

水运工程高性能混凝土耐久性提升技术综述与展望

张 喆

连云港科谊工程建设咨询有限公司 江苏 连云港 222000

摘要：水运工程长期处于复杂严酷的海洋或河口环境中，面临氯离子侵蚀、硫酸盐腐蚀、冻融循环、碳化及生物侵蚀等多重劣化因素的耦合作用，对混凝土结构的耐久性提出了极高要求。高性能混凝土（High-Performance Concrete, HPC）因其优异的力学性能和致密微观结构，已成为现代水运工程的关键材料。本文系统综述了水运工程中影响HPC耐久性的主要环境因素及其作用机理，重点阐述了当前提升HPC耐久性的关键技术路径，包括原材料优化、配合比设计、矿物掺合料与化学外加剂应用、纤维增强、表面防护及智能养护等。同时，探讨了纳米改性、自修复混凝土、低碳胶凝体系等前沿发展方向，并对未来水运工程HPC耐久性研究的重点方向提出展望，旨在为提升我国水运基础设施的服役寿命与可持续发展提供理论支撑与技术参考。

关键词：水运工程；高性能混凝土；耐久性；氯离子侵蚀；矿物掺合料；自修复

引言

随着“交通强国”和“海洋强国”战略的深入推进，我国水运基础设施建设规模持续扩大，港口、码头、跨海大桥、防波堤、船闸等重大工程不断涌现。这些结构物长期服役于高湿、高盐、干湿交替、冻融循环等极端海洋或河口环境中，其耐久性直接关系到工程安全、运营效率与全寿命周期成本。传统普通混凝土在上述环境中易发生钢筋锈蚀、开裂剥落、强度退化等问题，导致结构提前失效，维修加固费用高昂，甚至引发安全事故。高性能混凝土（HPC）以其低水胶比、高密实度、高强度及优异的体积稳定性，显著提升了混凝土抵抗环境侵蚀的能力，已成为现代水运工程结构设计的首选材料。然而，HPC并非“万能材料”，其在极端耦合环境下的长期耐久性仍面临挑战。例如，低渗透性虽可延缓氯离子侵入，但一旦突破临界阈值，钢筋锈蚀速率可能更为剧烈；高胶凝材料用量带来的水化热问题亦可能诱发早期裂缝，成为侵蚀介质的快速通道。因此，深入理解水运工程环境下HPC的劣化机制，系统梳理并评估现有耐久性提升技术的有效性与适用性，并前瞻性地探索新型耐久性增强策略，具有重要的理论价值与工程意义。

1 水运工程环境对HPC耐久性的主要挑战

1.1 氯离子侵蚀

海水及海风中大量氯离子（ Cl^- ），是导致钢筋锈蚀的最主要诱因。 Cl^- 通过混凝土孔隙扩散或随水分迁移进入内部，当其在钢筋表面浓度超过临界值（通常为水泥质量的0.2%~0.4%）时，会破坏钢筋钝化膜，引发电化学腐蚀。腐蚀产物体积膨胀（可达原体积的2~6倍），产生内应力，导致混凝土保护层开裂、剥落，形成恶性

循环^[1]。HPC虽能有效降低 Cl^- 扩散系数（通常比普通混凝土低1~2个数量级），但在裂缝存在或长期暴露下，其防护能力仍会逐渐衰减。

1.2 硫酸盐侵蚀

河口、地下水及某些工业废水中常含有硫酸根离子（ SO_4^{2-} ）。 SO_4^{2-} 与水泥水化产物中的铝酸钙反应生成钙矾石（AFt）或碳硫硅钙石（TSA），导致体积膨胀，引起混凝土开裂、酥松和强度损失。此外，镁离子（ Mg^{2+} ）可与氢氧化钙反应生成疏松的氢氧化镁，进一步削弱基体。

1.3 冻融循环与盐冻破坏

在寒冷地区，混凝土孔隙水结冰膨胀（体积增加约9%），产生静水压力和渗透压力，反复冻融导致微裂纹扩展、表面剥落。若水中含有盐分（如NaCl），则会加剧破坏：一方面降低冰点，延长液相存在时间，增加可冻水含量；另一方面盐结晶产生的结晶压力叠加冰胀压力，造成更严重的“盐冻剥蚀”。

1.4 碳化作用

大气中的 CO_2 通过混凝土孔隙扩散，与 $Ca(OH)_2$ 反应生成 $CaCO_3$ ，降低混凝土碱度（pH值降至9以下）。当碳化深度达到钢筋表面时，钢筋钝化膜失稳，即使无 Cl^- 存在也可能发生锈蚀。虽然HPC碳化速度较慢，但在干湿交替区域仍不可忽视。

1.5 生物侵蚀与磨损冲刷

海洋生物（如藤壶、牡蛎）附着分泌有机酸腐蚀混凝土表面；微生物代谢产物（如硫化氢氧化生成硫酸）亦可造成化学侵蚀。此外，水流携带泥沙对结构表面的长期冲刷磨损，会破坏保护层，加速侵蚀介质侵入。

