

海水海砂混凝土氯离子固化的研究进展

薛淇超¹, 葛树奎², 朱林³, 王大治³, 王学志^{1*}

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²辽宁省建筑设计研究院, 辽宁 沈阳

³营口市交通技术工程有限公司, 辽宁 营口

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月15日; 发布日期: 2026年6月11日

摘要

随着国家经济发展对建筑行业的需求, 混凝土的大量使用导致河砂资源不断减少。因此考虑另一种建筑用砂变得迫在眉睫, 由于地球有着极大的海洋面积, 所以将海水海砂作为河水河砂的替代品成为了现在大热的研究方向。本文以海水海砂混凝土为研究对象, 总结国内外学者对于纳米材料(纳米SiO₂)、工业副产掺合料(粉煤灰、矿粉)的特性研究。分析不同单一掺合料对海水海砂混凝土氯离子固化及力学性能的影响, 并对未来海水、海砂在混凝土应用研究进行展望。

关键词

工业副产掺合料, 纳米材料, 海水海砂混凝土, 氯离子固化

Research Progress on Chloride Ion Immobilization in Seawater-Sand Concrete

Qichao Xue¹, Shukui Ge², Lin Zhu³, Dazhi Wang³, Xuezhi Wang^{1*}

¹College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Liaoning Architectural Design and Research Institute Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenyang Liaoning

³Yingkou Transportation Technology Engineering Co., Ltd., Yingkou Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 15, 2026; published: June 11, 2026

Abstract

With the increasing demand for the construction industry in national economic development, the extensive use of concrete has led to a continuous decrease in river sand resources. Therefore, it is urgent to consider an alternative type of construction sand. Given the vast ocean area of the Earth, using seawater sand as a substitute for river sand has become a popular research direction. This

*通讯作者。

文章引用: 薛淇超, 葛树奎, 朱林, 王大治, 王学志. 海水海砂混凝土氯离子固化的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(6): 971-976. DOI: 10.12677/aep.2026.166097

paper focuses on seawater sand concrete, summarizing the research conducted by scholars both domestically and internationally on the properties of nanomaterials (nano-SiO₂) and industrial by-product admixtures (fly ash, slag). It analyzes the impact of different single admixtures on the chloride ion solidification and mechanical properties of seawater sand concrete, and provides an outlook on future research on the application of seawater and seawater sand in concrete.

Keywords

Industrial By-Product Admixture, Nanomaterial, Seawater-Sand Concrete, Chloride Ion Immobilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在过去的几十年里,随着国家经济的迅猛增长,对混凝土的需求呈现出急剧上升的态势。目前河砂仍然是混凝土细骨料的主要材料。近年来,由于开采活动过度,我国面临了一系列环境问题,如淡水资源的大量流失、河床决堤等。因此,如果我们能最大限度使用海水资源,不仅有利于环境的和谐发展,也是实现可持续发展的重要战略[1]。海水海砂混凝土之所以未能得到广泛应用,是因为海水海砂中携带大量的氯盐、硫酸盐、镁盐等成分。其中氯离子会侵蚀混凝土中的钢筋,破坏其表面的保护层,导致钢筋生锈。钢筋锈蚀不仅损害钢筋本身,还会因膨胀作用在混凝土中产生微小裂缝,严重影响其耐久性[2]。因此这极大地限制了海水海砂混凝土的广泛应用。本文主要综述纳米 SiO₂ 等复合掺合料对海水海砂混凝土抗氯离子侵蚀及耐久性的提升,以及微观结构方面的最新研究进展,分析海水-海砂混凝土现存的研究问题与不足,并对未来海水、海砂在混凝土应用研究进行展望。

2. 研究背景及意义

2.1. 研究海水海砂混凝土的意义

国家“十三五”规划、粤港澳大湾区建设等提出加快建设海洋强国的战略目标,与之相关的是海洋平台、海港码头、跨海通道、人工岛等海工及近海工程日益增多。然而,我国可持续发展需要建立在资源的可持续利用和良好的生态环境基础上。目前普通混凝土的巨量需求和使用已明显影响了我国的可持续发展[3]。这主要是因为制备普通混凝土需要大量的砂石,而过度开采河砂以满足混凝土的需求已导致我国许多河床岸出现了严重的生态环境问题,也致使大量的内河桥梁基础破坏。

