

海洋混凝土结构表面防护涂料环境适应性评价 研究进展

蔡森

(海军后勤技术装备研究所 北京, 100072)

摘要: 综述了岛礁混凝土结构表面防护涂料海洋环境适应性评价(老化)研究进展,对表面防护涂料海洋环境适应性评价中试验设计、控制因子设定、试验方法选择、评价指标确定等环节中存在的问题进行了讨论,认为只有在认真梳理单环境因子对涂料作用机理的基础上,对它们进行合理设定,才能有效提高加速试验结果和自然暴晒老化试验结果的相关性。

关键词: 涂料; 海洋环境; 混凝土结构; 加速模拟试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.015

中图分类号: TQ630.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0065-07

Research Progress in Environmental Adaptability Evaluation of Concrete Protective Coating in Marine Environment

CAI Sen

(Navy Logistical Technology and Equipment Institute; Beijing 100072, China)

ABSTRACT: Based on the analyses of the main characteristics of marine atmosphere and main factors influencing coating system performance, the current accelerated test methods for the adaptability of Concrete Protective Coating of island and characteristics of these tests were reviewed. The problems in the experimental design, control factor setting, test method selection, and the evaluation index determination of the accelerated test methods for the adaptability evaluation of concrete protective coating of island were discussed. It was suggested that only reasonable setting based on the effects of single environmental factors on the coating mechanism could effectively improve the correlation between the test results and the accelerated natural exposure aging test results.

KEY WORDS: concrete protective coating; marine environment; environmental adaptability; trend

混凝土作为最成功的复合人工材料,具有多孔、凝土内部,引起钢筋混凝土中的钢筋锈蚀,从而导致
显微裂缝结构和较粗糙的表面,氯离子侵入钢筋混凝土保护层胀裂,是目前海洋环境下钢筋混凝土

收稿日期: 2013-07-21; **修订日期:** 2013-08-15

Received: 2013-07-21; **Revised:** 2013-08-15

作者简介: 蔡森(1971—),女,北京人,硕士,高级工程师,主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: CAI Sen(1971—), Female, from Beijing, Senior Engineer, Research focus: material corrosion and protection.

结构破坏的主要原因。高质量混凝土和适当厚度的保护层是提高钢筋混凝土耐久性最重要和最基本的措施,但并不能避免钢筋混凝土腐蚀破坏的发生,尤其在南海地区这种海洋重度腐蚀环境下,应采取防腐附加措施。

美国混凝土协会(ACI)确认的4种钢筋混凝土有效保护附加措施包括-环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂、阴极保护和钢筋混凝土表面防腐涂料^[1]。针对氯离子这一在海洋环境下影响混凝土耐久性的主要环境因素对混凝土结构预期寿命与成本关系进行的评价表明:采用环氧树脂类、聚氨酯类或聚脲类等涂层对混凝土的表面进行封闭,相同的修复费用,可使桥梁的寿命达到75~100年^[2]。各国试验研究也表明^[3],混凝土结构采用防腐涂料后,在抗氯离子侵蚀方面会有显著改善。因此,海洋工程钢筋混凝土中实施涂料涂装保护是一种经济实用的防腐蚀技术措施,受到世界各国的高度重视并被快速推广应用,但涂层的环境适应性评定成为一个亟需解决的问题。

1 涂料海洋环境适应性评价现状

海洋大气暴露试验能真实地反映出涂料在典型气候环境地区的耐蚀性,数据准确可靠,但试验周期很长,有时需要几年甚至数十年才能得到较为可靠的试验数据,而且由于海域气候条件的不同,试验区域性很强,得出的试验结果不具有普遍性^[4]。模拟加速试验则是为了缩短考核时间而采用一些典型环境因子的单项试验,如湿热试验、太阳辐射试验、盐雾试验等(这些试验均有通用的标准试验方法)。在实际环境中,由于涂层受到高温、高湿、光辐射及光化学效应、盐雾大气等环境因子协同影响,其腐蚀结果并不是单因素单项腐蚀数据的简单综合或叠加,因而,单因子试验所得到的试验结果只能反映涂层某一方面的性能,并不能真实反映自然海洋环境下多种条件共同作用下的涂层失效规律和机理。穆山^[5]等对同一批次涂层体系样品分别进行的实验室单因素与循环组合试验和自然环境暴露试验的对比分析证明了这一点。这类单项加速试验结果,在比较不同涂料同一条件下的耐腐蚀性、确定某种因素对涂料腐蚀影响方面效果较好^[6],但与涂料在自然环境下的实际防腐寿命缺乏相关性,使建立在此类试验基

