

王清洲,赵洪彬,尚瑞鹏,等. 混凝土防腐涂层性能及试验方法综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 34-46.

WANG Qing-zhou, ZHAO Hong-bin, SHANG Rui-peng, et al. Research progress on performance and test methods of concrete anticorrosive coating[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 34-46.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.06.004

混凝土防腐涂层性能及试验方法综述

王清洲, 赵洪彬, 尚瑞鹏, 肖成志, 马士宾

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:为改善混凝土在氯盐腐蚀环境下的耐久性,从涂层防腐机理、分类、耐久性评价以及涂层体系选用和施工技术等方面系统总结混凝土防腐涂层的研究进展,并对涂层材料开发、试验方法统一构建等方面的发展趋势进行展望。研究表明:涂层通过表面成膜封缝、孔隙内部封闭、渗透疏水等功能实现裂缝封闭、阻断氯离子水溶液进入混凝土内部,形成了 3 类功能不同的涂层材料,明确了各类涂层适用的应用场景,应综合考虑涂层所处环境的干湿条件、腐蚀程度、应用部位等因素选用涂层类型;涂层的耐久性对混凝土防腐性能起关键作用,但交通运输行业相关规范中对 3 类涂层耐久性的评价指标及技术要求不统一且差异较大,限制了涂层优选和品种更新,考虑特殊的应用场景,推荐增加耐冲刷磨蚀性指标作为耐久性的评价指标以建立更加完善的评价体系;正确选用涂层体系和优良的施工技术是发挥涂层防腐效果的有效保障,交通行业对表面成膜型涂层给出了推荐的涂层体系,有效促进了涂层技术的发展,但缺少对工程应用中各类涂层施工工艺、应用效果以及长期使用性能的评估和监测,不利于经验借鉴和技术提升;未来,应建立涂层环保方面的评价指标并开发功能性改性涂层材料;形成适用于多行业的技术规范以及统一涂层混凝土抗腐蚀性能评价方法和指标,以期对相关领域的发展提供指导和支持。

关键词:道路工程;混凝土;防腐涂层;综述;氯盐腐蚀;耐久性评价

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)06-0034-13

Research progress on performance and test methods of concrete anticorrosive coating

WANG Qing-zhou, ZHAO Hong-bin, SHANG Rui-peng, XIAO Cheng-zhi, MA Shi-bin

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Aims to enhance the durability of concrete in environments susceptible to chloride erosion, the research progress of concrete anticorrosive coatings, including the systematic summarization of coating protection mechanisms, classification, durability evaluation, and selection as well as application techniques of coating systems were systematically summarized. The development trends of coating material development, standardization of testing methods, and

收稿日期:2024-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52078182)

作者简介:王清洲(1979-),男,河北沧州人,副教授,工学博士,E-mail:2006126@hebut.edu.cn.

通讯作者:马士宾(1973-),男,河北保定人,教授,工学博士,E-mail:marotolo@126.com.

other aspects were also anticipated. The results show that coatings achieve crack sealing by forming a film on the surface, sealing internal pores, and imparting hydrophobic properties to prevent the ingress of chloride ion solutions into concrete. Different types of coatings are categorized based on their distinct functionalities, specifying suitable application scenarios for each type. The selection of coating types should consider factors such as humidity, degree of erosion, and site of application. The durability of coatings plays a pivotal role in the anti-corrosive performance of concrete. However, existing standards in the transportation industry for evaluating the durability of these coatings are inconsistent and vary widely among the three categories, which limits optimal selection and variety updates of coatings. Considering special application scenarios, it is recommended that include resistance to abrasion and erosion as additional durability evaluation criteria to establish a more comprehensive assessment system. The proper selection of coating systems and superior application techniques are crucial for effective erosion protection. The transportation industry has recommended specific coating systems for surface-filming coatings, which have facilitated the development of coating technology. However, there is a lack of assessment and monitoring of construction techniques, application effects, and long-term performance in engineering applications, which limits the transfer of experience and technological advancement. Future directions should focus on establishing environmental assessment criteria for coatings and developing functionally modified coating materials. Additionally, creating technical standards applicable across industries and unified methods for evaluating the erosion resistance of coated concrete is essential to guide and support the development in related fields. 5 tabs, 2 figs, 67 refs.

Key words: road engineering; concrete; anti-erosion coating; review; chloride erosion; durability evaluation

0 引言

混凝土因原材料易获取、成本低的特点,在中国公路、桥梁、港口等交通基础设施建设中得到了广泛应用。截至 2023 年底,中国公路里程 543.68 万 km,公路桥梁 107.93 万座,总长 9 528.82 万延米^[1],同时在中国长达 1.8 万 km 的海岸线上,建有 2 878 个港口码头泊位,混凝土基础设施数量大。受恶劣服役条件等多种因素综合作用,混凝土设施服役期间常出现不同程度的损坏,缩短了其综合使用年限,甚至导致内部损伤诱发结构失效或崩塌事故发生^[2]。氯离子腐蚀是影响混凝土耐久性的重要因素之一。中国沿海地区的桥梁、码头等混凝土设施常位于浪溅区和潮差区,海水冲刷以及干湿循环作用使得混凝土剥蚀、露骨、锈蚀等病害十分普遍,是氯盐腐蚀的重灾区。据调查显示,浙江、广东、山东等地区^[3]的混凝土结构存在不同程度腐蚀损害,甚至有些构造物仅使用了 5~10 年就发生破坏,交通基础设施的耐久性

状况较差。

为了减轻氯盐腐蚀对混凝土耐久性产生的不良影响,国内外学者进行了大量研究,主要采取提高混凝土的密实度和抗渗透性^[4]、使用高性能混凝土^[5]以及表面涂层防护^[6]等措施,延缓混凝土腐蚀效果显著。通常,改善混凝土配合比和内部结构密实性的措施仅限于结构建设期内实施,通过掺入大量昂贵外加剂来提高混凝土内部结构的抗渗透性能,大幅增加了工程的建设成本,其性价比不高。近年来,随着新材料的兴起,开始使用碱激发材料的高性能混凝土(AAC),该技术通过向混凝土中添加硅酸钠、氢氧化钠和其他碱性盐活化工业副产品(如矿渣和粉煤灰)来提高混凝土的抗氯离子腐蚀能力。尽管 AAC 具有致密的孔结构和较好的氯离子结合能力,但可能会存在引入复杂的化合物溶液进入孔隙,延缓钝化层的形成、降低氯离子浓度阈值等风险,尚需进一步研究和试验^[7]。表面涂层防护是一种具有良好疏水和封缝作用的防腐措施,通过遏制氯离子水溶液进入

结构内部,进而提高混凝土的抗氯盐腐蚀能力,尤其适用于交通基础设施的养护工程。与改善混凝土自身构成的防腐措施相对比,涂层技术具有良好的防腐效果,且施工简单、成本低廉,可快速投入使用,适用于各种复杂工况,是简单可靠的防护手段^[8-9]。

