

铝液冷板涂装缺陷成因分析及质量控制研究

白金

南南铝业股份有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]本文针对铝液冷板在涂装过程中出现的典型缺陷进行成因分析, 包含针孔、缩孔、附着力不足、积粉、油漆流挂等, 主要原因包含铝液冷板基材因素、涂装前处理工艺因素、喷涂与固化因素, 提出铝液冷板涂装质量控制措施, 旨在进一步提高铝液冷板涂装质量, 减少缺陷, 并提高涂装产品的综合性能。

[关键词]液冷板; 涂装; 缺陷成因; 质量控制

DOI: 10.64635/ja.2026.1051

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Defect Formation Mechanisms and Quality Control of Coating on Aluminum Liquid Cooling Plates

Bai Jin

Nannan Aluminum Industry Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China

Abstract: This study investigates the formation mechanisms of typical coating defects occurring during the coating process of aluminum liquid cooling plates. The defects analyzed include pinholes, craters, insufficient adhesion, powder accumulation, and paint sagging. The primary causes are identified as substrate-related factors, pretreatment process parameters, as well as coating application and curing conditions. Based on these analyses, targeted quality control measures for the coating process of aluminum liquid cooling plates are proposed. The objective is to improve coating quality, reduce defect occurrence, and enhance the overall performance of coated products.

Keywords: aluminum liquid cooling plate; coating; defect formation mechanisms; quality control

引言

结合实际情况来看, 铝液冷板的涂装缺陷主要特征为多元性、复杂性, 为有效提高涂装质量, 需要深度分析缺陷形成原因, 才可有针对性地完成质量控制。与此同时, 通过涂装缺陷类型、成因分析, 还可进一步增加铝液冷板涂装效率、节约操作成本, 拓展铝液冷板的应用范围, 提升其稳定性。可以看出, 对铝液冷板的缺陷成因进行分析并做好质量控制, 具有重要的价值。

1 铝液冷板涂装缺陷类型与成因分析

1.1 颗粒

依颗粒缺陷主要表现为固体杂质嵌入铝液冷板表层漆膜或浮于表面, 形态包括硬质碎屑、凝胶粒子、纤维状异物, 手接触可明显感到突兀, 严重影响涂层光洁度、电绝缘性能。从污染源角度分析来看, 颗粒缺陷主要成因为: 其一, 作业环境中空气过滤效率较低, 导致粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的悬浮尘埃沉降于湿膜表面; 其二, 涂料体系自身稳定性较弱, 如颜料絮凝、树脂析出、由温度波动引发局部胶化, 形成微米级团聚物; 其三, 喷涂设备维护管理水平低, 管路密封部位受到磨损产生碎屑、喷枪清洗后残留干涸漆皮,

经涂料冲刷后混入新鲜漆膜。由于这些异物的存在, 会破坏漆膜连续性, 并且其与基材的界面部位容易产生应力集中点, 在温变工况下便会诱发微裂纹。

1.2 缩孔

缩孔缺陷会在铝液冷板涂层表面呈现火山口状凹陷, 中心部位具有低表面张力核心, 周边漆膜向外翻卷, 甚至还会呈麻点状。该缺陷的形成是表面张力梯度驱动的流体铺展失稳。当涂料施涂于铝液冷板基材时, 如果局部区域的表面张力不超过周围漆液污染物, 漆液便会自发从低张力区转移至高张力区, 形成凹陷。主要因为在处理基材前未能彻底脱脂, 未能对残留的冲压油、防锈油进行完全皂化去除; 压缩空气管路中混入油雾凝结成微滴; 涂料配方中消泡剂、流平剂与树脂体系相容性较低, 最后以游离态析出。此外, 外界环境中的硅酮类物质飘落至湿膜表面, 也会造成缩孔缺陷。

