

地聚物砂浆在港口水工结构修补中的应用

夏振兴, 汤铜锁

(天津港湾工程质量检测中心有限公司)

摘 要: 地聚物是一种通过碱激发剂激活铝硅钙基工业废料而形成的三维网状绿色环保材料, 具有卓越的力学性能和耐久性, 成为海洋、工业及高腐蚀环境下工程应用的理想选择。针对传统修补材料存在的施工效率低、耐久性不足及环境污染等问题, 以粉煤灰和矿渣为主要原料, 通过优化配合比设计, 研制了港口水工结构用地聚物砂浆。通过对比试验, 系统地评估了该材料的工作性能、力学性能及耐久性, 并与传统材料进行性能指标分析。证实了地聚物砂浆兼具高强度、高耐久及施工便捷等特点, 可有效解决港口水工结构因海水侵蚀、钢筋锈蚀导致的病害问题, 具有广阔的工程应用前景。

关键词: 地聚物; 港口水工结构; 修补材料; 工作性能; 力学性能; 耐久性

0 引言

地聚物混凝土(Geopolymer Concrete)是一种通过碱激发剂激活含硅铝材料而制成的环保建筑材料。作为一种低碳排放、资源化利用的创新材料, 地聚物混凝土在可持续建筑领域引起了广泛关注。其研究起源可追溯至 20 世纪 70 年代, Davidovits 提出使用工业副产品制备地聚物, 旨在替代传统水泥以减少碳排放^[1]。地聚物的主要优势在于显著降低温室气体排放, 并有效利用工业废料, 推动资源的循环利用。与传统硅酸盐水泥相比, 地聚物的生产过程能够减少超过 80% 的 CO₂ 排放, 每生产 1 t 地聚物可减少约 0.6 t CO₂ 的排放^[2-3]。此外, 地聚物的主要原材料如粉煤灰、矿渣及建筑废弃物等, 均为工业副产品, 能够有效缓解固体废弃物堆积问题。在使用寿命、耐久性和成本效益等方面, 地聚物也展现了较强的竞争力, 已成为低碳建筑材料领域的重要研究方向。

1 传统港口水工结构修补材料的问题和不足

港口水工建筑物由于长期暴露于特殊的环境条件, 特别是海水和潮湿环境, 容易受到钢筋腐蚀的影响, 导致锈胀裂缝和层裂的发生, 从而影响结构的安全性、使用性和耐久性。传统的修补材料, 如立模浇筑混凝土、喷射混凝土和聚合物水泥砂浆等, 虽然在一定程度上能够解决这些问题, 但在耐久性、环保性及长期效能方面仍存在一定局限。立模浇筑混凝土需要较长的施工周期, 包括模板制作、安装、混凝土浇筑、养护等步骤,

会影响修补工程的进度。同时混凝土生产过程中会产生大量的粉尘和噪音污染, 水泥的生产也会排放大量的 CO₂, 对环境造成压力。传统喷射混凝土的回弹率较高, 一般在 30% 左右, 这会导致材料浪费和修补效果不佳。在凹凸不平有尖角和缝隙的地方喷射混凝土无法渗入, 导致喷层与原结构的黏结力较弱, 极易造成喷层的脱落。此外长期暴露在海水和潮湿环境中, 喷射混凝土也极易发生碳化、氯离子侵蚀等问题, 影响其耐久性。聚合物水泥砂浆的制备过程中需要添加有机聚合物, 增加了其生产成本, 同时聚合物作为一种有机高分子材料, 长期暴露在户外环境下容易受到紫外线、氧化等因素的影响而发生老化, 老化后的聚合物水泥砂浆性能会下降, 如黏结强度降低、抗渗性变差等。

2 地聚物在港口水工结构修补材料中的应用

地聚物材料不仅具有低碳环保特性, 其在力学、耐久性方面亦表现出优异的抗压强度、抗渗透性、抗冻融性和耐化学侵蚀性^[4-7]。研究表明, 地聚物的抗压强度通常在 20~80 MPa 之间, 部分高性能材料的抗压强度可超过 100 MPa, 远高于普通硅酸盐水泥。此外, 地聚物混凝土的低孔隙率和均匀孔结构使其具有优良的抗渗性, 能够有效减少水分的渗透, 并且其抗冻融性能在低温循环环境下表现稳定, 适合极端环境中的应用。在耐化学侵蚀方面, 地聚物混凝土表现出显著优势, 尤其在硫酸盐侵蚀环境中, 其强度保持率明显高

