

海水海砂混凝土耐久性研究综述

何建平*, 王学志#, 兰 聪

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月23日

摘 要

随着全球海洋资源开发进程加快和海洋强国战略的深度推进, 现代化海洋基础设施体系构建已成为国家战略能力提升的关键支撑, 紧随其后的是大量沿海港口和土木工程项目需要建设。传统混凝土的制备消耗大量河砂, 淡水资源, 矿石, 也违背了可持续发展的理念, 建议采用海水、海砂替代淡水和河砂, 并以矿物掺合料部分替代水泥制备混凝土, 能够有效缓解建筑行业对自然资源的过度依赖, 还能显著降低对环境的影响。海水海砂混凝土的研究是一项兼具经济效益与环保价值的重要课题, 聚焦于海水海砂混凝土耐久性, 系统总结了国内外学者对海水、海砂应用的研究成果, 深入分析了海水海砂特点、盐类侵蚀、炭化、冻融以及矿物掺合料的添加对混凝土耐久性的影响在微观层面做出研究解释, 发现一定掺量矿物掺合料、纤维、特殊骨料对海水海砂混凝土耐久性提升有一定帮助, 同时对未来研究方向提出建议。

关键词

海水海砂混凝土, 耐久性, 矿物掺合料, 盐类侵蚀, 炭化, 冻融

Review on Durability of Seawater Sea-Sand Concrete

Jianping He*, Xuezhi Wang#, Cong Lan

Department of Civil and Architecture Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 12th, 2025; published: Apr. 23rd, 2025

Abstract

With the acceleration of global marine resource exploitation and the in-depth advancement of maritime power strategies, the construction of modern marine infrastructure systems has become a critical support for enhancing national strategic capabilities, followed by the requirement to build a

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 何建平, 王学志, 兰聪. 海水海砂混凝土耐久性研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 796-807.

DOI: 10.12677/hjce.2025.144086

substantial number of coastal ports and civil engineering projects. The preparation of traditional concrete was accompanied by the consumption of large amounts of river sand, freshwater resources, and minerals, and contradicted the concept of sustainable development. The use of seawater and sea sand as substitutes for freshwater and river sand, combined with the partial replacement of cement with mineral admixtures in concrete preparation, can effectively alleviate the construction industry's excessive dependence on natural resources and can significantly reduce environmental impacts. The research on seawater sea-sand concrete constitutes an important subject with both economic benefits and environmental value, focusing on the durability of seawater sea-sand concrete. Studies by domestic and international scholars on the application of seawater and sea sand were systematically summarized. An in-depth analysis was conducted on the characteristics of seawater and sea sand, salt erosion, carbonation, freeze-thaw cycles, and the effects of mineral admixture addition on concrete durability, with microscale research interpretations provided. It was found that the incorporation of appropriate amounts of mineral admixtures, fibers, and special aggregates provided certain enhancements to the durability of seawater sea-sand concrete, while recommendations were also proposed for future research directions.

Keywords

Seawater Sea-Sand Concrete, Durability, Mineral Admixtures, Salt Attack, Carbonation, Freeze-Thaw

Copyright © 2025 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

中国作为海洋大国,拥有 300 万平方千米的海洋国土、1.1 万余座海岛以及超过 3.2 万千米的陆地海岸线。《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出,要拓展海洋经济发展空间,统筹推进海洋生态保护、经济发展与权益维护,加快建设海洋强国。在这一背景下,海洋经济正成为推动区域经济发展的新增长点[1]。随着海洋经济的发展,临海码头港口,跨海大桥以及在海岛开展教育、科研、军事基地和生态环境保护等方面的建设,对于基础设施的建造完善显露出迫切的需求。

混凝土结构具有取材便捷、成本低廉、工厂化生产及施工高效等优势。然而,随着中国城市化进程的加速,砂石年消耗量已突破 200 亿吨,水泥年需求量长期维持在 20 亿吨以上,导致砂石资源日益紧缺。所以推进绿色建筑发展,未来建筑需注重资源节约与环境保护,在此基础上发掘更多可使用的建材(比如海水和海砂等),从而实现人与自然和谐共生。中国近海砂矿资源主要分为近岸海砂和浅海海砂两类[2]。近岸海砂多分布于江河入海口的沿海省份,如福建省近岸浅,海区资源量约为 10×10^8 吨。浅海海砂则主要集中于台湾浅滩、琼州海峡外、珠江口外及部分岛屿周边,其中台湾浅滩资源量估计达 200×10^8 至 400×10^8 吨,说明了我国近海砂矿资源的储量丰富与分布广泛等特点。然而,海水中含有的氯盐、硫酸盐、镁盐等成分可能对混凝土的力学性能和耐久性产生不利影响。尽管研究表明,淡化后的海水可作为混凝土原材料,但其科研成本增加,同时研究发现,掺入粉煤灰等矿粉掺合料有助于提升海水海砂混凝土(SWSSC)的耐久性。

因此,在促进海洋经济发展的背景下,深入研究海水海砂混凝土的应用,突破盐离子侵蚀、混凝土炭化等技术,对推动其进一步发展具有重要的现实意义和广泛前景,海水和海砂带来的经济效益也十分可观,但是值得注意的是不同地区海水海砂的成分在一定程度存在差异,需要构架完整的开采体系。

2. 海水和海砂以及矿粉合料的特点

2.1. 海水和海砂的特点

海水中富含多种离子、金属单质及杂质,其中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 F^- 等离子的浓度较高且相对稳定,属于海水中的保守元素[3][4]。此外,地理环境的差异导致不同海域的离子浓度存在区别。

海砂的粒径与河砂相近,但孔隙率更大,导致二者力学性能存在差异。海砂由海水冲刷、碰撞形成,主要成分为二氧化硅,并含有少量氯离子、长石、钙、镁和云母等。海砂用途广泛,主要用于工程建设,但其氯离子和硫酸根离子易腐蚀钢筋,且钙物质与酸反应会产生泡状腐蚀,影响海砂性能。不同的海域所产出的海砂成分存在差异[5]。海水和海砂中含有大量 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等离子,若海砂中贝壳含量较高,还会受到 Ca^{2+} 的影响,导致混凝土结构的耐腐蚀性和耐久性下降[6]。这些离子可能对水泥水化、凝结及建筑物使用过程产生不利影响[7]。为充分利用海水海砂资源,国内外学者开展了大量研究。例如,Wu Di [8]研究发现,舟山地区的海水海砂氯离子含量较低,适合直接用于工程实践。此外,海砂还可应用于砌筑砂浆中[9]。

