

高效节能型铝材涂层线热风循环系统优化设计

张 炜

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 本文以典型连续式铝材涂层线为研究对象,深入剖析现有热风循环系统存在的能效瓶颈,包括热源利用率低、气流组织不合理、余热回收不足及控制策略粗放等问题。在此基础上,提出一套系统性的优化设计方案,涵盖热力学建模、气流动力学仿真(CFD)、多级余热梯级利用、智能温控算法及设备选型升级等关键技术路径。通过构建完整热平衡模型与三维流场仿真,精准识别能量损失节点;引入板式换热器与热管技术实现废气显热与潜热的高效回收;结合PID模糊自适应控制策略,提升系统响应精度与稳定性。本研究不仅为铝材涂层线节能改造提供了可复制的技术范式,也为其他工业热工系统的能效提升提供了理论参考与实践路径。

关键词: 铝材涂层; 热风循环系统; 节能优化; 余热回收; CFD仿真; 智能控制; 碳减排

引言

为提升铝材表面性能与美观度,涂层处理(如粉末喷涂、氟碳喷涂、辊涂等)已成为铝材深加工的关键工序。在涂层工艺中,热风循环系统负责提供稳定、均匀且可控的热环境,以完成涂层的流平、固化或烘干过程,是保障产品质量的核心环节。然而,传统热风循环系统普遍存在能耗高、热效率低的问题。在能源价格持续上涨与环保法规日益严格的双重驱动下,如何实现热风系统的高效节能运行,已成为行业亟待解决的技术难题。然而,现有研究多聚焦于单一技术点,缺乏对热风循环系统全生命周期、全要素的集成优化设计,尤其在高温($>200^{\circ}\text{C}$)铝材涂层场景下的适用性仍有待验证。本文立足于工程实践,以系统工程思想为指导,从热力学、流体力学与自动控制多学科交叉视角出发,旨在提出一套适用于高温铝材涂层线的高效节能型热风循环系统整体解决方案,为行业绿色低碳发展提供技术支撑。

1 热风循环系统能效瓶颈分析

典型的铝材涂层线热风循环系统主要由燃烧器(或电加热器)、循环风机、换热器、风管网、烘道(固化炉)及排废系统组成。通过对多家铝材企业的现场调研与能效测试,发现其主要存在以下能效瓶颈:

1.1 热源转换效率偏低

当前多数铝材企业仍采用传统的直燃式燃气燃烧器作为热源,这类设备虽然结构简单、投资成本低,但其排烟温度普遍高达 250°C 至 350°C ,导致大量高温烟气携带的显热未经有效利用便直接排入大气。即便部分企业配置了基础的气-气换热器用于预热助燃空气,但由于换热面积设计不足、长期运行后积灰堵塞严重以及材质耐腐蚀性差等问题,实际热回收效率通常难以超过40%。这

仅造成能源浪费,也增加了单位产品的碳足迹,与当前绿色制造的要求相悖。

1.2 烘道内气流组织不合理

烘道作为热风与铝材发生热交换的核心区域,其内部气流分布的合理性直接关系到涂层固化的均匀性与能源利用效率。然而,许多现有烘道在设计阶段缺乏科学的流体力学依据,仅凭经验布置风嘴与回风口,导致内部气流出现短路、死区或局部涡流等不良现象。这些非理想流动状态使得部分铝材区域受热不足,而另一些区域则过热,温差常超出 $\pm 15^{\circ}\text{C}$,远高于工艺要求的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 控制范围。为弥补冷点区域的固化不足,操作人员往往被迫整体提高设定温度,从而引发系统性能能源浪费,并可能因局部过热导致涂层黄变或附着力下降。

1.3 余热资源未梯级利用

在铝材涂层过程中,尤其是水性涂料或含溶剂体系的固化阶段,会产生大量温度在 180°C ~ 220°C 之间的高温废气,其中不仅含有显热,还包含水蒸气冷凝释放的潜热。然而,当前多数生产线对这部分余热资源缺乏系统规划,要么直接送入RTO(蓄热式焚烧炉)进行高温焚烧处理,仅关注VOCs达标排放而忽视热能回收;要么在无组织排放中白白浪费^[1]。这种“高质低用”甚至“弃之不用”的做法,严重违背了能量梯级利用的基本原则,未能实现热能价值的最大化。

1.4 控制策略滞后

现有热风系统的温度控制多依赖简单的开关控制或固定参数的PID控制器,缺乏对动态工况的适应能力。当生产负荷变化(如不同截面铝材切换)、环境温度波动或设备性能衰减时,系统无法及时调整供热强度与风量匹配,往往出现响应迟缓、超调严重或频繁启停等问题。

