

水工钢闸门防腐涂层研究进展

张泽挥¹, 张伟绅², 曹天宝¹, 苏天^{2,*}, 石鑫炜¹, 张润¹

1. 华设检测科技有限公司, 江苏 南京, 210000

2. 山东理工大学, 建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博, 255000

摘要: 钢闸门是水工建筑物的主要挡水结构。在干湿交替的环境下, 防腐涂层容易发生起泡、开裂剥落等现象, 从而会导致钢闸门失去保护, 在使用过程中发生腐蚀破坏。简要综述了水工钢闸门的腐蚀环境分类, 总结了钢闸门防腐涂层病害现状及评定, 总结了自然曝露试验和人工加速老化试验方法, 分析了室内外老化试验的相关性。综述了水工钢闸门防腐涂层寿命预测的研究现状, 指出了目前水工钢闸门防腐涂层研究面临的难题, 并有针对性地提出了进一步的研究方向。

关键词: 钢闸门; 防腐涂层; 寿命预测

Research Progress of Anticorrosive Coatings for Hydraulic Steel Gate

ZHANG Ze-Hui^{1,*}, ZHANG Wei-Shen², CAO Tian-Bao¹, SU Tian^{2,*},
SHI Xin-Wei¹, ZHANG Run¹

1. China Design Testing Technology CO., LTD, Nanjing, Jiangsu, China, 210000

2. Shandong University of Technology Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Geomatics,
Shandong University of Technology, Zibo, Shandong, China, 255000

Abstract: Steel gate is the main water retaining structure of hydraulic structures. In the alternating wet and dry environment, the anticorrosive coating is prone to blistering, cracking and spalling, which will lead to the loss of protection of steel gates and corrosion damage in the process of use. The classification of corrosion environment of hydraulic steel gate is briefly summarized. The present situation and evaluation of anticorrosive coatings for steel gates are summarized. The methods of natural exposure test and artificial accelerated aging test are summarized. The correlation between indoor and outdoor aging tests is analyzed. The research status of lifetime prediction of anticorrosive coatings for hydraulic steel gates is reviewed. The difficulties faced in the current researches on anticorrosive coatings for hydraulic steel gates and further research directions are also pointed out in this paper.

Keywords: Steel gate; Anticorrosive coating; Lifetime prediction

我国幅员辽阔, 河流众多, 具有发展水运的优越条件。改革开放以来, 我国水运事业有了很大的发展, 内河航道建设取得了很大的成就。在开展改善航道工程中, 由于采取了综合治理, 同时结合兴修水利工程, 大搞河网化, 修建了许多通航建筑物。水工钢闸门是通航建筑物的重要组成部分, 钢闸门所处的环境介质及运行工况较为复杂, 它们有些处于室外大气、室内大气及潮湿的大气中, 有些处于水下的静水、动水及泥沙高速冲磨中, 有些处于干湿交替的环境中, 有些处于海水和生物及化学腐蚀中。所以水工钢闸门在使用过程中都会受到环境因素的作用而发生腐蚀破坏, 因环境的不同其破坏的程度也不同。因此, 为了有效控制水工钢闸门的腐蚀, 延长其使用寿命, 水工钢闸门的长效防腐问题引起人们的广泛关注^[1-4]。

1 腐蚀环境分类

ISO 12944-2-2017 “色漆和清漆—防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护（环境分类）”对涂层所处的腐蚀环境进行了分类，涂层的腐蚀环境一般分为大气腐蚀环境、水和土壤腐蚀环境。水工钢闸门防腐涂层所处的环境一般为水环境，水的类型—淡水、咸水或盐水—对钢材的腐蚀有严重的影响。钢闸门腐蚀环境示意图如图 1 所示。腐蚀性也受水中氧含量、溶解物质的类型和数量及水温的影响^[5]。水浸渍环境可分为以下三类区域：

