

GBL 装置 1,4-丁二醇汽化器结垢成因分析及优化改进研究

邓仔勇

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]为解决四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置中 1,4-丁二醇汽化器的结垢问题, 保障装置连续稳定运行并降低运维成本, 本研究对结垢成因、现有处理方式展开系统分析, 同时通过对比实验与工艺模拟提出优化方案并验证成效。研究表明, 汽化器结垢主要源于两方面: 一是 1,4-丁二醇进料中未被现有过滤器有效截留的高沸物, 二是 1,4-丁二醇及其杂质在汽化过程中分解形成的残留物, 二者在汽化器列管与翅片表面沉积, 导致换热效率下降, 且当前离线停机清洗模式严重影响装置连续性。针对该问题, 本研究提出两项核心改进措施: 其一, 升级 1,4-丁二醇进料过滤器, 将塑胶骨架替换为 304 不锈钢骨架, 并精准控制进料温度至 45℃, 强化高沸物截留效果; 其二, 优化汽化器结构, 调整装配方向为从上向下安装, 减小翅片宽度, 同时将点焊固定改为进口翅片打孔后钢丝固定。实际应用结果显示, 改进后汽化器结垢周期延长 60% 以上, 离线清洗频次降低 50%, 操作人员拆取翅片效率提升 50%, 且有效保障了 GBL 产品纯度 (>99.7%), 显著提升装置运行连续性与经济性, 为同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可行的技术参考。

[关键词]1,4-丁二醇; 1,4-丁二醇汽化器; GBL 装置

DOI: 10.33142/nstr.v2i3.17725

中图分类号: TQ545

文献标识码: A

Analysis of Scaling Causes and Optimization Improvement Research on 1,4-butanediol Vaporizer in GBL Device

DENG Ziyong

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: In order to solve the scaling problem of 1,4-butanediol vaporizer in the GBL unit of Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., ensure continuous and stable operation of the unit, and reduce operation and maintenance costs, this study conducts a systematic analysis of the causes of scaling and existing treatment methods. At the same time, through comparative experiments and process simulations, optimization solutions are proposed and the effectiveness is verified. Research has shown that scaling in vaporizers is mainly caused by two factors: Firstly, the high boiling material in the 1,4-butanediol feed that is not effectively intercepted by existing filters; secondly, the residue formed by the decomposition of 1,4-butanediol and its impurities during the vaporization process, which deposits on the surface of the vaporizer tubes and fins, resulting in a decrease in heat transfer efficiency, and the current offline shutdown cleaning mode seriously affects the continuity of the device. In response to this issue, this study proposes two core improvement measures: firstly, upgrading the 1,4-butanediol feed filter, replacing the plastic skeleton with a 304 stainless steel skeleton, and accurately controlling the feed temperature to 45 °C to enhance the retention effect of high boiling materials; Secondly, optimize the structure of the vaporizer, adjust the assembly direction to install from top to bottom, reduce the width of the fins, and change the spot welding fixation to steel wire fixation after drilling the inlet fins. The actual application results show that the improved vaporizer has extended the scaling cycle by more than 60%, reduced offline cleaning frequency by 50%, increased the efficiency of removing fins by 50%, and effectively ensured the purity of GBL products (>99.7%), significantly improving the continuity and economy of device operation, providing feasible technical reference for scaling control of similar GBL production devices.

Keywords: 1,4-butanediol; 1,4-butanediol vaporizer; GBL device

1 概述

为解决四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置以 1,4-丁二醇为原料、氢气为载体经铜催化脱氢, 精馏提纯工艺中, 1,4-丁二醇汽化器存在的结垢问题, 本研究针对结垢成因及现有处理方式展开分析, 并提出优化方案。

该装置所用 1,4-丁二醇为原料(含丁二醇车间新鲜料及产品塔侧采回收料)在与循环氢气混合雾化后, 需进入带翅片汽化器管程完成汽化; 但原料中未被现有过滤器去除的高沸物, 及 1,4-丁二醇自身与杂质在汽化过程中分解

