

高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温措施有效性分析

蒋浩

(四川交建)四川蜀道建设工程有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：高原高寒地区冬季气候极端，低温、大风、冻融循环叠加的环境特性，对桥梁混凝土施工质量构成严峻挑战。混凝土水化热释放不足易引发早期冻害，导致多种病害，直接威胁桥梁结构耐久性与服役安全。保温措施作为抵御低温侵蚀的核心手段，其适配性与有效性决定着施工质量管控成效。本文聚焦高原高寒桥梁混凝土冬季施工场景，通过分析高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温的意义，挖掘保温体系与极端环境的适配规律，提出高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温的有效措施，以为同类工程施工质量提升提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：高原高寒地区；桥梁混凝土；冬季施工；保温

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.081

引言

目前我国的公路桥梁工程建设十分复杂，有很多公路和桥梁的工程建设都在一些自然环境较为恶劣的地区，特别是一些高原高寒的地区，混凝土极容易因为受冻而产生问题，无法保证施工质量，甚至会导致施工事故的出现。因此，在环境如此复杂的情况下，须运用更加可靠的冬季保温措施才能弥补这一缺陷。

1 高原高寒桥梁混凝土冬季施工场景概述

高原高寒地区多处于海拔 3000 米以上区域，冬季气候呈现低温持续时间长、昼夜温差剧烈、风雪侵袭频繁的显著特征（如图 1 所示），最低气温常跌破 -20°C ，且伴随强紫外线、低气压等特殊环境因子，形成了桥梁混凝土施工的极端工况。冬季施工阶段，混凝土拌和物运输过程中易受外界低温影响出现温度骤降，浇筑后水化反应速率大幅放缓，若保温措施不到位，极易引发表层冻结、内部温度应力失衡等问题。同时，该区域交通基础设施相对薄弱，保温材料储运难度大，施工机械在低温环境下故障率攀升，进一步增加了现场管控难度。桥梁结构作为交通枢纽核心构件，其混凝土浇筑质量直接关系到整体工程的服役寿命，而冬季施工的环境复杂性与技术局限性，使得保温体系的科学布设与高效运行成为施工质量管控的核心环节。



图 1 冬季施工风雪侵袭频繁

2 高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温的意义

2.1 保障混凝土核心性能，筑牢结构强度基础

高原高寒区域冬季的酷寒气候，会对混凝土水化反应产生强烈抑制作用。保温措施缺失或失效，水泥水化进程将陷入停滞状态，直接造成混凝土强度发育迟缓甚至中断。合理的保温方案能够为浇筑后的混凝土构建稳定的温度环境，保证水化反应持续且充分进行，促使强度按设计要求稳步提升，为桥梁结构的承载安全筑牢物质基础。

2.2 提升结构耐久性，延长桥梁服役寿命

冻融循环交替是高原高寒地区侵蚀桥梁混凝土的关键因素，冬季低温引发的混凝土内部冻胀应力与解冻后的收缩应力反复叠加，会加速微裂缝的产生与扩展。有效的保温措施可显著缩小混凝土内外温差幅度，降低温度应力导致的开裂风险，同时削弱冻融循环对混凝土结构的物理侵蚀，减缓钢筋锈蚀、混凝土碳化等化学劣化过程，保障区域交通基础设施的长期稳定运行。

2.3 规避施工风险，保障工程施工安全

低温环境会导致混凝土拌和物的流动性显著降低，凝结硬化时间大幅延长，容易出现浇筑受阻、振捣不密实等施工难题，进而增加结构内部缺陷的产生概率。保温工作不到位，已完成浇筑的混凝土可能发生早期受冻现象，不仅需要返工处理造成工期延误，还可能在施工过程中引发安全风险。完善的保温体系能够维持混凝土从拌和到养护全流程的工作性能，保障浇筑、振捣等关键工序的顺利实施，减少因材料性能异常导致的质量问题。同时，稳定的作业环境可降低施工机械低温故障、人员冻伤等安全隐患，为冬季施工的有序开展提供坚实保障。

3 保温体系与极端环境的适配规律

3.1 关注多因子耦合特征，实现环境参数精准匹配

高原高寒环境的低温、大风、强辐射等因子并非孤立作用，其耦合效应会加剧对保温体系的侵蚀。适配规律的核心在于以环境参数为基准，构建“温度-风速-辐射”三维匹配模型。针

对-15℃以下低温，需选择导热系数 $\leq 0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的高效保温材料；面对8级以上大风，应强化保温层固定结构的抗风荷载设计；针对强紫外线辐射，需在保温层外侧增设抗老化防护层，通过参数精准匹配抵消多因子耦合带来的保温效能衰减。

3.2 遵循性能动态调控原则，适配环境时序变化规律

高原高寒冬季环境呈明显时序变化，昼夜温差可达20℃以上，冻融循环周期随气温波动缩短。保温体系需建立动态调控机制，在日间利用太阳辐射辅助升温，适当降低主动保温强度。夜间及寒潮来袭时，启动应急保温模块，通过电伴热与保温层叠加提升热防护能力。同时，根据混凝土水化进程调整保温强度，在强度发展关键期维持更高的保温阈值，适配环境与材料性能的双重时序变化。

