

腐蚀试验后典型案例失效分析

朱晓晶 李 飞 崔 晨

中汽研汽车零部件检验中心(宁波)有限公司 浙江 宁波 315104

摘要: 盐雾腐蚀试验是一种评估材料基材及其涂层耐腐蚀性能的重要实验方法。通过模拟海洋环境中的盐雾条件,此方法能够有效预测材料在实际应用中的腐蚀行为。本研究采用实验室中常用的盐雾箱,针对汽车零部件的涂层进行优化,以验证优化后的零部件在防腐蚀性能方面的有效性。研究的目标防止腐蚀带来的危害。

关键词: 盐雾腐蚀;汽车零部件;涂层;失效原因

引言:腐蚀每年给全球带来巨额经济损失,其损失超过了地质灾害的总和。对于汽车腐蚀,直接损失包括因腐蚀而增加的零部件材料费用、维护技术投入以及维修更换成本。间接损失则更为严重,随着新能源汽车销量的持续增长、出口规模的持续扩大,汽车腐蚀、老化问题成为影响车辆性能与寿命的关键因素,汽车腐蚀老化问题投诉大幅增长,影响用户体验和企业品牌形象。汽车腐蚀是一个涉及设计、材料、工艺和环境的系统工程问题。

1 常见的腐蚀案例

汽车腐蚀试验后典型案例失效分析涉及多个方面,以下是一些常见案例及原因分析:

1.1 车身缝隙腐蚀

车身缝隙腐蚀现象主要集中于车门包边、车门铰链与侧围安装面、机舱内部焊接接缝等部位。其成因可归纳为以下几个方面:首先,涂胶密封不充分,例如在钣金焊缝、包边结构等处若密封胶涂布不完整或存在漏涂,外部水汽易渗入缝隙内部,从而诱发局部腐蚀。其次,结构设计存在缺陷,如某些空腔区域钣金间隙过小或工艺孔布置不合理,影响电泳漆在内部的覆盖效果,导致残留积液难以排出,加速腐蚀进程。

1.2 底盘部件腐蚀

排气系统焊缝、底盘黑色涂层部件及紧固标准件等关键区域存在较为严重的腐蚀现象。该问题的产生可归因于多重因素的综合作用:首先,车辆运行环境较为恶劣,底盘长期暴露于砂石冲击、融雪剂或含盐泥水飞溅等工况,导致腐蚀介质持续附着并加速材料劣化;其次,部分零部件的表面涂层或电镀层在耐腐蚀性能上存在不足,材料选择亦未充分考虑腐蚀环境要求;此外,在装配过程中,螺栓安装可能划伤或破坏原有防护涂

基金项目:“科创甬江 2035”关键技术突破计划项目《汽车行业碳足迹评价和标识认证研究及应用》(2024Z252)。

层,且若预紧力不足,易在连接缝隙处形成积液并引发局部锈蚀,进一步降低结构耐久性。

1.3 发动机舱部件腐蚀

铝制部件表面在特定工况下出现了白色腐蚀产物,尤其是在高压油泵与涡轮增压器等高温区域呈现出较为明显的腐蚀倾向。其腐蚀机理主要可归纳为:一方面,在模拟或实际使用环境中,盐雾所含氯离子会侵蚀并破坏铝材表面的钝化氧化膜,从而诱发局部点蚀;另一方面,高温条件会进一步加速腐蚀过程,未采取适宜表面防护的高温部件(如高压油泵、EGR管路等)在腐蚀介质与热载荷的共同作用下,其耐蚀性能显著下降,导致腐蚀现象更为突出。

1.4 内外饰塑料件腐蚀

车标、门把手等电镀装饰件表面常出现光泽变暗并伴随腐蚀麻点的现象。其腐蚀成因主要涉及以下几方面:首先,外源性机械损伤,如钥匙、戒指等尖锐物体易划伤电镀表面保护层,造成底层镍暴露并加速腐蚀扩散;其次,电镀层厚度不足或镍层间电位差不满足设计要求,导致其耐盐雾腐蚀能力下降;此外,若镍封层中活性点分布密度偏低,将无法有效分散腐蚀电流,致使腐蚀集中于局部区域并形成可见的蚀点。

1.5 雨刮臂座起泡失效

雨刮臂座铝合金部件在整车强化腐蚀试验中表现出表面起泡及丝状腐蚀现象^[1]。其失效机制可主要归因于材料特性及前处理工艺两方面因素:材料方面,较高铜含量的铝合金中易形成电位差异明显的第二相,在腐蚀介质中作为阴极相显著加速周围基体的电偶腐蚀进程;前处理方面,钝化工艺处理未能有效抑制或转化含铜第二相,使其持续作为活性阴极,进一步促进基体阳极溶解,导致腐蚀沿特定方向扩展,形成典型的丝状腐蚀形貌。

2 提升汽车零部件抗腐蚀方法

2.1 电镀件防护性能提升路径

为提升电镀件的长期耐腐蚀性能,可从镀层体系设计、工艺优化及后处理强化等方面系统改进,具体路径如下:

2.1.1 镀层体系与厚度优化

通过增加功能性镀层的厚度并优化其结构,可显著提高电镀件的防护能力。例如,将镍层总厚度提升,并构建“半光亮镍/高硫镍/光亮镍”多层复合体系,利用不同镍层之间的电位差,引导腐蚀沿横向扩展,延缓腐蚀向基体渗透。此外,在铜底层与表层之间引入镍封层或微孔铬层作为耐蚀中间层,可有效分散腐蚀电流,抑制局部点蚀的发生。

2.1.2 新型镀层技术应用

采用合金镀层替代传统纯金属镀层是提升综合性能的重要方向。锌镍合金(镍含量一般要求12%-16%)及铝合金等体系,在保持良好镀层结合力的同时,可显著提高镀层硬度与耐盐雾腐蚀性能。进一步通过脉冲电镀工艺改善镀层致密性与均匀性,或向镀液中添加纳米二氧化硅、三氧化二铝等陶瓷颗粒形成复合镀层,能够同步增强镀层的耐磨性、机械强度与介质阻隔能力。

2.1.3 后处理强化工艺

电镀后对表面进行钝化或涂覆有机薄膜,可封闭镀层微观孔隙,延长其服役寿命。目前常用方法包括硅烷转化膜处理及涂覆的水性丙烯酸防护层。该工艺在不影响表面光泽与装配精度的前提下,为镀层提供附加的物理屏障与化学稳定性,进一步提升其在复杂环境中的耐腐蚀性能。

2.2 涂层增厚与多层协同设计

通过系统增加各涂层厚度并优化其功能配置,可显著增强整体防护效果:

2.2.1 涂层体系增厚与多层化

在涂层体系的防护性能提升路径中,电泳底漆层、中涂与色漆层以及清漆外层需进行系统化协同设计与材料优化:电泳底漆层应在结构缝隙、空腔等腐蚀敏感区域确保漆膜厚度不低于20 μm ,并选用高泳透力电泳涂料,以在复杂几何内表面形成完整连续且附着力优良的防腐基底;中涂层通过添加片状铝粉、云母或改性硅酸盐等屏障型填料,有效延长腐蚀介质的扩散路径,从而提升整体涂层体系的屏蔽性能,同时色漆层中引入高效紫外线吸收剂与抗水解助剂,进一步增强涂层的耐候性与湿热环境稳定性;清漆外层则建议将膜厚控制在大于35 μm ,并采用含硅氧烷、氟碳树脂或高性能聚氨酯体系,以提高涂层表面的疏水性、耐化学品性及抗石击破坏能力。

2.2.2 自修复及智能响应涂层技术

为进一步提升涂层的长期防护性能与服役可靠性,先进的自修复涂层技术受到广泛关注。其中,微胶囊自修复体系通过在涂层基体中掺入包覆缓蚀剂或可聚合单体的微胶囊,当涂层因机械损伤产生微裂纹时,胶囊破裂并释放活性物质,实现局部腐蚀防护的自主修复,从而延长涂层的使用寿命。某高校团队开发了一种以脲醛树脂为壁材、环氧树脂为芯材的微胶囊体系,将其引入环氧涂层中,在划伤区域可实现超过80%的修复效率,显著提高了涂层在盐雾环境下的耐蚀性。

与此同时,动态可逆交联涂层通过构建基于Diels-Alder反应、动态氨基甲酸酯键或动态二硫键等可逆化学键的聚合物网络,使涂层在外界刺激(如热、光或特定化学环境)下具备裂纹自愈能力。该类涂层不仅能够实现多次修复,还兼具良好的力学性能与环境适应性。某高校团队致力于新型光热自修复涂层的开发,利用分子动力学等手段设计本征自修复涂层,通过缺陷调控、表界面优化等手段合成化学稳定性高、光热转换效率高、光热填料,全面客观地评估复配涂层体系的光热自修复机制。

2.2.3 新型功能性涂层材料应用

纳米复合涂层技术通过引入石墨烯、碳纳米管或层状纳米黏土等功能纳米材料,可有效提升涂层的机械强度、阻隔性能及腐蚀防护耐久性。某学院研究团队将功能化氧化石墨烯引入环氧树脂涂层中,通过界面作用力优化及分散控制,使涂层的硬度提高约40%,耐盐雾时间延长至2000小时以上,并显著降低了水和氯离子的渗透率。

3 实验室加速试验与实际服役环境的相关性评价

盐雾腐蚀试验作为一项经典加速试验方法,其根本价值在于能够以较短时间预测材料或构件在长期自然暴露下的性能表现。但是单一的恒定盐雾试验与复杂的真实汽车服役环境(干湿交替、温度变化、紫外照射、机械应力等)存在差异。因此,对试验结果进行科学解读必须建立在理解相关性的基础上^[2]。

首先,需明确盐雾试验的模拟侧重。中性盐雾试验主要模拟沿海大气中氯离子渗透引发的均匀腐蚀或涂层下腐蚀,对于评价金属基材的耐蚀性、镀层孔隙率及涂层完整性尤为有效。如本文分析的底盘件腐蚀,其主因是氯离子和湿气,因此NSS试验具有良好的模拟性。但对于涉及酸性污染物(如酸雨)或交变应力的部位,则需引入循环腐蚀试验(CCT),其典型周期包含盐雾、干燥、潮湿等阶段,能更好地再现车身缝隙等处因干湿循环导致的腐蚀加速现象。