1.3 附着力不足

附着力不足缺陷主要表现为铝液冷板涂层不具备良好的剥离破坏抵抗能力, 也无法满足标准要求, 可将其划分成为湿附着不良、干态附着力差两种情况。铝材属于热

力学不稳定的金属,表面自然氧化层(Al_2O_3)特征为多孔性、厚度不均,如果没有对其进行化学转化处理(铬化、锆化),氧化层与涂料的界面结合力仅可生成物理吸附,缺少化学键合。在前处理环节中,如果存在微细缺陷,如除油后水洗水中含有硬脂酸残留,便会在基材表面形成单分子层级的弱边界层,大幅降低附着力。从涂料固化角度来看,如果烘烤温度过高、时间过长,漆膜便会过度交联而产生脆化,致使内应力不断积聚,如果遭遇冷热冲击、机械冲击,界面就会很容易发生剥离。

1.4 积粉

积粉缺陷指在铝液冷板的静电粉末喷涂工艺中,粉末在工作凹陷、棱边、接地不良区域过量堆积,固化后形成明显突起、肥厚边缘,使散热面的平整度受到破坏从静电涂装原理来看,工件表面电荷分布主要会遵循法拉第笼效应,在深凹或内腔部位电场线进入难度高,粉末吸附量少;相反,如果在尖端或凸起部位电荷密度过高,将会对带电粉末产生强力吸附,导致局部膜厚失去控制。如果喷枪输出电压不稳、粉末电阻率设计不合理、流化床供粉不均匀,都会加剧这种吸附偏差。对于液态涂料来说,相关缺陷表现为漆膜厚边,造成该情况的主要原因为喷涂轨迹重叠较多、涂料触变性薄弱,从而造成流淌堆积。

1.5 油漆流挂

流挂缺陷主要指湿膜在铝液冷板垂直面受重力作用向下运动形成的波浪状、泪滴状纹理,漆膜厚度表现为上薄下厚。如果出现该现象,原因为漆液屈服应力低于重力剪切应力,溶剂挥发速度较慢。对于工艺诱因方面,表现为施工黏度过低,或是没有正确选用稀释剂导致挥发速率慢;一次喷涂湿膜厚,超出膜层稳定极限;闪干时间与环境湿度未能互相匹配,尤其是在高湿环境下,溶剂挥发状况不良,漆膜长时间处于低黏度状态。此外,烘烤升温曲线过缓也会增加黏度上升时间,从而大幅增加流挂风险。

1.6 斑印

斑印缺陷是指铝液冷板涂层固化后呈现局部颜色差异、光泽不均区域,其并无固定形状,但会与周边正常漆膜形成视觉差异。从基材角度来说,铝液冷板经过挤压、压铸成型后,微观组织中存在晶粒取向、合金元素偏析,便会造成酸洗或钝化处理后表面氧化膜的生长速率无法匹配厚度要求,从而影响涂料的润湿速率、固化反应程度,形成光学性差异。从污染角度来看,工件在转运过程中可能会残留指印汗渍、焊斑等,在烘烤过程中会与涂料交联剂出现副反应,造成发花或变色。

1.7 橘皮

橘皮缺陷主要表现为铝液冷板的涂层表面呈类柑橘皮纹理的微观凹凸起伏,波长通常为0.5~2mm,属于流平性不佳的典型表现。在喷涂中,涂料经雾化形成液滴撞击基材,初始状便是呈凹凸不平的波纹状,之后会依靠表面张力驱动流平。如果涂料黏度较高、触变性较强,便会造成流平剪切速率条件下的黏度下降速率低,无法在表干时间内完成流平;溶剂挥发较快,湿膜表面会迅速出现凝胶化状态,使内部流动冻结。此外,对于喷涂参数来说,雾化压力过低将会导致漆滴粒径过粗,铺展难度高;但是雾化压力过高也可能造成溶剂过度挥发,使漆滴到达基材时失去流动性。另外,烘烤初期升温过快,漆膜表面会瞬间固化,使底层溶剂挥发冲破表层,最终形成橘皮状皱褶。

