

杀菌釜排放蒸汽与冷凝水回收的应用研究

魏鑫鑫 吕雪莹 张启砚

烟台中宠食品股份有限公司, 山东 烟台 264000

[摘要]在“碳达峰、碳中和”战略背景下,工业领域节能降碳已成为食品制造企业降低成本、提升绿色制造水平的重要路径。文中以烟台中宠食品股份有限公司产业园杀菌釜蒸汽系统为研究对象,针对杀菌车间高温蒸汽与冷凝水长期直排造成的能源浪费、水资源浪费及碳排放增加等问题,提出蒸汽余热与冷凝水协同回收方案。该方案通过汽水分离器、全焊接换热器、余热回收机组、恒压供水及传感联锁控制,实现废蒸汽热量间接回收、锅炉补水预热、清洗用水升温和冷凝水再利用。实践结果表明,项目年均可节约天然气约 72000Nm³,节省燃气费用约 30 万元,年均节约冷凝水约 4000 吨,投资回收期约一年,具有明显的经济效益、节能效益和行业推广价值。

[关键词]天然气; 杀菌釜; 汽水分离器; 管式换热器; 冷凝水; 节能减排

DOI: 10.33142/aem.v8i7.20307

中图分类号: TB657.1

文献标识码: A

Application Research on Steam and Condensate Recovery From Sterilization Kettle Discharge

WEI Xinxin, LYU Xueying, ZHANG Qiyan

Yantai China Pet Foods Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract: In the context of the "carbon peak and carbon neutrality" strategy, energy conservation and carbon reduction in the industrial sector have become important paths for food manufacturing enterprises to reduce costs and improve their green manufacturing level. The article takes the sterilization kettle steam system of Yantai China Pet Foods Co., Ltd. Industrial Park as the research object. In response to the energy waste, water resource waste, and increased carbon emissions caused by the long-term direct discharge of high-temperature steam and condensed water in the sterilization workshop, a coordinated recovery scheme of steam waste heat and condensed water is proposed. This scheme achieves indirect recovery of waste steam heat, boiler feedwater preheating, cleaning water warming, and reuse of condensate water through steam water separators, fully welded heat exchangers, waste heat recovery units, constant pressure water supply, and sensor interlocking control. The practical results show that the project can save about 72,000Nm³ of natural gas annually, save about 300,000 Yuan in gas costs, save about 4,000 tons of condensate water annually, and have a payback period of about one year, which has significant economic and energy-saving benefits and industry promotion value.

Keywords: natural gas; sterilization kettle; soda water separator; tube heat exchanger; condensate water; energy conservation and emission reduction

1 研究领域

本课题属于食品制造企业公用工程节能改造与余热回收利用领域,研究范围主要包括杀菌釜排放蒸汽回收、冷凝水回收、锅炉补水预热、恒压供水控制以及车间清洗用热水再利用等内容。其核心是将原本直接排放到地沟中的低压蒸汽和高温冷凝水,通过间接换热和分级利用方式转化为可再次利用的热能与水资源。

随着我国“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”目标持续推进,工业企业的能源利用效率、单位产品能耗和碳排放水平已经成为企业经营管理的重要指标。食品加工

企业普遍存在蒸汽用量大、冷热需求集中、生产周期连续、排放点分散等特点。杀菌釜在宠物湿粮、罐头、软包装食品等生产中承担高温杀菌功能,是保障产品安全和货架期的关键设备,也是蒸汽消耗较大的工序。

从理论角度看,蒸汽余热回收的基础是热能梯级利用。高温排放蒸汽和冷凝水虽然不宜直接进入生产物料系统,但仍然包含较高焓值。通过汽水分离、间接换热和恒压输送,可以将这部分热量传递给锅炉补水或工艺用水,从而减少锅炉再次加热所需的天然气消耗。从管理角度看,该课题兼具能源管理、设备管理、工艺安全和绿色制造价值,

能够将单点设备改造转化为企业降本降碳的系统性实践。

开展该项研究的意义主要体现在三个方面。第一，降低天然气消耗和蒸汽制备成本，直接提升企业能源使用效率。第二，减少冷凝水和热量浪费，改善车间排放环境，降低安全与环保管理压力。第三，形成可复制的杀菌釜余热回收改造模式，为同类食品加工企业提供低投入、高回报、易推广的节能技术路径。

2 前期状况和问题所在

(1) 国家政策与行业背景

国家为推动绿色低碳发展和能源消费强度控制，陆续出台《固定资产投资节能审查和碳排放评价办法》《2024—2025 年节能降碳行动方案》等政策文件，对工业项目节能审查、碳排放评价和重点行业降碳提出了更高要求。天然气、蒸汽和自来水是食品生产制造企业的重要能耗组成部分，降低燃气消耗、提高蒸汽利用率、减少水资源浪费，已成为食品企业提升产品竞争力和履行社会责任的重要控制手段。