防腐涂层在已建成的桥梁、港口码头等交通设施中应用广泛^[10],起到了较好的防腐效果。混凝土防腐涂层材料种类较多,应用场景各异且改性技术日新月异,新材料逐渐替代旧材料应用于新工程中,不断更新进步。孙红尧等研究表明,表面成膜型涂层在工程中逐渐被有机硅渗透型涂层所替代,应用多集中于东部沿海地区的桥梁工程中,如杭州湾跨海大桥、福厦高铁泉州湾跨海大桥等,采用3层涂层体系,底层和中间层一般采用环氧树脂,早期的面层多应用聚氨酯类和丙烯酸类涂层,近年来则用氟碳涂层代替^[11]。表面成膜型涂层易因混凝土内气体逸出导致涂层表面起泡甚至剥落,从而使涂层失去保护作用,影响涂层混凝土的耐久性和防腐效果,且失效后修复施工困难^[12],工程应用中逐渐减少。目前,渗透疏水型涂层在桥梁、港口码头工程中得到了越来越广泛地应用,如泉州安海湾特大桥、港珠澳跨海大桥等位于潮差区、浪溅区和大气区的桥墩、临水面、防撞墙等结构物,常使用丁基硅烷、辛基硅烷、异丁烯硅烷等硅烷低聚物涂层材料。但大多数工程的涂层防腐效果、耐久性等方面缺少跟踪和定量检测评价,难以为后续工程中的涂层选用起到借鉴作用。涂层的耐久性是确保防腐效果的重要因素。

目前,涂层材料种类繁多,适用条件和防腐效果差异性较大,并且因涂层材料使用效果评价和优选方面的研究还不完善,缺少统一的技术评价指标和试验方法,合理选用涂层成为工程应用中的难题。基于混凝土防腐涂层方面的研究成果,本文综述现有涂层的防腐机理、分类以及不同类型涂层的防腐效果和适用环境,重点梳理涂层耐久性的评价指标及试验方法,并对后续的研究提出一些见解和建议,旨在推动混凝土表面涂层防腐技术的不断发展。

1 涂层的防腐机理

混凝土的腐蚀劣化总是从表面开始向内部扩

展,其涂层防护不仅能有效增加混凝土的使用寿命,而且可以极大程度降低混凝土的养护成本。涂层材料阻水机理如图1所示,混凝土表面涂层的保护措施有3种形式^[13]:①表面成膜,能够在混凝土表面形成致密的连续膜,构筑起一层物理屏障,阻止有害物质侵入结构内部;②孔隙封闭,能够渗入到混凝土内部的毛细孔隙中发生原位反应形成固结体进而封闭裂缝,可有效降低表层孔隙率并形成防水层,以达到保护混凝土的目的;③渗透疏水,能够在混凝土表面及孔隙内壁形成憎水分子层,有效降低混凝土的吸水性或静水压力下的透水性,进而有效阻止氯离子侵入其内部^[14],同时维持了混凝土孔隙的透气性和自然外观。

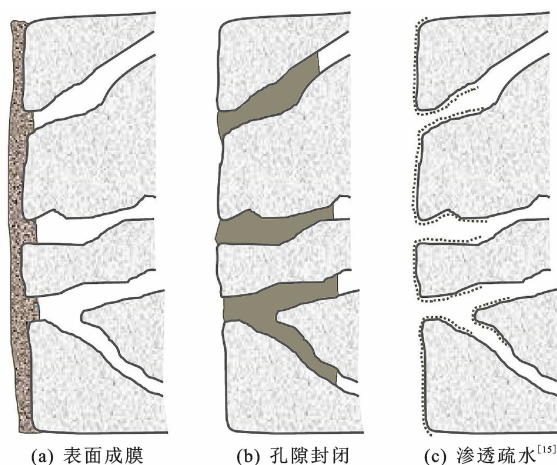


图1 涂层材料阻水机理

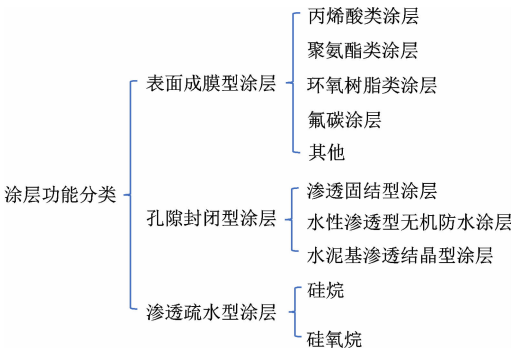
Fig. 1 Water resistance mechanism of coating materials

2 涂层的分类及应用现状

涂层材料按照涂层在混凝土表面的功能可分为表面成膜型涂层、孔隙封闭型涂层以及渗透疏水型涂层3类^[16],如图2所示。不同类型防腐涂层材料具有独特的优势和适用条件,其防腐效果也因材料特性和使用场景而存在差异,选择涂层材料时宜根据应用条件确定最适合的类型。

2.1 表面成膜型涂层

表面成膜型涂层通过自身发生的凝胶化反应,在混凝土表面形成连续、致密的涂膜将其包裹起来,从而有效阻挡腐蚀因子渗透进入混凝土内部,起到防腐作用。该类涂层种类繁多,且为大分子有机材料,常用于涂层体系的面层或中间层。典型的表面成膜型涂层包括丙烯酸类涂层(AC)、聚氨酯类涂层(PU)、环氧树脂类涂层(EP)、氟碳涂层等。



2.1.1 丙烯酸类涂层

丙烯酸树脂涂层材料是以丙烯酸酯、甲基丙烯酸酯等烯类单体经过自由基共聚合形成的有机化合物^[17],具有良好的耐候性和抗紫外线性能。但其耐水性和耐化学腐蚀性性能较差,因此不适用于长期水浸泡的环境^[18],常被用于低腐蚀环境中的面层或底层。

2.1.2 聚氨酯类涂层

聚氨酯树脂全称为聚氨基甲酸酯,是由多元醇和多异氰酸酯经缩聚反应形成双官能团的高分子材料^[19]。聚氨酯类涂层材料具有较好的柔韧性,其分子结构灵活多变,性能也因内部组分的不同差异较大。例如,脂肪族聚氨酯和丙烯酸聚氨酯均表现出良好的耐候性,而芳香族聚氨酯则具有较好的耐腐蚀、抗渗透性能^[20],但变形能力差,应根据允许变形的要求进行类型选择。

2.1.3 环氧树脂类涂层

环氧树脂涂层材料一般为双组分体系,由环氧树脂和不同种类的固化剂组合而成^[21]。环氧树脂涂层材料因分子内部羟基和醚键赋予了其优异的黏附性和防水能力,而含有大量苯环结构带来较高硬度的同时也降低了其耐候性,导致环氧树脂类涂层易老化、产生表层剥落破坏,不适宜作为面层使用^[22],但可应用于中间层或底层使用。《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》(JT/T 695—2007)(下文简称表面涂层防腐)^[23]推荐在中、强腐蚀环境中将环氧树脂漆作为底层、中间层与不同种类的面层搭配使用。

