

面向寒旱地区硫铝酸盐水泥耐磨砂浆的性能研究

叶 弯

新疆远测工程技术有限公司 新疆 昌吉 831100

摘要: 传统硅酸盐水泥基材料在寒旱地区环境中易出现早期开裂、强度发展缓慢、抗冻性不足及耐磨性劣化等问题。硫铝酸盐水泥 (Sulfoaluminate Cement, SAC) 因其快硬早强、低收缩、高抗渗及优异的抗冻融性能, 成为解决上述难题的潜在优选胶凝材料。本文聚焦于面向寒旱地区的硫铝酸盐水泥基耐磨砂浆, 系统综述了其基本特性, 并深入探讨了其在寒旱环境下的水化机理、力学性能演变规律、抗冻融耐久性、干缩开裂行为以及耐磨性能的影响因素与协同机制。通过分析矿物掺合料、化学外加剂、骨料级配及养护制度等关键组分对砂浆综合性能的调控作用, 提出了针对寒旱环境的硫铝酸盐水泥耐磨砂浆优化设计策略。最后, 展望了其在未来寒旱地区基础设施建设中的广阔应用前景, 旨在为提升寒旱地区工程结构的服役寿命和安全性提供理论支撑与技术参考。

关键词: 硫铝酸盐水泥; 耐磨砂浆; 寒旱地区; 抗冻融性; 干缩开裂; 耐久性

引言

寒旱地区广泛分布于我国西北、东北及青藏高原等地, 其中尤以新疆为代表的西北寒旱区气候条件尤为严酷——不仅具备极端低温 (北疆冬季最低温可达 -45°C), 冻融循环频繁 (年均120-180次), 昼夜温差大 (山区单日温差超 35°C), 还要同时兼顾腐蚀性介质的侵蚀、高水头流体携推移质泥沙水流与悬移质泥沙共同作用于混凝土表面冲磨等多因素耦合作用。这类极端环境对建筑材料的耐久性提出了极高要求。水利、交通及工业建筑表层结构在此环境下, 受多重作用易出现表面问题, 影响工程安全与寿命。传统硅酸盐水泥基砂浆在寒旱地区存在诸多瓶颈, 如低温下强度发展慢、冻融易损伤、易开裂等。硫铝酸盐水泥 (SAC) 因快硬早强、抗渗抗冻等特性, 能弥补其短板。但直接用于耐磨砂浆仍有问题, 后期强度增长有限, 耐磨性提升关键, 且对原材料和养护条件敏感, 不当设计会导致体积稳定或强度问题。因此, 需系统探讨寒旱地区SAC耐磨砂浆性能, 明确其演变规律, 建立优化设计方法。

1 硫铝酸盐水泥的基本特性与水化机理

1.1 基本组成与矿物特性

硫铝酸盐水泥熟料的主要矿物相为无水硫铝酸钙 ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$, 简称为 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$) 和 β 型硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 简称为 $\beta\text{-C}_2\text{S}$), 此外还含有少量的游离石灰 ($f\text{-CaO}$)、方镁石 (MgO) 及铁相固溶体。其中, $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 是决定SAC快硬早强特性的关键矿物, 其含量通常在55%-75%之间。 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 则负责提供后期强度。与OPC熟料相比, SAC熟料的烧成温度更低 (约 $1250\text{-}1350^{\circ}\text{C}$), 能耗更低, 且生产过程中 CO_2 排放量也相对较少。SAC在

粉磨时需掺入适量的调凝剂, 最常用的是天然二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。石膏的种类和掺量对SAC的凝结时间和强度发展有决定性影响。适量的石膏可以延缓 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 的过快水化, 保证正常的施工性能, 而石膏掺量不足或过多都会导致速凝或假凝等异常现象, 因此精确控制石膏的品质与掺量是确保SAC性能稳定的关键。

