显。开发能够提升饲料利用效率、保障动物健康并减少环境排放的新型功能性饲料已成为产业与科研的重要方向。益生菌因其在调节肠道菌群、增

强免疫功能和促进营养物质利用等方面的积极作用,被视为潜在的解决方案之一。本研究基于畜禽营养需求,研制了一种复合益生菌饲料(EKM型),该产品集成酿酒酵母菌、乳酸菌和枯草芽孢杆菌的协同作用,并辅以甘草、黄芪等中药成分,旨在系统评估其对不同畜禽生产性能、健康状况及粪便碳排放的综合影响,为其应用推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 EKM型益生菌饲料的制备

饲料基础配方参照国家《饲料原料目录》及畜禽营养需要标准设计。核心添加剂EKM型益生菌复合制剂包含:活性酿酒酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae*)、乳酸菌(*Lactobacillus* spp.)及枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*),各菌种活菌数均 $\geq 1.0 \times 10^9$ CFU/g。中药组分采用甘草、黄芪的标准化提取物。所有原料经均匀混合、制粒后形成最终试验饲料。

EKM型益生菌饲料的制备采用“分步混合、低温制粒”工艺,具体如下:①首先将基础饲料的原料进行粉碎处理操作,随后通过40目筛将其中的杂质成分有效剔除,之后以基础日粮配方比例为依据,把已经处理好的原料投入导混合机,充分混合,混合时间控制在15min左右。②取适量EKM型益生菌复合菌粉与甘草、黄芪提取物备用,按照菌粉、中药提取物、基础饲料以1:0.8:100的比例进行调配,将益生菌复合菌粉与甘草、黄芪提取物一同加入基础饲料中,充分混合,混合时间控制在20min左右,益生菌与中药提取物均匀分散于基础饲料中为宜;③将充分混合的饲料原料平稳的送入制粒机进行制粒操作,期间为了避免因高温而破坏益生菌的活性,要严格把控制粒的温度,通常为60~65℃为宜,针对猪、鸡等家畜家禽的饲料制粒直径为4mm,对于母马、羊、牛等动物的饲料制粒直径为8mm,制粒后迅速将饲料颗粒转移至烘箱内,在45℃下进行干燥;④干燥后的饲料依次经过冷却与筛分工序将其中夹杂的碎粒及各类杂质进行去除,为了避免因外界环境因素而影响饲料的质量,将饲料进行密封包装,并妥善放置于通风、阴凉的地方进行储存,储存期间注意对饲料中的益生菌菌数进行测定,另外要注意饲料的储存期限不可超过一个月。

对照组饲喂基础日粮,该基础日粮的制备工艺和试验组的相同,严格遵循操作规范以及生产流程进行操作,在制备过程中仅添加等量的载体(麸皮),不额外添加中药提取物和EKM型益生菌复合菌粉。为了确保实验结果的精准性,两组饲料的营养成分(除益生菌与中药成分外)、物理性状保持一致。

1.2 试验动物与设计

试验分为草食动物组与单胃动物组:

草食动物组:选取健康牛、羊、母马,随机分为试验组(饲喂EKM型饲料)与对照组(饲喂基础日粮),试验周期覆盖完整生产阶段。

单胃动物组:选取生长阶段一致的猪与产蛋鸡,设试验组与对照组,饲喂方案同上。

1.3 测定指标与方法

生产性能指标:通过消化代谢试验测定饲料干物质消化率、蛋白质消化率等。

健康指标:记录各组动物消化道与呼吸道疾病发病率;针对母马,记录发情率与受孕率,并采用放射免疫分析法测定孕马血清中相关生物活性物质的国际单位(IU)。

环境指标:于固定时间点采集新鲜粪便样本,使用便携式气体检测仪(灵敏度0.1ppm)测定密闭容器中粪便自然发酵产生的氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)等气体的峰值浓度。

统计分析:数据以“平均值 $\pm$ 标准差”表示,采用SPSS软件进行t检验或方差分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 对生产性能与养分消化率的影响

如表1所示,与对照组相比,饲喂EKM型饲料显著提高了所有试验动物的养分消化率。草食动物试验组的综合消化率平均提升30%以上($P < 0.01$)。单胃动物试验组对饲料的消化率提升更为明显,达40%($P < 0.01$)。这表明EKM型益生菌与中药成分协同优化了胃肠道微环境,增强了酶活性与养分分解吸收效率。

表1 两组生产性能与养分消化率对比

畜禽类型	组别	干物质消化率(%)	粗蛋白质消化率(%)	粗纤维消化率(%)	平均日增重(g)	饲料转化率
肉牛	对照组	62.3 $\pm$ 2.1	60.5 $\pm$ 1.8	58.2 $\pm$ 2.3	850 $\pm$ 45	3.8 $\pm$ 0.2
	试验组	81.1 $\pm$ 1.7**	79.8 $\pm$ 1.5**	76.5 $\pm$ 1.9**	1120 $\pm$ 52**	2.9 $\pm$ 0.1**
肉羊	对照组	65.4 $\pm$ 2.0	63.2 $\pm$ 1.7	61.3 $\pm$ 2.2	180 $\pm$ 22	3.5 $\pm$ 0.2
	试验组	85.2 $\pm$ 1.6**	82.5 $\pm$ 1.4**	79.8 $\pm$ 1.8**	245 $\pm$ 25**	2.6 $\pm$ 0.1**
母马	对照组	61.2 $\pm$ 2.2	59.8 $\pm$ 1.9	57.5 $\pm$ 2.4	320 $\pm$ 30	4.0 $\pm$ 0.2
	试验组	79.5 $\pm$ 1.8**	78.2 $\pm$ 1.6**	75.6 $\pm$ 2.0**	430 $\pm$ 35**	3.1 $\pm$ 0.1**
生长猪	对照组	70.5 $\pm$ 1.9	68.2 $\pm$ 1.6	65.3 $\pm$ 2.1	580 $\pm$ 40	2.8 $\pm$ 0.1
	试验组	98.7 $\pm$ 1.5**	95.5 $\pm$ 1.3**	91.6 $\pm$ 1.7**	850 $\pm$ 45**	1.9 $\pm$ 0.1**
产蛋鸡	对照组	68.3 $\pm$ 2.0	66.5 $\pm$ 1.7	63.2 $\pm$ 2.2	-	2.7 $\pm$ 0.1
	试验组	95.6 $\pm$ 1.6**	93.2 $\pm$ 1.4**	88.5 $\pm$ 1.9**	-	1.8 $\pm$ 0.1**

注:**表示与对照组相比差异极显著($P < 0.01$);产蛋鸡未计算平均日增重,“-”表示无相关数据。

2.2 对动物健康的影响

EKM 型饲料表现出显著的健康促进效果（表 2）。草食动物试验组的疾病总发病率较对照组下降 90%（ $P<0.01$ ），其中母马繁殖性能改善尤为突出，发情周期恢复正常，受孕率显著提高，孕马血清生物活性物质含量升至 70,000 IU/L 以上（表 3）。在猪与产蛋鸡试验组中，消化道与呼吸道疾病发病率降低 60%（ $P<0.01$ ）。上述效果主要得益于益生菌的免疫调节功能与中药材的扶正固本作用。

表 2 两组疾病发病率、血清水平对比

畜禽类型	组别	疾病总发病率 (%)	消化道疾病发病率 (%)	呼吸道疾病发病率 (%)	血清 IgG (g/L)	血清 IL-2 (pg/mL)
肉牛	对照组	16.7±3.2	10.0±2.5	6.7±1.8	12.5±1.2	185±15
	试验组	1.7±1.0**	0.0±0.0**	1.7±1.0**	18.6±1.5**	258±20**
肉羊	对照组	13.3±3.0	8.9±2.2	4.4±1.5	11.8±1.1	178±14
	试验组	1.3±0.9**	0.0±0.0**	1.3±0.9**	17.9±1.4**	245±18**
母马	对照组	15.0±3.1	9.0±2.1	6.0±1.7	12.2±1.2	182±15
	试验组	1.5±1.0**	0.0±0.0**	1.5±1.0**	18.2±1.4**	252±19**
生长猪	对照组	20.0±3.5	13.3±2.8	6.7±1.8	13.1±1.3	190±16
	试验组	8.0±2.0**	5.3±1.5**	2.7±1.1**	19.5±1.6**	265±21**
产蛋鸡	对照组	16.7±3.2	11.1±2.5	5.6±1.6	12.8±1.2	188±15
	试验组	6.7±2.0**	4.4±1.4**	2.2±1.0**	19.1±1.5**	260±20**

注：**表示与对照组相比差异极显著（ $P<0.01$ ）。

表 3 两组促卵泡激素、促黄体生成素、孕酮对比

妊娠天数 (d)	组别	促卵泡激素 (IU/L)	促黄体生成素 (IU/L)	孕酮 (IU/L)
30	对照组	42500±3200	41800±3100	43200±3300
	试验组	65200±3500**	64500±3400**	66100±3600**
60	对照组	45800±3300	45200±3200	46500±3400
	试验组	68500±3600**	67800±3500**	69200±3700**
90	对照组	48200±3400	47600±3300	49100±3500
	试验组	72100±3800**	71500±3700**	73200±3900**

注：**表示与对照组相比差异极显著（ $P<0.01$ ）；数据为孕马血清中相关生物活性物质含量平均值±标准差。

2.3 对粪便气体排放的影响

环境监测结果显示（表 4），EKM 型饲料能显著抑制粪便恶臭气体排放。草食动物试验组粪便中氨气浓度维持在 1 ppm 以下；猪、鸡试验组粪便中硫化氢与氨气浓度均低于 10ppm。对照组气体排放浓度显著高于试验组（ $P<0.01$ ）。减排效应表明，该饲料通过提高养分利用率，减少了粪便中未消化蛋白质等发酵底物，从而从源头降低了气体排放。

表 4 两组 NH₃、H₂S、CH₄对比

畜禽类型	组别	氨气 (NH ₃) 浓度 (ppm)	硫化氢 (H ₂ S) 浓度 (ppm)	甲烷 (CH ₄) 浓度 (ppm)
肉牛	对照组	8.5±1.2	5.2±0.9	12.3±1.5
	试验组	0.7±0.2**	0.5±0.1**	0.8±0.2**
肉羊	对照组	7.8±1.1	4.8±0.8	11.5±1.4
	试验组	0.6±0.2**	0.4±0.1**	0.7±0.2**
母马	对照组	8.2±1.2	5.0±0.9	12.0±1.5
	试验组	0.8±0.2**	0.6±0.1**	0.9±0.2**
生长猪	对照组	25.6±2.5	18.5±2.0	3.2±0.5
	试验组	8.2±1.0**	7.5±0.9**	1.1±0.3**
产蛋鸡	对照组	22.3±2.2	16.8±1.8	2.8±0.4
	试验组	7.8±0.9**	6.8±0.8**	1.0±0.2**

注：**表示与对照组相比差异极显著（ $P<0.01$ ）；数据为粪便发酵 24 h 后气体浓度平均值±标准差。

3 讨论

畜禽生产性能的提升的关键在于实现机体代谢的深度优化以及营养物质的高效利用，益生菌在此过程中发挥着重要的作用，通过作用于肠道，精准调节肠道的微生态平衡，为营养物质的高效消化与充分吸收提供良好的适宜的肠道内环境。

在本次研究中，EKM 型益生菌饲料的使用展现出比较显著的应用效果，尤其对肉鸡和育肥猪的生长性能起到了积极的影响作用，不仅可以有效提高肉鸡、育肥猪的平均日增重，而且有效降低料重比与死亡率，可能与益生菌各成分之间的协同作用存在紧密联系。其中，乳酸菌在畜禽肠道内能够代谢并产生乳酸，从而有效降低肠道内环境的 pH 值，对沙门氏菌、大肠杆菌起到抑制作用，在一定程度上可以大大降低肠道疾病的发生概率；酵母菌含多种营养物质，补充畜禽日粮中可能存在的营养不足；芽孢杆菌具备分泌多种消化酶的能力，针对性地分解饲料中存在的抗营养因子，提高畜禽对饲料的消化吸收能力与饲料的转化率。乳酸菌、芽孢杆菌和酵母菌的协同作用，有助于改善畜禽肠道的消化吸收功能，满足其生长发育的需求，与同类复合益生菌的应用效果相符。相关研究表明，EM 复合益生菌的使用，有助于肉鸡体重的增长，改善饲料转化效率，降低肉鸡的死亡率，虽然在部分指标上，其效果差异并不明显，但整体呈现正向调控作用，这与本次研究结果比较一致。不过，EKM 型益生菌经过了专门的菌株驯化，比 EM 复合益生菌的抗逆性更强，展现出突出的定植能力，以更有效地在畜禽肠道内定植并繁殖，提高畜禽生产性能，且在肉鸡、育肥猪等不同畜禽品种的养殖中得到了广泛的应用。

在畜禽机体中，肠道是最大的免疫器官，在机体免疫

防御体系中占据着核心地位,其机体的整体免疫水平与健康状况存在紧密的联系,而肠道微生态平衡是维持肠道健康的关键要素。本研究发现,EKM型益生菌饲料的使用可以促进畜禽血清IgG、IgA含量的提升,炎症因子水平IL-6、TNF- α 含量降低,有助于增强肠道屏障功能,对于维持肠道的健康具有至关重要的意义,主要与益生菌的免疫调控和肠道修复作用存在相关。EKM型益生菌中的乳酸菌、酵母菌可刺激肠道黏膜免疫细胞的增殖与活化,刺激机体免疫系统增加免疫球蛋白的分泌量,减轻肠道炎症反应。此外,益生菌可在肠道黏膜表面形成生物屏障,扩大营养物质吸收的表面积,增强肠道物理屏障的防护能力,从而有利于维护机体的健康。

本研究结果表明,EKM型益生菌饲料通过“微生态调控”与“药食同源”双重机制,实现了提高生产性能、增强动物健康与减少环境污染的多重目标。复合益生菌在肠道内定植,产生消化酶与维生素,竞争性抑制病原菌,并结合黄芪、甘草的免疫增强作用,共同构建健康的肠道屏障,此为消化率提升与发病率下降的主要原因。此外,消化吸收效率的提高减少了粪便中残留营养物质,直接降低了碳、氮、硫等元素的排放,对缓解养殖场温室气体与恶臭污染具有重要实践意义。益生菌有助于提升紧密连接蛋白的表达程度、促使肠道黏液层厚度增加,增强肠道屏障功能,同时发挥调控作用,引导免疫细胞正确分化,有效激活机体的防御体系,这与本研究中EKM型益生菌对畜禽肠道形态和免疫功能的调控机制一致,进一步证实了EKM型益生菌在畜禽健康保护中的应用价值。母马繁殖

性能的显著提升提示该配方可能对繁殖动物内分泌调节具有独特作用,值得进一步探讨。

4 结论

EKM型益生菌饲料能显著提高畜禽养分消化率(草食动物提升30%以上,单胃动物提升40%);显著改善动物健康,降低发病率(草食动物下降90%,猪鸡下降60%),并有效提升母马繁殖性能;同时,可明显减少粪便中氨气、硫化氢等恶臭气体排放(草食动物粪便 $\text{NH}_3 < 1\text{ppm}$,猪鸡粪便 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{S} < 10\text{ppm}$),实现养殖污染的源头减排。本研究成果验证了“药食同源”理念在现代畜牧业中的应用价值,为节约饲料资源、降低养殖成本、改善养殖环境及推动畜牧业绿色可持续发展提供了有效技术方案。

[参考文献]

- [1]张军民,高振川.益生菌在畜禽生产中的应用研究进展[J].动物营养学报,2019,31(1):1-10.
 - [2]刘蓓蓓,王佳莹.反刍动物甲烷减排营养调控技术研究进展[J].饲料工业,2020,41(11):1-6.
 - [3]Gaggi F, Mattarelli P, Biavati B. Probiotics and prebiotics in animal feeding for safe food production[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010(141):15-28.
 - [4]国家质量监督检验检疫总局.饲料原料目录[S].北京:中国标准出版社,2012.
 - [5]刘波,张鹏翼,孟祥瑞,等.益生菌发酵中药方法概述及其应用研究进展[J].中国现代中药,2020,22(10):1741-1750.
- 作者简介:李燕(1974.10—),单位名称:包头轻工职业技术学院,毕业学校:内蒙古农业大学。

微化工技术及其应用研究

周恒君 李永华 刘傲翔* 唐明 毕中霖 程源

北方华锦化学工业股份有限公司, 辽宁 盘锦 124000

[摘要]微化工技术作为化工技术中的一个新兴概念, 现已广泛地应用于学术和产业研究中。该技术以极高的传热传质效率、安全、连续化生产、精准控制、节能减排、绿色环保等特性, 展现了较常规的釜式工艺无法比拟的优势, 为很多化工品的连续安全生产提供了崭新的前景和研究方向, 具有巨大的开发潜力和应用价值。介绍了微化工技术的背景、特点及在危险微反应、有机金属化学微反应、光化学微反应和聚合微反应等方面的应用研究, 并展望了它在未来的发展前景。

[关键词]微化工技术; 微反应器; 传热传质效率; 连续化生产; 精准控制

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19395

中图分类号: TQ02

文献标识码: A

Microchemical Technology and Its Applications

ZHOU Hengjun, LI Yonghua, LIU Aoxiang*, TANG Ming, BI Zhonglin, CHENG Yuan

North Huajin Chemical Industries Co., Ltd., Panjin, Liaoning, 124000, China

Abstract: As an novel concept in chemical engineering, microchemical technology has been widely applied in academic and industrial researches. As the properties of the extremely high heat and mass transfer rates, safety, energy conservation and emission reduction, continuous production, precise control and green environmental protection, the technology represents the unparalleled advantages over the traditional kettle crafts. Based on the properties, it can provide new prospects and research directions for the productions. Meanwhile, it will have enormous potentials and applications for chemical industry. This article summarizes the background and features of microchemical technology, as well as the applications in hazardous microreactions, organometallics microreactions, photochemical microreactions and polymerization microreactions. Furthermore, the prospects of microchemical technology are also envisaged.

Keywords: microchemical technology; microreactor; heat and mass transfer rates; continuous production; precise control

近年来, 随着科技的进步, 资源紧张和绿色发展的趋势越来越严峻^[1], 对各化工企业而言, 节能减排、可持续发展等压力接踵而至。因此, 占地面积小、安全性高^[2]、反应效率快的新技术——微化工技术应运而生, 并很快发展成为一门新兴领域。作为微化工技术的核心工艺, 微反应器可以精准控制反应条件^[3], 在极为狭窄的通道内进行, 显著提升传质传热效率^[4-6], 并限制某些剧烈反应的链式效应, 降低了化工生产过程中的潜在风险。同时, 相较于釜式间歇工艺, 微化工技术可以实现化工品的连续化生产, 无“放大效应”, 对缓解资源紧张、实现可持续发展具有重要的战略意义。

1 微化工技术的背景

20 世纪 90 年代中期, 微化工技术的概念由德国的 Wolf-gang Ehrfeld 教授首次提出^[7]。自此, 微化工技术开始进入大众的视野, 并取得了迅速发展, 微反应器开始广泛应用于化工行业的研究和应用中。

1997 年, 第一届微化工技术会议召开, 掀起了一波以微化工技术为核心的研究热潮。2006 年, 康宁公司推出了集化学反应、换热于一体的 Mini-lab 微反应器, 在精细化工领域引起了极大地反响。2016 年 9 月, 第 14 届微反应技术的会议在北京召开, 领域内的专家就此展开了热烈地讨论, 经交流一致认为, 微反应技术对于化工行业而言, 是一场革命性的变革。自此, 大型化设备被微型化取代的趋势越来越显著^[8], 安全可控、高效反应、连续化生产的微反应工艺已成为了很多化工企业的首选。

2 微化工技术的特点

微化工技术是一种以微单元为核心部件, 通过精密微加工技术将传感器、控制器等组件集成于一体的化工设备。通过这种微结构单元, 可以使得设备内部的反应空间被限制在极为狭窄的区域 ($50 \sim 1000 \mu\text{m}$), 比表面积较大 ($10^4 \sim 10^6 \text{m}^2/\text{m}^3$)。在这种情况下, 通道内的流体被切割成可以相互接触的薄层^[9], 减少了分散范围, 有利于化学

反应过程的强化与控制^[10]。

与常规大型化工设备相比,微化工技术的主要特点可以归纳为以下几点:

(1) 传质传热效率高

基于微反应器特殊的几何结构(反应通道尺寸狭窄、比表面积大)^[11],使得反应器内部的流体只能进行单向流动,雷诺系数偏低(<2000),通道内流体以层流扩散状态为主。其中:

$$J = -D \cdot \nabla C \quad (1)$$

$$t = \frac{x^2}{D} \quad (2)$$

在上述菲克扩散定律的公式中, J 为单位时间内通过单位截面的扩散物质流量, 简称为扩散通量; ∇C 表示扩散物质的浓度梯度; D 为描述扩散速度的参数, 称为扩散系数, 扩散越快时, D 值越大; t 指扩散物质经单位截面扩散距离(x)所需的时间。由于微反应器反应通道尺寸的减少, 单位时间内通过截面所需的时间减少, x 值降低, 因此扩散物质在通道内的混合时间 t 有效缩短, 传质效率得以极大地提高, 进而促进通道内的高效反应。

与此同时, 狭窄的反应通道使得微反应器的比表面积极大, 约 $10000 \sim 50000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 显著高于常规的化工设施 ($100 \sim 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$)^[12], 决定了其具有极强的传热效率这一特性。研究表明, 微反应器内的反应与外界环境的传热系数范围约为 $2 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \sim 20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 远远高于釜式反应器^[12]。

(2) 精准控制

基于微反应器具有反应通道体积小、比表面积大的特性, 一方面, 对于一些吸热或者放热量较大的反应, 通道内的化学反应可以快速实现热量的交换, 使反应的温度维持在设定值, 避免飞温引起可能的链式效应^[13], 促进温度的精准控制, 提高反应转化率和选择性; 另一方面, 反应通道尺寸的减少, 避免了传统釜式工艺中物料混合不均匀、局部堆积等问题, 可有效实现对反应物料的精准配比控制。

微反应器连续化生产的流动特性, 解决了传统釜式工艺需要手动操作加料等容易引起反应体系波动的难点问题, 可以实现反应时长、反应停留时间等参数的精准控制, 避免实际生产过程中因加料的先后顺序导致的停留时间过长等引起的副反应^[14], 有效提高反应效率。

(3) 高集成化和连续流反应

微反应器通过微加工技术将反应、混合、换热等单元与传感器等进行集成, 将多单元集合于一体^[15]。这种集成化不仅可以减少生产的占地面积, 节约占地空间, 且有利

于反应的实时监控和连锁操作, 减少人员成本消耗。如某化工企业硝化反应的常规釜式工艺占地面积约 40 m^2 , 现场操作人员 12 名, 而微反应器仅占据 8 m^2 , 现场作业人员 3 名即可^[16]。

因此, 微化工技术的引入可以有效节约占地空间, 大大减少企业现场的操作人员数量, 进而降低企业的生产经营成本, 提高经济效益。

(4) 高效放大

已知传统的反应工艺中化学品要想投入生产往往需要经过“小试-中试-放大生产”一系列工序, 进行逐级放大摸索, 不断调整工艺来实现最终的生产。这种化学品的生产方式不仅需要较长的时间周期, 而且也需要投入大量的人力物力原料等成本。而微化工技术的引入则可有效避免上述繁琐冗余的工序。这是由于微化工技术生产工艺的放大是通过平行叠加反应通道的方法实现的^[17], 这种方式可以跳过“中试”流程直接由小试进入产业化生产, 无传统工艺的放大效应。在此基础上, 微化工技术可以节约简化很多工作量, 减少资源消耗, 实现资源的最大化利用^[18], 使化工品得以快速成果转化, 这对于企业的产业化生产经营具有重大的意义。

(5) 安全可靠

由于微化工技术高传热效率的特性, 可以实现反应通道内反应温度的精准控制^[19], 迅速地将热量进行移除, 避免了反应失控可能引起的爆炸, 有效提升了企业在实际产业化生产中的安全性能。

一方面, 微反应的物料在通道内可以实时流动, 不会出现大量堆积的情况, 即使反应出现失控的行为, 危害情况也在可控制的范围内^[20]; 另一方面, 连续化工艺保证了反应整体过程处于一个密闭的环境, 避免了传统间歇釜式工艺的倒料操作, 消除了在这个过程中可能出现的气体、液体泄露引起的风险, 进一步提高了企业的生产安全指数, 降低了事故风险率^[16]。

(6) 绿色环保

结合现如今政府出台的“双碳”政策, 预示着国家对于绿色、环保的化工生产工艺需求越来越紧迫, 微化工技术概念的提出为此提供了有效的解决措施。相较于传统的反应工艺, 微化工技术可以有效提高反应的转化率、选择性, 降低副产物的产生和“三废”的排放, 对于实现可持续发展这一战略政策具有重大意义^[21]。

3 微化工技术的应用

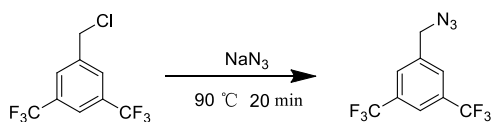
由于微化工技术反应具有通道尺寸小、比表面积大、传质传热效率高、连续化生产、安全可控、无放大效应、

绿色环保等独特的企业生产优势，目前已在精细化工、石油化工、高性能高分子材料、制药、军工、航空航天等领域的合成反应中有着广泛的应用。

3.1 危险微反应

在常规的化学反应工艺中，高放热或者容易引起爆炸的反应通常采用减缓反应介质滴加速度这一手段来进行控制。一旦反应放出的热量超出了冷却剂可以带走的热量，就存在引起爆炸的风险。微反应技术的引入，使这一问题得到了有效解决，狭窄的反应通道可以使反应快速进行热交换带走多余的反应热，消除了可能的风险隐患。同时，较短的反应停留时间也极大地降低了可能引起的爆炸风险。

叠氮基团作为一种在合成化学中使用频率很高的官能团，反应生产过程的危险指数极高，某种程度上限制了它在化工行业的发展。在这种反应工艺的生产中，叠氮酸会在反应釜中进行堆积，危险性极高。Kopach 等^[22]通过药物中间体 1-叠氮甲基-3,5-双(三氟甲基)苯的合成实验研究表明，连续流微化工技术更为适合此类官能团化学反应的合成(图 1)。



1-氯-3,5-双(三氟甲基)苯 1-叠氮甲基-3,5-双(三氟甲基)苯
图 1 连续流叠氮化反应合成药物中间体 1-叠氮甲基-3,5-双(三氟甲基)苯

在 Kopach 的实验研究中，通过不锈钢管式微反应器研究了图 1 的叠氮化反应在不同反应温度下的反应情况。最终的研究结果表明，当反应温度在 90℃时，该化学反应的反应效率最优，在通道内的停留时间仅 20min 就可以完成反应，转化率可达 97.3%。该反应在微反应器中连续运行 2.8h 即可得到 25g 的药物中间体产物 1-叠氮甲基-3,5-双(三氟甲基)苯，收率 94%。进一步地研究表明，相较于传统的间歇式反应工艺，微反应技术的引入极大地减少了反应停留时间，降低了叠氮化的反应过程风险，有效强化了化学反应过程，且反应的转化率和收率较高，具有广阔的应用前景。

Zuckerman 等^[23]则将微反应技术应用到了硝化反应的研究中(图 2)。该研究采用了 2,6-二氨基吡嗪-1-氧化物 DAPO 在混酸溶液中生成传爆药 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物 LLM，反应温度 20-30℃，反应时间 3h，最大产出可达 3.34g/h。由此可以看出，微反应技术的引入可以将反应条件优化至温和情况，消除放热失控的潜在

风险，精准控制反应时间、反应温度，且目标产物收率较高。因此，对于放热或者容易引起爆炸的反应而言，微反应技术可以有效降低其在反应过程中的风险，促进化工企业的安全性产业化生产。

