

寒冷地区公路冬季施工技术难点与应对措施

马晓鹏

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：随着我国交通基础设施建设向高纬度、高海拔等寒冷地区不断延伸，公路工程的冬季施工已成为保障项目工期、提升建设效率的关键环节。然而，严寒气候条件对公路工程的材料性能、施工工艺、质量控制及安全管理构成了严峻挑战。本文系统性地分析了寒冷地区公路冬季施工面临的核心技术难点，包括路基冻胀与融沉、混凝土低温性能劣化、沥青混合料摊铺压实困难、以及人员设备安全风险加剧等问题。在此基础上，针对性地提出了涵盖材料改性、工艺优化、保温养护、智能监测及综合管理等多维度的应对措施，并结合工程实例进行了验证。研究表明，通过科学规划、技术创新与精细化管理相结合，能够有效克服冬季施工障碍，确保寒冷地区公路工程的质量、安全与进度目标得以实现。

关键词：寒冷地区；公路工程；冬季施工；技术难点；应对措施；质量控制

引言

我国幅员辽阔，东北、西北及青藏高原等广大区域属于典型的寒冷或严寒地区，其冬季漫长，气温极低，部分地区最低气温可降至-40℃以下。在这些地区进行公路建设，不可避免地会遭遇冬季施工的问题。传统的施工观念往往认为冬季是工程的“休眠期”，但现代工程建设周期紧、任务重，加之部分特殊地质条件（如多年冻土区）反而要求在特定低温时段进行施工以规避热扰动，使得冬季施工从“不得已而为之”转变为一种主动的战略选择。然而，低温环境对公路工程各分项工程的影响是全方位且深刻的。低温不仅直接改变建筑材料的物理化学性质，还会显著影响施工机械的作业效能和施工人员的操作精度，进而对工程质量、安全和成本产生连锁反应^[1]。因此，深入研究寒冷地区公路冬季施工的技术难点，并制定科学、有效的应对策略，对于推动我国高寒地区交通基础设施高质量发展具有重要的理论价值和现实意义。本文旨在系统梳理冬季施工的核心挑战，并提出一套行之有效的综合解决方案。

1 寒冷地区公路冬季施工的主要技术难点

冬季施工的技术难点主要源于低温、冰雪、大风等恶劣气象条件对工程材料、施工过程和结构长期性能的负面影响。

1.1 路基工程：冻胀与融沉的双重威胁

路基作为公路工程的基础，其稳定性直接决定了上部结构的安全与耐久。在寒冷地区，路基土体中的水分是引发病害的根源。当路基土中含有未冻结水时，在负温条件下，水分会持续向冻结锋面迁移并结冰，形成冰透镜体。由于冰的体积比水大约9%，这种体积膨胀会对路基产生巨大的向上推力，导致路面隆起、开裂，严重破坏路面平整度和结构完整性。尤其对于细颗粒含量较高的粉土、黏土，因其毛细作用强，更容易发生严重的冻胀现象。而当春季气温回升，路基中的冰层融化成水，土体含水量急剧增加，强度大幅下降。如果路基排水系统不畅，过量的水分无法及时排出，路基就会在车辆荷载作用下产生不均匀沉降，即融沉。融沉不仅会导致路面凹陷、车辙，还可能引发边坡失稳等次生灾害。在多年冻土区，问题更为复杂，人为热扰动可能导致冻土上限下降，而在冬季施工若保温不当，同样会扰乱冻土原有的热平衡，加剧长期的热融沉降风险，对公路的全寿命周期构成严重威胁。