2.2. 矿物掺合料的特点

为顺应绿色建筑趋势,减少资源消耗和环境影响,未来建筑中水泥使用量或将减少。矿粉掺合料作为矿石开采后的副产品,经加工可替代部分传统水泥,成为新型环保材料——“绿色水泥”[10]。其中,粉煤灰、硅灰、白云石粉等因经济效益高、产量大且能提升混凝土性能,已得到广泛应用。

粉煤灰作为典型工业废弃物,研究发现其掺入混凝土可减少石灰用量,降低二氧化碳排放。粉煤灰与混凝土相互作用产生火山灰效应(化学反应)及微集料效应、颗粒形态效应(物理作用)[11]。学者们深入探究,通过调整粉煤灰掺量并对比混凝土强度变化,深入研究其应用效果。韩刚[12]等研究发现,海水海砂混凝土及其水化产物可作为碱激发剂与粉煤灰发生化学反应,当粉煤灰掺量为10%时激发效果最佳,且随掺量增加而减弱。朱德举[13]、赵雪薇等通过实验发现,粉煤灰在水泥水化过程中生成钙矾石(Aft)和弗里德尔盐(Fs)等含铝化合物,能与海水中的氯离子发生固化作用,且在30%掺量时效果最佳。Jiang Yi [14]等研究表明,掺粉煤灰的海砂混凝土早期和后期强度均高于普通混凝土,氯离子虽能提升早期强度,但后期对于混凝土的碱性产生负面影响。

硅灰是冶炼硅铁合金和工业硅的副产品,因其高细度特性,在混凝土中具有良好应用前景,尤其适用于海水海砂混凝土。Iqbal Mudassir [15]等研究发现,当改性硅灰取代7.5%水泥时,海水海砂混凝土强度提升最大,同时孔隙率减小,抗氯离子侵蚀能力增强。该实验研究重点在改性硅灰的最佳掺量和性能的提升,对进一步细化研究起到指导作用,见图1[15]对比硅灰和普通硅酸盐水泥的SEM图像,硅灰的细度可以满足填补混凝土孔隙的需求。刘华杰[16]等学者试验数据显示,混凝土抗氯离子渗透性能随养护周期延长,前期增速显著而后趋于平缓。回归分析发现,氯离子扩散系数与养护周期存在负相关性,值得注意的是,复合掺入粉煤灰与硅灰可显著优化早期现浇混凝土结构的抗侵蚀能力。与前文朱德举[13]对比发现,同等掺量下,硅灰比粉煤灰更能降低海水净浆孔溶液的碱度,突出了硅灰在降低碱度方面的优势,未来可利用材料碱度梯度差异提升混凝土防腐能力。

白云石粉通常掺量为10%~30%,可改善混凝土工作性、强度、耐久性和表面质量。Zhang Xin [17]等研究发现,在冻融循环下,白云石粉通过细化水泥浆体结构,显著降低了C30和C45混凝土的损伤程度,且损伤随掺量增加而减小,表明白云石粉可以提高混凝土抗冻性能。崔钊玮[18]等指出,白云石粉替代水泥时,能增强火山灰效应,可通过晶核效应抑制混凝土干燥收缩,密实结构,提升抗冻、抗渗和抗碳化

性能,说明白云石粉在微观层面对混凝土性能有一定帮助。

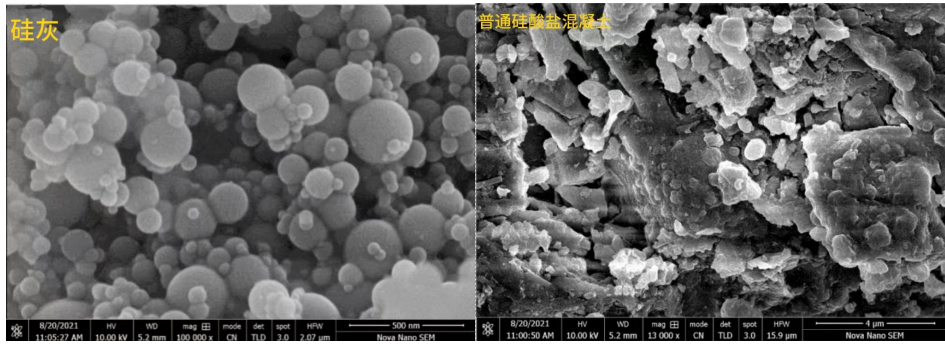


Figure 1. SEM images of SF and OPC [15]

图 1. SF 和 OPC 的 SEM 图像[15]

这些实验探究了矿物掺合料在海水海砂混凝土中与不同因素的反应效果和最佳反应掺量,但是对于这些实验中超过一定掺量后效果减弱,是否由于反应物之间比例失衡、掺合料过多稀释了有效成分或者反应不完全等问题仍然需要研究,可通过微观界面观察下调控因变量的组合变化,探究掺量增加后激发效果衰减的实际原因。矿物掺合料与水泥水化过程中通过化学反应和物理作用生成的新胶凝结构,多种因素影响下,有助于提升混凝土的强度、抗渗性、抗冻融性和抗盐类腐蚀能力。矿物掺合料在海水海砂混凝土中的应用,从微观结构到耐久性影响等方面未来仍需深入研究,可在多因素耦合条件下进一步探索其性能。

3. 海水海砂混凝土耐久性研究进展

3.1. 影响海水海砂混凝土性能的因素

C-S-H 具有多样化的形貌,且对外界环境高度敏感[19]。随着混合物料中盐含量增加,游离氯离子逐步转化为 Kuzel 盐和 Friedel 盐,硫酸盐则转化为 AFt,导致水化固相体积增大[20]。海水海砂混凝土的稳定性受多种因素影响,如水灰比、盐类侵蚀和炭化等[21],这些因素共同决定了其性能表现,体现了未来在耦合条件下研究的重要性。