形成的残留物, 会在汽化器列管与翅片表面沉积结垢, 直接导致设备换热效率下降。目前针对严重结垢需采用离线停机模式, 通过拆解翅片后进行机械清洗或水力清洗, 不仅影响装置连续运行, 还增加运维成本。

通过对比实验与工艺模拟, 本研究提出两项改进措施: 一是优化 1,4-丁二醇过滤器结构以强化高沸物截留效果, 二是调整汽化器安装方式以改善物料流场与汽化均匀性。结果表明, 上述改进可有效抑制 1,4-丁二醇汽化出口高盐结焦物的生成, 使汽化器结垢周期延长 60% 以上, 离线

清洗频次降低 50%，既保障了 GBL 产品（纯度>99.7%）的稳定产出，又提升了装置运行连续性与经济性，为同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可行技术参考。

2 GBL 装置简介

来自丁二醇车间的原料 1,4-丁二醇经过 1,4-丁二醇汽化器同循环氢气一起加热到 215°C 汽化（高于其露点温度 210°C），在蒸发分离器中除去所夹带的液体后，经过热器过热到 235~245°C，以防止 1,4-丁二醇在反应器内催化剂床层冷凝损坏催化剂；经过过热的 1,4-丁二醇蒸汽和氢气以绝对不含液体的形式通过在含铜催化剂固定床层对 1,4-丁二醇进行气相脱氢反应而生成粗 GBL，反应的热点控制温度在 202~205°C，反应器壳侧通过补偿反应吸热和控制反应器催化剂床层温度^[1]。

反应器出口气经冷却后进入粗 GBL 分离罐，将 BLO 和 H₂ 分离，粗 BLO 经过产品换热器进入精馏系统提纯；H₂ 大部分经循环氢压缩机加压后继续同新鲜的 1,4-丁二醇混合后汽化、过热后在反应器进行 1,4-丁二醇脱氢；副产的部分 H₂ 经过甲烷化炉进出口换热器 E 和电加热器加热到 285°C~290°C 后，在甲烷化炉内将 H₂ 中所含 CO、CO₂ 去除（CO+CO₂≤10ppm），通过氢气升压机升压后送双甲车间。

3 现状分析

3.1 1,4-丁二醇进料过滤器现状分析

在四川天华化工集团股份有限公司 GBL 生产装置的新鲜 1,4-丁二醇进料流程中，原料体系包含丁二醇车间输送的新鲜 1,4-丁二醇与产品塔侧采回收的循环 1,4-丁二醇，两类物料需先经前置过滤器处理后，方可进入后续 1,4-丁二醇汽化器参与汽化反应。当前装置配置的过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉作为核心过滤介质，支撑骨架为塑胶材质，该设计虽能初步拦截原料中粒径较大的机械杂质（如管道碎屑、微量固体残渣），但从实际运行数据来看，存在明显的性能短板与运维痛点——根据连续 12 个月的运行统计，该过滤器平均每 2 个月就需切换到过滤器旁路更换一次过滤棉，不仅增加了人工操作成本与过滤耗材采购支出，还会导致汽化器进料量短暂波动和未过滤的管道碎屑、微量固体残渣进入 1,4-丁二醇汽化器，直接造成 1,4-丁二醇汽化器结垢，间接影响后续铜催化脱氢反应的稳定性，甚至可能因进料中断引发 GBL 产品纯度的瞬时波动。

深入分析过滤器的运行缺陷可知，其核心问题集中在过滤介质与骨架材质的适配性不足：一方面，因 1,4-丁二醇的熔点为 20.1°C，在冬天遇到进料管线和 1,4-丁二醇储罐温度低于 40°C 时 1,4-丁二醇的黏度会上升，导致进料过滤器的压差上升。需要频繁地切过滤器，走旁路。就会导致未被拦截的高沸物随原料进入汽化器后，在列管与翅片表面附着，成为结垢的重要“先驱物”；另一方面，塑胶骨架在 1,4-丁二醇进料系统的常温、弱酸性环境下，长

