

寒区水电工程冬季施工技术难点与经验总结

何 联

第八师石河子市水利工程管理服务中心 新疆 乌鲁木齐 832000

摘要：高纬度、高海拔地区的水电工程，其建设周期往往不可避免地会跨越漫长的冬季。严酷的低温环境对混凝土工程、土石方工程、金属结构安装及施工组织管理等构成了严峻挑战，若处理不当，极易引发工程质量缺陷、安全事故乃至工期严重延误。本文立足于寒区水电工程建设的实际需求，系统梳理了冬季施工面临的核心技术难点，深入剖析了低温对混凝土性能、土体物理力学性质、焊接作业及人员设备效能的影响机理。在此基础上，从混凝土温控防裂、冻土开挖与回填、钢结构焊接质量保障、施工组织优化及安全风险防控等多个维度，全面总结并阐述了行之有效的关键技术措施与管理经验。研究表明，通过构建“主动保温+精准温控+精细管理”的综合技术体系，并辅以科学严谨的施工组织与应急预案，能够有效克服寒区冬季施工障碍，确保工程在极端气候条件下的高质量、高效率、安全有序推进。本文的研究成果可为类似寒区重大基础设施工程的冬季施工提供理论参考与实践指导。

关键词：寒区水电工程；冬季施工；混凝土温控防裂；冻土施工

引言

在全球能源转型与可持续发展背景下，水能作为清洁、可再生能源，在国家能源战略中地位重要。我国水能资源丰富，部分集中于青藏高原、东北、西北等寒区。寒区水电开发对优化区域能源结构、促进地方发展意义重大。但寒区冬季漫长且严酷，给水电工程建设带来技术难题。传统观念认为冬季应避免主体施工，可大型水电项目工期紧、任务重，完全避开冬季施工几乎不可能，且部分关键线路工作若冬季不推进，后续工序将连锁延误。因此，寒区水电工程冬季施工是亟待解决的关键课题。寒区冬季施工是多学科交叉的系统工程，低温会改变建筑材料性能，威胁施工工艺、设备效能及人员安全。如混凝土负温下强度难增长、易生微裂缝；冻土坚硬，开挖效率低且解冻后地基承载力可能骤降；金属材料韧性下降，焊接接头易生冷裂纹。问题若不解决，后果严重。鉴于此，本文深入剖析寒区水电工程冬季施工全过程，归纳技术难点，基于国内外成功案例总结综合应对策略与实践经验。论述遵循“问题识别—机理分析—对策提出—经验总结”脉络，为寒区水电及其他基础设施冬季施工提供可复制、推广的解决方案。

1 寒区冬季施工主要技术难点分析

寒区冬季施工的复杂性源于低温这一核心环境因子对工程各要素产生的全方位、深层次影响。其技术难点主要体现在以下几个方面：

1.1 混凝土工程：温控防裂的严峻挑战

混凝土作为水电工程的基石，其冬季施工质量直接关系到整个工程的安全与寿命。低温环境首先会严重抑

制水泥的水化反应，当温度降至 5°C 以下时，反应速率急剧放缓，一旦低于冰点，自由水结冰将使水化过程基本停滞，导致混凝土早期强度无法按预期发展，难以满足拆模和后续工序的时间节点要求。更为致命的是早期冻害风险，新拌混凝土在达到临界抗冻强度之前若遭受冻结，内部水分结冰膨胀所产生的巨大压力会对其微观结构造成不可逆的损伤，形成大量微裂缝，从而永久性削弱其强度、密实度及耐久性。即便成功规避了冻害，混凝土在硬化过程中仍深陷温度应力裂缝的泥潭。为了保温防冻，必须采取加热措施维持其内部正温，而外部却是极寒环境，巨大的内外温差在表面诱发强大的拉应力；同时，大体积混凝土内部因水化热积聚而温度远高于表面，形成内热外冷的梯度，同样催生贯穿性或深层裂缝。这些裂缝不仅是结构的薄弱环节，更是侵蚀性介质侵入的通道，将加速钢筋锈蚀和混凝土劣化，对工程的长期服役性能构成严重威胁。

1.2 土石方工程：冻土开挖与地基稳定的双重困境

寒区冬季普遍存在的季节性冻土层，为土石方工程设置了天然屏障。冻土因其内部冰晶骨架的支撑作用，强度和硬度远超未冻土，变得异常坚硬，使得常规的挖掘机、推土机等设备作业效率极低，磨损剧增，强行施工成本高昂且效果不佳。虽然爆破法可用于破碎冻土，但在邻近已建结构或精密设备区域，其带来的振动和飞石风险往往难以接受^[1]。更为棘手的是冻土地基的稳定性问题。若在冻土上直接进行基础施工，待来年春季气温回升，冻土融化，冰晶转化为自由水，土体颗粒间的有效应力瞬间丧失，导致承载力急剧下降，发生不均匀沉