水灰比是决定混凝土性能的关键[22]。Craipeau [23]研究表明,水灰比不仅影响水泥水化过程,还导致水泥基体积变化,而未完全水化产生的孔隙水压力则影响混凝土的化学收缩和自收缩。此外,胶凝材料的多样性也会改变水化过程,进而影响混凝土性能。

Mifeng Gou [24]研究发现,石膏-水泥-矿粉三元体系的水化速率高于单一体系或水泥-石膏二元体系,生成的二水石膏晶体可包裹 C-S-H 凝胶,从而提升混凝土性能。Yifan Zhao [25]研究表明,水灰比同样影响海水海砂混凝土性能,添加高铝胶凝材料(SCMs)后,其性能受矿化度影响显著。

3.2. 盐类侵蚀及改善方式

硫酸根离子是海水中的常见成分,易在海水海砂混凝土中引发硫酸盐侵蚀。研究表明,硫酸根离子会改变 C-S-H 凝胶的形态[26]。在水化初期,带负电的硫酸根离子吸附在带正电的 C-S-H 表面,使其从“团聚”态转变为“针状”态;当硫酸根离子耗尽后,C-S-H 又恢复为“团聚”态[27]。

学者通过硫酸盐干湿循环实验模拟海水侵蚀,探究混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。Yanzhong Ju [28]发现,粉煤灰和高炉矿渣与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成的 C-S-H 凝胶见图 2 [28]所示,能填充混凝土孔隙,且粉煤灰在水化后期催化水化作用,使孔隙结构更致密,增强抗硫酸盐侵蚀能力。Xin Liu [29]研究了海水 pH 值对

C-S-H 组成和微观结构的影响,发现低 pH 加剧 C-S-H 脱钙,而强碱性环境提升其抗劣性。低 pH 硫酸盐 (pH=10~12) 侵蚀时, C-S-H 平均链长增加,大孔(>10 nm)比例上升,结构变疏松。分子动力学分析表明,硫酸盐侵蚀易去除 C-S-H 层间钙,促进 Si-O-Si 基团形成,增加链长。Xin Sun [30] 发现海水海砂制备的超高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀能力要高于河砂高性能混凝土。所以,海水海砂混凝土对比普通混凝土,在低 pH 值时更有优势,同时可改善内部孔隙、通过海水与水泥反应产物提高性能。矿粉掺合料在一定程度上能够作为催化剂使海水海砂混凝土反应更彻底,通过改变内部结构达到抵抗恶劣环境的要求。未来针对 pH 值的不稳定带来性能波动,可开发含 pH 敏感矿物(如沸石、水滑石)的复合胶凝材料,在酸性环境中释放碱性离子缓冲 pH 波动,抑制 C-S-H 脱钙,也能将粉煤灰与纳米硅灰封装为微胶囊,提高水化反应的释放效率,优化孔隙结构梯度,提高海水海砂混凝土性能。

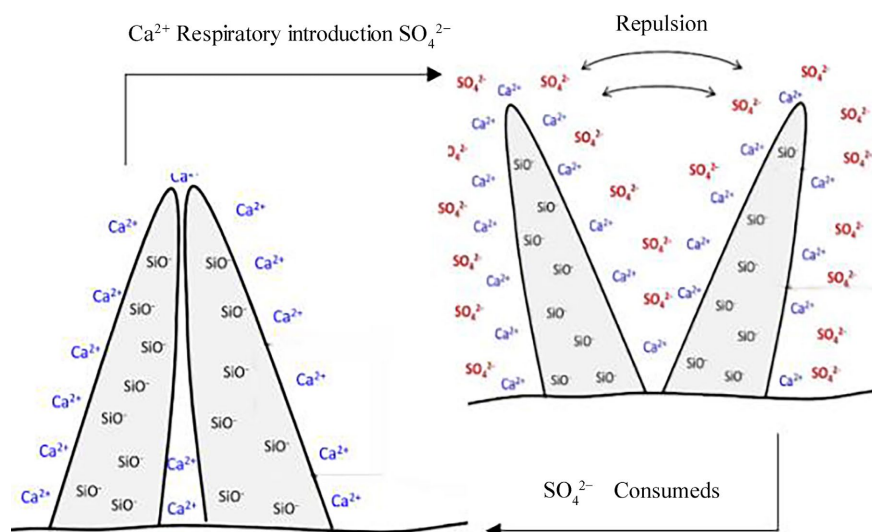
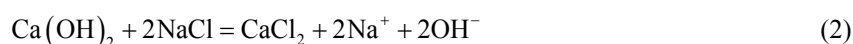


Figure 2. Schematic diagram of the morphological effect of SO_4^{2-} on C-S-H [28]

图 2. SO_4^{2-} 对 C-S-H 的形态影响示意图[28]

氯离子同样是海水中浓度较高的离子之一,在制备海水海砂混凝土时,氯离子侵蚀是主要挑战。侵入性氯离子分为两类:一是外部氯离子,侵入已硬化的混凝土;二是内部氯离子,源自原材料[31] [32]。内部氯离子(即游离氯离子)易与 C_3A 发生反应,其过程可用式(1)和式(2)描述[33]。



海水中富含氯盐,高浓度的氯离子会渗透到混凝土内部,增加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶解度,导致冻融破坏并腐蚀内部钢筋[33],因此,固定氯离子成为关键问题[34]。研究表明,氯离子的固定能力取决于含铝化合物的含量[35]。

Shicai Li [36] 研究发现,当铝酸钙水泥(CAC)掺量为 100% 时,其对氯离子的固化效果可达 200%。然而,富铝胶凝材料(如偏高岭土、粉煤灰)替代 CAC 时,固定氯离子的效果不如替代普通硅酸盐水泥显著。Shutong Yang [37] 发现,完全使用海水海砂的混凝土生成的 C-A-S-H 凝胶最多,氯离子固定能力最强,且凝胶填充混凝土内部结构,显著提升了抗氯离子渗透性。此外,氯化物能稳定弗里德尔盐,但石膏中的硫酸盐会生成更稳定的钙矾石,降低氯离子固定能力,因钙矾石不与氯离子反应[32]。Wei Huang [38] 研究发现,海砂超高性能混凝土(UHPC)在 NaCl 溶液中浸泡 180 天后,其电荷转移电阻(Rct)几乎不变,

