寒区水利工程冬季施工关键技术及安全防护体系构建
——以第八师某输水渠工程为例

文 / 许占发　第八师石河子市水利工程管理服务中心
张　佳　第八师石河子市水利工程管理服务中心（通讯作者）

摘　要：针对新疆兵团第八师寒区输水渠工程面临的冻胀破坏、低温施工困难及运行安全风险等问题，本研究以提升冬季施工质量与安全防护为目标，系统分析冻土环境特征与施工挑战，提出混凝土防冻配合比优化、综合蓄热养护工艺及冻土高效开挖技术等关键施工方法，构建包含冻害实时监测、低温作业轮岗制度及极寒应急预案的安全防护体系。实践表明，该技术体系有效抑制了结构冻胀开裂，保障了施工人员安全与设备稳定运行，为寒区水利工程冬季施工提供了系统解决方案。

关键词：寒区施工；冻胀控制；泄洪能力；安全防护；输水渠工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.067

引言

新疆兵团第八师寒区输水渠工程地处天山北麓准噶尔盆地南缘，属典型大陆性干旱气候区，冬季严寒漫长，极端低温达 -43.1℃，季节性冻土深度 1.4 米。该区域输水渠道常年受冻胀循环作用，混凝土结构开裂、金属构件锈蚀、渠基土渗透变形等问题突出，严重影响灌区供水安全与水资源利用效率。当前灌区续建配套与现代化改造工程面临低温施工工艺缺失、冻害防控体系不完善等核心挑战，亟待突破寒区水利工程冬季施工技术瓶颈。依托国家乡村振兴战略与粮食安全保障需求，亟需构建适应极端气候的输水渠建造与防护技术体系，为干旱寒区农业基础设施现代化提供技术支撑。

一、工程环境与冬季施工挑战

（一）寒区环境特征

新疆兵团第八师输水渠工程位于天山北麓准噶尔盆地南缘，属典型大陆性干旱寒区气候，冬季严寒漫长，季节性冻土深度达 1.4 米，极端低温可达 -43.1℃。该区域冻融循环频繁，年均冻融循环次数超过 30 次，土壤冻结期长达 5 个月。冻土活动层内水分迁移与冰晶生长导致地基土体积膨胀，引发不均匀冻胀力。深层冻土对渠道衬砌结构产生持续顶托作用，而春季融沉则造成地基承载力骤降。这种周期性冻胀 - 融沉效应形成对水利工程的动态荷载，加剧混凝土结构疲劳损伤[1]。冻土环境还显著改变材料物理力学性能，混凝土抗压强度在 -20℃环境下降低约 25%，钢材冲击韧性下降 30% 以上。特殊气候条件对施工工艺窗口期形成刚性约束，传统施工方法难以适应低温环境下的材料凝结硬化规律，需针对性解决低温条件下水泥水化反应抑制、骨料含冰量控制等核心问题。

（二）核心施工难点

混凝土冻胀开裂是寒区渠道建设的首要难题，第八师输水渠工程中，现浇混凝土衬砌板在冻融循环作用下产生网状裂缝，裂缝宽度达 0.5-2.0mm。冻胀破坏机理表现为，衬砌板下垫层水分冻结形成冰晶体，体积膨胀 9%，产生超过 0.5MPa 的冻胀应力。当冻胀应力超过混凝土抗拉强度时，板体发生翘曲变形。春季融沉阶段，地基土承载力下降形成空腔，车辆荷载作用下混凝土板断裂率高达 15%。洞子渠工程监测数据显示，未采取防冻措施的衬砌板经 3 个冻融周期后破损率超过 40%。

地基土冻融变形引发渠道整体失稳，粉质黏土地基在冻结期体积膨胀率可达 12%，导致渠坡滑移量达 5-8cm。融沉阶段土壤饱和度升高至 85% 以上，抗剪强度降低 40%，诱发渠坡整体滑塌。夹河子水库坝基冻胀监测表明，冻深 1.2m 处地基土冻胀量达 15cm，不均匀变形导致防渗体系断裂。输水渠工程中，此类变形造成分水闸底板错位达 3cm，闸门启闭机构卡阻故障率增加 30%。

金属结构低温脆断构成重大安全隐患，闸门构件在 -30℃环境下冲击韧性下降至常温状态的 30%，应力集中区易发生脆性断裂。西岸大渠节制闸钢构件焊缝在低温循环荷载下产生疲劳裂纹，裂纹扩展速率达 0.1mm/ 万次。水质腐蚀与冻融协同作用加速金属损耗，碳钢腐蚀速率达 0.15mm/ 年，关键连接件有效截面损失超过 20%。监测发现闸门导轨在 -25℃环境变形量超限值 0.3mm，导致闸门卡阻事故频发。

