

盐冻环境下水泥混凝土路面耐久性提升技术研究

杨鹏博

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

摘要:在我国北方及高寒地区,道路工程长期受到盐蚀与冻融循环的双重作用,水泥混凝土路面容易出现剥落、开裂、坑槽等破坏,严重影响道路使用寿命与行车安全。研究盐冻环境下混凝土的劣化机理及耐久性提升技术,对于公路建设与养护具有重要意义。本文从盐冻环境特征、水泥混凝土受损机理、影响因素及改进技术等方面进行系统探讨。通过材料优化、外加剂改性、界面增强与结构设计等多维度分析,提出一套适应寒区盐冻环境的混凝土耐久性提升路径。研究表明,采用低水胶比、高致密度的设计理念,结合抗冻矿物掺合料和防盐渗外加剂,可显著提高混凝土抗冻抗盐性能。合理的排水设计与表层防护技术也能有效减缓劣化速率。该研究为寒区道路建设提供了可操作的技术参考,对延长路面寿命、降低维护成本具有积极意义。

关键词:盐冻环境;水泥混凝土;路面工程;耐久性;改性技术

引言

我国北方及西部地区气候寒冷,冬季频繁发生冻融循环,同时道路除冰盐的大量使用,使得混凝土路面处于高盐高湿交替变化的恶劣环境中。盐冻作用导致混凝土表层盐结晶压力增加,内部孔隙水反复冻结膨胀,引起裂纹扩展和结构疲劳。这种多因素耦合作用是导致混凝土路面早期损坏的关键原因之一。传统混凝土设计偏重力学强度,而对环境适应性关注不足,致使在盐冻环境下耐久性显著下降。随着交通强度和载荷水平的提高,道路服役期望值不断延长,对混凝土耐久性的要求愈加严格。为了应对盐冻环境的复杂挑战,需从材料组成、结构设计及维护管理等多方面协同提升混凝土的整体性能。本文基于国内外相关研究成果,结合工程实践经验,对盐冻环境下水泥混凝土路面的劣化机理与防护技术进行系统研究,为寒区道路的设计与施工提供技术依据。

一、盐冻环境下混凝土劣化机理分析

1. 盐冻耦合作用特征

盐冻环境是寒区道路与桥梁混凝土结构劣化的主要外部因素之一,其破坏机理具有显著的耦合性和复杂性。在冬季低温与融雪条件交替作用下,混凝土同时受到冻融循环与除冰盐渗透的双重影响。除冰盐中氯化钠、氯化钙和氯化镁等离子在孔隙水中形成高浓度电解质溶液,改变了孔隙水的冰点与渗透压分布。随着温度周期性波动,盐溶液在孔隙中不断发生结晶—溶解反应,产生反复的晶体膨胀应力和渗透压力,使内部微裂纹逐步扩展

并贯通。同时,盐离子对钢筋表面钝化膜具有破坏作用,导致腐蚀电位升高与界面结合力减弱。长期循环后,混凝土表层出现剥蚀、起壳与失水粉化现象,力学性能明显衰退,结构整体稳定性显著下降。

2. 冻融循环破坏机制

冻融循环是引发盐冻劣化的核心动力过程。混凝土孔隙中的水在结冰时体积膨胀约9%,若孔隙结构致密或排水条件不良,冻结产生的内部压力无法及时释放,易诱发微裂纹扩展与孔隙连通。随冻融次数增加,裂缝逐渐发展为渗透通道,促使盐分深入渗透并加速损伤累积。实验证明,当混凝土饱水度超过80%时,抗冻性能急剧下降,冻融循环100次后相对动弹性模量降低可超过40%。此外,外部环境温度梯度与内外湿度差共同作用,使表层与内部产生应力不均,进一步加快剥落与剥蚀过程。长周期冻融作用下,材料组织由“点状破坏”演变为“面状剥蚀”,耐久寿命显著缩短。

3. 盐化学作用与结构损伤

盐化学作用对混凝土长期耐久性影响深远。氯离子可与水泥水化产物反应生成氯化钙铝酸盐(Friedel's Salt),导致水化产物体积膨胀及结构孔隙率上升;钠离子参与碱—骨料反应形成凝胶状产物,在吸水膨胀过程中产生内应力,促使裂缝进一步扩展。氯盐渗入还会改变孔溶液的碱度,使钢筋表面钝化膜被破坏,引发电化学腐蚀,腐蚀产物体积膨胀后反过来挤压混凝土保护层,加速剥落与剥蚀。长期循环作用下,混凝土经历物理冻胀、化学反应与力学劣化的叠加效应,形成复杂的多因