而普通混凝土的 R_{ct} 显著下降, 表明 UHPC 具有优异的抗点蚀能力。Yongqiang Li [39] 指出, 在碳化环境下, 碳酸吸附会破坏钢筋表面, 腐蚀产物 $\beta\text{-FeOOH}$ 导致 Cl^- 重新分布, 进一步加剧钢筋腐蚀。Wei Liu [40] 发现, 见图 3 [40] 所示海砂混凝土中氯离子浓度随深度增加而降低, 但在氯化物重分配过程中, 氯化物剖面出现了“伪富集”现象, 这被证实是由单位转换引起的。

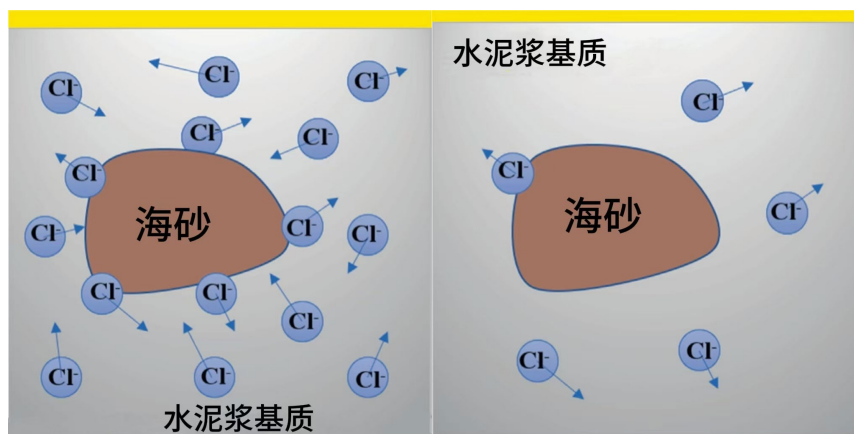


Figure 3. Chloride ion permeation in sea sand concrete [40]

图 3. 海砂混凝土中的氯离子渗透[40]

综上发现, 不同材料对氯离子固化效果不同, CAC 具有高效性、富铝材料替代的局限性, C-A-S-H 凝胶的固定作用、硫酸盐的影响、UHPC 的抗腐蚀性能、碳化环境下的腐蚀机制和氯离子分布的测量问题, 都是海水海砂混凝土抵抗氯离子腐蚀的有效途径, 单一因素的研究较为成熟, 未来可设计多凝胶体系(如钙-铝协同调控)、碳化-氯离子耦合模型构建、低碳高耐蚀材料开发来实现海水和海砂的建材化。

3.3. 冻融循环

我国沿海和岛礁地区有大量混凝土建筑, 长期面临海风侵蚀、海浪冲刷和潮汐影响。尤其是北方沿海地区的混凝土结构, 在自然环境中承受更为严酷的考验, 其中冻融循环对混凝土耐久性的影响尤为显著。

冻融循环对混凝土的耐久性影响显著。作为多孔材料, 混凝土会吸收并保持水分。当温度低于 0°C 时, 孔隙中的水结冰膨胀, 产生膨胀应力和渗透压力, 超过混凝土的极限拉应力。经过多次冻融循环, 内部微裂缝逐渐扩展, 为水和有害离子侵入提供了通道, 导致混凝土的弹性模量、抗压强度等力学性能持续下降[41], 最终削弱结构的抗震和承载能力。此外, 水化反应使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 析出, 进一步加剧裂缝扩展, 加速混凝土劣化。

为缓解混凝土冻融劣化问题, 可通过减少内部孔隙、增强抗裂性和保温性能来降低冻融影响: 添加矿物掺合料(如硅灰、粉煤灰、磨粒高炉渣、稻壳灰), 利用其高细度填充毛细孔, 提高密实度, 阻止水分子、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 渗透, 从而提升抗冻融和抗渗性能[42]。孔靖勋[43]研究发现, 适量粉煤灰可降低混凝土孔隙率, 其作用机制包括改善微观结构以抑制毛细管道形成, 以及促进引气剂生成均匀稳定的微孔体系, 细化气泡分布, 增强抗冻融能力。矿物掺合料具有操作便捷、原材料充足的优势, 但要掌握掺量对性能影响。

研究表明, 调整混凝土骨料可优化孔隙结构并增强保水性。Liu Yuanzhen [44] 等发现, 添加玻璃空心微珠能形成蜂窝状孔隙结构, 提升保水能力, 从而减少冻融循环对混凝土的破坏, 增强抗冻性, 在骨料孔隙结构方面具有创新性。高恒等学者[45]在海水海砂混凝土中使用再生粗骨料, 发现随着替代率增加,

7天和28天抗压强度呈上升趋势。养护90天后,水化反应趋于稳定,强度主要受骨料自身强度影响,时间因素作用减弱。此外,该混凝土在海水海砂环境中早期强度发展显著,7天强度可达28天强度的86%~90%,表明海水海砂能加速水化反应,促进早期强度形成。这表明再生骨料取代率影响长期性能,但海水海砂混凝土早期强度高后期可能下降,所以需要综合这些信息,说明再生骨料和海水海砂的协同效应。

研究证明添加纤维可提升混凝土的抗裂性能。海水海砂水泥基复合材料属于脆性材料,受压或受弯时易发生瞬间破坏,缺乏延性,纤维的加入能有效改善这一现象。王昂[46]研究发现,在海水海砂混凝土中加入PVA纤维可显著提高抗弯韧性,且高掺量下后期效果更明显。试验表明,高纤维掺量试件的能量吸收性能比低掺量试件提升33%~109%。夏建云[47]等发现,添加碳纤维可显著提升混凝土的力学性能和抗冻性,但当碳纤维含量超过0.6%时,抗压强度和抗拉强度会下降,表明过量碳纤维会破坏内部结构。李钢粮[48]等研究表明,玻璃纤维与膨胀剂均可抑制海水海砂混凝土的冻融破坏,但单掺膨胀剂的增强效果优于单掺玻璃纤维。复合使用时,通过协同阻裂机制降低冰晶膨胀应力,使抗压强度、动弹性模量及质量损失率分别降至15.79%、9.79%和0.54%,其协同原理源于纤维阻裂与膨胀剂填充的协同作用,共同优化了混凝土微观结构。深入研究纤维类型的选择和掺量优化,构建纤维与矿物体系的交互作用是提升海水海砂混凝土的可行方向之一。