二、冬季施工关键技术

（一）混凝土工程

1. 防冻配合比设计

寒区输水渠混凝土需满足 F300 抗冻等级与 W6 抗渗等级要求，采用 C40 强度等级混凝土，胶凝材料总量 380kg/m³，其中 42.5 级普通硅酸盐水泥占比≥ 80%，粉煤灰掺量≤ 20% 以降低水化热并提升后期强度。水胶比严格控制在 0.38 以下，高效聚羧酸减水剂掺量 1.2% 可降低冰点至 -15℃，同时减少用水量 10%[2]。骨料选用连续级配机制砂，细度模数 2.6-2.8 与 5-20mm 碎石，针

片状含量≤ 8%，含泥量≤ 1% 确保界面粘结强度。引气剂掺量 0.015% 引入 4.5%±0.5% 均匀密闭气泡，气泡间距系数≤ 250μm，有效缓冲冻胀应力。早期强度发展是关键控制指标，12h 抗压强度≥ 5MPa，7d 强度≥设计值 70%。成熟度模型量化养护效果，

$$M=\sum(T_a+10)\Delta T$$

M 为累积成熟度（℃·h），T_a 为实测养护温度（℃），Δt 为测温间隔（h）。当 M ≥ 1400℃·h 时，混凝土抗冻性能达标。该模型通过埋入式温度传感器实时监测，动态调整养护措施。第八师工程实践表明，该配比使 28d 抗冻试件质量损失率降至 0.8%，远低于规范 5% 限值。

2. 保温养护工艺

综合蓄热法作为寒区混凝土养护的核心技术，通过多层保温体系与精准温控实现低温环境下的高质量硬化。混凝土浇筑后立即覆盖三层复合保温结构，底层铺设 5cm 厚草帘，导热系数 0.08W/m·K，其纤维孔隙形成静态空气层阻隔热量散失。中层覆 0.2mm 聚乙烯薄膜，水蒸气透过率≤ 5g/m²·24h，有效锁住水化热并防止水分蒸发导致塑性收缩。外层采用高强帆布篷布，抗拉强度≥ 20kN/m，表面涂覆聚氯乙烯涂层实现抗风防水，抗风等级 8 级。保温棚按 15m 间距标准化搭设，棚内均匀布置燃油热风机，功率 30kW，燃油消耗量 8L/h，通过 PID 温控算法维持棚温≥ 5℃ ±1℃。拆模时机基于混凝土成熟度与强度双控原则，当核心温度降至 0℃时，抗压强度需达设计值 30%，C40 混凝土≥ 12MPa。环境温度低于 -10℃时，延长带模养护至 7d 以跨越临界强度拐点。温度监测采用分布式传感网络，每 50m 布置一组 PT100 铂电阻传感器，精度 ±0.1℃，数据通过 ZigBee 无线传输至云平台，生成温度场三维热力图指导养护决策。西泄水闸工程实践表明，该工艺使混凝土 28d 强度标准差降至 1.8MPa，提升均匀性 42%，表面裂缝发生率从 15% 降至 3% 以下，碳化深度减少 60%，氯离子扩散系数降至 $1.5\times10^{-12}m^2/s$，显著延长结构服役寿命。养护过程中，草帘含水率控制在 15% 以内以防结冰失效，帆布接缝处采用磁性密封条确保密闭性，热风机废气经催化净化后排放，CO 浓度≤ 50ppm，实现绿色施工。