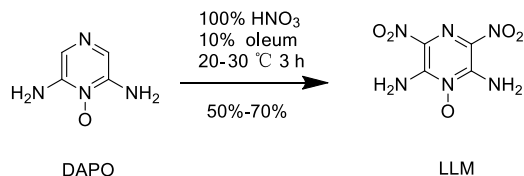


图 2 微反应合成传爆药 LLM

3.2 有机金属化学微反应

有机金属化学是指含有金属-碳键(M-C)化合物的反应，通常采用有机锂、有机镁、有机钠、有机铝等金属化合物。由于这类反应的反应过程通常对水分较为敏感，有较高爆炸风险，因此反应条件较为苛刻，比如低温、惰性环境等。微反应技术的引入可以使这类反应的转化时间极大缩短，控制在毫秒范围内，使不稳定的中间体得以消耗，避免异构化或副反应的发生，有效地提高反应的选择性与收率，降低潜在反应风险。

Rencurosi 等^[24]通过在管式反应器中进行的格氏反应研究表明，在连续流动的反应条件下，反应效率有所提高，副反应减少，反应时间缩短，反应纯度大幅提高。该研究采用的是聚四氟乙烯管式反应器进行反应，0.25M 的 rac-2-二甲氨基甲基-1-环己酮与 1.2 倍当量的 3-甲氧苯基溴化镁在室温条件下进行反应，仅需反应 33min 即可得到目标产物 rac-曲马多非对映体混合物，如图 3 所示。同时，目标产物收率较高，达到 96%。

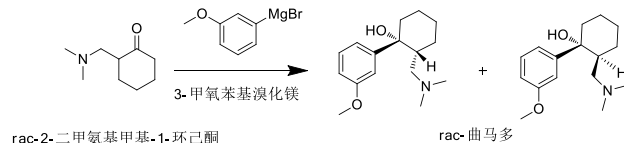


图 3 连续流条件下 rac-曲马多的合成

Yoshida 等^[25, 26]则采用了微反应器进行二溴苯的两步连续锂化反应，生成苯基锂中间体，与亲电试剂发生一取代或二取代反应，进而得到芳环化合物。亲电试剂可采用三氟甲磺酸甲酯、氯二甲基硅烷、三甲基硅酸酯、氯三丁基锡烷等化合物。当反应为传统的间歇式工艺时，即使在 -78 °C 的低温条件下，也会产生大量苯炔及其衍生副产物，如图 4 所示。一般情况下，此类反应通常需要采用 -100 °C 甚至更低的环境下才能保证反应的正常进行。同时，之后反应过程中亲电试剂的引入与反应也需同样严格控制在此低温条件下，条件极为苛刻。

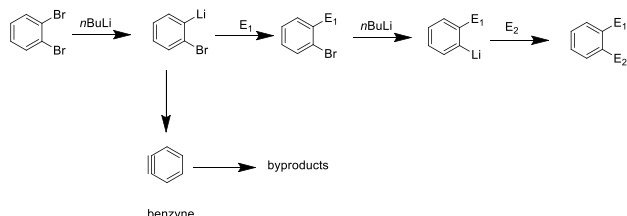


图4 二溴苯微反应合成单取代或者双取代芳环化合物

该项研究采用了微反应器对反应中的 Br-Li 交换反应条件进行了优化。一方面,微反应器的反应通道尺寸较小,可以使进入其中的反应介质迅速混合,反应停留时间极短,避免了部分可能发生在混合均匀之前的副反应;另一方面,相较于传统工艺必须将上述两步反应分步合成的劣势,微反应工艺可以采取连续工艺进行反应,较为省时省力,仅需将反应的前两步设定为 -78°C ,后两步反应设定为 0°C ,经连续流动工艺 0.8s 即可得到芳环终产物。

3.3 光化学微反应

随着技术的进步,光化学反应已经开始崭露头角。光化学反应是指在可见光或紫外光的照射下发生的化学反应^[27]。该反应通过将光的能量转化为化学能量,进而实现化学反应的驱动。目前,光化学反应已在工业中有所应用,如维生素 D3、维生素 A、青蒿素等。但由于光在运输过程中会呈现衰减的趋势,因此极大地限制了光化学反应在实际工业生产中的应用。

近年来,大量研究表明^[28-31]微反应器较为适配此类反应,基于微反应器反应通道尺寸较小的特性,可以使光线均匀的照射反应介质,避免了传统工艺中光传输衰减的弊端,在较短的时间内即可迅速完成光化学反应,且反应时间可达分秒级,降低了反应风险。

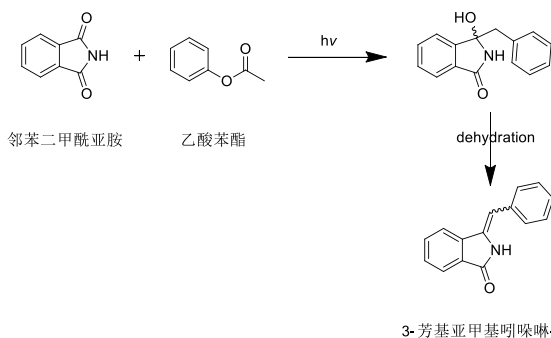


图5 微反应器中光反应合成 3-芳基甲基吡啶-1-酮 (300 nm)

Oelgemoller 等^[32]在微反应器中采用光催化的手段进行了 3-芳基甲基吡啶-1-酮的制备(图5所示)。在该光化学反应中,将邻苯二甲酰亚胺溶于丙酮和缓冲溶液(pH7.0)的混合溶液,在 300nm 的光照条件下,与 3 倍当量的乙酸苯酯反应 2h,经脱水反应得到目标产物,展

现了极高的选择性和收率。

3.4 聚合微反应

目前,聚合反应在微反应技术方面的研究与应用较为广泛,如开环聚合、缩聚反应等。通过微反应器对反应流速、反应介质滴加顺序等参数的精准控制,科学家们合成了许多新的结构化聚合物,如树枝状聚合物、嵌段聚合物等。

阴离子聚合可以采用各种功能化亲电试剂或者聚合物进行封端,是合成聚合物强有力的手段。在传统的间歇式反应工艺中,当阴离子聚合在极性溶剂中进行反应时,活性中心通常具有高活性、高放热,因此需要在极低的反应温度条件下进行;当聚合在非极性溶剂中进行时,活性中心的活性则一般偏低,需在高温环境下进行,且反应时长较长。这些反应弊端极大地限制了阴离子聚合在实际生产中的应用。

Yoshida^[33]和 Frey^[34]等采用微反应器设备分别探究了乙烯基单体在极性和非极性溶剂中的阴离子聚合反应。研究表明,在微反应器中进行该反应时,反应温度设置为 0°C 或 24°C 即可顺利完成反应,避免了极低温或极高温的极端情况,且反应时间仅需 10s。同时,反应得到的终产物分子量分布较窄,仅为 1.08 和 1.10。综上,微反应技术可以有效改善阴离子聚合苛刻的反应条件,将反应温度由零下的极低温条件转变为温和的反应条件,合成的目标聚合物具有较窄的分子量分布,展现了优异的产业化应用意义。

4 结语

微化工技术卓越的化工过程强化性能,使其相较于传统的间歇式工艺有着革命性的价值意义。但也要注意微化工技术的一些弊端,如微反应器通道尺寸较小,容易引起物料的堵塞等。因此,对于微化工技术的研究工作仍任重道远,需要充分发挥工艺优势,优化不足,为推进未来化工行业朝着微型化、智能化的方向发展,助力节能减排,实现可持续发展贡献力量。

基金项目:辽宁省产业技术创新类重点研发项目(2024JH2/102300004)。

[参考文献]

- [1]张恭孝,王者辉.微反应器技术及其研究进展[J].现代化工,2015(2):5.
- [2]董正亚,朱晓晶,贾竞夫.超声微反应器系统的放大及其在纳米材料制备中的应用[J].化工学报,2024,75(11):4095-119.
- [3]薛潇,商敏静,苏远海.微反应器内药物连续流制备的研究进展[J].化工学报,2024,75(4):1439-1454.
- [4]DENG J,ZHANG J,WANG K, et al. Microreaction Technology for Synthetic Chemistry[J].Chinese Journal of

Chemistry,2019,37(2):161-70.

[5]张健,陈砺,严宗诚.微通道反应器在有机合成中的应用研究[J].广州化工,2019,47(12):4.

[6]宋青明,许蓉,李闯.连续流微反应器快速合成邻甲基环己基醋酸酯的研究[J].现代化工,2022,42(8):4.

[7]孙青霞,苏焕焕,金晓云.微通道技术在提升精细化工安全中的应用进展[J].浙江化工,2023,54(9):43-8.

[8]张秋双,陈永东,韩冰川.新型工业微反应器的开发研究[J].流体机械,2024(2):52.

[9]周伟,李新颖,钟雨晨.甲醇重整制氢微反应器的研究进展[J].厦门大学学报(自然科学版),2021,60(3):598-613.

[10]王法军.微反应器技术在化学工业节能降碳方面的应用[J].流程工业,2024(11):20-3.

[11]程荡,陈芬儿.连续流微反应技术在药物合成中的应用研究进展[J].化工进展,2019,38(1):20.

[12]李绪根,王建芝,刘捷.微反应器在精细化工领域氧化反应中的应用进展[J].化学与生物工程,2022(8):39.

[13]吴威,李倩倩.微反应技术在提升精细化工安全中的应用[J].当代化工研究,2025(6):5.

[14]张海飞,操凡,张世元.微通道反应合成十二碳醇酯的工艺研究[J].中国涂料,2021,36(5):4.

[15]何威葳,鄢冬茂,闫士杰.微反应技术在聚合反应中的应用[J].染料与染色,2023,60(6):4-8.

[16]郭红卫.微通道反应器在精细化工行业的安全应用[J].现代职业安全,2020(10):4.

[17]赵峰,苗静.微反应技术在橡胶助剂生产中的应用研究[J].中国橡胶,2017(1):3.

[18]陈光文.微反应技术研究进展;中国化工学会橡塑产品绿色制造专业委员会微通道反应技术研讨和产业化推进会论文集[C].北京:中国化工学会,2016.

[19]孙喜滨,吴杨.微反应器在化工工艺中的应用与优化研究[J].辽宁化工,2024,53(8):1299-302.

[20]代婷婷,宋姜.微通道反应器工艺技术的应用进展及发展前景[J].辽宁化工,2022,51(10):1442-1445.

[21]徐圆圆.微反应技术在石化领域的应用进展[J].精细石油化工进展,2022,23(3):33-6.

[22]MICHAEL E, KOPACH, Michael M. Murray, Timothy M. Braden. Improved Synthesis of 1-(Azidomethyl)-3,5-bis-(trifluoromethyl)benzene: Development of Batch and Microflow Azide Processes[J].Organic Process Research&Development,2009,13(2):152-60.

[23]ZUCKERMAN N B,SHUSTEFF M, PAGORIA P F,et

al.Microreactor flow synthesis of the secondary high explosive 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105)[J].Journals of Flow Chemistry,2015,5(3):178-182.

[24]RIVA E, GAGLIARDIS, MARTINELLI M, et al.Reaction of Grignard reagents with carbonyl compounds under continuous flow conditions[J].Tetrahedron,2010,66(17):3242-7.

[25]NAGAKI A, TAKABAYASHI N, TOMIDA Y,et al.Selective monolithiation of dibromobiaryls using microflow systems[J].Organic Letters,2008,10(18):3937-40.

[26]USUTANI H, TOMIDA Y, NAGAKI A,et al.Generation and Reactions of o-Bromophenyllithium Without Benzyne Formation Using a Microreactor[J].Journal of the American Chemical Society,2007,129(11):3046-7.

[27]王昱翰,沈冲,苏远海.光化学微反应技术的基础及研究进展[J].化工进展,2021,40(9):4749-4761.

[28]JIANG Y, XU K, ZENG C. Use of electrochemistry in the synthesis of heterocyclic structures[J].Chemical reviews,2017,118(9):4485-540.

[29]ATOBE M, TATENO H, MATSUMURA Y. Applications of flow microreactors in electrosynthetic processes[J].Chemical Reviews,2017,118(9):4541-72.

[30]CARDOSO D S, SLJUKIC B, SANTOS D M, et al.Organic electrosynthesis: from laboratorial practice to industrial applications[J].Organic Process Research&Development,2017,21(9):1213-26.

[31]OELGEMOELLER M. Highlights of photochemical reactions in microflow reactors[J].Chemical engineering & technology,2012,35(7):1144-52.

[32]BELLUAU V.Photodecarboxylative benzylations of phthalimide in pH 7 buffer: a simple access to 3-arylmethyleneisindolin-1-ones[J].Tetrahedron Letters,2010,51(36):4738-41.

[33]NAGAKI A, TOMIDA Y, YOSHIDA J I. Microflow-System-Controlled Anionic Polymerization of Styrenes[J].Macromolecules,2008,41(17).

[34]WURM F,WILMS D,KLOS J,et al.Carbanions on tap—Living anionic polymerization in a microstructured reactor[J].Macromolecular chemistry and physics,2008,209(11):1106-14.

作者简介:周恒君(1990—),女,博士,工程师,从事精细化工品开发与应用研究工作;刘傲翔(1989—),男,硕士,工程师,精细化工。

AES-6800 全谱电弧发射光谱仪对比一米平面光栅摄谱仪测定银、硼、锡元素的优势研究

李 艳

有色第一地质勘查院, 青海 西宁 810007

[摘要]目的系统研究 AES-6800 全谱电弧发射光谱仪对比传统一米平面光栅摄谱仪在测定银 (Ag)、硼 (B)、锡 (Sn) 元素时的性能优势。方法以国家一级标准物质 (岩石、土壤、水系沉积物) 为研究对象, 分别采用 AES-6800 全谱电弧发射光谱仪和一米平面光栅摄谱仪测定样品中 Ag、B、Sn 元素, 对比两种仪器的检出限、精密度、准确度、分析效率及抗干扰能力。结果 AES-6800 测定 Ag、B、Sn 元素检出限低于一米平面光栅摄谱仪, 相对标准偏差更优, 测定准确度、分析效率、抗干扰能力高于一米平面光栅摄谱仪, AES-6800 单次样品分析时间短于一米平面光栅摄谱仪。结论与传统一米平面光栅摄谱仪相比较, AES-6800 全谱电弧发射光谱仪检出限低、精密度高、准确度好、分析效率高、抗干扰能力强、操作便捷, 适用于大批量的 Ag、B、Sn 元素检测工作。

[关键词]AES-6800 全谱电弧发射光谱仪; 一米平面光栅摄谱仪; 银; 硼; 锡

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19390

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

Research on the Advantages of AES-6800 Full Spectrum Arc Emission Spectrometer Compared to One Meter Planar Grating Spectrometer for the Determination of Silver, Boron, and Tin Elements

LI Yan

Nonferrous First Geological Exploration Institute, Xining, Qinghai, 810007, China

Abstract: Objective: to systematically study the performance advantages of AES-6800 full spectrum arc emission spectrometer compared to traditional one meter plane grating spectrograph in determining silver (Ag), boron (B), and tin (Sn) elements. Method: the national first-class standard materials (rocks, soils, and water sediment) were used as the research objects. The AES-6800 full spectrum arc emission spectrometer and one meter plane grating spectrograph were used to determine the elements Ag, B, and Sn in the samples. The detection limits, precision, accuracy, analysis efficiency, and anti-interference ability of the two instruments were compared. The detection limit of Ag, B, and Sn elements determined by AES-6800 is lower than that of a one meter plane grating spectrometer, with better relative standard deviation. The accuracy, analysis efficiency, and anti-interference ability of the measurement are higher than those of a one meter plane grating spectrometer. The single sample analysis time of AES-6800 is shorter than that of a one meter plane grating spectrometer. Conclusion: compared with traditional one meter planar grating spectrometers, the AES-6800 full spectrum arc emission spectrometer has low detection limit, high precision, good accuracy, high analysis efficiency, strong anti-interference ability, and convenient operation. It is suitable for large-scale detection of Ag, B, and Sn elements.

Keywords: AES-6800 full spectrum arc emission spectrometer; one meter flat grating spectrograph; silver; boron; tin

引言

银 (Ag)、硼 (B)、锡 (Sn) 在自然界中分布极为广泛, 且在冶金生产、地质找矿等领域中展现出极高的应用价值。元素定量分析作为相关领域研究与生产实践过程中的重要环节, 其效率与准确性对整个工作流程的进度以及

质量有着直接的影响。电弧发射光谱法是 Ag、B、Sn 元素测定的常用方法, 依赖一米平面光栅摄谱仪, 通过电弧激发样品, 使样品中的元素原子或离子被激发而发射出特征光谱, 根据光谱的波长和强度来对元素进行定性和定量分析, 虽然可以实现多元素的同时测定, 样品前处理流程

简单。但是，单次样品分析时间较长、无法准确检测到含量较低的元素。AES-6800 全谱电弧发射光谱仪融合了现代光学技术、电子技术以及计算机技术，可以准确、快速地捕捉样品的光谱信息，解决了传统摄谱仪的诸多不足。目前，关于 AES-6800 在多元素测定中的应用已有相关报道，但针对该仪器与传统一米平面光栅摄谱仪在 Ag、B、Sn 元素测定中的系统对比研究较少。为此，研究深入探讨分析 AES-6800 全谱电弧发射光谱仪对比传统一米平面光栅摄谱仪在测定银 Ag、B、Sn 元素时的性能优势。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

1.1.1 实验仪器

AES-6800 全谱电弧发射光谱仪（上海美析仪器有限公司）采用电感耦合等离子体激发光源等，分辨率 $\leq 0.007\text{nm}$ ，线色散率倒数 0.26nm/mm 、输出功率 $800\sim 1200\text{W}$ ，频率 $27.12\text{MHz}\pm 0.05\%$ 。一米平面光栅摄谱仪（北京第二光学仪器厂，WP-100 型）焦距 1050mm ，相对孔径 $1:22$ ，有效高度 10mm ，倒线色散率 0.4nm/mm ，狭缝宽度 $0.002\sim 0.3\text{mm}$ 。辅助仪器 XZJ-54 型振动搅拌机（武汉探矿机械厂）、Mettler AL104 型电子天平（美国梅特勒-托利多公司）、鼓风干燥箱（上海一恒科学仪器有限公司）、玛瑙研钵（直径 100mm ）、光谱纯石墨电极。

1.1.2 实验试剂与标准物质

试剂选择光谱纯焦硫酸钾（ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ ）、氟化钠（NaF）、三氧化二铝（ Al_2O_3 ）、炭粉、氧化锆（ GeO_2 ），均购自国药集团化学试剂有限公司；蔗糖（分析纯），购自上海试剂一厂；乙醇（分析纯），购自天津科密欧化学试剂有限公司；实验用水为超纯水。按 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 22%、NaF 20%、 Al_2O_3 44%、炭粉 14%（内含 GeO_2 0.007%）的质量配比缓冲剂。选用国家一级标准物质，均购自中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所，具体认定值见表 1。

表 1 国家一级标准物质中 Ag、B、Sn 元素认定值（示例）

标准物质编号	物质类型	Ag 认定值 ($\mu\text{g/g}$)	B 认定值 ($\mu\text{g/g}$)	Sn 认定值 ($\mu\text{g/g}$)
GBW07302	岩石	0.052 ± 0.004	125 ± 8	2.8 ± 0.2
GBW07406	土壤	0.038 ± 0.003	89 ± 6	1.9 ± 0.1
GBW07317	水系沉积物	0.085 ± 0.006	156 ± 10	4.2 ± 0.3

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理

将标准物质与待测样品于 105°C 鼓风干燥箱烘干 2h，冷却后用玛瑙研钵研磨过 200 目筛。分别称取 0.1000g 样品与 0.1000g 缓冲剂，混合磨匀装入下电极，滴 2 滴 20g/L

蔗糖溶液， 90°C 烘干后备用上机。

1.2.2 仪器工作条件优化

AES-6800 全谱电弧发射光谱仪工作条件：激发光源用直流电弧，预燃电流 5A 、 5s 防样品飞溅，激发电流 14A 、 30s ，电压 80V 、频率 200Hz 避断弧，电极间距 2mm ；积分时间 Ag 30s 、B 25s 、Sn 30s ；分析线对含 Ag、B、Sn 与 Ge 对应波长；光栅刻线 3600线/mm ，波长扫描 $200\sim 400\text{nm}$ ；载气 0.5L/min 、辅助气 0.2L/min 、等离子气 10L/min ；冷却水温度 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 、流量 $>5\text{L/min}$ 、水压 $>0.1\text{MPa}$ ；以 Ge 为内标校正光源波动。

一米平面光栅摄谱仪工作条件：激发光源用交流电弧，电流 12A 、电压 80V ，电极间距 2mm ；狭缝宽 $10\mu\text{m}$ 、中间光栏高 3.2mm 、中心波长 290nm ；Ag、B、Sn 曝光时间分别为 40s 、 35s 、 40s ；用天津紫外 II 型相板，显影 20°C 、 5min ，定影 15min ；分析线对同 AES-6800，以 Ge 为内标，测谱线黑度用工作曲线法定量。

1.2.3 测定方法

先绘制标准曲线，称取不同编号国标物质前处理后，用两种仪器测定，以认定值为横坐标、谱线强度比为纵坐标绘图并计算回归方程与相关系数（ $r\geq 0.998$ ）；样品测定时，将预处理后的待测样品用两种仪器各测 12 次，AES-6800 自动采集计算，一米平面光栅摄谱仪人工计算；以 GSES-1 为空白样品计算检出限（ $\text{LOD}=3S_0$ ）；用相对标准偏差（RSD）评价精密性，按含量范围有不同要求；以测定值与认定值对数差值（ $\Delta\lg C$ ）评价准确度。

2 结果与分析

2.1 标准曲线对比分析

两种仪器测 Ag、B、Sn 元素标准曲线相关系数均 ≥ 0.998 ，但是，AES-6800 相关系数（ $0.9992\sim 0.9995$ ）更高，Ag 元素的线性范围下限低于一米平面光栅摄谱仪，B 元素的线性范围下限低于一米平面光栅摄谱仪，结果见表 2。

表 2 两种仪器测定 Ag、B、Sn 元素的标准曲线参数对比

仪器类型	元素	回归方程	相关系数 (r)	线性范围 ($\mu\text{g/g}$)
AES-6800 全谱电弧发 射光谱仪	Ag	$y=0.0312x+0.0025$	0.9995	$0.021\sim 10.0$
	B	$y=0.0048x+0.0123$	0.9992	$0.54\sim 1000.0$
	Sn	$y=0.0186x+0.0037$	0.9993	$0.51\sim 100.0$
一米平面光 栅摄谱仪	Ag	$y=0.0294x+0.6411$	0.9982	$0.036\sim 10.0$
	B	$y=0.0646x-1.2669$	0.9980	$2.85\sim 1000.0$
	Sn	$y=0.0237x-1.0697$	0.9981	$0.54\sim 100.0$

2.2 检出限对比分析

两种仪器测定 Ag、B、Sn 元素的检出限均低于《多

目标区域地球化学调查规范》规定的检出限,但 AES-6800 的检出限低于一米平面光栅摄谱仪,其中, AES-6800 的检出限仅为一米平面光栅摄谱仪的 18.9%, 结果见表 3。

表 3 两种仪器测定 Ag、B、Sn 元素的检出限对比

仪器类型	元素	空白标准 偏差 S_0 ($\mu\text{g/g}$)	检出限 $\text{LOD}=3S_0$ ($\mu\text{g/g}$)	规范规定 检出限 ($\mu\text{g/g}$)	检出限降 低比例 (%)
AES-6800 全谱电弧 发射光谱 仪	Ag	0.0023	0.007	0.02	65.0
	B	0.060	0.18	1.0	82.0
	Sn	0.057	0.17	1.0	83.0
一米平面 光栅摄谱 仪	Ag	0.0040	0.012	0.02	40.0
	B	0.317	0.95	1.0	5.0
	Sn	0.060	0.18	1.0	82.0

2.3 精密度对比分析

AES-6800 测定 Ag、B、Sn 元素的 RSD 范围低于一米平面光栅摄谱仪的 RSD 范围, AES-6800 的精密度优于一米平面光栅摄谱仪, 见表 4。

表 4 两种仪器测定 Ag、B、Sn 元素的精密度对比 (n=12)

标准物质编号	元素	AES-6800 RSD (%)	一米平面光栅摄 谱仪 RSD (%)	RSD 降低比 例 (%)
GBW07302 (岩石)	Ag	4.2	7.8	46.2
	B	4.5	8.9	49.4
	Sn	4.1	7.6	46.1
GBW07406 (土壤)	Ag	5.3	10.1	47.5
	B	5.7	11.3	49.6
	Sn	5.5	10.5	47.6
GBW07317 (水系沉积 物)	Ag	2.8	6.2	54.8
	B	3.1	7.5	58.7
	Sn	2.9	6.5	55.4

2.4 准确度对比分析

选取 3 种岩石、3 种土壤、3 种水系沉积物, AES-6800 测定 Ag、B、Sn 元素的 $\Delta\lg C$ 绝对值范围为 0.003~0.018,

一米平面光栅摄谱仪测定 Ag、B、Sn 元素的 $\Delta\lg C$ 绝对值范围为 0.024~0.041, 但 $\Delta\lg C$ 绝对值明显大于 AES-6800, 表明其准确度低于 AES-6800, 结果见表 5。

2.5 分析效率对比分析

以 10 个样品为例, AES-6800 上机分析、数据处理、单次样品上机时间比一米平面光栅摄谱仪短, 结果见表 6。

表 6 两种仪器测定 10 个样品的分析效率对比

分析环节	AES-6800 全谱电 弧发射光谱仪	一米平面光 栅摄谱仪	效率提升比 例 (%)
样品前处理 (min)	45	50	10.0
上机分析 (min)	5	60	91.7
数据处理 (min)	2	40	95.0
总分析时间 (min)	52	150	65.3
单次样品上机时间 (s)	≤ 30	360	91.7

2.6 抗干扰能力对比分析

选取常见共存元素 (Fe、Al、Ca、Mg、Si), 分别配制不同浓度的干扰元素混合溶液, 加入到标准物质 GBW07302 (岩石) 中, 使干扰元素浓度分别为 500 $\mu\text{g/g}$ 、1000 $\mu\text{g/g}$ 、2000 $\mu\text{g/g}$, AES-6800 的相对偏差始终低于一米平面光栅摄谱仪, 结果见表 7。

表 7 两种仪器在不同浓度共存元素干扰下的相对偏差对比

干扰元素浓度 ($\mu\text{g/g}$)	待测元素	AES-6800 相对偏 差 RD (%)	一米平面光栅摄谱仪相 对偏差 RD (%)
500	Ag	1.2	4.5
500	B	1.5	5.8
500	Sn	1.1	4.2
1000	Ag	2.3	8.7
1000	B	2.8	10.3
1000	Sn	2.1	8.1
2000	Ag	3.5	13.2
2000	B	4.1	14.5
2000	Sn	3.2	12.8

表 5 两种仪器测定 Ag、B、Sn 元素的准确度对比

标准物质类型	标准物质编号	元素	认定值 ($\mu\text{g/g}$)	AES-6800 测定值 ($\mu\text{g/g}$)	$\Delta\lg C$ (AES-6800)	一米平面光栅摄谱 仪测定值 ($\mu\text{g/g}$)	$\Delta\lg C$ (一米平面 光栅摄谱仪)
岩石	GBW07302	Ag	0.052 $\pm$ 0.004	0.051	-0.008	0.049	-0.026
	GBW07305a	B	98 $\pm$ 7	97	-0.004	92	-0.027
	GBW07307a	Sn	3.5 $\pm$ 0.3	3.4	-0.012	3.2	-0.033
土壤	GBW07406	Ag	0.038 $\pm$ 0.003	0.037	-0.011	0.035	-0.034
	GBW07430	B	112 $\pm$ 8	111	-0.004	105	-0.028
	GBW07446	Sn	2.3 $\pm$ 0.2	2.2	-0.018	2.0	-0.041
水系沉积物	GBW07317	Ag	0.085 $\pm$ 0.006	0.084	-0.005	0.080	-0.024
	GBW07312	B	138 $\pm$ 9	137	-0.003	130	-0.025
	GBW07449	Sn	4.8 $\pm$ 0.3	4.7	-0.009	4.5	-0.027