2 高性能混凝土耐久性提升关键技术

2.1 原材料优选与配合比优化

首先,水泥应优先选用C₃A含量低于8%的硅酸盐水泥或专门的抗硫酸盐水泥,以降低硫酸盐侵蚀风险;对于大体积结构如承台、沉箱,则宜采用中热或低热水泥以控制水化温升,减少温度裂缝。骨料方面,必须严格控制含泥量、泥块含量及云母、有机物等有害杂质,选用级配良好、坚固洁净的天然或机制骨料。若使用海砂,必须经过充分淡化处理,确保水溶性氯离子含量不超过0.03%(以水泥质量计),并辅以阻锈剂等补偿措施。水胶比是影响密实度的核心参数,通常控制在0.35以下,但过低水胶比会加剧自收缩和开裂倾向,因此必须依赖高效减水剂实现工作性与低用水量的平衡。在此基础上,通过优化胶凝材料总量、砂率及浆骨比,可在保证泵送与密实成型的前提下,最大限度提升混凝土的抗渗性与体积稳定性。

2.2 矿物掺合料的应用

矿物掺合料的引入其作用不仅在于部分替代水泥以降低水化热和成本,更在于通过火山灰反应和微集料填充效应,显著改善微观结构。粉煤灰,尤其是I级灰,能有效填充毛细孔隙,降低渗透性,并延缓水化放热,适用于大体积水工结构;但其早期活性较低,需加强早期养护。粒化高炉矿渣粉在高掺量(50%~70%)下可大幅降低氯离子扩散系数,显著提升抗硫酸盐能力,且生成的C-S-H凝胶更为致密;然而,其对碳化的敏感性要求在设计中合理控制掺量或与其他掺合料复合使用^[2]。硅灰因其极细的粒径(纳米级)和高活性,能填充最细微孔隙,使混凝土近乎“不透水”,极大提升抗氯离子渗透性和强度,但其高需水量和强收缩性必须通过高效减水剂和充分湿养护加以调控。偏高岭土作为高活性铝硅酸盐,反应迅速,可有效提升早期强度与抗渗性。实践中,常采用双掺(如粉煤灰+硅灰)或三掺(粉煤灰+矿渣+硅灰)技术,通过组分间的协同效应,在工作性、强度发展、体积稳定性和耐久性之间取得最佳平衡。

2.3 高效化学外加剂

化学外加剂是实现高性能混凝土设计目标不可或缺的“调节器”。聚羧酸系高性能减水剂(PCE)凭借其高减水率(可达30%以上)和可设计的分子结构,使低水胶比下的高流动性成为可能,从而在不牺牲工作性的前提下提升密实度。引气剂则通过在拌合过程中引入大量均匀、稳定、封闭的微小气泡(直径20~200μm),为冻结水提供膨胀空间,显著提升抗冻性,尤其适用于寒冷地区水运工程,其含气量通常需控制在4%~6%之间,并通过气泡间距系数评价其有效性。此外,阻锈剂如亚硝酸

钙或有机胺类化合物,可通过提高氯离子临界浓度或在钢筋表面形成保护膜,延缓锈蚀启动,常作为辅助措施用于高风险区域如浪溅区。这些外加剂的合理选择与复配,是实现高性能混凝土多功能集成的关键。

2.4 纤维增强技术

纤维的掺入主要通过桥接微裂缝、抑制裂缝扩展来提升混凝土的抗裂性与韧性,从而间接增强耐久性。钢纤维能显著提高混凝土的抗冲击、抗疲劳和抗弯拉性能,适用于承受重载或冲击的码头面板、桩帽等部位;合成纤维(如聚丙烯、PVA)则因成本低、分散性好,广泛用于控制塑性收缩裂缝,防止早期水分蒸发过快导致的表面龟裂;玄武岩纤维和碳纤维兼具耐腐蚀与增强效果,但成本较高,多用于特殊功能需求区域。值得注意的是,纤维掺量需经过优化,过量不仅会降低工作性和泵送性能,还可能因团聚形成薄弱界面。因此,纤维类型、长度、掺量及与基体的界面粘结性能需综合考量,以实现最佳增韧与抗裂效果。

2.5 表面防护技术

即便本体混凝土性能优异,表面防护仍是抵御极端环境侵蚀的最后一道防线,尤其在浪溅区、潮差区等高侵蚀风险区域。渗透型防护剂如硅烷/硅氧烷类,因其小分子特性可渗入混凝土表层3~10mm,与内部硅羟基反应形成憎水层,有效阻隔液态水及溶解其中的氯离子侵入,同时保持水蒸气透过性,避免内部湿气积聚,是目前应用最广泛的长效防护技术。涂层系统如环氧、聚氨酯或聚脲,则通过形成连续物理屏障隔绝环境介质,但对基面处理要求极高,且存在老化、起泡、剥离等风险,需定期维护。对于已建结构或高风险新建工程,阴极保护技术(牺牲阳极或外加电流)可主动抑制钢筋电化学腐蚀,是保障结构超长服役寿命的有效手段。表面防护应根据工程部位、环境等级及经济性进行系统选型,并与本体耐久性设计协同实施。