2.1.4 氟碳涂层

氟碳涂层材料是以氟树脂为主的复合涂层材料,主要包括聚四氟乙烯氟碳树脂、聚偏二氟乙

烯氟碳树脂、FEVE 氟碳树脂三大类^[24-25]。氟碳涂层材料具有优异的耐候性、耐热性、耐低温性、耐腐蚀性,且具有独特的表面能和表面自洁能力,但该涂层也存在使用成本高、施工难、稳定性差的缺点,限制了氟碳涂层材料在中国的推广应用。未来,降低施工难度与成本将是氟碳材料的重要发展方向。

除目前主流使用的 4 种有机涂层材料外,其他不常用的有机涂层材料还包括氯化橡胶、乙酸乙酯、聚脲类涂层材料等。

2.2 孔隙封闭型涂层

孔隙封闭型涂层通过自身的渗透性,将材料自身或者含有的部分活性物质渗入混凝土孔隙之中,并发生原位反应,实现部分或全部填充混凝土表面的毛细孔隙,以达到保护混凝土的目的。与表面成膜型涂层相比,孔隙封闭型涂层因在孔隙内部发生原位反应而“生根”,能够有效解决涂层起皮剥落的问题,同时数毫米以上的渗透深度加上表面防腐层的总厚度也远大于表面成膜型涂层的厚度。目前,常用孔隙封闭型涂层主要由渗透固结防护涂层材料和渗透结晶型涂层 2 类组成,其中渗透固结防护涂层材料多以环氧树脂作为基体树脂,而渗透结晶型涂层由硅酸盐类涂层材料和水性渗透型无机防水涂层组成^[26]。

2.2.1 渗透固结型涂层

渗透固结型涂层材料一般由环氧树脂或丙烯酸酯作为基体树脂,加入大量有机溶剂后制成,可在混凝土表面形成高性能的固结体,封闭孔隙。基体是树脂类材料,因此该涂层具有优异的附着力和抗渗透性能。为了制备渗透性强、黏度低的聚合物封闭涂层材料,常需要加入大量可挥发溶剂来降低其黏度,造成环境污染的同时也危害人身健康。近年来,常采用醛酮/丙酮等混合反应性溶剂来稀释环氧树脂,将挥发溶剂的危害降至最低。

2.2.2 水性渗透型无机防水涂层

水性渗透型无机防水涂层材料是一种传统的无机物涂层,主要以硅酸钠、硅酸钙、硅酸锂等材料为主^[27]。水性渗透型无机防水涂层通过控制自身溶液的黏度低于 10 MPa·s 来确保渗透进入混凝土表面孔隙中,溶液中含有的硅酸根离子与混凝土中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 发生化学反应,形成不

溶性硅酸盐,进而封闭混凝土孔隙^[28]。硅酸盐类涂层可填补表面孔隙,增加表面密实度,同时改善水泥混凝土的力学强度。但是其抗渗性能及耐腐蚀性能较弱,受到破坏后会失去防水效果,因此仅适用于底层。

2.2.3 水泥基渗透结晶型涂层

水泥基渗透结晶型涂层材料是将适量活性化学物质掺入水泥以及砂等材料中形成的刚性无机涂层^[29]。由于内部含有活性化学物质,可多次激活,催化混凝土中 Ca^{2+} 形成不溶于水的结晶化合物修补裂缝,具有“自愈合能力”^[30],在实际应用中一般作为底层使用。但水泥基渗透结晶型涂层材料也存在以下缺点:①涂层材料在外力的作用下易开裂,且无法对较宽的裂缝进行修复,不适用于长期应力荷载作用的场景;②涂层的黏结性能较差,一般只能应用于结构的背水面;③无水条件下无法修复混凝土破损,因此不适用于石化行业。

目前,渗透结晶型涂层展现出优异的强度和环保性能,但缺少统一的环保评价方法和指标,亟待完善涂层的环保评价与要求,为选用涂层提供依据;渗透固结型涂层既能在表面成膜,又能封闭孔隙,在改善表面强度的同时增强涂层的抗渗透性,在重腐蚀环境中具有广泛的应用前景。未来,发展新型无毒、无污染反应性溶剂以及基于生物技术,利用细菌产生碳酸盐沉淀作为孔隙封闭型涂层是一个应用前景较好的研究方向。

2.3 渗透疏水型涂层

渗透疏水材料属于憎水型材料,种类较多,多以有机硅类材料为主,如硅烷和硅氧烷等。这类材料具有良好的渗透性能,可轻松浸渍混凝土表层孔隙并在表面成膜形成疏水层^[31],而不会造成孔隙封闭,可以避免因气体排出导致涂层破损或者起皮的问题。然而,混凝土的空隙依旧开放,虽然有效阻止了水的渗透,但无法阻隔 CO_2 侵入,因此,该类涂层材料的抗碳化性能较差^[32]。此外,当在表面孔隙率较低的混凝土表面使用时,不利于有机硅类材料渗透,进而导致其防腐效果变差^[33]。目前,浸渍疏水涂层在沿海地区桥梁等基础设施的混凝土防腐中应用较多,常作为复合涂层的底层使用。未来,增强较高水压环境、低孔隙率混

土等特殊条件下有机硅材料的抗渗透性能将是具有前瞻性的研究方向。

3 防腐涂层耐久性的评价指标及试验方法

防腐涂层耐久性是影响混凝土防腐性能的关键指标^[34]。中国交通、水利和住建等行业虽然制定了混凝土防腐蚀措施的相关规定,但规范中没有给出推荐的涂层体系以及统一的性能指标要求,给工程应用带来了难点,也影响了涂层的耐久性和使用效果^[11]。涉及防腐涂层耐久性的规范主要包括《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275—2000)(下文简称海港规范)^[35]、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)(下文简称普通混凝土耐久标准)^[36]、《混凝土结构防护用成膜型涂料》(JG/T 335—2011)(下文简称成膜涂料)^[37]、《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)(下文简称水运工程标准)^[38]、《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310—2019)(下文简称公路混凝土耐久标准)^[39]、《桥梁混凝土表面防护用硅烷膏体材料》(JT/T 991—2015)(下文简称硅烷涂料)^[40]。本文总结相关规范中关于 3 类功能性涂层性能和试验方法的规定。

3.1 表面成膜型涂层耐久性

为了更好地评价表面成膜型涂层的耐久性,梳理了规范中关于涂层材料的外观、涂层耐冲击性、涂层附着力、耐候性、耐碱性、耐酸性、抗冻性、碳化深度比、抗氯离子渗透性的技术指标及要求(表 1)^[41]。本文对规范中涂层附着力、耐候性 2 个存在分歧的指标进行介绍。