降,即“融沉”现象,这将对上部建筑物的安全构成直接威胁。此外,冬季土方回填也面临严峻挑战,回填料若含有冰块或处于冻结状态,直接压实后,随着温度升高冰块融化,会在回填体内留下空洞或软弱夹层,造成回填体密实度不足,后期沉降过大,进而影响上部结构的整体稳定性和使用功能。

1.3 金属结构与机电设备安装:焊接与材料性能的考验

水电站内大量的闸门、压力钢管、桥机梁等钢结构,其现场焊接质量是保障工程安全运行的生命线。低温环境对此构成了严峻考验,其中最突出的风险是焊接冷裂纹(延迟裂纹)。这种裂纹通常在焊后数小时甚至数天才出现,其产生是低温加剧了三大不利因素共同作用的结果:一是低温促进了焊缝及热影响区脆硬马氏体组织的形成;二是焊接电弧分解空气中的水分,使氢原子溶入熔池,冷却时在脆硬组织中富集产生巨大内应力;三是焊接接头在拘束状态下冷却收缩形成的拉应力。这三者的叠加效应在低温下被显著放大,使得冷裂纹的敏感性成倍增加。与此同时,许多金属材料本身在低温下会发生韧脆转变,冲击韧性大幅下降,增加了在动态荷载下发生无预兆脆性断裂的风险,这对水轮发电机组等关键设备及其支撑结构的安全性提出了更高要求。此外,低温还直接影响施工设备的正常运行,润滑油和液压油粘度剧增导致机械启动困难、运行阻力增大、磨损加速,而橡胶、塑料等密封件则会硬化收缩,引发密封失效等一系列连锁问题。

1.4 施工组织与人员设备管理:效率与安全的平衡

超越具体的技术层面,冬季施工对整体的施工组织 and 现场管理提出了前所未有的高要求。低温环境下,无论是作业人员还是机械设备,其工作效率都显著降低。工人需穿戴厚重的防寒服,动作笨拙且体力消耗巨大;机械设备则因功率输出不足和故障率升高而拖慢进度,这使得在有限的冬季窗口期内完成既定目标变得异常艰难。与效率下降相伴的是安全风险的急剧攀升。冰雪覆盖的作业面和道路极易引发滑倒、坠落等人身伤害事故;为取暖而广泛使用的火炉、电热设备若管理不善,极易酿成火灾;在封闭的保温棚内,燃烧不充分产生的CO等有毒气体若通风不良会迅速积聚,造成群体性中毒窒息事件。极寒天气本身也是对作业人员健康的直接威胁,冻伤、失温等职业健康风险不容忽视^[2]。所有这些因素都极大地增加了后勤保障的压力,从搭建保温棚、供应热源到保障道路畅通、提供防寒物资,都需要投入数倍于常温的资源,导致施工成本大幅攀升,而恶劣天气引发的交通中断更可能随时打乱整个施工部署。

2 关键技术对策与实践经验总结

针对上述技术难点,经过长期的工程实践与技术攻关,业界已形成了一套较为成熟的技术对策与管理经验。其核心思想是“预防为主、主动干预、精细管理”。

2.1 混凝土工程温控防裂综合技术体系

确保寒区混凝土冬季施工质量,关键在于构建一个覆盖从原材料到成品养护全链条的主动温控体系。该体系始于原材料的预热与配合比的精心设计,通过蒸汽、热水或热风对砂石骨料进行预热,使其温度达到5-10°C以上。需注意加热均匀,避免局部过热导致骨料爆裂。将拌合水加热至40-60°C(最高不超过80°C,以防水泥假凝),是提升混凝土出机温度最直接的手段。同时,优先选用早期水化热高、水化速度快的早强型水泥(如P·O42.5R)。同时,必须掺加高效减水剂以降低水胶比,并复配引气剂,引入适量微小、封闭的气泡,为水分结冰提供“缓冲空间”,提高混凝土的抗冻性。最关键的是掺加防冻剂,其作用是在负温下降低混凝土中液相的冰点,并促进水泥在低温下的水化,使混凝土能在负温环境中继续硬化并达到预期强度。在运输与浇筑环节,混凝土搅拌车罐体应包裹保温材料(如岩棉、橡塑海绵)。浇筑前,必须清除模板和钢筋上的冰雪和污垢,并用热风机或蒸汽对仓面进行预热,确保基岩或老混凝土面温度不低于2°C。尽量缩短运输和浇筑时间,减少热量损失。可采用泵送方式,并对泵管进行全程包裹保温。养护阶段是温控成败的决定性环节,对于大型水电工程,暖棚法是最主流且可靠的选择,通过在浇筑仓号周围搭建封闭保温棚并辅以内热源,为混凝土创造一个稳定、温暖的硬化环境。对于特定部位,也可采用蓄热法或电热/蒸汽养护法。无论采用何种方法,都必须辅以精细化的温度监测,通过在混凝土内部、表面及环境中布设传感器网络,实时掌握温度场变化,并据此动态调整保温或加热策略,严格控制降温速率和内外温差,从而从源头上扼杀温度裂缝的萌芽。