素耦合损伤机制。这一耦合作用不仅削弱了结构强度与粘结性能，也显著降低了工程寿命与安全储备，是寒区混凝土退化的关键控制因素。

二、影响水泥混凝土耐盐冻性能的主要因素

1. 材料组成与孔隙结构

混凝土的抗盐冻性能与其内部孔隙结构密切相关，孔隙特征直接影响水分迁移和盐分扩散行为。高水胶比和低密实度会导致毛细孔比例增加，使盐水在冻融过程中更容易渗入、结冰并产生膨胀破坏。研究表明，将水胶比控制在0.35以下，可显著降低连通孔隙率，减弱冻胀通道的形成，从而提升抗冻耐久性。在材料组成方面，水泥品种与矿物掺合料的协同作用对孔隙结构的优化具有决定性意义。普通硅酸盐水泥在低温环境中收缩较大，容易引起微裂纹扩展，而矿渣水泥、粉煤灰水泥及复合水泥因水化产物更致密、化学稳定性更强，可显著提高混凝土抵御盐冻侵蚀的能力。此外，适量引入活性硅酸盐类掺合料，可与氢氧化钙反应生成更多的C-S-H凝胶，使孔径分布更加细化、孔壁更加致密，从而有效阻断水与离子的渗透路径。通过对材料组成和孔隙特征的系统优化，混凝土能够形成多级封闭孔结构，实现物理阻隔与化学稳定的双重防护，为提升寒区结构的长期服役性能提供坚实基础。

2. 外加剂与掺合料性能

外加剂与矿物掺合料的合理复配，是改善混凝土抗盐冻性能的关键技术途径。引气剂通过引入均匀分布的微气泡，在混凝土内部形成封闭的气泡系统，可为冰晶生成和体积膨胀提供缓冲空间，降低内应力集中与微裂纹扩展风险。试验研究表明，当引气含量控制在4%~6%范围内时，混凝土在盐冻循环中的相对动弹性模量保持率可提升30%，耐冻融循环次数提高约1倍。同时，防腐剂剂和防渗剂可通过形成疏水膜或晶体填充作用，显著降低氯离子与水分的渗透速率。矿物掺合料如硅灰、偏高岭土、粉煤灰等可有效细化孔径结构，降低渗透系数，提高抗渗与抗盐蚀能力。尤其是硅灰掺量为8%~10%时，可使孔径集中分布在0.05微米以下，大幅度减弱盐分扩散效应。复合掺合体系在多种物理与化学作用的共同影响下，使混凝土形成“致密—吸附—缓释”的防护结构，兼具抗冻性、抗渗性与抗盐蚀性，为寒区道路、桥梁和机场道面提供高可靠性的材料基础与性能保障。

三、盐冻环境下混凝土耐久性提升技术

1. 材料优化与配合比改进

提升混凝土抗盐冻性能的首要途径在于优化原材料

选择与配合比设计。材料层面应优先选用低碱活性骨料，以避免碱—骨料反应引发的微裂纹扩展，从源头上提升结构稳定性。同时，采用高性能水泥与高活性矿物掺合料（如粉煤灰、硅灰、矿渣微粉）能有效改善水化产物结构，降低孔隙率与渗透性。合理调整水胶比、砂率及引气量，是实现抗冻性能与力学性能平衡的关键。引气体系在混凝土内部形成均匀的微气泡网络，可缓冲冰晶生成时的膨胀应力，减轻冻融破坏。实验与工程结果表明，采用粉煤灰与硅灰双掺技术的混凝土，其毛细孔体积较普通混凝土减少约30%，抗盐冻性能提高约40%。同时，应加强施工阶段的质量控制，如优化拌合工艺与振捣密实度，确保气泡分布均匀与水化反应充分，从而形成致密、稳定且抗渗的内部结构。

2. 防护层与表面处理技术

混凝土表层是抵御外界盐分与水分侵蚀的第一道防线，表面防护技术在提升抗盐冻性能中具有重要作用。渗透型密封固化剂可通过与水化产物反应形成硅酸盐凝胶，封闭毛细孔隙，降低水分迁移速率；憎水涂层与聚合物覆膜能在表层形成高疏水性保护膜，有效阻隔氯盐离子渗入；微晶渗透封闭剂则能在保持材料透气性的同时，提高表层密实度和抗裂性。研究显示，经表面封闭处理后的混凝土吸水率可下降50%以上，氯离子扩散系数显著减小。对于服役周期较长的道路和桥面结构，应建立周期性表面再处理机制，通过定期喷涂、机械抛光和裂缝封堵，维持防护层完整性。此外，可结合颜色指示涂层进行老化监测，以判断防护性能衰减周期，从而科学安排维护计划，实现材料性能与使用寿命的协同提升。

3. 结构设计与排水优化

在寒区道路与桥梁工程中，合理的结构与排水系统优化是防止盐冻损伤的关键环节。结构设计阶段应充分考虑雨雪融水及除冰盐溶液的排泄路径，路面纵横坡度应满足快速排水需求，避免水膜滞留造成局部冻胀破坏。基层应采用透水性良好的材料，如级配碎石或透水混凝土，以形成有效的排水通道。对于高寒地区，可设置排盐沟渠或集水管网，降低盐分积聚浓度。结构层组合上，采用复合路面结构或抗冻缓冲层，可有效分散温差应力与盐晶膨胀力，减少界面剥离风险。同时，设计中应合理控制混凝土厚度与钢筋保护层厚度，使结构兼顾力学强度与抗渗性能。监测数据表明，具备完善排水与保温结构的道面，其冻融损伤率可降低40%以上。通过结构设计优化与功能性防护相结合，可实现从“抗