础上的研究成果在实际工程推广应用中具有较大的局限性。由于海洋环境模拟加速试验中的试验方法、试验手段、加速控制因素、评价指标,直接影响到模拟加速试验与实际使用之间的相关性。如何提高它们之间的相关性,以涂层短期的模拟加速试验确定其长期的海洋自然环境适应性,是涂层的研制、使用双方急需解决的实际问题。

文中就南海岛礁混凝土结构表面防护涂料腐蚀环境特点及性能要求进行了分析,对目前多因素人工加速试验研究进展进行了总结,对存在的问题进行了讨论。

2 岛礁混凝土结构表面防护涂料腐蚀环境特点

在实验室中模拟涂层在自然环境中的老化过程,并建立快速试验与评价方法,主要目的是获得与自然环境中的试验有可比性、试验时间短的试验结果。实验室试验能否获得理想效果,取决于选择、确定试验的方法、程序试验和条件,但首先要考虑对涂层破坏有重要影响的环境因素。

南海岛礁混凝土结构涉及区域包括海洋大气区^[7-8]、飞溅区、潮差区、海水全浸区等4个腐蚀区带。其中,浪花飞溅区由于海水飞溅、干湿交替,氧的供应最充分,光照和浪花冲击破坏是最严峻的海洋腐蚀环境,腐蚀最为强烈。另一区域为潮差区,特别是平均低潮线以下0.5~1.0 m处,因其溶解氧充分、流速较大、水温较高、海生物繁殖快等,形成了另一个腐蚀峰值。对大量长期暴露于海洋环境下混凝土结构的腐蚀破坏调查分析表明^[9],处于不同腐蚀带的同一海工混凝土结构由于环境条件的不同,氯离子进入混凝土中的机理不同,腐蚀特点各不相同,腐蚀形貌^[10]、原理也有一定的差异,对表面防护涂料性能的要求也各有侧重。如飞溅区是毛细管吸附为主导,潮差区以扩散为主及全浸区有水头压力作用下的渗透。另外,潮差区所取的混凝土试样部分表面覆盖有生物膜,可释放表面活性物质,不仅使水蒸汽扩散进入混凝土方式发生变化,而且还改变了毛细管吸附水分的能力,可能会对氯离子渗透产生一定的物理阻挡作用,导致氯离子扩散速率发生变化,该区域钢筋腐蚀量也显示了较明显的差异。

根据岛礁混凝土结构腐蚀环境特点,对混凝土表面防护涂料的性能要求主要有以下几方面。

1) 在涂料性能方面,要求表面涂料涂膜致密且为高性能耐候面漆^[11-12],受阳光直射部位的面漆耐紫外线老化设计年限应不小于10年。同时,由于相对于钢材,混凝土结构的形变更大,用于混凝土结构表面的涂料要具有很好的力学性能,以适应混凝土的形变,以确保涂层保护的效果。

2) 在施工方面,由于所处岛礁混凝土结构环境特点受环境潮汐影响较大,因此混凝土结构表面处于周期性的干湿交替状态,而且,因涨潮落潮的影响,部分混凝土结构只有不到2 h位于水面之上。这样对涂层体系提出了特殊的性能和涂装要求,特别是封闭底漆要求能够在潮湿的混凝土表面涂装,需要采用对潮湿混凝土基面具有很好适应性的涂料,即对潮湿混凝土基面具有良好的润湿性、渗透性、耐碱性和优异的附着力。同时,涂料固化时间应该控制在一定时间内或可湿固化^[13]。鉴于海洋环境腐蚀的严重性,涂料应有良好的复涂性,当发生严重腐蚀需要进行修补时,与后继防腐技术措施匹配性要好。