4 冬季施工保温必要性

G0615线久治（川青界）至马尔康段高速TJ10标段位于马尔康市，属大陆性高原季风气候，山地气候特征显著，高山峡谷与山原地貌交织。项目全线平均海拔3300m，全年平均气温偏低，9月至次年3月气温持续低于5℃，全年0℃以下严寒期超300天，极端低温与频繁大风雪天气叠加，给桥梁混凝土施工带来严峻挑战，冬季施工保温工作至关重要且不可替代。

气候层面，标段内K205+600-K224+300高山峡谷段最为恶劣，山峰海拔超4500m，山顶终年积雪，仅7-8月气温回升至0℃以上，冬季冻融作用强烈，基岩裂隙水发育路段易形成涎流冰，进一步加剧施工难度。区域标准冻深60cm，最大冻深80cm，17m/s以上大风雪年均达40次，霜冻灾害频发。施工周期层面，若因严寒采取半年冬休，将严重延误总工期，增加设备闲置、管理维护等额外成本，直接影响项目投资效益与通车目标实现。

质量安全层面，低温环境易引发混凝土冻害。极低气温会快速流失拌和物初始温度，阻碍水化反应，导致强度增长停滞；内部游离水结冰膨胀还会破坏结构密实性，引发裂缝、表层剥落，降低桥梁承载能力与耐久性。加之标段地处金汤弧形构造带北侧，地质构造复杂，褶皱、断裂发育，不良地质广泛分布，桥梁作为核心承重构件，施工质量直接关乎运营安全。因此，构建科学系统的冬季施工保温体系，是保障质量、推进进度、规避风险的必备前提。

5 高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温的有效措施

5.1 混凝土原材料精准预热，筑牢保温基础防线

原材温度直接决定拌和物初始状态，是抵御早期冻害的关键。遵循“分类管控、梯度升温、精准控温”原则，融合新型保温材料与智能监测技术，实现主动干预与精准调控。

集料采用封闭式智能保温料仓存储，仓内壁铺设纳米气凝胶保温毡（导热系数 $\leq 0.020\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），保温效能为传统岩棉

的2-3倍），适配高原大风环境。料仓根据气温智能切换加热模式：-10℃以下启用“蒸汽+电伴热”双系统，-10℃~5℃单用蒸汽加热，通过温度传感器实时反馈数据，自动调节功率，确保集料入机温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ，杜绝含冰集料导致的温度骤降。料仓入口设自动除冰装置，清除表面冰层，保障拌和质量。

拌和用水采用智能恒温加热水箱，配备变频加热与双监测模块，温度精准控制在40℃-60℃。水箱外层包裹聚氨酯硬泡保温层，减少热量流失，既提升拌和物温度，又避免水温过高引发水泥假凝。

水泥、粉煤灰等胶凝材料存储于干燥密闭智能保温库房，内壁铺设真空绝热板，配套除湿装置（相对湿度 $\leq 60\%$ ），防止吸潮结块。库房设低温预警传感器，温度低于0℃时自动启动电暖器补温，避免水化反应滞后。全流程布设无线温度传感器，数据实时上传管控平台，偏离阈值自动预警，实现远程精准调控。

5.2 拌和与运输全流程温控，维持混凝土工作性能

混凝土拌和与运输阶段是温度损失的关键环节，针对高山峡谷运输复杂的问题，需构建“智能拌和+高效保温运输”体系，确保混凝土运抵现场温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ ，维持良好工作性能。

拌和选用智能保温型强制式拌和机，外层包裹岩棉复合保温层并加装防风罩，减少低温大风干扰。拌和系统搭载温控模块，腔内温度低于15℃时自动电伴热补温。严格遵循“先集料水、后胶凝材料外加剂”顺序，借助热水预拌升温，拌和时间较常温延长20%-30%，保障均匀性与温度稳定。出料口设智能测温记录装置，不达标拌和物严禁出站。

运输采用双层真空保温罐车，内壁铺设聚异氰酸酯保温层，罐口加装密封保温盖与防风圈，阻隔热量流失。罐车配备智能温控终端，实时显示温度，运输中持续搅拌防离析。提前清理路线积雪冰层，规划最优路径缩短运输时间；运输超5km或气温低于-20℃时，加装可拆卸柔性电伴热片，精准弥补温度损失。

建立“出站-到场”双温核查机制，卸料口设测温传感器，数据实时上传。到场温度低于10℃时，立即启动车载蒸汽二次升温或调整外加剂掺量。该体系较传统运输温度损失减少40%以上，避免混凝土浪费，降低成本。

5.3 浇筑过程精细化保温，强化施工环节控温效果

混凝土浇筑过程中，低温与高空强风叠加易导致表面降温过快，采用精细化措施，减少温度流失。

作业面搭建模块化智能保温棚，承台等下部结构采用全封闭钢结构棚，棚体为“双层彩钢板+纳米气凝胶”复合结构，内置智能恒温系统，暖风机与蒸汽暖棚双装置协同工作，确保棚内温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 。桥墩等高空部位，设柔性防风保温围挡（高强度牛津布+保温毡），可折叠吊装，搭配小型暖风机提升局