—水下区域：永久浸没在水里的地方；

—中间区域（变动水位）：由于自然或人为因素而水位变动，受水和大气的水雾联合作用而加重腐蚀的区域；

—浪溅区：被浪和水雾溅湿的区域，能引起异常高的腐蚀应力，特别是盐水。



图 1 钢闸门腐蚀环境示意图

Fig. 1 Corrosion environment diagram of steel gate

2 钢闸门防腐涂层病害现状及评定

钢闸门因受到各种环境因素的作用而发生腐蚀，为了避免或缓解腐蚀，防腐涂层由于其有效、经济等优势而成为目前应用最广泛的控制腐蚀的手段。但是，水工钢闸门防腐涂层同样会受到各种因素的作用，如紫外线、温度、水、氧气、荷载、流水冲刷等，而导致防腐涂层发生老化，外观上出现失光、变色、粉化、起泡、生锈、剥落等病害。例如某船闸钢闸门，1999 年涂装结束，运营 10 年，钢闸门外表面油漆出现粉化、局部锈蚀等病害，其中严重锈蚀深度达到 2-3mm。经过水工金属结构防腐检测，在涂层表面发现大面积锈蚀、起皮、沾污等病害，普遍出现涂层剥落锈蚀现象，锈蚀部位大部分以点状分布。

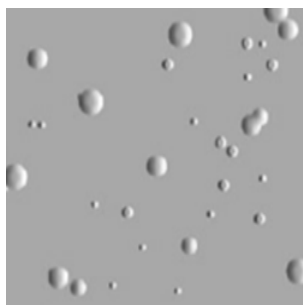


图 2 起泡

Fig. 2 Blister

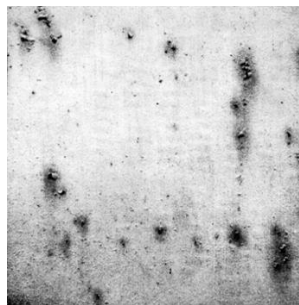


图 3 生锈

Fig. 3 Rust

对于防腐涂层病害的评定,国内外有许多规范可供参考。GB/T 1766-2008《色漆和清漆:涂层老化的评级方法》规定了涂层老化的评级通则,规定了失光、变色、粉化、开裂、起泡、生锈、剥落、长霉、斑点、泛金、沾污等老化单项指标的评级方法,规定了装饰性漆膜和保护性漆膜的综合老化性能等级评定方法^[6]。ISO 4628-2003《色漆和清漆:涂层老化的评定——缺陷的变化程度、数量和大小》基本把涂层劣化评定分为起泡、生锈、开裂、剥落、粉化和丝状腐蚀六个方面,起泡、生锈、开裂、剥落、粉化这五个方面分别与GB/T 1766-2008对涂层劣化的分类一致,但其中的丝状腐蚀评估是中国规范所没有的。美国材料与试验协会(ASTM)对涂层在钢结构表面涂层劣化提出了相应的评估标准,该标准除了将外用涂料的开裂程度细化为微裂和开裂两方面,其他部分与我国的标准大体一致。

3 防腐涂层老化失效的试验方法

3.1 自然气候曝露试验

自然气候曝露试验是一种在户外对试样进行曝露试验的老化方法,使试样在真实的自然状况下,通过自然环境因素(诸如阳光、风、雨、雪、露水、气温、化工气体等各种大气条件的综合作用)对试样的作用,从而实现自然老化的试验方法。观察其性能随时间发生变化的特点,通过检验样板外观评估其耐久性,此实验数据可靠。现场暴露实验能对涂层的抗老化性能给出理想的评价,也有其不可替代的长周期数据价值。自然气候曝露试验除了数据可靠的长处之外,还有所需实验设备比较简单,可投样品较多等优点。其缺点是实验周期长,少则几个月,长的要十几年时间^[7-8]。为此,我国科技部建设了国家材料环境腐蚀平台,长期从事材料环境腐蚀数据积累和试验研究,目前已整合建成了30个国家级试验站和材料腐蚀平台中心构成的国家材料环境腐蚀试验研究基地。