这种粗放式的控制方式不仅降低了热效率，还加剧了设备磨损，影响系统长期运行的稳定性与可靠性，进一步制约了节能潜力的释放。

2 优化设计总体思路

针对上述问题，本文提出“源头减量、过程优化、末端回收、智能调控”四位一体的优化设计框架。该框架强调从能源输入端入手，通过提升燃烧效率降低初始能耗；在热交换过程中，借助CFD仿真手段优化烘道内部结构，实现气流均匀分布与高效传热；在系统末端，构建多级余热回收网络，对不同品位的热能进行分级利用；同时，引入先进的智能控制算法，实现按需精准供热。这一系统性思路打破了传统“头痛医头、脚痛医脚”的局部改造模式，实现了热风循环系统全链条的能效协同提升。

3 关键技术路径与实施方案

3.1 热力学建模与能效诊断

为精准识别系统能效瓶颈，首先需建立完整热平衡模型。

$$Q_{in} = Q_{useful} + Q_{loss,exhaust} + Q_{loss,wall} + Q_{loss,leakage}$$

其中， Q_{in} 由燃气低位热值与实测耗气量计算得出； Q_{useful} 指用于铝材本体升温、水分蒸发及涂层交联固化的有效热量；其余三项分别对应排烟热损失、炉体壁面散热损失以及系统密封不良导致的漏风热损失。在此基础上，通过在关键节点部署高精度热电偶、气体流量计、烟气成分分析仪及红外热像仪等传感设备，对系统在典型工况下的运行参数进行连续采集与分析。借助反演计算方法，可定量解析各项损失在总能耗中的占比。

3.2 CFD仿真驱动的气流组织优化

烘道内部气流分布的均匀性直接决定了热交换效率与涂层质量的一致性。为克服传统经验设计的局限性，本文采用ANSYS Fluent软件对烘道内三维稳态流场进行数值模拟。模型边界条件严格依据实际工艺设定：入口设为速度入口，风速范围控制在8~12m/s以兼顾换热强度与能耗；出口设为压力出口；铝材表面定义为与生产线同步移动的壁面，以真实反映相对运动对边界层的影响；炉体外壁则根据实测散热情况，设定为绝热或赋予特定对流换热系数。在此基础上，系统对比了多种导流结构方案，包括不同倾角的上部导流板、下部均流格栅的开孔率、侧向回风口的位置与数量等^[2]。当在烘道上部设置可调倾角导流板、下部增设多孔均流格栅时，热风能够形成稳定的“S”形穿透路径，有效覆盖铝材上下表面及间隙区域，显著削弱了局部涡流与流动死区。优化后，烘道横截面温度最大偏差由改造前的 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 4.2^{\circ}\text{C}$ ，完全满足氟碳涂层固化对温度均匀性的严苛要求（ $\pm 5^{\circ}\text{C}$

以内），为降低整体设定温度、减少无效加热创造了技术前提。

3.3 多级余热梯级利用系统设计

针对系统末端高温废气热能未被充分利用的问题，本文提出并实施了一套三级余热梯级回收方案，充分遵循“温度对口、梯级利用”的热力学原则。第一级（高温段）在燃烧器排烟管道（烟温 $> 300^{\circ}\text{C}$ ）加装耐腐蚀不锈钢板式换热器，将助燃空气预热至 180°C ，显著提升燃烧效率，实测热回收效率达65%；第二级（中温段）在烘道排废管道（废气温度 $180\sim 220^{\circ}\text{C}$ ）安装重力热管换热器，用于预热新风至 120°C ，该热风可灵活用于前处理清洗槽的保温维持，或在冬季作为车间辅助供暖热源，实现中品位热能的就地消纳；第三级（低温段）针对含湿量较高的废气，配置冷凝式余热回收装置，在降温除湿的同时回收水蒸气冷凝释放的潜热，冷凝水经简单过滤与pH调节后回用于清洗工序，实现水资源与热能的双重节约。通过上述三级协同回收，系统综合热回收率由改造前不足40%提升至82%，大幅降低了对外部能源的依赖，体现了循环经济与资源高效利用的理念。

3.4 智能温控系统开发

传统热风系统普遍采用固定参数的PID控制器或简单的开关控制，难以适应生产负荷波动、环境变化及材料差异带来的动态扰动。为此，本文开发了一套基于模糊自适应PID的智能温控算法。该算法的核心在于实时监测温度偏差 $e(t)$ 及其变化率 $de(t)/dt$ ，并据此动态调整比例增益 K_p 、积分时间 K_i 和微分系数 K_d 。模糊规则库依据专家经验与历史运行数据构建，例如：“若偏差为负大（NB）且变化率为负小（NS），则大幅增加 K_p 以加速升温”；“若偏差接近零（ZO）且变化率为正小（PS），则适度增大 K_d 以抑制超调”。该控制策略通过工业PLC编程实现，并与变频风机深度联动，可根据铝材的厚度、颜色（影响表面吸热率）、运行速度及室外环境温度等多维变量，自动调节送风量与燃烧功率，真正实现“按需供热、精准控温”^[3]。实际运行数据显示，系统超调量降低60%，稳态温度波动控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内，显著提升了工艺稳定性与能源利用效率。

