

水利金属结构表面涂层附着力检测方法实践研究

姜佳 徐海亮

江苏禹衡工程质量检测有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17075

[摘要] 本研究旨在深入探究水利金属结构表面涂层的附着力检测方法,并详细分析拉拔法、划痕法、剪切法以及PCM附着力检测技术各自的原理、操作步骤及其应用效果。通过细致对比不同材质结构的附着力差异情况,深入探究环境因素究竟如何影响附着力,严谨验证附着力促进剂的实际应用效果,同时积极探索涂层附着力与结构耐久性之间存在的紧密关系。研究结果表明,不同的检测方法各自具备独特的优势与不足,其适用范围也各有差异,同时,材质特性与环境因素对涂层附着力的影响十分显著,而附着力促进剂的应用则能够有效地提升涂层的附着力。这一结论为检测方法的进一步优化以及新型技术的研发工作提供了坚实且科学的依据。

[关键词] 涂层附着力; 检测方法; 水利金属结构; PCM检测技术

中图分类号: TV698.2 **文献标识码:** A

Research on Practical Methods for Testing the Adhesion of Surface Coatings on Hydraulic Metal Structures

Jia Jiang Hailiang Xu

Jiangsu Yuheng Engineering Quality Testing Co, Ltd.

[Abstract] This study aims to conduct an in-depth investigation into the adhesion testing methods for surface coatings on hydraulic metal structures, providing a detailed analysis of the principles, operational procedures, and application effectiveness of various techniques, including the pull-off method, scratch method, shear method, and PCM adhesion testing technology. By meticulously comparing adhesion differences across different material structures, it explores how environmental factors influence adhesion, rigorously verifies the practical effectiveness of adhesion promoters, and actively examines the close relationship between coating adhesion and structural durability. The results indicate that each testing method has its own distinct advantages and limitations, with varying scopes of application. Furthermore, material characteristics and environmental factors significantly affect coating adhesion, while the use of adhesion promoters can effectively enhance it. These conclusions provide a solid and scientific basis for further optimization of testing methods and the development of new technologies.

[Key words] Coating Adhesion; Detection Methods; Hydraulic Metal Structures; PCM Testing Technology

引言

涂层附着力作为评判金属结构防腐性能好坏的一个核心指标,检测精度对水利工程的耐久性评估以及后续维护策略的制定有着直接的影响。在水利工程金属结构服役过程中,涂层失效往往源于附着力不足引发的剥离、脱落现象,进而导致基材直接暴露于腐蚀介质中,加速结构劣化进程^[1]。现有研究表明,涂层附着力与金属基材表面粗糙度、涂层材料分子结构及环境介质渗透性存在显著相关性^[2],而传统检测方法如划格法、拉开法等因操作主观性强、量化精度低等问题,难以满足复杂工况下的检测需求^[3]。因此,研发出既精准又高效的涂层附着力检测技术,

已然成为水利金属结构防腐方面至关重要的研究课题。

1 研究背景与意义

1.1 水利金属结构腐蚀现状

水利金属结构长久地暴露在复杂多变的环境介质里,其遭受腐蚀的过程,受到电化学作用、微生物侵蚀以及机械磨损等诸多因素共同、复杂的影响。在潮湿环境下,金属表面易形成微电池腐蚀系统,导致局部点蚀与均匀减薄;而在含氯离子或硫化物的介质中,腐蚀速率显著加快,可能引发应力腐蚀开裂等灾难性失效模式^[4]。据相关统计数据,那些没有采取有效防腐措施的水利金属结构,其使用寿命或许会大幅缩短,仅仅能达到设计

值的30%–50%，这无疑会直接对工程的安全以及运行效率构成严重威胁。

1.2 涂层附着力的重要性

涂层附着力,作为衡量防腐体系与金属基材之间结合紧密程度的核心指标,其数值的准确大小能够直接体现出涂层抵抗剥离、起泡等各类失效模式的能力。按照ASTM D3359标准的规定,附着力等级被细致地划分为0级至5级这六个档次,其中,5级代表着涂层与基材之间实现了完全的附着,而0级则意味着涂层已经完全剥离。在水利金属结构里,当涂层的附着力不够时,腐蚀介质就会顺着涂层与基材的界面逐渐渗透进去,进而形成“鼓包-剥离-腐蚀”的恶性循环过程。

1.3 检测方法研究的必要性

当前所使用的检测方法,在技术层面存在着较为明显的局限性,这在一定程度上对水利金属结构防腐质量能否进行精准评估产生了制约。传统划格法(按照ISO 2409标准执行)只能对附着力等级进行定性的判断,不能对结合强度进行量化分析,而且在检测软质涂层时还容易对其造成人为的损伤。拉拔法(ASTM D4541)虽然能够给出定量的数据,然而其检测效率并不高,单点检测所需时间超过15分钟,而且对于曲面结构的适应性也不够理想。在某大型泵站的检测过程中,拉拔法由于操作空间受到限制,致使30%的检测点无法进行有效检测,进而延误了工程进度。在面对复杂几何结构的检测时,这些方法暴露出了明显的局限性,导致行业不得不采用“抽检+经验修正”这种相对粗放的管理模式,进而埋下了安全隐患。