于传统混凝土。

目前，地聚物低碳材料已在建筑材料、交通设施抢修与维护、土木工程结构加固以及环境治理等多个领域得到应用。特别是在港口水工工程这一对高性能、高耐久性混凝土材料需求迫切的领域，地聚物混凝土凭借其卓越的性能表现，正逐渐成为该领域的焦点。广东省千里海堤达标工程中，地聚物混凝土的工作性能和力学性能均较优异，服役期间未发现骨料外露和蜂窝孔洞现象，施工效果良好；上海洋山深水港码头修补工程中，地聚物材料成功应用于浪溅区，经 3 a 海水浸泡后无钢筋锈蚀迹象^[8-9]。地聚物作为一种新型环保材料，拥有优异的力学性能和耐久性，是港口水工结构修补的理想选择，拥有广阔的发展空间和应用潜力。

3 原材及试验

以粉煤灰、矿渣为主要原料，以需修补的构件混凝土强度等级为 C50 为基本假设，进行研究和配合比设计，制备了一种适用于港口水工修补的地聚物砂浆。通过一系列性能试验，比较了地聚物砂浆与聚合物水泥砂浆的工作性能、力学性

能及耐久性，表明了该修补材料各项性能满足港口水工建筑物修补施工技术要求。

3.1 原材料

本研究所采用的原材料包括粉煤灰、矿渣、细骨料和碱激发剂。粉煤灰选用河北国华沧东发电有限责任公司提供的 F 类Ⅱ级粉煤灰，矿渣则选用沧州中铁装备制造材料有限公司的 S95 级矿渣。细骨料来源于河北唐山的机制砂，细度模数为 3.0，属于Ⅱ区中砂，表观密度为 2 730 kg/m³。碱激发剂由氢氧化钠和工业硅酸钠混合溶液组成，其中工业硅酸钠由郑州兴和乾材料有限公司生产，模数为 3.2，二氧化硅含量为 26.0%，氧化钠含量为 8.05%。氢氧化钠则选用片状工业用碱，纯度达到 99%。

按照此次研究选用的材料进行配合比设计，最终确定选用骨料与胶凝材料比为 1.0，粉煤灰与矿渣比为 2.0，模数为 1.6，水胶比为 0.40，为此次港口水工用地聚物修补材料配合比。同时通过添加硼砂作为缓凝剂，延长凝结时间，增强施工性能，通过膨胀剂改善其干缩特性，地聚物修补砂浆的配合比如表 1 所示。

表 1 港口水工用地聚物修补砂浆配合比

原材料	粉煤灰	矿渣粉	膨胀剂	机制砂	工业硅酸钠	氢氧化钠	水	kg
								硼砂
每 m ³ 用量	515	258	62	773	184	30	188	19

3.2 试验方法

地聚物混凝土的主要性能要求参考了 JTS/T 311—2023《港口水工建筑物修补加固技术规范》中对修补用混凝土和砂浆的相关规定，其中修补砂

浆的性能要求如表 2 所示，根据这些要求，本研究需要进行一系列的性能试验，主要包括工作性能、力学性能、耐久性等方面的测试，以满足工作需要。

表 2 修补砂浆性能指标

					MPa
7 d 抗压强度	28 d 抗压强度		28 d 抗折强度	28 d 抗拉强度	砂浆与老混凝土 28 d 黏结强度
≥30.0	比原构件强度等级提高一级，且不得低于 C30		≥6.5	≥3.5	不小于原混凝土抗拉强度标准值

1) 工作性能

混凝土及砂浆的流动性和凝结时间是施工可操作性的关键指标，控制地聚物砂浆的流动性和凝结时间，能够满足不同施工现场和施工工艺的需求。工作性能的试验主要通过 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法标准》和 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》进行测定。本文采用流动度测定仪测试地聚物混凝土的流动性，通过测定混凝土在测定仪上的扩展直径反映其流动

性能。凝结时间则通过贯入阻力法进行测定，这一方法能够有效反映地聚物砂浆的凝结特性，确保其施工过程中的适应性和可操作性。

2) 力学性能

力学性能是影响混凝土和砂浆结构安全性的关键因素。本文主要对地聚物砂浆的抗压、抗折、抗拉强度及其与老混凝土的黏结强度进行测试。相关试验依据《港口水工建筑物修补加固技术规范》进行测定。通过一系列力学性能检测，旨在评

估砂浆与原结构的结合力以及其在实际修补中的承载能力。

3) 耐久性

耐久性是地聚物混凝土在复杂环境下应用的一个重要考量因素。电通量作为衡量混凝土抗氯离子渗透能力的重要指标，能够直观反映其耐久性。试验按照 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土

试验检测技术规范》中电通量法进行测定。测试结果能够为地聚物砂浆作为港口水工建筑物修补材料提供可靠的耐久性评价，确保其在恶劣环境下的长期稳定性和使用效果。

4 试验结果及分析

通过一系列试验，对地聚物砂浆和聚合物水泥砂浆进行比对，各项性能试验结果见表 3。

表 3 修补材料试验结果汇总

修补材料	工作性能		力学性能					耐久性
	流动度/mm	凝结时间/min	7 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗折强度/ MPa	28 d 抗拉强度/ MPa	与老混凝土黏 结强度/MPa	56 d 电通量/C
地聚物砂浆	320	56	39.5	58.9	8.2	6.4	3.26	635
聚合物水泥砂浆	260	175	37.6	52.5	13.7	8.5	2.97	1 280