总结发现,国内外学者从冻融损伤机理、材料性能和数值模拟三个方面研究了冻融劣化问题,指出海水海砂混凝土冻融劣化的两个前提条件:一是水分渗入内部缝隙达到饱和状态,二是温度正负交替变化。为缓解冻融劣化,学者们提出了多种方法:(1)添加高细度矿物掺合料(如硅灰、粉煤灰等),可填充内部孔隙,提高密实度,降低渗透系数和 Cl^- 渗透能力。但过量添加会因混凝土比例下降而削弱性能。(2)通过调整骨料和添加纤维(如PVA纤维、碳纤维等),优化孔隙结构并提升力学性能。纤维的抗拉性能可有效抵抗冻融产生的膨胀应力,增强抗裂性和保温能力,同时阻断孔隙连通,进一步提高抗冻性,但是需精准控制掺量阈值与分散工艺。

3.4. 矿粉掺合料对海水海砂混凝土性能的影响

海水海砂混凝土的力学性能与其工程应用密切相关。为提升性能,许多学者尝试添加不同矿物掺合料。国内外大多数学者认为,随着矿粉掺量增加,混凝土的力学性能会下降;但也有研究表明,适量增加矿粉掺量可提升其力学性能。

张腾腾[49]研究发现,随着粉煤灰掺量增加超过临界点,海水海砂混凝土的抗压强度和抗折强度均下降。关国浩[50]则发现,单掺粉煤灰时,混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度先升高后降低。Liu Jun [51]在SWSSC中加入LC2(煅烧粘土与石灰石的复合材料),发现LC2的增加抑制了水泥水化反应,导致早期强度降低。实验中加入矿粉掺合料的目的通常是在经济可行的前提下提升混凝土的耐久性。Liangyu Tong [52]研究了以海水和珊瑚砂制备的碱活性粉煤灰和矿渣粉地聚合物体系的氯离子结合能力及抗氯离子扩散性能。通过宏观和微观测试分析,发现地聚合物的氯离子结合能力优于普通硅酸盐水泥(OPC)。提高初始氯离子浓度可增强氯离子结合能力,从而改善海水海砂混凝土的耐久性。同时发现将海水海砂应用于自密实混凝土中,替代天然砂石对强度影响较小[53]。由于海砂中贝壳的存在,海水海砂自密实混凝土的流动性优于普通混凝土[54]。M. Wihardi Tjaronge发现,自密实混凝土中水泥水化生成的Friedel盐和钙矾石对强度几乎没有影响[55]。

综上所述,海水海砂对混凝土强度的影响规律并没有统一结论,但适宜掺量的矿物掺合料对海水海砂的孔隙结构改良,可以提高海水海砂混凝土的力学性能,海水和海砂加速水化的同时,促进早期混凝土成型,但自身带来的氯离子和硫酸根离子影响后续混凝土强度,矿物掺合料的掺入可以固化游离离子

提升耐久性，未来可通过精准掺量控制、材料复配优化及混凝土界面强化技术化解其对早期强度的负面影响。

3.5. 炭化

混凝土炭化是指二氧化碳通过孔隙扩散，与碱性水化产物反应，导致 pH 值从 12~13 降至 8~9，造成结构劣化和钢筋钝化膜侵蚀，从而降低耐久性[56]。

炭化反应公式：



邢丽等[57]研究发现，海水海砂混凝土的抗炭化性能优于普通硅酸盐水泥，原因是其盐晶体随龄期膨胀，填充内部孔隙，阻碍二氧化碳扩散，从而提升耐久性。

另有学者认为，海水和海砂对混凝土的抗炭化性能影响有限。卞立波等[58]研究发现，海砂替换比例对炭化进程影响不显著。在低水胶比和高强度配比下，即使使用不同比例的海砂，混凝土的炭化深度仍保持在较低水平。Limeira [59]等人也指出，海砂并未改变混凝土的炭化过程，其炭化深度与普通混凝土几乎一致。

研究表明，适当提高 Cl^- 浓度可增强混凝土的抗炭化性能。Liu Wei [60]等研究了 Cl^- 对海水海砂混凝土(SWSSC)的影响，见图 4 所示[60]并建立了 Cl^- 与炭化相互作用的模型。结果显示， Cl^- 能有效降低孔隙率，改善微观结构，使 SSC 炭化速率减少 20%~50%。这种抗炭化性能的提升有助于降低钢筋腐蚀风险，因为炭化过程会将结合的 Cl^- 转化为游离态，减少其对钢筋的侵蚀。

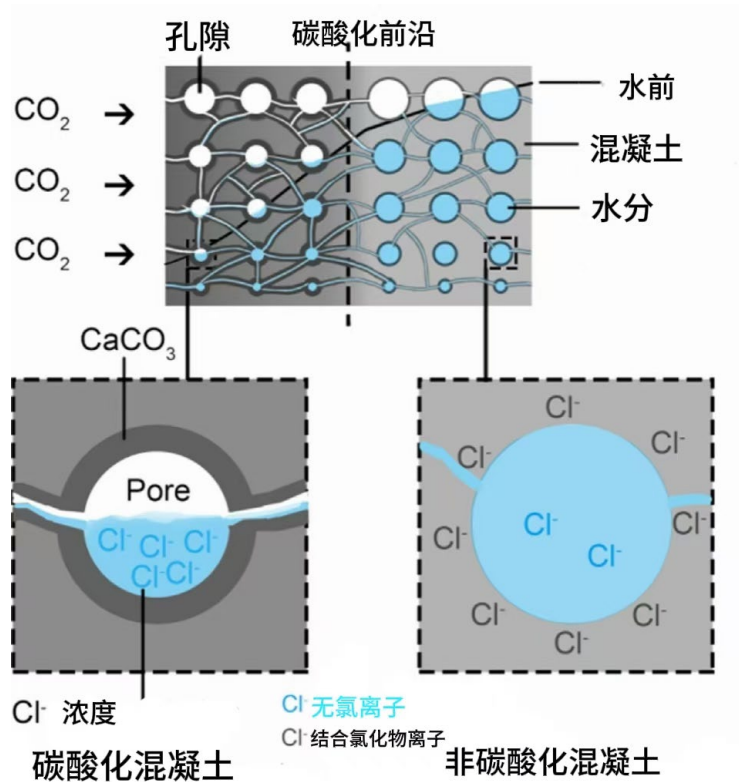


Figure 4. Schematic diagram of chloride concentration in the pore solution of sea sand concrete under carbonization and drying [60]