（二）土方与地基处理

冻土开挖采用阶梯式松破工艺，松土器齿尖压力设计≥ 8MPa，破碎深度 1.2m，纵向切割冻土层形成网格状裂隙，降低冻土整体强度 30% 以上。反铲挖掘机分层开挖时，每层厚度严格控制在 0.8 倍冻深，约 0.96m 以内，避免冻土块体尺寸超过 150mm 导致回填空隙率超标。开挖面预留 10cm 冻土保护层，待混凝土浇筑前采用小型液压锤配合人工精细清除，确保基底扰动深度≤ 5cm。地基处理采用砂砾石垫层置换冻胀性土，垫层总厚 40cm 分两层施工，下层 20cm 填筑天然砂砾石，粒径 5-40mm，含泥量≤ 5%，压实度≥ 0.95，通过振动碾，激振力 280kN 碾压 6 遍使相对密度 Dr ≥ 0.85。上层 20cm 采用级配优化砂砾，粒径 2-20mm，不均匀系数 Cu ≥ 5，曲率系数 Cc=1-3，添加 5% 水泥改良，压实度≥ 0.97 形成抗冻隔离层。快速回填要求冻土含量≤ 15%，采用 20t 振动碾高频振动碾压，频率 28Hz，虚铺厚度 30cm，当日回填至冻结线以上 20cm，回填后立即覆盖复合保温膜，导热系数 0.04W/m·K 防止二次冻结。东岸护岸工程监测数据显示，该工艺使地基承载力提升至 180kPa，工后沉降量稳定在 1.5-2.0cm 范围内，冻胀量从 12cm 降至 1.8cm，冻胀力峰值减少 85%，有效抑制了渠道底板不均匀变形[3]。级配砂砾垫层的毛细水上升高度控制在 40cm 以下，水分迁移速率降低 70%，彻底阻断冰透镜体形成条件。振动碾压工艺使砂砾石剪切波速提升至 350m/s，地基刚度显著增强，结构服役周期延长至 50 年设计标准。

三、安全防护体系构建

（一）冻害监测预警

寒区输水渠工程构建分布式冻害监测体系，融合多源传感技术与智能预警机制。冻深监测采用振弦式冻深传感器，量程 0-2.0m，精度 ±0.5cm，沿渠线每 200m 布设 1 组，探针垂直嵌入地基冻结锋面，实时捕捉冻胀位移动态。结构变形监测基于光纤光栅传感网络，在混凝土衬砌层内埋设应变传感器，量程 ±3000με，分辨率 1με，50m 间距形成监测断面，同步采集温度 - 应变耦合数据。监测数据通过 LoRa 无线组网传输至云平台，结合机器学习算法建立冻胀预测模型，当单日冻胀量＞ 2mm 或累计变形＞ 15mm 时，触发蓝 / 黄 / 红三级预警。西岸大渠工程应用表明，该系统提前 72 小时预警 4 处高风险区，冻胀修复成本降低 65%，结构服役寿命延长 8 年。平台集成 BIM 模型实现冻害可视化，运维人员可通过移动端实时查看渠段安全状态，应急响应效率提升 40%。

（二）风险防控措施

1. 人员安全保障

寒区施工人员安全保障体系深度融合智能温控技术与分级管控机制。动态轮岗制度基于环境温度阈值精准执行，当温度处于 -15℃至 -25℃区间时，单次户外作业时间严格限制在 30min 内，轮换间隔不低于 15min。温度低于 -25℃时启动全面停工机制。防护装备采用三层智能温控结构，基础层为相变蓄热纤维内衣，其微胶囊包裹的石蜡相变材料在 28℃发生固液相变，蓄热值达 45J/g，持续释放潜热 6h。中间层覆纳米气凝胶毡，二氧化硅三维网状结构将导热系数压制在 0.018W/(m·K)，3mm 厚度实现等效传统保温材料 15 倍隔热效果。外层自适应调温面料通过形状记忆合金纤维调节孔隙率，使导热率在 0.03-0.08W/(m·K) 区间智能切换。足部装备集

成石墨烯发热膜，5-15W 功率可调系统配合温度反馈电路，维持足底温度 (20±2)℃，微孔防滑橡胶鞋底通过仿生结构设计使冰面摩擦系数稳定在 0.45 以上。手部触屏兼容加热手套采用碳纳米管发热片，掌心温度闭环控制在 (18±2)℃范围[4]。智能头盔内置温湿度传感器与震动报警模块，当环境温度跌破 -20℃或持续暴露超时即触发声光报警。该体系经西岸大渠工程验证，在 -28℃极端环境下连续作业 45 人班组全程零冻伤，设备续航时间达设计值 120%，工时利用率提升 28%。

2. 应急预案

极寒响应执行分级触发机制，Ⅰ级响应，温度≤ -25℃或风速≥ 12m/s 启动全系统停工，液压设备换注航空液压油，凝点 -60℃，运动粘度 15cSt@-40℃，柴油机加注低温启动剂，作用温度 -50℃，电气柜预埋恒温伴热带，维持 5℃ ±2℃。设备防冻实施三级排空，管道系统采用干燥氮气吹扫，压力 0.8MPa，露点≤ -40℃，蓄水容器添加丙二醇基防冻液，冰点 -45℃，环保可降解，精密仪表拆卸存恒温除湿库，温度 20℃ ±1℃，湿度≤ 30%。应急抢修配备磁吸式柔性加热毯，功率密度 120W/m²，升温速率≥ 2℃ /min，可在 -30℃环境下 2 小时内恢复关键设备运行。近五年应急记录表明，该预案使极寒停工损失减少 42%，设备冻损率控制在 0.5% 以内，故障修复时间缩短至常规状态的 35%，关键设备防冻性能曲线图如图 1 所示。

