高寒地区水利水电工程冬季施工技术及保温措施

高兴双
新疆兵团水利水电工程集团有限公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：高寒地区独特的气候条件给水利水电工程冬季施工带来严峻挑战，低温、冻融循环、风雪天气及有效工期短等因素不仅影响混凝土浇筑与养护质量，也威胁土石方开挖填筑、地基处理及金属结构安装等环节的作业安全与工程耐久性。本文系统分析了高寒环境下冬季施工面临的主要技术难题，从混凝土施工保温、土石方工程防冻、基础处理抗冻、金属结构焊接防护及施工组织管理等方面，梳理了当前适用的冬季施工技术体系与保温防护措施。研究表明，高寒地区冬季施工需要构建覆盖材料、工艺、设备和组织管理的全方位保温防护体系，将被动御寒与主动温控相结合，在保障施工质量与安全的前提下合理延长年度有效施工期。

关键词：高寒地区；水利水电工程；冬季施工；保温措施；混凝土养护

引言

新疆高寒地区分布广泛，包括阿尔泰山、天山山脉、昆仑山脉及帕米尔高原区域，这些区域蕴藏着丰富的水能资源，是国家能源战略布局和西部开发的重要依托。然而新疆地区冬季漫长严寒，极端气温可达-40℃以下，年有效施工期往往不足六个月，严重制约了水利水电工程的建设进度和投资效益。随着水电开发向高海拔高纬度地区持续推进，冬季施工从过去的“不得已而为之”逐渐演变为“必须面对的常态”。水利水电工程冬季施工面临的核心矛盾在于：低温环境对建筑材料性能、施工工艺条件和人员作业能力均产生显著负面影响，而工程本身对施工质量和安全性的要求却丝毫不能降低。混凝土冻害、土体冻胀、焊接脆裂、水管冻裂等问题若防控不当，将给工程留下难以弥补的质量隐患。

1 高寒地区冬季施工的环境约束与技术难点

1.1 气候特征与施工窗口分析

高寒地区冬季气候的显著特征表现为：气温低且持续时间长，日均气温低于-5℃的时段通常持续四至六个月；温差大，日温差可达15℃以上，剧烈的温度变化引发材料热胀冷缩效应显著；冻融循环频繁，在冬春交替期尤为突出，对混凝土和岩土体构成反复损伤；风雪天气多，低温和风沙共同作用加速了裸露工作面和新浇混凝土的热量散失。这些气候条件的叠加效应导致常规施工方法难以直接套用，必须根据当地具体气候参数（历年极端最低温、平均低温天数、最大风速、冻深等）制定差异化的冬季施工方案[1]。有效施工窗口的识别与利用是冬季施工组织的前提，通常将日平均气温稳定在-5℃以上的时段定义为可施工时段，并根据不同作业类型设定更为严格的起始温度阈值。

1.2 低温对各施工环节的影响机制

对于混凝土工程，低温延缓了水泥水化反应速率，当混凝土温度降至冰点以下时，内部孔隙水结冰膨胀将破坏水泥石结构，造成不可逆的强度损失和耐久性劣化。对于土石方工程，冻结使土体强度短期内升高但融化后强度骤降，冻胀作用还可能导致已填筑体产生不均匀变形。对于地基处理，基岩和土层的冻结增加了开挖难度，灌注桩和帷幕灌浆施工中浆液可能因低温而改变流变性能。金属结构的低温焊接面临冷裂纹风险，钢材的脆性转变温度若高于环境温度，则存在脆性断裂隐患。此外，施工机械设备在低温下启动困难、润滑性能下降、液压系统响应迟缓等问题也显著影响施工效率和安全。

1.3 冬季施工的综合难度评价

从质量维度看，低温环境下质量缺陷具有隐蔽性和滞后性——冻害往往在春融后才暴露，此时返工成本极高且延误后续工期。从安全维度看，冰雪路面、低温冻伤、设备倾覆等安全风险显著升高，施工人员在高寒环境下的生理耐受能力和操作精准度均有所下降。从经济维度看，冬季施工需要投入额外的保温材料、加热设备和防护设施，人工和机械台班费用也相应增加，单位工程量成本较常温施工上浮明显。因此，冬季施工技术的选用必须在技术可行性、质量保障性和经济合理性之间进行综合权衡，避免不计成本的盲目施工。

2 混凝土施工冬季施工技术与保温措施

2.1 混凝土原材料预热与配合比调整

混凝土冬季施工的首要措施是保证入模温度满足水化反应要求。对拌合水进行加热是最经济有效的升温手段，热水温度一般控制在40℃~60℃之间，以不超过80℃

为宜，防止水泥假凝。骨料的加热可采用蒸汽排管或热风加热方式，应特别注意避免骨料中含有冰屑或冻块。水泥不宜直接加热，宜通过提高拌合水温间接提升胶凝材料温度。配合比方面，冬季施工应适当降低水胶比，减少游离水含量以降低结冰风险；可掺入早强剂、防冻剂、减水剂等外加剂，其中防冻剂能降低拌合水的冰点，使混凝土在负温条件下仍能继续水化[2]。但外加剂的品种和掺量必须通过适配试验确定，严禁过量使用导致后期强度倒缩或碱骨料反应风险增加。