多年来,国内外也有很多科技工作者对防腐涂层进行自然气候曝露试验以研究涂层的耐久性和应用价值。黄微波等对Qtech-412涂层进行600天户外自然曝晒老化,发现其光泽度下降超过90%,力学性能基本不变,目前该涂层已成功应用于青岛海湾大桥承台、港珠澳大桥沉管隧道接缝等防护工程^[9]。王晶晶等通过室外海洋大气暴晒对环氧涂层进行了老化试验^[10]。为进行三峡工程金属结构设备防腐涂装体系设计,其中包括多座钢闸门结构,从1995年开始进行户外挂片试验,用于大气暴露腐蚀试验的有机涂装体系42种,用于长江水暴露试验(含全浸和干湿交替工况)的有机涂装体系35种^[11]。

3.2 人工加速老化试验

由于自然气候曝露试验周期太长,对于改进涂层的抗老化性能研究来说显然是不能接受的。因此,有必要采用人工加速的老化试验方法。人工加速老化试验的基本思想是模拟自然大气暴露环境下的主要因素与应力的作用,使涂层体系在上述因素更高强度的作用下,以更快的速度降解,从而缩短试验时间,以达到对涂层的性能进行快速评价的目的;另一方面,通过建立加速试验时间与户外自然环境暴露试验时间之间的当量关系进行涂层寿命的预测。现有的人工加速老化试验主要有两类:一类为加速光老化试验方法,包括:氙灯、紫外荧光灯、碳弧灯等;另一类为加速腐蚀试验方法,主要有盐雾、湿热、周期浸润等^[12-14]。

加速腐蚀老化试验往往模拟的是腐蚀较为严重的海洋环境以及受到二氧化硫严重污染的工业区域。王连盛等测试了4种不同防腐涂料的耐人工老化性能,通过中性盐雾试验测试了每种防腐涂料老化前后及人为划痕破坏处理后的耐腐蚀性能^[15]。张三平等通过室内加速腐蚀试验,发现对于不同

涂层室内加速腐蚀的破坏形式和程度与户外暴露结果有差异^[16]。Kim 等学者采用加速循环腐蚀试验对 5 种涂层体系进行研究,这 5 种涂层体系广泛应用于日本的钢桥上^[17]。Hirohata 等模拟海水环境自行设计了加速腐蚀试验系统,对环氧涂层、聚氨酯涂层和焦油聚氨酯涂层进行加速腐蚀试验^[18]。

国内外有许多涂层人工加速腐蚀老化试验方法的标准,如:GB/T 23987—2009《色漆与清漆 涂层的人工气候老化曝露 曝露于荧光紫外线和水》(等同采用 ISO 11507:2007)、GB-T 1771-2007《色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定》、GB/T 14522—2008《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候老化试验方法 荧光紫外灯》、GB/T 1865-2009《色漆和清漆人工气候老化和人工辐射曝露滤过的氙弧辐射》等。

3.3 防腐涂层防护寿命的评估及表征方法

在防腐涂层寿命评估的研究中,普遍采用的方法是根据涂层的物理性能、化学性能以及电化学性能等随曝露时间的衰减作出对比和评价。物理性能评价是通过对老化后的试样的光泽度、颜色、粉化、起泡、开裂、剥落等情况进行评级,其中光泽度和颜色的测定应用更普遍。化学性能评价则通过红外光谱、拉曼光谱、光电子能谱等分析有机涂层表面化学结构和成分的变化。电化学性能评价则通过交流阻抗、电化学噪声等技术分析有机涂层的电化学性能,而电化学阻抗谱法目前应用十分广泛,技术也十分成熟,这种方法又被成为 EIS (Electrochemical impedance spectro)。

