

涂层线烘烤温度场均匀性对铝材涂层附着力的影响研究

张 炜

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要：铝材因其密度低、强度高、耐腐蚀性好及可回收性强等优点，在建筑、交通、电子和包装等领域得到广泛应用。为了提升其装饰性、耐候性和功能性，常需在其表面施加有机涂层（如聚酯、氟碳、丙烯酸等）。涂层固化是涂装工艺中的关键环节，通常通过烘烤实现。烘烤过程中，炉内温度场的均匀性直接影响涂层的交联反应程度、内应力分布及与基材界面的结合状态，进而显著影响涂层附着力这一核心性能指标。本文系统探讨了涂层线烘烤温度场均匀性的定义、评价方法及其对铝材涂层附着力的作用机理。研究结果表明，温度场不均匀会导致涂层局部过烘烤或欠烘烤，破坏涂层-基材界面的化学键合与物理锚固，从而引发附着力下降甚至失效。最后，本文提出了优化烘烤温度场均匀性的技术路径，为提升铝材涂层产品质量和稳定性提供了理论依据与实践指导。

关键词：铝材；涂层；烘烤固化；温度场均匀性；附着力；交联反应

引言

随着现代工业对材料表面性能要求的不断提高，铝材表面涂装技术已成为提升其附加值和应用广度的关键手段。在众多涂装工艺中，辊涂（coilcoating）因其高效、连续、环保的特点，成为铝材预涂装的主流方式。辊涂工艺流程通常包括脱脂、水洗、钝化（或无铬转化处理）、底漆涂覆、烘烤、面漆涂覆、二次烘烤及冷却等步骤。其中，烘烤固化环节至关重要，它不仅决定了涂层的最终物理化学性能，更直接关系到涂层与铝基材之间的附着力。附着力是衡量涂层抵抗从基材表面剥离能力的核心指标，是涂层发挥防护与装饰功能的前提。国际标准（如ISO2409、ASTMD3359）和行业规范均将附着力列为必检项目。然而，在实际生产中，即使采用相同的涂料配方和前处理工艺，不同批次或同一批次不同位置的铝卷仍可能出现附着力不合格的现象^[1]。大量现场调研和失效分析表明，烘烤炉内温度场的不均匀性是导致此类问题的重要诱因之一。烘烤炉作为热能传递设备，其内部温度分布受加热方式（热风对流、红外辐射、组合式）、气流组织、炉体结构、传送速度及负载量等多种因素影响，难以做到绝对均匀。微小的温度差异（ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 甚至更小）在特定条件下即可对涂层的固化动力学产生显著影响。因此，深入研究烘烤温度场均匀性与铝材涂层附着力之间的内在关联，对于优化涂装工艺、提升产品质量一致性具有重要的理论价值和现实意义。

1 烘烤温度场均匀性的内涵与评价

1.1 温度场均匀性的定义

在涂层烘烤工艺中，温度场均匀性是指在烘烤炉的有效工作区域内，空间各点在同一时刻的温度偏差程度，

以及同一空间点在时间维度上的温度波动程度。理想的烘烤环境应保证所有被涂物在通过烘烤区时，都能经历完全一致的热历程（thermalhistory），即相同的峰值温度和保温时间。

温度场不均匀主要表现为两种形式：①空间不均匀性：沿炉宽方向（横向）或炉长方向（纵向）存在温度梯度。例如，炉膛中心与边缘、上部与下部的温差。②时间不均匀性：由于燃烧器/加热元件控制精度、气流扰动等原因，导致某一点的温度随时间发生波动。

1.2 温度场均匀性的评价方法

评价烘烤炉温度场均匀性通常采用“炉温跟踪仪”（也称“黑匣子”或“DATAPAQ”）。该设备由多通道热电偶、隔热保护盒和数据记录器组成。测试时，将热电偶牢固地粘贴在模拟工件（通常为与产品相同材质和厚度的铝板）的不同位置，随生产线一同通过烘烤炉。出炉后，通过专用软件读取并分析各测点的完整热历程曲线。

关键评价指标包括：①最大温差（ ΔT_{max} ）：所有测点在同一时刻记录到的最高温度与最低温度之差。②有效固化区温差：在涂层达到玻璃化转变温度（ T_g ）至完成交联反应的关键温度区间内的温差。③温度均匀性指数（TUI）：一种综合评价指标，考虑了温差和持续时间的影响。

行业普遍认为，对于高性能铝材涂层（如氟碳涂层），烘烤炉的有效工作区温差应控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内；对于普通聚酯涂层，可放宽至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。超出此范围，涂层性能的一致性将面临风险。

2 铝材涂层附着力的形成机理

涂层附着力并非单一作用力的结果，而是多种界面

相互作用的综合体现,主要包括:

2.1 机械嵌合 (Mechanical Interlocking)

这是最直观的附着形式。经过前处理(如化学蚀刻或物理喷砂)的铝材表面会形成微观粗糙结构。液态涂料在涂覆过程中能充分润湿并流入这些微孔和凹槽中,固化后形成无数微小的“锚”,将涂层机械地锁在基材上^[2]。烘烤温度直接影响涂料的流动性,进而影响其对基材微观形貌的复制能力。

2.2 物理吸附 (Physical Adsorption)

涂层分子与铝材表面原子之间通过范德华力(Vander Waals forces)和氢键等次价键力相互吸引。这种作用力虽然较弱,但普遍存在,是附着力的基础组成部分。良好的润湿性是实现有效物理吸附的前提,而润湿性又受温度影响。

2.3 化学键合 (Chemical Bonding)

这是最强的附着形式。在理想情况下,涂层中的活性官能团(如羧基-COOH、羟基-OH)能与铝材表面的氧化铝(Al_2O_3)或转化膜层发生化学反应,形成共价键或配位键。例如,某些底漆树脂设计有能与铝表面羟基(-OH)反应的基团。烘烤过程为这种化学反应提供了活化能,温度不足则反应不完全,温度过高则可能导致已形成的键断裂。

2.4 扩散理论 (Diffusion Theory)

对于某些热塑性或部分热固性体系,涂层中的小分子或链段在高温下可能向基材表层发生一定程度的扩散,反之亦然,从而在界面处形成一个渐变的过渡层,增强结合力。烘烤温度是驱动这种扩散过程的关键参数。

综上所述,涂层附着力的形成是一个复杂的、多因素耦合的过程,而烘烤温度作为贯穿始终的能量输入,对上述所有机理均有决定性影响。

3 温度场不均匀性对涂层附着力的影响机理

3.1 欠烘烤区域的影响

当铝材通过烘烤炉中温度偏低的区域时,涂层无法获得足够能量完成预期的交联反应,从而进入欠烘烤状态。在此状态下,聚合物网络结构发育不全,交联密度远低于设计值,导致涂层本体强度和内聚力显著下降。在进行附着力测试时,涂层往往不是从界面剥离,而是在内部发生断裂,表现为内聚破坏。同时,由于温度不足,涂料中的溶剂或水分未能充分挥发,残留在涂层-基材界面,形成一层连续或不连续的薄弱层,阻碍了涂层与基材的有效接触,抑制了机械嵌合与化学键合的形成^[1]。此外,低温下涂料粘度较高,流动性差,难以充分润湿经前处理形成的微观粗糙结构,进一步削弱了机械锚

固效应。这些因素叠加,使得欠烘烤区域的附着力明显劣于正常固化区域,成为整卷产品中的性能短板。

3.2 过烘烤区域的影响

与欠烘烤相反,当铝材经过温度偏高的区域时,涂层会遭受过烘烤。过高的温度不仅加速了交联反应,还可能引发聚合物的热氧化降解、主链断裂或过度交联,使涂层变得异常脆硬。脆性涂层在受到外力(如划格测试中的刀片切割或胶带剥离)时极易开裂,表现出较差的附着力。更严重的是,高温可能诱发涂层与基材之间的不利副反应。例如,某些聚酯树脂在超过 $250^{\circ}C$ 时会分解产生羧酸类物质,这些酸性产物会腐蚀铝基材或破坏其表面的无铬转化膜,从根本上损害界面稳定性。此外,涂层与铝材的热膨胀系数存在本质差异,在冷却过程中,过烘烤区域因经历了更高的峰值温度,其热收缩量更大,从而在界面处积聚显著的热应力。当该内应力超过涂层-基材间的结合强度时,便会导致涂层自发起泡、翘曲甚至大面积剥离。

3.3 温度梯度诱导的应力集中

即便烘烤炉的平均温度处于工艺窗口内,若存在明显的横向或纵向温度梯度,也会对附着力构成威胁。这是因为不同温度区域的涂层在固化和冷却过程中会发生不同程度的体积收缩。在温度突变的边界区域(如高温区与低温区的交界处),相邻区域的收缩行为不协调,导致局部产生剪切应力和拉伸应力的集中。这种应力集中在后续的加工(如辊弯、冲压)或服役过程中极易成为裂纹萌生和扩展的起点。即使初始附着力测试合格,在动态载荷或环境老化作用下,这些区域也最先出现涂层失效,表现为局部剥落或起泡。因此,温度梯度本身即是一种潜在的结构缺陷源,其危害不容忽视。