1.2 水化反应与产物

SAC的水化过程主要由 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 和 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化反应主导。 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 与石膏迅速反应, 生成大量的针棒状钙矾石 (AFt) 晶体和氢氧化铝凝胶 ($\text{Al}(\text{OH})_3$)。钙矾石晶体在水泥石早期形成致密的骨架结构, 这是SAC获得高早强和低渗透性的根本原因, 而氢氧化铝凝胶则填充于孔隙之中, 进一步提高了硬化体的密实度。相比之下, $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化速率要慢得多, 其水化产物为水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶和少量的氢氧化钙 (CH), 这部分反应为SAC提供了持续但相对平缓的后期强度增长^[1]。值得注意的是, SAC水化过程中几乎不产生或仅产生极少量的CH, 这使其具有优异的抗硫酸盐侵蚀能力。同时, 由于水化初期大量AFt的生成伴随着体积膨胀, SAC浆体在硬化初期表现出微膨胀性, 这一特性有助于补偿塑性收缩, 减少早期开裂风险, 对于在干燥环境中施工尤为重要。

2 寒旱环境下硫铝酸盐水泥耐磨砂浆的关键性能探讨

2.1 力学性能与早期强度发展

SAC最突出的优点之一是其卓越的早期力学性能。在标准养护条件下, SAC砂浆1天抗压强度可达 30MPa 以上, 3天强度可超过 50MPa , 远高于同龄期的OPC砂浆。这一特性对于寒旱地区水利工程中容易收到冲磨破坏的混凝土部位至关重要, 因为它能够极大地缩短工期, 实

现快速修补。即使在0℃左右的低温环境中，SAC仍能保持较快的水化速率和强度增长，而OPC在此温度下几乎停止水化。砂浆的耐磨性与其表面硬度和整体强度密切相关，高强致密的结构能有效抵抗磨料的切削、冲击和疲劳破坏。因此，SAC砂浆凭借其高早强特性，从源头上为其优异的耐磨性能奠定了坚实的基础。研究表明，在相同强度等级下，硫铝酸盐水泥（SAC）基砂浆的耐磨性通常显著优于普通硅酸盐水泥（OPC）基砂浆。这一优势主要源于SAC基砂浆独特的材料特性：其水化产物以钙矾石和单硫型硫铝酸钙为主，形成的微观结构更为致密，孔隙率更低；同时，SAC与骨料之间的界面过渡区（ITZ）更加紧密，界面粘结力更强。

2.2 抗冻融耐久性

抗冻融性是衡量材料在寒区服役能力的核心指标。冻融破坏的本质是饱水材料内部孔隙水结冰时体积膨胀约9%，对孔壁产生巨大压力，反复循环最终导致材料剥落失效。SAC砂浆之所以具有优异的抗冻性，主要归功于其独特的微观结构。首先，SAC水化生成的大量AFt晶体能有效填充毛细孔，使得硬化体总孔隙率显著低于OPC，且孔径分布更细小、更均匀。这种细小的孔隙不易被水完全充满，即使结冰，产生的膨胀压力也较小。其次，致密的微观结构极大地阻碍了外界水分向内部的渗透，降低了材料的饱和度，从根本上减少了可冻水的含量。再者，早期水化形成的AFt带来的微膨胀效应有助于闭合初始微缺陷，提高了结构的整体性和抵抗内部应力的能力。大量实验数据表明，经过300次甚至500次快速冻融循环后，SAC砂浆的质量损失率和动弹性模量损失率均远优于国家标准限值，表现出极佳的抗冻耐久性，这使其成为寒区工程的理想选择。