Fredj 等法国学者用 EIS 方法研究应力对涂层的影响,Deflorian 等意大利学者采用 EIS 方法研究了镀锌钢上防腐涂层的防护性能。骆晨等采用电化学阻抗谱法综合研究航空有机涂层在外加应变和热带海洋大气环境耦合作用下的损伤规律和失效模型^[19-23]。殷红霞等对氟碳涂料进行人工耐候性试验和天然曝露试验,通过测量涂层的光泽度和色差等数据对涂层的物理性能进行评价^[24]。Yong 等以涂层的失光率、厚度、色差、附着力等 8 种性能指标为基础建立涂层的综合评估模型,以便对涂层的防护寿命作出评估^[25]。

3.4 室内外老化试验的相关性

自然曝露试验能真实反映实际环境中涂层的老化规律,但其存在试验周期长、环境复杂等缺点。加速老化试验试验周期短、重现性好,但可能与防腐涂层实际老化机理存在一定的差异,不能完全真实地反应防腐涂层的失效机理,而相关性是评价模拟加速试验合理性与有效性的重要手段,因此对防腐涂层进行室内外相关性研究也十分重要。目前,用于防腐涂层室内外相关性评价的方法主要为失效机理对比法、Pearson 积距相关系数法、Spearman 秩相关系数法、回归分析法、灰色关联度等^[12]。

失效机理对比法的基本思想是防腐涂层在自然曝露试验和人工加速老化试验中的试验结果相近并不一定相关,失效机理一致才是真正的相关。人们可以通过分析防腐涂层宏观以及微观结构、物理及化学性能、电化学本质等方面来研究其室内外相关性。但是,失效机理对比法对设备和人员要求较高,具有一定的局限性,应用起来有一定的难度。

Pearson 积距相关系数法用于衡量两组变量间的线性关系,易受变量分布的影响,对异常值敏感,一般用于数据呈近似正态分布的情况,有一定的局限性。骆晨等采用 Pearson 积距相关系数法计算得到有机涂层户外暴露与户内加速试验的相关系数为 0.77,为强相关^[23]。Spearman 秩相关系数法用于分析两组非线性相关变量之间的相关性分析,方法很简便并且能说明两组变量间的相关性问题,目前,这个方法在涂层老化相关性评价的工作中经常被采用^[26]。诸如回归分析法、灰色关联度等数学

统计方法在涂层老化相关性评价中,也得到了一定的应用。Lee 等对钢桥防腐涂层进行了室内外曝晒试验,并采用幂函数回归的方法对室内外试验的相关性进行评价^[27]。

相关性评价因人工加速老化试验的发展而被提出,评价方法也随之不断增多,获得了巨大的进步,但目前还没有一种公认的最适合相关性评价的方法,需要防腐涂层耐久性工作者的进一步探索。

4 防腐涂层的寿命预测

4.1 涂层保护寿命的定义

一般所说的涂层保护寿命,大多是根据肉眼观察到涂层所保护的基体发生了锈蚀来判断的,其主要标准就是生锈面积的大小^[29]。到目前为止,涂膜的保护寿命还没有一个统一的定义。但有以下几种说法:

- (1) 只要发现有一个地方生锈,就证明涂层已达到了寿命;
- (2) 认为涂层的生锈面积达到某一预定值,就认为涂层达到了寿命;
- (3) 当涂层的低频阻抗值低于 $10^7 \Omega/\text{cm}^2$,涂层即达到寿命。

第一种说法显然不符合实际应用,当钢材基体的某一点发生腐蚀,这只是钢材基体与涂层界面间腐蚀的初始阶段,并不代表整个涂层失去了对钢材的防护功能,其它部分的涂层可能仍处于良好状态。对于第三种说法,应用于寿命预测也不太实际,因为防腐涂层的阻抗下降到这种临界值需要很长的时间,虽然人工加速老化试验缩短了试验时间,但是并不清楚加速条件和实际应用条件下涂层寿命间的关系^[28]。而第二种观点在防腐涂层的寿命预测中被采用地较多。