3 讨论

AES-6800 全谱电弧发射光谱仪对比一米平面光栅摄谱仪测定相关元素标准曲线线性关系良好,满足定量分析要求。不过 AES-6800 相关系数更高,谱线强度采集更稳、数据重复性更佳,且线性范围更宽,能检测更低含量的 Ag、B 元素,适用范围更广。究其原因在于, AES-6800 采用 CCD 阵列检测器,通过软件自动进行谱线校正和背景扣除,不仅能够快速采集全谱范围内的光谱信息,且减少了光谱干扰对标准曲线线性关系的影响;而一米平面光栅摄谱仪采用相板成像方式,谱线黑度测量受人为操作和相板质量影响较大,导致标准曲线的相关系数略低。

两种仪器测定相关元素检出限均低于规范要求,满足复杂基体样品检测需求。不过 AES-6800 检出限显著低于一米平面光栅摄谱仪,尤其 B 元素差异最突出, AES-6800 在低含量 B 元素测定中优势明显。究其原因在于 AES-6800 仪器采用高分辨率的离子刻蚀全息光栅和高灵敏度的 CCD 阵列检测器,同时提高光谱信号的采集效率和检测灵敏度,进一步降低检出限。而一米平面光栅摄谱仪的分辨率较低,且相板成像过程中存在背景噪声,导致检出限较高,难以准确检测低含量 B 元素。

AES-6800 测定相关元素 RSD 均满足规范要求,一米平面光栅摄谱仪部分低含量样品 RSD 超标。对比可知, AES-6800 精密度显著更优,在不同类型样品、不同含量水平下数据重复性都更稳定。造成两种仪器精密度差异的主要原因是: AES-6800 采用自动化操作,样品激发、数据处理均由仪器和软件自动完成,减少了人为操作误差。此外, CCD 阵列检测器的响应速度快、测量精度高,能够有效减少光谱信号的波动。而一米平面光栅摄谱仪的操作流程繁琐,均依赖人工操作,人为误差较大。同时,其激发光源易受外界环境影响,导致精密度较低。

AES-6800 测定相关元素 $\Delta \lg C$ 绝对值均小于 0.05,满足规范要求,准确度极高,测定值与认定值高度吻合。一米平面光栅摄谱仪虽也满足基本要求,但 $\Delta \lg C$ 绝对值明显更大,准确度低于 AES-6800,在低含量元素测定中准确度偏差较大。究其原因在于该仪器采用全谱扫描技术,能够快速匹配待测元素的特征谱线,通过软件自动进行谱线识别和背景扣除。同时,内标元素 Ge 的蒸发行为与 Ag、B、Sn 元素一致,能够有效校正光源波动和基体效应,进一步提高测定准确度。而一米平面光栅摄谱仪的谱线识别和背景扣除依赖人工操作,且相板测光过程中存在人为误差,导致准确度较低。

两种仪器样品前处理时间差异小,因前处理步骤一致且均人工操作。但上机分析和数据处理环节, AES-6800

效率优势显著,上机分析与数据处理时间均大幅缩短。综合来看, AES-6800 总分析时间更短,分析效率提升明显,样品量越大优势越突出。究其原因在于 AES-6800 采用全自动化设计,单次样品上机分析时间 $\leq 30s$,10 个样品可连续测定;而一米平面光栅摄谱仪采用相板成像方式,每个样品激发后需取出相板,步骤繁琐,且人工操作耗时较长,易出现操作失误,进一步降低分析效率。

随着共存元素浓度的增加,两种仪器相对偏差均上升,但 AES-6800 相对偏差始终显著更低,抗干扰能力更强。在共存元素不同浓度下, AES-6800 受干扰小,测定结果准确性基本不受影响;一米平面光栅摄谱仪干扰明显,浓度升高时偏差远超规范要求,严重影响结果可靠性。究其原因在于 AES-6800 采用高分辨率离子刻蚀全息光栅,配备专用的光谱干扰校正软件,结合 Ge 内标元素校正基体效应,能够有效分离待测元素特征谱线与共存元素的干扰谱线。而一米平面光栅摄谱仪分辨率较低,且背景扣除和干扰校正依赖人工判断和操作,无法有效区分两条相邻谱线,导致干扰偏差较大。

综上,与统一一米平面光栅摄谱仪相比较, AES-6800 全谱电弧发射光谱仪检出限低、精密度高、准确度好、分析效率高、抗干扰能力强、操作便捷,适用于大批量的 Ag、B、Sn 元素检测工作。

[参考文献]

- [1]章连香.极谱法测定铅及铅合金中的微量锡[J].矿冶,2017,26(3):91-93.
- [2]张敏霞,潘光勇,商其英,等.电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定铜基低银焊料中的银、磷和锡[J].分析测试技术与仪器,2018,24(3):169-172.
- [3]付国余,吴冬梅,赵燕秋,等.AES-8000 全谱交直流电弧发射光谱仪的研发与应用[J].分析仪器,2018(6):16-19.
- [4]陈旭光,陈晓红,白梦莎.铜基钎料中银、锡和磷含量测定新方法[J].科技通报,2022,38(12):12-16.
- [5]张文华,王彦东,吴冬梅,等.交流电弧直读光谱法快速测定地球化学样品中的银、锡、硼、钼、铅[J].中国无机分析化学,2013,3(4):16-19.
- [6]王彦东,张文华,吴冬梅,等.电弧直读光谱仪的开发与应用[J].中国无机分析化学,2014,4(4):65-71.
- [7]王彩玉,刘玖芬,李君强,等.AES-7200 型专用发射光谱仪在地质样品分析中的应用[J].黄金,2016(4):77-80.

作者简介:李艳(1992.1—),女,毕业院校:青海大学,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:有色第一地质勘察院,职务:化验员,职称级别:实验测试初级助理工程师。

苯并三氮唑醇与 TBP 在菜籽油中的摩擦学性能

王宗斌¹ 熊丽萍² 何忠义²

1. 济南舜茂试验仪器有限公司, 山东 济南 250116

2. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013

[摘要]为了解决纯基础油的摩擦学性能不佳无法适应现代工况的需求, 本文以苯并三氮唑、环氧氯丙烷为原料, 制备了苯并三氮唑醇衍生物 BEP, 作为菜籽油添加剂, 利用四球机评价了添加剂的摩擦学性能, 结果表明, 制备的添加剂在菜籽油中具有很好的摩擦学性能, 并且 BEP 含磷添加剂磷酸三丁酯 TBP 复配后, 具有较好的极压、抗磨和减摩性能。主要原因是添加剂苯并三氮唑中的氮和 TCP 中的活性磷在润滑过程中与钢球表面发生了吸附和摩擦化学反应, 在钢球的界面形成了一层含磷氮的物理吸附和化学反应复合边界膜, 起到了抗磨减摩作用。

[关键词]菜籽油; 苯并三氮唑醇; TBP; 摩擦学性能

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19389

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

Tribological Performance of Benzotriazole Alcohol and TBP in Rapeseed Oil

WANG Zongbin¹, XIONG Liping², HE Zhongyi²

1. Ji'nan Shunmao Testing Instrument Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250116, China

2. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi, 330013, China

Abstract: In order to solve the problem of poor tribological performance of pure base oil that cannot meet the needs of modern working conditions, benzotriazole and epichlorohydrin as had been used as raw materials to prepare benzotriazole alcohol derivative BEP as a rapeseed oil additive. And the tribological properties of the lubricating oil was evaluated using a four-ball test machine. The results showed that the synthesized additive BEP had good tribological properties in rapeseed oil, and the compound additive, which containing BEP and tributyl phosphate TBP, had good extreme pressure, anti-wear, and friction-reducing properties. The main reason is that the nitrogen in benzotriazole and the active phosphorus in TCP taken on tribochemical reactions with the metal surface during the lubrication process, forming a composite film containing phosphorus and nitrogen at interface, which plays a role in anti-wear and friction-reduction.

Keywords: Rapeseed oil; Benzotriazole alcohol; TBP; tribological performance

苯并三氮唑及其衍生物是一类含氮杂环, 在金属加工中, 广泛地被用作金属钝化剂, 最近的研究表明其同样拥有良好的摩擦学性能^[1-4]和抗腐蚀性等性能。脂肪醇具有一定的减摩性能, 将脂肪醇链接苯并三氮唑官能团, 合成一种新型的含有醇和苯并三氮唑官能团的化合物, 并且把它作为润滑油添加剂应用于润滑油中, 评价其摩擦学性能, 并且评价其和传统的抗磨减摩添加剂磷酸三丁酯 (TBP)^[5]在菜籽油中的摩擦学性能, 探讨添加剂

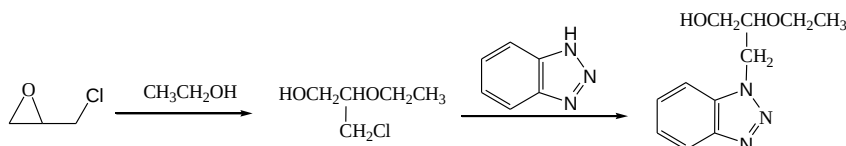
在润滑过程中的摩擦学机理, 对于其实际应用提供一定的指导。

1 实验部分

1.1 添加剂的合成及试样制备

试剂: 环氧氯丙烷, 硫酸, 苯并三氮唑, 乙醇, 苯, 氢氧化钾等均为分析纯化学试剂, 购于上海申科化学试剂公司。

反应式为如下所示。



实验步骤：将含 3.2g 的无水乙醇的 100ml 苯溶液缓慢滴加入到盛有 0.5ml 浓硫酸的三口烧瓶中，室温下搅拌再滴加 6.5g 的环氧氯丙烷，完毕后将反应液升温至 40℃，2h 后冷却至室温，加入 12.5g 的 40%KOH 溶液，再滴加 8.3g 的苯并三氮唑和 100ml 苯混合溶液，回流 4h，抽滤，水洗溶液中的盐，再干燥过夜，过滤后将清液进行减压蒸馏除溶剂，最终得 11.2g 苯并三氮唑醇衍生物(简称 BEP)，形态为浅黄色黏稠液体。

得到的化合物 BEP 经红外和元素分析：%C 60.13 (59.71)；%H 6.68 (6.83)；%N 19.31 (18.99)，括号里面是理论值)，确定为目标化合物。

基础油为未改性的菜籽油，其理化性能是 40℃黏度为 30.65mm²/s，闪点是 223℃。添加剂磷酸三丁酯(TBP)为市售添加剂，制备的额 BEP 和购买的 TBP 在菜籽油中在超声搅拌下形成透亮的浅黄色液体。采用如表 1 所以的添加剂的质量分数进行油样编号。

表 1 油样编号、配方

油样编号	配比公式 (wt%)		
	BEP	TBP	菜籽油油
纯菜籽油	0.0	0.0	100.0
BEP	1.0	0.0	99.0
R1	0.9	0.1	99.0
R2	0.7	0.3	99.0
R3	0.5	0.5	99.0
R4	0.3	0.7	99.0
R5	0.1	0.9	99.0
TBP	0.0	1.0	99.0

1.2 摩擦磨损试验方法及表面分析

摩擦试验机为济南试验机厂生产的 MRS-10 型四球摩擦磨损试验机，实验条件为：室温，测试时长为 30 min，转速 1450r/min。钢球为 GCr15 标准钢球（购于上海轴承厂），润滑油的最大无卡咬负荷 (P_B 值)按照 GB/T3142-82 标准方法测定，试验时间为 10s。润滑油的摩擦学性能按照 ASTM D5183-95 (1999) 标准测定。

392N 载荷下的磨损钢球表面的形貌和化学价的变化采用 PHI-5702 型多功能 X-射线光电子能谱仪 (XPS) 和 HITACHI 公司的 X-650 型扫描电子显微镜 (SEM) 进行分析测量。

2 实验结果与讨论

2.1 承载性能

为了进一步考察合成的 BEP 与含磷添加剂的复配效应，室温下测定了不同含量 BEP 在菜籽油中的最大无卡

咬负荷 (P_B 值)，测试的结果如表 2 所示。

表 2 润滑油样的承载能力

浓度	纯菜籽油	BEP	R1	R2	R3	R4	R5	TBP
P_B 值 (N)	510	579	736	794	804	794	726	579

由表 2 可以看出，随着 BEP 含量的增加，油品的 P_B 值均逐渐增大，说明 BEP 能提高菜籽油的极压性能，并且随 BEP 含量增加， P_B 值快速增加，BEP 和 TBP 在任何比例下，1.0wt%浓度下均存在极压协同性能。

2.2 抗磨性能

图 1 表示在不同载荷时，不同浓度的单剂 BEP 添加在菜籽油的浓度在润滑后的钢球磨斑直径。图 2 是在不同载荷下，不同油样在不同载荷下的磨斑直径。

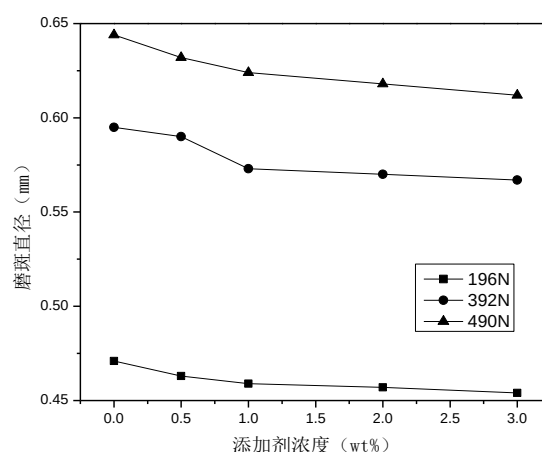


图 1 不同 BEP 浓度下的磨斑直径

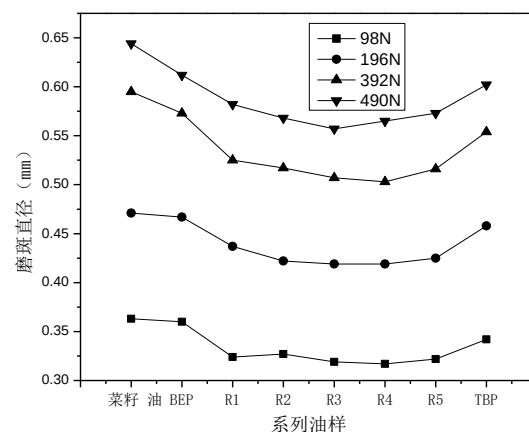


图 2 不同油样的磨斑直径

从图 1 中可知，单纯的 BEP 在菜籽油中的抗磨效果一般，BEP 浓度的增加不能明显地提高菜籽油的抗磨效果。观察图 2 可知，在润滑过程中，添加剂 BEP 和 TBP 均能降低菜籽油的磨斑直径，随着载荷从 98N 提升至

490N, 钢球表面的磨斑直径随之增加。在 98N 和 196N 载荷下, 混合油样随着 BEP 和 TBP 比例的增加, 其磨斑直径呈下降趋势, 说明此时 BEP 的抗磨效果好于 TBP 的抗磨效果。在 392N 和 490N 的高载荷下, 混合油样随着 BEP 和 TBP 比例的增加, 其磨斑直径有一个先减小后增大的过程, 在 BEP 和 TBP 的比例等于 5:5 时, 达到最低点。此现象说明在高载荷条件下, 苯并三氮唑醇 BEP 和磷酸酯 TBP 在提高菜籽油的抗磨性能中具有协同效果, 并存在最强协同的比例(5:5)。在高负荷(392N 和 490N)下, 当进一步提高 BEP 和 TBP 的比(大于 5:5), 油样的磨斑直径反而增大, 不利于抗磨性能的增加, 但混合油样的磨斑直径均低于单剂 BEP 和 TBP 的磨斑直径。

油样在润滑过程中, 菜籽油和添加剂在摩擦副表面发生竞争性吸附。在低载荷下, 由于菜籽油中含有油酸等极性物质, 通过分子间作用力容易吸附在钢球表面形成一层物理吸附膜, 此边界膜起到了抗磨效果。在高载荷条件下, 由于剪切力的增加, 单纯的物理吸附膜容易破裂, 但是添加剂分子能和钢球在表面发生摩擦化学反应, 在润滑边界形成一层化学反应膜, 其在界面的强度大于物理吸附膜。BEP 分子的苯并三氮唑官能团和极性的羟基官能团能吸附在钢球表面, TBP 分子中的活性 P 元素能在金属表面发生摩擦化学反应形成磷酸盐, 具有良好的承载能力和抗磨效果。当 BEP 和 TBP 的比例到了一定的程度(如 5:5), 含有物理吸附和化学吸附形成的复合膜的强度达到最优, 从而拥有的抗磨性能最佳。

2.3 减摩性能

不同载荷下, 不同油样的平均摩擦系数的测试结果见图 3。从图 3 可以看出, 当菜籽油作为基础油时, 随着载荷的增加, 油样的摩擦系数数值也随之提高, 仅含 BEP

和 TBP 的油样的摩擦系数一般大于它们复合时的摩擦系数, 说明单剂 BEP 和 TBP 进行复合后形成的油样的减摩效果强于仅含单剂的油样, 说明在减摩方面, 两种添加剂之间存在较好的协同效应。尤其在 BEP 和 TBP 比例为 5:5 时, 摩擦系数有明显的减小, 达到最优, 说明此时的协同作用达到最佳。

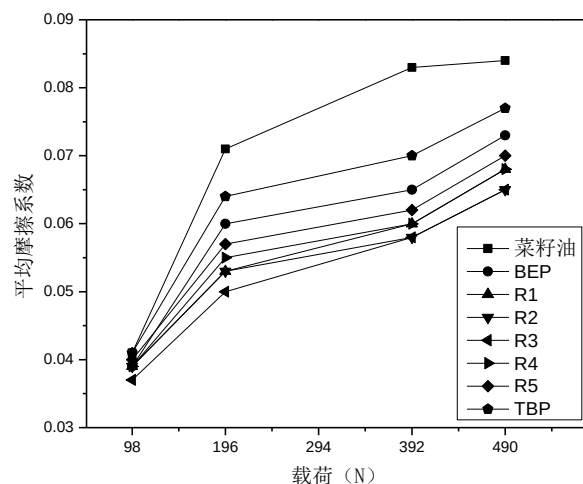


图 3 不同油样的平均摩擦系数

2.4 磨损钢球表面分析

制备的添加剂在润滑过程中的摩擦学机理通过对磨损表面的形貌分析等进行。图 4 是在载荷为 392N 下, 纯菜籽油和 R4 油样润滑下的钢球磨损表面的 SEM 形貌图。从图 4 可知, 当纯菜籽油作润滑下的钢-钢摩擦副表面有明显的犁沟, 呈现出很明显的磨粒磨损特征。当油样 R4 润滑时, 钢球表面的磨损程度明显降低, 这和 R4 中含有含氮杂环苯并三氮唑官能团以及 TBP 有关, 在润滑过程中^[7], 添加剂分子和金属表面形成物理吸附和化学反应膜, 这种复合边界膜具有良好的摩擦学性能。

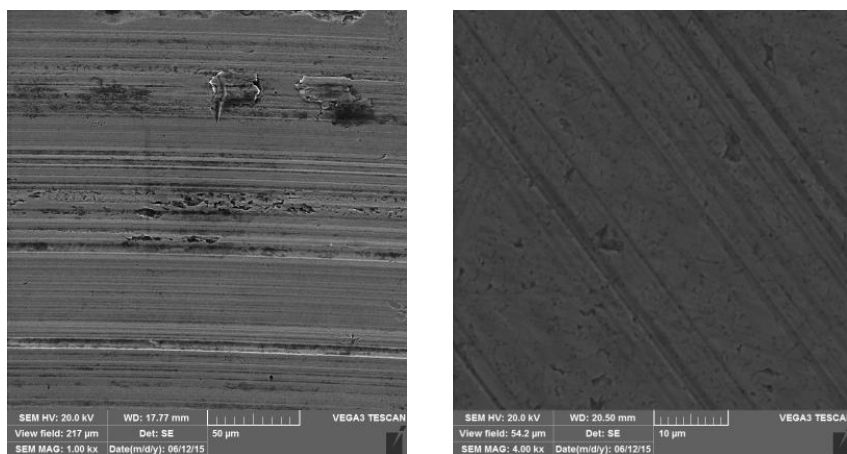


图 4 菜籽油和 R4 油样润滑下的钢球表面的 SEM 照片 (左: 菜籽油; 右: 油样 R4)

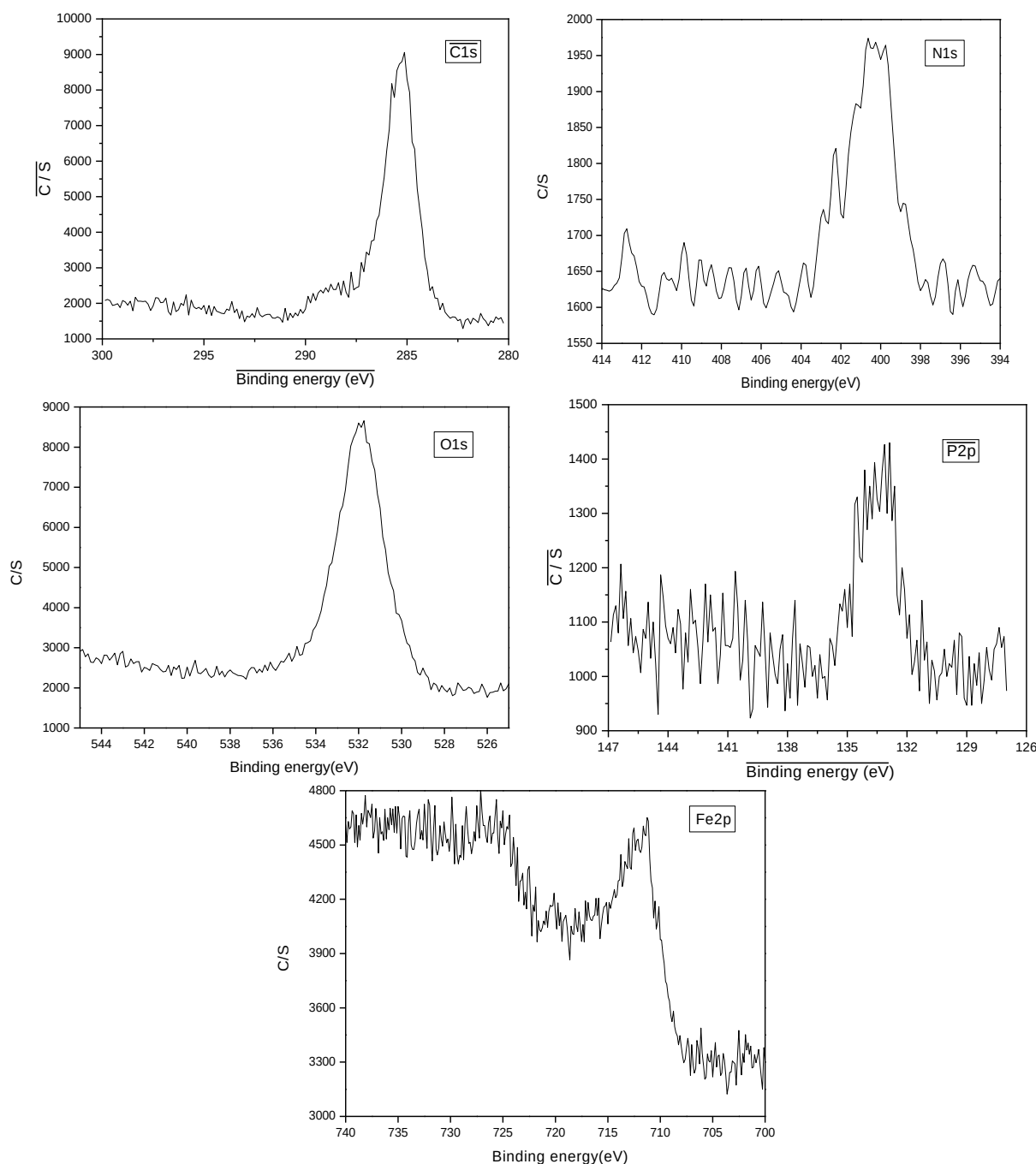


图 5 各种特征元素的 XPS 图谱

为了更好地理解 R4 油样在润滑过程中的摩擦化学机理,图 5 是在 392N 载荷下, R4 油样润滑下的上钢球表面的 XPS 分析结果。C_{1s} 谱图中位于 284.83eV 及 288.46eV 处的峰分别对应磨损表面的污染碳及菜籽油中的 C-H 和 COO⁻, 说明在润滑过程中, 菜籽油在摩擦副表面发生了吸附; Fe_{2p} 谱图中位于 710.70 eV 处的峰对应铁的氧化物。N_{1s} 的结合能^[6]大约是 400.50 eV, 摩擦后

的结合能仍然为 400.50 eV, 说明 N 元素以有机氮的形式吸附在钢球表面, 而位于 399.80 eV 的 N_{1s} 谱峰对应于 Fe(CN)₆⁴⁻等含氮金属配合物。P_{2p} 谱图中位于 133.25 eV 处的峰对应 PO₄³⁻, 位于 530.74eV 的 O_{1s} 处的峰对应 Fe₂O₃ 和 FeO。

从上面 XPS 的峰的归属结果可以推测, BEP 分子中强极性的羟基官能团首先吸附在钢球表面, 而氮杂环中的

N 元素也能在钢球表面以有机氮的形式进行吸附,同时在摩擦过程中,一部分氮和钢球表面发生摩擦化学反应,形成含氮金属配合物。TCP 分子中含有活性 P 元素, P 元素能和金属发生反应,生成磷酸盐无机膜,当它们的比例到了一定的程度,这种物理吸附膜和化学吸附膜一起组成的复合膜^[6]的强度最佳,从而具有最佳的抗磨效果,从而提高菜籽油的摩擦学性能。

3 结论

综上所述,可以得出如下结论:

(1) 合成的化合物 BEP 以及其和 TBP 复配均能不同程度的地提高基础油的最大无卡咬负荷(P_B 值),当 BEP 和 TBP 共同存在时,可以产生很好的协同效应。

(2) BEP 和 TBP 均能降低菜籽油的磨斑直径,在两者复配以后,随着 BEP 和 TCP 比例的增加,在低载荷下,其磨斑直径是直线下降,说明 TBP 的抗磨效果好于 BEP 的;在高载荷下,其磨斑直径是先降后升,说明复合添加剂在一定比例时,协同作用达到最佳。

(3) 随着载荷的增加,复合油样的摩擦系数增加,但数值趋于平稳。含单剂 BEP、TBP 油样的摩擦系数数值一般大于含复合剂的油样,说明 BEP 和 TBP 复合后油样的减摩效果好,添加剂之间存在减摩协同效应。

(4) 由 BEP 与 TBP 形成的复合添加剂的油样在润滑过程中,发生物理吸附的同时,还能与摩擦副表面发生摩擦化学反应,复合添加剂中的 O 及 P 元素与钢球表面发生反应形成无机盐,添加剂中的 N 元素一部分以有机

氮的形式吸附在金属表面,一部分同金属表面发生摩擦化学反应生成含氮金属配合物。在钢球磨损表面形成的物理吸附和经过摩擦化学产物复合边界润滑膜是提高菜籽油润滑性能的主要原因。

[参考文献]

- [1]Su T ,Peng K ,Zhang D, et al. Synergistic Lubrication and Anti-Corrosion Effects of Benzotriazole and Ionic Liquid Under Current-Carrying Friction[J].Lubricants,2025,13(2):77-77.
- [2]王少帅.含氮杂环衍生物的制备及其性能评价[J].石油化工应用,2023,42(4):102-107.
- [3]李毅,张松伟,丁奇,等.新型苯并三氮唑功能化离子液体的缓蚀与摩擦学行为研究[J].摩擦学学报,2019,39(3):279-286.
- [4]Yinglei Wu, Emile H D V, Zhongyi He. Effect of sulfur on the hydrolytic stability and tribological properties of N-containing borate ester[J].Wear,2022(2):504-505.
- [5]侯锁霞,贾晓鸣,张好强.固体润滑剂减摩胶涂层的实验研究[J].润滑与密封,2005(4):145-174.
- [6]俎鹏蛟,董均阳,李毅,等.S-N 型功能分子用作多功能添加剂的缓蚀及摩擦学行为研究[J].摩擦学学报(中英文),2024,44(4):573-584.
- [7]熊丽萍,何忠义,吴细敏,等.无硫磷三嗪衍生物的摩擦学研究[J].新技术新工艺,2010(6):53-56.