3.1.1 涂层的附着力

涂层附着力用于表征涂层的附着性能。水运工程标准^[38]、海港规范^[35]和成膜涂料^[37]中给出的试验方法大致相同,主要参照《色漆和清漆拉开法附着力试验》(GB/T 5210—2006)^[42]中的试验方法,均为在涂层试件表面选择边长为 30 mm×30 mm 的测点进行拉拔试验,计算得到涂层附着力,并规定试验值不小于 1.5 MPa 时判定涂层满足附着力要求。相关规范中关于试验要求的区别仅在于所使用的试件尺寸。

表 1 表面成型型涂层材料耐久性的技术指标及要求

Tab. 1 Technical indicators and requirements for durability of surface film-forming coating materials

项目	试验方法	技术指标
外观(标准养护后)	标准养护后观察	均匀,无流挂、无斑点、不起泡、不龟裂、不剥落等
涂层耐冲击性 I	《漆膜耐冲击测定法》(GB/T 1732—2020) ^[45]	$\geq 50 \text{ kg} \cdot \text{cm}$
涂层附着力 F	海港规范 ^[35]	$\geq 1.5 \text{ MPa}$
	成膜涂料 ^[37]	$\geq 1.5 \text{ MPa}$
	水运工程标准 ^[38]	$\geq 1.5 \text{ MPa}$
耐候性 t (人工光老化)	人工老化试验 ^[44]	1 000 h 不粉化、不起泡、不龟裂、不剥落
	成膜涂料 ^[37]	1 000 h 起泡、剥落、粉化等级为 0
	人工老化试验 ^[44]	设计保护年限 10 年, $t \geq 1\,000 \text{ h}$; 设计保护年限 20 年, $t \geq 2\,000 \text{ h}$
耐碱性(30 d 后)	海港规范 ^[35]	不起泡、不龟裂、不剥落
	成膜涂料 ^[37]	30 d 无气泡、剥落、粉化现象
	水运工程标准 ^[38]	合格
耐酸性(30 d 后)	成膜涂料 ^[37]	30 d 无气泡、剥落、粉化现象
抗冻性(冻融循环)	普通混凝土耐久标准 ^[36]	200 次冻融循环无脱落、破裂、起泡现象
碳化深度比 $d_t \cdot d_0^{-1}$	普通混凝土耐久标准 ^[36]	$\leq 20\%$
抗氯离子渗透性 (30 d 后)	海港规范 ^[35]	$\leq 5.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
	水运工程标准 ^[38]	

注: d_0 、 d_t 分别为初始时刻与 t 时的碳化深度。

3.1.2 涂层的耐候性

涂层的耐候性(人工光老化)反映了其在光照下老化程度。由于在日间照射下,涂层会逐渐发生变色老化,进而出现脆化、粉化现象,导致涂层表面产生裂纹甚至剥落,除此之外,紫外照射也会使部分涂层材料发生光氧化作用,出现降解问题^[43],涂层老化问题应引起足够的重视。耐候性通常依据《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》(GB/T 1865—2009)(下文简称人工老化试验)^[44]中试验方法并根据海港规范^[35]、公路混凝土耐久标准^[39]、水运工程标准^[38]中的试验指标进行评价。根据涂层设计保护年限不同,涂层所需的试验照射时间不同,一般设计年限为 10 年需照射 1 000 h,20 年需照射 2 000 h,并根据照射后涂层表面是否出现了起泡、剥落、粉化等现象判定涂层耐候性的优劣。

3.2 孔隙封闭型涂层耐久性

孔隙封闭型涂层耐久性的指标和要求所参照的规范不同,其中渗透固结型涂层的依据《环氧树脂防水涂料》(JC/T 2217—2014)^[46],评价指标包括:固含量、干燥时间、柔韧性、耐冲击性和拉拔强度等。水性渗透型无机防水剂涂层依据《水性渗透型无机防水剂》(JC/T 1018—2020)^[47],评价指标包括:抗渗性、抗碳化值、表面亲水性等。水泥

基渗透结晶型涂层依据《水泥基渗透结晶型防水材料》(GB 18445—2012)^[48],评价指标包括抗压强度、抗渗性等。

3.3 渗透疏水型涂层耐久性

渗透疏水型涂层材料目前应用最多的是硅烷液体和硅烷膏体,梳理该类涂层耐久性的评价指标及试验方法见表 2,参照的规范包括公路混凝土耐久标准^[39]、水运工程标准^[38]和硅烷涂料^[40]。

关于吸水率的要求,公路混凝土耐久标准^[39]和水运工程标准^[38]采用的指标相同,试验方法也相同,而硅烷涂料^[40]中采用吸水率比指标;关于氯化物吸收量降低效果指标,3 个规范试验方法相同,硅烷涂料^[40]中的技术指标要求大于 80%,其他规范则要求大于等于 90%;关于抗盐冻性指标,公路混凝土耐久标准^[39]中的试验方法要求处理后的试件在盐水冻融试验中表面发生损失时的冻融循环次数应比未处理试件多至少 20 次,而硅烷涂料^[40]仅要求多至少 15 次即可。关于耐碱性试验仅有硅烷涂料^[40]中进行了规定,其他规范不做要求。

3.4 其他指标

目前,除了上述规范涉及防腐涂层耐久性的指标以外,尚需根据混凝土涂层所应用的特殊环境增加耐冲刷磨蚀性作为评价耐久性的指标,以

表 2 渗透疏水型涂层材料耐久性的技术指标及要求

Tab. 2 Technical indicators and requirements for durability of penetrating hydrophobic coating materials

项目	试验方法	技术指标
吸水率 W	海港规范 ^[35]	$\leq 0.01\text{ mm}\cdot\text{min}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
	水运工程标准 ^[38]	$\leq 0.01\text{ mm}\cdot\text{min}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
渗透深度 l	海港规范 ^[35]	C45 混凝土以下, $l\geq 3\text{ mm}$; C45 混凝土以上, $l\geq 2\text{ mm}$; 水灰比为 0.6, $l\geq 10\text{ mm}$
	水运工程标准 ^[38]	普通混凝土, $l\geq 3\text{ mm}$; 高性能混凝土, $l\geq 2\text{ mm}$
	硅烷涂料 ^[40]	C45 混凝土以下, $l\geq 3\text{ mm}$; C45 混凝土以上, $l\geq 2\text{ mm}$
氯化物吸收量降低效果 (C_U-C_{U1}) $C_U^{-1}\times 100\%$	海港规范 ^[35]	$\geq 90\%$
	水运工程标准 ^[38]	$\geq 90\%$
	硅烷涂料 ^[40]	$> 80\%$
干燥速度系数(与未涂装相比) $D_1D_2^{-1}\times 100\%$	海港规范 ^[35]	$\geq 30\%$
	硅烷涂料 ^[40]	$> 30\%$
抗盐冻性	普通混凝土耐久标准 ^[36]	与基准混凝土相比多 20 次冻融循环
	硅烷涂料 ^[40]	与基准混凝土相比多 15 次冻融循环
碱处理后吸水率比 $W_a\cdot W_o^{-1}$	硅烷涂料 ^[40]	$< 10\%$
吸水率比 $W_a\cdot W_o^{-1}$	硅烷涂料 ^[40]	$< 7.5\%$

