

严寒地区铁路桥梁混凝土抗冻技术研究

张 莹

中国铁路哈尔滨局集团有限公司 黑龙江哈尔滨 150000

摘 要：在天气寒冷的地区，铁路桥梁是交通基础设施的重要部分，常年要面对低温下反复冻结和融化的考验。混凝土是建铁路桥梁的主要材料，它抵抗冻结的能力直接关系到桥梁能用多久、是否安全，以及后期维护要花多少钱。现在我国高铁网不断向东北、西北等严寒地区延伸，像哈大高铁、牡佳高铁这些重点工程，对铁路桥梁混凝土的抗冻技术要求越来越高，也越来越紧迫。

关键词：严寒地区；铁路桥梁；混凝土抗冻技术

严寒地区的温度特别低，极端时候能降到零下40℃以下。这种环境下，混凝土内部缝隙里的水会反复结冰、融化。水结冰时体积会膨胀大约9%，产生的压力会让混凝土内部出现细小裂缝；等冰融化了，水又会渗进这些裂缝里，为下一次冻结做好准备。长时间这样反复，混凝土的强度和结实程度会慢慢下降，表面会出现脱落、露出里面的石子，裂缝也会越来越大。严重的话，桥梁可能就没法承受重量，甚至引发安全事故。所以，好好研究严寒地区铁路桥梁混凝土的抗冻技术，对保证铁路运输安全、延长桥梁使用时间、减少维护费用，都有很重要的实际意义。

一、严寒地区铁路桥梁混凝土冻融破坏的影响因素

（一）混凝土自身性能

混凝土本身的性能是影响它抗冻能力的内在原因，其与孔隙结构、强度等级及水灰比等因素有关。

孔隙结构：混凝土中存在大量的孔隙，其尺寸、分布状况及贯通与否直接关系到混凝土的抗冻性。微孔具有较强的致密性，可以有效地阻断水的渗入与流通，降低了冻融过程中因水凝结而引起的膨胀，增强了抗冻性能；而疏松、贯通的孔隙有利于水的渗入，加快了混凝土的冻融破坏。

强度等级：一般情况下，强度等级高的混凝土具有更紧密的内部结构和更好的抗冻性。高强度混凝土孔隙少，具有较致密的组织，能够较好地抵御冻融作用引起的破坏。

水灰比：水灰比是影响混凝土性能的关键指标。水灰比越大，混凝土内部孔隙越多，密实度越低，抗冻能力就越差。因为水多了会在混凝土内部形成很多孔隙，冻融时这些孔隙里的水结冰膨胀，产生的力量会让混凝土出现裂缝、掉皮。

（二）外部环境因素

外部环境是导致严寒地区铁路桥梁混凝土冻融破坏的外在原因，主要包括温度变化、冻融次数、水分多少。

温度变化：严寒地区冬天温度特别低，而且白天晚上温差大。温度大幅变化会让混凝土内部产生热胀冷缩的力量，当这种力量超过混凝土的抗拉能力时，内部就会出现裂缝。同时，低温会让混凝土里的水结冰，体积变大，进一步加重破坏。

冻融循环次数：冻融次数愈多，则愈易发生破坏。随着冻融循环的增多，混凝土的孔隙越来越大，结构越来越松散，其强度及耐久性也随之降低。在寒冷的气候条件下，铁道桥梁的混凝土在一年中经受多次的冻融循环，其结构将逐渐发生破坏。

水分供应：足够的水分是混凝土发生冻融破坏的必要条件。如果混凝土处于干燥环境，就算温度低、冻融次数多，也不会有明显破坏。但严寒地区的铁路桥梁常处于潮湿环境，比如下雨下雪、地下水渗透等，会让混凝土内部一直有较多水分，为冻融破坏创造了条件。

（三）施工质量因素

施工质量对严寒地区铁路桥梁混凝土的抗冻能力也很重要。施工时如果工艺不好、质量把控不严，混凝土就会出现蜂窝、麻面、裂缝等问题，这些问题会成为水分渗透的通道，加速冻融破坏。

搅拌：混凝土拌合是否良好，关系到均匀程度及紧实度。搅拌时间过短或过快都会引起各种成分混合的不均衡，产生离析、泌水等现象，从而使其压实度和抗冻性能下降。

浇筑：浇筑混凝土时，如果速度太快、振捣不充分，内部会出现空洞和孔隙，影响结构性能和抗冻能力。而且如果浇筑时遇到低温，没做好保温，混凝土早期就会

受冻，强度增长慢，甚至出现冻胀破坏。

养护：养护是确保混凝土的强度和耐久性的重要环节。在寒冷的气候条件下，若不进行有效的养护或者方法不当，其表层的水分将迅速挥发而产生干燥收缩，并影响水泥水化，从而导致其强度和抗冻性下降。

二、高性能混凝土材料技术

（一）优化混凝土配合比

采用减小水灰比和添加矿物掺合料的方法来改善其密实度。在水灰比为0.38~0.42的基础上，掺入20%~30%的粉煤灰，或10%~15%的矿渣粉，可以有效地提高其抗冻性能。某铁路桥梁工程用这种配合比配制的C40混凝土，经过500次冻融循环后，相对动弹模量还能保持在80%以上，质量损失率不到3%，比普通混凝土的表现好很多^[1]。