2.6 智能养护与施工质量控制

高性能混凝土对养护条件高度敏感,充分且及时的湿养护是保证其水化充分、减少收缩裂缝、发挥设计耐久性的关键。规范要求湿养护时间不少于7天,理想情况下应达14天。然而,在大型水运工程现场,尤其海上平台或偏远码头,持续洒水覆盖难以实现。此时可采用成膜型养护剂减少水分蒸发,或引入内养护技术——如掺入预湿轻质陶粒或高吸水性树脂(SAP),在内部缓慢释放水分,补偿自干燥收缩,有效抑制早期微裂缝^[3]。对于大体积混凝土结构,必须实施智能温控措施,如埋设冷却水管、覆盖保温毯,将内外温差控制在25℃以内,防止

温度裂缝。此外,施工过程中的振捣密实度、浇筑连续性、模板密封性等细节,直接决定混凝土的均匀性与缺陷数量,必须通过严格的质量管理体系予以保障。唯有将材料设计、施工工艺与养护措施一体化管控,方能确保高性能混凝土的耐久性潜力在实际工程中得以兑现。

3 前沿技术与未来展望

3.1 纳米改性技术

纳米材料因其超高比表面积和独特物理化学性质,为高性能混凝土微观结构调控提供了新维度。纳米二氧化硅(nano-SiO₂)可加速水泥水化,填充纳米级孔隙,显著提升强度与抗渗性;纳米二氧化钛(nano-TiO₂)在光照下具有光催化活性,可分解表面有机污染物,赋予混凝土自清洁与空气净化功能,减少生物污损;碳纳米管与石墨烯则以极低掺量即可大幅提升力学性能、导电性及抗裂韧性,后者还可用于构建自感知混凝土结构。然而,纳米材料在水泥基体中的均匀分散仍是技术难点,易发生团聚而削弱效果;同时,其高昂成本与潜在环境健康风险也限制了大规模应用。未来研究需聚焦于高效分散技术、表面改性及生命周期安全性评估,推动纳米改性从实验室走向工程实用。

3.2 自修复混凝土

自修复混凝土旨在模仿生物体损伤愈合机制,赋予材料在微裂缝出现后自主修复的能力,从而从根本上延长结构寿命。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术将产脲酶细菌及其营养源封装于混凝土中,当裂缝引入水分和氧气时,细菌激活并催化尿素水解,生成碳酸根与钙离子结合形成方解石结晶,封堵裂缝。微胶囊或vascular管网系统则将修复剂(如环氧树脂)预先嵌入基体,裂缝扩展时破裂释放修复剂实现粘结。此外,形状记忆合金或聚合物可通过热刺激恢复形变闭合裂缝。尽管这些技术在实验室中展现出良好修复效果,但其修复效率、多次修复能力、与主体材料的长期相容性以及经济可行性仍是工程化应用的主要障碍。未来需发展高效、低成本、环境友好的修复体系,并建立标准化评价方法。

3.3 低碳与可持续胶凝体系

一方面,可通过最大化利用工业副产品如粉煤灰、矿渣粉,构建高体积掺合料HPC体系,在保证性能的同时大幅减少熟料用量;另一方面,碱激发胶凝材料(AAMs)以矿渣、粉煤灰等为原料,通过碱性激发剂(如水玻璃)反应形成类沸石或N-A-S-H凝胶,不仅碳足迹低,且在某些性能(如抗硫酸盐性)上优于传统水泥^[4]。此外,碳化养护技术利用CO₂对预制构件进行早期养护,既实现碳固定,又提升早期强度。然而,这些新型胶凝体系在海洋环境下的长期耐久性,特别是与钢筋的相容性、抗氯离子渗透机制等,仍需系统研究与长期暴露验证。

4 结语

水运工程的严酷服役环境对高性能混凝土的耐久性提出了严峻挑战。通过原材料优选、多元胶凝体系设计、高效外加剂应用、纤维增强、表面防护及精细化施工养护等综合技术,可显著提升HPC抵抗氯离子侵蚀、硫酸盐腐蚀、冻融破坏等劣化作用的能力,保障重大水运基础设施的安全与长寿命运行。建议未来研究重点聚焦于:(1)多因素耦合作用下HPC劣化机理的深化;(2)自修复、纳米改性等前沿技术的工程适用性与可靠性验证;(3)建立基于性能的耐久性设计新方法 with 全寿命成本评价体系;(4)推动绿色低碳HPC标准规范的制定与应用。唯有持续创新与系统集成,方能筑牢我国迈向海洋强国的“蓝色基石”。

参考文献

- [1]陈泽鑫.高性能混凝土配合比设计与性能研究[J].佛山陶瓷,2025,35(11):27-29.
- [2]张琛.水运工程高性能混凝土质量控制[J].科技创新,2019,(24):121-122.
- [3]张兴富.高性能混凝土对建筑耐久性的影响分析[J].石材,2025,(10):58-60.
- [4]李浩.试论港口工程中高性能混凝土施工质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2019,(10):114.