由于涂料在海洋环境中的腐蚀受到多种复杂因素的综合作用,因而要更真实地再现涂料在海洋大气中的失效过程,必须尽可能的将这些环境因素综合起来考虑。对于岛礁混凝土结构特殊的环境特点,有必要根据南海岛礁混凝土结构表面防护涂层不同区域防护要求,针对实际情况设计试验程序和具体参数,以提高加速模拟试验与现场暴露试验的相关性。比如,对于海洋大气区、飞溅区,涂层破坏形式主要为在海洋自然环境中的老化。由于海洋环境中温度变化幅度小,因此涂层性能主要受湿度、光辐射、盐雾、冲击等环境因素的影响。高温高湿的环境,使得太阳光引发的涂料的氧化和水解过程加快,盐雾中的氯离子穿过涂层与底金属发生电化学反应,因此涂层老化速度的快慢,最主要是由热效应、光化学效应以及盐雾腐蚀作用决定。飞溅区和潮差区,涂膜破坏则主要是受到海水干湿交替、冲击,引起的涂膜附着力下降。鉴于施工对涂料性能的影响,要想获得良好的岛礁混凝土表面涂层加速试验的相关性,对实际环境的模拟(加速),不仅要体现在环境要求的特殊性上,而且,在样品的制作过程,也应考虑现场施工条件的限制,并做出相应规定。

3 岛礁混凝土结构表面防护涂料评价研究进展

近年来模拟大气腐蚀的模拟加速试验方法及设备,都在向多因子复合加速腐蚀的方向发展。

国内就目前已经公开的一些专利来看,海洋环境腐蚀室内模拟试验装置成为研究热点,相关专利数量众多。虽然针对试验对象不同,它们都是模拟实际海洋环境大气区、飞溅区、潮差区、全浸区和海泥区等5个腐蚀环境区带某些环境特点的试验装置,特别是针对潮差区周期性潮汐的特点进行了模拟,很少将光照带来的温度及紫外线老化等因素考虑在内,一定程度上影响了该类装置的试验结果与现场暴露试验的相关性。如CN 2252989Y^[14],CN 2421640Y^[15],CN 101285756A^[16],CN 101285757A等,他们大多在主工作箱内设置了适浪板和试样架,可通过电脑精确控制或简单时控开关和水位控制器联合控制,实现装置的自动化运行,模拟干湿交替、潮汐变化,试板按照“浸泡在海水中→暴露在空气中→浸泡在海水中”的顺序做间浸腐蚀试验。通过使试验箱中的试件交替处于浸润和干燥状态来模拟处于潮汐区的样品周期性浸润和干燥的过程,并可设定不同干湿循环周期和干湿比例实现模拟不同海域的潮汐周期特点。CN101482482 B^[17],CN101285756A, CN2938075Y^[18]等还可附带模拟水温波动、海水冲刷等多方面的模拟加速海洋环境腐蚀试验。少数专利如CN 101871877A^[19],考虑了光照情况。CN202066781 U^[20]综合考虑了海水干湿交替以及阳光照射的影响,更接近实际腐蚀环境,为研究潮差区腐蚀防护技术提供了实验基础,但试验组合方式、程序、手段有待细化,而且上述专利内容,都缺乏试验相关性方面的验证。

国外涉及到海洋环境模拟试验方法主要有如下4种^[21]:ASTM G85-1985^[22](该试验方法已被众多涂料制造商采用),ASTM D5894-2005^[23],Norsok M-501-2004^[24],NACE TM 0304-2004^[25]。它们在具体试验参数、所用溶液种类、循环次数等方面有一定不同(见表1),但都不再单独采用连续盐雾试验作为主要评定手段。ASTM G85将盐雾与干湿交替循环结合在一起,ASTMD5894标准中更将“紫外线/冷凝”循环包

表1 国外海洋大气环境下涂层循环加速腐蚀试验方法比较

Table 1 Comparison of test conditions of accelerated coating corrosion test in marine atmospheric environment

序号	标准名称		单次试验项目		试验条件	循环次数	相关性	备注
			项目	T/h				
1	Prohesion 盐雾试验		盐雾过程	1	盐溶液:0.35%(NH ₄) ₂ SO ₄ +0.05%NaCl; 温度为室温;pH为5.0~5.4 温度:35℃	24 h 的倍 数	0.81	12种涂 层实海 试验及 加速腐 蚀试验 的结果 显示,连 续盐雾 试验与 实海试 验的相 关因数 仅0.30
			干燥过程	1				
2	ASTM D5894 (4032h)	Prohesion 盐雾试 验(168 h) 紫外线/冷凝循环 (168 h)	盐雾过程	1	盐溶液:0.35%(NH ₄) ₂ SO ₄ +0.05%NaCl; 温度为室温;pH为5.0~5.4 温度:35℃ 紫外线照射:60℃ 冷凝:50℃	12	0.89	
			干燥过程	1				
			紫外线	4				
			冷凝	4				
3	Norsok M-501 (4200h)	紫外线/冷凝循环 (72 h) 盐雾 冷冻	紫外线	4	紫外线照射:60℃ 冷凝:50℃ 依据 ASTM B117 标准进行 温度:-20℃	25	0.85	
			冷凝	4				
				72				
				24				
4	NACE TM 0304 (2016h)	Prohesion 盐雾试 验(168 h) 紫外线/冷凝循环 (168 h)	盐雾过程	1	人工海水依据 ASTM D1141 标准制备;喷雾 温度为室温; 温度:35℃ 紫外线照射:60℃ 冷凝:50℃	6		
			干燥过程	1				
			紫外线	4				
			冷凝	4				