目前,河砂资源日益匮乏和供不应求的现象导致了其市场价格节节攀升,导致了普通混凝土在沿海地区应用的局限性。与河砂相比,海砂具有资源储量大、开采难度小、就地取材运输成本低等优势,利用海砂配制混凝土,经济性优越。实际上,在英国、日本和香港等许多淡水资源比较稀缺的国家和地区已经普遍使用海砂,并有十分成熟的淡化工艺[4]。根据日本行业协会的统计,2011年日本国内海砂的消耗量占细骨料总量的12.2%,其中有7个县海砂的使用比例高达90%以上[5]。这说明了在采取了妥当的淡化技术或添加阻锈剂后,即使大量使用海砂也不会造成混凝土的质量事故,体现了利用海砂的可靠性和应用价值。此外,国内20世纪80年代初就开始小规模海砂的开采,到上世纪90年代中期到达高潮。以烟台市为例,至1996年沿海矿产采集处达到50多处,开采量达到600万吨[6]。

2.2. 氯离子侵蚀对海水海砂混凝土的影响

海水中主要含有的盐类物质有 NaCl、MgCl₂、MgSO₄、K₂SO₄ 和 Na₂CO₃ 等，其中 NaCl 为最主要的成分，海水中的盐类成分及含量会随各地不同而有一些细微的差异[7]。表 1 所示为部分港口海岸海水的化学成分及含量[8]。海水中自身携带的大量氯离子会快速渗透进入混凝土内部，突破钢筋表面的碱性钝化膜，引发钢筋电化学锈蚀，锈蚀产物体积膨胀会导致混凝土保护层开裂、剥落，进一步加速氯离子、水分与氧气侵入，形成恶性循环；同时氯离子持续侵蚀还会降低混凝土自身密实度与结构耐久性，削弱构件承载能力，最终大幅缩短海工混凝土结构的使用寿命，是海水海砂混凝土最主要、最致命的劣化因素。

与河砂相比，海砂具有粒型好、细度均匀、含泥量低、工作性能优良的特点，这主要是由于由海水冲刷、滚动、碰撞、打磨而成的，海砂的成分除二氧化硅之外，还有少量的氯离子、长石、钙、镁和云母等等。其中的氯离子和硫酸根离子易对钢筋造成腐蚀作用，而且海砂中的钙物质容易与酸发生反应，产生泡状反应腐蚀海砂。此外，海砂的孔隙率大于河砂，因此二者在力学性能方面也存在差异。不同的海域所产出的海砂成分存在差异，表 2 为我国不同海域的海砂化学成分及含量[9]。

Table 1. Presents the chemical composition of seawater from selected ports

表 1. 为部分港口海水化学成分

港口名称	质量浓度/(mg/L)					pH 值
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	总盐	
秦皇岛	1174	387	2372	17,339	31,330	7.9
大连	1102	408	2171	15,900	28,729	8.5
蓬莱	1093	384	2167	15,775	28,503	8.4
天津	1156	482	2489	16,842	30,420	7.9
烟台	1050	437	2463	15,450	28,620	7
连云港	1159	397	2289	10,700	30,173	8
青岛	1445	/	2400	16,000	29,040	8
厦门	1172	/	2140	15,440	/	8
湛江	800	/	2198	/	/	7.7
北仓	803	258	168	11,760	21,250	8.1
锦州	963	264	2014	14,541	/	8.1

注：Na⁺、K⁺、Sr⁺、Br⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 等离子对水泥水化作用影响不大故不多叙述。

Table 2. Presents the composition of sea sand from selected regions

表 2. 为部分地区海砂的成分

地区	海域名称	质量分数%	
		Cl ⁻	贝壳含量
青岛	黄海	0.150	2.20
珠江口	南海	0.027	2.0~30.0
锦州	渤海	0.062~0.085	1.12
舟山	东海	0.1069	8.2

综上所述,海水和海砂中存在大量的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等离子,若海砂含贝壳量高的话还容易受到 Ca^{2+} 离子的影响,使用海水和海砂制备混凝土会导致大量氯离子在其内部扩散,使混凝土结构耐腐蚀性、耐久性下降[10]。这些离子的存在也可能在水泥水化、凝结、以及建筑物使用过程中造成影响[11],导致发生不可逆转的破坏。虽然目前大部分研究结果显示海水淡化后可以作为混凝土的原材料使用,但是其耗费的成本巨大增加。因此,氯离子的固化对海水海砂混凝土的广泛应用起着至关重要的作用。