2.3 干燥收缩与抗裂性能

寒旱地区的极度干燥和大风环境会加速砂浆表面水分的蒸发，导致严重的塑性收缩和干缩，进而引发开裂。OPC砂浆因水化产物CH的存在和较高的自收缩，干缩值通常较大。相比之下，SAC砂浆的干缩性能更为优越。一方面，SAC水化不产生CH，而CH是OPC干缩的重要来源之一；另一方面，早期水化形成的AFt带来的微膨胀效应，可以在很大程度上抵消后续干燥收缩变形。此外，SAC良好的工作性允许采用更低的水胶比，从而直接减少可用于蒸发的自由水量，进一步抑制收缩^[2]。尽管如此，在极端干燥条件下，SAC砂浆仍可能发生干缩，而一旦表面出现微裂缝，将显著削弱材料的抗冲磨性能——因为裂缝成为混凝土表层最薄弱的区域，在水流、砂石颗粒的持续冲刷磨蚀作用下极易扩展和剥落，

从而加速冲磨破坏进程。

耐磨性是此类砂浆的核心功能属性，其优劣直接决定了工程的服役寿命。SAC砂浆的耐磨性主要受强度、骨料性能、界面过渡区（ITZ）状态及表面状况等因素的综合影响。高强度是高耐磨性的前提，而SAC砂浆恰恰具备这一优势。骨料作为砂浆的骨架，其自身的硬度、粒径、级配以及与胶凝材料的粘结强度对耐磨性有着决定性的作用。选用莫氏硬度高、压碎值低的坚硬骨料，并通过优化级配实现最大堆积密度，是提升耐磨性的关键路径。此外，SAC与骨料之间形成的ITZ通常更为致密，这得益于其低水胶比和AFt的填充效应，从而增强了骨料在抵抗磨损时的锚固作用，避免了骨料在磨耗过程中被轻易拔出。最后，一个光滑致密的表面能有效减少与磨料的接触面积和摩擦阻力，也是保障高耐磨性不可或缺的一环。

3 面向寒旱环境的性能优化策略

3.1 矿物掺合料的协同作用

合理掺加矿物掺合料是改善SAC砂浆综合性能的有效途径。优质粉煤灰的“滚珠效应”可显著改善新拌砂浆的工作性，其微弱的火山灰活性虽不足以主导早期强度，但能参与后期反应，细化孔隙，降低水化热，并进一步减少干缩，但其掺量必须严格控制，以免过度延缓至关重要的早期强度发展。硅灰则展现出截然不同的作用机制，它具有极高的火山灰活性和微集料填充效应，掺入少量（5%-10%）便能显著提高砂浆的密实度、强度和耐磨性，尤其能强化脆弱的骨料-浆体界面过渡区（ITZ），然而硅灰会大幅增加体系的需水量和自收缩倾向，因此必须与高效减水剂复配使用，以平衡其负面影响^[3]。偏高岭土作为一种高活性矿物掺合料，能与SAC水化产生的少量CH反应，生成更多C-S-H和铝胶，进一步优化微观结构，提升后期强度和整体耐久性，为砂浆的长期性能提供保障。

3.2 化学外加剂的精准调控

化学外加剂在SAC砂浆的性能调控中扮演着精准“手术刀”的角色。聚羧酸系高性能减水剂（PCE）是实现低水胶比高流动性SAC砂浆的基础，但必须选用与SAC相容性良好的专用型号，否则可能引发异常凝结。在寒区应用中，适量引入微小、独立、稳定的气泡是提升抗冻性的经典且有效的方法，这些气泡为冻胀水提供了宝贵的“缓冲空间”，能极大缓解冻胀压力，但含气量必须精确控制在3%-5%的黄金区间，过多的气泡会牺牲强度和耐磨性，得不偿失。在极寒条件下施工，可考虑复合使用无氯早强剂（如甲酸钙）和有机防冻剂，以确保