部温度。

采用分层智能控温浇筑技术,平台预设厚度(30cm-50cm)与间隔时间,缩短暴露时长。上层浇筑后智能振捣设备二次振捣,增强密实性、降低导热阻力。浇筑中用红外智能测温仪实时监测入模及表面温度,数据上传平台,低于8℃时自动预警,通过覆盖电热毯或提升暖棚功率补温。

浇筑完成后立即分层覆盖:内层透气塑料薄膜密封保湿,外层两层阻燃防水岩棉被保温,边角易散热部位加装柔性电伴热条。该措施较传统方式降温速率降低50%,规避表层冻结与裂缝风险。

5.4 养护阶段立体化保温,促进混凝土强度发展

养护是强度发展关键期,针对冬季冻融频繁、低温持久的特点,构建“主动增温+被动保温+智能监测”立体化体系,为水化反应提供适宜温度。

大体积混凝土(承台、墩身)采用“内部循环热水+外部多层保温”模式。内部埋设PE-RT循环水管(30cm×30cm间距),智能温控锅炉提供恒温热水(初凝期40℃-50℃,终凝后20℃-30℃),实现内部温度均匀提升。外部采用“塑料薄膜+高密度挤塑板+防风布”多层包裹,挤塑板紧密贴合结构,极端低温时外侧加装电伴热片,抵御大风破坏。

箱梁、T梁等薄壁构件采用“电伴热+低压蒸汽”复合保温,表面铺设柔性电伴热片并覆盖岩棉保温被密封,养护棚内通入低压蒸汽,智能蒸汽发生器根据温度数据自动调节供应量,确保内外温度≥10℃。该方式较传统蒸汽养护节能30%以上,温度控制更精准。

全养护过程搭载智能温度监测调控系统,混凝土内部、表面及环境布设无线传感器,每30分钟采集数据并通过5G传输至平台。平台内置算法,内部温度低于10℃或内外温差>25℃时自动启动增温装置,高于35℃时调节散热,实现智能精准调控。系统自动生成温度曲线,全程可追溯,确保-20℃极端低温

下混凝土正常水化,7天强度达设计60%以上,28天满足设计要求。

5.5 保温体系动态优化与应急保障,应对极端环境挑战

高原高寒地区冬季气候突变频繁,寒潮、暴雪等极端天气易对保温体系造成冲击,需建立动态保障机制,通过日常巡查优化、极端天气预警、应急处置等方式,提升保温措施的适应性与可靠性。在日常施工中,安排专业人员每日对保温设施进行全面巡查,重点检查保温层的完整性、加热装置的运行状态及温度监测设备的准确性,发现保温层破损及时修补、设备故障立即更换,同时根据环境温度变化调整保温措施参数,如气温降幅较大时增加保温层厚度,风力增强时加固保温层固定结构。建立极端天气预警联动机制,与当地气象部门保持实时沟通,提前获取寒潮、暴雪等天气预警信息,在极端天气来临前24小时启动应急准备工作,包括检查应急保温材料储备情况、调试备用加热设备、加固保温棚与围挡结构等。当极端天气发生时,立即启动应急保温方案,对于已浇筑混凝土结构,在原有保温基础上增设临时电伴热装置或增加保温层层数,确保结构核心温度不低于5℃;对于正在施工的部位,暂停浇筑作业并对已施工部分进行强化保温,同时对施工机械与保温设备采取防冻措施,防止设备损坏。极端天气过后,组织专业人员对保温体系与混凝土结构进行全面检测,评估温度变化对结构质量的影响,根据检测结果调整后续保温方案,通过动态优化与应急保障的双重措施,有效应对极端环境挑战,确保冬季施工保温效果持续稳定。

总而言之,高原高寒地区桥梁混凝土冬季施工保温,是系统性的技术与工程。从原材料预热到应急保障的全流程措施,核心在于构建与极端环境适配的温控体系。只有精准施策、动态调控,才能抵御低温侵蚀,保障结构质量。这不仅是工程安全的底线要求,更是推动高原交通建设高质量发展的重要支撑。

参考文献:

- [1] 范银鹏.高原高寒地区混凝土冬季施工技术分析与研究[J].砖瓦,2021,(09):170+172.
- [2] 柴茂林.高原高寒地区混凝土冬季施工技术分析与研究[J].科技创新与应用,2020,(07):154-155+157.
- [3] 贾洪斌,朱志新,张义博.高原高寒地区混凝土冬季施工技术研究[J].江西建材,2021,(11):163+165.
- [4] 戢敏.高原高寒地区混凝土冬季施工技术[J].工程建设与设计,2021,(07):269-271.
- [5] 高楠瑜.浅谈高原高寒地区水工混凝土冬季施工的质量控制措施[J].福建建材,2022,(05):69-70.