2.2 冻土施工与地基处理技术

应对冻土带来的挑战,需要采取“避、松、换、保”相结合的综合策略。在施工规划上,应尽可能将大规模土方作业安排在非冻结期,若必须在冬季开挖,则可采用装有特制松土齿的推土机对冻土层进行预松,或利用蒸汽针、电热棒对局部区域进行解冻,以提高开挖效率,并做到随挖随运,减少基坑暴露时间。对于地基稳定问题,核心在于防止冻胀和融沉。一种有效的方法是在已完成的基础表面铺设高性能保温材料(如挤塑聚苯板),形成隔热层,阻止地基土冻结,从而一劳永逸地消除冻

害隐患^[3]。另一种根本性措施是换填法,即将基础底面以下一定深度的冻胀性土全部挖除,替换为粗砂、碎石等非冻胀性材料。无论采用哪种方法,完善地表和地下排水系统,降低土体含水率,都是防治冻土病害不可或缺的基础性工作。

2.3 钢结构低温焊接质量保障措施

保障低温环境下钢结构的焊接质量,必须围绕控制“氢、应力、组织”三大致裂因素展开系统性工作。焊前准备至关重要,所有焊材必须经过严格的高温烘干处理,并在恒温保温筒中保存,严防吸潮;同时,必须彻底清理坡口区域的杂质,并根据钢材特性、厚度及环境温度进行充分的焊前预热,以减缓冷却速度。在焊接过程中,必须坚持使用超低氢型焊材,并在保证熔合质量的前提下,合理控制焊接线能量,尽量保持连续施焊,避免中途停顿造成局部过冷。焊后处理是防止冷裂纹的最后一道也是最关键的防线,必须立即对焊缝及热影响区进行后热(消氢处理),通过在250-350℃保温一段时间,促使残余氢充分扩散逸出。后热完成后,还需用保温材料对焊缝进行包裹,实现缓慢冷却,以进一步降低焊接残余应力,最终确保焊接接头的完整性和可靠性。

2.4 施工组织优化与综合保障体系

成功的冬季施工离不开科学、周密且富有弹性的组织管理。这一切始于一份详尽的《冬季施工专项方案》,该方案应在冬季来临前由专家充分论证,明确技术路线、资源配置、安全保障及应急预案。人的因素是核心,必须对全体参建人员进行系统的冬季施工安全与技术培训,并实行人性化的作息制度,配备充足的防寒劳保用品,设立温暖的休息场所,以保障其身心健康与作业效率。设备是生产力的保障,入冬前必须完成全面的检修保养,更换低温专用油液,并建立高效的维修响应机制^[4]。安全是底线,必须构建完善的HSE管理体系,重点防范火灾、中

毒、滑跌等冬季高发事故,尤其要确保保温棚内的强制通风和有害气体监测。最后,应积极拥抱信息化与智能化技术,利用BIM进行施工模拟优化工序,通过物联网实现对关键参数(如温度、设备状态)的远程实时监控,从而将冬季施工从传统的经验驱动转变为数据驱动的精细化、智能化管理模式。

3 结语

寒区水电工程冬季施工是充满挑战的系统工程,其成功实施依赖对低温环境下材料性能演变规律的深刻理解和关键技术的有效集成与创新应用。本文剖析核心难点后总结出关键经验:混凝土工程要建立覆盖全过程的主动温控体系,以暖棚法为核心确保质量;冻土问题需标本兼治,通过合理规划、高效开挖及可靠地基处理规避风险;焊接质量关乎安全,要严格执行技术路线并加强管理控制;科学施工组织是成功基石,需编制专项方案、强化保障、构建体系并拥抱信息化技术。总之,寒区水电工程冬季施工并非不可逾越,坚持“科技引领、精细管理、安全第一”原则,融合技术与组织管理可降低严冬影响。未来,随着新材料、新工艺和智能建造技术发展,寒区冬季施工技术水平必将提升,为高寒地区能源开发等提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 历睿鑫. 水利水电工程特殊季节施工措施分析[J]. 水利电力技术与应用, 2025, 7(19).
- [2] 白栋梁. 水利工程混凝土冬季施工浇筑及养护技术研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2025, 13(29): 147-149.
- [3] 李亚丽. 水利施工中预防混凝土裂缝的措施及方法[J]. 建筑设计与研究, 2025, 6(11).
- [4] 丁钊, 冯海波, 陈柳江. 浅谈高寒高海拔双曲拱坝快速分层施工技术[J]. 四川水力发电, 2025, 44(5): 85-89.