对路基产生巨大的向上推力，导致路面隆起、开裂，严重破坏路面平整度和结构完整性。尤其对于细颗粒含量较高的粉土、黏土，因其毛细作用强，更容易发生严重的冻胀现象。而当春季气温回升，路基中的冰层融化成水，土体含水量急剧增加，强度大幅下降。如果路基排水系统不畅，过量的水分无法及时排出，路基就会在车辆荷载作用下产生不均匀沉降，即融沉。融沉不仅会导致路面凹陷、车辙，还可能引发边坡失稳等次生灾害。在多年冻土区，问题更为复杂，人为热扰动可能导致冻土上限下降，而在冬季施工若保温不当，同样会扰乱冻土原有的热平衡，加剧长期的热融沉降风险，对公路的全寿命周期构成严重威胁。

1.2 桥梁与结构物工程：混凝土低温性能劣化

混凝土是桥梁、涵洞、挡墙等结构物的主要材料，其水化反应对温度极为敏感。当环境温度低于5℃时，水泥的水化反应速率显著减慢；一旦温度降至0℃以下，混凝土内部的自由水开始结冰，水化反应基本停止，这直接导致混凝土早期强度增长缓慢甚至停滞，无法满足拆模或承受荷载所需的强度要求。更为致命的是新浇筑混凝土的冻害损伤。若在水泥水化产生足够强度之前（通常指抗压强度达到5MPa之前），混凝土内部的水分结冰，所产生的膨胀压力极易超过混凝土当时的极限抗拉强度，从而在内部形成大量微裂缝。这些微裂缝不仅会严重削弱混凝土的最终强度，使其损失高达50%以上，还会破坏其密实性，为日后氯离子、二氧化碳等侵蚀性介质的侵入打开通道，加速钢筋锈蚀和混凝土碳化，极大缩短结构的使用寿命^[2]。此外，即使采取了保温措施，混凝土内部与外部环境之间仍可能存在较大的温差。混凝土

土是热的不良导体,内部水化热积聚导致温度较高,而表面因暴露在冷空气中迅速降温。这种内外温差会在混凝土内部产生拉应力,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,便会产生贯穿性或表面性的温度裂缝,进一步影响结构的整体性和耐久性。

1.3 路面工程:沥青混合料施工性能骤降

沥青路面因其行车舒适性好、维修方便等优点被广泛应用,但沥青是一种典型的温度敏感性材料,其施工性能在低温环境下会急剧恶化。为了保证沥青混合料的施工和易性,必须将其加热到很高的温度(通常150-170℃)。然而,在严寒环境下,混合料在从拌合站到摊铺现场的运输过程中热量散失极快。一旦温度降至规定的摊铺温度以下(通常不低于130℃),沥青粘度会急剧增大,混合料变得僵硬,难以摊铺和压实。低温下,摊铺机熨平板对混合料的整平效果变差,容易出现离析和表面不平整。更关键的是,压路机的压实作业窗口期被大大缩短。由于混合料温度下降过快,压路机往往来不及完成规定的碾压遍数,导致压实度不足。压实度不足的路面空隙率过大,不仅会加速沥青老化,还会在雨雪季节因水分渗入并在冻融循环作用下,引发坑槽、松散等早期损坏。同时,在低温下喷洒粘层油或封层油,其流动性差,难以在旧路面上形成均匀、连续的薄膜,导致新旧沥青层之间或沥青层与基层之间的粘结力不足,容易在行车荷载下产生层间滑移和推移病害,严重影响路面的整体结构性能。

1.4 施工组织与安全管理:风险全面升级

除了工程技术层面的挑战,冬季施工对项目的整体组织管理和人员设备安全也提出了更高要求。严寒、冰雪、大风天气极易导致施工人员冻伤、滑倒摔伤,长时间在低温环境下作业,人的反应能力和操作精度也会下降,增加了安全事故发生的概率。与此同时,低温会使机械设备的润滑油粘度增大,发动机启动困难,液压系统反应迟钝,金属部件脆性增加,故障率显著上升。冰雪覆盖的道路也给大型施工机械的转场和物料运输带来巨大不便。为应对低温,需要额外投入大量的人力、物力进行保温、加热等辅助工作,如搭建暖棚、预热骨料、覆盖保温材料等,这些都延长了单道工序的作业时间,降低了整体施工效率。所有这些因素叠加,使得冬季施工的成本大幅攀升,对项目的经济性和可行性构成了严峻考验。