在食品杀菌行业中，传统工艺更重视杀菌温度、杀菌时间、产品安全性和设备稳定性，对排放蒸汽与冷凝水的回收利用关注不足。很多企业将杀菌釜排气和冷凝水直接排入地沟，虽然操作简单，但造成了显著的热能损失和水资源浪费。燃气锅炉系统中冷凝水回收、闪蒸汽利用和换热回收已有成熟技术基础，但如何在杀菌釜工艺约束、食品安全要求和现场管路条件下稳定集成，仍需要结合具体生产场景进行实践验证。

(2) 企业前期运行状况

以中宠股份第十工厂为例，锅炉房内共有两台锅炉，额定蒸发量分别为 10t/h 和 6t/h，承担产业园区主要蒸汽供应。第十工厂杀菌车间每天蒸汽使用量约 28t，折算费用约 8000 元。每台杀菌锅每天运行约 22h，通过蒸汽或热水完成蒸煮杀菌。杀菌前需要排冷空气，每锅约需直通蒸汽排放 20min，排放管道管径为 DN50。杀菌锅顶部共有 4 根 DN15 供蒸汽循环排放管，汇总至 1 根 DN25 管道，在约 2h 杀菌过程中持续开启，相当于持续直排蒸汽。

现场排查发现，所有杀菌锅产生的蒸汽冷凝水和排放蒸汽均通过管道排至地沟，热量未被回收利用。根据 DN50 管道流量测算，0.1MPa 表压饱和蒸汽绝对压力约 0.2MPa，对应密度约 0.6kg/m³。按管内平均流速 30m/s、DN50 内径 50mm 计算，管道截面积为 0.0019625m²，质量流量约为 2.1195kg/min。按 10 台设备、每台每天 11 锅、每锅排放 20min 计算，DN50 管道日排放量约为 4662.9kg，即 4.663 吨/天。

实验室分析还确认，二次蒸汽中含有酸性物质，不适合直接回到生产场合或锅炉水系统中使用，必须采用间接换热或其他隔离方式进行热量利用，避免交叉污染和水质风险。这说明，项目不能简单采用“直接回收、直接回用”的方式，而必须在安全边界内完成热量转移和水资源再利用。

3 问题所在

通过前期调研和现场核算，本项目需要解决的关键问题主要集中在以下几个方面：第一，杀菌釜排放蒸汽和冷凝水长期直排，导致热能与水资源同时损失，企业燃气费用和补水成本偏高。第二，杀菌釜排气管道对残余压力要求极高，排气管道不能有明显背压，必须小于 0.002 公斤，否则会影响杀菌系统稳定性和工艺安全。第三，二次蒸汽中含酸性物质，不能直接进入锅炉补水或生产用水系统，回收方式必须兼顾食品安全、水质安全和设备防腐。

第四，现场杀菌釜数量多、排放管路分散，如果将多根排气管简单汇入一根主管，可能出现串流、背压波动和局部排放不畅等风险。第五，回收系统必须与原生产节拍兼容，不能影响杀菌釜升温、排气、保温和降温过程，也不能对产品质量、设备运行和车间安全造成负面影响。因此，本文准备重点解决的是：在不改变杀菌工艺安全边界的前提下，如何通过系统化设备集成实现废蒸汽热量回收、冷凝水回收和稳定供水控制。

4 创新案例的创新性、难点、个人工作业绩、作用和取得成绩

(1) 创新性

本创新案例的核心创新点不是单一设备替换，而是将汽水分离、间接换热、恒压供水、传感监测和施工风险控制集成一套协同回收系统。系统遵循“抓两头、优中间”的控制思路：前端抓排放蒸汽和冷凝水入口条件，确保排气顺畅、压力稳定；中间优化汽水分离与换热效率，充分释放废蒸汽和冷凝水中的热量；末端抓锅炉补水预热、热水回收和车间清洗用水利用，实现热能和水资源的多场景消纳。

与传统直接排放方式相比，该方案通过间接换热避免了二次蒸汽污染风险，通过恒压智能控制避免了回收系统对杀菌釜排气的干扰，通过冷凝水再利用拓展了节水价值。该方案既解决了能源浪费问题，也兼顾了食品加工企业对稳定性、卫生安全和连续生产的要求，具有较强的工程适配性。