日本防腐专家山本隆认为涂层钢板生锈的面积率(或涂层开孔面积率)达到 5%时涂层已达到了寿命,并把整个涂层的寿命分为两个阶段。涂层达到开孔的时间为 T_1 ;当涂层所开的孔,经过腐蚀的加剧,其开孔率达到 5%面积时所需要的时间为 T_2 。则:涂层的寿命年限 = $T_1 + T_2$

山本隆先生对涂层寿命的观点,显然是对上述定义的第三种说法的延伸,并对其进行了实质性的表述^[29]。

4.2 防腐涂层的寿命预测模型

如何预测涂层的寿命,一直是涂层应用研究的重大课题之一。20 世纪以来,人们不断对涂层防护及失效理论进行探索,目的是为了找到最符合实际应用状况的涂层防护及失效机理,从而采用最简便、经济、有效的方法来达到保护钢材基体的目的。并根据涂层防护失效机理,建立行之有效的涂层寿命预测模型,利用寿命预测模型科学合理地推断出涂层在不同腐蚀环境下的寿命^[30]。

有一些科学家提出了涂层防护及失效理论和增加涂层寿命的方法,但是对于涂层寿命预测的研究仍然比较少。山本隆博士在上个世纪曾先后查阅了世界上有关涂层方面的文献 26838 件,涉及到涂层寿命的文献仅有 90 件,提出涂层寿命预测公式的文献仅有 3 件。

根据 Fick 的扩散定律,水和氧气等腐蚀介质在涂层中的传输符合 Fick 扩散定律,而且在钢板表面用涂层进行防护,就会在钢板表面形成一层涂膜,这层涂膜能够阻挡腐蚀介质与钢材基体接触^[31-32]。不少科技工作者依据这一理论,认为增加涂膜厚度就可以增加涂层对钢材的防护作用,从而延长涂层的寿命。然而在上个世纪 50 年代,Mayne 提出“涂膜极化电阻控制论”,认为涂料在基体表面形成的涂膜不具备隔离效应,他认为,“涂膜具有良好的透水、透氧性质,所以腐蚀电流可在局部阳极与局部阴极两处通过涂层。若提高涂膜的电阻值,就会减小腐蚀电流”^[29]。

Menges 提出的涂膜寿命公式为:

$$L = l / 6D + \varphi(P_s * \sigma_n) \quad (1)$$

(1) 式中: L —涂膜寿命; l —涂膜的厚度; D —涂膜的离子扩散系数; φ —常数; P_s —施加在涂膜下钢表面的压力; σ_n —涂膜的附着力^[28]。

山本隆博士把涂层的寿命分为两个时间段: 涂层从开始到开孔的时间 T_1 ; 涂层所开的孔经过腐蚀加剧, 开孔率达到 5% 面积所经历的时间 T_2 。涂层的寿命年限 $=T_1 + T_2$ 。基于此假设他提出了自然状态下的涂层保护寿命预测公式:

$$\ln(s\%) = a \times i_{\text{corr}} \times t + \ln(A_0 / S \times 100) \quad (2)$$

(2) 式中: $s\%$ —涂层开孔面积率; a —涂层的开孔率; i_{corr} —腐蚀电流密度; A_0 —初期开孔面积; S —浸渍面积; t —相应的时间。

进入 21 世纪, 随着钢结构的广泛使用, 对于防腐涂层的寿命预测研究也逐渐增多, 人们对于涂层防护及失效理论也理解地更为深刻, 许多数学模型方法被应用于防腐涂层的寿命预测。在腐蚀寿命预测的数学模型方法中, 可分为两种类型: 一种是根据腐蚀机理, 结合数据处理方法来建立的腐蚀特征参数和腐蚀时间之间的数学模型; 另一种是不考虑腐蚀机理, 只根据腐蚀数据, 用纯数学方法来建立腐蚀随时间变化的数学模型^[33]。