3. 单一掺合料对海水海砂混凝土氯离子固化特性分析

氯离子固化是一种有效降低自由氯离子危害的途径,通过物理吸附,化学结合和高效阻迁的方式,使混凝土内部的自由氯离子含量降低同时防止氯离子接触钢筋表面,最终消除混凝土内部的自由氯离子造成的“内腐蚀”[12]。大量研究证明,单一掺合料如纳米 SiO_2 、粉煤灰等副产掺合料对海水海砂混凝土抗氯离子侵蚀及耐久性有所提升。因此,本工作对不同单一掺合物对海水海砂混凝土氯离子固化、力学性能以及耐久性能的影响进行分析。

3.1. 掺合粉煤灰对海水海砂混凝土氯离子固化分析

作为应用最广泛的工业副产掺合料,粉煤灰提升海水海砂混凝土氯离子固化性能已得到大量试验验证,其作用机制主要依靠火山灰反应与物理填充。孙丛涛等[13]通过试验发现,粉煤灰中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应,生成大量水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,该凝胶的多孔网络结构可通过物理吸附作用固持氯离子,同时反应生成的水化铝酸钙能与氯离子结合形成稳定的 Friedel's 盐,显著提升体系氯离子结合容量。

在龄期方面,粉煤灰还显著提升海水海砂混凝土的后期强度。肖建庄等[3]的研究发现,粉煤灰掺量为 30% 的混凝土,7 d 抗压强度较基准组低 5%~8%,但 28 d 抗压强度已接近基准组,90 d 抗压强度则较基准组高 15% 以上。Cheewaket 等[14]的长期海洋暴露试验进一步证实,粉煤灰混凝土的氯离子固化能力随龄期延长持续增强,服役 10 年后仍能维持优异的抗氯离子侵蚀性能。

粉煤灰的掺量与预处理方式对固化效果也起到提升作用。吕周岭等[12]的研究表明,经预处理的粉煤灰可优化颗粒级配与活性激发程度,其氯离子固化效率较普通粉煤灰提升 15%~20%,当粉煤灰掺量控制在 30%~40% 时,固化效果与混凝土工作性达到最佳平衡。

3.2. 掺合矿粉对海水海砂混凝土氯离子固化分析

矿粉作为高活性掺合料,凭借其丰富的活性氧化铝与超细颗粒特性,在氯离子固化中展现出独特优势,其作用机制以化学结合与物理阻隔为主。沈均等[15]的研究指出,矿粉中的活性氧化铝组分可加速 Friedel's 盐生成反应,相较于粉煤灰,矿粉体系中 Friedel's 盐的生成速率提升 30% 以上,同时其超细颗粒可填充混凝土内部孔隙,切断氯离子迁移通道,使混凝土密实度显著提高。此外,矿粉的水化热较低,可减少混凝土内部温度应力裂缝,间接降低氯离子渗透风险。

矿粉在力学性能的提升机制与粉煤灰类似,但早期活性更突出。在水泥水化初期,矿粉中的活性组分可与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 快速反应,生成 C-S-H 凝胶与水化铝酸钙等产物,其反应速率较粉煤灰快 30% 以上。此外,矿粉生成的水化产物对氯离子具有较强的结合能力,可减少氯离子对钢筋与水泥石的侵蚀,间接保障力学性能的长期稳定[16]。沈均[15]的试验表明,矿粉掺量为 35% 的海水海砂混凝土,28 d 抗压强度达到 46.8 MPa,较基准组提升 28%,同时弹性模量提升 22%,显著优于单一粉煤灰体系。王冲等[17]的研究发现,掺加 30% 矿粉的海水海砂混凝土,水化热峰值较基准组降低 25%,温度裂缝宽度减少 60%,28 d 抗压强度因裂缝减少额外提升 5%~8%。在海洋侵蚀环境中,矿粉的加入使混凝土力学

性能衰减速率显著降低。

3.3. 掺合纳米 SiO₂ 对海水海砂混凝土氯离子固化分析

纳米材料凭借其高比表面积与高反应活性，成为优化水泥基材料氯离子固化性能的新型改性剂，其中纳米 SiO₂ 的应用研究最为系统深入，图 1 为纳米 SiO₂ 在电镜下的微观结构。吕周岭等[12]通过试验证实，纳米 SiO₂ 可加速水泥水化进程，促进 C-S-H 凝胶生成并细化其微观结构，显著提升凝胶对氯离子的物理吸附能力，当纳米 SiO₂ 掺量为 1%~3% 时，水泥-粉煤灰复合体系的氯离子固化能力达到最优。邱泽辉[18]的研究进一步发现，纳米 SiO₂ 可有效填充水泥石纳米级孔隙，减少氯离子传输路径，同时提高混凝土密实度，使氯离子扩散系数降低 30% 以上，显著提升抗氯离子侵蚀能力。