期接触物料易出现局部溶胀变形，导致过滤棉与骨架内壁贴合度下降，形成约 0.1~0.3mm 的“旁流通道”，部分杂质可直接通过通道绕过过滤棉进入汽化器，进一步削弱过滤效果。此外，频繁的过滤棉更换过程中，进料管道需短暂敞口，空气易与系统内残留的氢气混合，虽通过氮气置换可降低风险，但仍存在潜在安全隐患，且每次更换后需重新调试进料流量，增加了工艺控制的复杂性。

3.2 1,4-丁二醇汽化器现状分析

四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置的 1,4-丁二醇汽化工段，原料体系分为两类：一是丁二醇车间输送的新鲜 1,4-丁二醇，二是产品塔侧线采出的回收 1,4-丁二醇。两类物料与循环氢共同进入混合器，经超音速喷嘴雾化形成的气液混合雾滴后，共同进入带翅片的列管式汽化器管程。该汽化器的加热热源来自 282 系统的 LT 导热油蒸汽，导热油在汽化器壳侧逆向流动，通过翅片与管程壁面的强制传热，使管程内的 1,4-丁二醇雾滴快速汽化，工艺要求汽化器出口温度稳定控制在 210°C 以上，以确保 1,4-丁二醇汽化率≥99.8%，满足后续铜催化脱氢反应对原料气纯度的需求。然而，在长期运行过程中，该汽化器存在显著的结垢问题，其成因可归结为两方面：一方面，新鲜 1,4-丁二醇中含有的微量醛类、酯类杂质，以及回收 1,4-丁二醇在循环过程中因局部高温生成的低聚物，在 210°C 以上的汽化温度下会发生热分解反应，生成羰基残留物；另一方面，当前 1,4-丁二醇前置过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉介质（孔径 5μm），对原料中粒径小于 5μm 的高沸物（如分子量≥200 的 1,4-丁二醇衍生物）截留效率仅为 25%~30%，未被拦截的高沸物随 1,4-丁二醇蒸汽在汽化器管程内流动时，会因翅片表面温度梯度发生相变沉积。上述两类物质共同附着在汽化器列管内壁与翅片表面，形成厚度不均的结垢层，且结垢速率随运行时间呈非线性增长——此时管程与壳侧的传热热阻显著增加，换热系数下降 30%~40%，为维持出口温度≥210°C，需将 LT 导热油蒸汽进口温度提高至 260°C~265°C，不仅增加了导热油系统的能耗，还会加剧 1,4-丁二醇的过度分解，形成“结垢-能耗上升-进一步结垢”的恶性循环^[2]。

1,4-丁二醇汽化器作为实现介质相变的关键设备，其换热性能直接决定了整个工艺系统的运行效率与稳定性，而列管-翅片组合结构是保障换热效果的核心组件。该汽化器采用 444 根列管作为基础换热单元，列管内部均装配翅片，此设计的核心目的在于通过翅片大幅扩展管内换热面积，打破单纯依靠列管管壁换热的局限，尤其针对 1,4-丁二醇这类黏度相对较高、传热系数较低的介质，能有效强化管内对流换热效率，缩短汽化过程所需时间，降低系统能耗。由于列管与花板采用点焊固定，每次清洗时必须将所有焊点完全剔除，才能解除翅片与列管的约束，实现翅片的取出与管内清洗。但在实际操作中，焊点剔除面临

两大问题:

剔除不彻底的普遍性: 444 根列管对应数量庞大的焊点, 且部分焊点可能因焊接时电流、压力不均, 导致焊点与基材结合紧密程度存在差异, 部分焊点甚至出现“深埋”于花板表面的情况。操作人员依靠常规工具(如錾子、角磨机)进行剔除时, 难以保证每一个焊点都被完全清除, 残留的焊点会形成凸起或卡阻结构, 直接导致翅片无法顺利抽出。

