

铝制液冷板涂装前处理工艺对涂层性能的影响

白金

南南铝业股份有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]随着新能源汽车、储能系统不断发展, 铝制液冷板对涂层耐腐蚀性、结合力提出更高要求, 前处理工艺是决定涂层性能的关键环节。主要对比无水溶剂型除油剂+钝化剂、有水型除油剂+钝化剂在铝制液冷板涂装前的处理效果, 评估两种工艺对涂层附着力、腐蚀性的影响, 为绿色高效前处理工艺选型提供依据。采用扫描电镜 (SEM)、电化学阻抗谱 (EIS)、划格试验、中性盐雾试验等手段, 表征两种工艺处理后钝化膜微观形貌、成分、涂层体系力学性能和防腐性能, 希望为实践提供理论依据。

[关键词]铝制; 液冷板; 涂装工艺; 涂层性能

DOI: 10.64635/ja.2026.1105

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

Effect of Pretreatment Processes on Coating Performance of Aluminum Liquid Cooling Plates

Bai Jin

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

Abstract: With the continuous development of new energy vehicles and energy storage systems, higher requirements have been placed on the corrosion resistance and adhesion of coatings applied to aluminum liquid cooling plates, making pretreatment a critical step in determining coating performance. This study mainly compares the pretreatment effects of an anhydrous solvent-based degreasing agent combined with a passivating agent and a water-based degreasing agent combined with a passivating agent prior to the coating of aluminum liquid cooling plates, and evaluates the effects of the two processes on coating adhesion and corrosion resistance, so as to provide a basis for selecting green and efficient pretreatment processes. Scanning electron microscopy (SEM), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cross-cut adhesion tests, and neutral salt spray tests were employed to characterize the microstructure and composition of the passivation films, as well as the mechanical properties and corrosion resistance of the coating systems after the two pretreatment processes, with the aim of providing a theoretical basis for practical application.

Keywords: aluminum; liquid cooling plate; coating process; coating performance

引言

近几年来, 铝制液冷板被广泛应用于电子散热领域中, 包括电子显示设备、光电器件、集成电路等, 其前处理工艺会对涂层耐腐蚀性、使用寿命产生关键影响, 同时也是涂装质量的决定性因素。因此, 通过研究铝制液冷板涂装前处理工艺对涂层性能产生的影响, 可进一步优化处理工艺, 具有重要现实意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本研究所用基材为典型铝制液冷板用铝合金板材, 牌号为 3003 铝合金, 因其良好导热性、加工成型性能被广泛, 试板尺寸统一加工为 150mm×70mm×2mm, 避免

尺寸因素对后续涂装、测试结果产生影响。

前处理药剂其一为无水溶剂型体系, 包含专用溶剂型除油剂、配套免水洗型无铬钝化剂, 旨在实现无废水排放的清洁生产。其二为有水型体系, 采用碱性除油剂与水基无铬钝化剂, 水基无铬钝化剂为锆系钝化剂, 工作液 pH 值维持在 ≤1.0 酸性范围内, 处理时间为 30~70s, 确保形成均匀钝化膜。为精确评估前处理工艺对最终涂层性能影响, 所有试板在完成前处理后均喷涂同批次环氧底漆, 确保涂层材料一致, 消除涂料批次差异造成实验误差^[1]。

1.2 前处理工艺方案设计

为对比两类前处理工艺效果, 实验设置三个并行组别, 分别对应不同表面处理流程。

A组采用无水溶剂型工艺,首先进行溶剂除油,通过喷淋或浸泡方式去除铝基体表面轧制油污与尘埃;随后进行溶剂型无铬钝化处理,同免于水洗,直接形成钝化膜;最后送入烘道进行热风干燥,干燥温度设定为80~120℃,去除残留溶剂、促使钝化膜致密化。该工艺特征在于全程无水参与,规避复杂结构件内部残留水分导致涂层起泡。

B组采用有水型工艺,首先进行碱性除油,以皂化、乳化作用去除表面油脂;随后经两道逆流纯水清洗,清除残留碱液,防止污染钝化槽液;进入水基无铬钝化步骤,在常温条件下处理30~70s;钝化后进行可选纯水清洗,最终经热风干燥完成前处理,该工艺代表传统水基处理典型配置^[2]。