1.8 针孔

针孔缺陷表现为铝液冷板漆膜上呈密集分布的微细孔洞,直径通常小于0.1mm,深度可至基材表面,属于涂层致密性缺陷。针孔缺陷的形成机理为湿膜内部产生气泡,且在漆膜表面封闭前没有完全逸出。气泡来源包含:机械搅拌卷入空气未经过静置脱泡,残留于漆液内;喷涂压力设定过高、枪嘴距离过近,空气被裹入漆膜;溶剂挥发不平衡,表层结膜后下层溶剂急剧气化,冲破黏稠半固态表层;铝材基体存在微观孔隙、焊接气孔,在烘烤时,内部气体受热膨胀逸出,穿透未完全固化的漆层。针孔缺陷不仅会降低铝液冷板耐盐雾性能,还会成为渗漏冷却液的通道。

2 铝液冷板涂装缺陷质量控制措施

2.1 做好基材质量控制

为加强质量控制,应保障铝液冷板基材优质,基材表面如果存在任何瑕疵、污染,均会在后续工序中造成缺陷。所以,要构建严格的基材入厂检验标准,才可做好质量控制的首要步骤。制定检验标准过程中,应包含基材表面质量、清洁度两项内容。在控制基材表面质量时,应明确铝材允许的表面缺陷类型与限度范围。挤压型材较为常见的缺陷如纵向纹路、划伤、压痕、气泡等,要依据其深度、分布范围设置明确验收指标。如果划伤、压痕深度超过涂膜厚度三分之一,便要判定其为不合格的基材产品,这类缺陷无法利用后续涂装完全覆盖。同时,还要对基材表面的氧化斑点、腐蚀情况进行严格管控,如果存在这两类缺陷,其会在处理过程中伴随表面状态变化而发生改变,且钝化处理过程中也无法形成具有均匀性的转化膜。此外,油污污染也会对铝液冷板的涂装质量产生影响。铝材在挤压、转运、存储过程中,极易接触到多种油类物质,比

如挤压工艺完成后,会残留脱模机、切割冷却液,或是在储存环境中受到油雾沉降。在基材入厂检验过程中,应设置油脂残留检测项目,比如可使用擦拭法、表面能测试方法对其进行精准筛查。对于含有明显的油污基材批次,应立即要求供应商对基材包装、转运方式进行优化,并在基材入厂后增设脱脂处理环节。另外,还要对基材的存放环境、存放周期进行严格管理,避免其长期暴露于潮湿、工业污染环境中,防止基材表面出现氧化、吸附污染物的问题,这类基材即便在入厂环节会呈现出检验合格状态,也要在铝液冷板涂装之前对其进行严谨处理。

2.2 前处理参数精细化管理

在铝液冷板涂装前处理工艺中,主要工序包含脱脂、水洗、钝化等多项内容,不同环节的工艺参数互相关联、互相影响,应对其进行精细化管理,才可保障处理效果具有稳定性、一致性。具体来说,铝液冷板涂装前处理的参数主要包含槽液浓度、处理温度、作用时间。在脱脂工序中,应对脱脂剂浓度、槽液温度、处理时间几项核心参数进行严格控制。要保障脱脂剂浓度适宜,若浓度较低,无法彻底去除重油污,如果浓度过高,将会生成大量泡沫,过渡腐蚀铝液冷板基材。槽液温度会与脱脂反应速率之间存在密切关联,如果温度较低将会延长处理时间,温度过高将会加快槽液老化速度。在实际开展铝液冷板涂装前处理过程中,应对槽液浓度进行定期滴定检测,依据实际处理的工件数量、油污负荷设置科学补加周期,保障浓度处于工艺窗口范围中。为验证脱脂效果,可使用水膜破裂试验进行精准判断,如果工件表面水膜呈现出连续、均匀状态,且保持时间满足规定要求,才可判定脱脂工序合格。此外,对于钝化工序的成膜质量来说,其会受到槽液化学成分稳定性、工艺参数控制的影响。铝液冷板涂装前处理无论是采用铅钛系无铬钝化方式还是传统铬化方式,都要将槽液 pH 值、成膜剂浓度、促进剂含量控制在狭窄波动范围中。如果处理温度较高,将会加快反应速率,膜层也会粗厚疏松,温度较低将会延缓反应时间,致使膜层过薄,无法完全覆盖。在控制处理时间时,应保障时间适宜,避免出现膜层不连续、膜层溶解等问题。还要构建钝化膜质量在线检测机制,对膜层颜色进行判断、进行简单划伤试验、膜重测试,避免工艺参数偏离正常轨道。在水洗工艺中,应保障各级水洗槽的电导率得到限值控制,尤其是末级水洗,应保障电导率较低,确保工件表面离子不会过多残留。另外,还要依据实际生产负荷灵活调整水洗水更新频率、喷淋压力、溢流速率,对水洗槽内的离子种类、含