(2) 技术难点

项目实施难点主要包括三类：一是工艺压力控制难点。

杀菌釜排气管道不能形成残余压力,回收系统必须在保证排气通畅的基础上进行热量回收。为此,系统加装压力传感器、温度传感器和主管道调节阀,并与控制系统形成联锁,使蒸汽压力、水压、容量和温度参数保持在工艺允许范围内。二是水质与污染隔离难点。由于二次蒸汽含有酸性物质,不能直接作为锅炉水或生产用水使用。项目采用汽水分离器和换热器实现间接换热,使 RO 水或工艺冷水在换热器中吸收热量,而污染风险被隔离在废汽侧。换热后的低温冷凝水控制在约 50~70℃,可用于车间地面清洗等非直接生产场景,实现分级利用。三是现场管路与施工管理难点。车间多台杀菌釜排气点分散,10 根管道不能简单连接到一根主管上,否则存在串流风险。项目需要根据现场空间、管路走向、接口位置和设备安装条件,重新布置 DN200 不锈钢连接管、汽水分离器、换热器、冷凝水回收装置、恒压供水装置及相关阀门仪表,同时必须在不停产或少停产条件下完成安全施工。

(3) 方案设计与实施过程

结合热水杀菌锅需要将常温水升温至 121℃、锅炉补水通常为 20℃常温水等实际需求，项目确定采用“废蒸汽与高温冷凝水间接换热回收”的总体方案。废蒸汽和冷凝水先进入汽水分离器，完成气液分离后进入换热器，将热量传递给 RO 水、锅炉补水或车间用水。升温后的水进入锅炉补水箱或恒压供水系统，从而降低锅炉燃气消耗。换热后的冷凝水经加压装置回收到新增汽水分离器或水箱，再用于车间清洗。

设备布局方面,车间杀菌釜排气管道按防串流要求分别接入回收系统,通过 DN200 不锈钢管道与汽水分离器连接,整套机组布置在负一楼合理区域。蒸汽进入换热器后,与 RO 水或冷水进行热交换,升温后的水进入锅炉补水箱或车间热水水箱。冷凝水回收装置、恒压供水装置和水泵配合运行,使热水通过 DN50 管线回到水箱或供水管道,满足车间清洗与工艺辅助用水需求。

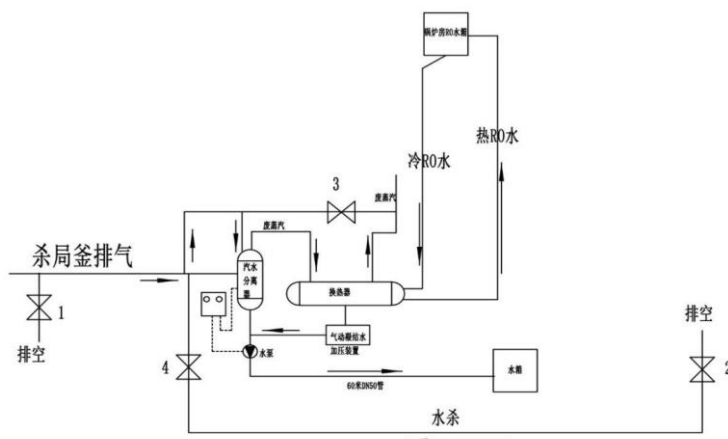


图 1 蒸汽回收工艺流程图

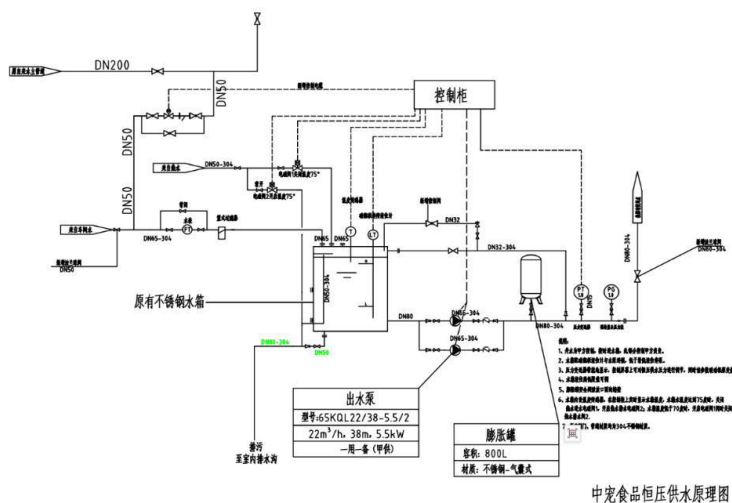


图 2 冷凝水回收工艺流程图

智能控制方面,系统在主管道调节阀、出口温度传感器和压力传感器之间建立联锁控制,通过阀门开度调节保障车间供水温度稳定在 40~60℃之间。施工前对设计图纸进行复核,确认管路走向、接口位置与现场一致;施工中制定分项施工方案和进度节点,验收汽水分离器、换热器、恒压供水装置等设备材料,检查出厂合格证明和性能报告;同时会同安全管理部门办理动火证、登高证,落实现场隔离、应急物资和安全监护,确保改造过程安全可控。安装完成后,开展压力密封测试、设备运行稳定性验证、施工验收与节能效果评估。

