

混凝土附加防腐蚀涂层性能试验研究

谷慧¹, 孟昭博¹, 荣华²

(1.聊城大学建筑工程学院, 山东 聊城 252000; 2.中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 混凝土附加防腐蚀涂层可以阻止混凝土的腐蚀, 提高其耐久性。不同类型附加防腐蚀涂层对混凝土结构抗氯离子侵蚀性能的提高作用不同。选择3种表面成膜型涂料、3种渗透型涂层和一种复合型涂层, 采用电阻率法研究了涂料种类、水胶比对涂覆涂层的混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响。结果表明: 涂层能够有效抑制氯离子向混凝土内部扩散, 明显提高混凝土的抗氯离子侵蚀性能; 在相同水胶比的情况下, 成膜型涂料的抗氯离子侵蚀效果一般要优于渗透型涂料, 复合型涂层的性能最优; 水胶比对涂层阻隔有效性的测试结果略有影响。

关键词: 防腐涂层; 混凝土; 抗氯离子侵蚀性能; 水胶比

中图分类号: TQ639, TB304

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2025)02-0006-04

Experimental Study on Chloride Ion Corrosion Resistance of Additional Anti-corrosion Coating of Concrete

GU Hui¹, MENG Zhao-bo¹, RONG Hua²

(1.School of Architecture and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China;

2.MCC Architectural Research Institute Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The protective layer prevents concrete corrosion and improves its durability. Different types of additional anti-corrosion coatings have different effects on improving the chloride ion corrosion resistance of concrete. Three surface film-forming coatings, three penetrating coatings, and one composite coating were selected, and the influence of coating types and water cement ratio on the chloride ion corrosion resistance of coated concrete was studied using the resistivity method. The results indicate that the coating can effectively inhibit the diffusion of chloride ions into the interior of concrete, and has a significant effect on improving the resistance of concrete to chloride ions. Under the same water cement ratio, the anti chloride ion corrosion effect of film-forming coatings is generally better than that of penetrating coatings, and composite coatings have the best performance. The water to adhesive ratio has a slight impact on the test results of the barrier effectiveness of the coating.

Key words: anti-corrosion coating; concrete; chloride ion erosion resistance; water glue ratio

0 引言

氯离子侵蚀是海洋环境下混凝土腐蚀破坏的最主要原因。在混凝土表面涂覆防腐蚀涂层, 可以形成一道防护屏障, 有效阻碍氯离子向混凝土内部的不断渗入,

提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力, 进而达到减缓钢筋表面氯离子浓度聚集速率、保持钢筋表面氯离子浓度低于临界锈蚀浓度的目标。

目前所采用的涂层材料很多, 通常分为3种类型^[1]: 表面成膜型、渗透型、复合型, 涂层防腐蚀示意如图1所示。由图1可知, 涂层的使用, 会在混凝土表面形成与基体混凝土物理性能截然不同的表面层, 构成双层复合材料(表面层+基体混凝土), 此材料可大幅度提高混凝土抗氯离子侵蚀性能^[2]。然而, 不同涂层种类对

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 51278401。

作者简介: 谷慧(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事工程结构可靠度和耐久性研究工作。E-mail: guhuiyatou@163.com。