C组为对照组,其处理方式一种是仅除油处理,不进行任何钝化,凸显钝化膜对涂层性能的作用;另一种采用传统铬酸盐钝化工艺,作为衡量无铬钝化技术性能参照。

1.3 性能测试方法

其一,铝基体表面状态。利用扫描电子显微镜观察不同工艺处理后试板表面微观形貌特征,如蚀刻程度、晶界显露情况、钝化膜覆盖状态。配备X射线能谱仪用于分析表面微区元素组成,验证钝化膜中特征元素的存在、相对含量。此外,通过接触角测量仪测试去离子水在试板表面的静态接触角,评价不同工艺处理后基材的表面能、对涂料的润湿性。

其二,涂层力学性能、耐腐蚀性能测试。涂层附着力依据ISO2409标准进行划格试验,按ISO4624标准进行拉开法附着力测试。涂层耐腐蚀性能通过中性盐雾试验进行评估,重点考察划线处涂层扩蚀宽度、非划线区域起泡等级。为探究腐蚀动力学过程,采用电化学工作站对涂层体系进行极化曲线、电化学阻抗谱测试,获取涂层电阻、电荷转移电阻等电化学参数。最后,通过沸水浸泡试验考察涂层耐水性能,对比测试前后涂层附着力保留率,评价涂层抗水解能力^[3]。

2 铝制液冷板涂装前处理工艺对涂层性能的影响

2.1 前处理工艺对铝基体表面状态的影响

不同的铝制液冷板涂装前处理工艺会通过不同物理化学作用改变基体表面形貌、化学成分、表面能,从而影响后续涂料润湿、铺展、界面结合的形成状态。关于表面形貌对比分析,扫描电子显微镜观察结果显示两种前处理工艺对铝基体产生不同微观蚀刻效果。经有水型碱性除油、酸性和水基钝化处理后,铝基体表面呈现均匀微观起伏、蚀刻坑点,主要源于碱性除油剂对铝基体的化学溶解

作用、酸性钝化液轻微刻蚀,有利于扩大涂层与基体的实际接触面积,产生更强机械咬合效应。无水溶剂型工艺处理后的表面相对平整,未见明显蚀刻特征所以可最大限度保留铝基体原始轧制形貌,孔隙率较低。

在表面化学成分方面,经X射线能谱分析数据显示,不同工艺在基体表面引入的特征元素存在差异。经有水型铬系钝化处理的试面检测到明显铬元素特征,分布情况与表面微观形貌对应,表明形成含铬化学转化膜层,为后续涂层提供化学键合位点。对于无水溶剂型工艺,钝化膜的形成依靠溶剂携带的成膜剂、铝基体直接反应,EDS分析同样检测到特征成膜元素,但元素分布形态与水基工艺不同,呈现出更均匀、致密的薄层覆盖特征。对照组的仅除油不钝化试面,仅能检测微量残留污染物、自然氧化层元素,未见明显外来成膜元素富集。

对于表面能、润湿性评估,有水型工艺处理后的铝板面表现出较低接触角,在20°~30°间,具有良好亲水性。主要是因为碱性除油去除表面疏水污染物,并形成亲水性无铬转化膜,确保涂料在基材表面更快、更均匀铺展,消除涂膜缺陷。无水溶剂型工艺处理后的表面接触角相对较高,主要由于其表面缺乏亲水性基团、微观结构相对平整。

2.2 前处理工艺对涂层附着力的影响

涂层附着力是评价涂装质量的核心指标,会对涂层保护效果、使用寿命产生直接影响。在干附着力对比方面,本研究主要使用划格法与拉开法,测试结果显示经两种工艺处理的试板在划格法中均能获得0级、1级表现,表明在初始干燥状态下,只要前处理过程中除油较为彻底,无论是机械咬合还是化学键合,都可建立足够附着力。有水型工艺处理后的涂层拉开强度值略高于无水溶剂型工艺,主要因为其表面微观粗糙结构可提供额外机械锚合力,或是铬系转化膜与涂层树脂间形成化学键合。无水溶剂型工艺虽拉开强度值稍低,但高于技术规范要求,证实其形成的钝化膜也可提供有效界面结合^[4]。

对于湿附着力方面,经沸水浸泡试验后,所有试板的附着力出现不同程度下降,经有水型工艺处理试板在湿热试验后保持最高的附着力保留率,超过80%,表明界面初始结合强度高,转化膜具有抗水解能力,可有效阻碍水分子沿界面渗透。无水溶剂型工艺处理后的涂层湿附着力保留率较低,主要是由于界面结合方式物理作用占比较小,致使水分子侵入更为敏感。此外,利用扫描电子显微镜观察拉开法测试后的断裂面,可发现两种工艺的破坏模式存在不同特征。在有水型工艺处理样品中,断裂面表现为涂