1) 工作性能

从流动度测试结果可以看出，地聚物砂浆的流动度为 320 mm，相较于聚合物水泥砂浆提高了 23.1%，表明其流动性较好，能够满足施工过程中的可操作性要求，具有较好的施工适应性，尤其是在复杂施工环境下，对于提高施工效率和减少施工难度具有重要意义。凝结时间的测试结果表明，地聚物砂浆的凝结时间为 56 min，与聚合物水泥砂浆凝结时间为 175 min 相比，大大缩短了凝结时间，可用于构件的快速修补，提升施工效率，减少工期延误。

2) 力学性能

从抗压强度测试结果来看，地聚物砂浆的 7 d 抗压强度为 39.5 MPa，28 d 抗压强度为 58.9 MPa。相较于聚合物水泥砂浆分别提高 5.1% 和 12.2%。抗压强度的提高，使构件能够承受更大的荷载，减少因压力导致的裂缝或坍塌风险，确保工程结构的稳定性和安全性。然而，在抗折强度及抗拉强度方面，地聚物砂浆的表现略显不足。其 28 d 抗折强度和抗拉强度分别为 8.2 MPa 和 6.4 MPa，相较于聚合物水泥砂浆分别降低了 40.1% 和 24.7%。地聚物砂浆与老混凝土的黏结强度达到 3.26 MPa，较聚合物水泥砂浆的 2.97 MPa 提高了 9.8%。这一结果表明地聚物砂浆与原有混凝土基材之间的黏结性能良好，有助于确保修补后结构的整体稳定性。在港口水工建筑物的修补中，黏结强度是衡量修补材料与原结构结合效果的关键指标。地聚物砂浆较强的黏结强度能够减少修

补过程中材料脱落或剥离的风险，提高修补效果的持久性。

3) 耐久性

电通量测试结果表明，地聚物砂浆 56 d 时电通量为 635 C，远低于聚合物水泥砂浆的 1 280 C。这是由于地聚物在形成过程中，其主要成分通过聚合反应相互连接，形成一种三维网络结构，这种结构中，孔隙的尺寸和数量相对较少，特别是连通孔隙很少，能较好地抵挡氯离子渗透，能够有效抵抗海水环境中的氯离子侵蚀。这对于港口水工建筑物的修补至关重要，能够有效延长修补结构的使用寿命，特别是在长期暴露于海洋环境中的修补材料具有重要的实用价值。

5 结语

在“双碳”目标驱动下，港口工程修补材料的绿色转型已成为水工结构可持续发展的重要课题。针对聚合物水泥砂浆施工周期长、耐久性不足及全生命周期碳排放高等固有缺陷，本研究聚焦地聚物材料的低碳特性与性能优势，通过原材料优选、配合比优化及多维度性能试验，系统评估地聚物修补砂浆的综合性能。

结果表明：相较于聚合物水泥砂浆，地聚物砂浆兼具优异的工作性能与快速凝结特性，可有效提升施工效率；其抗压强度与界面黏结强度提升显著，有效保障修补结构的力学稳定性；耐久性方面，地聚物砂浆对氯离子侵蚀的抵抗能力明显优于传统材料，可在海水环境中展现出更长的服役寿命。然而，地聚物砂浆在实际应用中仍面

临一些挑战。如抗折强度和抗拉强度的短板,限制了其在部分对材料韧性要求较高场景中的应用,后续需通过改进材料配方、添加合适增强纤维等方法加以优化。未来,地聚物材料有望在更多港口水工结构修补工程中得到广泛应用,推动港口基础设施的可持续发展。

参考文献:

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1991, 37(8): 1633–1656.
- [2] PALOMO A, MACIAS A, BLANCO M, et al. Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers [C]// *Proceedings of the 9th international congress on the chemistry of cement*. 1992: 505–511.
- [3] KONG D L Y, SANJAYAN J G, SAGOE-CRENTSIL K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1583–1589.
- [4] 任进阳. 粉煤灰地聚物混凝土的力学性能研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [5] 范飞林, 许金余, 李为民, 等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物混凝土的基本性能研究 [J]. *混凝土*, 2008(6): 58–61.
- [6] 贺亮. 碱激发矿渣粉煤灰水泥抗干湿循环及耐腐蚀性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [7] 詹疆淮, 李宏波, 傅博, 等. 不同碱当量、粉煤灰和矿渣掺量对碱激发粉煤灰-矿渣地聚物力学性能及微观结构的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12218–12224.
- [8] 李兆恒, 陈晓文, 杨永民, 等. 无机聚合物混凝土的制备及其在海堤建设中的应用 [J]. *广东水利水电*, 2018(11): 102–105.
- [9] 杜玉娇. 碱激发混凝土中的钢筋锈蚀研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.