含进来。NACE TM 0304 标准在 ASTM D5894 基础上用人工海水代替了特定的电解质溶液,增加了试验周期,这使得它们与真实暴露试验相关性提高。挪威的佐敦涂料(Jotu Coatings)采用 ASTM G85 标准和 Norsok M-501 标准同时进行试验,结果显示这2种试验方法能够很好地相互关联,且均与实际腐蚀情况有较好的相关性。英国国际油漆公司在英国的北海附近对8种有机涂层体系进行了6 a 实海暴露试验,同时依据 NACE TM0304, ASTM D5894, Norsok M-501 和 ASTM B117 标准进行了加速腐蚀试验。结果表明,在涂层腐蚀破坏的类型及腐蚀面积百分数上,3种循环加速腐蚀试验都较连续盐雾试验更接近实海暴露试验的结果;同时发现3种循环腐蚀试验的腐蚀严酷程度从小到大为 NACE TM 0304, ASTM 5894, Norsok M-501。从表1可见,海洋环境下多因素腐蚀加速试验与实际暴露试验的相关性明显好于单因素的连续盐雾试验,且试验程序、项目对试验相关性影响较大。目前国内外对海洋环境模拟加速试验中盐雾—干燥过程的观点一致,但国外标准中普遍引入了模拟阳光老化的试验项目,并且获得了较好的相关性数据。这一点值得重视,但对施工因素

都没有做明确要求。

目前,在试验方法方面,国内也有人注意到了试验设计对海洋模拟试验相关性的关系。如 CN 101482484 A 选择湿热试验—光辐射试验—盐雾试验这一先后顺序模拟海洋自然环境^[6],通过渐进式控温控湿的湿热试验、带温氙灯老化、连续盐雾试验组成1个循环,按循环次数10个以上的方式进行模拟试验,判断指标为涂层附着力、外观、色差。经试验研究显示,10次循环即720 h基本上可以得出涂层性能变化的规律,并与海洋环境户外暴露试验18个月的涂层性能变化结果相比。该发明提供的涂层模拟加速试验方法具有较好的模拟性、加速性和重现性。由于引入太阳光辐射这一因素,使得试验相关性大大提高,比较适用于海洋大气区、飞溅区、潮差区涂料模拟加速试验。

4 需注意的问题

岛礁混凝土结构表面防护涂料海洋环境适应性评价中最主要的问题是:室内加速腐蚀试验方法对涂层耐蚀性能的评价能部分反映出涂层在海洋大气

环境中的耐蚀性优劣,但将它们简单组合后不能用以预测涂层体系在实际使用环境的耐蚀寿命。这可能是因为室内加速腐蚀试验设计中各控制因素选取不当或各因素所占权重不合理,使得涂层的破坏形式与实际环境涂层表面的真实破坏过程不完全相同引起的。建议引入类似材料试验中“环境当量”的概念^[27],根据岛礁混凝土结构所处环境的特殊性,从以下方面进行改进。

4.1 试验控制因子的选取

目前,国内对岛礁混凝土结构表面防护涂料海洋环境适应性(老化)评价方面的研究重点在干湿交替环境对涂层的影响,对光照+浸泡液、温度+浸泡液等因素的协同作用考虑不够。有研究表明,氯离子在光照→温度+海水,以及海水+干燥等条件下,渗透率是不一样的,这也必将影响到涂膜的使用寿命,影响到加速试验的相关性^[28]。因此,对岛礁混凝土结构表面防护涂料海洋环境适应性(老化)评价,应充分考虑一定温度下,紫外老化+干燥+加速液等几个因素协同作用对涂膜质量的影响。通过模拟加速试验控制条件的选择、试验前后顺序的编排等一系列基础试验,与实际暴露实验对比,获得不同环境因素对涂层腐蚀破坏的加权系数,最终确定特定环境加速试验因子。