(4) 个人工作业绩与作用

在本项目实践中,项目组围绕“现场排查-数据核算-方案设计-设备选型-施工组织-调试验收-效果评估”的闭环开展工作。前期重点完成杀菌釜运行时长、蒸汽排放点、管道规格、排放持续时间、冷凝水去向和锅炉补水需求等基础数据收集,并根据饱和蒸汽密度、管道截面积和流速公式完成 DN50 排放量核算,为方案可行性判断提供数据依据。

方案阶段,项目组结合杀菌釜工艺要求和二次蒸汽酸性风险,明确采用间接换热而非直接回用,避免因水质问题影响锅炉系统和食品安全。实施阶段,项目组协调生产、设备、安全和施工单位,完成管路改造、设备安装、传感器联锁、恒压供水调试和压力密封测试。项目完成后,通过燃气消耗、水资源回收、供水温度和生产稳定性等指标进行综合评估,验证了系统的节能效果和运行可靠性。

(5) 取得的成绩与应用效果

项目改造后,杀菌釜蒸汽直排量由原来的约 4.663t/天转化为可回收热源。供水温度达到约 60℃时,每吨蒸汽对应天然气消耗可降低约 6m³。按白天蒸汽使用量 40t 计算,每天可减少天然气用量约 240m³。按年运行 300 天计算,年节约天然气约 72000Nm³,年节省燃气费用约 30 万元。冷凝水回收利用年均可节约约 4000t,投资回收期约一年。

除直接节能外,项目还改善了车间清洗效率。原系统设备清洗使用常温水,改造后冷凝水换热后水温约 40℃,可提高设备清洗速度,并减少清洗剂消耗。项目运行过程中未对生产效率和产品质量产生负面影响,实现了节能、降本、节水、减排的多重效益。节约燃料也意味着直接减少 CO₂、NO_x 等温室气体和污染物排放,是企业履行社

会责任、落实绿色制造要求的重要路径。

(6) 行业价值与推广应用

本项目形成了以汽水分离、换热回收、冷凝水回用和恒压智能控制为核心的标准化改造模块,可适配食品杀菌釜、蒸煮设备、热水清洗系统等类似场景。其推广价值在于改造投入相对可控,收益来源清晰,既能减少企业燃气和水费支出,又能满足节能审查、碳排放评价和绿色工厂建设要求。

未来,该类系统可进一步向数字化和智能化方向发展。通过对锅炉、蒸汽输配管网、用汽设备、回收装置和清洗用水系统进行整体建模,可以识别泄漏、保温不良、疏水阀失效和局部换热效率低等薄弱环节。企业还可利用 AI 算法和历史运行数据预测负荷变化,自动优化余热回收系统运行策略,实现全厂能源系统协同优化,而不局限于单点余热回收。

综上所述,本创新案例通过蒸汽余热回收与冷凝水协同利用,实现了杀菌釜排放热能的梯级利用,显著降低了中宠股份杀菌釜设备的蒸汽消耗、天然气消耗和运行成本。该系统在不影响杀菌工艺稳定性和产品质量的前提下,将原本直排的废蒸汽和冷凝水转化为锅炉补水预热、车间清洗和辅助用热资源,体现了较高的实用价值。

该案例的意义不仅在于单个工厂节约能源费用,更在于证明食品制造企业可以通过成熟设备集成、现场工艺优化和智能控制实现低风险、可复制的绿色改造。其经验可为同类杀菌釜、蒸煮设备和高温排放场景提供参考,具有举一反三的指导意义。随着企业能源管理精细化和碳排放核算要求不断提高,该类协同回收系统将在食品加工行业节能降碳实践中发挥更大作用。

[参考文献]

- [1]国务院.关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[N].人民日报,2021-10-25(001).
- [2]国家发展和改革委员会.锅炉节能环保技术规程[S].2020.
- [3]刘国平,邵大文.蒸汽式杀菌釜气动控制系统设计及恒温控制[J].液压与气动,1997(6):28-29.

作者简介:魏鑫鑫(1981—),男,山东省高密市人,工程师,山东大学机械工程专业毕业,现就职于烟台中宠食品股份有限公司,从事机械工作,职务是设备与安全生产总监。