2 研究方法

2.1 拉拔法

拉拔法作为检测涂层附着力的经典手段,其根本原理源自机械力学领域里的拉伸破坏效应。该方法借助专用的拉拔仪,垂直地将涂层从基材表面剥离下来,并把最大拉拔力当作附着力的定量衡量指标,其单位一般采用MPa或者N/cm²。操作流程主要包含四个关键环节,即试样制备、粘结剂涂覆、固化养护以及拉拔测试,粘结剂的选择要同时考虑与涂层和基材的相容性,防止因界面反应对检测结果产生干扰^[5]。在水利金属结构的实际应用中,拉拔法特别适合作为检测平面或是微曲面构件的局部附着力情况,像闸门、拦污栅这类结构的涂层质量评估就很适用。

2.2 划痕法

划痕法利用机械划痕的方式使涂层发生失效,并借助划痕的形貌参数来反向推导附着力,其背后的理论支撑是涂层与基材界面间的能量释放率模型。检测流程主要涵盖划痕制备、形貌观测以及临界载荷确定这三个关键步骤:具体操作时,先利用金刚石压头在涂层表面施加呈线性递增趋势的载荷,从而形成连续的划痕;接着,借助光学显微镜或者扫描电镜来仔细观察划痕两侧涂层的剥落状况;最后,把涂层首次出现连续剥落现象时的临界载荷当作附着力指标。该方法在面对不同材质的水利金属结构时,表现出的适用性有所不同。比如,在铝合金表面,由于

其材质较为软质,容易产生塑性变形,这时就需要结合声发射技术来辅助判断失效点;而在不锈钢表面,因为其硬度相对较高,划痕的形貌会更加清晰,检测结果的重复性也更为出色。

2.3 剪切法

剪切法主要是靠施加和界面平行的剪切力,来达到涂层剥离的目的,力学模型是以库仑摩擦理论为基础的。测试过程主要涵盖试样制备、夹具固定以及加载测试这三个关键阶段。试样要被加工成双剪或者单剪的标准件,以此保证涂层和基材之间的接触面积能够精确地得到控制;在加载环节,会使用伺服液压机来施加匀速的位移,并记录下剪切力-位移曲线;最终,将最大剪切力或者剪切强度当作附着力的指标。该方法在评估涂层附着力时,展现出了较高的准确性,尤其针对厚涂层体系,这是因为其剪切破坏模式与实际服役条件下所承受的应力状态更为接近。误差的主要来源涵盖了试样对齐时产生的偏差、加载速率出现的不稳定波动以及界面预先存在的应力,要降低系统误差,就必须实施严格的过程控制措施

2.4 PCM附着力检测技术

PCM(脉冲电流法)附着力检测技术,依托于电化学阻抗谱原理,属于一种非破坏性的检测手段,通过细致监测涂层与基材界面在脉冲电流刺激下所产生的响应特性,进而准确反推出附着力参数。操作流程主要涵盖电极布置、脉冲激励施加以及信号解析这三个关键环节:具体操作时,先在涂层表面精心布置阵列式电极,从而形成完整的检测网络;接着施加宽频脉冲电流,以此激发界面电荷的传输;最后通过傅里叶变换对抗谱进行解析,提取出特征频率下的相位角和模量参数,进而建立起与附着力的定量关系模型。

3 实践研究

3.1 不同材质水利金属结构的附着力检测

在水利金属结构防腐这个特定领域里,由于不同材质金属结构的化学成分、晶体结构以及表面状态都存在差异,涂层附着力表现有着十分明显的不同。以钢、铝、铜三种典型材质为例,钢材因表面粗糙度较高且存在氧化铁皮等缺陷,涂层附着过程需通过机械咬合与化学吸附共同作用形成结合力,其附着力检测值通常高于铝材。铝材的表面很容易生成一层致密的氧化膜,这层氧化膜有着较强的化学惰性,使得涂层和基材之间的界面结合主要是依靠物理吸附,在附着力检测的时候,常常会出现局部剥离的情况,所以需要通过表面预处理,像喷砂、磷化等方式,来破坏这层氧化膜,进而提升附着力。铜材有着极佳的延展性,在涂层附着的时候,基材很容易发生变形,进而致使界面应力集中,所以在进行附着力检测时,需要把拉拔法和剪切法结合起来综合评估,能避免单一方法因应力释放不充分而出现误差。

3.2 环境因素对附着力的影响

环境因素对涂层附着力的影响,会随着时间变化而展现出不同的特点,同时在空间分布上也存在明显差异。温度这一关键的环境参数,会通过改变涂层分子链的运动能力,进而对附着力的形成机制产生影响:在低温环境(低于-10℃)中,涂层的固化