图 4. 碳化和干燥作用下海砂混凝土孔隙溶液中氯化物浓度示意图[60]

Table 1. Comparison of controversial studies on carbonization
表 1. 炭化争议性研究对比

研究观点	核心结论	关键实验条件
邢丽[57]支持	海水海砂混凝土碳化深度比普通混凝土低 40%	水胶比 0.45, Cl ⁻ 浓度 4%
卞立波[58]中立	海砂替换率 0~100%时, 28 天碳化深度差异 < 0.5 mm	水胶比 0.35, C50 混凝土
Limeira [59]质疑	海砂混凝土与普通混凝土碳化曲线重合度 > 90%	自然暴露试验 CO ₂ 浓度 0.03%
Liu Wei [60] 机制深化	Cl ⁻ 浓度 2%~5%时, 碳化速率与 Cl ⁻ 浓度呈负相关 (R ² = 0.89)	硫磺混凝土(SSC), 加速碳化试验

见表 1 所示矛盾, 推测解释: (1) 水胶比差异: Bian 研究中低水胶比(0.35)混凝土本身孔隙率低(<10%), 海砂的孔隙填充效应被掩盖。 (2) 材料体系差异: Liu Wei 研究的海水海砂混凝土(SWSSC)中 Cl⁻硫化物协同作用增强致密性, 而 OPC 体系 Cl⁻作用受碱性环境影响更大。

综上所述, 海水海砂混凝土的碳化规律与普通硅酸盐水泥(OPC)相似: 水灰比降低, 碳化深度减少; 时间延长, 碳化深度增加。然而, 海水海砂混凝土中氯离子和硫酸根离子的添加生成了多种彭软物质(钙矾石、FS), 改变了内部孔隙结构导致长期强度降低, 通过添加不同胶凝材料、纤维同时优化配比, 减缓二氧化碳的扩散, 从而提升了抗碳化能力, 研究建立多因素耦合模型, 固化游离离子提高海水海砂混凝土耐久性。

3.6. 微观分析

当前学者主要通过微观分析海水海砂混凝土的内部结构来提升其力学性能和耐久性, 重点研究水化产物、孔隙特征及界面过渡区(ITZ)。朱德举[13]等通过 X 射线衍射(XRD)发现, 氯离子与铝酸盐反应生成 Friedel 盐, 硫酸盐与铝酸盐反应生成钙矾石, 可能导致膨胀和开裂, 影响长期性能, 而适量粉煤灰可固化离子。扫描电子显微镜(SEM)观察显示, 孔隙率与混凝土性能密切相关, 氯离子和硫酸盐的侵入加剧孔隙复杂性, 海水可能改变孔径分布, 影响渗透性和耐久性。添加纤维和高细度矿物掺合料可优化孔隙结构, 提升力学性能和耐久性[42]。此外, ITZ 通常较厚且密实度较低, 海水中的氯离子和硫酸盐可能进一步削弱其性能, 导致微裂缝, 影响整体强度和耐久性。林敏[61]等学者发现掺入膨胀剂和玻璃纤维可以提高海水海砂混凝土的劈裂强度、弯曲强度、粘结能以及初始和失稳粘结韧性, 采用卷积裂缝纹理机(CPMs)对粘结界面进行粘结裂缝点搜索, 根据 SqueezeNet 深度学习网路架构对粘结界面模型的参数进行压缩, 结果吻合的粘结界面模型正确率高达 91.4%, 同时缩短了时间成本。算法能够提高海水海砂混凝土粘结界面模型分析的精度和降低训练成本, 为海水海砂混凝土的研究提供了新思路。

综上所述, 微观分析表明海水海砂混凝土具有复杂的微观结构和耐久性问题。虽然在某些条件下可使用, 但需采取防护措施以提升其长期性能。

4. 结语

通过对国内外研究的总结, 得出以下结论:

(1) 海水中的离子能促进水泥基材料的早期水化, 生成更多 Fiedel 盐、At 和 M-S-H 等水化产物, 优化孔隙结构并加速凝结。然而, 离子会加速钢筋锈蚀, 因此使用 FPR 筋替代传统钢筋是一个重要方向。FPR 筋与海水海砂混凝土结合良好, 能满足性能要求。氯离子和硫酸根离子的耦合作用中, 前期腐蚀由氯离子主导, 后期因硫酸根离子抑制氯离子扩散, 由硫酸根离子主导。

(2) 海水和海砂的使用对混凝土耐久性有不利影响, 但加入纤维、矿粉掺合料和调整骨料可优化水化反应, 改善孔隙结构, 提升密实度, 满足工作性能要求, 并增强抗冻融和抗碳化性能。海砂砂浆比普通

砂浆更能抵抗外部盐溶液侵蚀, 因其内部溶液饱和, 能在渗透压作用下与外部溶液达到平衡, 抵抗外部盐溶液侵入。

(3) 海水与水泥的反应机理研究较少, 且不同海域海水成分差异影响水化反应。因此, 制定针对不同海域的施工规范值得研究。海水海砂混凝土的强度发展与养护方法和条件密切相关, 但相关研究缺乏系统性总结。其微观水化历程和强度发展受服役环境影响, 需对不同养护条件下的性能进行系统研究, 学习训练模型的快速求解可以提高检测速度, 促进海水海砂混凝土的研究。