混凝土抗氯离子侵蚀能力的提高作用不同。

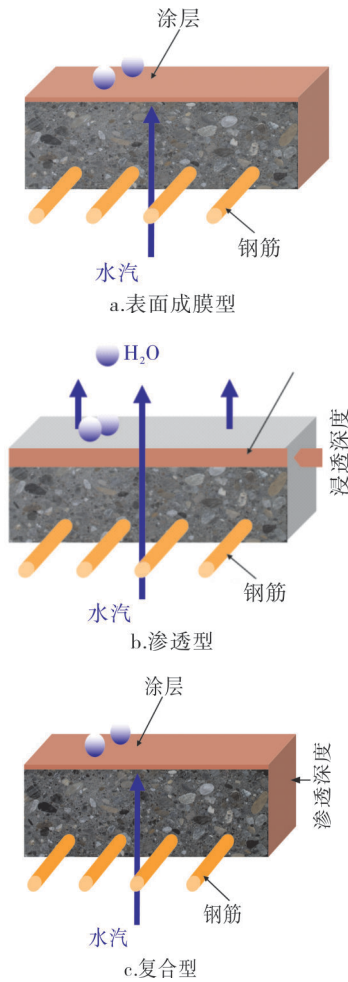


图1 涂层防腐蚀示意

国内外学者对不同涂层对混凝土的防腐蚀效果进行了相应研究。赵羽习等^[3]采用了干湿循环试验,试验结果显示渗透型涂料的防护效果不如成膜型涂料。苏海防等^[4]对海洋混凝土结构中硅烷涂层的应用效果进行了研究,结果表明混凝土的吸水率、渗透深度和氯离子吸收量与硅烷的涂覆量有关。徐爱敏等^[5]通过对比3种不同涂层的附着强度、透水量和抗氯离子渗透性能,选出了最优涂层。熊建波等^[6]通过电通量法和吸水率法得出,混凝土密实性对硅烷的防护效果有影响。Batis R G等^[7]研究了3种有机涂层在氯离子侵蚀和碳化环境下对混凝土的保护作用,发现涂层的保护效果明显。Zhang G L等^[8]用羰基溶剂制备了环氧树脂溶液,其中溶剂和环氧树脂可以与胺(固化剂)反应形成网络,研究发现涂覆环氧树脂的混凝土强度提高,且具有较好的防腐蚀性能。Chi J F等^[9]研发了一种高性能涂层,可以渗透到1.5 mm的混凝土孔或缺陷中,且溶剂在较高的温度下与环氧树脂交联,形成坚固的根状

涂层-混凝土复合材料,涂层的使用使混凝土的机械强度和耐腐蚀性明显增强。Elsayed M Elnaggar等^[10]制备了具有沥青和聚氨酯树脂两种特性的沥青聚氨酯涂料,并对有涂层和无涂层混凝土样品的接触角、吸水率和氯离子渗透性进行了评估,试验表明有涂层混凝土样品的吸水率比无涂层混凝土样品更低,接触角更高,抗氯离子渗透能力更强。上述文献虽然有对涂层防腐蚀性能的对比,但不能全面地反映不同成膜型涂料、不同渗透型涂料和复合型涂料对混凝土基体的抗氯离子侵蚀性能的提高程度,需要进一步的性能试验对比研究。

本文选取7种防腐涂层,包括3种表面成膜型涂料、3种渗透型涂层和1种复合型涂层,根据工程应用,选择两种具有代表性的水胶比进行涂覆混凝土的抗氯离子侵蚀性能对比试验,分析不同涂层、不同水胶比对涂覆涂层的混凝土抗氯离子侵蚀能力提升的效果,为防腐涂层在海洋环境下混凝土保护措施中的进一步应用提供参考。

1 试验部分

1.1 防腐蚀涂层选取

通过调研,选取目前公认效果较好的3种表面成膜型涂料、3种渗透型涂层和1种复合型涂层进行相关试验研究,涂层相关参数如表1所列。其中,成膜型涂料体系由底漆、中间漆和面漆组成,配套涂料之间应具有良好的相容性。

表1 涂层相关参数

涂层	材料	标准干膜厚度/ μm
表面成膜型涂料	底漆 专用环氧封闭漆	40
	A 中间漆 多功能耐磨环氧玻璃鳞片漆	200
	面漆 丙烯酸聚硅氧烷面漆	60
	B 底漆 环氧封闭底漆	60
	中间漆 环氧玻璃鳞片漆	200
	面漆 丙烯酸聚硅氧烷面漆	40
渗透型涂层	C 底漆 环氧封闭底漆 HS	50
	中间漆 环氧中间漆	200
	面漆 聚氨酯面漆	50
复合型涂层	1 异辛基三乙氧基硅烷	
	2 异辛基三乙氧基硅烷	
	3 异丁基三乙氧基硅烷	
D 表面成膜型涂料+渗透型涂层	300	