砂浆在负温下能正常水化并获得必要的早期强度，但需特别注意某些防冻组分（如亚硝酸盐）可能对SAC的稳定性产生不利影响，必须经过严格的相容性验证。

3.3 骨料的选择与级配设计

骨料作为砂浆的骨架，其选择与设计直接决定了砂浆的物理力学上限。应优先选用玄武岩、辉绿岩等莫氏硬度高、压碎值低、吸水率小的坚硬岩石破碎而成的骨料，以确保其自身具备抵抗磨损的能力。在此基础上，合理的连续级配设计至关重要，它能够最大限度地减少骨料间的空隙，从而在保证新拌砂浆良好工作性的前提下，显著降低胶凝材料浆体的用量，最终实现更高的密实度、强度和耐磨性^[4]。一个经过精心设计的骨料级配，是构建高性能耐磨砂浆的物理基石。

3.4 养护制度的重要性

SAC对湿度非常敏感，其优异性能的发挥离不开科学的养护。虽然其早期水化迅速，但如果在硬化初期（前3-7天）失水过快，会导致表面粉化、强度发展受阻甚至产生塑性收缩裂缝。因此，在寒旱地区施工后，必须立即采取严格的保湿养护措施，如覆盖塑料薄膜、喷涂成膜型养护剂或在温度条件允许时定期洒水。在冬季低温环境下，单纯的保湿已不足以应对挑战，还需结合保温措施（如覆盖保温棉被），形成“保湿+保温”的双重养护体系，以防止新拌砂浆受冻，并为其水化反应提供一个温和稳定的环境，确保其性能得以充分发展。

4 应用前景展望

展望未来，随着国家“一带一路”倡议向高寒高海拔地区延伸，以及西部大开发战略的深入推进，对适用于寒旱地区的高性能建筑材料的需求将日益增长。硫铝酸盐水泥耐磨砂浆凭借其独特的优势，有望在水利等多个领域的基础设施建设与维护中发挥更大作用。在水利水电工程中，可作为寒冷地区输水渠道、渡槽、溢洪道等过流面的抗冲耐磨衬砌材料。当然，要实现更广泛的

推广应用，还需在以下几个方面继续深入研究：一是建立更完善的SAC基材料在力-热-湿多场耦合作用下的长期性能预测模型，以科学评估其百年服役寿命；二是开发与SAC相容性更好、功能更专一的新型外加剂和复合掺合料体系，实现性能的定制化调控；三是制定专门针对寒旱地区SAC耐磨砂浆的设计、施工与验收规范，为工程实践提供权威的技术指南。

5 结语

本文系统探讨了面向寒旱地区的硫铝酸盐水泥耐磨砂浆的性能特点与优化路径。研究表明，硫铝酸盐水泥凭借其快硬早强、低收缩、高抗渗及卓越的抗冻融性能，为解决寒旱地区工程结构面临的早期开裂、强度不足、冻融破坏和耐磨性差等共性难题提供了极具潜力的技术方案。其优异的综合性能源于其独特的水化机理和由此形成的致密微观结构。通过科学掺配矿物掺合料（如粉煤灰、硅灰）、精准使用化学外加剂（特别是引气剂和高效减水剂）、优选坚硬耐磨骨料并优化级配，以及实施严格的早期保湿保温养护，可以显著提升硫铝酸盐水泥耐磨砂浆在寒旱严酷环境下的综合服役性能。未来在水利等领域的基础设施建设与维护中具有广阔的市场前景。持续深化对其长期耐久性机理的研究，并推动相关标准规范的建立，将是促进其大规模应用的关键。

参考文献

- [1]李敏,王子明,崔素萍,等.温度环境对硫铝酸盐水泥水化性能的影响[J].中国建材,2025,(09):124-126.
- [2]魏洋,黄文慧,余松柏,等.硫铝酸盐水泥在砂浆和轻质混凝土中的性能研究[J].中国水泥,2025,(S1):77-80.
- [3]张开阳,吴航,王福会.铝酸盐水泥/硅酸钾复合涂层的高温腐蚀性能研究[J].辽宁化工,2025,54(09):1496-1503.
- [4]朱建彬,钟圣钰,白峰,等.硫酸钠对硫铝酸盐水泥基材料性能的影响研究[J].新型建筑材料,2025,52(06):24-28.