2.2 混凝土运输与浇筑过程中的保温

运输车辆应采取罐体保温包裹措施，必要时在罐体外加装电加热装置或采用热水冲洗罐体预热。运输路线应尽量缩短，减少途中热量损失，运输频次应保证连续浇筑，避免施工冷缝。浇筑前应对模板和钢筋进行预热，清除表面积雪和冰霜。浇筑作业宜选择在白天气温相对较高的时段进行，入模温度应满足设计要求，一般不低于5℃。浇筑过程中应迅速振捣密实，减少混凝土在空气中的暴露时间。对于大体积混凝土冬季浇筑，还应重视内外温差控制，防止表面温度骤降引发温度裂缝。

2.3 养护阶段的综合保温措施

蓄热法是最基础的措施，依靠混凝土自身水化热和外部保温层的共同作用维持正温养护，适用于环境温度不低于-15℃的情况。保温材料可选用厚层草袋、岩棉被、聚苯乙烯泡沫板或充气保温棚，覆盖层数根据热工计算确定，应确保混凝土表面温度与内部温差不超过允许值。当蓄热法不能满足要求时，需采用外部热源加热法，包括暖棚法、蒸汽加热法和电热法。暖棚法是在结构周边搭设保温棚架，内部设置热风机或火炉加热，棚内温度宜保持在5℃~15℃；蒸汽加热法适用于预制构件或局部养护，但需控制升温速率不超过10℃/h，防止表面开裂。无论采用何种方法，都应埋设温度传感器进行实时监测，养护期间混凝土内部温度不宜超过65℃（大体积混凝土应控制在设计允许范围内），降温速率应控制在2℃/d以内。

2.4 拆模条件与后续防护

冬季混凝土拆模时间应较常温施工大幅延长，除满足设计强度要求外，还需考虑混凝土内外温差和表面与环境的温差。一般而言，拆模时混凝土强度应达到设计强度的75%以上，且表面温度与环境温度之差不宜超过20℃。拆模后应对混凝土表面立即进行临时覆盖保温，防止寒潮袭击造成表面温度骤降。对于暴露在外的结构，越冬期间应采取长周期保温防护措施，在表面铺设高效保温材料并压实固定，防止雨雪渗透和反复冻融。埋入式测温元件的监测应持续至混凝土温度与环境温度达到热平衡后方可停止。

3 土石方工程与基础处理的冬季施工技术

3.1 土石方开挖的防冻与解冻措施

冬季土石方开挖面临的主要问题是表层土体和基岩的冻结硬化，增加了开挖难度和设备损耗。对于冻结深度不大的情况，可采用大功率破冻设备（如破冻犁、冲击锤）随挖随破。对于冻深较大的区域，宜在开挖前采取预防性防冻措施，即在拟开挖面覆盖保温材料或喷洒防冻覆盖剂，减少冻深。解冻方法包括蒸汽解冻（通过蒸汽排管或蒸汽枪对冻土进行热融）、电热解冻（将电极插入冻土层通电加热）和火烧解冻（适用于小范围或紧急情况，但存在安全风险）。解冻后的土方应随融随挖，防止再次冻结，开挖后应及时进行下道工序施工或采取保温覆盖。

3.2 土石坝填筑的冬季施工限制与工艺调整

土石坝冬季填筑的技术难点在于负温条件下填筑料的压实特性和层间结合质量难以保障。一般而言，当环境温度持续低于-5℃时，不宜进行黏土心墙的填筑作业，因为冻土料无法达到设计压实度，且春融后可能产生不均匀沉降。对于透水性坝壳料，可在适当条件下进行有限度填筑，但需严格控制填筑料中不得混有冻块，铺筑厚度应较常温减薄，碾压遍数宜适当增加[3]。层间结合面的处理尤为关键，已压实层表面若已冻结，必须清除冻结层并采取喷水湿润（热水）或涂刷黏土浆后再铺新料。越冬期间，已填筑坝面应进行防冻覆盖，防止冻胀裂缝和雨雪侵入，覆盖材料宜选用不透水保温材料并压实边缘。

3.3 地基处理与灌浆工程的冬季作业要点

地基处理中的灌注桩施工在冬季需采取泥浆保温措施，防止泥浆冻结导致循环中断和孔壁坍塌。混凝土灌注宜采用热拌混凝土，灌注后桩头部位应及时覆土或包裹保温，防止桩头冻裂。帷幕灌浆和固结灌浆在低温条件下应调整浆液配比，适当掺入早强剂和减水剂，保持浆液温度不低于5℃。灌浆管路应包裹保温材料，防止输送过程中浆液温度下降[4]。灌浆结束后，孔口应及时封闭并保温养护，防止孔内浆液冻胀破坏孔壁岩体。对于化学灌浆，低温条件下浆液黏度增大、渗透性下降，一般不宜在5℃以下施工，若必须作业则需采用低温型浆材并将施工环境加热至许可温度。