1.2 基体混凝土试件制作

为对比不同涂层对混凝土构件抗氯离子侵蚀性能提高的作用,并考虑混凝土水胶比的影响,选取水胶比

为 0.365 和 0.450 的混凝土试件作为基体混凝土试样,配合比如表 2 所列。其中,水泥使用钱潮牌普通硅酸盐水泥,粉煤灰为 II 级粉煤灰,水泥和粉煤灰的化学组成如表 3 所列。中砂为过筛后 0.3~0.5 mm,碎石 1 的尺寸为 5~16 mm,碎石 2 的尺寸为 16~31.5 mm,外加剂为减水剂(聚羧酸),选自江苏兆佳建材科技有限公司。将上述材料充分混合配制直径为 100 mm、长为 200 mm 的混凝土圆柱体试样,试样脱模后放在养护室内按标准条件(温度(20±2)℃,相对湿度大于 90%)养护 28 d,取出试样后放至面干。在试样的中间部分切出长为 50 mm 的圆柱体 3 个,即为基体混凝土试样。

表 2 混凝土配合比 kg/m³

水胶比	水泥	粉煤灰	水	中砂	碎石 1	碎石 2	外加剂
0.365	396	55	165	708	356	735	6.4
0.450	304	76	170	777	1 069	0	5.4

表 3 粉煤灰和水泥的化学组成 %

胶凝材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI
粉煤灰	7.14	48.40	31.41	4.46	1.32	1.18	2.33
水泥	64.40	20.36	4.96	3.17	2.09	1.98	1.27

1.3 涂层的涂覆

选择基体混凝土试块的上下两面作为涂覆涂层表面,进行涂层的施涂,涂覆方法如下:表面成膜型涂料的涂覆方法为基层前处理→含水量测定→封闭底漆→中间漆→面漆→养护 7 d,涂料施工时,保证试件相对湿度≤85%,涂覆环境温度 5~50℃,涂覆基材温度高于露点 3℃,试件涂覆时,每层漆涂刷应均匀无起泡,涂料干燥后再涂刷另外一层;渗透型涂层的涂覆方法为:将试样面用砂布打磨刷新,并将打磨面洗净、晾干,用毛刷蘸取部分硅烷浸渍剂,由上而下在试样被涂面均匀涂刷,试样涂覆后,置于温度 20~23℃、相对湿度 50%~70%的标准环境中养护,7 d 后取出试样进行相关测试;复合型涂层的涂覆方法为先涂覆渗透型涂层,待养护 7 d 后再涂覆表面成膜型涂料,再养护 7 d 即可。表 1 中每种涂层涂覆 3 个样品,试验中以 3 个样品的测试平均值作为测试结果。

1.4 抗氯离子渗透性试验

对于钢筋混凝土结构,氯离子的侵入能破坏钢筋表面的钝化膜,增加混凝土的电导率,引发钢筋腐蚀。当钢筋表面氯离子浓度值达到临界氯离子浓度时,钢筋发生初始腐蚀。因此,涂层的主要防腐蚀效果与其能否有效抵抗氯离子对混凝土结构的侵入有关。混凝土

抵御氯离子渗透的能力主要通过氯离子的扩散系数来评价。因此为了准确评价防腐涂层的抗氯离子渗透阻力效果,根据 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》,采用抗氯离子渗透性试验评估带涂层混凝土试块抗氯离子渗透的效果。