量进行定期检测,精准判断前级槽液是否存在串槽、带出过量现象。如果在冬季,水温较低,会降低水洗效果,所以要增设加热装置,或延长水洗时间才可保障铝液冷板涂装前处理质量,防止发生缺陷。

2.3 喷涂与固化优化

铝液冷板涂层质量、稳定性会受到喷涂工序自动化程度的影响,因此要科学设置静电喷涂参数,操课保障铝液冷板涂层具有良好均匀性、附着力。喷涂参数的核心指标包含静电电压、雾化气压、喷枪距离,应结合工件实际形状、涂料类型、环境条件做好优化。在设置静电电压过程中,要保障其具有良好带电效果、上粉效率,防止电压过低导致涂料粒子荷电不足,浪费涂料。同时,电压过高将会造成尖端放电问题,使涂层被击穿或出现针孔。由于铝液冷板具有复杂流道结构,在设置电压过程中,还要结合法拉第笼效应,控制凹陷部位的上粉效果,比如可使用电压分段控制方式、调整喷枪设置方案。对于雾化气压部分,其会影响涂料雾化颗粒细度、喷射速度,若是气压较低,将会出现雾化不良问题,造成铝液冷板涂层发生橘皮、颗粒。

另外,为保障铝液冷板涂层达到完全交联成膜的效果,需要对固化炉实施温度曲线验证。铝液冷板的主要特性为导热快、比热容小,对炉温的变化十分敏感,所以在设置炉温曲线时,应同时考虑铝液冷板涂层固化要求、基材热稳定性因素。比如可使用随炉热电偶法对炉温曲线进行测定,在工件表面不同位置固定热电偶,确保其可充分展现工件固化过程的温度变化。在升温环节,速率要保持适中,避免发生针孔与气泡缺陷。在保温时,要在规定范围内控制好温度波动状态,保障铝液冷板涂层满足完全固化需要的热量输入。另外,为精准验证炉温曲线,还要构建定期检测制度,在固化炉设备的维修、更换加热元件、调整生产节奏、变更涂料型号时,都需要对炉温测定方法、曲线进行调整。并且,要将炉内不同区域的温度差控制在合理范围内,防止相同挂具、不同位置的工件固化程度存在差异。如果使用连续式固化炉,还要保障链条速度、炉膛长度互相匹配,保障工件的炉内停留时间满足固化需求。

3 结语

铝液冷板涂装缺陷主要包含橘皮、针孔、附着力不足、油漆流挂等,为防止缺陷发生,应深度分析缺陷成因,即基材质量、涂装前处理工艺质量、喷涂与固化质量,之后采用相应的质量控制措施,才可彻底消除铝液冷板涂装缺陷,从根本上提高涂装质量。在未来的研究中,主要方向为新型环保涂料、智能化检测技术,从而防止铝液冷板涂

装缺陷发生,进一步提高铝液冷板涂装效果。

[参考文献]

[1]史方兵.防误防错技术在涂装车间涂胶量控制零缺陷中的应用[J].现代涂料与涂装,2024,27(05):64-66.

[2]张艳芬,李飞,郭家.涂装漆膜缺陷自动检测技术的缺陷识别率影响因素分析[J].汽车制造业,2024,(03):50-51+55.

[3]周华,张明哲.新型乙烯基酯树脂玻璃鳞片涂料对电解

铝板的防护[J].中国涂料,2013,28(08):41-44.

[4]胡剑华.铝板卷材涂装质量问题及其处理方法[J].中国建材科技,2004,(04):43-45.

[5]黄天杰.仿铝板涂装的施工技术[J].现代涂料与涂装,2004,(04):31-33.

作者简介:白金(1986.04—),男,本科,民族:壮族,毕业院校:南昌航空大学,所学专业:金属材料工程。