层内部混合破坏,部分区域为涂层内聚破坏,部分区域为界面破坏,界面破坏区域还会残留转化膜。表明界面结合强度接近、超过涂层自身内聚强度。对于无水溶剂型工艺处理的样品,断裂面则呈现出更加清晰的界面破坏特征,表明界面结合力对于涂层内聚力来说依然是潜在薄弱区域。

2.3 前处理工艺对涂层耐腐蚀性能的影响

从中性盐雾试验观察结果来看,在试验初期,所有涂层都可表现出良好屏蔽效果,无明显腐蚀迹象。随试验周期增加,在人工划痕处开始出现腐蚀扩展。有水型工艺处理样板显示出更强抗扩蚀能力,划痕两侧腐蚀扩蚀宽度增长缓慢,在远离划痕的区域没有出现明显起泡倾向,表明铬系转化膜可在划痕部位提供“二次防腐”能力,有效抑制腐蚀产物沿界面横向扩展。对于无水溶剂型工艺处理的样板方面,在相同试验周期下,划线处扩蚀宽度略大于有水型工艺,个别样品在试验后期出现微小点状起泡,表明界面区域的局部存在附着力损失现象。

结合电化学测试结果来看,在浸泡初期,两种涂层体系表现出很高低频阻抗模值,表明涂层具有良好物理屏蔽效果。随浸泡时间增加,有水型工艺处理涂层体系阻抗模值下降速度较慢,在整个测试周期内保持更高相位角平台,说明涂层更为稳定,有效抑制电化学的双电层形成过程。无水溶剂型工艺处理的涂层体系经过长期浸泡后,阻抗模值明显下降,弛豫时间常数出现变化,表示电解质溶液开始渗透至界面区域。结合极化曲线测试结果分析来看,两种工艺处理的涂层体系均会正移铝基体的腐蚀电位,但经有水型工艺处理后的样品表现出更低腐蚀电流密度,说明电化学腐蚀速率较慢。

结合上述分析可以看出,对于有水型工艺处理后形成的铬系转化膜,与涂层树脂、金属基体之间都可形成较为稳定的化学键合,构建出致密“混合界面层”。当水、氧、氯离子等腐蚀介质通过涂层微孔渗透至界面时,界面层可有效阻滞其横向扩散,确保腐蚀状态控制在局部区域,从而延缓起泡现象发生^[5]。而无水溶剂型工艺处理后的界面层会更依靠成膜剂物理覆盖作用,化学键合作用较弱。因此,水分子渗透至界面后,更易沿能量较低的涂层间次界面进行横向扩展,破坏原本物理结合,进而降低铝制液冷板的附着力,涂层也会起泡剥离。

3 铝制液冷板涂装前处理工艺对涂层性能影响讨论

3.1 无水溶剂型工艺的技术优势分析

从工艺过程来看,无水溶剂型工艺可有效避免水洗环

节,处理流程可在无水条件下完成,从而避免在生产过程产生工业废水,节约废水处理设施投资、日常运行成本,大幅降低企业的环境合规风险。此外,无水工艺也无需配置庞大水洗槽、纯水制备系统、废水处理站,大幅减少生产线占地面积。针对铝制液冷板的结构特点来看,无水溶剂型工艺技术具有更加突出的优势。例如,铝制液冷板内部通常含有复杂流道结构,流道小且曲折,使用传统有水型工艺处理时,清洗水、钝化液极易残留在流道死角,后续烘干时难以将其彻底清除。当铝制液冷板涂装后进入高温固化阶段,残留水分会汽化膨胀,导致涂层起泡、剥落,致使涂层失效。所以,经过无水溶剂型工艺处理,可发挥处理全程无水的优势,有效规避上述风险。并且,溶剂型药剂表面张力较低、流动性强,处理后更易于挥发干燥,不会在流道内残留液体,保证铝制液冷板整体涂层更具完整性、可靠性。

3.2 有水型工艺的技术优势分析

在成本控制方面,有水型工艺会使用碱性除油剂、水基无铬钝化剂,相比于溶剂型产品会更为节约成本。在处理中,水为主要介质,价格低廉,可减少槽液配制、日常补加的成本。对于已有废水处理设施的大型企业来说,采用有水型工艺无需增加溶剂回收、防火防爆设施,使运营成本更为可控。从产线兼容性方面来说,有水型工艺与市面主流涂装生产线既有配置高度匹配。例如,喷淋式、浸泡式前处理设备,均会使用水基处理流程设计方式,配备多级水洗槽、烘干通道。如果使用有水型无铬钝化工艺,企业仅需将原有的铬酸盐钝化槽液更改为无铬钝化剂,并灵活调整工艺参数,便可完成工艺升级,无需改造生产线的主体结构,从而降低技术升级门槛。