作者简介:王宗斌(1980—),男,汉族,山东济南人,本科学历,毕业院校:济南大学,研究方向:机械设计。

电解水制氢技术研究进展与发展建议

任楠楠

华电科工股份有限公司, 北京 100160

[摘要]在国内外能源结构变革及双碳战略中,水电解生产氢气是目前最具有潜力的“绿色氢气”的制取手段之一,受到广泛的关注。文章对碱性电解水(ALK)、质子交换膜电解水(PEM)、阴离子交换膜电解水(AEM)以及固体氧化物电解水(SOEC)四种主要类型的电解水制氢技术进行综述,在技术原理、性能参数、产业水平等方面做出对比。在总结以上研究的基础上,重点探讨了高效率与低能耗、材料费用及资源消耗、耐久性和稳定性、系统整合与大规模生产四大难题。最后,在关键技术开发、系统整合及智能调控、政策措施和技术标准、产业协同发展机制四个方向上,给出相关建议希望能够对我国电解水制氢行业发展有所帮助。

[关键词]电解水制氢; 质子交换膜电解; 阴离子交换膜电解; 固体氧化物电解

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19384

中图分类号: TQ116.2

文献标识码: A

Research Progress and Development Suggestions on Hydrogen Production Technology through Electrolysis of Water

REN Nannan

Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100160, China

Abstract: In the transformation of energy structure and dual carbon strategy at home and abroad, water electrolysis to produce hydrogen is currently one of the most promising methods for producing "green hydrogen" and has received widespread attention. The article provides an overview of four main types of hydrogen production technologies using alkaline electrolyzed water (ALK), proton exchange membrane electrolyzed water (PEM), anion exchange membrane electrolyzed water (AEM), and solid oxide electrolyzed water (SOEC). Comparisons are made in terms of technical principles, performance parameters, and industry level. Based on the summary of the above research, the four major challenges of high efficiency and low energy consumption, material cost and resource consumption, durability and stability, system integration and large-scale production were discussed in detail. Finally, relevant suggestions are given in four directions: key technology development, system integration and intelligent regulation, policy measures and technical standards, and industrial collaborative development mechanism, hoping to be helpful for the development of China's electrolytic water hydrogen production industry.

Keywords: electrolysis of water to produce hydrogen; proton exchange membrane electrolysis; anion exchange membrane electrolysis; solid oxide electrolysis

在全球各国为实现气候目标、促进能源结构调整的过程中,氢气是高效低碳的能源载体,在全世界范围内对它的需求将会增长到 2050 年的 5.3 亿 t。大约有三分之二的的需求需要依靠通过电解水来生产氢气来满足。但是目前化石燃料制氢产生的每公斤氢气会产生约 10 公斤二氧化碳的排放量,限制着其在环境保护方面的贡献效果。在此情况下,电解水制氢根据电解质种类及运行温度的不同大致可分为以下四种类型:碱性水电解(ALK)、质子交换膜水电解(PEM)、阴离子交换膜水电解(AEM)和固体氧

化物水电解(SOEC)^[1]。近几年我国电解水制氢产业取得了很大的进步,在全世界清洁氢项目的投资总额中占比高达 30%,酸性电解槽已经实现了 90%+以上的国产化替代。但是技术走向大规模商业化的步伐依然受到了成本、稳定性的制约等问题阻碍着。

1 电解水制氢技术原理与分类

电解水制氢基本反应包括阴极析氢反应以及阳极析氧反应。理论上分解电压是 1.23V,但由于有超电压的存在使得实际分解电压远远高于理论值。按电解质种类不同、

离子传输方式及运行温度高低不同主要分为四种类型:①碱性电解水(ALK)以 KOH 或者 NaOH 溶液作为电解液,用多孔隔膜把电极隔开,运行温度控制在 60~90°C 之间。ALK 工艺成熟、价格低廉、使用周期较长,但是电流密度较小、响应速度慢。②质子交换膜电解水(PEM)使用全氟磺酸型质子交换膜,纯水为原料。高电流密度,1.5~2.5A/cm²、快速动态响应,<1s 和高压输出能力,但依靠贵金属催化剂,铂、铱等以及钛双极板,成本高^[2]。③阴离子交换膜电解水(AEM)传递氢氧根离子,兼备 ALK 低成本与 PEM 高动态响应特点,能用非贵金属催化剂,但是膜的电导率及化学稳定性成为主要障碍。④固体氧化物电解水(SOEC)在高温 700~900°C 下工作,传递氧离子,热效率高,但是对材料稳定性要求很高,启动时间很长。

2 主要电解水制氢技术研究进展

2.1 碱性电解水(ALK)技术

ALK 技术成熟可靠、价格低廉、使用寿命长,在国际上电解水制氢领域占据了绝对的优势,我国碱性水电解槽国产率达 90%以上,单槽产量可达到 1000Nm³/h 以上,催化剂的研究方向主要有过渡金属系催化剂,包括 Ni、Co、Fe 系材料以及碳基非金属催化剂等,同时催化剂性能的提高也是在对催化剂形状、电子轨道、晶格结构、载体等多方面进行控制的结果,Adnan Ozden 等人认为只有降低电压、延长催化剂/膜寿命>13140h、降低电解槽成本<200 美元/千瓦才能使电解水制氢变得经济可行。旭化成 10MW 级设备已有长时间的示范,证明了 ALK 的大规模可能性。

2.2 质子交换膜电解水(PEM)技术

PEM 技术以其高功率密度和快响应能力适于匹配间歇式的再生能源供给。质子交换膜水电解技术用于利用可再生资源制造氢气具有独特的优势,即快速响应<1s、高电流密度 1.5~2.5A/cm²、高压输出>350bar 可以减少压缩能耗。但其贵重催化剂铱基催化剂以及铂基阴极、钛双极板使得成本过高并且在苛刻环境条件下存在使用寿命短的问题。对此研究人员探索了低贵金属含量的催化剂、耐腐蚀多孔传输层、界面工程等方法。

2.3 阴离子交换膜电解水(AEM)技术

AEM 技术结合了 ALK 低廉的价格以及 PEM 快速的动力响应特性,被认为是未来新型绿色制氢的重要技术选择。而 AEM 水电解作为一种新型的绿色制氢方法也备受关注,其主要研发方向就是如何做到纯净水进料,但是由于膜—电极三相接触不稳定、电流密度小及使用寿命短等

问题的存在使得这一方向的发展受到了限制,中国科学技术大学徐铜文和杨正金课题组采用奎宁环鎇阳离子作为微孔分支阴离子交换膜,在 80°C, 10mol/L 的 NaOH 溶液中 3100h 后仍能维持 99.95%的电导率。中科院大连化物所邵志刚、赵云课题组采用表面技术,在 80°C、1.8V 条件下实现了 1200mAcm⁻² 电流密度并且稳定运行了 2464h。我国华能集团首套 AEM 制氢装置已经完成了 72h 连续满负荷实验。根据中国氢能联盟的研究结果显示,我国 AEM 整体上处于跟随的状态,大规模的应用还需要的时间大概是 10~15 年内。

2.4 固体氧化物电解水(SOEC)技术

SOEC 工艺由于在高温下工作所带来的较高的热力学性能受到重视。SOEC 电解固体氧化物电解(SOEC)作为一种先进的制氢工艺已经崭露头角。其最大的优点就是在高温下工作的优势可以提高热力学效率并且部分的能量可以通过热的形式供给反应所需要的能量但是提高堆栈材料的寿命是一个巨大的难题。SOEC 可以同甲醇制造及高温废热回收等过程进行综合应用^[3]。而在太阳能方面,SOEC 由于它可以将热能和电能转变成化学能的独特功能引起了人们的极大兴趣,学者们正在试图探究 SOEC 与太阳能全方位利用相结合的方法。但是高温造成启停时间过长、热疲劳抵抗能力弱,在耦合间歇性的可再生能源上存在着天然壁垒,今后需要开发可逆固体氧化物电池(rSOC)来提高灵活性。

3 电解水制氢技术面临的关键挑战

3.1 效率与能耗问题

电解水制氢的能量利用率一直限制着它的经济性。现阶段,电解水制氢系统整体的能量转化率一般处于 60%到 80%左右水平,大部分电能以热量形式损失掉,现有主流制氢方法基本上是以化石能源为主导,电解水制氢的最大障碍则是由于巨大的能耗造成的成本问题,与清洁能源相联结被认为是缓解这一问题的主要方式。绿色氢气的成本中有 70%~80%来自于电费,是最大的一块支出,所以降低制氢能耗才是提高绿色氢气经济效益的根本方法,在电价为 0.6 元的时候,电解水制氢的成本依然要超过 30 元每公斤,而煤炭制氢成本只有 10 元每公斤,由此可见,电解水制氢的成本劣势仍然非常明显。所以建立高效、节能的电解水制氢系统已经成为学界以及业界研究的重点方向。

3.2 材料成本与资源依赖

材料成本是制约成本的重要因素,在 PEM 中,铱、铂等贵金属的匮乏成为 PEM 大规模应用的一大阻碍,研究预计到 2030 年铱的需求量超过当前的年产 7t,还需要

将催化剂负载降低到 0.55kg/MW 到 0.07~0.02kg/MW 之间来满足需求。全世界用于 PEM 电解槽阳极催化剂的铱金属年产量只有 9t，而铂金年产量也只有 200t 左右。而在 ALK 领域，镍基催化剂储量较多但是耐久性不足，在 SOEC 领域，陶瓷电解质以及高温电极的价格昂贵，缩减甚至去除贵金属催化剂使用量是迫在眉睫的工作。

3.3 耐久性与可靠性

长周期运行耐久性直接关系到产品全寿命周期的经济效益，在 ALK 技术上碱液电解质对金属件的侵蚀以及启动停止过程中的催化剂损耗是两大挑战。电解水制氢与可再生能源结合时，间歇式的供电所带来的电极损耗需要精确计算并加以控制^[4]；另外，在 PEM 技术中，高电压、高浓度酸性溶液以及高氧含量对于阳极催化剂的侵蚀以及质子交换膜的化学损失都是造成阳极催化剂降解的主要原因。西安交大赵旭等人在 AEM 电解水制氢催化剂的研究方面取得了较大的突破，找到了一种新的解决方案来缓解阳极催化剂在苛刻的条件之下发生的失稳现象^[5]。将催化剂/膜寿命延长到 13,140h 以上是碱性电解水制氢产业化经济可行的基础条件。

3.4 系统集成与规模化瓶颈

大规模推广应用受限于系统集成以及可再生能源配合难度较大。风力发电和光伏发电具有波动性的特点使得电解槽面临着热量调节、压力调节以及气体净化等诸多难题，而在中国能建松原项目中采用的自主研发的“风光储氢醇工业智能体”的方案很好地解决了电解水制氢技术与新能源供电的兼容性问题。我国已经有制定出台的《电解水制氢系统功率波动适应性测试方法》国家标准。但是在百千瓦级向百兆瓦级的跨越过程中涉及到电解槽堆组负荷调控、系统热量匹配及氢气回收等一系列的技术难题亟需整体破解。

4 发展建议

4.1 加强关键材料与核心部件研发

解决电解水制氢技术瓶颈的关键在于攻克核心材料及零部件的技术障碍。可以从以下几个方面着手：第一种是以低铱甚至超低铱乃至无铱的非贵金属阳极析氧电催化剂为基础，采用纳米组装技术及表面结构调变来实现活性和稳定性的平衡；第二种是针对高功率密度需求开发高性能、耐久性强的离子交换膜，对于全氟磺酸膜增强其力学性能与耐热性的同时探索以非氟芳烃类材料作为阴离子交换膜基底来开发具有更高工作温度范围的新一代膜材料，并着重于解决高碱溶液环境中加速老化的问题；第

三种为改善多孔传导层、双极板等组件所用材料及设计，在保证较低欧姆损失及减小传质效应的同时获得较为理想的电流分布特性等。四、加快开展高温 SOEC 电解质和电极材料低成本制备技术的研发，例如流涎成型、丝网印刷、等离子喷涂等工程技术的应用。

4.2 推动系统集成与智能化控制

电解水制氢系统的高效稳定运行离不开整个系统的集成优化以及智能化控制。可以从以下几方面着手：一是在电解槽和可再生能源发电系统的一体化协同优化技术上进行研发，建立“源-网-荷-储”的综合型智慧能源控制系统，利用智能优化求解出风光电量预测、电解槽群集负荷分配、储能系统运行的最优方案^[6]；二是在模块化的电解槽上进行开发，研制出标准型可以快速安装的电解槽模块来减少建设投资及运维难度；三是在光风电解水制氢智能调节系统的技术标准上加强研究，使其成为系统设计、开发、建设、运维的基础指导准则。四是在电解水制氢系统的运行中引入数字化孪生技术，达到对系统进行全方位实时检测、故障预警以及预见性保养的目的。

4.3 完善政策支持与标准体系

政策指引及标准体系建设对促进电解槽制氢产业发展起着至关重要的作用，在政策方面，《中华人民共和国能源法》于 2025 年开始实施，这是第一次以法律法规的形式明确氢能源的能源属性，将其与煤炭、石油、天然气、核能、水能、风电、光伏等一起列为法定能源之一；同时工信部、财政部、发改委共同印发的《关于支持氢燃料电池汽车动力系统关键技术研发示范应用的通知》中指出，到 2030 年终端用户用氢平均价低于 25 元/公斤，希望能在一定好的地方降到大概 15 块钱每公斤这样一个水平。建议在此基础上再制订电解水制氢专项支持政策，比如绿氢生产的电价优惠、电解水制氢设备的固定资产加速折旧、绿氢认证及碳交易机制等。在标准体系上，尽快建立一套完整的电解水制氢全产业链的标准体系，包括原材料检测、电解槽检测、系统安全性要求、产品质量检测等，为我国电解水制氢产业走向国际市场做好准备。

4.4 构建产业链协同创新生态

电解水制氢工艺的发展离不开跨领域合作即材料、化工、电化学、机械、电工电子等多个学科领域的相互渗透以及高校、研究机构、企业之间协同工作才能取得突破性进展。为此提出了以下三点意见，以构建一个良好的协同创新生态系统：一是建设国家氢能技术创新中心，整合高校、院所及骨干企业的各自优势力量，针对电解水制氢关

键技术进行联合攻关;二是建设电解水制氢工业试验平台,促进实验室内研究成果向工业规模化生产转化,加快先进电解水制氢技术产业化进程^[7];三是鼓励上下游企业间合作共建,打造完整的氢能产业链条,加强供应链自主保障能力。四、加大国际合作力度,在积极参与国际电解水制氢技术标准建立的同时,将中国的电解水制氢技术及产品推向世界。

5 结束语

电解水制氢充当了可再生能源和氢能应用之间的纽带作用,在达成“双碳”战略以及建立清洁低碳能源系统方面扮演着重要的角色。目前我国电解水制氢技术进入了快速发展的阶段,ALK 技术已经实现大规模应用,PEM 技术进行了试验性示范,而 AEM、SOEC 技术也分别完成了基础理论的研究及工程化验证。但是技术进步向产业化转变的过程中还有很长的一段距离要走,提高效率、降低成本、采用新材料、增加使用寿命等一系列难题都需要尽快找到答案。日后电解水制氢将会采取多种技术路线共同发展、互相取长补短,不同的使用场合会选用最合适的技术手段。核心材料的成本化下降以及国产化的发展将会进一步加快,金属催化剂及新材料的研发将会彻底突破电解水制氢的困境,在系统的集成度和智能化方面都会有很大进步,绿色氢气的生产由单纯的电解环节转变为风光储氢一体式的综合能源系统,政策和市场需求将会推动大规模绿氢的应用,“十五五”期间绿氢的价格可能会逼近甚

至低于石化原料制氢的成本。

[参考文献]

- [1]吴宇,胡佩瑶.电解水制氢技术电极催化剂研究进展[J].辽宁化工,2025,54(11):1930-1933.
- [2]周峻,冀承泽,李儒欢,等.电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展[J].高电压技术,2025,51(5):2096-2113.
- [3]Li S ,Wrubel A J ,Blair J S , et al.An Acid-Free, Temperature-Based Cation Contamination Removal Strategy for PEM Water Electrolysis[J].Journal of The Electrochemical Society,2026,173(7):074503-074503.
- [4]李赫龙,唐晶,赵炎,等.绿氢生产技术与应用研究进展[J].现代化工,2026,4(2):1-7.
- [5]郝新朝,王健,闫兆乾,等.可再生能源耦合 PEM 电解水制氢研究进展[J].自动化应用,2025,66(7):129-134.
- [6]李怡,王纪元,潘旭海,等.碱性电解水制氢安全研究进展[J].化工学报,2025,76(10):4961-4975.
- [7]Hong R, Su J, Li J, et al.Recent Advances in Membrane Electrode Assembly for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: Performance and Durability Enhancement[J].Electrochemical Energy Reviews,2026,9(1):8-8.

作者简介:任楠楠(1987.9—),女,汉,高级工程师,华电科工股份有限公司,研究方向:电解水制氢领域。

冷却塔水分回收难点、技术分析及发展展望

负延滨^{1,2,4} 梁全部³ 张建³ 庄国强^{2,4} 李萌^{2,4} 邢絮¹ 杨文娟^{2,4} 李国忠^{2,4}

1.北京林业大学, 北京 100083

2.滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256606

3.邹平滨能能源科技有限公司, 山东 滨州 256200

4.滨州铝产业先进制造山东省实验室, 山东 滨州 256606

[摘要]冷却塔作为工业生产核心散热设备,其水分损失量占工业总耗水量的比例较大,开展水分回收对实现节水减排、降本增效具有重要意义。文章系统分析冷却塔水分回收过程中的核心难点,针对各难点梳理高效收水器、闭式循环、膜分离、水蒸气冷凝回收等主流技术的工作原理、优缺点及实用化现状,结合行业发展需求与技术迭代趋势,展望冷却塔水分回收技术的未来方向,为工业企业优化水资源利用、推进绿色生产提供参考。

[关键词]冷却塔; 水分回收; 技术分析; 节水减排; 工业应用

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19394

中图分类号: TQ051.5

文献标识码: A

Difficulties, Technical Analysis, and Development Prospects of Water Recovery in Cooling Towers

YUN Yanbin^{1,2,4}, LIANG Quanbu³, ZHANG Jian³, ZHUANG Guoqiang^{2,4}, LI Meng², XING Xu¹, YANG Wenjuan^{2,4}, LI Guozhong^{2,4}

1. Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

2. Binzhou Weiqiao National Science and Technology Higher Technology Research Institute, Binzhou, Shandong, 256600, China

3. Zouping Binneng Energy Technology Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256200, China

4. Shandong Laboratory of Aluminum Advanced Manufacturing in Binzhou (SLAAMB), Binzhou, Shandong, 256200, China

Abstract: As the core heat dissipation equipment in industrial production, the water loss of cooling towers accounts for a large proportion of the total industrial water consumption. Conducting water recovery is of great significance for achieving water conservation, emission reduction, cost reduction and efficiency improvement. The article systematically analyzes the core difficulties in the process of water recovery in cooling towers, and summarizes the working principles, advantages and disadvantages, and practical status of mainstream technologies such as high-efficiency water collectors, closed cycles, membrane separation, and steam condensation recovery. Combined with industry development needs and technological iteration trends, it looks forward to the future direction of cooling tower water recovery technology, providing reference for industrial enterprises to optimize water resource utilization and promote green production.

Keywords: cooling tower; water recovery; technical analysis; water conservation and emission reduction; industrial application

引言

在全球水资源短缺与环保政策日趋严格的双重背景下,工业节水已成为企业可持续发展的核心议题。冷却塔在电力、化工、冶金等工业领域广泛应用,通过水与空气直接接触蒸发散热,将工艺余热排放至大气^[1]。在此过程中,大量循环冷却水以水蒸气形式随空气排出,形成温度25~40℃、湿度接近饱和的湿热气流。一座600MW火电机组湿式冷却塔年排汽损失水量高达150~200万t,造成巨大水资源浪费^[2]。同时,饱和湿空气冷凝形成白色羽雾,

影响视觉景观和周边环境^[3]。冷却塔水分回收技术通过回收流失水分并净化回用,既能减少新鲜水补给量、降低运营成本,又能缓解水资源压力与环境负荷。然而,受水质特性、能耗成本、工况适配性等多重因素制约,水分回收技术的规模化应用仍面临诸多挑战。因此,深入剖析回收难点、优化技术路径,对推动冷却塔水分回收技术产业化落地具有重要现实意义,在“双碳”目标下,提高工业用水效率已成为国家战略需求。因此,开发高效冷却塔水分回收技术,捕集湿空气中水分循环利用,对缓解水资源短

缺、改善环境质量、提升系统能效具有重大现实意义^[4]。

1 冷却塔水分回收的核心难点

1.1 水质复杂导致回收处理难度大

冷却塔循环水中不仅含有原水中的钙、镁、氯等溶解盐类，还因与空气接触吸附粉尘、微生物，以及投加缓蚀剂、阻垢剂等化学药剂，形成成分复杂的混合体系。水分回收过程中，蒸发浓缩会导致盐类浓度升高，易引发结垢与设备腐蚀；微生物滋生与药剂残留则增加了水质净化难度，若处理不达标，回用后会加剧冷却塔内部堵塞与设备损耗。例如，某炼油厂冷却塔排水中总磷含量长期超标60%，直接回用会严重影响循环水系统稳定性。

1.2 能耗与成本平衡矛盾突出

多数水分回收技术需消耗额外能源实现水汽分离、水质净化，如膜分离、蒸发结晶等技术均存在较高能耗。例如，为了达到较低的露点温度，需要使用大型制冷设备，显著增加电厂的运行费用^[5]。同时，回收系统的设备购置、安装调试及后期维护成本较高，以1000t/h处理量为例，闭式冷却塔初始投资较开式冷却塔高20%~30%。对于中小企业而言，高初期投资与长投资回收期降低了技术应用积极性，如何在保证回收效率的前提下控制能耗与成本，成为制约技术推广的关键瓶颈。

1.3 工况波动影响回收系统稳定性

工业生产中，冷却塔负荷随生产工况变化频繁，导致进水流量、水温、水质参数波动较大。传统回收设备多针对固定工况设计，适应性较差，当工况突变时易出现回收效率下降、设备故障等问题。此外，冬季低温环境下冷却塔易结冰，会损坏收水器、配水装置等设备，导致风吹损失增加；夏季高温高湿工况则会加剧蒸发损失，进一步增加回收系统的运行压力。

1.4 设备适配性与系统集成难度高

现有工业冷却塔类型多样，包括自然通风逆流式、横流式、机械通风式等，不同塔型的结构设计、散热效率差异较大，导致单一回收技术难以普遍适配。同时，水分回收系统需与原有冷却系统、水处理系统集成，若设计不合理，会影响冷却塔原有散热功能，甚至引发整个生产系统停机。此外，在烟气环境中，由于烟气中含有SO_x、NO_x等酸性气体以及粉尘颗粒，传统回收设备容易受到腐蚀和结垢的影响，降低设备使用寿命，增加维护成本。酸性气体与水蒸气结合会形成腐蚀性液体，对设备材料造成损害；而粉尘颗粒则容易在设备表面沉积，形成结垢，影响传热效率，甚至堵塞设备^[6]。部分老旧电厂因冷却塔结构老化、维护不当，收水器损坏脱落现象普遍，进一步降低了水分回收效率。

2 冷却塔水分回收主流技术分析

2.1 高效收水器技术

(1) 工作原理：高效收水器技术作为冷却塔节水的重要手段，其工作原理在于通过优化结构设计，例如调整倾斜角度和增加波纹层数，以提升对冷却塔排出气流中雾滴的捕集能力，从而有效减少风吹损失，并将回收的水分直接送回塔底集水池循环利用^[7]。

(2) 优缺点：优点为结构简单、投资成本低、无额外能耗，安装维护便捷，适用于各类冷却塔改造^[8,9]；缺点是仅能回收雾滴形式的风吹损失，无法回收蒸发损失，回收效率有限，且易受水质影响产生堵塞，需定期清理^[10]。

(3) 实用化现状：目前已成为冷却塔水分回收的基础技术，广泛应用于电力、化工行业。高效收水器（倾斜角度30°左右）可将风吹损失率降至0.001%以下，较传统收水器节水效果提升显著，某造纸厂安装后年节水成本节约600万元，投资回收期仅1.8年。但在水质浑浊、微生物滋生严重的场景，其使用寿命与回收效率会大幅下降。

2.2 闭式循环冷却技术

(1) 工作原理：采用封闭循环系统，冷却介质在管道内循环流动，通过盘管与外界空气实现间接热交换，避免冷却介质与空气直接接触，从源头减少蒸发损失与水质污染，同时收集盘管表面冷凝水回用^[11]。

(2) 优缺点：优点为节水效果显著，水分损耗率可降低至5%以下，较开式冷却塔节水60%以上，且能有效避免结垢与腐蚀，设备维护周期延长至2~3年；缺点是初始投资高，传热效率略低于开式系统，风机能耗相对较高，不适用于低温极端工况。

(3) 实用化现状：在高耗水行业应用占比逐年提升，我国闭式冷却塔市场规模年复合增长率达12%，在制造领域的渗透率已从2018年的23%提升至2024年的41%。某大型火电厂采用闭式冷却塔后，年节水达20万t，设备寿命延长至10年以上，但中小企业因投资压力仍较少采用。

2.3 膜分离回收技术

(1) 工作原理：针对冷却塔排污废水，采用反渗透（RO）、纳滤（NF）等膜分离技术，依托膜的选择透过性去除水中盐类、杂质及药剂残留，净化产水回用于冷却塔补水，浓水经后续处理后排放或资源化利用，聚焦排污损失的回收净化。

(2) 优缺点：优点为净化效果好，产水水质可满足工业用水标准，能有效回收排污损失，提升水循环率；缺点是膜组件投资成本高，易发生膜污染，需定期更换膜元件，运行成本较高，且对进水水质预处理要求严格。

(3) 实用化现状：在水质要求较高的石化、电子行业应用较广，美国通用服务管理局（GSA）的测试显示，排污回收系统结合反渗透技术可实现 53% 的排污节约与 16% 的补水节约，投资回收期约 2.86 年。但在高硬度、高浊度水质场景，膜污染问题突出，导致运行成本增加 30% 以上^[12]。

2.4 蒸发结晶回收技术

(1) 工作原理：针对膜分离产生的高盐浓水，通过机械蒸汽再压缩（MVR）、多效蒸发等技术加热浓水，使水分蒸发形成冷凝水回收回用，结晶盐作为固体废弃物处置或资源化回收，可实现高盐废水零排放。

(2) 优缺点：优点为处理效果彻底，可实现高盐废水的全量回收，无二次污染；缺点是能耗极高，设备投资与运行成本昂贵，仅适用于小规模高盐废水处理，大规模应用经济性较差。

(3) 实用化现状：主要应用于环保要求严格、水资源极度短缺的地区，在电力、化工行业的零排放项目中偶有试点。某化工园区采用 MVR 蒸发结晶技术处理冷却塔浓水，冷凝水回用率达 95%，但能耗成本占处理费用的 65% 以上，限制了其规模化推广。

2.5 物理防垢与水质稳定技术

(1) 工作原理：不属于直接回收技术，通过电磁除垢、超声波等物理手段，或新型非磷型阻垢剂，替代传统化学药剂，控制循环水结垢、腐蚀与微生物滋生，提升水质稳定性，为各类水分回收技术的高效运行创造适配条件。