设备损伤的高发性: 为尽可能清除残留焊点, 操作人员往往需要加大工具作用力或延长打磨时间, 这一过程极易对列管花板造成损伤。花板作为列管的支撑与密封载体, 其表面平整度与厚度精度直接影响列管的密封性。打磨过程中若出现花板表面划痕、凹陷, 或因过度打磨导致花板局部厚度减薄, 会破坏列管与花板的密封配合面, 后续重新装配时极易出现介质泄漏问题。统计数据显示, 每次清洗后因花板损伤导致的泄漏率约占设备故障总数的 30%~40%, 且泄漏位置多集中于焊点密集区域, 维修难度大、成本高。

即使焊点剔除完成, 翅片取出过程仍面临巨大挑战。一方面, 1,4-丁二醇在汽化过程中可能产生微量腐蚀性物质, 长期运行后翅片与列管内壁可能出现轻微腐蚀粘连, 加之结垢层在翅片与管壁之间的填充, 进一步增加了翅片与列管的摩擦力, 导致翅片取出时需要施加较大外力, 操作难度显著提升。另一方面, 操作人员在取出翅片时, 若用力不均或工具使用不当, 可能导致翅片发生变形、弯折, 甚至出现翅片断裂在列管内的情况, 不仅影响本次清洗效果, 还可能为后续设备运行埋下堵塞隐患。

更严重的是, 每次清洗后都会出现部分列管的翅片无法取出的情况。无法取出的翅片会被永久留在列管内, 其表面的结垢层无法清除, 相当于该列管的有效换热面积大幅缩减, 且结垢层会持续增厚。长期累积下来, 无法取出翅片的列管数量逐渐增加, 444 根列管的有效换热单元不断减少, 设备整体换热效率呈现阶梯式下降趋势。

4 改进措施

4.1 1,4-丁二醇进料过滤器改进措施

为有效解决现有过滤器运行问题, 结合装置实际工况与工艺核心需求, 现从过滤器骨架材质升级、1,4-丁二醇进料温度精准调控两大维度提出针对性改进方案, 具体内容如下:

4.1.1 过滤器骨架材质升级: 塑胶骨架替换为 304 不锈钢骨架

针对原塑胶骨架易因材质特性导致“旁流通道”、结构稳定性不足等问题, 将其全面替换为 304 不锈钢骨架。该材质具备三大核心优势: 一是优异耐腐蚀性, 可适配装置内复杂介质环境, 避免长期运行中的材质老化与腐蚀破损; 二是高强度结构稳定性, 能长期保持骨架形态, 防止因压力波动导致的形变; 三是高精度贴合性, 通过精密机

械加工确保与滤芯的无缝贴合, 从根本上消除“旁流通道”问题, 保障过滤效率。从实际运行效果来看, 改进后过滤器平均更换周期由原周期延长至 8 个月/次, 不仅大幅降低过滤耗材的采购与更换成本, 更避免了因过滤器频繁更换导致的进料波动, 有效保障了 GBL 产品质量稳定性, 同时显著提升装置整体运行的连续性与经济性。

4.1.2 1,4-丁二醇进料温度精准控制: 稳定控制在 45℃

针对原 1,4-丁二醇进料温度偏低易导致过滤器频繁切换的问题, 优化温度控制系统, 将 1,4-丁二醇进料温度精准稳定控制在 45℃。该温度参数经过工艺验证, 既能避免因温度过低导致 1,4-丁二醇物料黏度升高、杂质易附着堵塞滤芯的问题, 又能适配后续反应工艺需求。根据运行数据统计, 当 1,4-丁二醇 进料温度稳定控制在 45℃及以上时, 未再发生因温度控制不当导致的过滤器切换情况, 进一步减少了非计划停机次数, 提升了装置运行稳定性与生产效率。