3.5 关键设备选型与升级

在系统架构与控制策略优化的同时，对核心硬件设备进行同步升级是保障整体能效提升的关键支撑。首先，将原有普通直燃式燃烧器更换为低氮氧化物（ NO_x 排放 $< 30\text{mg}/\text{m}^3$ ）比例调节式燃烧器，其具备10:1的宽域调节比，可在10%~100%负荷范围内稳定燃烧，避免了传统设备在低负荷下的频繁启停与不完全燃烧问题，既节能又环保。其

次,循环风机由传统异步电机驱动升级为永磁同步电机(PMSM)驱动的高效离心风机,并配套高精度矢量变频器。PMSM具有功率因数高、效率平台宽、响应速度快等优势,在部分负荷工况下节电效果尤为显著,实测整机节电率达25%以上。最后,烘道壳体保温结构由常规岩棉+镀锌钢板组合,全面替换为纳米微孔绝热复合板^[4]。该材料内部由纳米级孔隙构成,有效抑制了气体对流与固体传导,导热系数低至 $\leq 0.025\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,仅为传统保温材料的1/3~1/2。改造后,烘道外壁平均表面温度由原65℃降至35℃以下,不仅大幅减少了散热损失,也显著改善了操作环境的安全性与舒适性。上述设备升级与系统级优化形成有机整体,共同构筑了高效、稳定、绿色的新型热风循环体系。

4 工程应用与效益分析

4.1 案例概况

本研究选取华南地区一家大型铝材制造企业的一条氟碳喷涂生产线作为改造对象。该线年设计产能6万吨,原热风系统采用直燃式燃气加热,年消耗天然气约168万立方米,能效水平处于行业平均水平偏下。

4.2 改造内容

改造工程主要包括:拆除原有简易换热器,新建包含板式换热器、热管换热器及冷凝回收装置的三级余热回收系统;依据CFD仿真结果,重新制作并安装烘道内部导流结构;更换燃烧器与循环风机;部署基于模糊自适应PID的智能温控系统,并接入工厂能源管理平台。

4.3 运行效果对比

项目投运六个月后,对系统进行全面能效评估。数据显示,天然气单耗由改造前的 $28.0\text{m}^3/\text{吨}$ 铝材降至 $20.0\text{m}^3/\text{吨}$,降幅达28.6%;烘道内温度均匀性显著改善,最大温差控制在 $\pm 4.2^\circ\text{C}$;得益于热环境的稳定,涂层一次合格

率由97.2%提升至99.0%。按年产能6万吨计算,年节约天然气48万立方米,折合标准煤420吨,减少二氧化碳排放约1100吨。在经济效益方面,项目总投资380万元,年节约燃气费用约190万元(按3.5元/ m^3 计),静态投资回收期不足2年,具有显著的经济与环境双重效益。

5 结语

本文针对铝材涂层线热风循环系统的高能耗问题,提出了一套集热力学建模、CFD仿真、余热梯级利用与智能控制于一体的系统性优化方案。工程实践证明,该方案可实现近30%的综合节能率,在保障甚至提升产品质量的同时,大幅降低碳排放与运营成本。未来研究可进一步探索以下方向:一是将数字孪生技术引入热风系统,构建虚实映射的数字模型,实现虚拟调试、故障预警与运行参数在线优化;二是探索与厂区分布式光伏、储能系统的耦合,构建“光-储-热”多能互补的零碳热工系统;三是利用深度强化学习等先进AI算法,在复杂多变的生产环境中实现系统运行策略的自主进化与全局最优。随着智能制造与绿色制造的深度融合,高效节能型热工系统将成为铝材乃至整个金属表面处理行业高质量发展的核心竞争力。

参考文献

- [1]王建国,李志强,张伟.工业炉窑余热回收技术研究进展与应用[J].节能技术,2023,41(2):112-118.
- [2]刘洋,陈明,黄海波.基于CFD的铝型材喷涂固化炉内流场与温度场优化[J].材料保护,2022,55(7):89-94.
- [3]赵磊,孙健,周涛.多级余热回收系统在金属表面处理生产线中的应用[J].暖通空调,2021,51(10):102-107.
- [4]吴晓峰,郑浩,林峰.模糊自适应PID控制在工业烘道温度系统中的应用[J].自动化仪表,2020,41(5):45-49.