针对岛礁混凝土结构表面防护涂料使用环境特点,在加速试验设计中,应充分考虑施工条件的特殊性,并将这一因素纳入环境模拟的范围内。不能不承认,除非试验要求,试验室制样的条件肯定会好于岛礁现场施工环境,甚至于为达到良好的试验结果,会对干燥时间、温、湿度环境会进行调整。这就会造成部分在实际应用中经常可以遇到的,满足说明书中带湿要求、固化时间、复涂间隔等相关施工参数要求,但仍难以适应岛礁恶劣的施工环境,出现试验报告和实际应用脱节的情况。“三分涂料七分施工”,施工环节对涂膜质量的重要性不言而喻,在加速模拟试验中,应考虑施工条件对涂膜质量的影响,并对样品的制备条件按实际海况进行统一规定,避免试验条件不统一造成的试验误差。

4.2 试验方法的选取

不同的加速试验方法对不同涂层变化的影响趋

势与实际海洋环境暴露试验的结果相关性存在明显差异。以氙灯老化试验为例,由于氙灯光谱与照射到地球表面的太阳光光谱非常相近,因而成为涂膜耐候性能测试常用的加速试验方法。有研究表明,对聚酯粉末涂层,当以保光率作为评价耐候性指标时^[29],紫外/冷凝老化试验对聚酯粉末涂层在湿热气候环境大气暴露的模拟性和相关性优于按标准 GB/T 1865—1997 进行的氙灯老化试验。这说明氙灯老化试验也只能是有限度地模拟湿热气候环境的户外暴露情况。叶美琪等的试验也表明^[30]:氙灯加速老化试验引入盐雾试验以后对颜色影响较大,对光泽影响不大。粉化是阳光中强烈紫外线造成的,氙灯老化加速试验不能对其起到加速作用。就涂层表观颜色、光泽、粉化而言,紫外老化+盐雾比氙灯老化+盐雾及连续氙灯加速老化试验更接近海洋大气环境暴露试验的结果。因此,海洋环境模拟试验试验方法和评价指标的选择,直接影响到模拟试验与涂料在实际环境中的使用寿命的相关性。在设计加速试验方法时,一些基础性的前期试验项目必不可少。

另外,对试验方法的选择上,应满足以下4条相关性评价标准:试验腐蚀过程的化学机理一致;试验形成的腐蚀形貌、锈层特性一致;试样所处试验环境的作用机理一致;同时试验多种材料时耐蚀顺序一致。这使得有些试验方法先天存在缺陷,需对必要的试验参数进行修正,特别是一些有关氯离子渗透的电化学快速检测方法,这另文描述。

4.3 评价指标的设定应全面、合理

在评价指标的设定方面,应加入一些对涂料在力学性能、防腐蚀性能等方面的跟踪性检测,如做加速试验后,涂膜附着力、柔韧性性能变化更具有工程实际意义。做加速试验,关注点在加速试验后,涂料的性能是否达到工程应用的要求,而不只是得到光泽变化或“涂膜无变化”的外观结论。

5 结语

通过对试验方法、控制因子、程序、评价指标的合理设定,提高加速试验结果和自然暴晒老化试验结果的相关性,是开展模拟加速腐蚀试验研究,建立起一套满足模拟性、加速性和重现性的岛礁混凝土

结构表面防护涂料海洋环境适应性评价(老化)加速试验方法的有效途径。这将成为由室内加速腐蚀试验来推测户外长期混凝土结构表面防护涂料老化试验的结果,进而预测特定环境涂料的耐腐蚀性能的第一步。

参考文献:

- [1] 陈肇元,范立础,刘建航,等. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004:92—94.
CHEN Zhao-yuan, FAN Li-chu, LIU Jian-hang, et al. Design and Construction Direction to Concrete Structure Durability[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004:92—94.
- [2] 田惠文,李伟华,宗成中,等. 海洋环境钢筋混凝土腐蚀机理和防腐涂料研究进展[J]. 涂料工业,2008,28(8): 62—67.
TIAN Hui-wen, LI Wei-hua, ZONG Cheng-zhong, et al. Corrosion Mechanism and Research Progress of AntiCorrosion Coatings for Reinforced Concrete Used in Marine Environment[J]. Paint & Coatings Industry, 2008, 28(8): 62—67.
- [3] 黄君哲,范志宏,王胜年,等. 海洋环境中混凝土涂层防腐效果分析[J]. 水运工程,2006,192(2):16—19,54.
HUANG Jun-zhe, FAN Zhi-hong, WANG Sheng-nian, et al. Corrosion Prevention Effectiveness of Coating System Applied in Marine Environment[J]. Port & Waterway Engineering, 2006, 192(2): 16—19, 54.
- [4] 罗振华,蔡键平,张晓云,等. 耐候性有机涂层加速老化试验研究进展[J]. 合成材料老化与应用,2003,32(3): 31—35.
LUO Zhen-hua, CAI Jian-ping, ZHANG Xiao-yun, et al. Progress in Study of Accelerated Test for Anti-weathering Organic Coatings[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2003, 32(3): 31—35.
- [5] 穆山,李军念,王玲. 实验室加速试验与自然暴露试验差异性研究[J]. 装备环境工程,2011,8(5):13—19.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Difference between Accelerated Test and Outdoor Exposure Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 13—19.
- [6] 张三平,萧以德,朱华,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.
ZHANG San-ping, XIAO Yi-de, ZHU Hua, et al. Investigation on Correlation of Atmospheric Exposure Test and Accelerated Corrosion Test of Outside Coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(3): 157—159.
- [7] 侯保荣. 海洋环境腐蚀规律及控制技术[J]. 科学与管理, 2004(5):6—8.
HOU Bao-rong. Corrosion Law and Control Techniques in Seawater[J]. Science and Management, 2004(5): 6—8.
- [8] 郑卫京,裘跃先. 近海岸海洋设施的腐蚀与腐蚀控制[J]. 装备环境工程,2004,1(8):56—59.
ZHENG Wei-jing, QIU Yue-xian. The Corrosion and Control of Sea Equipment near Shore[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 01(8): 56—59.
- [9] 朱雅仙,朱锡昶,张燕迟. 钢筋混凝土耐久性海洋暴露试验[J]. 海洋工程,2004,22(4):60—65.
ZHU Ya-xian, ZHU Xi-chang, ZHANG Yan-chi. Coastal Exposure Test of Durability of Reinforced Concrete Using Activated Admixtures[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(4): 60—65.
- [10] 吕建福,谭智军,巴恒静. 长期暴露的海工混凝土性能与显微结构分析[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(4): 528—533.
LV Jian-fu, TAN Zhi-jun, BA Heng-jing. Micro-structure and Performance Analysis of Marine Concrete After Extended Exposure to Marine Environment[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4): 528—533.
- [11] 白书亚,晁兵,田云生,等. 钢筋混凝土表面复合涂层防护技术的研究进展[J]. 现代涂料与涂装,2010,13(12): 29—31,40.
BAI Shu-ya, CHAO Bing, TIAN Yun-sheng, et al. Research Progress of Compound Coatings Protection Technology on the Surface of Steel Reinforced Concrete[J]. 2010, 13(12): 29—31, 40.
- [12] 黄君哲,周欲晓,王胜年,等. 海工混凝土结构表面涂层暴露试验及应用效果[J]. 中国港湾建设,2002(6): 17—20,51.
HUANG Jun-zhe, ZHOU Yu-xiao, WANG Sheng-nian, et al. Analysis of Exposure Experiment and Application of Coatings for Marine Concrete Structures[J]. China Harbour Engineering, 2002(6): 17—20, 51.
- [13] 张炜煌,蔡志滨,杨医博,等. 环氧涂料在海工混凝土的应用进展[J]. 广东建材,2011(2):32—35
ZHANG Wei-huang, CAI Zhi-bin, YANG Yi-bo, et al. Progress in Applications of Epoxy Coating on Concrete for Ocean Construction[J]. Guangdong Building Materials, 2011