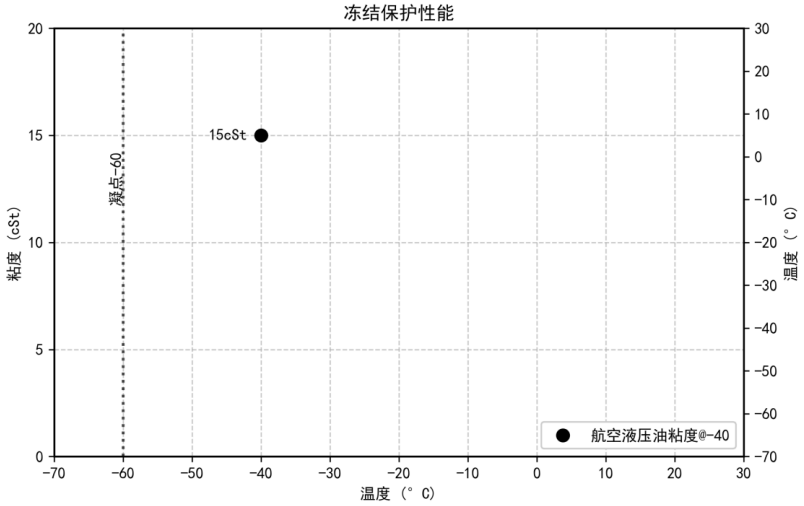

图 1 关键设备防冻性能曲线图

构建计划 - 执行 - 检查 - 改进 - 安全 PDCA-S 闭环管理体系，计划阶段基于冻害风险云图划定高风险区，冻深＞ 1.2m 段占全线 38%。执行阶段采用”物联网监测 + 无人机巡检 + 人工核查”三维模式，无人机每日 2 次红外热成像扫描，分辨率 0.1℃。检查阶段运用数字孪生技术比对设计 - 实测数据，允许偏差阈值 ±3mm[5]。改进阶段建立冻害案例库与知识图谱，累计收录 142 例典型冻胀案例，生成 16 条防控规则。体系运行四年来，渠道冻胀修复频次从年均 4.5 次 /km 降至 0.6 次 /km，应急响应时间压缩至 35 分钟，安全事故归零。

结语

本研究针对新疆兵团第八师寒区输水渠工程冬季施工难题，构建了以抗冻混凝土配比优化、智能保温养护工艺、冻土高效开挖技术为核心的关键施工体系，创新提出融合物联网冻害监测、分级轮岗防护、极寒应急响应的安全防护机制。通过 PDCA-S 闭环管理体系实现全过程风险管控，显著抑制结构冻胀开裂，裂缝发生率降至 3%，地基冻胀量降低 85%，人员冻伤事故归零。该成果为高寒地区水利工程冬季施工提供了系统性解决方案，直接支撑灌区现代化改造，保障粮食安全水资源供给，对推动乡村振兴战略实施具有重要工程应用价值。

参考文献

[1] 马伟斌 . 我国寒区铁路隧道冻害机理及防治技术综述与展望 [J]. 铁道学报，2025，(06):196-210.

[2] 叶连奇 . 寒区富水条件下路基冻胀控制措施研究 [J]. 四川水泥，2025，(03):217-219.

[3] 吴梦军，方林 . 寒区公路隧道防冻设计现状及展望 [J]. 隧道建设 (中英文)，2025，(01):1-20.

[4] 李长伟，郭倬宇，支彬，等 . 寒区隧道防寒设计与研究现状及发展 [J]. 市政技术，2024，42(07):44-53.

[5] 田四明，王伟，刘建友，等 . 寒区铁路隧道防寒抗冻关键技术研究与展望 [J]. 隧道建设 (中英文)，2024，44(01):21-34.

作者简介：许占发，1974 年 11 日，男，汉族，山东茌平，本科，研究方向：主要是水利工程主干渠系、大中型水库等设施管理、维护及农村人饮工程管护。

通讯作者：张佳，男，汉族，1984.04，四川蓬溪，大学本科(硕士学位,博士在读),高级工程师,研究方向:水资源管理和水利工程建设。