注: C_U 、 C_{U1} 分别为对照组与浸渍组的氯化物平均含量; D_1 、 D_2 分别为浸渍组与对照组的干燥速率; W_a 、 W_o 分别为浸渍组与对照组的吸水率。

建立更加完善的涂层耐久性评价指标体系。例如,海港工程、桥墩或水电工程的混凝土常受到水流或流砂的冲刷磨蚀作用,易造成涂层破损失效。调查结果表明^[49],中国已建大中型水电工程中约 70% 的混凝土存在冲刷、磨损和空蚀破坏现象,约有 32.8% 泄水工程中闸门的门槽、溢流面、水流变化段、鼻坎、分流墩、消力墩等部位的混凝土发生空蚀破坏。因此,考查应用于该环境中的混凝土防腐涂层的抗冲刷磨蚀性能非常有必要。

测试涂层耐冲刷磨蚀性能一般分为干式和湿式试验方法。干式试验通常采用涂层的耐冲击试验和耐磨性试验来测试涂层的耐冲刷磨蚀性能,其中耐冲击性能依据《色漆和清漆 快速变形(耐冲击性)试验 第 2 部分:落锤试验(小面积冲头)》(GB/T 20624.2—2006)进行测试^[50];耐磨性能场景不同,试验方法也不同,相关方法列于表 3 中。湿式试验需在水中展开,通常参考《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017)和《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》(DL/T 5207—2021)(下文简称混凝土抗水砂抗空蚀试验)^[51-52],具体的试验方法和适用场景如表 4 所示。树脂类涂层厚度较薄,在耐磨性能测试时经常因涂层较薄,很快出现局部磨损且显露底材的现象,无法得到准确的试验结果,因此混凝土抗水砂抗空蚀试验^[52]

表 3 干式耐磨性能试验

Tab. 3 Dry abrasion resistance test

试验方法	适用场景	规范
旋转橡胶砂轮法	适用于大多数场景	《色漆和清漆耐磨性的测定: 旋转橡胶砂轮法》(GB/T 1768—2006) ^[53]
落砂法	适合耐磨性能较低涂层材料的耐磨性能试验	《涂料耐磨性测定: 落砂法》(GB/T 23988—2009) ^[54]
阿克隆磨耗法	适合可卷曲弹性涂层材料的磨耗试验	《硫化橡胶 耐磨性能的测定》(GB/T 1689—2014) ^[55]

表 4 湿式耐磨性能试验

Tab. 4 Wet abrasion resistance test

参数	推移质冲磨	悬移质冲磨
指标	水流速度 $v<10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用水下钢球法	含砂量 $\eta<20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或水流速度 $v<20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用圆环法
要求	水流速度 $v\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用高速水下钢球法	含砂量 $\eta\geq 20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或水流速度 $v\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用圆环法

中混凝土耐磨性能的抗冲磨试验不适用于树脂类涂层的耐磨性能试验。

综上所述,涂层材料的耐久性将影响涂层混凝土抗氯离子腐蚀的能力和使用寿命。目前,缺乏综合考虑温度、老化、风化、浸泡、磨蚀等多因素耦合效应下,涂层性能劣化机理以及涂层寿命预测模型方面的研究;同时,也缺少一套适用于多数行业且采标程度较高的混凝土表面涂层的技术规范,以便达到方便、可靠的选择涂层。

4 涂层选用及施工技术

混凝土防腐涂层的使用寿命与涂层的施工技术密切相关。防腐涂层施工技术涉及涂层材料选用、表面准备、涂刷工艺、施工条件和涂层质量检查等多个关键步骤^[56]。

4.1 涂层选用

涂层体系设计是确保耐久性和防腐效果的前提,也是选择施工工艺的重要因素^[57]。涂层体系设计首先要确定涂层的层数,即确定采用“底层+中间层+面层”的3层体系,还是“底层+面层”2层体系,其次还要确定每层选用的涂层类型和厚度^[39]。涂层体系设计应参照相关规范中关于技术指标和不同应用环境的推荐涂层体系来完成,例如表面涂层防腐^[23]、公路混凝土耐久标准^[37]等。公路混凝土耐久标准^[37]中建议参照水运工程标准^[38]中规定的混凝土涂层体系执行,推荐的3层涂层体系为:环氧封闭漆(底层)+环氧树脂漆(中间层)+聚氨酯漆/丙烯酸树脂漆/氟碳树脂漆/氯化橡胶漆(面层,可任选一项)。推荐的2层涂层体系为:丙烯酸树脂漆封闭漆(底层)+丙烯酸树脂漆或氯化橡胶漆(面层,可任选一项)。本文调查总结了我国沿海地区桥梁工程实际应用中所采用混凝土防腐涂层体系的构成情况,见表5。统计结果表明,氟碳树脂的应用量逐渐增多,应用场景主要为腐蚀程度较低的表干区域内;在表湿区域等腐蚀严重的环境下,表面成膜型涂层逐渐被渗透疏水型涂层所替代;目前存在少数工程尝试将表面成膜型涂层与渗透疏水型涂层复合使用涂覆于腐蚀严重环境的混凝土表面,但这种涂层体系暂无相关规范推荐,其应用效果也有待跟踪及评价。

目前,除交通行业外,其他行业并未给出各类场景下应选用涂层体系的推荐方案,亟待形成一套适用于多行业混凝土表面涂层的技术规范,给出不同行业混凝土涂层体系多应用场景下的推荐方案,为设计和施工单位提供参考。

4.2 涂层施工

施工前,为确保混凝土表面清洁,表面应做好除油脂、灰尘、锈蚀等污染物处理工作,通常采用磨削、喷砂、化学处理等方法;对于存在的坑槽、孔

洞和裂缝的缺陷部位,应填补并打磨平整,以确保涂层能够良好地附着在混凝土表面^[66]。

施工中,常采用喷涂、滚涂、刷涂等施工方法根据涂层体系设计要求分层施工,多层连续施工时应间隔1~2 d,确保涂层充分固化后再继续施工,同时应采用表面多次垂直交叉涂刷,确保涂层有足够的强度和密闭性。硅烷浸渍类涂层施工时,立面部位应自下而上进行涂布,使被涂表面至少保持5 s“看上去是湿的”状态;顶面和底面部位应保持至少5 s“看上去是湿的镜面”状态,以保证硅烷足量浸渍入混凝土中。另外,施工时应选择合适的环境温度和湿度,避免在雨天、露水或过高湿度的情况下施工,以免影响涂层的质量和效果^[67]。