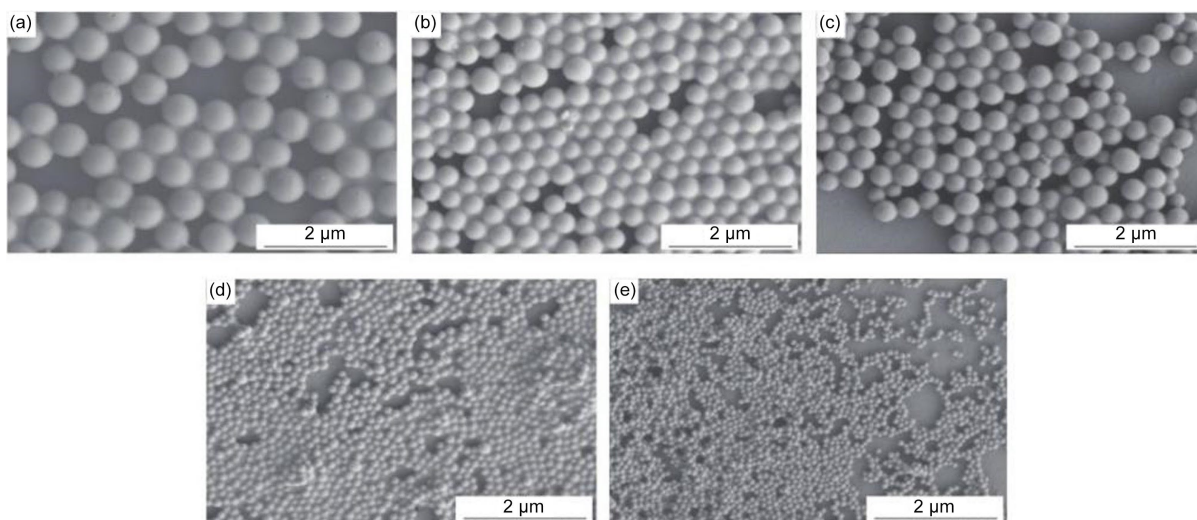


Figure 1. Microstructure of nano-SiO₂ under electron microscopy

图 1. 纳米 SiO₂ 电镜下微观结构

在力学性能方面，纳米 SiO₂ 可改善骨料与水泥石的界面过渡区性能，减少界面处的孔隙与微裂缝，增强界面粘结强度，从而提升混凝土整体力学性能[19]。邱泽辉[18]的研究也证实，纳米 SiO₂ 在海水海砂混凝土的抗压强度与抗折强度均有显著提升，且耐久性指标同步优化，实现了强度与耐久性的协同提升。

纳米 SiO₂ 与粉煤灰的复掺体系可进一步实现力学性能与耐久性的协同提升。毕鹏鹏[20]的研究表明，纳米 SiO₂ 可有效改善大掺量粉煤灰水泥砂浆的早期强度不足问题，当纳米 SiO₂ 掺量为 2%、粉煤灰掺量为 50% 时，水泥砂浆 3d 抗压强度提升 30% 以上，同时氯离子固化能力显著增强。戚丹等[21]的试验也发现，复掺粉煤灰和纳米 SiO₂ 的混凝土，其抗压强度、抗渗性与氯离子固化率均较单一掺合料体系有明显提升，证实了复合改性体系的技术优越性。

4. 总结与展望

通过对国内外专家学者研究结果做分析总结，得出以下结论：

海水海砂作为建筑原材料的替代资源，其在混凝土工程中的应用具有显著资源效益与环境效益，氯离子固化与力学性能优化是实现其规模化应用的核心技术瓶颈。现有研究证实，通过粉煤灰、矿粉等矿物掺合料与纳米二氧化硅的复合改性，可有效提升混凝土的氯离子固化能力与力学性能，实现耐久性与力学性能的协同优化。未来需进一步强化微观机制研究、优化复合改性体系、开展长期服役性能试验，推动海水海砂混凝土的技术成熟与工程应用，为海洋工程建设与资源可持续利用提供技术支持。