（二）挑选优质骨料

骨料是混凝土中的“骨架”，其品质直接关系到混凝土的抗冻性能。骨料应选用质地坚硬，表面洁净，级配合理的，不得含有软弱颗粒、风化颗粒或其他杂物。针对粗骨料，应将其最大粒度控制在40mm以下，针状物、片状物的比例要小于10%，以此减小骨料与水泥浆之间的弱连接。细骨料以中砂为宜，其细度模数为2.3~3.0，泥率不超过3%，泥块不超过1%，以确保混凝土和易性及密实度。

（三）使用高效抗冻剂

选对合适的抗冻剂，能有效提高混凝土的抗冻性。现在常用的引气型抗冻剂，能在混凝土内部形成很多细小、封闭的气泡，这些气泡可以缓冲冻胀压力，减少冻融带来的破坏。在-30℃以下的严寒地区，通常会用掺量为3%~5%的复合型抗冻剂（按胶凝材料总量计算）。东北某铁路桥梁工程中，在混凝土里加入了4%的引气型抗冻剂，混凝土的抗冻等级达到了F300，满足了当地的使用需求，这座桥用了25年，混凝土结构还保持得很好。

三、混凝土结构防护技术

（一）表面涂层防护

在混凝土表面采用喷涂保护涂料的方法，可以有效地阻止水、盐分等对钢筋的侵蚀，从而改善其抗冻性能。常见的保护涂料有氟碳涂料，聚氨酯涂料等。氟碳涂料具有良好的抗老化性能，涂刷后可在混凝土表层生成密集的保护层，使混凝土的吸水性低于3%。某铁路桥梁用氟碳涂料对桥墩混凝土做防护，用了10年，混凝土表面没有出现明显的冻融破坏痕迹，而没刷涂层的区域已经出现了轻微开裂^[2]。

（二）钢筋阻锈技术

钢筋生锈会导致混凝土保护层脱落，加重冻融破坏，所以做好钢筋的阻锈处理很重要。可以在混凝土里加入钢筋阻锈剂，也可以用环氧涂层钢筋。

某铁路桥梁工程中，在混凝土里加入了2%的氨基醇类钢筋阻锈剂（按胶凝材料总量计算），同时用了环氧涂层钢筋。检测发现，这座桥用了15年，钢筋的锈蚀速率只有0.01毫米/年，远低于普通钢筋0.05毫米/年的锈蚀速率。

四、施工质量控制技术

（一）混凝土浇筑与养护

在严寒的气候条件下进行混凝土的浇注，应严格掌握浇注的温度，通常不能低于5℃。采用热水拌和和对骨料进行预热等措施，使混凝土温度达到规定的标准。混凝土浇筑完成后，要及时做好保温养护，比如盖棉被、铺电热毯，让混凝土在养护期间的温度不低于0℃，养护时间不能少于14天。某铁路桥梁冬季施工时，把骨料预热到20℃~30℃，用60℃~80℃的热水拌合混凝土，让人模温度达到了8℃；同时用电热毯加棉被做保温养护，混凝土28天的强度达到了设计强度的105%，抗冻性能也符合设计要求。

（二）施工缝处理

在混凝土结构中，施工缝由于其较弱，极易形成渗水管道，故应对其进行加固。在对施工缝进行处理时，应先将其表层的浮皮、疏松的骨料剔除，然后铺一层水泥浆或者和混凝土配合比相同的水泥砂浆，再浇筑后面的混凝土^[3]。之前有座铁路桥梁，因为施工缝处理不到位，只用了5年，这个部位的混凝土就出现了冻融开裂的情况，后来不得不做加固处理，增加了工程成本。

五、桥梁结构加固与修复技术

针对已发生冻融破坏的铁路桥梁，应尽快进行补强修补，使其结构功能得以有效地恢复。目前主要采用粘贴碳纤维布和外包钢加固等措施。采用粘贴碳纤维布对混凝土进行补强，其施工简便，效果显著，可改善混凝土构件的受弯和剪切性能，对其抗冻融性能也有较大的改善作用。某铁路桥梁因为桥墩混凝土出现冻融开裂，用粘贴碳纤维布的方式做了加固，加固后桥墩的承载力提高了20%，用了5年，加固部位没出现新的损坏。如果混凝土表面有脱落、开裂等问题，可以用修补砂浆修复。要选抗冻性好的修补砂浆，修复前把有问题的部位清理干净，刷上界面剂，再分层涂抹修补砂浆，养护到规定强度。某铁路桥梁支座附近的混凝土出现了脱落，用抗冻修补砂浆修复后，经过3个冻融周期，修补部位

还是完好的。

六、哈大高铁某桥梁工程案例

哈大高铁经过我国东北严寒地区，冬天最低温度能到 -35°C ，冻融循环很频繁。这个工程在桥梁混凝土施工时，用了高性能混凝土配合比（水灰比0.40，加入25%的粉煤灰和12%的矿渣粉），同时加入了4%的引气型抗冻剂，混凝土的抗冻等级达到了F300。