施工后,应定期检查涂层的附着力、密度和表面状况,及时对涂层进行修补和保养,以延长其使用寿命^[68];对于浸渍表面,应于至少7 d后随机选择区域钻芯取样,测试吸水率、浸渍深度和氯离子吸收量等指标来评价涂刷质量。

目前,对于工程应用后的涂层防腐效果缺乏系统、完善的跟踪调查和评估,尚未发挥对后续工程的借鉴和指导作用。

5 结 语

(1)混凝土防腐涂层种类多样,应根据具体的应用场景和要求进行选择。表面成膜型涂层在中国桥梁工程中常用,具有良好的抗氯离子渗透和防碳化性能,但由于厚度较薄,容易在混凝土表面起皮脱落,耐久性较差。孔隙封闭型涂层强度高、环保性好,能同时封闭孔隙和表面成膜,适用于重腐蚀环境,但多为无机材料,脆性和黏附性较差,影响其耐久性。渗透疏水型涂层渗透力强、疏水性好,适用于湿润区或水中混凝土,不适用于腐蚀环境或低孔隙率的混凝土。需开发更多新型功能性涂层以适应不同场景。

(2)涂层的耐久性是影响混凝土防腐效果的关键。目前,各行业虽对3类涂层的耐久性提出了相关指标和测试方法,但评价标准不统一,尤其是表面成膜型涂层的附着力和耐候性规定存在差异,影响其选用。此外,现有的测试方法还需完善,缺乏复合涂层体系的耐久性测试标准。建议

表 5 采用表面涂层防腐的桥梁工程案例

Tab. 5 Bridge engineering case study using surface coating for corrosion prevention

年份	工程名称	应用位置	涂层类型	涂层体系
2012	嘉绍大桥 ^[58]	表干区	表面成膜型涂层(3 层)	湿固化环氧封闭底漆
				湿固化环氧漆
				氟碳树脂面漆
		表湿区	渗透疏水型涂层+ 表面成膜型涂层(3 层)	硅烷浸渍
				湿固化环氧封闭底漆
				湿固化环氧漆
2018	港珠澳跨海大桥 ^[59]	墩身	表面成膜型涂层(3 层)	氟碳树脂面漆
				环氧树脂封闭底漆
				环氧树脂漆
2019	松下跨海特大桥 ^[60]	墩身表面、承台表面	渗透疏水型涂层	聚氨酯面漆
2021	湄洲湾跨海大桥 ^[61]	塔柱、高潮位以上及+8 m	表面成膜型涂层(3 层)	硅烷浸渍
				环氧树脂封闭底漆
				环氧树脂漆
2022	安海湾特大桥 ^[62]	低潮位-高潮位	表面成膜型涂层(3 层)	氟碳树脂面漆
				硅烷浸渍
				环氧树脂漆
2022	泉州湾跨海大桥 ^[63]	上塔柱、中塔柱、下塔柱(大气区)	表面成膜型涂层(3 层)	环氧树脂封闭底漆
				环氧树脂漆
				氟碳树脂面漆
		下塔柱(浪溅区)	渗透疏水型涂层+ 表面成膜型涂层(3 层)	硅烷浸渍
				环氧树脂封闭底漆
				环氧树脂漆
在建	黄茅海大桥 ^[64]	标高+16 m 以上塔身	表面成膜型涂层(3 层)	氟碳树脂面漆
				环氧树脂漆
				环氧树脂封闭底漆
在建	杭州湾跨海铁路大桥 ^[65]	标高+16 m 以下塔身	渗透疏水型涂层	硅烷浸渍
				环氧云铁漆
				氟碳树脂面漆
在建	杭州湾跨海铁路大桥 ^[65]	塔柱、桥墩	渗透疏水型涂层	硅烷浸渍

在海港、桥墩或水电工程等易冲刷磨蚀的场景中增加耐冲刷磨蚀性指标,并建立相应的测试方法,以便更好满足实际需求。

(3)涂层体系的合理选用和施工质量对防腐效果至关重要。现有规范中缺乏明确的涂层体系选用标准,只有交通行业规定了表面成膜型涂层的 2 层或 3 层涂层体系,但其他类型涂层缺少相应的推荐方案,限制了应用范围,增加了推广难度。随着混凝土防腐涂层在多个行业的广泛应用,亟需制定适用于各行业的技术规范,简化涂层设计流程,降低选用难度。尽管防腐涂层施工技术较为成熟,但在一些特殊工况下仍缺乏统一规定,也缺少对长期应用效果的监测和评估,限制了经验的积累和应用推广。

(4)未来可在以下几方面开展研究:

①涂层性能评价体系需进一步完善,除了关注耐久性外,还应纳入环保指标,推动绿色环保涂层标准的建立,促进无毒、无污染的有机涂层研发,符合国家环保政策。基于生物技术和纳米材料改性的防腐涂层开发是未来的研究方向。

②涂层耐久性评价方法有待改进,当前面临试验周期过长和室内试验难以真实还原应用场景的问题,特别是缺少针对特殊场景的耐久性评价指标和多因素耦合下的寿命预测模型。未来需要制定适用于各行业的技术规范,简化涂层选用并保证防腐效果。

③随着各行业和特殊应用场景的增多,复合涂层体系的研究成为热点。开发 3 类涂层组合的复合体系,并建立相关的评价指标和检测方法,完善工程中涂层效果评估和长期性能监测,可以提

高防腐能力和延长使用寿命。

参考文献:

References:

- [1] 2022 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2023-06-21)[2023-10-24]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transportation industry in 2022[EB/OL]. (2023-06-21)[2023-10-24]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm
- [2] JI X L, CHEN L J, LIANG K, et al. A review on FRP bars and supplementary cementitious materials for the next generation of sustainable and durable construction materials [J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131403.
- [3] 刘沐宇, 梁磊, 吴浩, 等. 海洋桥梁工程全寿命管理维护战略探讨[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 25-30.
LIU Mu-yu, LIANG Lei, WU Hao, et al. Lifecycle management and maintenance of marine bridge engineering[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 25-30.
- [4] 丁向群, 陈灿, 赵丽佳, 等. 膨润土对混凝土抗渗性能影响的研究[J]. 混凝土, 2021(1): 102-106.
DING Xiang-qun, CHEN Can, ZHAO Li-jia, et al. Effect of bentonite on the permeability resistance of concrete[J]. Concrete, 2021(1): 102-106.
- [5] SALADI N, MONTANARI L, DE LA VARGA I, et al. Assessing durability properties of ultra-high performance concrete-class materials [J]. Materials and Structures, 2023, 56(8): 155.
- [6] LYNA P, TAWEECHAI S, SOMNUK T. Experimental investigation on the degradation of coating on concrete surfaces exposed to accelerated and natural UV in chloride environment[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(2): 240-256.
- [7] TAHRI W, HU X, SHI C J, et al. Review on corrosion of steel reinforcement in alkali-activated concretes in chloride-containing environments[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123484.
- [8] 张铨, 李维红, 范金朋, 等. 不同防护涂层提升混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土, 2019(12): 165-168.
- [9] ELNAGGAR E M, ELSOKKARY T M, SHOHIDE M A, et al. Surface protection of concrete by new protective coating[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 245-252.
- [10] SONG J L, LI Y X, XU W, et al. Inexpensive and non-fluorinated superhydrophobic concrete coating for anti-icing and anti-corrosion[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 541: 86-92.
- [11] 孙红尧, 张兴铨, 李森林, 等. 防护涂料在钢筋混凝土结构表面的国内应用现状[J]. 涂料工业, 2019, 49(5): 79-87.
SUN Hong-yao, ZHANG Xing-duo, LI Sen-lin, et al. Status of application of protective coatings on reinforced concrete surface in China[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(5): 79-87.
- [12] 张利铨, 林上顺, 陶志蕾, 等. 跨海大桥 RC 桥墩防腐蚀研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(1): 177-183.
ZHANG Li-quan, LIN Shang-shun, TAO Zhi-lei, et al. Research progress on corrosion protection of RC piers of sea crossing bridges[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(1): 177-183.
- [13] ZHANG T, ZHANG X F, LI P F, et al. Experimental research on fatigue performance of reinforced concrete T-shaped beams under corrosion-fatigue coupling action[J]. Materials, 2023, 16(3): 1257.
- [14] ZHANG C Y, ZHANG S F, YU J W, et al. Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 154: 106738.
- [15] DI MUNDO R, LABIANCA C, CARBONE G, et al. Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete[J]. Coatings, 2020, 10(5): 449.
- [16] MILLÁN R G P, BYLINSKI H, NIEDOSTATKIEWICZ M. Deterioration and protection of concrete elements embedded in contaminated soil: A review [J]. Materials, 2021, 14(12): 3253.
- [17] ZHANG Y H, LI Y Z, THAKUR V K, et al. Bio-based reactive diluents as sustainable replacements

- for styrene in MAESO resin[J]. RSC Advances, 2018,8(25):13780-13788.
- [18] PAN X Y, SHI Z G, SHI C J, et al. A review on concrete surface treatment part I: Types and mechanisms[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132:578-590.
- [19] CHOI S M, LEE S, SHIN E J. Synthesis and characterization of biopolyol-based waterborne polyurethane modified through complexation with chitosan[J]. Nanomaterials, 2022, 12(7):1143.
- [20] WANG L X, ZHANG J W, WANG F J, et al. Investigation on the effects of polyaniline/lignin composites on the performance of waterborne polyurethane coating for protecting cement-based materials[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64:105665.
- [21] LIU H C, WEI L W, GAO F S, et al. Performance research and formulation optimization of high-performance local insulation spray coating materials[J]. Nanomaterials, 2022, 12(19):3344.
- [22] 齐玉宏, 张国梁, 池金锋, 等. 混凝土防腐涂料的研究进展[J]. 涂料工业, 2018, 48(11):63-71, 78.
QI Yu-hong, ZHANG Guo-liang, CHI Jin-feng, et al. Progress in anticorrosive coatings for concrete[J]. Paint & Coatings Industry, 2018, 48(11):63-71, 78.
- [23] JT/T 695—2007, 混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件[S].
JT/T 695—2007, Specification of anti-corrosive coating for concrete bridge structure[S].
- [24] DUGAS R, FORERO-SABOYA J D, PONROUCH A. Methods and protocols for reliable electrochemical testing in post-Li batteries (Na, K, Mg, and Ca)[J]. Chemistry of Materials, 2019, 31(21):8613-8628.
- [25] GU W C, WANG W, JIAO X, et al. Waterborne superamphiphobic coatings with network structure for enhancing mechanical durability[J]. RSC Advances, 2022, 12(26):16510-16516.
- [26] PAN X Y, SHI C J, JIA L F, et al. Effect of inorganic surface treatment on air permeability of cement-based materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(3):04015145.
- [27] LI J F, SONG J L, ZHANG S H, et al. The effects of various silicate coatings on the durability of concrete: Mechanisms and implications[J]. Buildings, 2024, 14(2):381.
- [28] KIM T K, PARK J S. Comparative analysis of domestic and international test guidelines for various concrete repair materials[J]. Materials, 2022, 15(9):3267.
- [29] ZHANG Y Z, WANG R W, DING Z. Influence of crystalline admixtures and their synergetic combinations with other constituents on autonomous healing in cracked concrete: A review[J]. Materials, 2022, 15(2):440.
- [30] LI P F, GAN W H, YAO G Y, et al. Effect of permeable crystalline materials on the mechanical and porosity property of recycled aggregate and recycled aggregate concrete[J]. Materials, 2023, 16(13):4596.
- [31] CHEN F, QUY N X, KIM J, et al. Investigation on aesthetic and water permeability of surface protective material under accelerated weathering[J]. Materials, 2021, 14(22):6896.
- [32] JIANG L, ZHENG H B, XIONG J B, et al. Fabrication of negative carbon superhydrophobic self-cleaning concrete coating: High added-value utilization of recycled powders[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136:104882.
- [33] ZHANG W J, LI S C, HOU D S, et al. Study on unsaturated transport of cement-based silane sol coating materials[J]. Coatings, 2019, 9(7):427.
- [34] ZHOU C L, PAN M F, LI S J, et al. Metal organic frameworks (MOFs) as multifunctional nanopatform for anticorrosion surfaces and coatings[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 305:102707.
- [35] JTJ 275—2000, 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
JTJ 275—2000, Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbour engineering[S].
- [36] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].
- [37] JG/T 335—2011, 混凝土结构防护用成膜型涂料[S].
JG/T 335—2011, Film-forming coatings for concrete structure protection[S].
- [38] JTS 153—2015, 水运工程结构耐久性设计标准[S].
JTS 153—2015, Standard for durability design of port