3.3 两类工艺钝化膜形成机理差异及其对涂层性能的影响

有水型铬系钝化工艺主要表现为化学转化膜形的成过程,当铝基体浸入酸性铬盐溶液中,铝基体会与酸发生反应,增加界面区域 pH 值,使溶液中的铬离子以水合氧化铬的形式沉积于铝表面,之后伴随铝基体微量溶解,使转化膜与基体间存在化学键合,较为牢固。同时,铝基体的溶解会让表面产生微观蚀刻,增加实际表面积,为涂层提供机械锚固点,使有水型工艺处理后的涂层界面具有较高结合强度、抗水解能力。

对于无水溶剂型钝化工艺方面,其成膜组分会在溶剂挥发过程内逐渐浓缩,通过物理吸附、与铝表面氧化层微弱化学反应附着在基体表面。由于溶剂体系并不会对铝基

体发生蚀刻作用,成膜过程不会伴随基体溶解,形成的钝化膜与基体间主要为物理结合。虽然在干燥状态下此种界面结合方式可满足基本附着力要求,但在湿热环境内,水分子的侵入会破坏物理结合界面,从而降低湿附着力。

基于铝制液冷板的结构特征来看,两种工艺的适配性也存在差异。在铝制液冷板中,含有钎焊焊缝,焊缝区域的化学成分、组织状态均与母材存在差异,表面可能存在钎剂残留、氧化皮。有水型工艺处理后的碱性除油、酸性钝化会使焊缝区域获得较强清洗、活化能力,有效去除残留污染物,确保焊缝表面可均匀形成转化膜。对于无水溶剂型工艺方面,焊缝区域的适应性会受到溶剂溶解能力、成膜剂铺展性能影响。对于残留较为顽固的钎剂,清洗效果可能会不如水基工艺。在薄壁特征方面,无水溶剂型工艺没有腐蚀性介质,无法对薄壁区域造成蚀刻,可有效保障薄壁件尺寸精度;但有水型工艺应用时,要严格控制处理时间、温度,避免薄壁区域被过度腐蚀从而降低强度下降,甚至发生穿孔风险。

为提高铝制液冷板前处理工艺应用效果,应依据实际情况选取前处理工艺。对于内部流道结构复杂、对涂层可靠性要求较高的产品,可使用无水溶剂型工艺,避免在流道内残留水分,防止涂层缺陷。对于常规结构的铝制液冷板,可优化烘干工序确保流道干燥,便可使用有水溶剂型工艺,从而提高涂层附着力、耐腐蚀性。

4 结语

通过对比无水溶剂型除油剂、钝化剂与有水型除油

剂、钝化剂的前处理后效果,在涂层附着力方面,基于干燥状态下,两类工艺处理后的涂层均可达到较高附着力等级,满足涂装质量基础要求,但在湿热环境下,其耐久性的表现具有差异。耐久性表现存在差异。耐腐蚀性能方面,有水型工艺处理涂层体系展现出优异防护效果。中性盐雾试验、电化学测试结果表明有水型工艺处理样板扩蚀宽度更小,涂层阻抗值下降慢,腐蚀电流密度低。因此,在实际工程实践中,建议根据具体产品结构、生产条件等要求,综合评估两类工艺技术经济性,从而选取最为适宜的前处理工艺。

[参考文献]

- [1]刘欢,郑焱.多目标拓扑优化蛛网型液冷板的散热特性[J].江苏理工学院学报,2026,32(01):87-99.
- [2]乔礼惠.4630t 新能源汽车电池包液冷板全自动生产线研制[J].锻压装备与制造技术,2025,60(06):30-35.
- [3]章正哲,张恒运,张健胜,等.方形电池模组对称蛇形流道液冷板热特性研究[J].上海工程技术大学学报,2025,39(04):471-476.
- [4]屈胜利,刘一爽,王闯,等.新型双芯片冷板式液冷数据中心冷却系统性能试验研究[J].制冷与空调,2025,25(12):56-62+113.
- [5]胡国高,杨俊,郑兴文.铝制冷板在乙二醇冷却液中的腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2017,38(11):871-876.

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。