当前研究已明确矿物掺合料(粉煤灰、矿粉)与纳米材料(纳米二氧化硅)是提升海水海砂混凝土氯离子固化性能与力学性能的核心技术手段:粉煤灰与矿粉通过火山灰反应生成稳定水化产物实现氯离子固化,纳米二氧化硅则通过细化微观结构、加速水化进程实现性能强化,两者复掺可形成显著协同效应;氯离子固化性能与力学性能存在内在关联,优化微观结构是实现两者协同提升的核心关键;海水海砂的合理利用可通过掺合料改性实现性能达标,为海水海砂混凝土的工程应用提供了宏观参考。

尽管现有研究取得阶段性进展,但仍存在诸多不足:一是氯离子固化机制的精细化研究欠缺,现有成果多集中于宏观性能表征,对纳米尺度下氯离子与水化产物的结合机制、长期服役过程中固化氯离子的稳定性演变研究较少;二是复合改性体系的优化设计缺乏统一标准,不同掺合料与纳米材料的配比参数需结合具体工程场景调整,通用性较差;三是长期服役性能研究匮乏,现有试验多基于短期模拟环境,海水海砂混凝土在海洋复杂环境(高盐、高湿、强腐蚀)下的长期力学性能演变与氯离子固化效果衰减规律尚不明确;四是阻锈剂与掺合料的协同作用研究不足,阻锈剂与矿物掺合料、纳米材料的配伍性及增效机制有待深入探索。

参考文献

- [1] 程品. 海水海砂混凝土研究现状[J]. 广东建材, 2024, 40(9): 174-177.
- [2] 李师财, 于泳, 金祖权. 海水海砂混凝土力学性能与耐久性研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3743-3752.
- [3] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 16-22.
- [4] Soeda, K. and Ichimura, T. (2003) Present State of Corrosion Inhibitors in Japan. *Cement and Concrete Composites*, **25**, 117-122. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00058-0](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00058-0)
- [5] 一志辻. 骨材需要と供給, 品質のうごき: 2011 年/コンクリート骨材に関する全国実態調査より[J]. セメント・コンクリート, 2013(792): 14-22.
- [6] 马艳丽, 徐民英, 梁品文. 烟台市海砂资源的利用与保护[J]. 长春教育学院学报, 2002(1): 16-18.
- [7] 李彪宗. 海水海砂特性及其水泥基材料力学性能研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2021(5): 134-136
- [8] 李师财. 海水海砂混凝土中氯离子迁移与结合研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [9] 刘伟, 谢友均, 董必钦, 等. 海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 15-22.
- [10] 邢丽, 薛瑞丰, 曹喜. 海砂海水混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2015(11): 137-141.
- [11] 黄亮, 谢建和, 陆中宇. 海水海砂混凝土研究现状与应用前景[J]. 混凝土, 2020(9): 155-160.
- [12] 吕周岭, 罗英, 马保国, 等. 纳米二氧化硅对水泥-粉煤灰体系氯离子固化能力的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 1997-2003.
- [13] 孙丛涛, 宋华, 牛获涛, 等. 粉煤灰混凝土的氯离子结合性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 35-39.
- [14] Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W. (2010) Long Term Performance of Chloride Binding Capacity in Fly Ash Concrete in a Marine Environment. *Construction and Building Materials*, **24**, 1352-1357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.039>
- [15] 沈均, 罗驹华, 王建华. 粉煤灰和矿粉对海水海砂混凝土氯离子固化和抗冻性能的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(4): 39-43.
- [16] 王璐瑶, 周渊, 周鹤鸣, 等. 矿粉及粉煤灰对氯离子的固化作用[J]. 上海建设科技, 2022(2): 69-70+75.
- [17] 王冲, 杨长辉, 钱觉时, 等. 粉煤灰与矿渣的早期火山灰反应放热行为及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(7): 1050-1058.
- [18] 邱泽辉. 纳米二氧化硅对混凝土耐久性影响研究[J]. 广东建材, 2025, 41(10): 29-31.
- [19] 张立欣. 纳米二氧化硅对水泥基材料影响的试验研究[J]. 交通世界, 2023(10): 38-40.
- [20] 毕鹏鹏. 纳米二氧化硅改性大掺量粉煤灰水泥砂浆性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [21] 戚丹, 马琳, 赵珍. 复掺粉煤灰和纳米二氧化硅对混凝土耐久性的影响[J]. 化学与粘合, 2023, 45(5): 427-431.