(2) 优缺点：优点为无药剂残留，降低后续水处理难度，运行成本较低，对环境友好；缺点是物理技术适配性有限，对高硬度水质处理效果不佳，新型药剂研发成本较高。

(3) 实用化现状：电磁除垢技术在部分企业得到应用，可实现无药剂运行，减少排污量，使浓缩倍数提升至 10 倍以上；非磷型阻垢剂在保证阻垢率 $\geq 90\%$ 的同时，可降低 40% 药剂成本，逐步替代传统磷系药剂。

2.6 水蒸气冷凝回收技术

(1) 工作原理：聚焦冷却塔排出水蒸气（羽雾）中的蒸发损失回收，填补传统技术短板，核心分为两类工艺。一是间接换热消雾回收工艺，改造换热模式为间接换热，搭配特制消雾填料与智能温控系统，减少水蒸气蒸发并捕获羽雾，回收水分回流循环系统；二是旋流造涡冷凝分离工艺，通过导流片构建强旋流场，利用离心力、惯性力促使微小液滴聚并，经壁面液膜收集与重力导流完成回收，形成闭环流程。

(2) 优缺点：优点为回收对象直击占比 80% 以上的蒸发损失，节水潜力显著，收水率可达 55% 以上，部分工况突破 60%；旋流造涡工艺采用耐磨抗老化复合材料，适配高温、腐蚀等复杂工况，维护周期延长至 3 年以上，较传统设备维护成本降低 60%~70%；间接换热工艺可实现开式、闭式工况切换，适配不同季节运行需求。缺点是初始改造投资高于传统收水器，旋流造涡系统对导流角度、通道参数设计精度要求高；低温工况下需配套防结冰装置，避免设备损坏影响回收效率。

(3) 实用化现状：该技术在石化、火电行业已形成成熟应用案例，成为高耗水企业节水改造的优选方案。沧州炼化对 3 座冷却塔实施间接换热消雾改造，通过更换配水系统、增设消雾填料及智能控制系统，实现羽雾完全消除，年节水达 3 万 t，彻底解决了雾气锈蚀周边设备的隐患。某大型石化企业采用旋流造涡系统改造后，单厂年节水量达 50 万方，按工业用水成本 3 元/方计算，年节约水费 150 万元，且 3 年无明显设备老化变形。在火电领域，某运行 18 年的机组冷却塔改造后，年节水 20 万 t，发电水耗率降至 $2.16\text{kg/kW}\cdot\text{h}$ ，低于国家定额标准。目前该技术在中小企业的推广仍受投资成本制约，但随着复合材料与智能控制技术升级，成本逐步下降，适配性持续提升。

3 冷却塔水分回收技术发展展望

3.1 多技术协同集成，提升综合回收效率

未来，单一技术的局限性将逐步凸显，多技术协同集成成为发展主流。例如，将闭式循环技术与膜分离技术结合，实现源头减损与排污净化的双重目标；或构建“高效收水器+水蒸气冷凝回收+物理防垢+智能控制”组合方案，兼顾风吹损失与蒸发损失回收，同步保障水质稳定与能耗优化。已有研究通过人工湿地、纳滤、电化学氧化与反渗透的组合处理链，成功实现冷却塔排水回用并降低淡水足迹^[13]，为多技术协同提供了实践参考。某试点项目采用热-质-化协同处理技术，使水循环率提升至 93%，COD 排放降低 88%，综合能耗仅增加 12%，展现出良好的应用前景。

3.2 智能化与数字化升级，优化系统运行

依托物联网、大数据与人工智能技术，构建智能化水分回收系统，实时监测水温、流量、电导率、浊度等参数，通过算法预测结垢倾向、膜污染程度，自动调节药剂投加量、设备运行状态，实现动态优化运行。例如，基于 PLC 的闭环控制系统可使系统适应水质波动的能力提高至 $\pm 5\%$ ，减少人工干预，降低运行成本。同时，通过数字化建模优化系统集成设计，提升回收设备与原有冷却系统

的适配性,避免影响核心生产流程。

3.3 低能耗技术研发,破解成本瓶颈

降低能耗与运行成本是技术规模化推广的核心瓶颈。一方面,研发高效低耗膜材料与膜组件,提升抗污染能力与使用寿命,降低膜更换成本;另一方面,优化蒸发结晶技术能耗结构,结合余热回收技术,利用工业废热驱动蒸发过程,减少能源消耗。同时,开发低成本物理处理技术与适配高硬度水质的药剂,提升技术性价比,满足中小企业的应用需求。

3.4 资源化与零排放融合,推动绿色发展

随着“双碳”目标推进,冷却塔水分回收将逐步与资源化、零排放需求深度融合。通过优化蒸发结晶技术,实现结晶盐的资源化回收,减少固体废物排放量;将回收水与再生水、雨水等非常规水源协同利用,构建多元化供水体系。同时,开发适用于极端工况(低温、高温高湿)的回收技术与设备,提升技术的环境适应性,推动零排放技术在更多行业的落地应用。

3.5 政策引导与标准完善,强化推广保障

政府需进一步完善工业节水政策与标准体系,加大对冷却塔水分回收技术改造的补贴力度,建立节水效益评价机制,引导企业主动开展技术升级。同时,制定统一的回收水质标准与设备技术规范,规范行业市场,避免劣质设备与技术的无序竞争。通过政策引导与市场驱动相结合,加速技术的产业化推广,助力工业领域实现水资源高效利用与绿色低碳发展。

4 结论

冷却塔水分回收是工业节水减排的重要路径,但其发展受水质复杂、成本高昂、工况适配性差等难点制约。目前,高效收水器、闭式循环、膜分离、蒸发结晶、物理防垢及水蒸气冷凝回收等技术各有优劣,在不同行业场景中形成差异化应用格局,尚未形成普适性强、性价比高的主流技术方案。其中,水蒸气冷凝回收技术针对性解决蒸发损失回收难题,节水潜力突出,已在石化、火电行业展现良好应用效果。未来,需聚焦多技术协同集成、智能化升级、低能耗研发与资源化利用,通过技术创新破解核心瓶颈,同时依托政策引导与标准完善,推动冷却塔水分回收技术向高效、节能、环保、低成本方向发展,为工业绿色转型提供有力支撑。

课题项目:横向课题“火力发电厂冷却塔蒸发水热回收”,课题编号:GYH-NH-2025-ST-002。

[参考文献]

[1]田路泞,韩哲楠,董勇,等.燃煤电厂湿烟气余热及水分回

收技术研究[J].洁净煤技术,2017,23(5):105-110.

[2]许全坤,汪洋.基于膜分离方法的烟气水分回收技术研究现状及展望[J].华电技术,2013,35(5):25-28.

[3]张言格.中空纤维膜法回收烟气中水蒸气的性能研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[4]陈海平,冯义钧,杨博然,等.陶瓷膜组件回收烟气水分及余热性能实验研究[J].热力发电,2019,48(2):45-52.

[5]甘露,毛霖,李红飞,等.燃煤烟气水分回收技术概述[J].资源节约与环保,2017(8):24-25.

[6]Smith J. Energy Consumption in Industrial Cooling Systems[J]. Journal of Energy Engineering, 2005, 131(2): 87-95.

[7]Lee B. Corrosion and Fouling in Flue Gas Desulfurization Systems[J]. Power Engineering, 2010, 114(8): 62-68.

[8]Lucas M, Martínez P J, Viedma A. Experimental determination of drift loss from a cooling tower with different drift eliminators using the chemical balance method[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(6): 1779-1788.

[9]Ru-qing L, Feng-zhong S, You-liang C, et al. Discussion of Technologies on Water-saving of Counter-flow Wet Cooling Tower[J]. In Power System Engineering, 2007(6): 47-48.

[10]Tang C, Zhang C, He D, et al. Research on Gravity Energy Saving Reconstruction Technology of Circulating Cooling Water in Mechanical Ventilation Cooling Tower of a Steel Plant[J]. Energies, 2023, 16(17): 6274.

[11]Ran S. Review on research of water saving for natural ventilation cooling tower[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 283(1020): 1-8.

[12]Nurrohmah, Albeirutty M H, Almisbahi H, et al. Development and evaluation of a hybrid membrane condenser for water recovery from cooling tower plume[J]. Separation and Purification Technology, 2025(354): 128815.

[13]Wagner T, Saha P, Bruning H, et al. Lowering the fresh water footprint of cooling towers: A treatment-train for the reuse of discharged water consisting of constructed wetlands, nanofiltration, electrochemical oxidation and reverse osmosis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022(364): 132667.

作者简介: 负延滨(1970.12—), 毕业院校: 北京化工大学, 所学专业: 化学工程, 当前就职单位: 北京林业大学, 职称级别: 教授。

可再生能源开发利用中的生态环境保护问题研究

葛怀鹏 徐忠友 宁志平

华能威海发电有限责任公司, 山东 威海 264200

[摘要]随着全球能源结构的绿色转型,可再生能源开发在减碳方面有着不可替代的功效,但是在资源开发、运营建设过程中呈现出的生态负效应越来越突出。文中将从风电、光伏、水电等可再生能源的开发利用进行分析,将其与生态环境保护问题联动,重点探讨项目选址,对生物多样性、土地用地以及植被退化等方面,关注水土流失以及电网接入导致的景观破碎化问题。文中将分析单一开发模式所忽视的生态承载力和系统恢复力。为防止局部生态服务功能下降,提出“生态优先、全周期监管”的应对思路,将环境承载力前置,在项目的规划阶段,则重点解决方案(NbS),通过构建景观生态廊道、推行光伏复合利用及数字化生态补偿机制,实现能源开发与生态修复的有机耦合。最终文章中将研究可再生能源与生态安全保护的合理路径,为推动我国能源电力工业与生态文明建设协调高质量发展提供理论依据。

[关键词]可再生能源开发;生态环境保护;生态平衡;生态修复

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19385

中图分类号: F426

文献标识码: A

Research on Ecological Environment Protection Issues in the Development and Utilization of Renewable Energy

GE Huaipeng, XU Zhongyou, NING Zhiping

Huaneng Weihai Power Generation Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264200, China

Abstract: With the green transformation of the global energy structure, the development of renewable energy has an irreplaceable effect in reducing carbon emissions. However, the ecological negative effects in resource development, operation and construction are becoming increasingly prominent. The article will analyze the development and utilization of renewable energy sources such as wind power, photovoltaics, and hydropower, and link them with environmental and ecological protection issues. The focus will be on project site selection, biodiversity, land use, and vegetation degradation. Attention will be paid to soil erosion and landscape fragmentation caused by grid access. The article will analyze the ecological carrying capacity and system resilience overlooked by a single development model. To prevent the decline of local ecological service functions, a response strategy of "ecological priority and full cycle supervision" is proposed, which prioritizes environmental carrying capacity. In the planning stage of the project, the key solution (NbS) is to construct landscape ecological corridors, promote photovoltaic composite utilization and digital ecological compensation mechanisms, and achieve the organic coupling of energy development and ecological restoration. The final article will study the reasonable path of renewable energy and ecological security protection, providing theoretical basis for promoting the coordinated and high-quality development of Chinese energy and power industry and ecological civilization construction.

Keywords: renewable energy development; ecological environment protection; ecological equilibrium; ecological restoration

引言

从当下的全球角度考虑,一方面气候变暖带来诸多压力,另一方面,“双碳”目标当加速实现,为了解决好这些问题,大力发展风能、太阳能等可再生资源已经成为新型能源体系的重要结构,也是必然选择^[1]。然而随着能源项目的扩张,山区、荒漠等生态脆弱区域的能源与自然保护问题更加棘手,在能源转型和生态保护之间搭建桥梁,

优化策略是必然之举。当前大规模设备的安装以及复杂的输电工程,以及长达数年的运营周期,这些都会使得土地利用结构遭到改变,同时还会对局部的生物栖息地、水文环境、生态环境造成高层次的困扰^[2]。故而我们必须在保障能源供应的同时遏制过度开发、过度破坏。由此可见,破解“绿色能源”带来的“生态代价”难题,已成为当前我国生态文明建设中必须正视的重大战略课题。

1 可再生能源开发的生态风险现状

1.1 土地占用

在可再生能源大规模开发的过程中,土地利用方式已经发生了巨大改变,而这也是引发生态风险的源头。从实际情况来看,随着光伏电站、风电站,从平原区域向荒漠、戈壁山地等地区的延伸跟转移,这些都会使得原生态的植被遭受大面积的破坏,同时地表表层也会受到扰动^[3]。以光伏电站为例,在长期的板下遮阴、清洗作业后,则会对局部微气候条件造成影响,也会导致土壤水分蒸发下降,地表径流模式的改变。在长期的运行过程中会加剧土地荒漠化,还会导致生物结皮退化。这种“空间排他性”开发模式不仅挤压了自然生态系统的生产空间,也会导致本就容易破碎的生态环境,难以有较强的自我保护能力和自我修复能力^[4]。在相对脆弱的生态屏障环境面前,气候的变化无疑是沉重的一击,对生态的破坏也是短期难以复原的。

1.2 生物干扰

生物多样性受损也是当前可再生能源开发过程中的显著问题,并具有持久的干扰性。例如在风电机组的叶片旋转过程中,会对飞禽以及猛禽造成严重的威胁,使其发生碰撞^[5]。而且在风机运行的过程中会产生电磁辐射和低频噪音,这些问题应当得到重视。改变动物听觉感知和生境利用模式,会导致该区域的物种丰富度和种群数量同步下降。此外,光伏阵列的广泛覆盖,也会对地表生物造成物理隔绝,阻断了野生动物日常的迁徙,也破坏了在特定区域内的基因交流,甚至会导致部分种群会由于栖息地的丧失而陷入孤岛化的泥潭中。这种由基础设施带来的“类永久性”干扰,已经超过了局部植被自我恢复的范畴,而且会对区域生态结构的稳定性造成不可逆的负面影响,使其功能多样性逐步丧失^[6]。

1.3 水土流失

户流失是一项老生常谈的问题,特别是在工程建设以及运营维护期间,它的危害容易被隐藏。在丘陵山地建设风电场时会由于修建交通运输道路,开挖山体以及修葺弃渣场,造成地表植被的裸露,同时,由于该区域地形坡度大,容易将水集中汇聚,这就会导致降雨期出现严重的水土流失,还会增加滑坡隐患。同时,在干旱和干旱地区建造大型的光伏发电基地,在前期,若是缺乏科学的土地改良和植被覆盖,也会导致表土在强风的作用下被风力侵蚀,导致表层土壤流失,甚至出现养分的贫瘠化。当水土资源流失后也会加剧施工地区的生态问题,生产的泥沙会随着雨水进入周边区域,也会对下游的水质,特别是湿地生态系统造成二次污染,形成从山体到流域的复合型生态

冲击,对区域生态环境的可持续管理提出了严峻挑战。

2 生态保护的瓶颈与制约因素

2.1 顶层规划与生态红线衔接不足

当前能源开发规划往往以“能源保供”为核心逻辑,优先考虑资源禀赋与消纳能力,然而很多时期,生态保护红线、自然保护区的边界以及生物多样性廊道的空间避让往往具有滞后性,这些问题在尚未解决的时候,已经完成了选址决策。能源规划与国土空间规划之间存在着明显的信息不对称以及响应滞后,这就会导致不少项目在建设初期就触碰了生态底线,出现了先开发后修复的被动局面^[7],故而,难以从源头上实现生态安全空间与能源发展空间的最优匹配。

2.2 生态评价标准与全生命周期监管缺失

现行的环境影响评价机制在针对可再生能源的特殊性上存在短板。一方面,环境评价指标更多地关注施工期的污染防治,这对于运营期 20 年的累积性生态影响,缺乏细致的评估^[8]。另一方面针对光伏、风电等新能源设备的生态补偿技术尚未完善,缺乏有力的约束和量化的补偿。这就会导致生态修复流于形式,并未得到闭环监管与考核。

2.3 生态协同技术研发滞后与补偿机制单一

目前,能源开发企业在提升生态友好型技术研发方面的投入仍然较为欠缺。注重研发效率,忽视生态已经成为行业的惯性。同时在现有的生态补偿机制上看,主要依赖于行政性资金的投入,且缺乏市场化的生态权益交易制度,这就会导致生态恢复成本较高。导致很多企业在后期生态修复过程中面临资金缺口这一直观问题,同时也缺乏技术指导,这就会导致恢复目标难以实现,并难以构建可持续发展的行业生态圈。

3 生态友好型开发策略

3.1 基于生态敏感度分级的空间布局优化

落实 NbS 的核心在于“避让优先”。在开发前期应当建立高精度的区域生态评估体系,通过遥感监控以及大数据分析,明确物种分布情况,识别生物多样性。同时还应当对重要湿地区域性动物的迁徙廊道进行避让,将其划定为“禁建区”或“限制区”^[9]。通过对空间叠图的分析,需要将能源项目放置在生态稳定性较强的戈壁区域,或者废弃的工业用地,以及已经严重受损的矿山修复区,这样能够减少对原生自然系统的物理破坏及功能切割,从而确保能源布局与自然生态空间的和谐共生。

3.2 融合生态功能修复的工程设计方案

NbS 倡导利用生态系统自身的能力来解决环境压力。

在工程设计过程中,应当推行生态友好型基础设施的建立,如在风电场的设计过程中,可以采用低扰动建设技术,尽可能保护地表植被的完整性。在光伏阵列布置过程中,也可以结合“光伏+”模式,通过科学的板间距设计及阵列高度设计,保留地表植被的生长空间,同时还可以利用光伏板的遮阴效应来改善干旱地区的微气候^[10]。这对促进退化草原的自然恢复有帮助。此外,配套建设人工通道和生物通道能够将人工结构与生态景观相嵌入相结合,这也能弱化工业施工对野生动植物行为的阻挡。

3.3 全生命周期的动态生态监测与适应性管理

基于 NbS 的策略需具备动态适应性。项目开发不应止于建设,而应建立“监测-反馈-优化”的闭环机制。通过部署环境监测传感器,能够感知光伏区域风机周边的土壤水分变化以及生物多样性变化。同时,若在监测过程中已经发现了负面的生态反馈,也应当启动应急管理机制,调整植被被覆盖的品种以及优化风机运行的时间,应当注意避开候鸟迁徙的高峰期^[11]。这种更加精细的且积极主动的管理模式,能够将开发过程中的不确定性进行优化和转化,为生态治理的调节提供了科学方案,也有助于提升能源基地的生态韧性,不失为有效方法。

4 数字化全周期监管与生态补偿机制: 构建智慧监测体系

构建数字化全周期监管体系是实现可再生能源生态治理精细化的核心支点。首先,应依托“空-天-地”一体化监测技术,要建立覆盖规划、建设运行退役全生命周期的数字平台,通过卫星遥感定向系统来扫描周边地表环境的变化。特别是在部署风机和光伏阵列之间可以利用互联网传感器网络抓取水土流失情况、土壤湿度以及鸟类活动迁徙路径等^[12],通过对这些数据的统一分析和综合讨论,结合 AI 算法的优势,对干扰强度进行识别和预警,这样能够将生态保护转化为可量化为具有可追溯的指标管理体系。同时,这一举措也能够降低人工核查的频率,有助于发挥数据管理的优势,突破反馈滞后的困境,为生态监管提供精准的决策支持。

4.1 数字化监管与生态资产量化

构建智慧监测体系的关键,在于将生态系统的服务功能转化为可视化的资产价值,在大模型数据评估之后,能够为项目的建设提供更多的参考^[13]。特别是在生物多样性损失以及生态系统服务价值变化上,这能为生态环境保护提供更科学的依据,也为生态补偿提供了更有利的方式。

4.2 市场化生态补偿与责任闭环

智慧监测不仅是监管工具,更是市场化补偿的“计费表”。利用区块链技术构建不可篡改的生态环境数据记录,能够将企业的生态影响及生态补偿义务挂钩起来。探索可量化的补偿模式,应当坚守“谁开发、谁修复,谁破坏、谁补偿”的量原则^[14],通过这一原则的设立,要鼓励企业在实现碳减排的过程中,通过投资生态修复项目获得生态积分。使企业被动的环境责任变为主动创造环境价值,最终构建起以数据驱动、责任闭环为特征的可持续监管与激励生态圈。

5 结论: 推动能源与生态协调发展的路径展望

5.1 构建“能源-生态”双赢的协同治理框架

展望未来,可再生能源的持续发展道路必须超越减排优先的逻辑,并且能够通过管理制度的优化,迈向能源转型与生态保护深度融合的“双赢”格局。该路径的核心在于在规划的伊始就确立生态优先的刚性原则。同时,将空间避让作为底线进行约束,要基于自然的解决方案调整开发建设等一系列工作。通过政府引导、市场驱动与技术支持的有机结合,推动能源开发从粗放型向集约型转变。我们不仅要通过数字化监测手段,量化企业作业对生态影响的数据分析,还应当完善法律法规体系,明确企业的全生命周期责任。要明确能源保护建设不仅仅是碳中和的驱动力,也是生态修复系统的参与者。要实现能源安全、生态安全的功能与价值的高度统一。

5.2 创新生态价值实现机制的产业路径

推动能源与生态的协调发展,关键在于激发内生动力,将生态保护成本转化为产业价值收益。未来的重点路径应聚焦于两方面:一方面要深化生态产品价值实现机制,利用生物多样性等补偿市场化的手段,对企业的生态修复行为予以经济属性,使“绿水青山”的保护能够产生真实的经济回报,从根本上解决生态补偿资金不足或不到位的瓶颈。二是强化跨学科融合创新,要加速开发低干扰的新能源建设设施,加大环境融合的力度,同时可以通过“智慧能源+生态恢复”的创新驱动模式,重塑传统能源开发范式。

总的来说,持续的政策鼓励和技术的迭代,能够构建一套由数据驱动决策、机制保障落实,技术支撑效果的能源生态共同体,这为广袤的土地上绘制出一幅“能源基地、生态绿洲”和谐共生的未来画卷。

[参考文献]

[1]杨尊尊.可再生能源的应用与环境保护的双重效益[J].

花炮科技与市场,2026,33(1):145-147.

[2]徐静,黄谨,李湘峰,等.支撑“十五五”可再生能源发展的土地要素保障关键问题及路径研究[J].水力发电,2026,03(30):1-5.

[3]张华山,黄海偲,徐静,等.可再生能源发展与国土空间规划协调研究[J].水力发电,2026,03(30):1-6.

[4]韩梦瑶,朱沛浩,何则.碳中和背景下清洁能源开发的生态环境规制及冲突困境纾解[J].世界地理研究,2026,35(3):166-181.

[5]韩可望.新时代能源安全的理性认知与法律体系完善[J].上海节能,2025(2):152-159.

[6]孙朋元,江志兵,陈友淦,等.生态环境友好型的海上可再生能源技术发展前瞻[J].中国科学:技术科学,2025,55(3):423-441.

[7]蒋雨馨.可再生能源用地与生态保护法律制度的矛盾与调和——基于国土空间规划体系的视角[J].中外能源,2024,29(12):7-12.

[8]张慧.山西可再生能源发展生态环境制约对策分析[J].山西水土保持科技,2024(2):3-5.

[9]宁天琦.论“双碳”目标下能源法的秩序价值及其实现[J].江苏大学学报(社会科学版),2023,25(5):46-59.

[10]刘明明.“双碳”目标下可再生能源发展规划实施的用地困境及其纾解[J].中国人口·资源与环境,2022,32(12):21-30.

[11]张金晓.我国可再生能源市场化发展的制度检视与完善进路——以《能源法》为背景[J].生态文明研究,2026(1):132-150.

[12]邴强.高速公路路域综合能源开发利用模式与减碳路径研究[J].交通节能与环保,2026,22(1):250-253.

[13]张锐,王强.全球南方国家的公正能源转型探索与挑战——以南非为例[J].中国石油大学学报(社会科学版),2025,41(6):76-86.

[14]潘紫燕,高翰之,周东林.可再生能源发展对碳排放的影响——基于 61 个国家的实证研究[J].价格月刊,2026(1):1-11.

作者简介:葛怀鹏(1986.9—),毕业院校:山东科技大学,所学专业:热能与动力工程,当前就职单位:华能威海发电有限责任公司,职务:值长,职称级别:工程师。

靶向肠道生物活性细菌纳米复合体的构建策略与功能机制研究进展

蓝春梅 陈宴希 姜红辛 冯颖 莫婷婷 黄诗言 廖艳娟*

广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西 南宁 530005

[摘要]肠道菌群与人体健康密切相关, 其失衡与多种疾病的发生发展紧密相连。利用纳米技术构建能够靶向肠道特定细菌的生物活性纳米复合体, 为精准调控菌群组成和功能、治疗相关疾病提供了极具前景的创新策略。本文系统综述了该领域的核心构建策略, 重点阐述了靶向配体设计、纳米载体选择、生物活性物质负载及响应性释放机制等方面的最新研究进展。在此基础上, 深入解析了此类纳米复合体与肠道细菌相互作用的功能机制, 包括特异性识别与黏附、生物膜穿透、细菌代谢途径调控以及宿主免疫系统调节等。最后, 本文探讨了该技术在临床转化中面临的挑战, 如体内稳定性、长期安全性及规模化制备等, 并展望了其未来发展方向, 旨在为开发下一代基于肠道微生态的精准干预工具提供理论参考与思路。

[关键词]肠道菌群; 纳米复合体; 靶向递送; 构建策略; 功能机制; 精准调控

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19387

中图分类号: R749.4

文献标识码: A

Research Progress on the Construction Strategy and Functional Mechanism of Targeted Intestinal Bioactive Bacterial Nanocomposites

LAN Chunmei, CHEN Yanxi, JIANG Hongxin, FENG Ying, MO Tingting, HUANG Shiyan, LIAO Yanjuan*

College of Marine and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530005, China

Abstract: The gut microbiota is closely related to human health, and its imbalance is closely linked to the occurrence and development of various diseases. The use of nanotechnology to construct bioactive nanocomposites that can target specific bacteria in the gut provides a highly promising innovative strategy for precise regulation of microbiota composition and function, as well as treatment of related diseases. This article systematically reviews the core construction strategies in this field, with a focus on the latest research progress in targeted ligand design, nanocarrier selection, loading of bioactive substances, and responsive release mechanisms. On this basis, the functional mechanisms of the interaction between such nanocomposites and intestinal bacteria were deeply analyzed, including specific recognition and adhesion, biofilm penetration, regulation of bacterial metabolic pathways, and host immune system regulation. Finally, this article explores the challenges faced by this technology in clinical translation, such as in vivo stability, long-term safety, and large-scale preparation, and looks forward to its future development direction, aiming to provide theoretical references and ideas for the development of the next generation of precise intervention tools based on gut microbiota.