通过查阅众多有关涂层寿命预测的文献, 笔者对国内外学者们推导得到的寿命预测公式进行了简要总结, 具体如表 1 所示。

Lee 等通过现场曝露试验和人工加速老化试验对涂层的寿命进行研究, 并分别建立了氯化橡胶、聚氨酯、无机富锌这三种涂层体系的老化模型, 经过回归分析分别得到三种涂层体系的寿命预测公式, 并得出三种涂层体系的寿命分别为 20.8 年、26.6 年、17.8 年^[34]。Kallias 等以涂层失效面积达到 50% 为界限, 建立起涂层的寿命模型, 表 1 的公式中 $A_{\text{pr}}(t)$ 、 $A_{\text{pr}0}$ 分别指涂层的剩余防护面积和初始防护面积^[35]。而后, Kere 等结合 Kallias 的寿命预测公式推导得到了涂层钢的寿命预测公式^[36]。Sun 等研究了主要腐蚀应力与腐蚀率的关系, 并建立腐蚀率与温度、湿度之间的函数关系, 表 1 中 H_K 、 T_K 即表示湿度和温度, 从而达到寿命预测的目的^[37]。

刘攀根据腐蚀机理以及数学推导得到涂层 (含金属基体) 在西安大气腐蚀环境下的寿命预测方程为^[7]:

$$T = -(0.003 / S) \ln(1 - 0.75 / a) + (0.003 / \beta) \left(\sqrt{0.05 A_s - 3.66 + 0.5} \right)^2 + (0.02 D)^2 \quad (\text{年}) \quad (3)$$

(3) 式中: a 、 b 为失光因子系数, β 为起泡系数, A_s 为涂层面积, D 表示钢材年平均腐蚀深度 ($\mu\text{m} / \alpha$)。

耿刚强等运用灰色 GM (1,1) 模型, 并依据涂层防腐机制和经验, 以腐蚀面积为基础建立了涂层寿命预测公式^[39]。Meng 等同样也是采用灰色系统理论 (Grey System Theory) 建立了环氧涂层的寿命预测模型^[40]。Tian 等利用反向人工神经网络的数学方法建立涂层的寿命预测模型^[38]。

郇智斌等以电弧喷锌铝涂层在青岛大气环境下的深度腐蚀速率预测得到青岛海湾大桥钢箱梁外侧 120 μm 厚的热喷涂锌铝涂层的保守使用寿命为 10.2 年^[41]。Hirohata 等研究三种防腐涂层体系, 模拟海洋环境进行加速曝露试验, 通过幂函数模型对腐蚀深度以及腐蚀扩散距离进行预测^[18]。

表1 防腐涂层的寿命预测公式
Table 1 Life prediction formula of anticorrosive coating

作者	寿命预测公式
Lee ^[34]	氯化橡胶体系: $y = 19.52 \exp(x/16.29) - 20.19$
	聚氨酯体系: $y = 2.51 \exp(x/8.73) - 2.55$
	无机富锌体系: $y = 5.36 \exp(x/7.59) - 5.42$
Kallias ^[35]	$\frac{A_{pr}(t)}{A_{pro}} = 1 - \left(\frac{0.6t^2}{T_L^2} - \frac{0.1t}{T_L} \right)$
Kere, K.J ^[36]	$\ln \frac{A_i(T)}{A_0} = \left\{ \ln \left[0.6 \left(\frac{t}{T_{50\%}} \right)^2 - 0.1 \left(\frac{t}{T_{50\%}} \right) \right] + \sigma_A \varepsilon \right\}, t \leq T_U$ $0, t > T_U$
Sun, L ^[37]	$d(S) = -e^{10.9} \cdot H_k^{0.8} \cdot e^{-\frac{5426.3}{T_k}}$
刘攀 ^[7]	$T = -\frac{0.003}{b} \ln \left(1 - \frac{0.75}{a} \right) + \frac{0.003}{\beta} \left(\sqrt{0.05A_s - 3.66} + 0.5 \right)^2 + (0.02D)^2 (\text{年})$
耿刚强 ^[39]	$t = \frac{NA \ln(1 - e^a)}{a \ln S\%} + t_0$
Meng, F ^[40]	$t_\infty = \frac{N}{a} \ln \left[\frac{X^{(0)}_{(t)} - \frac{u}{a}}{W} \right] (1 - e^a) + t_1$
酆智斌 ^[41]	$t = \frac{d}{8.65V / \rho}$