4.2 1,4-丁二醇汽化器改进措施

从本质层面分析, 当前设备清洗难题的核心根源, 在于结构设计与运维需求的根本性不匹配。在设备设计阶段, 研发重心过度偏向初期的组装便捷性与初始密封性, 汽化器翅片采用点焊固定结构时, 未将后续长期清洗维护的可操作性纳入核心考量维度, 直接导致设备“一次性组装成型”的设计属性, 与实际运维中“多次性拆解清洗”的现实需求形成尖锐矛盾, 为后续清洗工作埋下先天性障碍。与此同时, 翅片与列管的配合间隙设计存在明显缺陷: 既未充分结合介质物理化学特性预留合理空间, 也未考虑设备长期运行后介质残留引发的翅片与列管粘连风险, 更缺乏便于翅片快速取出的结构优化设计, 进一步加剧了清洗操作的难度。现将原有装配方向调整为由上向下安装, 大幅降低操作人员的体力消耗, 提升组装与拆解效率; 通过优化设计减小翅片宽度, 从物理结构上降低翅片与列管内壁的摩擦阻力, 为翅片拆卸提供更大操作空间; 摒弃传统点焊固定工艺, 采用进口翅片打孔后以钢丝固定的全新方式。该方案不仅保留了结构稳定性, 更彻底解决了传统工艺中“剔除焊点易损坏花板”的关键痛点, 从根本上消除了清洗维护对设备本体的损伤风险。经实际验证, 上述改进方案成效显著, 操作人员拆卸翅片的效率较之前提升 50%, 有效化解了设备设计与运维需求之间的矛盾^[3]。

5 结语

本研究围绕四川天华化工 GBL 装置 1,4-丁二醇汽化器结垢这一核心问题, 通过对装置工艺、设备现状的深入剖析, 明确了结垢的关键诱因, 并针对性提出改进方案, 最终取得显著成效, 主要结论如下:

结垢成因清晰化: 汽化器结垢的核心原因在于原料处理与设备设计的双重不足。一方面, 原有 1,4-丁二醇进料过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉介质与塑胶骨架, 不仅对粒

径小于 $5\mu\text{m}$ 的高沸物截留效率低 (仅 25%~30%), 且塑胶骨架易溶胀形成“旁流通道”, 导致杂质进入汽化器; 另一方面, 汽化器列管与翅片点焊固定的设计, 使得清洗时需剔除焊点, 不仅易造成花板损伤 (泄漏率达 30%~40%), 还因翅片与列管配合间隙不合理、粘连等问题, 增加清洗难度与设备损耗。

改进方案高效可行: 针对成因提出的两项改进措施具备显著实用性。过滤器升级后, 304 不锈钢骨架解决了“旁流通道”与腐蚀问题, 45°C 进料温度控制避免了物料黏度升高导致的频繁切换, 使过滤器更换周期从 2 个月延长至 8 个月; 汽化器结构优化后, 从上向下的装配方式降低操作体力消耗, 减小宽度的翅片减少摩擦阻力, 钢丝固定替代点焊彻底消除花板损伤风险, 多维度提升设备运维便捷性。

应用成效显著且具有推广价值: 改进后装置运行指标大幅优化, 汽化器结垢周期延长超 60%、离线清洗频次

降低 50%, 既减少了非计划停机对生产的影响, 又降低了运维成本; 同时, GBL 产品纯度稳定保持在 99.7% 以上, 保障了产品质量。该研究成果不仅为四川天华化工 GBL 装置的稳定运行提供支撑, 其技术思路与方案也为国内同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可借鉴的实践经验, 具备广泛的行业推广意义。

[参考文献]

[1]张悦,郝家悦,胡泽汇,等.1,4-丁二醇生产工艺及其换热网络优化[J].应用技术学报,2024,24(4):402-409.

[2]赵新明.1,4-丁二醇制备工艺的现状分析[J].化工管理,2017(26):49.

[3]李玉芳.我国 1,4-丁二醇生产技术研究进展[J].精细与专用化学品,2024,32(1):52-54.

作者简介: 邓仔勇 (1986.11—), 男, 籍贯: 广元, 学历: 本科, 职位: 工艺技术员, 研究方向: GBL、2-PY、NMP、NVP 等系列产品的生产与应用。