4 优化烘烤温度场均匀性的技术路径

4.1 炉体结构与气流组织优化

提升烘烤温度场均匀性的根本在于优化炉体内部的热传递环境。首先,应将烘烤炉沿传送方向划分为多个独立温控区,根据热平衡计算和实际测试数据,精细设定各区温度曲线,以补偿入口散热、出口余热及中部热量积累等效应。其次,风道设计至关重要,合理的进风口与回风口布局能够引导热风在炉膛内形成均匀、稳定的循环流场,避免出现气流死角或短路现象。可借助导流板、文丘里管等结构强化气流分布,确保热风垂直、均匀地冲击工件表面。此外,适当提高炉内循环风速不仅能加快传热速率,缩短涂层达到目标温度的时间,还能有效减小工件表面与热空气之间的温差,从而提升整体温度响应的一致性。

4.2 加热方式的选择与组合

加热方式的选择直接影响温度场的均匀性与能效。纯热风对流加热以其良好的均匀性和温和的加热特性，适用于大多数涂层的主体固化阶段；而红外辐射加热则具有升温迅速、能量利用率高的优点，特别适合用于快速升温段。将两者有机结合，构建“红外+热风”复合加热系统，可兼顾效率与均匀性^[4]。在采用红外加热时，应优先选用中波或短波红外发射器，并配合高反射率的抛物面或平面反射器，确保辐射能量在炉宽方向上均匀投射，避免出现“热点”或“冷点”。对于高端产品线，还可考虑引入远红外或微波辅助加热技术，以实现更深层次的均匀固化。

4.3 过程监控与智能调控

仅仅依靠静态设计难以长期维持高均匀性，必须辅以动态监控与智能调控。企业应建立常态化的炉温测试制度，定期使用炉温跟踪仪对生产线进行“体检”，建立历史数据库，及时发现温控元件老化、风机效率下降等问题。更进一步，可在炉内关键截面布置多点高精度温度传感器，实时采集温度数据，并将其接入PLC或DCS控制系统，形成闭环反馈。当检测到某区域温度偏离设定值时，系统可自动调节该区加热功率、风门开度或风机转速，实现动态补偿。未来，结合数字孪生技术，通过构建烘烤炉的CFD仿真模型，可在虚拟环境中对炉体结构、气流参数和控制策略进行反复优化，大幅降低物理调试成本，提前规避潜在的不均匀风险。

4.4 工艺管理与标准化

再先进的设备也需匹配严格的工艺管理。生产过程中，必须确保传送速度的高度稳定性，因为速度波动会直接改变工件在各温区的停留时间，等效于改变了局部温度。同时，应规范炉内铝卷的装载方式，保持合理的间距和对中度，防止因堆叠过密或偏心放置造成局部遮挡，影响热风流通和辐射接收。此外，应制定详细的烘烤工艺规程（SOP），明确不同涂料体系对应的最佳温度曲线、允许温差范围及异常处理流程，并对操作人员

进行定期培训，确保工艺纪律的严格执行。唯有将设备、控制与管理三者有机结合，才能真正实现烘烤温度场的长期、稳定、高均匀性。

5 结语

本文系统探讨了涂层线烘烤温度场均匀性对铝材涂层附着力的影响。研究表明，烘烤温度场的均匀性是决定涂层附着力一致性和可靠性的关键工艺参数。温度场不均匀会导致涂层局部出现欠烘烤或过烘烤现象，前者因交联不足和界面污染而削弱附着力，后者则因涂层脆化和内应力增大而损害附着力。此外，温度梯度本身也会在界面处诱发应力集中，成为潜在的失效源。为解决此问题，本文从炉体设计、加热方式、过程监控和工艺管理等多个维度，提出了优化烘烤温度场均匀性的综合技术路径。在实际生产中，企业应高度重视烘烤炉的维护与校准，将温度场均匀性作为核心质量控制点，从而从根本上保障铝材涂层产品的高品质和高可靠性。未来的研究可进一步深入探究不同涂料体系（如高固含、水性、粉末涂料）对温度场均匀性的敏感性差异，以及在极端服役环境下（如高湿热、强紫外线），由温度场不均匀性引发的附着力退化行为，为开发更具鲁棒性的涂装工艺提供更全面的指导。

参考文献

- [1]王淑华,艾兵权,田秀刚,等.高铝双相钢HC420/780DP的烘烤硬化特性[J].金属热处理,2023,48(12):180-183.
- [2]卢嘉华,林英杰.铝合金表面碱性硅烷化处理对陶瓷涂层附着力的影响及其机理研究[J/OL].电镀与涂饰,1-7[2025-11-20].
- [3]赵朋朋,赵亚广,李菁.JJF(冀)241—2024《涂层拉开法附着力测试仪校准规范》解读[J].中国计量,2025,(06):59-61.
- [4]党坤,占发琦,郑月红,等.复合镍铝涂层高温氯化物熔盐腐蚀行为和机理研究[J/OL].材料科学与工艺,1-11[2025-11-20].