一般抗氯离子渗透性采用 RCM 试验,但实际测试时发现,对于表面涂层混凝土,即使在外加电压(60 V)时,氯离子也很难渗透到混凝土内部,无法用 RCM 法对其氯离子扩散性能进行评价。因此,此处涂覆涂层的混凝土氯离子扩散系数测定统一采用电阻率法(NEL 法)^[1]。电阻率法具有试验周期短、可重复性好的优点,被广泛用于混凝土氯离子扩散系数的测定。

NEL 法试验时,在试件四周(即圆柱面)用环氧树脂密封,上端涂覆涂层,等涂层完全干燥后,放在压力<133 MPa 的干燥器中干燥 3 h,后在水中浸泡 18 h,最后将混凝土试块放在氯离子扩散系数 NEL 测定仪上测定。试验中,控制电压不超过 5 V,使涂层试验中氯离子扩散保持稳定。在电压的作用下,氯离子在普通混凝土中传输,随着氯离子流量变为常数,氯离子传输可以用 Nernst-Planck 方程来描述,在这一方程中,下游电槽中的氯离子总流量由扩散、迁移和对流 3 部分组成,即:

$$J = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{F}{RT} D_i C_i \frac{\partial V}{\partial x} + C_i u, \quad (1)$$

式中: J 为氯离子流量, mol/(s·m²); D_i 为氯离子扩散系数, m²/s; C_i 为氯离子浓度, mol/m³; $\partial C_i/\partial x$ 为氯离子浓度梯度, mol/m⁴; F 为法拉利常数, 96 500 C/mol; R 为气体普适常数, 8.31 J/(mol·K); T 是绝对温度, K; $\partial V/\partial x$ 为阳极与阴极之间的电场场度, V/m; u 为溶质的速率。

方程(1)中的第一项和第三项分别是扩散和对流对氯离子流量的贡献,由于混凝土处于饱和状态,溶质的速率可以忽略不计,而且在电场作用下,扩散部分的贡献很小也可以忽略。这样,方程(1)简化为:

$$J = \frac{F}{RT} D_i C_i \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (2)$$

则混凝土的氯离子扩散系数为:

$$D_i = \frac{RTI}{C_i F V} J. \quad (3)$$

该式为稳态电场作用下,测量氯离子扩散系数的理论表达式。

由于混凝土表面实施了附加防腐措施,由 NEL 试验所测得的是双层复合材料的总叠加氯离子扩散系数。对双层复合材料的微观结构进行分析,可获得表面层氯离子扩散系数的解析解,直接评价附加防腐方案,计算公式为:

$$\frac{d_b}{D_b} = \frac{d_2}{D_2} - \frac{d_c}{D_c}, \quad (4)$$

式中： d_b 为表面涂层厚度， D_b 为表面层氯离子扩散系数， d_2 为基体混凝土加涂层的总厚度， D_2 为总氯离子扩散系数， d_c 为基体混凝土厚度， D_c 为基体混凝土氯离子扩散系数。

最终，对获得的涂层氯离子扩散系数的试验结果进行对比分析，对不同附加防腐蚀方案的抗氯离子侵蚀性能进行评价，从中选取最优方案，作为混凝土附加防腐蚀的建议方案。

2 结果与讨论

涂层外观如图 2 所示。根据目测，涂层均无表面缺陷，表现均匀，表面无针孔、麻点、起瘤、气泡、毛刺、斑点、烧焦、暗影、阴阳面等弊病。混凝土试件涂覆涂料后其表面光滑、光泽度好，应涂部位完全被涂层覆盖，达到规定的色泽。混凝土试件涂覆硅烷后，在基材表面形成了一层均匀且致密的硅氧憎水膜。

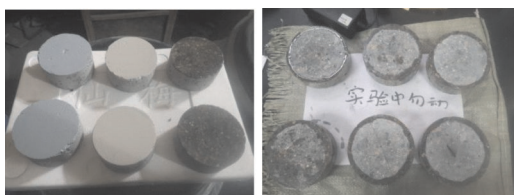


图 2 部分涂层的外观

2.1 涂料种类对涂层混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

NEL 法试验中，由于浓度差的存在，涂层氯离子迁移，随着扩散的进行，氯离子含量逐渐增大。由试验所测得的氯离子扩散系数如表 4 所列，表中总氯离子扩散系数平均值是取 3 个涂覆相同涂层试样的混凝土样品所测结果的平均值，表面层氯离子扩散系数是根据公式(4)计算得到的。