- and waterway engineering structure[S].
- [39] JTG/T 3310—2019, 公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S].
- JTG/T 3310—2019, Code for durability design of concrete structures in highway engineering[S].
- [40] JT/T 991—2015, 桥梁混凝土表面防护用硅烷膏体材料[S].
- JT/T 991—2015, Creamy silane impregnating agent for concrete surface protection of bridge[S].
- [41] 宋莉芳, 陈彤丹, 文一平, 等. 混凝土用水性氟碳涂料的制备及耐腐蚀性能评价[J]. 化学研究与应用, 2019, 31(6): 1209-1215.
- SONG Li-fang, CHEN Tong-dan, WEN Yi-ping, et al. Preparation and properties of waterborne fluorinated polyacrylate coating for concrete anti-corrosion [J]. Chemical Research and Application, 2019, 31(6): 1209-1215.
- [42] GB/T 5210—2006, 色漆和清漆拉开法附着力试验[S].
- GB/T 5210—2006, Paints and varnishes—pull-off test for adhesion[S].
- [43] 郝负洪, 宣姣羽, 李洁, 等. 紫外老化作用下钢结构涂层受风沙冲蚀性能研究[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(4): 141-146.
- HAO Yun-hong, XUAN Jiao-yu, LI Jie, et al. Study on sand erosion performance of steel structure coatings under UV aging[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(4): 141-146.
- [44] 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[S].
- GB/T 1865—2009, Paints and varnishes—Artificial weathering and exposure to artificial radiation—Exposure to filtered xenon-arc radiation[S].
- [45] GB/T 1732—2020, 漆膜耐冲击测定法[S].
- GB/T 1732—2020, Determination of impact resistance of coating films[S].
- [46] JC/T 2217—2014, 环氧树脂防水涂料[S].
- JC/T 2217—2014, Epoxy resin waterproof coating[S].
- [47] JC/T 1018—2020, 水性渗透型无机防水剂[S].
- JC/T 1018—2020, Waterbased capillary inorganic waterproofer[S].
- [48] GB 18445—2012, 水泥基渗透结晶型防水材料[S].
- GB 18445—2012, Cementitious capillary crystalline waterproofing materials[S].
- [49] 孙红尧, 徐雪峰, 杜恒. 中国水工结构抗冲磨防腐蚀涂料的研究及应用现状[J]. 水利水运工程学报, 2023(5): 158-168.
- SUN Hong-yao, XU Xue-feng, DU Heng. Investigation and application of abrasion and cavitation resistant coatings for hydraulic structures in China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 158-168.
- [50] GB/T 20624. 2—2006, 色漆和清漆 快速变形(耐冲击性)试验 第2部分: 落锤试验(小面积冲头)[S].
- GB/T 20624. 2—2006, Paints and varnishes—Rapid-deformation (impact resistance) tests—Part 2: Falling-weight test (small-area indenter)[S].
- [51] DL/T 5150—2017, 水工混凝土试验规程[S].
- DL/T 5150—2017, Test code for hydraulic concrete[S].
- [52] DL/T 5207—2021, 水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范[S].
- DL/T 5207—2021, Technical specification for abrasion and cavitation erosion resistance of concrete in hydraulic structures[S].
- [53] GB/T 1768—2006, 色漆和清漆耐磨性的测定: 旋转橡胶砂轮法[S].
- GB/T 1768—2006, Method of test for abrasion resistance of paint films[S].
- [54] GB/T 23988—2009, 涂料耐磨性测定: 落砂法[S].
- GB/T 23988—2009, Determination for abrasion resistance of coatings by falling abrasive[S].
- [55] GB/T 1689—2014, 硫化橡胶: 耐磨性能的测定[S].
- GB/T 1689—2014, Rubber vulcanized—Determination of abrasion resistance (Akron machine)[S].
- [56] KAUR R, KAUR R, RANI S, et al. Rapid monitoring of organochlorine pesticide residues in various fruit juices and water samples using fabric phase sorptive extraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Molecules, 2019, 24(6): 1013.
- [57] MILLÁN R G P, BYLINSKI H, NIEDOSTATKIEWICZ M. Effectiveness of various types of coating materials applied in reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and chlorides [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 12977.
- [58] 常绍艳, 晁兵. 硅烷浸渍与湿面涂装工艺技术在嘉绍大桥上的设计应用[J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(12): 30-32.
- CHANG Shao-yan, CHAO Bing. Design application of silane impregnation & wet surface technology on Jiashao Bridge[J]. Modern Paint & Finishing, 2012, 15(12): 30-32.

15(12):30-32.

[59] 孟凡超,吴伟胜,刘明虎. 港珠澳大桥桥梁耐久性设计创新[J]. 预应力技术,2010,32(6):11-27.
MENG Fan-chao,WU Wei-sheng,LIU Ming-hu. Du-rability design innovation of Hong Kong-Zhuhai-Ma-cao Bridge[J]. Prestress Technology,2010,32(6):11-27.

[60] 张 杰. 长平高速公路松下跨海特大桥设计[J]. 福建交通科技,2021(10):59-62.
ZHANG Jie. Design of Panasonic Cross-sea Bridge on Changping Expressway [J]. Fujian Jiaotong Keji,2021(10):59-62.

[61] 殷鹏程. 福厦高铁湄洲湾跨海大桥(96+180+96) m 斜拉桥总体设计[J]. 铁道标准设计,2020,64(增 1):12-18.
YIN Peng-cheng. Overall design of (96+180+96) m cable-stayed bridge of Meizhou Bay Cross-sea Bridge of Fuzhou-Xiamen High-speed Railway[J]. Railway Standard Design,2020,64(S1):12-18.

[62] 王登辉. 泉州安海湾特大桥主桥耐久性质量控制措施[J]. 福建交通科技,2020(1):82-86,99.
WANG Deng-hui. Quality control measures for dura-bility of main bridge of Anhaiwan Bridge in Quanzhou [J]. Fujia Jiaotong Keji, 2020 (1): 82-86,99.

[63] 文望青,严 嵩,曾甲华. 福厦高铁泉州湾跨海大桥桥塔设计[J]. 世界桥梁,2020,48(增 1):7-11.
WEN Wang-qing, YAN He, ZENG Jia-hua. Tower design of Quanzhou Bay Cross-sea Bridge on Fuzhou-Xiamen High-speed Railway [J]. World Bridges,2020,48(S1):7-11.

[64] 杜 磊,梁立农,孙向东,等. 黄茅海跨海通道工程高栏港大桥桥塔方案设计[J]. 广东公路交通,2021,47(3):30-35.
DU Lei, LIANG Li-nong, SUN Xiang-dong, et al. Scheme design of towers of Gaolangang Bridge in Huangmaohai link[J]. Guangdong Highway Commu-nications,2021,47(3):30-35.

[65] 别业山,肖海珠,舒思利. 杭州湾跨海铁路大桥总体设计[J]. 桥梁建设,2023,53(增 2):22-28.
BIE Ye-shan, XIAO Hai-zhu, SHU Si-li. Overall de-sign of Hangzhou Bay Cross-sea Railway Bridge[J]. Bridge Construction,2023,53(S2):22-28.

[66] NOVÁK L, FOJTL L, KADLECKOVÁ M, et al. Sur-face modification of metallic inserts for enhancing adhe-sion at the metal-polymer interface[J]. Polymers,2021,13(22):4015.

[67] GUO Y C, SHEN A Q, SUN X H. Exploring poly-mer-modified concrete and cementitious coating with high-durability for roadside structures in Xinjiang, China[J]. Advances in Materials Science and Engi-neering,2017,2017:9425361.

[68] MERACHTSAKI D, FYTIANOS G, PAPASTER-GIADIS E, et al. Properties and performance of novel Mg(OH)₂-Based coatings for corrosion mitigation in concrete sewer pipes [J]. Materials, 2020, 13(22):5291.