冻损”到“防冻害”的转变，为寒区道路基础设施的长期服役提供坚实保障。

四、工程应用与未来发展方向

1. 工程案例分析与实践效果

在东北、西北典型寒区的高速公路与机场道面工程中，针对长期低温与盐冻环境造成的混凝土劣化问题，工程技术人员通过采用引气复合掺合料与表面防护技术形成的双重抗冻体系，显著提升了结构耐久性。实践证明，引气复合掺合料在混凝土内部形成微细气泡网络，可有效缓解冻融循环中冰晶膨胀应力的集中，从而降低裂缝扩展速率。结合表面硅烷浸渍防护技术，可在混凝土外层形成疏水屏障，阻断氯盐离子与水分渗入通道，实现抗冻与防腐的协同效应。现场监测数据显示，经过300次盐冻循环试验后，改性混凝土质量损失率控制在3%以内，表层剥蚀深度小于1毫米，远优于普通混凝土的10%损失率与3毫米剥蚀值。部分机场跑道段在连续三年使用后未出现明显表层破坏，表明该体系在极端环境下表现出优异的稳定性与施工适应性。通过引气与表面复合防护的协同机制，显著降低了寒区道路早期病害发生率，为提升北方地区公路及机场混凝土结构的耐久性提供了技术支撑与实践依据。

2. 发展趋势与研究展望

近年来，混凝土耐久性研究逐步从材料单一改性向结构全寿命优化与信息化管理转变。随着纳米技术与功能材料的引入，混凝土抗盐冻与自修复能力得到了全新突破。纳米二氧化硅、石墨烯增强剂等材料可改善孔结构分布，显著提升抗渗与抗裂性能；微胶囊与菌体自修复体系的应用，则能在裂缝出现后自动释放修复剂，实现材料性能的自恢复，延长服役寿命。与此同时，数字化与智能化技术的发展为混凝土耐久性监测提供了新手段。基于BIM与物联网的智能监测系统可对温度、湿度、氯离子浓度及应变进行实时采集与分析，为结构运行状态评估与预防性养护提供数据支撑。未来研究应加强环境因子与材料响应的多尺度耦合分析，构建区域化盐冻数据库与寿命预测模型，实现从经验性设计向基于数据驱动的精准确设计转变。通过材料—结构—环境一体化研究路径，将进一步推动寒区道路工程向绿色、智能与可持续方向发展。

3. 综合评价与推广价值

通过典型工程的长期运行监测与实验室验证可以看出，引气复合掺合料与表面防护技术的联合应用在寒区

道路工程中具有显著经济与社会效益。一方面，复合体系的推广有效延长了混凝土结构服役寿命，减少了因冻融破坏带来的养护与重建成本；另一方面，其施工工艺简便、材料易得，能够在现有工程体系中快速推广应用，适应不同环境条件与结构类型。相关项目数据显示，采用该技术的道路五年维护费用下降约30%，结构完好率提高20%以上。同时，该技术体系为制定寒区混凝土耐久性评价标准与防护规范提供了参考依据。未来应进一步推动其在高海拔、高盐分与季节冻土区的适用性研究，并与绿色建材政策相结合，形成标准化、模块化推广体系。综合分析表明，该技术不仅优化了寒区基础设施的耐久性能，也为我国极端环境工程材料技术的创新与国际竞争力提升提供了实践样本与技术支撑。

结束语

盐冻环境对水泥混凝土路面的破坏具有长期性和隐蔽性，其劣化机理复杂，既包括物理冻胀，又涉及化学盐蚀与结构疲劳。提升混凝土耐久性需要从材料、结构与管理等多层面协同创新。通过优化配合比、采用引气与矿物掺合料、加强表面防护及完善排水系统，可显著提高抗盐冻性能，延长道路使用寿命。随着材料科学与监测技术的不断进步，未来应建立更完善的寿命评估与智能养护体系，实现从事后修复向主动防控的转变。盐冻环境下混凝土耐久性提升研究不仅是工程技术问题，更是绿色可持续交通建设的重要组成部分，对推动我国寒区道路工程高质量发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 阙文广. 纤维增强混凝土路面试验与力学性能研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [2] 许婕婷. 硫酸盐-干湿-冻融耦合下自养护路面混凝土性能损伤研究[D]. 佛山科学技术学院, 2023.
- [3] 黄鹏程. 除冰盐环境下超高性能混凝土材料性能损伤及劣化过程研究[D]. 山东建筑大学, 2021.
- [4] 杜增利. 铺洒不同融雪剂环境下路面水泥混凝土抗盐冻耐久性分析[J]. 中国市政工程, 2020, (01): 85-88+98.
- [5] 方灶生. 除冰盐条件下疏水性水泥混凝土路面性能研究[D]. 长沙理工大学, 2018.
- [6] 李志军. 水泥混凝土抗盐冻性能试验研究[D]. 长安大学, 2018.