5 结论

(1) 大量自然曝晒试验和人工加速老化试验被用于对防腐涂层的研究, 自然曝晒试验数据真实可靠但周期长, 人工加速老化试验有望在较短时间内对防腐涂层的寿命作出评估和预测, 然而室内外试验的相关性具有不确定性的显著特点, 这是人工加速老化试验应用的一大难题, 是需要进一步研究的课题。

(2) 防腐涂层的寿命预测模型过于简单, 较难适应复杂多样的腐蚀环境, 较难应用于实际涂层体系, 是另一个需进一步研究的课题。

参考文献

- [1] 杨士斌, 马颖, 张松涛等. 海河口水工钢闸门防腐蚀浅析[J]. 海河水利, 2009, 6: 73-76.
- [2] D.A.BAYLISS, D.H. DEACON. steelwork corrosion control [M]. 第二版. 化学工业出版社, 2005
- [3] Abass A. Olajire. Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 269(11): 572-606.
- [4] 蔡光义等. 有机涂层防护性能与失效评价研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(9): 657-664.
- [5] ISO12944-2, Paints and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems-Part 2: Classification of environments, Geneva, Switzerland, 2017.
- [6] 张三平, 萧以德, 等. 涂层户外暴露与室内加速腐蚀试验相关性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(3): 157-159.