Keywords: gut microbiota; nanocomposites; targeted delivery; building strategies; functional mechanism; precise regulation

引言

肠道是一个极其复杂的微生态系统, 其内部定植着数量庞大、种类繁多的微生物群落, 统称为肠道菌群。这些微生物与宿主之间形成了共生、互生或拮抗的复杂关系, 深刻影响着宿主的生理稳态与病理进程。大量研究表明, 肠道菌群的组成和功能与宿主健康密切相关, 其失调与多种疾病的发生发展存在关联。例如, 肠道菌群参与物质与能量代谢, 促进免疫系统发育成熟, 并形成黏膜屏障以抵御病原体侵袭^[1]。在炎症性肠病和结直肠癌等疾病中, 肠道细菌可通过信号传导影响黏膜细胞(包括上皮细胞和免

疫细胞)的线粒体功能, 从而改变线粒体代谢、激活免疫细胞、诱导炎症小体信号并影响上皮屏障功能^[2]。此外, 肠道菌群失衡也被证实与非酒精性脂肪肝病^[3]、胆结石形成^[4]阿尔茨海默病^[5]缺血性脑卒中^[6]及帕金森病^[7]多种疾病的病理生理机制相关。这些关联揭示了肠道菌群在维持宿主健康中的核心地位, 也凸显了对其进行精准调控的潜在治疗价值。

然而, 传统上用于干预肠道菌群的手段, 如口服益生菌或使用抗生素, 存在显著的局限性。益生菌的靶向性差, 在穿越胃肠道恶劣环境(如胃酸、胆汁盐)时活性易受损,

且其定植效率受宿主原有菌群状态影响较大。而广谱抗生素虽然能清除病原菌,但会无差别地破坏菌群多样性,可能导致长期生态失调,甚至促进耐药菌的产生^[4]。例如,抗生素的使用已被探讨与阿尔茨海默病的潜在关联,因其可能通过改变肠道菌群组成而影响大脑活动^[4]。因此,亟需发展一种能够实现时空特异性、剂量可控且对菌群平衡扰动更小的新型调控策略。

近年来,纳米技术与合成生物学、微生物学的交叉融合,为这一挑战提供了全新的解决方案,催生了“纳米-细菌”复合体这一新兴前沿领域。通过理性设计和构建,将具有特定生物活性的纳米材料与靶向元件相结合,可以创造出能够精准识别并作用于肠道内特定细菌的功能性纳米复合体。这类策略的核心优势在于其高度的可设计性。纳米载体能够有效保护包裹的活性成分(如抗菌肽、益生元、基因编辑工具等),使其免受胃肠道降解,提高生物利用度^[7]。更重要的是,通过对纳米颗粒表面进行功能化修饰,例如连接特定的抗体、适配体或碳水化合物配体,可以实现对有益菌或有害菌的特异性识别与结合^[8]。此外,这些纳米复合体还可以被设计成具有环境响应性(如 pH、酶、氧化还原响应),使其仅在目标部位或特定条件下释放载荷,从而实现肠道菌群调控的精准时空控制。

本文旨在系统梳理靶向肠道生物活性细菌的纳米复合体的最新构建策略,并深入剖析其与肠道细菌相互作用背后所涉及的功能机制。通过总结该领域的研究进展,我们期望为未来开发更高效、更安全的肠道菌群调控工具提供清晰的框架和思路,并推动相关基础研究向临床转化迈进。

1 靶向肠道细菌纳米复合体的核心构建策略

1.1 特异性靶向配体的设计与偶联

靶向配体是赋予纳米复合体识别特定肠道细菌能力的关键元件。这些配体主要包括抗体片段、适配体、噬菌体展示肽以及能够与细菌表面特定受体结合的碳水化合物或代谢物^[9]。例如,针对特定细菌(如病原菌大肠杆菌或益生菌乳杆菌)的表面抗原,可以通过计算模拟与实验筛选相结合的方法,设计出高亲和力与高特异性的配体。在偶联策略上,化学共价连接(如点击化学)和物理吸附是常用的方法,其核心在于平衡偶联效率、配体生物活性的保持以及纳米颗粒的整体稳定性。为了减少空间位阻并提高靶向效率,常使用聚乙二醇(PEG)等分子作为间隔臂,这有助于配体更有效地与目标细菌表面结合。通过这种精心的设计与偶联,纳米复合体能够实现目标细菌群体的空间选择性捕获与相互作用^[9]。

1.2 纳米载体的选择与功能化修饰

纳米载体的选择是构建高效递送系统的基石,其类型取决于所需负载的生物活性物质的性质。常用的载体包括聚合物纳米粒(如 PLGA)、脂质体、壳聚糖纳米粒以及金属有机框架(MOFs)等。例如,PLGA 纳米粒因其良好的生物相容性和可控的降解特性,被广泛用于抗生素(如美罗培南)的递送。功能化修饰旨在赋予纳米载体额外的特性,以应对肠道复杂的生理环境。这包括通过表面修饰 pH 敏感或酶敏感的聚合物,使纳米复合体能够在肠道特定 pH 值或细菌特异性酶(如蛋白酶、DNase)的作用下解离并释放内容物。此外,使用黏附性材料(如壳聚糖)对载体表面进行修饰,可以延长其在肠道黏膜的滞留时间,从而增强与目标细菌的接触机会。这些修饰策略共同提升了纳米复合体在肠道环境中的稳定性、渗透性和靶向性。

1.3 生物活性物质的负载与保护策略

纳米复合体负载的生物活性物质种类繁多,包括小分子抗生素、核酸(如用于基因编辑的 CRISPR-Cas 系统)、蛋白质(如细菌素、酶)以及益生菌成分或其代谢产物。有效的负载策略必须解决这些活性成分在制备、储存及体内递送过程中易失活的问题。例如,对于疏水性抗生素,可以将其包封于脂质体的疏水核心或聚合物纳米粒的疏水区域;对于易被核酸酶降解的核酸,则可通过与阳离子聚合物复合形成保护性复合物。将酶(如群体感应信号分子合成酶)封装在具有保护作用的纳米笼或金属有机框架中,也是保护其活性的有效方法。更为先进的是采用多层包覆或核壳结构实现多种活性物质的共递送,例如同时递送抗生素和能够降解生物膜基质的酶,以产生协同抗菌效应。

1.4 刺激响应性释放机制的构建

为实现药物在目标部位的精准控释,纳米复合体常集成对肠道微环境或细菌微环境敏感的“智能”释放机制。这些刺激响应类型包括 pH 响应(利用结肠与胃部 pH 的差异)、酶响应(针对细菌特异性表达的酶,如偶氮还原酶、 β -半乳糖苷酶、蛋白酶)、氧化还原响应(针对炎症部位升高的活性氧水平)以及群体感应分子响应。机制构建依赖于智能材料的设计,例如,使用 pH 敏感的化学键(如乙缩醛键)或酶敏感的肽键/酯键作为连接子或构成载体的部分。当纳米复合体到达目标肠道区域或被特定细菌内化后,这些化学键在特定刺激下断裂,导致载体结构解体并释放包封的生物活性物质。这种按需释放的策略不仅能提高治疗效果,还能最大限度地减少对非靶标肠道菌

群的影响，维持肠道微生态平衡。

2 纳米复合体与肠道细菌相互作用的功能机制

2.1 特异性识别与黏附机制

纳米复合体实现对特定肠道细菌的精准靶向，其核心在于其表面修饰的靶向配体能够与目标细菌表面的特异性受体发生高亲和力结合。这种相互作用类似于自然界中配体-受体的识别过程，是干预措施精准化的第一步。例如，凝集素等配体可以与细菌表面的多糖结构特异性结合，从而实现选择性富集。这种特异性不仅显著提高了纳米复合体在复杂肠道菌群中对目标菌的定位效率，更重要的是，它最大限度地减少了对非目标菌群的“脱靶”效应，这对于维持肠道微生态的平衡至关重要。为了深入量化这种相互作用的动力学参数，如结合常数和解离常数，研究通常需要借助表面等离子共振 (SPR) 和等温滴定量热法 (ITC) 等高灵敏度技术。同时，利用荧光染料标记纳米复合体或细菌表面受体，并通过共聚焦显微镜进行实时观察，可以直观地验证其在细菌表面的定位与结合情况，为优化靶向设计提供直接证据。

2.2 穿透生物膜与细菌内化途径

针对形成生物膜的致病菌，纳米复合体需要具备穿透致密胞外聚合物 (EPS) 屏障的能力。有效的策略包括在纳米复合体中整合能够降解 EPS 关键成分的酶，如 DNA 酶或蛋白酶，以瓦解生物膜的结构。此外，通过精心设计纳米复合体的表面电荷和疏水性，可以促进其在生物膜基质中的扩散和渗透。一旦抵达细菌表面，纳米复合体的内化途径则取决于其自身的物理化学性质 (如尺寸、表面电荷) 以及目标细菌的种类。可能的机制包括通过膜融合 (例如脂质体类载体)、细菌的内吞作用，或利用细菌特有的物质摄取系统进入胞内。明确具体的内化途径对于优化纳米复合体的设计至关重要，因为它直接关系到所负载的活性物质 (如抗生素、核酸药物) 能否有效递送至细菌胞内作用靶点，从而提高其胞内生物利用度和治疗效果。

2.3 对细菌代谢与生长的调控机制

纳米复合体进入细菌或作用于其表面后，可通过释放负载的活性物质，直接干扰目标细菌的关键生命过程，实现对其代谢与生长的调控。例如，递送的抗生素可以直接破坏细菌细胞壁的合成或抑制蛋白质的翻译过程；代谢抑制剂则可以阻断细菌对必需营养物 (如氨基酸、糖类) 的摄取或利用途径。此外，纳米复合体还可以递送核酸药物，如小干扰 RNA (siRNA)，以沉默细菌的毒力基因或耐药基因的表达，从而削弱其致病性和生存优势。除了直接杀

伤或抑制，间接调控机制也日益受到重视。例如，纳米复合体可以递送特定的益生元，选择性促进肠道内有益菌 (如乳酸杆菌、双歧杆菌) 的生长，通过竞争性排斥抑制病原菌。另一种策略是递送群体感应抑制剂，干扰细菌间的化学通讯，从而抑制其毒力因子的协同表达和生物膜的形成，这种“去武装”而非“杀死”的策略有助于减轻对菌群结构的冲击。

2.4 免疫调节与菌群-宿主互作的影响

纳米复合体对肠道菌群的调控作用，最终会通过影响菌群-宿主互作来发挥治疗效益。一方面，纳米复合体本身或其释放的成分可以作为免疫调节剂。例如，靶向递送至特定细菌的纳米颗粒可能促进局部抗原提呈，调节肠道黏膜免疫反应；而负载抗炎因子 (如白介素-10) 的纳米复合体则可以直接缓解病原菌感染引起的肠道炎症。另一方面，通过精准调控特定细菌的丰度或功能，纳米复合体能够深刻影响细菌代谢产物的谱系。例如，促进产短链脂肪酸 (如丁酸) 的细菌生长，可以增强肠道上皮屏障功能、调节宿主免疫稳态和全身能量代谢。这些代谢产物作为重要的信号分子，构成了纳米复合体发挥深层治疗作用的桥梁。因此，评估纳米复合体对肠道菌群结构及其代谢功能的影响，是理解其整体疗效和安全性不可或缺的一环。

3 靶向纳米复合体在肠道疾病干预中的应用与评估

3.1 在感染性疾病中的应用：以艰难梭菌感染为例

针对艰难梭菌感染，靶向纳米复合体的设计旨在实现抗生素在病灶部位的特异性富集和释放，从而提高疗效并降低全身副作用。一种策略是构建表面修饰有抗体的纳米载体，以实现对抗原体的特异性识别与结合。例如，利用金黄色葡萄球菌分选酶 A (sortase A) 介导的酶促偶联方法，可以将特异性识别病原体的单链抗体 (scFv) 精确地连接到纳米颗粒表面，这种生物共轭技术能有效保留抗体的生物活性，为构建靶向艰难梭菌的纳米递送系统提供了通用工具。在递送内容物方面，除了传统的抗生素如万古霉素，反义寡核苷酸 (ASO) 作为一种新型治疗策略也展现出潜力。研究表明，基于阳离子 bola 两亲性化合物 (如 DQAsomes) 构建的纳米复合体，能够有效递送靶向艰难梭菌必需基因 (如 *rpoB* 和 *dnaE*) 的磷硫酰化缺口反义寡核苷酸，在体外实验中实现了对艰难梭菌生长的纳摩尔级抑制。功能评估不仅限于体外杀菌效率，还包括在感染模型中修复菌群紊乱的能力。例如，利用聚乙二醇水凝胶纳米颗粒持续释放多聚磷酸盐，可以抑制肠道病原体 (如铜

绿假单胞菌)毒力因子的表达,这种通过调节局部微环境而非直接杀菌的策略,有助于在治疗感染的同时维持肠道菌群稳态。综合评估需结合 16S rRNA 测序分析菌群结构变化,并利用代谢组学等手段综合评价纳米复合体对复发率的降低效果。

3.2 在炎症性肠病 (IBD) 中的应用

在炎症性肠病中,靶向纳米复合体的应用旨在将药物精准递送至肠道炎症部位,以最大化局部疗效并最小化全身暴露。传统策略主要依赖于利用结肠的独特生理特征,如 pH 梯度、转运时间或丰富的微生物菌群,来触发药物释放。例如,基于多糖(如糊精、果胶)与乙基纤维素混合制成的薄膜包衣,能够抵抗上消化道环境,但可被结肠菌群分泌的酶特异性降解,从而实现结肠靶向释药。更先进的策略是直接靶向炎症部位本身。研究表明,炎症靶向水凝胶(IT-hydrogel)由抗坏血酸棕榈酸酯制成,能优先黏附于炎症的结肠上皮表面,负载地塞米松后,通过局部酶解释放药物,在小鼠结肠炎模型中显著减轻炎症,且相比游离药物降低了全身血药浓度。在递送内容物方面,纳米复合体不仅可以递送小分子抗炎药(如 5-氨基水杨酸),还可以递送生物大分子如细胞因子。例如,利用重组格氏链球菌作为递送载体,可在胃肠道黏膜局部分泌具有生物活性的人白介素-1 受体拮抗剂(IL-1ra),并在白细胞介素-2 基因敲除的小鼠溃疡性结肠炎模型中显示出治疗益处。应用评估通常在 DSS 或 TNBS 诱导的结肠炎模型中进行。例如,负载 5-氨基水杨酸的 Nutriose:乙基纤维素包衣微丸,在 TNBS 诱导的大鼠结肠炎模型中,相比市售 Pentasa 微丸,能更有效地降低宏观和微观结肠损伤评分,并显著降低促炎细胞因子(IL-1 β ,TNF)的 mRNA 水平,同时减少药物在全身的代谢暴露。这些评估指标共同证实了靶向纳米复合体在改善疾病活动指数、组织病理学评分及调节局部免疫反应方面的优势。

3.3 在代谢性疾病中的应用

针对肥胖、糖尿病等代谢性疾病,靶向肠道菌群的纳米复合体策略侧重于调节与能量代谢密切相关的特定细菌及其有益代谢产物的水平。设计思路包括递送促进有益菌(如阿克曼氏菌、普拉梭菌)定植或增强其代谢功能的底物。例如,受肠道菌群与宿主细胞间“分子交换”的启发,有研究将菌群代谢产物丁酸盐锚定在聚乙二醇纳米颗粒上。丁酸盐功能化的纳米颗粒能通过特异性结合肠上皮细胞膜上的单羧酸转运蛋白(MCT),显著增强细胞摄取和跨上皮转运,从而改善胰岛素等生物大分子药物的口服吸收,在糖尿病大鼠模型中产生了更强的降血糖反应和更

高的口服生物利用度。这为通过纳米技术递送调节菌群代谢功能的物质提供了新思路。功能评估需要紧密结合代谢表型与分子机制。在动物模型中,需系统考察纳米复合体干预对糖耐量、胰岛素敏感性、体脂积累等关键代谢指标的影响。同时,需要利用 16S rRNA 测序分析肠道菌群结构的变化,并检测短链脂肪酸(如丁酸、乙酸)的水平,以明确纳米复合体是否通过调节菌群组成和代谢功能发挥作用。此外,通过分析宿主结肠组织中的基因表达谱(例如,过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 的激活情况),可以进一步阐明从菌群调节到宿主代谢改善的因果链。例如,在结肠炎模型中,使用菌群敏感的包衣系统递送 5-氨基水杨酸,不仅能减轻炎症,还能激活 PPAR- γ 通路,这提示类似的靶向策略在调节代谢相关通路方面也具有潜力。因此,构建靶向特定代谢相关细菌的纳米复合体,并系统评估其对“菌群-代谢产物-宿主基因表达-代谢表型”这一完整作用链条的影响,是未来该领域的重要研究方向。

4 当前挑战与未来展望

4.1 安全性、长期毒性及免疫原性挑战

尽管靶向肠道生物活性细菌的纳米复合体展现出巨大的治疗潜力,但其安全性、长期毒性及免疫原性仍是临床转化前必须系统评估的核心挑战。首先,纳米材料本身、其靶向配体以及潜在的降解产物可能对宿主细胞、肠道黏膜免疫系统乃至非目标菌群产生未知的生物学影响。例如,一些合成纳米材料在临床前研究中显示出较高的免疫毒性,可能导致治疗失败。因此,必须进行涵盖急性、亚急性和长期暴露的系统性毒性评估,以全面了解其生物相容性。其次,反复使用纳米复合体可能导致机体产生针对纳米载体或其表面配体的特异性免疫应答,产生抗体,这不仅会降低其靶向效率,还可能引发过敏反应等不良事件。为解决这一问题,未来的研究需致力于开发降低免疫原性的策略。例如,采用人源化抗体作为靶向配体,或利用生物膜、细胞膜等天然来源的“隐形”涂层对纳米颗粒进行伪装,以避免免疫系统的识别和清除。这些策略旨在提高纳米复合体的生物安全性,为其临床应用铺平道路。

4.2 肠道复杂微环境下的递送效率瓶颈

肠道作为药物递送的目标场所,其内部环境极为复杂,构成了多重生理屏障,严重制约了纳米复合体的靶向递送效率。肠道的动态蠕动、厚实的黏液层、多样化的消化酶以及密集且竞争激烈的菌群,共同构成了一个极具挑战性的递送环境。这些屏障可能导致纳米复合体在到达目标细菌前就被清除、降解或被非目标菌群竞争性消耗。为了突破这一瓶颈,未来需开发更智能的“逐级响应”递送系统。

这类系统能够依次克服不同的生理障碍：例如，首先设计具有黏液穿透能力的表面特性以穿越黏液层；随后，通过响应肠道内特定酶或 pH 变化释放有效载荷，或利用对特定细菌代谢产物的响应来克服菌群竞争；最终，通过高亲和力的配体-受体相互作用精准定位到目标细菌表面。同时，利用先进的活体成像技术实时追踪纳米复合体在肠道内的分布、滞留和命运，对于优化递送系统设计、验证其靶向效率至关重要。

4.3 个体化与精准化设计的必要性

肠道菌群具有高度的个体间差异性，这种差异受到遗传、饮食、环境及疾病状态等多种因素的影响。因此，一种通用的靶向策略在不同个体中可能效果迥异，甚至无效。未来的发展方向必然是走向个体化与精准化。这需要结合患者个体的肠道菌群测序信息和代谢组学数据，定制个性化的靶向纳米复合体。实现这一愿景面临两大核心任务：一是建立更完善、更精细的细菌表面标志物数据库，明确不同菌株，甚至同一菌株在不同生理或病理状态下的特异性表面抗原；二是开发模块化、可编程的纳米平台。这种平台允许像“搭积木”一样，快速更换不同的靶向配体、载药模块和响应性元件，以便快速适配不同患者的特定致病菌或功能缺失菌株，从而实现真正意义上的精准微生态调控。

4.4 从实验室到临床转化的路径展望

推动靶向细菌的纳米复合体从实验室走向临床，需要解决一系列转化科学问题。首要挑战是建立大规模、符合药品生产质量管理规范（GMP）的标准化制备工艺，并制定统一的质量控制标准，包括纳米颗粒的粒径分布、靶向配体密度、载药量、释放动力学及批次间一致性等关键参数。其次，必须加强微生物学、材料科学、药学和临床医学等多学科的深度融合，开展严谨的临床前药效学和药代动力学研究，全面评估其有效性和安全性。此外，应积极探索纳米复合体技术与现有微生态制剂、活体生物药（LBP）等领域的结合应用。例如，将纳米载体作为益生菌的“装甲”，增强其口服后的存活率和定植能力。或利用细菌来源的囊泡作为天然的低免疫原性纳米平台，装载药物并赋予其固有靶向性。通过跨学科协作和多元化技术融合，有望加速这一前沿技术向临床治疗的转化，为肠道相关疾病的治疗提供全新策略。

5 结论

靶向肠道生物活性细菌的纳米复合体是微生态干预的前沿方向。从概念验证向系统工程与机制驱动研究的范

式转变，其核心是“载体-菌群-宿主”多层互动机制的因果性解析，以及个体化递送效率与长期生物安全性的协同优化。未来发展依赖跨学科深度融合，聚焦精准机制、标准化评价与临床转化三大支柱，以推动该智能治疗体系从实验室走向临床实践。

基金资助：2024 年大学生创新创业训练计划项目国家级项目（项目编号：202410608029X）。

[参考文献]

- [1] Wang Q, Hao C, Yao W, et al. Intestinal flora imbalance affects bile acid metabolism and is associated with gallstone formation[J]. BMC Gastroenterology,2020(20):59.
- [2] Jackson DN, Theiss AL. Gut bacteria signaling to mitochondria in intestinal inflammation and cancer[J]. Gut Microbes,2020(11):285-304.
- [3] Zhang B, Li J, Fu J, et al. Interaction between mucus layer and gut microbiota in non-alcoholic fatty liver disease: Soil and seeds[J]. Chinese Medical Journal,2023(136):1390-400.
- [4] Angelucci F, Cechova K, Amlerova J, et al. Antibiotics, gut microbiota, and alzheimer's disease[J]. Journal of Neuroinflammation,2019(16):108.
- [5] Zhang W, Dong XY, Huang R. Gut microbiota in ischemic stroke: Role of gut bacteria-derived metabolites[J]. Translational Stroke Research,2023(14):811-28.
- [6] Ghosh N, Sinha K, Sil PC. Pesticides and the gut microbiota: Implications for parkinson's disease[J]. Chemical Research in Toxicology,2024(37):1071-85.
- [7] Chen X, Wang B, Mamun AA, et al. Pectin-zein-IPA nanoparticles promote functional recovery and alleviate neuroinflammation after spinal cord injury[J].Journal of Nanobiotechnology,2025(23):152.
- [8] Qi X, Liu Y, Hussein S, et al. The species of gut bacteria associated with antitumor immunity in cancer therapy[J]. Cells,2022(1):11.
- [9] Fernandes R, Luo X, Tsao C-Y, et al. Biological nanofactories facilitate spatially selective capture and manipulation of quorum sensing bacteria in a bioMEMS device[J]. Lab on a Chip,2010(10):1128-34.

作者简介：廖艳娟^{*}，女，壮族，广西，博士，副教授，广西民族大学海洋与生物技术学院。

生物炭作为热敷材料的应用潜力与性能研究

韩丽娜 陈玉芬 郭一泽 吕喆森 孟妍柳铎 张梦玥 王嘉戈 毛宇航 王静*
石家庄科技信息职业学院, 河北 石家庄 050000

[摘要]生物炭具有多孔结构、良好的热稳定性、优异的蓄热保温性能等特性,在热敷材料领域展现出巨大的应用潜力,为推动生物质资源化利用与热敷产品升级换代,系统研究生物炭热敷材料的核心性能,探讨其理疗功能、温度调控、蓄热保温方面的优势,并传统热敷材料进行对比分析,明确生物炭在热敷材料应用中的核心竞争力。同时,对目前应用器件所存在的不足之处进行分析,提出针对性的解决方案,推进生物炭热敷材料的规模化应用,以供参考。

[关键词]生物炭; 热敷材料; 蓄热性能; 远红外辐射; 性能对比

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19388

中图分类号: TS176

文献标识码: A

Research on the Application Potential and Performance of Biochar as a Hot Compress Material

HAN Lina, CHEN Yufen, GUO Yize, LYU Zhemiao, MENG YAN Liushuo, ZHANG Mengyue, WANG Jiage, MAO Yuhang, WANG Jing*
Shijiazhuang Vocational College of Technology & Information, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Biochar has the characteristics of porous structure, good thermal stability, and excellent thermal storage and insulation performance, showing great potential for application in the field of hot compress materials. In order to promote the utilization of biomass resources and upgrade hot compress products, the core performance of biochar hot compress materials is systematically studied, and its advantages in physical therapy, temperature regulation, and thermal storage and insulation are explored. It is compared and analyzed with traditional hot compress materials to clarify the core competitiveness of biochar in the application of hot compress materials. At the same time, analyze the shortcomings of current application devices, propose targeted solutions, and promote the large-scale application of biochar hot compress materials for reference.

Keywords: biochar; hot compress materials; thermal storage performance; far infrared radiation; performance comparison

引言

生物炭作为一种碳质固体材料,在缺氧或厌氧条件下,经高温热解制备而成。其具有多孔结构、高比表面积、良好的热稳定性与蓄热性能。同时还富含多种微量元素与矿物质,因其具有独特的远红外辐射特性,可以为人体带来有效的理疗效果。目前,市场上主流的热敷材料主要分为一次性铁粉类自发热材料、无机非金属类热敷材料、电热类热敷材料三类。而传统的热敷材料属于不可降解材料,在使用完毕后易形成环境垃圾。近年来,在能源存储、土壤改良等领域中生物炭得到了广泛的使用,但在热敷材料领域中尚处于起步阶段。生物炭热敷材料不仅能够高效的蓄热保温,还能通过远红外理疗功能,缓解人体肌肉疲劳,而且,它还具有便携易用的特点,有效解决传统热敷材料的痛点,致力于开发出高效、安全、环保且具有多种功能的新型热敷材料。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

选用苕麻、玉米秸秆、稻壳 3 种常见生物质原料制生物炭,洗净、干燥、粉碎后过 80 目筛备用。试剂包括盐酸(HCl)、氯化锌($ZnCl_2$)等。制备生物炭热敷材料辅助材料有工业级棉纤维、无纺布。传统热敷材料样品含市售铁粉类暖宝宝(型号 XX-1)、陶瓷粉热敷袋(型号 XX-2)、电热丝热敷垫(型号 XX-3)。

1.2 生物炭的制备与改性

原材料预处理:将苕麻、玉米秸秆、稻壳剪成 5mm 左右的长度,分别放入烧杯中,放入沸水中煮 30min,降温后用去离子水洗涤,过滤,随后将之放入真空干燥箱内,在 100℃的条件下干燥 10h,每 3h 抽 1 次真空,真空干燥结束后,关闭真空干燥箱,降温至室温。取出洗涤干燥好的生物质材料保存备用。

采用高温热解法制备生物炭，将预处理后的苕麻、玉米秸秆、稻壳置于管式炉，在氮气（流量 50mL/min）氛围下，加热至 750℃（升温速率为 5℃·min⁻¹）；再加热至 850℃（升温速率为 1℃·min⁻¹），并保持 2h。冷却后粉碎过 100 目筛，得到原始生物炭样品苕麻炭（BC-Z）、秸秆炭（BC-S）、稻壳炭（BC-R）。

采用 ZnCl₂ 活化法制备生物炭，配置 1.0mol·L⁻¹ 的 ZnCl₂ 溶液。将预处理后的苕麻、玉米秸秆、稻壳分置三个烧杯，各加入 1.0mol·L⁻¹ ZnCl₂ 溶液（淹没生物质材料），在 30℃下搅拌 10h，每 3h 进行 10 min 的超声震荡处理，然后将混合物在 100℃下真空干燥 10h（每 3h 抽 1 次真空）。将被 ZnCl₂ 溶液浸泡过的三种生物质在氮气（流量 50mL/min）氛围下，加热至 750℃（升温速率为 5℃·min⁻¹）；再加热至 850℃（升温速率为 1℃·min⁻¹），并保持 2h。自然降温后，用坩埚钳取出制得的制备好的改性生物炭样品，用配置好的 1.0mol·L⁻¹ 盐酸浸泡搅拌 4h，再洗涤至中性。对洗涤后的生物炭样品进行干燥（每 3h 抽 1 次真空）。干燥结束后，分别标号为 M-BC-Z、M-BC-S、M-BC-R。氯化锌活化法可增比表面积与孔隙率，提升蓄热与远红外辐射能力。

1.3 生物炭热敷材料的制备

采用复合成型工艺制备生物炭热敷材料，将改性生物炭与棉纤维按 4:6 质量比混合，封装于透气布袋得样品。

棉纤维的价格相对较低，来源广泛，而改性生物炭的制备可能需要一定的成本。按照 4:6 的质量比混合，可以在保证热敷材料性能的前提下，降低生产成本，提高产品的市场竞争力。这种质量比的热敷材料具有良好的柔韧性和舒适性，适合贴合人体不同部位进行热敷治疗。同时，其重量适中，不会给使用者带来过多的负担。