施工过程中，严格控制混凝土入模温度（不低于 5°C ），采用热水拌合、预热骨料的方法，浇筑后用棉被加电热毯做保温养护。另外，还在桥梁桥墩和梁体的混凝土表面刷了氟碳防护涂层。这座桥投入使用到现在已经10年，经过多次冻融循环，混凝土结构没出现明显的冻融破坏，结构性能稳定，能满足铁路运营的要求。

七、严寒地区铁路桥梁混凝土抗冻技术发展趋势

（一）新型抗冻材料的研发与应用

在我国北方寒冷地区的高速铁道桥梁，其防冻防护技术的研究与应用将是重大的发展趋势。今后应重点研究开发新型抗冻剂、高性能混凝土及纳米防护材料，以提升混凝土的抗冻性能与耐久性。例如，研制不含氯盐的环保型防冻剂，以减少对钢筋的侵蚀，减少对环境的破坏；研究开发轻型、高效的混凝土，在降低自身重量的基础上，增强其抗地震、抗冻性能；研发新型的纳米防护材料，通过对其进行改性，制备出具有优异特性的新型结构，以达到增强混凝土耐水、抗冻的目的。

（二）智能化监测与评估技术的应用

智能化监测与评估技术将为严寒地区铁道大桥的抗冻融性能研究和工程应用奠定基础。将传感技术应用于混凝土的温度、湿度、应力和应变等方面，实现对混凝土的温度、湿度、应力和应变的实时监控，及时掌握冻融损伤情况；通过大数据及人工智能等手段，构建基于多源信息的冻融破坏预报方法，为混凝土抗冻性能的动态评价与预警提供科学依据。在此基础上，通过检测与评价，对其进行适时的养护与维修，以达到提高其使用年限的目的。

（三）绿色环保抗冻技术的发展

随着人们环保意识的提高，发展绿色环保抗冻技术会成为必然趋势。研发和应用抗冻技术时，要注重保护环境，减少污染。比如，用工业废渣、建筑垃圾等做混凝土的掺合料或骨料，实现资源循环利用；研发环保型抗冻剂和防护材料，减少对土壤、水源和空气的污染；优化施工工艺，降低施工时的能源消耗和废弃物排放，实现铁路桥梁绿色建筑。

（四）跨领域技术融合与标准化完善

今后，抗冻技术将呈现跨领域交叉的趋势，例如，

将土木工程、材料科学、人工智能等交叉学科相结合，研究出更加有效的防冻措施。比如，利用3D打印的方法制备桥梁混凝土构件生产，通过精准控制打印参数，实现对混凝土内部组织的优化，降低气孔，从制造源头上提高抗冻融性能。另外，目前不同地区和项目的抗冻技术标准也不尽相同，因此，急需尽快制定出一套针严寒地区不同级别的铁路桥梁的抗冻指标、材料选择和施工工艺要求，使抗冻技术应用更规范、更高效，避免因标准不统一导致的工程质量差异。

（五）低成本抗冻技术的推广

在保证抗冻效果的前提下，低成本抗冻技术的研发和推广也会成为重要趋势。目前部分新型抗冻材料和技术因成本较高，难以在中小项目中普及。未来可通过优化材料配方、改进生产工艺、规模化应用等方式降低成本，比如研发“工业废渣+常规材料”的复合抗冻掺合料，既利用废弃物降低原料成本，又能保证抗冻性能。同时，还可总结成熟项目的低成本抗冻方案，编制简易施工指南，让更多施工团队能便捷、经济地应用抗冻技术，推动严寒地区铁路建设降本增效。

结束语

通过采用高性能混凝土（配合比优化、抗冻剂添加）、混凝土结构保护（表层涂层、钢筋阻锈）、严格的施工质量监控和高效的结构补强修补等措施，可显著提升铁路桥梁混凝土的抗冻性，并显著提升其使用寿命。从工程实例可以看到，采取的防冻技术措施具有良好的实用价值，完全能够适应我国严寒气候条件下的铁道桥梁建设要求。随着我国铁路工程不断向寒冷区域发展，对其抗冻性能提出了更高的要求。在今后的工作中，应对其机理进行深入研究，研制出高性能的抗冻材料，例如：新型复合抗冻剂和高性能防护涂料；在此基础上，构建基于智能技术的轨道交通桥梁结构抗冻性能在线监控与评价体系，实现对冻土环境下的冻融损伤的早期预警与维修，为我国北方严寒地区铁路桥梁的安全运行奠定基础。

参考文献

- [1] 魏荣华, 张康健, 张志强. 冻融环境混凝土配合比优化试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(04): 1211-1218+1227.
- [2] 龚泳帆, 贾梦晓, 孙钦举, 等. 混凝土表面涂层防护性能试验研究[J]. 混凝土, 2025, (07): 236-239+243.
- [3] 邓晓刚. 道路桥梁施工中高性能混凝土的应用分析[J]. 汽车周刊, 2025, (11): 89-91.