- [7] 刘攀. 桥梁钢结构防腐涂层的老化失效机理和寿命预测研究[D]. 长安大学, 2008.
- [8] 邓洪达. 典型大气环境中有机涂层老化行为及其室内外相关性的研究[D]. 武汉材料保护研究所, 2005.
- [9] 黄微波, 谢远伟等. 海洋腐蚀环境下纯聚脲重防腐涂层耐久性研究[J]. 上海涂料, 2013, 51(4):1-5.
- [10] 王晶晶, 董士刚等. 环氧涂层室外暴晒和室内加速老化试验相关性研究[J]. 表面技术, 2006, 35(1):36-39.
- [11] 田连治. 三峡二期工程金属结构防腐涂装体系设计[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3):40-45.
- [12] 许欣, 孙飞龙等. 建筑涂层加速腐蚀老化试验方法标准及适用性研究[J]. 涂料工业, 2017, 47(5):51-62.
- [13] 张恒, CREWDSON M, ROBERTS R L. 户外测试检验加速测试[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3):105-109.
- [14] 袁敏, 王忠. 涂装工艺组合 / 综合环境试验技术综述[J]. 环境技术, 2011(6):28-34.
- [15] 王连盛, 马捷. 钢结构防腐涂料耐久性检测与评定技术的研究[C] // 既有建筑综合改造关键技术研究示范项目交流会论文集, 中国建筑科学研究院, 2010:31-34.
- [16] 张三平, 萧以德等. 涂层户外暴露与室内加速腐蚀试验相关性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(3):157-159.
- [17] I. T. Kim, Y. Itoh. Accelerated exposure tests as evaluation tool for estimating life of organic coatings on steel bridges[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2013, 42(3):242-252.
- [18] M. Hirohata, J. Takemi, Y. Itoh. Corrosion accelerated exposure experiment simulating under seawater environment for organic coated steel materials[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2014, 50(6):449-461.
- [19] 高瑾, 李晓刚等. 重防腐涂层环境失效研究及寿命预测[C]. // 2012 全国绿色新型重防腐涂料与涂装技术研讨会论文集, 中国腐蚀与防护学会, 2013.
- [20] 李运德, 张亮等. 现代桥梁钢结构防腐涂层体系设计[J]. 电镀与涂饰, 2010, 30(1):57-62.
- [21] N. Fredj, S. Cohendoz, et al. Ageing of marine coating in natural and artificial seawater under mechanical stresses [J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 74(2):391-399.
- [22] F. Deflorian, S. Rossi, et al. Organic coatings degradation: Comparison between natural and artificial weathering [J]. Corrosion Science, 2008, 50(8):2360-2366.
- [23] 骆晨等. 外加应变对航空有机涂层损伤规律的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(5):657-668.
- [24] 殷宪霞, 王军. 奥运主体育场防腐工程用氟碳涂料天然曝晒试验与分析[J]. 经验交流, 2007, 22(11):38-41.
- [25] X. Yong, X. Hu, et al. Damage assessment of the corrosion-resistant performances for organic coating systems after accelerated tests using analytic hierarchy process [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 93(11):1-12.
- [26] 张洪彬, 闽杰等. 大气暴露试验与模拟加速实验相关性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013(31):317-321.
- [27] K.J. Lee, S.I. Kim, et al. A Study on the Lifetime Prediction of Anticorrosive Paints for Steel Structures [J]. Korea Institute of Construction Materials, 2013:1203-1208.
- [28] 杨海, 陆卫中. 海洋环境下高性能重防腐有机涂层失效机理及寿命评估[C]. // 2012 全国绿色新型重防腐涂料与涂装技术研讨会论文集, 中国腐蚀与防护学会, 2013:128-138.
- [29] 方震. 涂膜保护寿命的预测理论初探[J]. 涂料涂装与电镀, 2005, 3(1):3-5.
- [30] 吕平, 李华灵等. 有机防护涂层老化研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(13):83-86.
- [31] 杨丽霞, 李晓刚等. 水、氯离子在丙烯酸聚氨酯涂层中的扩散传输行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1):6-10.
- [32] 宋林林, 解瑞等. 模拟海洋大气环境中丙烯酸聚氨酯涂层的失效规律[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(3):226-230.
- [33] 崔静娜. 桥梁钢结构件防腐涂层腐蚀全寿命设计研究[D]. 长安大学, 2007.
- [34] Lee, Chan Young, et al. Service Life Prediction for Steel Bridge Coatings with Type of Coating Systems [J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2016, 28(5):325-335.
- [35] Kallias, Alexandros N, et al. Performance profiles of metallic bridges subject to coating degradation and atmospheric corrosion [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(4):440-453.
- [36] K J Kere, Q. Huang. Life-Cycle Cost Comparison of Corrosion Management Strategies for Steel Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4):1-16.
- [37] L. Sun, X. Wang, et al. Life Assessment of Organic Coating Based on Accelerated Degradation Test and Modeling[C]. // IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE Computer Society, 2016:1644-1647.
- [38] W. Tian, F. Meng, et al. Lifetime prediction for organic coating under alternating hydrostatic pressure by artificial

- neural network [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):1-12.
- [39] 耿刚强等. 钢桥防腐蚀涂层寿命的预测方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(5):43-47.
- [40] F. Meng, Y. Liu, et al. Studies on Mathematical Models of Wet Adhesion and Lifetime Prediction of Organic Coating/Steel by Grey System Theory [J]. materials, 2017, 10(715):1-15.
- [41] 酆智斌, 董彩常等. 海湾大桥钢箱梁外表面涂层体系防腐蚀寿命分析[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(5):441-443.

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目 (20240856)

¹ **第 1 作者简介:** 张泽挥 (1996-), 男, 硕士, 工程师, 华设检测科技有限公司, 研究方向: 桥隧检测技术、桥隧智能监测技术、钢结构腐蚀与防护技术。 E-mail: 18252582690@163.com

*** 通讯作者简介:** 苏天 (1989-), 男, 博士/博士后, 山东理工大学, 研究方向绿色建筑及绿色施工技术。 E-mail: sutiancivil@foxmail.com