其次,相关性建立依赖于严酷度转换研究。研究所显示,通过在全国典型环境站点进行长期大气暴露试验,并同步进行实验室加速试验,可以建立起两者之间的当量关系。这种基于数据的相关性模型,是工程上将试验结果转化为设计寿命预估的关键。在本文研究中,优化后的涂层若能将盐雾试验红锈出现时间从500小时提升至1000小时,依据特定的相关性模型,可初步推测其在某沿海城市的防锈保修期可能从5年延长至10年,从而为成本决策提供量化依据。

最后,失效模式的一致性是对比试验有效性的核心判据。无论采用何种加速试验,其诱发的失效模式(如涂层的起泡、基体的点蚀、镀层的剥落)必须与实地失效件分析结果(微观形貌和机理上保持一致。本研究在分析各类案例后,在盐雾箱中复现了类似的起泡、丝状腐蚀等现象,证明了所用试验方法对于揭示这些失效机制是有效的工具。未来,结合多环境因子叠加的加速试验方法和基于大数据的环境谱编制,将进一步提升实验室试验的模拟保真度和预测准确性。

4 从防腐设计到全生命周期成本管理的工程思维拓展

汽车腐蚀防护不仅是一个技术问题,更是一个关乎产品可靠性、市场竞争力和企业经济效益的系统工程。因此,工程师的思维应从单纯的“技术防腐”向“成本效益最优的全生命周期防腐管理”拓展。

在设计与材料选型阶段,需进行初始成本与后期成本的权衡。采用更高等级的镀层(如镀锌合金替代纯锌)、更厚的涂层体系或更耐蚀的基材(如镀锌板替代冷轧板),必然会增加单件初始成本。然而,从全生命周期成本(LCC)视角看,这能够大幅降低车辆在保修期内的索赔费用、过保后因腐蚀问题导致的客户流失带来的隐性成本,以及维护品牌形象所需的营销投入。一个经典的工程决策模型是计算“每辆车防腐投入的增加额”与“因腐蚀问题降低的每辆车平均保修成本及品牌折价”之间的平衡点。

在制造与质量管控阶段,预防优于纠正。许多腐蚀源于密封不良、涂层损伤等工艺缺陷。因此,投资于高精度的自动涂胶设备、机器人喷涂系统、在线膜厚检测仪等,虽然增加了资本支出,但能从根本上减少缺陷流出,避免后期高昂的现场维修、大规模召回及信誉损失。

在售后服务与可持续性阶段,防腐性能直接影响品

牌资产与循环经济。优异的防腐蚀能力是汽车耐用性的直观体现,直接关联用户口碑和二手车残值,这是高端品牌的核心资产之一。同时,随着欧盟等市场对汽车可回收率要求的提高,易于分离和回收的环保涂层、无重金属的表面处理技术,不仅是为了满足法规,更是企业构建绿色供应链、履行社会责任战略选择。

综上所述,对盐雾腐蚀试验的深化理解和防腐技术的创新应用,最终应服务于提升产品全生命周期的价值。工程师需要在技术方案、成本控制、质量保证和可持续发展等多目标约束下寻求最优解,这标志着汽车腐蚀防护工作从传统的“后方保障部门”向“参与前端设计与价值创造的核心工程环节”的深刻转变。

结束语

盐雾腐蚀试验作为评估材料与涂层耐蚀性能的重要手段,在汽车零部件腐蚀防护的研究与应用中具有不可替代的价值^[3]。本研究通过系统分析车身缝隙、底盘部件、发动机舱高温件等典型腐蚀案例,揭示了其失效机制主要源于结构设计缺陷、环境介质滞留、材料与涂层性能不足以及工艺控制薄弱等多因素耦合作用。进一步地,针对电镀件与涂层件的防护提升路径,研究提出从镀层体系优化、涂层增厚与多层协同设计,到引入自修复、纳米复合与环境友好型涂层等先进技术的系统性解决方案。结果表明,通过材料-结构-工艺-环境的整体优化,可显著提升汽车零部件的腐蚀防护能力,延长其服役寿命,从而降低因腐蚀导致的直接与间接经济损失,并有助于提升车辆品质、用户满意度与企业品牌形象。未来,随着智能涂层技术、数字化腐蚀预测与全生命周期防护体系的不断发展,汽车腐蚀防护将向着更高效、更环保、更智能的方向持续演进,为汽车工业的可靠性与可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]朱飞,王斌洋,王晓佳,等.预腐蚀平行钢丝高温后力学性能试验研究[J].水利水运工程学报,2025(4):175-183.. DOI: 10.12170/20240322002
- [2]齐淑林,李江江,赵民,等.动车组涂层体系循环腐蚀试验的研究[J].涂料工业.2020,50(3).64-66,71. DOI:10.12020/j.issn.0253-4312.2020.3.64.
- [3]中国汽车工程学会.2021中国汽车工程学会年会论文集[M].机械工业出版社,2022.