

严寒地区混凝土抗冻性能提升技术研究

张景森 610324199107082037

摘要

我国东北、西北等高纬度严寒地区冬季气温长期低于零度，混凝土结构受冻融破坏威胁严重，直接影响基础设施使用寿命与运行安全。本文围绕严寒地区混凝土冻融破坏机理展开分析，从原材料优化、配合比设计、外掺改性技术与表面防护四个维度梳理当前主流抗冻性能提升技术，对比不同技术路径的应用效果与适用场景，结果表明复掺矿物掺合料与引气剂的复合改性方案适配多数严寒工程场景，结合表面憎水防护可进一步提升抗冻寿命。研究可为严寒地区混凝土工程抗冻设计与施工提供参考。

关键词

严寒地区；混凝土；抗冻性能；冻融破坏；提升技术

一、引言

在我国黑龙江、内蒙古、新疆等严寒地区，年最低气温可达 -30°C 以下，部分区域冻融循环次数年超过 100 次，混凝土结构在服役过程中，内部孔隙水反复冻结膨胀，会逐步产生内部微裂缝扩张、表层剥落、强度劣化等问题，冻融破坏已经成为严寒地区混凝土结构耐久性失效的主要诱因。近年来随着我国寒区基础设施建设规模不断扩大，交通、水利、市政工程对混凝土服役寿命要求不断提升，如何通过技术手段优化提升混凝土抗冻性能，已经成为寒区混凝土工程领域的研究重点。本文系统梳理冻融破坏的基本机理，总结当前主流的抗冻性能提升技术路径，并分析不同技术的应用优势，为工程实践提供支撑。

二、严寒地区混凝土冻融破坏机理

目前学术界普遍认可的混凝土冻融破坏机理以静水压假说与渗透压假说为核心。静水压假说认为，混凝土内部孔隙中存在自由水，当环境温度降至零度以下时，孔隙内的水发生冻结体积会膨胀约 9%，未冻结的自由水在孔隙扩张压力作用下向周边孔隙迁移，迁移过程产生的静水压力超过混凝土抗拉强度时，就会引发内部微裂缝；随着冻融循环次数增加，微裂缝不断扩张连通，最终导致混凝土

土表层剥落、整体强度下降。渗透压假说则补充，混凝土内部溶液中存在氢氧化钙等可溶性盐，冻融过程中未冻结区域溶液盐浓度不断升高，形成浓度差推动水分迁移，进一步增大孔隙内部压力，加速裂缝生成。

对于严寒地区而言，除了冻融循环本身的作用，低温还会降低水泥基材料水化反应速率，导致混凝土早期强度发展缓慢，内部孔隙结构未形成致密体系，更易受到冻融侵蚀；同时部分区域存在除冰盐、盐碱地下水等耦合作用，冻融破坏速率比普通地区更快，对混凝土抗冻性能要求更高。

三、混凝土抗冻性能提升主要技术路径

3.1 原材料优化技术

原材料是决定混凝土抗冻性能的基础，优化原材料选择是提升抗冻性的首要措施。首先在水泥选择上，应优先选用早期强度发展快、水化热适中、安定性合格的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，避免选用掺合料占比过高的低热水泥，减少早期冻害风险；其次粗骨料应选择质地坚硬、孔隙率低、吸水率小于 1%的花岗岩或玄武岩碎石，控制针片状颗粒含量不超过 10%，避免使用孔隙率较高的风化石料，减少内部可冻结水含量；细骨料优选级配良好的中粗河砂，含泥量控制在 3%以内，过多的泥分会增加混凝土孔隙率，降低抗冻性能。同时对于拌合用水，需要控制氯离子、硫酸根离子含量，避免有害离子加剧冻融过程中的侵蚀作用。

3.2 引气剂应用技术

引气剂是目前提升混凝土抗冻性能应用最广泛的外加剂，其作用机理是在混凝土搅拌过程中引入大量直径在 10~100 μm 之间的封闭微小气泡，这些气泡可以有效缓解冻融过程中孔隙水冻结产生的膨胀压力，为未冻结水提供迁移缓冲空间，避免静水压力超过混凝土强度极限产生裂缝。工程实践表明，在满足混凝土强度要求的前提下，将混凝土含气量控制在 3%~5%范围内，可将混凝土抗冻等级从 F100 提升至 F300 以上，提升效果十分显著。当前引气剂应用需要注意的问题是含气量控制，引气剂掺量过高会显著降低混凝土强度，因此需要根据原材料特性、工程要求的抗冻等级精准控制掺量，同时在浇筑振捣过程中避免过振导致气泡逸出，保证含气量稳定。