1.4 性能测试方法

蓄热保温性能测试采用恒温箱-热电偶测试法，将热敷材料样品于 60℃恒温箱加热 30min 达热平衡后，放入 25℃室温环境，用电偶实时监测表面温度变化，通过计算保温时间（从 60℃降至 40℃的时间）与温度下降速率评价蓄热保温性能；对自发热型生物炭热敷材料，用电偶实时监测其在空气中温度变化，记录发热启动时间、最高温度、稳定发热时间（40~50℃维持时间）评价温度调控性能；采用远红外辐射率测试仪（型号：DRT-1000）在 25℃室温与 50℃加热状态下，测试生物炭及传统热敷材料在 8~14μm 波长范围的远红外辐射率并对比；采用皮肤刺激性测试法，将样品贴敷于健康家兔（体重 2.0~2.5kg）背部皮肤（5cm×5cm）24h，观察皮肤反应，同时用 MTT 法检测生物炭提取物对 L929 细胞的毒性（细

胞存活率≥90%表明无明显细胞毒性）评价生物相容性；安全性测试检测材料 pH 值（6.5~7.5）与重金属含量（铅、镉、汞等），环境友好性测试材料在自然环境下 6 个月内的降解率并与传统热敷材料对比。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 与 Origin 软件对实验数据进行整理、分析，计算各项性能指标的平均值与标准。采用 SPSS 软件对实验数据进行显著性分析（P<0.05 为差异显著）。

2 实验结果与分析

2.1 生物炭的基本性能分析

生物炭的基本性能对蓄热保温与远红外辐射性能有着直接影响，表 1 为原始生物炭与改性生物炭的基本性能测试结果。

表 1 原始生物炭与改性生物炭的基本性能测试结果

生物炭样品	比表面积（m ² /g）	孔体积（cm ³ /g）
BC-Z（原始苕麻炭）	972.1	0.480
M-BC-Z（改性苕麻炭）	1329.4	0.731
BC-S（原始玉米秸秆炭）	670.2	0.333
M-BC-S（改性玉米秸秆炭）	1135.1	0.508
BC-R（原始稻壳炭）	667.2	0.269
M-BC-R（改性稻壳炭）	1073.8	0.537

由表 1 可知，三种原始生物炭中，苕麻炭比表面积与孔体积最高，稻壳炭最低，源于苕麻纤维结构致密，热解后多孔结构更发达。ZnCl₂ 活化法制的三种生物炭比表面积与孔体积均提升。这是因为氯化锌可刻蚀生物炭表面，产生更多微孔与介孔，增强吸附与蓄热能力。生物炭孔隙结构是蓄热保温关键，多孔结构能储热、减缓热量传导散失，还为远红外辐射提供更多位点，提升辐射效率。综上，改性苕麻炭基本性能最优，适合作为热敷材料核心原料。

2.2 生物炭热敷材料的蓄热保温性能分析

蓄热保温性能是热敷材料的核心性能之一，直接决定热敷效果的持续时间。表 2 为其蓄热保温性能测试结果。

由表 2 可知，自然冷却下，改性苕麻炭热敷材料蓄热保温性能最优，从 60℃降至 40℃耗时达到 135min、平均温度下降速率仅为 0.148℃/min，显著优于其他热敷材料。

原始苕麻炭热敷材料的保温时间短于改性苕麻炭热敷材料；充分说明改性苕麻炭的多孔结构优势更突出，因改性增大了生物炭比表面积、孔隙率与孔体积，增强蓄热能力。与传统热敷材料相比，改性苕麻炭热敷材料保温优势明显，温度下降更慢，温度下降速率仅为铁粉类暖宝宝的 33.3%、陶瓷粉热敷袋的 28.1%，改性苕麻炭热敷材料无需外接电源、使用安全。

表 2 生物炭热敷材料的蓄热保温性能测试结果

热敷材料类型	从 60℃降至 40℃的时间 (min)	平均温度下降速率 (°C/min)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	135±5.8	0.148±0.007
原始苕麻炭热敷材料 (BC-Z)	100±4.9	0.200±0.011
改性玉米秸秆炭热敷材料 (M-BC-S)	120±5.2	0.167±0.008
改性稻壳炭热敷材料 (M-BC-R)	105±4.7	0.185±0.009
铁粉类暖宝宝	45±3.5	0.444±0.015
陶瓷粉热敷袋	38±3.2	0.526±0.018
电热丝热敷垫 (持续通电)	130±6.1	0.154±0.007

2.3 生物炭热敷材料的温度调控性能分析

由表 3 可知, 改性苕麻炭热敷材料发热启动时间为 2.8min, 虽略长于传统铁粉类暖宝宝, 但最高温度 48.2℃ 处于人体舒适热敷温度范围 (45~50℃), 不会造成低温烫伤。在稳定发热时间上, 该材料达 17.2h, 是传统铁粉类暖宝宝的 2.07 倍, 能满足长时间热敷需求, 且温度波动范围仅 2.1℃, 温度稳定性显著优于传统铁粉类暖宝宝 (5.8℃), 可持续提供稳定热量提升热敷效果。其温度调控性能优异, 是因生物炭的多孔结构控制发热速度与最高温度, 同时其蓄热性能可吸收部分反应热量, 避免温度骤升。

表 3 生物炭热敷材料与传统铁粉类暖宝宝的温度调控性能测试结果

热敷材料类型	发热启动时间 (min)	最高温度 (°C)	稳定发热时间 (40~50℃, h)	温度波动范围 (°C)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	2.8±0.4	48.2±1.1	17.2±0.9	2.1±0.2
传统铁粉类暖宝宝	2±0.3	62.5±1.5	8.3±0.6	5.8±0.5

2.4 生物炭热敷材料的远红外辐射性能分析

8~14μm 波长的远红外线能够穿透人体皮肤表层, 促进血液循环, 具有良好的理疗效果, 见表 4。

表 4 不同热敷材料在室温与加热状态下的远红外辐射率测试结果

热敷材料类型	室温 (25℃) 远红外辐射率 (8~14μm)	加热状态 (50℃) 远红外辐射率 (8~14μm)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	0.905±0.016	0.931±0.013
原始苕麻炭热敷材料 (BC-Z)	0.868±0.014	0.897±0.012
铁粉类暖宝宝	0.623±0.010	0.685±0.009
陶瓷粉热敷袋	0.785±0.012	0.821±0.010
电热丝热敷垫	0.658±0.011	0.712±0.008

由表 4 可知, 无论室温还是加热状态, 生物炭热敷

材料远红外辐射率均高于传统热敷材料 ($P<0.05$)。改性苕麻炭热敷材料在 50℃加热状态下远红外辐射率达 0.931, 接近黑体辐射率 (1.0), 综合理疗效果最优, 这是因为改性处理能够增加生物炭表面的含氧官能团, 而苕麻炭本身的纤维结构更加疏松, 改性后远红外辐射效率更突出。

2.5 生物炭热敷材料的生物相容性、安全性、环境友好性分析

皮肤刺激性测试表明, 改性与原始苕麻炭热敷材料贴敷家兔背部 24h 后皮肤均无刺激性反应, 刺激性等级为 0 级, 具有良好的皮肤相容性; 细胞毒性测试显示二者提取物对 L929 细胞存活率均≥90%, 无明显细胞毒性, 生物相容性好, 这得益于生物炭以碳元素为主且无毒害。安全性测试显示, 改性苕麻炭热敷材料 pH 值接近人体皮肤, 无重金属污染风险, 且与传统热敷材料相比, 无漏电、高温烫伤、有毒有害物质释放风险, 安全性更优。环境友好性测试表明, 改性与原始苕麻炭热敷材料 6 个月内降解率均超 78%, 属可降解材料, 而传统热敷材料降解率低于 10%, 生物炭热敷材料原料可再生, 可实现废弃物资源化利用, 还可自然降解, 制备过程还能固定碳元素助力“双碳”目标, 环境价值高。

3 生物炭与传统热敷材料的综合性能对比

为全面明确生物炭热敷材料的优势, 对生物炭热敷材料与传统热敷材料进行综合对比, 结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 生物炭热敷材料综合性能显著优于传统热敷材料, 其中以改性苕麻炭热敷材料的综合性能最优, 蓄热保温时间更长、无高温烫伤风险、远红外理疗效果更好、环境友好性更强, 虽然成本略高, 但使用寿命更长。与陶瓷粉热敷袋相比, 生物炭热敷材料的蓄热保温性能更优、便携性更强, 远红外辐射率更高。与电热丝热敷垫相比, 生物炭热敷材料无需外接电源、无漏电风险、环境友好性更强, 且成本更低。

表 5 生物炭与传统热敷材料的综合性能对比

性能指标	生物炭热敷材料(改性苧麻炭, M-BC-Z)	铁粉类暖宝宝	陶瓷粉热敷袋	电热丝热敷垫
蓄热保温性能	优秀(保温时间 135min)	较差(保温时间 45min)	差(保温时间 38min)	优秀(持续通电, 保温时间 140min)
温度调控性能	优秀(最高 48.2℃, 稳定 17.2h)	较差(最高 62.5℃, 稳定 8.3h)	一般(需外部加热, 温度波动大)	良好(温度可调, 波动小)
远红外辐射性能	优秀(50℃时辐射率 0.931)	差(50℃时辐射率 0.685)	良好(50℃时辐射率 0.821)	较差(50℃时辐射率 0.712)
生物相容性	优秀(无皮肤刺激, 细胞存活率 97.5%)	一般(部分存在漏粉刺激)	良好(无明显刺激)	一般(可能存在漏电风险)
安全性	优秀(无烫伤、无漏电、无重金属污染)	较差(高温烫伤风险, 部分重金属超标)	良好(无烫伤风险, 无重金属污染)	较差(漏电风险)
环境友好性	优秀(可降解, 降解率 87.6%)	差(难降解, 降解率<10%)	差(难降解, 降解率<10%)	差(难降解, 耗电污染)
便携性	优秀(无需外接电源, 可折叠、贴合性好)	良好(一次性, 便携)	较差(需外部加热, 笨重)	差(需外接电源, 不便携带)
成本(元/片)	中等(2.6~3.1)	低(1.0~1.5)	中等(2.0~2.5)	高(50~100)

4 生物炭热敷材料的应用潜力、现存问题及改进措施

4.1 应用潜力分析

生物炭热敷材料应用广泛, 因蓄热保温、远红外理疗等优势, 可缓解肌肉酸痛、关节不适等问题。其远红外辐射和温度可控性利于术后康复、运动损伤恢复, 生物相容性也满足长期使用需求。无需外接电源、便携且蓄热久, 能为户外人员保暖、为受伤人员缓解疼痛。此外, 在宠物保健、农业等领域也有广阔应用前景。

4.2 现存问题与改进措施

当前, 生物炭热敷材料发展面临诸多挑战, 如制备工艺不完善、成本高且污染大, 复合工艺欠优化、性能稳定性不足, 长期使用多孔结构被破坏, 自发热型发热剂活性降低, 耐水性差, 品牌建设与市场推广不足, 且缺乏统一性能评价标准, 产品质量参差不齐。

针对生物炭热敷材料发展问题, 可从多方面改进推动其产业化。优化制备工艺, 采用新型热解技术、绿色低碳成本改性方法、控制粒度, 并扩大生产规模。通过表面包覆、优化发热剂配方、改进封装工艺、加强市场推广与品牌建设。向高端理疗、智能穿戴、特殊群体定制延伸, 构建完整产业链, 加强原料供给、生产加工、市场销售及废弃物

回收各环节建设。还需加强产学研协同创新, 高校与科研机构攻克关键技术, 实现产业规模化、高质量发展。

5 结论

综上, 采用 $ZnCl_2$ 活化法制备的改性苧麻炭热敷材料综合性能最优, 其核心性能显著优于传统热敷材料, 蓄热保温时间长, 远红外辐射率高且安全环保。在多领域应用潜力大, 但存在制备工艺、成本、市场认知度等问题, 限制产业化应用。可通过优化工艺、提升性能、加强推广等解决现存问题。

[参考文献]

[1]杨海征,袁宗琪,徐晓林,等.低温裂解水稻秸秆生物炭对水体中 Pb/Cd 吸附的应用研究[J].曲靖师范学院学报,2024,43(3):13-23.

[2]戚海洋,魏聂晶,王文静,等.小麦秸秆生物质炭的结构特征及其对 Cr(VI) 的吸附性能研究[J].土壤,2024,56(1):135-142.

[3]谢祖彬,刘琦,许燕萍,等.生物炭研究进展及其研究方向[J].土壤,2011,43(6):857-861.

作者简介:韩丽娜(1987.5—),女,毕业院校:河北科技师范学院,所学专业:无机化学,当前就单位:石家庄科技信息职业学院,职务:专职教师,职称级别:讲师。

光合细菌-纳米复合体调控水产养殖微生态的作用机制与应用效能研究进展

陈宴希¹ 蓝春梅¹ 姜红辛¹ 冯颖¹ 莫婷婷¹ 黄诗言¹ 廖艳娟¹ 陈万林^{2*}

1. 广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西 南宁 530005

2. 博白县新田镇农业服务中心, 广西 玉林 537606

[摘要] 水产养殖业的可持续发展面临养殖环境恶化、动物病害频发等问题的严峻挑战, 亟需开发高效、绿色的微生态调控技术以替代抗生素等传统手段。光合细菌-纳米复合体作为一种新兴的微生态调控剂, 因其能够协同光合细菌的生态功能与纳米材料的独特性能, 在水质改良和动物健康促进方面展现出巨大潜力, 已成为当前研究热点。本文系统综述该领域的最新进展, 首先概述了光合细菌与各类纳米材料构建功能化复合体的主要策略; 其次, 重点阐述了该复合体通过改善水体环境与调控养殖动物肠道菌群平衡的双重作用机制; 最后, 对复合体在实际应用中的效能评估方法、关键影响因素进行了分析, 并展望了其未来的发展方向, 以期开发高效、稳定的水产养殖微生态调控产品提供坚实的理论依据和技术参考。

[关键词] 光合细菌; 纳米材料; 复合体; 水产养殖; 微生态调控

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19386

中图分类号: S9

文献标识码: A

Research Progress on the Mechanism and Application Efficiency of Photosynthetic Bacteria Nanocomposite in Regulating the Microecology of Aquaculture

CHEN Yanxi¹, LAN Chunmei¹, JIANG Hongxin¹, FENG Ying¹, MO Tingting¹, HUANG Shiyan¹, LIAO Yanjuan¹, CHEN Wanlin^{2*}

1. College of Marine and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530005, China

2. Bobai County Xintian Town Agricultural Service Center, Yulin, Guangxi, 537606, China

Abstract: The sustainable development of aquaculture industry is facing severe challenges such as deteriorating aquaculture environment and frequent occurrence of animal diseases. It is urgent to develop efficient and green micro ecological regulation technologies to replace traditional methods such as antibiotics. As an emerging microecological regulator, photosynthetic bacteria nano composites have shown great potential in water quality improvement and animal health promotion due to their ability to synergistically regulate the ecological functions of photosynthetic bacteria and the unique properties of nanomaterials. They have become a current research hotspot. This article provides a systematic review of the latest developments in this field, first outlining the main strategies for constructing functional complexes between photosynthetic bacteria and various nanomaterials; Secondly, the dual mechanism of the complex in improving water environment and regulating the balance of gut microbiota in farmed animals was emphasized; Finally, the effectiveness evaluation methods and key influencing factors of the composite in practical applications were analyzed, and its future development direction was discussed, in order to provide a solid theoretical basis and technical reference for the development of efficient and stable aquaculture microecological regulation products.

Keywords: photosynthetic bacteria; nanometer material; composite; aquaculture; microecological regulation

引言

水产养殖业的集约化发展在提升产量的同时, 也带来了水质恶化、病害频发等严峻挑战, 这使得微生态调控成为实现绿色健康养殖的关键策略。光合细菌作为一类具有光合作用、固氮、脱硫等多重功能的微生物, 在水质净化与益生功能方面展现出巨大潜力。例如, 在受污染的亚穆纳河沉积物中, 光合细菌如沼泽红假单胞菌

(*Rhodopseudomonas Palustris*) 被鉴定为关键的有机物还原菌群, 其存在与水体有机质含量密切相关, 这凸显了其在自然水体修复中的重要作用^[1]。然而, 光合细菌在实际应用中存在定植能力弱、环境抗逆性差等局限性, 限制了其效能的稳定发挥。

纳米技术的兴起为解决这些问题提供了新思路。通过构建光合细菌-纳米复合体, 可显著增强其稳定性、功能

活性及靶向递送效率。有研究提出了一种“自上而下”的方法，利用原核生物（如细菌）的膜来制备非常规脂质体（PD-脂质体），这种载体系统不仅与细菌膜具有更高的亲和力，还能作为抗生素等活性物质的有效递送载体，其装载青霉素 G 后对大肠杆菌的最小抑菌浓度可比游离青霉素 G 降低多达 16 倍^[2]，这为构建基于细菌自身组分的纳米载体以增强光合细菌功能提供了重要借鉴。此外，将纳米材料与光合细菌进行超分子组装，可以调控其能量与电荷转移过程。例如，将二氧化钛纳米颗粒与光合细菌天线复合体 LH2 进行组装，通过飞秒时间分辨光谱研究证实，TiO₂纳米颗粒可以部分装入 LH2 蛋白的空腔中，并与细菌叶绿素发生长程电荷转移，这揭示了纳米材料与光合细菌功能蛋白相互作用的物理机制^[3]。这种复合不仅可能增强光合细菌的光能捕获与转化效率，还可能赋予其新的光电催化特性，为水质净化提供新途径。

近年来，该领域研究日益深入，但对其系统性的作用机制梳理与综合性的应用效能评估仍显不足。一方面，需要深入理解复合体如何协同调控养殖水体的微生态，包括对氮、硫等关键元素循环（如反硝化、硫酸盐还原）相关微生物群落的影响^[4]另一方面，也需要评估其对宿主（如养殖动物）肠道微生态的益生作用及靶向递送效率^[5]本文将围绕光合细菌-纳米复合体的构建、其对水产养殖微生态（包括水体环境与宿主肠道）的调控机制，以及应用效能的科学评估体系展开全面综述，以期为该技术的理论深化与产业化应用提供指导。

1 光合细菌-纳米复合体的构建策略与特性

1.1 常用纳米载体材料及其特性

在构建光合细菌-纳米复合体的过程中，选择合适的纳米载体材料至关重要。无机纳米材料因其独特的物理化学性质而被广泛应用。例如，二氧化钛（TiO₂）纳米颗粒因其优异的光催化性能，可与光合细菌天线复合体（如 LH2）组装，形成能够进行长程电荷转移的超分子系统^[6,7]。此外，碳纳米管（CNT）也被证明是有效的载体，其高比表面积和导电性使其能够与银改性二氧化钛（Ag-TiO₂）结合，形成复合光催化剂，用于构建紧密耦合的光催化-生物降解系统^[8,9]。这些无机材料通常具有良好的机械强度和易于表面修饰的特性，便于负载或吸附光合细菌^[10]。有机或高分子纳米材料则以其良好的生物相容性和可降解性见长^[11]。海藻酸钠（SA）作为一种天然多糖，常被用作包埋基质，与光合细菌和光催化剂

共同构建复合凝胶珠，为微生物提供保护性微环境^[12]。壳聚糖也是一种常用的生物高分子，其阳离子特性使其易于与带负电的细胞表面结合，并可被用于修饰电极或作为固定化介质^[13]这类材料通常能够实现营养物质的缓释，并增强细菌对不良环境（如重金属胁迫）的抵抗力^[14]。为了结合无机与有机材料的优势，复合纳米材料应运而生。例如，将磁性氧化铁（Fe₃O₄）纳米颗粒与还原氧化石墨烯（rGO）结合形成的纳米复合材料，可以修饰在碳毡电极上，不仅提高了导电性和比表面积，其磁性组分还便于后续的分选回收^[15]。同样，将 Fe₃O₄纳米颗粒直接作为催化剂添加，可以显著促进光合细菌对废食用油等复杂基质的利用，并增强其对共污染重金属的耐受性。这些复合设计旨在同时实现高效载菌、环境响应和操作便利性。

1.2 复合体的构建方法与结构表征

光合细菌-纳米复合体的构建方法多样，需根据应用需求选择。物理吸附法是一种相对简单的方法，主要依赖于静电作用、范德华力等非共价相互作用。例如，通过聚-L-赖氨酸涂层修饰载玻片，可以增强细菌样本的附着，便于后续的显微观察。然而，这种方法形成的结合力较弱，对环境因素（如 pH、离子强度）较为敏感。包埋或封装法则能提供更强的物理保护，通常利用凝胶化技术将细菌包裹在纳米级或微米级的高分子基质中。研究显示，将沼泽红假单胞菌与碳纳米管-银-二氧化钛光催化剂共同包埋于海藻酸钠凝胶中，形成的复合体显著提高了对染料废水的降解效率。类似地，使用海藻酸钠/聚乙烯醇/卡拉胶复合凝胶颗粒固定化沼泽红假单胞菌 CQK 01，构建了高效的固定化细胞光生物反应器用于产氢。这种方法能有效隔离外界不利条件，增强细菌的存活率和活性。化学交联法则通过共价键将细菌固定在功能化的纳米材料表面，结合更为牢固。例如，将含有铜的亚硝酸还原酶与紫精修饰的壳聚糖共固定于玻碳电极上，用于构建电化学生物传感器。虽然结合力强，但化学交联过程可能对细菌细胞壁造成损伤，影响其代谢活性，因此需谨慎优化反应条件。为了精确评估复合体的构建效果，需要综合运用多种结构表征技术。扫描电镜和透射电镜是观察复合体形貌、纳米颗粒分布以及细菌与材料界面相互关系的直接手段，例如用于观察细菌合成的硫化镉纳米颗粒的形貌与尺寸。Zeta 电位和粒径分析仪可用于测定复合体在水相中的表面电荷和流体力学

尺寸, 评估其胶体稳定性。傅里叶变换红外光谱则能分析复合体形成过程中化学基团的变化, 例如检测蛋白质等生物分子在纳米颗粒表面的包覆情况。这些表征技术的联用, 为理解和优化光合细菌-纳米复合体的构建提供了全面的信息基础。

2 复合体对养殖水体微生态的调控作用机制

2.1 强化水质净化与氮磷循环

光合细菌-纳米复合体通过其独特的结构, 显著强化了对养殖水体中污染物的去除与氮磷循环过程。纳米材料作为载体, 为光合细菌提供了高密度的附着位点, 有助于形成稳定的生物膜状结构, 从而大幅提升光合细菌在水体悬浮物及底泥界面的定植能力和生物量。这种增强的定植能力使得复合体能够更有效地富集于污染界面, 为后续的生物转化过程奠定基础。在污染物去除方面, 光合细菌与纳米材料展现出协同增效作用。光合细菌能够利用其光合作用同化水体中的氨氮、硫化氢等有害物质, 而某些纳米材料(如二氧化钛)在光照下可产生光催化作用, 进一步降解有机污染物[PHDQEA7X8]。这种物理化学与生物过程的结合, 使得复合体对化学需氧量(COD)等污染指标的去除效率显著提高。此外, 复合体的引入如同“生态位工程师”, 通过竞争性排斥和提供附着基质等方式, 能够有效抑制蓝藻等有害藻类的过度繁殖, 同时促进硝化细菌等有益微生物的生长, 从而优化水体的菌藻群落结构, 建立更健康、稳定的微生态系统。

2.2 抑制病原菌与改善水体微生物平衡

光合细菌-纳米复合体通过多种机制抑制水产养殖中的病原菌, 从而改善水体微生物平衡。首先, 某些纳米材料本身具有广谱抗菌性, 例如银纳米颗粒或氧化锌纳米颗粒, 它们与光合细菌产生的抑菌代谢产物(如细菌素、酶类)可产生联合效应, 对病原菌形成直接抑制。其次, 复合体通过生态竞争间接抑制病原菌。复合体在水体中快速占据生态位并高效消耗营养物质, 剥夺了诸如弧菌、气单胞菌等常见水产病原菌的生存资源, 从而通过营养竞争抑制其增殖。这种竞争排斥作用对于维持水体微生物群落的健康至关重要。再者, 研究表明, 一些纳米材料和光合细菌的代谢物能够干扰病原菌的群体感应系统。群体感应是细菌协调群体行为(如毒力因子表达和生物被膜形成)的关键通讯机制。通过淬灭这一系统, 复合体可以降低病原菌的毒力, 并阻碍其形成难以清除的生物被膜, 从而从根

源上削弱其致病潜力, 为养殖生物创造一个更为安全的微环境。

3 复合体对养殖动物肠道微生态的调控作用机制

3.1 靶向递送与肠道定植增强

纳米载体的应用为光合细菌(PSB)在水产养殖中的益生功效提供了关键的技术保障。通过纳米包埋技术, 可以构建一个保护性外壳, 使光合细菌在通过养殖动物胃部时免受胃酸和胆汁盐的破坏, 从而显著提高活菌到达肠道后端的存活率和数量。这种靶向递送策略对于发挥光合细菌的益生作用至关重要, 因为只有足够数量的活菌到达肠道定植位点, 才能有效调节肠道微生态。例如, 研究表明, 将海洋紫色非硫细菌(PNSB)如 *Rhodovulum sulfidophilum* 以低至 1×10^3 CFU/mL 的浓度添加于养殖水体, 即可有效促进对虾的生长和免疫, 这暗示了其在肠道环境中的有效定植与存活。此外, 经特定纳米材料修饰后, 光合细菌的表面特性可能发生改变, 使其更易与肠道黏膜层的黏蛋白等成分结合。这种增强的黏附能力可以延长光合细菌在肠道内的滞留时间, 为其在肠道内增殖并形成稳定的益生菌群创造条件, 从而为后续的微生态调控奠定基础。

3.2 调节肠道菌群结构与屏障功能

摄入的光合细菌及其复合体能够作为有效的益生元或益生菌, 直接干预并优化养殖动物的肠道菌群结构。研究表明, 紫色非硫细菌(PNSB)作为益生菌在水产养殖中的应用已显示出积极效果, 它们能够促进肠道内有益菌的生长, 并可能抑制潜在病原菌的丰度, 从而增加肠道微生物的多样性。这种对菌群组成的优化是维持肠道健康的第一道防线。在增强肠道物理屏障方面, 光合细菌的代谢产物发挥着核心作用。例如, 它们代谢产生的短链脂肪酸(SCFAs)可为肠上皮细胞提供能量, 是维持肠道上皮完整性的关键物质。这些代谢产物能够促进肠上皮细胞间紧密连接蛋白(如 Occludin、ZO-1)的表达, 从而降低肠道通透性, 有效阻止有害物质和病原体的易位。此外, 光合细菌复合体还能通过调节肠道免疫系统功能来强化化学与免疫屏障。它们可以调节巨噬细胞、T 细胞等免疫细胞的功能, 促进分泌型免疫球蛋白 A (sIgA) 的分泌, 并可能诱导抗菌肽的表达。这些免疫调节作用共同构建了一个多层次的肠道防御体系, 增强了宿主对病原感染的抵抗力。

4 光合细菌-纳米复合体的应用效能评估体系

4.1 体外评估指标与方法

体外评估是衡量光合细菌-纳米复合体性能与安全性的基础。在活性与稳定性评估方面,关键指标包括复合体中光合细菌的存活率及其在不同环境胁迫下的耐受性。例如,研究显示,向光合细菌培养体系中添加铁基纳米材料(如 Fe_3O_4 纳米颗粒)可以显著增强细菌对重金属(如 Pb 、 Ni 、 Co 、 Zn)的耐受性,并促进其生长。这为评估复合体在模拟恶劣环境(如高胆盐、酸性胃肠液)中的稳定性提供了参考。在功能活性评估上,需测定复合体的核心代谢功能。相关研究通过测量细菌的生物量、蛋白质及类胡萝卜素等有价值产物的产量来间接评估其代谢活性,发现 Fe_3O_4 纳米颗粒的加入能使这些产物的产量提升 57.2% 至 70.78%。此外,通过飞秒时间分辨光谱技术,可以深入研究复合体中光合细菌天线色素(如细菌叶绿素 B850)与纳米材料(如 TiO_2)之间的光致电荷转移效率,这为评估其光能转化与电子传递等核心功能提供了高精度方法。安全性初步评估不可或缺,需通过细胞毒性试验考察纳米材料溶出离子的潜在风险。虽然直接针对鱼类细胞系的毒性数据在现有文献中有限,但相关研究通过分析纳米材料促进微生物生长和代谢物(如胞外聚合物 EPS)产生的作用,间接提示了其在适宜浓度下对生物体系的友好性,为后续系统的毒理学评估奠定了基础。