反应速率会明显降低,分子链之间的交联变得不充分,这使得附着力检测值相较于常温(25℃)时下降了30%~50%;相反,在高温环境(高于50℃)下,涂层与基材之间的热膨胀系数差异会引发界面应力,导致在附着力检测过程中,涂层更容易出现剥落现象。湿度对附着力的影响主要体现在涂层固化过程中的水分竞争吸附:当环境相对湿度超过70%时,涂层中的溶剂挥发速率减缓,水分渗入涂层与基材界面形成水化层,导致附着力检测值降低20%~40%,这一现象在铝材表面尤为显著。

3.3 涂层附着力与结构耐久性的关系

以某座大型水库的闸门作为典型案例,其闸门表面所涂覆的涂层,在初次进行附着力检测时,数值显示为15MPa。历经5年的运行使用后,那些附着力降低至10MPa的闸门区域,明显出现了锈蚀现象;反观附着力依旧维持在12MPa以上的区域,则并未发现任何腐蚀的迹象。这一现象能够借助涂层失效领域里著名的“薄弱环节理论”来阐释:一旦涂层的附着力低于临界值(一般来说是8~10MPa),涂层和基材之间的界面结合处,就会变成腐蚀介质能够渗透进去的通道,使得局部的电化学腐蚀速度加快,最终造成涂层大面积地剥落。当附着力处于12~15MPa这个范围时,结构耐久性指数(用腐蚀速率的倒数来表征)能够达到8~10年;要是附着力下降到8~12MPa,耐久性指数就会降低到5~7年;而当附着力低于8MPa时,耐久性指数甚至不足3年。通过数据分析得出的量化关系显示,当涂层的附着力每提升2MPa时,其结构的耐久性能够相应延长1~2年。此外,附着力与结构耐久性之间的关系,还会受到涂层类型的影响:像环氧类涂层,由于其交联密度比较高,附着力与耐久性的相关性系数能够达到0.92;而聚氨酯类涂层因为柔韧性特别好,其相关性系数为0.85,所以要结合剪切法检测来评估其界面剪切强度。

3.4 附着力促进剂应用效果的实践验证

附着力促进剂能够改善涂层和基材界面之间的化学结合情况,进而大幅提高涂层的附着力。当在钢质水利金属结构表面涂上硅烷偶联剂类促进剂后,通过拉拔法检测发现,涂层附着力从原本的15MPa显著提升到了22MPa,增幅高达46.7%;同样地,在铝材表面应用磷酸盐类促进剂后,附着力也由8MPa提升到了14MPa,

增幅达到了75%。促进剂发挥作用的机制主要涵盖两个关键层面:一方面能够与基材表面的羟基发生化学反应,进而生成稳固的化学键,以此增强界面之间的结合力;另一方面还可以降低涂层表面的张力,提升涂层的润湿性能,从而有效减少界面存在的缺陷。环境条件会明显影响促进剂的效果:当处于高温高湿环境,温度达到40℃、相对湿度为85%RH时,促进剂的有效性相较于常温状态会降低30%~50%,此时就需要通过把促进剂浓度从1%提高到2%,或者添加缓释剂来补偿效果。

4 结论

实践研究显示,针对水利金属结构表面涂层的附着力检测,拉拔法、划痕法、剪切法以及PCM附着力检测技术均展现出各自的特点,其中拉拔法操作直观却带有破坏性,划痕法适合快速筛查但精度稍显不足,剪切法对试样制备有着较高要求,而PCM技术则以其高精度和高效率脱颖而出。不同材质的金属结构,它们之间的附着力差异十分明显,像环境温湿度、腐蚀介质这类动态因素,会改变涂层分子间的作用力以及基材的表面能,进而对附着力的稳定性产生直接影响。未来的研究工作,应当着重于研发那些既不会造成破坏、又具备高精度的智能化检测技术,同时,还要进一步深入探索附着力与结构耐久性之间的动态关联模型,以期为水利金属结构的整个生命周期内的防腐维护工作,提供坚实的理论支撑。

[参考文献]

- [1]许旭东,蔡一平,王延艳.水工金属结构防腐涂层附着力试验与分析[J].水利建设与管理,2024,(5):65-69.
- [2]李鑫.水利工程金属结构防腐检测与防护技术研究[J].区域治理,2025,(13):0103-0105.
- [3]张娟娟,范志伟.建筑金属结构安全性能检测与评估方法研究[J].中国建筑金属结构,2024,(10):190-192.
- [4]谢挺,李云龙.钢管基材表面熔结环氧涂层附着力的评价方法及影响因素[J].腐蚀与防护,2022,(4):59-64.
- [5]贺嘉伟,许新科,孔明,等.基于面结构光的金属表面高光抑制方法研究[J].中国测试,2021,(10):12-18.