- (2):32—35.
- [14] 高振洋. 海洋腐蚀模拟试验机: 中国, 2252989Y[P]. 1997-04-23.
GAO Zhen-pan. Testing Machine in Simulated Marine Corrosion Environment; CHINA, CN 2252989Y[P]. 1997-04-23.
- [15] 侯保荣, 李言涛, 黄彦良, 等. 模拟海洋环境腐蚀试验装置: 中国, 2421640Y[P]. 2001-02-28.
HOU Bao-rong, LI Yan-tao, HUANG Yan-liang, et al. Test Device in Simulated Marine Corrosion Environment[P]. CHINA: CN 2421640Y, 2001-02-28.
- [16] 李言涛, 刘建国. 一种智能型模拟海洋腐蚀试验机: 中国, 101285756A[P]. 2008-10-15.
LI Yan-tao, LIU Jian-guo. Intelligent Testing Machine in Simulated Marine Corrosion Environment; CHINA, CN101285756A[P]. 2008-10-15.
- [17] 吴俊升, 李晓刚, 董超芳. 一种海洋腐蚀模拟加速试验装置: 中国, 101482482 B[P]. 2009-02-04.
WU Jun-sheng, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang. Accelerated Testing Device in Simulated Marine Corrosion Environment; CHINA, CN 101482482 B[P]. 2009-02-04.
- [18] 张爱萍, 田冰, 何其平, 等. 耐候钢海水飞溅腐蚀试验装置: 中国, CN2938075Y[P]. 2007-08-22.
ZHANG Ai-ping, TIAN Bing, He Qi-ping, et al. Test Device in Simulated Marine Corrosion Environment of Weathering Steel at the Splash Zone; CHINA, CN2938075Y[P]. 2007-08-22.
- [19] 金伟良, 许晨. 用于模拟海洋潮沙环境的自动化试验装置: 中国, 101871877A[P]. 2010-10-27.
JIN Wei-liang, XU Chen. Automation Function Test Device in Simulated Marine tidal Environment; CHINA, CN 101871877A[P]. 2010-10-27.
- [20] 赵卫民, 王勇, 韩彬, 等. 海洋潮差区腐蚀模拟实验装置: 中国, 202066781 U [P]. 2011-05-06.
ZHAO Wei-min, WANG Yong, HAN Bin, et al. Testing Device in Simulated Marine Corrosion in Tidal Zone; CHINA, CN 202066781 U[P]. 2011-05-06.
- [21] 张连飞, 王旭东, 孙冬柏, 等. 国外海洋大气环境下涂层循环加速腐蚀试验方法简介[J]. 材料保护, 2010, 43(6): 84—86.
ZHANG Lian-fei, WANG Xu-dong, SUN Dong-bai, et al. Introduction of ACCELERATED CORROSION TEST of Foreign Countries in SIMULATING Marine Atmosphere[J]. Materials Protection, 2010, 43(6): 84—86.
- [22] ASTM G85, Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing[S].
- [23] Standard Practice for Cyclic Salt Fog/UV Exposure of Painted Metal (Alternating Exposures in a Fog/Dry Cabinet and a UV/Condensation Cabinet)[S].
- [24] Norsok M-501, Surface Preparation and Protective Coating [S].
- [25] NACE TM 0304, Offshore Platform Atmospheric and Splash Zone Maintenance Coating System Evaluation[S].
- [26] 田月娥, 朱蕾, 肖勇, 等. 涂层的模拟加速试验方法: 中国, 10 1482484 A[P]. 2009-07-15.
TIAN Yue-er, ZHU Lei, XIAO Yong, et al. The Method of Simulated Acceleration Test for Coating; CHINA, CN 10 1482484 A[P]. 2009-07-15.
- [27] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48—52.
LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48—52.
- [28] 王建东, 徐惠芳, 曾凡信, 等. 人工气候环境下混凝土梁中氯离子浓度分布规律的研究[J]. 浙江建筑, 2010, 27(12): 57—59.
WANG Jian-dong, XU Hui-fang, ZENG Fan-xin, et al. Study on Chloride Ion Density Distribution Law in Concrete Beam Under Artificial Climate Conditions[J]. Zhejiang Construction, 2010, 27(12): 57—59.
- [29] 毛海荣, 祁黎, 张志勇, 等. 聚酯粉末涂料的大气暴露试验与人工加速试验研究[J]. 涂料工业, 2003, 33(12): 49—52.
MAO Hai-rong, QI Li, ZHANG Zhi-yong, et al. Study on Weathering Exposure and Artificial Weathering Tests for Polyester Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2003, 33(12): 49—52.
- [30] 叶美琪, 金晓鸿, 陈乃红, 等. 船舶涂料海洋环境与实验室加速试验相关性研究——海洋大气区用涂料体系[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 4—11.
YE Mei-qi, JIN Xiao-hong, CHEN Nai-hong, et al. Study on Correlation between Marine Environmental Test and Accelerated Tests in Laboratory for Ship Coatings——Coating Systems for Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 4—11.