由表 4 可知，涂层对氯离子向混凝土内部的扩散具有有效的抑制作用，有涂层的混凝土试件的氯离子扩散系数明显低于无涂层的素混凝土试件的氯离子扩散系数，涂层对混凝土抗氯离子性能的提高作用明显。相同水胶比的情况下，3 种表面成膜型涂料的抗氯离子渗透效果提高作用相当，其表面层氯离子扩散系数比素混凝土提高 4 个等级；3 种渗透型涂层对混凝土抗氯离子性能的提高作用相当，其表面层氯离子扩散系数比素混凝土提高 2 个等级。试验表明：在腐蚀性环境中，对建筑物混凝土外表面施加涂层保护是非常必要的，表面成膜型涂料的抗氯离子侵蚀能力优于渗透型涂层，复合型涂层比其任何一种涂层的防护效果

都好，对较重要的海工构筑物的附加防腐蚀涂层可选用复合型。

表 4 涂层氯离子扩散系数

涂层类别	水胶比	总氯离子扩散系数平均值/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	涂层厚度/ μm	表面层氯离子扩散系数/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)
素混凝土		5.74×10^{-13}		5.74×10^{-13}
表面成膜型涂料	A	2.12×10^{-15}	305	1.29×10^{-17}
	B	2.69×10^{-15}	640	3.42×10^{-17}
	C	2.50×10^{-15}	403	2.01×10^{-17}
渗透型涂层	1	4.01×10^{-13}	300	7.01×10^{-15}
	2	3.38×10^{-13}	300	4.54×10^{-15}
	3	4.21×10^{-13}	300	8.13×10^{-15}
复合型涂层	D (2+B)	7.86×10^{-16}	940	1.46×10^{-17}
素混凝土		6.82×10^{-13}		6.82×10^{-13}
表面成膜型涂料	A	2.25×10^{-15}	305	1.37×10^{-17}
	B	3.01×10^{-15}	640	3.82×10^{-17}
	C	2.90×10^{-15}	403	2.33×10^{-17}
渗透型涂层	1	5.06×10^{-13}	300	1.00×10^{-15}
	2	3.92×10^{-13}	300	5.12×10^{-15}
	3	4.42×10^{-13}	300	6.79×10^{-15}

2.2 水胶比对涂层混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

水胶比决定了混凝土结构的孔隙特征，随着水胶比的增大，孔隙率增大，混凝土结构内部连通的毛细孔增多，直接导致混凝土结构的抗氯离子渗透能力下降。与此同时，混凝土中的水泥浆体与骨料的界面过渡区存在内部裂缝和连通孔隙，会进一步降低其抗氯离子渗透性能，因此如表 4 中水胶比为 0.450 的素混凝土比水胶比为 0.365 的素混凝土的氯离子扩散系数平均值大。

水胶比对涂层的阻隔有效性的测试结果略有影响。水胶比越小的混凝土试块越致密，在微电流的作用下，氯离子相对于较高水胶比的混凝土更难进入，因此水胶比为 0.365 的带涂层混凝土试块，所测得的氯离子扩散系数相对水胶比为 0.450 的带涂层混凝土试块略小。

3 结语

氯盐环境中，采用涂覆涂层的方法对混凝土结构的抗氯离子侵蚀性能的提高作用明显。涂层防护混凝土结构，虽然不能完全隔绝氯离子侵入混凝土中，但由于涂层的阻隔作用，氯离子侵入速度极慢，因此能够对混凝土结构提供良好的保护作用。

试验表明，在相同水胶比的情况（下转第 14 页）