4.2 养殖现场应用效能评估

养殖现场的应用效能评估是验证光合细菌-纳米复合体实际效果的关键环节。水质指标监测是首要任务,需定期检测氨氮、亚硝酸盐等关键理化参数的变化。研究表明,负载了铁铝双金属氧化物纳米材料(Fe-Al-NBMO)的基质在构建湿地系统中对 Cr(VI) 表现出高达 988.43mg/kg 的吸附容量,其引入能有效降低出水 Cr(VI) 浓度,确保其符合排放标准。这提示类似的光合细菌-纳米复合体在养殖水体中可能通过增强对氮、磷等污染物的吸附与转化,来改善水质。养殖动物生长与健康指标方面,需系统记录增重率、饲料系数等生产性能,并分析血清免疫与抗氧化指标。纳米材料的添加被证实能促进特定功能微生物(如 *Rhodopseudomonas*)的生长并增加代谢产物。这有望通过改善肠道健康或系统免疫,最终提升养殖动物的生长性能和抗应激能力。微生物群落分析通过高通量测序技术,能深入揭示复合体对微生态的调控机制。研究发现在引入 Fe-Al-NBMO 纳米材料后,系统中具有污染物去除功能的

微生物(如 *Rhodopseudomonas* 和 *Hyphomicrobium*)丰度增加,同时与还原代谢相关的功能基因(如 *nuoB*、*nuoC* 等)表达上调。这为解析复合体通过调控微生物群落结构及其功能来净化水体的机制提供了直接证据。抗病力评估则通过攻毒实验完成,需记录累积死亡率并分析免疫相关基因表达。虽然现有文献未直接报道此类实验,但纳米材料增强微生物功能、促进有益代谢物产生的特性。理论上可为养殖动物构建更健康的微生态环境,从而可能间接提升其对病原感染的抵抗力,这有待后续研究验证。

5 挑战、优化策略与发展前景

5.1 面临的主要挑战与风险

尽管光合细菌-纳米复合体展现出调控水产养殖微生态的巨大潜力,但其实际应用仍面临多重挑战与风险。首先,纳米材料的环境归趋与长期生态风险是核心关切。纳米颗粒在复杂多变的水体环境中可能发生迁移、转化与生物积累,其对非靶标水生生物(如浮游动物、底栖生物)乃至整个生态系统的潜在毒性影响尚不明确,缺乏长期、系统的生态毒理学数据支持。其次,复合体的规模化生产成本与工艺是制约其产业化的瓶颈。目前,高纯度、粒径均一且功能稳定的纳米材料制备成本高昂,而将光合细菌与纳米材料高效、稳定复合的大规模生产工艺尚不成熟,难以保证产品批次间的稳定性和标准化。最后,相关的法规与安全性评价标准严重缺失。目前全球范围内均缺乏专门针对用于水产养殖的微生物-纳米复合产品的监管法规和全面的安全性评价标准体系,这为产品的市场准入和规范应用带来了不确定性。

5.2 复合体的性能优化策略

为应对上述挑战,研究者们提出了多种性能优化策略。开发智能响应型复合体是提升其靶向性和效率的关键方向。通过设计对 pH 值、特定酶或光照敏感的纳米载体,可以实现光合细菌在目标微环境(如水产动物肠道、水体污染富集区)的精准、可控释放,从而减少无效损耗并增强局部调控效果。其次,构建多功能协同复合体是增强综合调控能力的有效途径。将光合细菌与特定的酶制剂、噬菌体或益生元等其他功能活性成分共同负载于纳米载体上,形成“鸡尾酒”疗法,有望实现对水产养殖环境或宿主肠道中病原菌、有害代谢物等多靶点的协同干预,提升微生态调控的广谱性和稳健性。此外,利用废弃物合成绿色纳米材料是降低成本并提升环境友好性的重要策略。探索利用农业废弃物(如稻壳)或水产加工废弃物(如虾蟹

壳)合成生物炭、几丁质纳米纤维等生物基纳米材料,不仅能够实现资源循环利用、降低原材料成本,还能赋予复合体更好的生物相容性和可降解性。

5.3 未来研究方向与应用前景

展望未来,光合细菌-纳米复合体技术的研究与应用前景广阔,但需在多个方向深化探索。首先,需要深入机制研究。未来应广泛应用宏基因组学、代谢组学、转录组学等多组学技术,在分子和系统水平上全面解析复合体介入后,对宿主肠道及养殖水体中微生物群落结构、功能基因表达、代谢网络通路的深层影响,从而揭示其调控微生物生态的复杂网络机制。其次,开发实时监测与评估技术至关重要。结合先进的传感器技术,开发能够原位、实时监测复合体在水体或生物体内的分布、浓度变化及其对关键环境或生理指标(如氨氮、溶解氧、菌群丰度)影响效能的工具,将为精准评估和优化应用方案提供数据支持。最后,推动标准化与产业化是技术落地的最终保障。这需要加强材料科学、微生物学、水产养殖学及环境工程等领域的跨学科合作,建立从实验室基础研究、中试放大到规模化生产的完整技术链条,并同步推动产品制备、质量控制和安全性评价等相关行业或国家标准的制定,以促进该技术安全、高效、规范地应用于现代水产养殖业。

6 结论

光合细菌-纳米复合体技术代表了水产微生态调控从粗放投菌向精准、智能材料学干预的重要范式转变。它通过“外净水质、内调菌群”的双重协同机制,为绿色健康养殖提供了创新解决方案。当前研究已证实其原理可行性,但将其转化为稳定、可靠、可负担的养殖实践,仍需跨越机制认知、安全评估与产业化标准等多重鸿沟。未来的成功将取决于能否开展长期的生态安全监测、建立严格的标准化体系,并实现跨学科的深度协同创新。唯有如此,这项颇具潜力的技术方能稳健地推动水产养殖业走向真正的可持续发展。

基金资助:2024年大学生创新创业训练计划项目国家级项目(项目编号:202410608013)。

[参考文献]

[1]Xing SF, Tian HF, Yan Z, et al. Stability and biomineralization of cadmium sulfide nanoparticles biosynthesized by the bacterium *Rhodopseudomonas palustris* under light[J]. *J Hazard Mater*,2025(458):131937.
 [2] Viana de Freitas T, Karmakar U, Vasconcelos AG, et al.

Release of immunomodulatory peptides at bacterial membrane interfaces as a novel strategy to fight microorganisms[J]. *J Biol Chem*,2023,299(4):103056.

[3] Marek PL, Sieger H, Scherer T, et al. Self-assembled chromophores within mesoporous nanocrystalline TiO_2 : towards biomimetic solar cells[J]. *J Nanosci Nanotechnol*,2009,9(6):3708-13.

[4] Linares DM, Ross P, Stanton C. Beneficial Microbes: The pharmacy in the gut[J]. *Bioengineered*,2016,7(1):11-20.

[5] Alvanou MV, Feidantsis K, Staikou A, et al. Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics Utilization in Crayfish Aquaculture and Factors Affecting Gut Microbiota[J]. *Microorganisms*,2023,11(5).

[6] Chen XH, Zhang L, Weng YX, et al. Protein structural deformation induced lifetime shortening of photosynthetic bacteria light-harvesting complex LH2 excited state[J]. *Biophys J*,2005,88(6):4262-73.

[7] Ze Y, Liu C, Wang L, et al. The regulation of TiO_2 nanoparticles on the expression of light-harvesting complex II and photosynthesis of chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Biol Trace Elem Res*,2011,143(2):1131-41.

[8] Yang Y, Liu K, Sun F, et al. Enhanced performance of photocatalytic treatment of Congo red wastewater by CNTs-Ag-modified TiO_2 under visible light[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*,2022,29(11):15516-15525.

[9]Dasagiri CS, Araga R. Synthesis and preliminary evaluation of Ag- TiO_2 /CNT hybrid nanocomposite for the degradation of polystyrene microplastics under solar irradiation[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*,2024,31(22):32863-32874.

[10] Liu K, Yang Y, Sun F, et al. Rapid degradation of Congo red wastewater by *Rhodopseudomonas palustris* intimately coupled carbon nanotube - Silver modified titanium dioxide photocatalytic composite with sodium alginate[J]. *Chemosphere*,2025(299):134417.

[11] Zhou D, Tabassum S, Li J, et al. In situ remediation of eutrophic Wolong Lake sediments using novel PVA-SA-biochar and PVA-SA-zeolite embedded immobilized indigenous microorganisms: a pilot study[J]. *Environ Sci Process Impacts*,2025,27(3):597-622.

[12] Xing D, Cheng J, Song X, et al. Study on modified SA-H₃BO₃ immobilization microorganism method for wastewater treatment in seawater recirculating aquaculture system[J]. Environ Res,2025(226):115636.

[13] Iimaa T, Batmunkh M, Dulguun B, et al. Bacterial Heavy Metal Resistance in Contaminated Soil[J]. J Microbiol Biotechnol,2025(35):2411073.

[14] Kulakovskaya T. Inorganic polyphosphates and heavy metal resistance in microorganisms[J].World J Microbiol Biotechnol,2018,34(9):139.

[15] Nies DH. Microbial heavy-metal resistance[J]. Appl Microbiol Biotechnol,1999,51(6):730-50.

作者简介：陈万林^{*}，男，汉族，广西博白，本科，兽医师，研究方向：畜牧兽医。

基于人工智能的油脂加工企业安全风险智能识别与预警研究

周 伟 冯延杰

中储粮油脂工业盘锦有限公司, 辽宁 盘锦 124000

[摘要]油脂加工作业环节涉及高温高压、火灾爆炸等复杂危险因素,传统安全管理手段在风险识别的及时性与准确性方面存在明显不足。文章旨在构建面向油脂加工行业的安全风险智能识别与预警管理体系,系统梳理行业主要风险隐患及传统管理方法的局限性,深入分析机器学习、深度学习等人工智能算法的理论基础及其在工业安全领域的应用现状,设计多源信息融合的智能感知系统架构,涵盖在线监测、预警推送等功能模块。通过构建层次化融合识别模型并进行系统性能验证,证明该方法能够有效实现风险早期特征实时捕捉与预警级别智能判定,显著提升安全生产预防性管控水平。研究成果可为油脂加工业企业安全管理智能化转型提供重要参考与指导依据。

[关键词]油脂加工; 安全生产; 风险识别; 人工智能; 智能预警

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19393

中图分类号: F27

文献标识码: A

Research on Intelligent Identification and Early Warning of Safety Risks in Oil Processing Enterprises Based on Artificial Intelligence

ZHOU Wei, FENG Yanjie

SINOGRAIN Oil Industry Panjin Co., Ltd., Panjin, Liaoning, 124000, China

Abstract: The oil processing operation involves complex hazardous factors such as high temperature and high pressure, fire and explosion. Traditional safety management methods have obvious shortcomings in the timeliness and accuracy of risk identification. The article aims to build an intelligent identification and warning management system for safety risks in the oil processing industry, systematically review the main risks and hazards in the industry and the limitations of traditional management methods, deeply analyze the theoretical basis of artificial intelligence algorithms such as machine learning and deep learning, and their application status in the field of industrial safety. It designs an intelligent perception system architecture that integrates multiple sources of information, covering functional modules such as online monitoring and warning push. By constructing a hierarchical fusion recognition model and conducting system performance verification, it has been proven that this method can effectively achieve real-time capture of early risk characteristics and intelligent judgment of warning levels, significantly improving the level of preventive control in safety production. The research results can provide important reference and guidance for the intelligent transformation of safety management in the oil processing industry enterprises.

Keywords: oil and fat processing; safety production; risk identification; artificial intelligence; smart early warning

引言

随着我国油脂加工业规模持续扩大与工艺复杂度不断提升,生产过程中潜在的安全隐患日益凸显。油脂加工涵盖预处理、压榨或浸出、精炼、氢化等核心工序,普遍涉及高温、高压工况及易燃易爆溶剂使用,火灾爆炸、有毒有害气体泄漏等重大风险贯穿生产全过程。传统安全管理模式主要依托规章制度与管理人员经验开展风险评估,风险辨识以定期检查与事后分析为主,面对海量动态生产数据时表现出显著的滞后性与主观性缺陷。推动安全管理从被动

防御向主动预判转型,已成为行业亟待解决的关键课题。

人工智能技术的快速发展,特别是在预测分析领域的突破性进展,为工业安全风险智能感知提供了全新思路。研究表明,人工智能能够从历史数据与实时信息流中挖掘人脑难以察觉的潜在规律与关联模式。本文致力于将人工智能技术全面融入油脂加工安全风险场景,构建集智能识别、实时预警于一体的风险感知技术体系,在理论层面拓展安全科学与工程学科的交叉研究,在实践层面为企业安全生产管理提供可落地的人工智能解决方案,切

实保障从业人员生命财产安全，促进产业高质量发展。

1 油脂加工企业安全风险概述

1.1 油脂加工工艺与主要风险点

油脂加工是包含物理分离与化学转化的连续性生产过程，主要包括预处理、压榨或浸出、精炼、深加工等工艺环节。预处理工段中，原料清理、破碎、软化等工序产生大量可燃性粉尘，在特定浓度条件下遇点火源极易引发猛烈爆炸。浸出工段危险等级最高，普遍采用正己烷等低闪点、高挥发性易燃溶剂，设备密封失效或人为操作失误导致溶剂泄漏后，形成的爆炸性混合气体遇明火或高温表面即发生严重燃爆事故。精炼工段中，脱臭、脱色等工序操作温度常超过 200℃，热载体系统存在超温、超压及泄漏风险，高温油脂本身亦具可燃性。氢化等深加工工序需使用氢气等危险化学品并维持高压环境，对安全管控提出严苛要求。此外，整条生产线配套使用的锅炉、压力容器、压力管道等特种设备，运行故障亦构成重大危险源。上述相互关联的风险节点交织形成复杂的安全风险网络，系统性管控难度极大。

1.2 传统安全风险识别方法的局限性

传统安全风险辨识以法规标准与人员经验为核心，主要表现为定期检查、设备点检、事后统计分析等形式。该模式虽在历史上发挥重要作用，但面对现代复杂生产系统已显露多重局限：

一是主观性强，标准化程度低。风险判定效果高度依赖检查人员的专业素养与责任心，缺乏统一量化标准，不同人员判定结果差异显著，难以实现标准化、规范化管理。

二是时效性差，存在监测盲区。检查多为周期性开展，无法实时捕捉生产过程中的瞬态异常变化，形成时间空白区与信息滞后，错失风险干预最佳窗口期。

三是数据利用率低，信息挖掘不足。面对现场持续生成的多源异构数据，人工方式难以实现有效整合与深度解析，大量蕴含风险征兆的信息被闲置浪费。

四是系统性分析能力弱。侧重显性隐患排查，缺乏分析工具研究风险因子间复杂耦合关系，难以预判多因素联动引发的系统性风险。

传统模式的固有缺陷使其在复杂生产环境中捉襟见肘，亟需引入智能化手段提升风险辨识的客观性、实时性与系统性。

2 人工智能技术在安全风险识别中的理论基础

2.1 相关人工智能技术概述

人工智能多项子技术为安全风险智能辨识提供技术

支撑。机器学习使系统能够从数据中进行自我优化：有监督学习算法（如支持向量机）可利用历史事故数据训练分类器，对新风险状态进行判别；无监督学习（如聚类算法）擅于在未标注数据中发现内在规律，识别设备运行的异常模式。深度学习通过构建深层神经网络挖掘数据中的复杂抽象特征：卷积神经网络在图像视频分析中表现卓越，可自动识别监控画面中的火灾烟气与人员违规操作；循环神经网络及其变体（如 LSTM）适用于时序数据分析，能够捕捉工艺参数随时间演变的规律并检测离群点。自然语言处理技术可解析设备维修日志、巡检记录等文本资料，提取关键风险要素。上述技术构成由浅入深、多维互补的人工智能工具体系。

2.2 智能识别与预警的基本框架

人工智能安全风险智能感知与预警一般遵循“数据层-算法层-应用层”的体系化架构。数据层负责大规模采集生产设备传感器参数、视频监控图像、安全巡查记录、维护档案等多源异构数据。算法层对原始数据执行清洗、对齐、融合等预处理操作，基于目标风险类型选取特征工程方法与人工智能模型，输出风险概率等识别结果。应用层依据预设规则将识别结果转化为低危、中危、高危等分级预警提示，通过可视化界面、短信、语音等多种渠道向相关人员推送预警信息，形成“检测-计算-反馈”的闭环管理流程。

2.3 人工智能在工业安全领域的应用现状

人工智能在工业安全领域已取得阶段性进展。设备健康管理方面，机器学习算法被用于大型旋转机械状态监测数据分析，实现故障早期预警与预测性维护，减少次生事故发生。流程工业安全方面，深度学习算法应用于化工过程异常工况识别，通过数据驱动方法捕捉工艺参数变化趋势并追溯根因^[1]。现场作业监管方面，基于计算机视觉的技术能够自动识别未佩戴安全帽、违规闯入危险区域等行为，弥补人工监管的视野盲区。多源信息融合方面，学者们综合运用文本、传感器、图像等多模态数据开展风险评估，提升复杂环境下的判断准确性。上述实践为人工智能在油脂加工业的落地应用提供了技术参照，但如何结合行业特殊性与具体风险场景开展定制化开发，仍是亟待探索的课题。

3 油脂加工企业安全风险智能识别模型构建

3.1 风险数据采集与预处理

构建高质量数据集是模型开发的首要环节。模型所需数据主要包括三类：一是工艺装置实时运行时序数据，如

温度、压力、流量、液位等关键工艺参数；二是环境与状态监测数据，如可燃气体浓度、视频监控流、设备振动频率、红外热成像等；三是管理与文档文本数据，如巡检记录、维护工单、事故报告、操作规程等。鉴于多源数据在格式、标准、时序上差异显著，需进行统一预处理：异常值剔除、缺失值填补、时间戳同步、非结构化文本结构化转换、量纲标准化等。数据质量直接决定模型性能，必须建立严格的数据质量管理体系。

3.2 风险特征提取与选择

在预处理基础上需提取表征风险状态的有效特征。时序数据可从时域（均值、方差、斜率、峰值）与频域（频率分布、能量谱）维度提取统计特征，反映设备运行稳定性；图像数据借助卷积神经网络进行深度特征提取，获取泄漏蒸汽形态、火焰纹理、人员姿态等高层语义信息；文本数据通过词嵌入技术转换为低维稠密向量，捕捉语义关联。初步提取的特征往往维度高且存在冗余，需进一步开展特征选择：采用基于特征重要性的排序筛选或主成分分析降维，保留与风险标签关联最紧密、区分度最高的特征子集，在降低维度的同时提升模型效率与可解释性。

3.3 智能识别模型设计

为满足多模态风险识别需求，本文提出层次化融合智能识别模型框架，整体架构如图1所示。

底层为并行独立子模型层，针对不同数据类型设计专用处理单元：采用“一维卷积+LSTM”混合模型学习工艺参数时序异常特征；基于YOLO等目标检测算法构建视觉识别模型定位危险目标（如火焰、烟雾、泄漏点）；基于BERT等预训练语言模型构建文本理解模型解析工单描述中的风险语义。各子模型独立输出初步风险概率或特征表示。

中层为自适应融合层，引入注意力机制模块动态评估各子模型输出结果的可信度，赋予差异化权重，实现信息源的择优整合。

顶层为决策输出层，通过全连接网络对加权融合后的高层次特征进行综合研判，输出从“正常”到“高风险”的总体风险等级判定。

该架构既保留了对单一信号源的精细化分析能力，又实现了多源信息整体性融合判断，兼顾识别精度与系统鲁棒性。

3.4 模型训练与优化方法

模型训练依赖高质量标注数据集构建，需组织领域专家依据事故案例与行业规范对样本进行风险等级人工标注。针对工业场景中高风险事件样本稀缺的类别不平衡问题，可采用SMOTE过采样或生成对抗网络（GAN）合成虚拟样本等方式实现数据均衡。训练过程选用交叉熵损失函数与Adam优化器进行参数寻优，引入Dropout、L2正则化等技术抑制过拟合，基于验证集性能监控实施早停策略。对于学习率、网络层数、隐藏单元数等超参数，采用网格搜索或贝叶斯优化确定最优配置。经系统训练优化后，即可获得稳健可靠的风险智能识别模型。

4 安全风险智能预警系统设计及实现

4.1 预警系统总体架构

基于识别模型进行工程化部署，构建稳定运行的安全风险智能预警系统。系统采用分层松耦合架构设计，如图2所示，包含四个核心层次：

边缘感知层：由现场传感器、工业摄像头、智能仪表等物联网设备构成，负责原始数据采集与边缘预处理。

数据汇聚处理层：基于Kafka消息队列与Flink流处理平台构建，实现多源数据接入、实时清洗、格式转换、持久化存储，并对外提供统一数据服务接口。

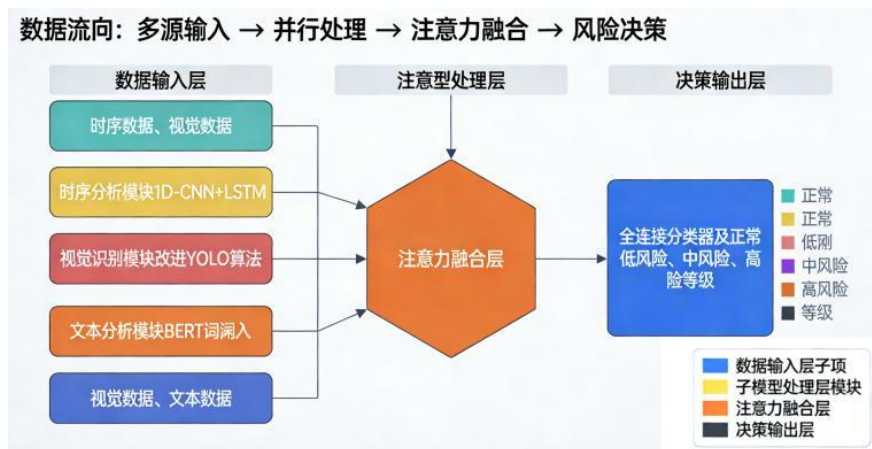


图1 分层融合智能识别模型架构图

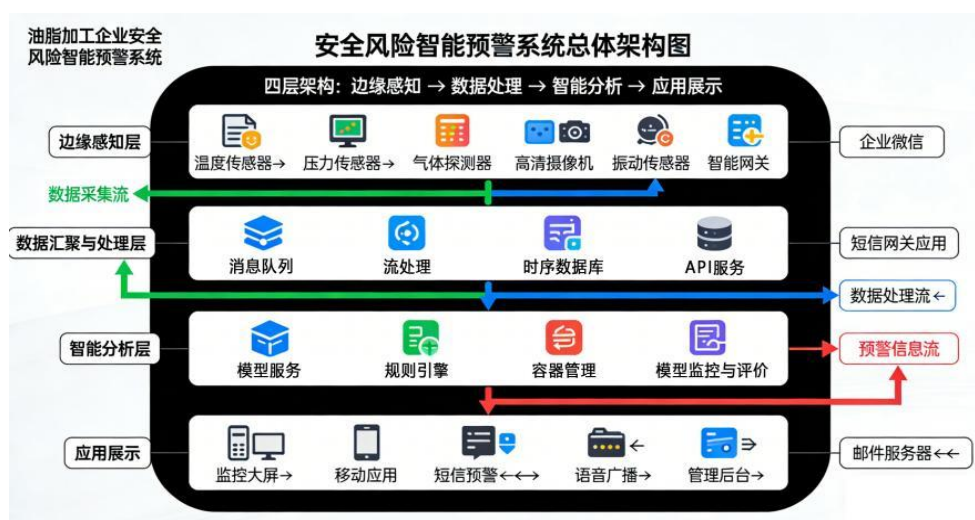


图 2 安全风险智能预警系统总体架构图

智能分析层：将训练完成的风险识别模型封装为微服务，以 RESTful API 或 gRPC 方式对外提供实时推理计算能力，支持弹性扩展与版本管理^[2]。

应用呈现层：面向安全管理人员提供可视化监控大屏、实时预警列表、统计分析报表、历史追溯查询等功能模块，并通过标准接口对接企业短信平台、声光报警器、应急广播等外部系统，实现多渠道预警推送。

各层之间通过标准化协议（MQTT、HTTP/HTTPS）互联，确保系统具备良好的可扩展性与可维护性。

4.2 实时风险分析模块

实时风险分析模块需满足高并发、低延迟的处理要求，采用 Apache Flink 等流计算框架对连续数据流进行实时处理与建模分析。模块内部维护多模型实例池，支持多条生产线的并行分析请求。针对时序数据流维护滚动时间窗口，将窗口内时序特征输入时序模型计算动态风险分值；针对视频流按固定频率抽帧送入图像识别模型进行推理。模块内置规则引擎，基于行业知识库制定逻辑规则（如“可燃气体浓度超限时直接触发高危预警”），对模型输出结果进行辅助校验与修正。最终综合模型预测结果与规则引擎输出，生成结构化风险事件记录并推送至预警生成模块。

4.3 预警信息生成与发布机制

预警信息生成模块负责将风险事件转换为标准化预警信息。系统实施四级预警分级机制：提醒（蓝色）、警示（黄色）、告警（橙色）、危急（红色），对应差异化的推送策略与响应流程。模块内置可配置信息模板库，依据事件特征自动填充生成包含风险位置、类型、等级、建议措施等要素的完整预警内容。发布机制采用发布-订阅

（Pub/Sub）模式，预警信息推送至中心消息主题，短信网关、移动 APP、Web 界面、声光设备等订阅端异步接收消息。全量预警信息及后续处置记录完整存档，形成闭环管理，支持事后审计与模型迭代优化。

4.4 系统测试与性能评估

系统投用前需经过严格测试验证，包括功能测试、性能测试与现场试点测试。功能测试验证数据采集、模型推理、预警推送等全流程功能正确性；性能测试评估高负载场景下的响应延迟、吞吐能力与系统稳定性；现场试点测试选择非核心生产线开展实体验证，对比系统报警与人工发现、模拟测试的响应情况，综合评价系统实效。核心评估指标包括：预警准确率、虚警率、漏检率、平均预警延迟时间等。测试通过后方可正式部署应用^[3]。

5 结论与展望

本文立足油脂加工行业安全生产实际需求，系统研究了人工智能技术在安全风险智能识别与预警中的应用。通过分析行业风险特征与传统管理方法的局限性，构建了层次化融合智能识别模型与配套系统架构。研究表明，基于多源信息融合的人工智能方法能够有效提升风险识别敏感度，实现从“事后分析”向“事前预防”的管理模式转型。

然而，框架的全面落地仍面临高质量数据获取困难、模型可解释性不足、人机协同机制不完善等挑战。未来研究可从以下方向深化：一是探索小样本学习与迁移学习技术，降低对大规模标注数据的依赖；二是引入可解释人工智能（XAI）方法，提升模型决策透明度与可信度；三是深化预警信息与应急响应预案的智能联动，构建“识别-

预警-处置”一体化闭环。人工智能与安全生产的深度融合是一项长期迭代、持续优化的系统工程，需要产学研用各方协同推进，为油脂加工乃至流程工业的本质安全水平提升贡献智能化力量。

[参考文献]

[1]梁强,李鸿运.基于大数据和人工智能的危化企业安全风险预警与控制技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):72-74.

[2]哈承春.化工企业中的风险监控与安全管理预警技术[J].

化工管理,2021(26):92-93.

[3]魏家勇,余阳荣,方建伟.人工智能驱动下轮胎制造企业安全风险智能预测技术研究[J].中国轮胎资源综合利用,2025(7):97-99.

作者简介：周伟（1986.8—），男，单位名称：中储粮油脂工业盘锦有限公司，毕业学校和专业：沈阳化工，安全工程专业；冯延杰（1982.7—），男，中级安全工程师，单位名称：中储粮油脂工业盘锦有限公司，毕业学校和专业：沈阳工业大学，热能与动力工程专业。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

www.viserdata.com