(4) 海水海砂混凝土在服役中面临多种环境侵蚀, 为提升其耐久性, 需重视多种侵蚀耦合作用下的劣化机制研究。

基金项目

辽宁省教育厅创新人才培育项目(理工类) LJZZ222410154008。

参考文献

- [1] 赵昕. 海洋经济发展现状、挑战及趋势[J]. 人民论坛, 2022(18): 80-83.
- [2] 张金鹏, 万荣胜, 朱本铎. 中国近海砂矿资源开发与利用及相关战略建议[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 879-880.
- [3] 侯卫星, 秦磊, 郭盼盼, 等. 海水-海砂混凝土研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2024, 38(2): 184-193.
- [4] 中国科协发布 2022 重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题[J]. 中国机械工程, 2022, 33(14): 1716.
- [5] 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.
- [6] 崔明. 海砂海水混凝土力学性能及其与 FRP 筋组合梁受弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [7] 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.
- [8] Di, W., Yan, Q., Wang, Y., Gan, X., Dong, Z., Wang, J., et al. (2019) Micro-Analysis of Marine Sand from Zhoushan Seas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **304**, Article ID: 032101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/3/032101>
- [9] Yang, S., Sun, Z., Jiang, Z., Yang, Z. and Liu, S. (2021) Effect of Chloride Ion Content and Replacement Ratio of Manufactured Sand on Performance of Sea Sand Masonry Mortar. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**, 147-158. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00539-x>
- [10] 蒲智琦. 绿色建筑材料在建筑工程施工技术中的应用研究[J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(1): 110-112.
- [11] 王云鹏. 绿色建筑材料在土木工程施工中的应用分析[J]. 居舍, 2024(5): 47-49.
- [12] 韩刚, 王学志, 孔祥清, 等. 海水、海砂、粉煤灰混凝土早期立方体抗压强度研究[J]. 混凝土, 2022(8): 25-28.
- [13] 朱德举, 赵雪薇, 郭帅成. 海水与矿物掺合料对水泥基材料微结构和力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(5): 1477-1485.
- [14] Jiang, Y., Liu, J.Z., Sun, W., Zheng, C.Y. and Wu, S.Y. (2014) Study on the Properties of Sea Sand Concrete with Fly Ash. *Advanced Materials Research*, **1065**, 1854-1857. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.1854>
- [15] Iqbal, M., Zhang, D., Khan, K., Amin, M.N., Ibrahim, M. and Salami, B.A. (2023) Evaluating Mechanical, Microstructural and Durability Performance of Seawater Sea Sand Concrete Modified with Silica Fume. *Journal of Building Engineering*, **72**, Article ID: 106583. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106583>
- [16] 刘华杰, 朱海威, 范从军, 等. 海洋环境下现浇混凝土结构耐久性提升技术研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1329-1335.
- [17] Zhang, X., Luo, Y. and Yao, W. (2022) An Innovative Material with Strong Frost Resistance—Concrete Containing Dolomite Powder. *Materials*, **15**, Article 1721. <https://doi.org/10.3390/ma15051721>
- [18] 崔钊玮, 杨靖韬, 刘荣桂. 白云石粉掺量对水泥混凝土力学性能影响研究[J]. 非金属材料, 2022, 45(4): 39-41.
- [19] Geng, J., Easterbrook, D., Li, L. and Mo, L. (2015) The Stability of Bound Chlorides in Cement Paste with Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, **68**, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.010>
- [20] Yan, Y. and Geng, G. (2024) Does Nano Basic Building-Block of C-S-H Exist?—A Review of Direct Morphological Observations. *Materials & Design*, **238**, Article ID: 112699. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112699>