3.3 矿物掺合料改性技术

利用粉煤灰、矿渣微粉、硅灰等工业废料作为矿物掺合料改性混凝土，是近年来提升混凝土抗冻性能的主流技术方向。矿物掺合料通过火山灰反应消耗水泥

水化产生的氢氧化钙，生成更多的水化硅酸钙凝胶，细化混凝土内部孔隙结构，将大孔隙转化为对冻融破坏不敏感的微小孔隙，降低孔隙率，提升混凝土密实度。研究表明，单掺 20%~30% 一级粉煤灰可以改善混凝土和易性，降低水化热，提升长期抗冻性能；复掺粉煤灰与硅灰，硅灰的超细颗粒可以填充粉煤灰颗粒之间的间隙，进一步提升密实度，抗冻效果优于单掺方案。矿物掺合料改性技术不仅可以降低混凝土生产成本，还能消纳工业固体废弃物，符合绿色建材发展方向，目前已经在大量寒区工程中得到应用。

3.4 纤维增韧抗冻技术

纤维增韧技术是通过在混凝土中掺入聚丙烯纤维、钢纤维、玄武岩纤维等纤维材料，抑制冻融过程中微裂缝的产生与扩张，提升混凝土抗冻性能。纤维在混凝土内部形成随机分布的三维网络结构，可以有效约束混凝土内部变形，延缓裂缝开展速度，同时减少水分渗透通道，降低可冻结水含量。研究表明，掺入体积率 0.1%~0.2% 的聚丙烯纤维，不会对混凝土工作性能产生明显影响，经过 200 次快速冻融循环后，相对动弹性模量比基准混凝土提升 10%~15%，质量损失率降低 5% 左右。纤维增韧技术通常与引气剂、矿物掺合料技术复合使用，可以进一步提升混凝土抗冻性能，多用于对抗冻要求较高的大体积混凝土、薄壁混凝土结构。

四、不同抗冻提升技术对比与应用建议

不同抗冻性能提升技术的适用场景与性价比存在差异，原材料优化是基础措施，所有寒区混凝土工程都必须严格控制原材料质量，该技术无额外成本增加，是提升抗冻性能的前提；引气剂技术成本低、效果显著，是严寒地区混凝土抗冻设计的常规选项，适用于绝大多数工程场景；矿物掺合料改性技术兼具经济性与环保性，适合大体积混凝土工程，需要注意早期养护，保证水化反应充分；纤维增韧技术成本相对较高，多用于对抗冻等级要求达到 F300 以上的重点工程；表面防护技术适合新建工程的二次防护与既有工程的抗冻加固。工程实践中，通常采用多种技术复合方案，例如采用“引气剂+复掺粉煤灰硅灰”的内部改性方案，配合表层有机硅防护，可以使混凝土抗冻等级满足 F500 要求，适配最严酷的严寒环境。

五、结论

严寒地区混凝土冻融破坏是影响基础设施服役寿命的核心问题，抗冻性能提升需要从原材料、内部改性到表面防护形成系统技术方案。引气剂与矿物掺合料

复合改性技术兼具效果与经济性，是当前应用最广泛的技术路径，结合纤维增韧与表面防护可以进一步提升抗冻性能，满足更高等级的抗冻要求。未来随着寒区工程建设的不断发展，还需要进一步研究冻融与除冰盐、碱骨料反应等多重破坏因素耦合作用下的抗冻提升技术，开发更低成本、更环保的抗冻改性材料，推动严寒地区混凝土工程耐久性不断提升。

参考文献

- [1] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 124-135.
- [2] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土耐久性与使用寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 89-96.
- [3] 李金玉, 曹建国. 引气剂对混凝土抗冻性能影响的研究[J]. 水利学报, 1998(5): 32-36.