4 金属结构安装及其他辅助作业冬季施工措施

4.1 低温焊接工艺与焊前焊后热处理

水利水电工程中的压力钢管、闸门及预埋件等金属

结构在冬季安装时，焊接质量受低温影响显著。当环境温度低于焊接工艺评定所规定的最低温度时，必须采取焊前预热措施。预热温度应根据钢材牌号、板厚和约束程度确定，一般不低于100℃~150℃，预热范围应覆盖焊缝两侧各100mm以上，预热方式可采用火焰加热或电加热。焊后热处理（后热）是防止冷裂纹的关键措施，焊后应立即进行消氢处理，加热温度一般为200℃~350℃，保温时间不少于1小时。焊接过程中应搭设防风保温棚，棚内温度宜保持在5℃以上，相对湿度控制在80%以下。焊接材料（焊条、焊丝、焊剂）应存放在恒温干燥箱中，随用随取，避免受潮。

4.2 机械设备的低温防护与运行管理

施工机械设备在低温环境下的可靠运行是冬季施工的基础保障。设备选型时宜选用带有低温启动装置和驾驶室取暖系统的机型。每日作业前应进行充分预热，发动机冷却系统应加注防冻液，蓄电池应采取保温措施或采用大容量低温蓄电池。液压系统应更换为低温液压油，管路包裹保温套，作业前进行低负荷空载运转至油温正常。设备停放区域宜设置在有遮挡的位置，长期停放的设备应放空冷却水和燃油系统，或采取循环加热保温措施。建立设备冬季运行专项检查制度，增加每日检查频次，重点检查制动系统、转向系统和液压系统的灵敏性。

4.3 施工供水系统与现场临时设施的防冻

施工供水系统在冬季极易发生冻结堵塞，应采取深埋（置于冻层以下）、包裹保温材料和电伴热等措施进行防护。管线布置应避免死水段，停水时应彻底排空管内积水。取水口和水泵房宜采用暖棚保温，必要时设置辅助加热设备维持正温。施工现场临时道路应备有除雪设备和防滑材料，冰雪天气后及时清理路面。施工现场的临时设施（办公用房、宿舍、仓库）应采用保温结构设计，设置供暖系统，确保人员作业环境和材料储存条件满足要求。易燃保温材料和加热设备的使用应制定严格的防火安全措施，配备充足消防器材。

4.4 冬季施工组织管理与应急预案

在施工计划编制阶段，应将冬季施工准备期提前纳入总体进度安排，预留足够的材料采购、设备调试和方案评审时间。施工过程中应建立气温预警机制，与当地气象部门保持密切联系，提前掌握寒潮、大风、暴雪等极端天气信息，据此调整作业安排。当气温超过施工允许下限时，果断启动停工预案，对已施工部位进行紧急防护后有序撤离。冬季施工专项方案应明确各工序的起始温度条件、保温措施的技术要求、质量检测的特殊方法和应急处置流程。应组织冬季施工专项培训和应急演练，使全体作业人员熟悉冬季施工的操作规程、安全要点和应急响应程序，提高全员冬季施工的质量安全意识和操作技能。

5 结语

高寒地区水利水电冬季施工是多学科交叉的系统工程。本文梳理混凝土、土石方等维度的低温约束与技术对策，指出核心在于被动防护（材料改良、保温覆盖）与主动温控（加热、增温）的有机结合，以创造必要工艺条件。强调冬季施工并非常温施工的简单“加厚”，而应建立匹配高寒环境的专门化技术体系。具体需从勘察设计阶段纳入冬施考量，预留可行性；施工阶段建立全链条温控体系，将温度视同强度指标；管理层面制定理性决策机制，科学平衡施工与停工，避免盲目抢工。未来，随着高海拔、高纬度水电开发深入，该技术将向智能化监控、高性能低温材料及自适应工艺方向发展，为工程建设提供坚实支撑。

参考文献

[1]朱伯芳,张国新,许平.高寒地区混凝土坝冬季施工温控防裂研究进展[J].水利水电技术,2023,54(2):1-12.

[2]张子明,王成,赵吉坤.低温环境下混凝土水化热调控与养护技术综述[J].建筑材料学报,2022,25(6):1115-1124.

[3]刘晶玉,李宁,程国栋.高寒区土石坝冬季施工关键技术及工程应用[J].水力发电学报,2022,41(8):76-87.

[4]党发宁,刘云贺,王铁行.冻土地区水利工程地基处理关键技术研究[J].岩土工程学报,2023,45(1):45-56.