- [21] Harris, A.W., Manning, M.C., Tearle, W.M. and Tweed, C.J. (2002) Testing of Models of the Dissolution of Cements—Leaching of Synthetic CSH Gels. *Cement and Concrete Research*, **32**, 731-746. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00748-7](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00748-7)
- [22] Morandeau, A., Thiéry, M. and Dangla, P. (2014) Investigation of the Carbonation Mechanism of CH and C-S-H in Terms of Kinetics, Microstructure Changes and Moisture Properties. *Cement and Concrete Research*, **56**, 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>
- [23] Craipeau, T., Perrot, A., Toussaint, F., Huet, B. and Lecompte, T. (2021) Mortar Pore Pressure Prediction during the First Hours of Cement Hydration. *Cement and Concrete Composites*, **119**, Article ID: 103998. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103998>
- [24] Gou, M., Zhao, M., Zhou, L., Zhao, J., Hou, W., Ma, W., et al. (2023) Hydration and Mechanical Properties of FGD Gypsum-Cement-Mineral Powder Composites. *Journal of Building Engineering*, **69**, Article ID: 106288. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106288>
- [25] Zhao, Y., Hu, X., Shi, C., Zhang, Z. and Zhu, D. (2021) A Review on Seawater Sea-Sand Concrete: Mixture Proportion, Hydration, Microstructure and Properties. *Construction and Building Materials*, **295**, Article ID: 123602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123602>
- [26] 黄杨, 罗坤杰, 覃丽菲. 海洋环境下氯离子对混凝土结构耐久性的影响与防护[J]. 中国科技信息, 2022(19): 114-116.
- [27] Bérédier, E.M.J., Muller, A.C.A. and Scrivener, K.L. (2020) Effect of Sulfate on C-S-H at Early Age. *Cement and Concrete Research*, **138**, Article ID: 106248. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106248>
- [28] Ju, Y., Zhang, H., Wang, D., Kong, X., Ma, Y., Zhang, X., et al. (2024) Effect of Mineral Admixtures on the Resistance to Sulfate Attack of Reactive Powder Concrete. *Journal of Cleaner Production*, **440**, Article ID: 140769. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140769>
- [29] Liu, X., Feng, P., Li, W., Geng, G., Huang, J., Gao, Y., et al. (2021) Effects of Ph on the Nano/Micro Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) under Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, **140**, Article ID: 106306. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106306>
- [30] Sun, X., Li, T., Shi, F., Liu, X., Zong, Y., Hou, B., et al. (2022) Sulphate Corrosion Mechanism of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Prepared with Seawater and Sea Sand. *Polymers*, **14**, Article 971. <https://doi.org/10.3390/polym14050971>
- [31] Sun, C., Sun, M., Tao, T., Qu, F., Wang, G., Zhang, P., et al. (2021) Chloride Binding Capacity and Its Effect on the Microstructure of Mortar Made with Marine Sand. *Sustainability*, **13**, Article 4169. <https://doi.org/10.3390/su13084169>
- [32] Li, P., Li, W., Yu, T., Qu, F. and Tam, V.W.Y. (2020) Investigation on Early-Age Hydration, Mechanical Properties and Microstructure of Seawater Sea Sand Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, **249**, Article ID: 118776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118776>
- [33] Ben-Yair, M. (1974) The Effect of Chlorides on Concrete in Hot and Arid Regions. *Cement and Concrete Research*, **4**, 405-416. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(74\)90106-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(74)90106-9)
- [34] Wu, Q., Li, X., Xu, J., Wang, G., Shi, W. and Wang, S. (2019) Size Distribution Model and Development Characteristics of Corrosion Pits in Concrete under Two Curing Methods. *Materials*, **12**, Article 1846. <https://doi.org/10.3390/ma12111846>
- [35] Chen, J., Jia, J. and Zhu, M. (2024) Development of Admixtures on Seawater Sea Sand Concrete: A Critical Review on Concrete Hardening, Chloride Ion Penetration and Steel Corrosion. *Construction and Building Materials*, **411**, Article ID: 134219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134219>
- [36] Li, S., Jin, Z. and Yu, Y. (2021) Chloride Binding by Calcined Layered Double Hydroxides and Alumina-Rich Cementitious Materials in Mortar Mixed with Seawater and Sea Sand. *Construction and Building Materials*, **293**, Article ID: 123493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123493>
- [37] Yang, S., Xu, J., Zang, C., Li, R., Yang, Q. and Sun, S. (2019) Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Concrete Mixed by Seawater and Sea Sand. *Construction and Building Materials*, **196**, 395-410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.113>
- [38] Huang, W., He, L., Chen, Z., Yin, J., Huang, Q., Chen, R., et al. (2024) Effect of Endogenous Chloride Ion on the Corrosion Behavior of Reinforcement Embedded in Sea-Sand UHPC Matrix in Different Immersion Environments. *Journal of Building Engineering*, **90**, Article ID: 109376. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109376>
- [39] Li, Y., Liu, W., Mi, T., Ding, X., Tang, L. and Xing, F. (2024) Durability Study of Seawater and Sea-Sand Concrete under the Combined Effects of Carbonation and Chloride Redistribution. *Journal of Building Engineering*, **89**, Article ID: 109294. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109294>
- [40] Liu, W., Li, Y., Tang, L. and Xing, F. (2021) Modelling Analysis of Chloride Redistribution in Sea-Sand Concrete Exposed to Atmospheric Environment. *Construction and Building Materials*, **274**, Article ID: 121962.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121962>
- [41] Duan, A., Jin, W. and Qian, J. (2010) Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Stress-Strain Curves of Unconfined and Confined Concrete. *Materials and Structures*, **44**, 1309-1324. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9702-9>
 - [42] 杨文武, 杜蓬娟, 范伟, 等. 海工磨细矿渣混凝土的冻渗性与孔结构研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2134-2138, 2153.
 - [43] 孔靖勋. 冻融和海水侵蚀耦合作用下大掺量粉煤灰混凝土的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
 - [44] Liu, Y., Chen, Y.F., Wang, W. and Li, Z. (2016) Bond Performance of Thermal Insulation Concrete under Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, **104**, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.040>
 - [45] 高恒, 杨天琪. 海水海砂再生粗骨料混凝土强度影响因素的试验研究[J]. 建材与装饰, 2019(1): 33-35.
 - [46] 王昂. PVA 纤维增强海水海砂水泥基复合材料力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2021.
 - [47] 夏建云. 碳纤维掺料下混凝土力学性能与抗冻性能研究[J]. 江苏建材, 2024(4): 36-38.
 - [48] 李钢粮, 简嘉宇, 宋钰莹, 等. 冻融环境下 SFCB 与玻璃纤维膨胀剂增强海水海砂混凝土力学和粘结性能研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(5): 62-70.
 - [49] 张腾腾, 王传林, 张宇轩, 等. 粉煤灰掺量对海水海砂高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1677-1688.
 - [50] 关国浩, 王学志, 贺晶晶, 等. 耐碱玻纤增强海水海砂混凝土力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(6): 48-53, 59.
 - [51] Liu, J., An, R., Jiang, Z., Jin, H., Zhu, J., Liu, W., *et al.* (2022) Effects of W/b Ratio, Fly Ash, Limestone Calcined Clay, Seawater and Sea-Sand on Workability, Mechanical Properties, Drying Shrinkage Behavior and Micro-Structural Characteristics of Concrete. *Construction and Building Materials*, **321**, Article ID: 126333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126333>
 - [52] Tong, L., Zhao, J. and Cheng, Z. (2021) Chloride Ion Binding Effect and Corrosion Resistance of Geopolymer Materials Prepared with Seawater and Coral Sand. *Construction and Building Materials*, **309**, Article ID: 125126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125126>
 - [53] Yang, B., Xie, T., Yu, Y., Zheng, Y. and Xu, J. (2022) Mechanical Properties and Environmental Performance of Seawater Sea-Sand Self-Compacting Concrete. *Advances in Structural Engineering*, **25**, 3114-3136. <https://doi.org/10.1177/13694332221119863>
 - [54] Kryzhanovskiy, V., Avramidou, A., Orlowsky, J. and Spyridis, P. (2023) Self-Compacting High-Strength Textile-Reinforced Concrete Using Sea Sand and Sea Water. *Materials*, **16**, Article 4934. <https://doi.org/10.3390/ma16144934>
 - [55] Tjaronge, M.W., Irmawaty, R., Adisasmita, S.A., Amiruddin, A. and Hartini, (2014) Compressive Strength and Hydration Process of Self Compacting Concrete (SCC) Mixed with Sea Water, Marine Sand and Portland Composite Cement. *Advanced Materials Research*, **935**, 242-246. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.935.242>
 - [56] Ge, L., Feng, Z., Sayed, U. and Li, H. (2023) Research on the Performance of Seawater Sea-Sand Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **409**, Article ID: 133921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133921>
 - [57] 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.
 - [58] 卞立波, 宋少民, 李飞. 海砂混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(2): 11-14.
 - [59] Limeira, J., Agullo, L. and Etxeberria, M. (2010) Dredged Marine Sand in Concrete: An Experimental Section of a Harbor Pavement. *Construction and Building Materials*, **24**, 863-870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.011>
 - [60] Liu, W., Cui, H., Dong, Z., Xing, F., Zhang, H. and Lo, T.Y. (2016) Carbonation of Concrete Made with Dredged Marine Sand and Its Effect on Chloride Binding. *Construction and Building Materials*, **120**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.011>
 - [61] 林敏, 吴海英, 张湘伟, 等. 基于深度学习的纳米纤维海水海砂混凝土粘结机理分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1147-1151.