2 寒冷地区公路冬季施工的综合应对措施

针对上述技术难点,必须采取系统性的、多维度的应对策略,将被动防御转变为主动控制。

2.1 路基工程稳定化处理技术

路基工程的核心在于有效控制水分和温度场的动态变化。首先,在填料选择上,应优先选用粗颗粒含量高、渗透性好、冻胀敏感性低的砂砾、碎石等材料。对于必须使用的当地土,可通过掺入石灰、水泥等无机结合料进行改良,以降低其塑性指数和液限,减少毛细水上升高度,从而从根本上抑制冻胀的发生。其次,必须构建完善的路基排水与隔断体系。在路床顶面或易冻胀土层上方铺设土工布、复合土工膜等隔断层,可以有效阻断地下水向路基上部的毛细迁移。同时,配套设置边沟、盲沟、渗沟等排水设施,确保春融期能迅速排走路基内的多余水分,防止因水分积聚而导致的融沉。此外,对于高寒或多年冻土地区,采用保温隔热技术是一种行之有效的手段^[3]。在路基顶部铺设聚苯乙烯泡沫板(EPS)、挤塑聚苯板(XPS)等高效保温材料,可以显著减小路基的冻结深度,保护下卧的多年冻土或减少季节性冻土的冻胀量。最后,施工过程中的含水率控制至关重要。冬季路基填筑应尽量安排在土壤冻结前完成,并严格控制填料的最佳含水率,避免过湿。对于已冻结的土块,严禁直接作为填料使用,必须经过破碎、筛分,并在正温条件下回填,以确保路基的压实质量和长期稳定性。

2.2 混凝土结构物冬季施工保障体系

混凝土冬季施工的核心原则是确保其在达到临界强度前不受冻,并有效控制内外温差。为此,必须从原材料、配合比、施工过程到后期养护进行全过程温度管理。在拌合阶段,应对拌合用水进行适度加热(水温不宜超过60℃,以免引起水泥假凝),必要时对骨料进行蒸汽或暖棚预热。在配合比设计上,应选用早强型水泥,并适当降低水胶比,同时掺加高效防冻剂和早强剂。防冻剂能显著降低混凝土中液相的冰点,保证在负温下仍有足够的液态水供水泥水化;早强剂则能加速水化反应,使混凝土尽快获得抗冻临界强度。在运输和浇筑环节,混凝土运输罐车应包裹保温套以减少热量损失,对于关键或小型结构物,可搭设全封闭的暖棚,棚内通过热风机、蒸汽或电热设备维持正温环境。对于大型结构,则可采用“蓄热法”或“综合蓄热法”,即在混凝土浇筑后,利用其自身水化热,通过覆盖棉被、草帘、保温毯等材料来延缓热量散失,并辅以少量外部热源进行补充加热。养护期间,必须持续监测混凝土内部温度,确保其降温速率符合规范要求,防止因降温过快而产生温差裂缝。拆模时间必须严格依据同条件养护试块的强度来确定,严禁在混凝土未达到规定强度前拆

模, 避免因温差过大或结构自重导致开裂或破坏。

2.3 沥青路面低温施工关键技术

沥青路面冬季施工的关键在于“抢时间、保温度”, 最大限度地延长有效压实时间。首先, 可在不导致沥青老化的前提下, 适当提高混合料的拌合和出厂温度, 为后续的运输和摊铺争取更多的时间窗口。其次, 必须强化运输与摊铺环节的保温措施。运输车辆必须加盖双层保温篷布, 并尽量缩短运输距离和现场等待时间。摊铺机的料斗、刮板输送机、螺旋布料器等关键部位应加装保温装置, 摊铺作业应遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则, 即压路机要紧跟摊铺机, 以最快速度完成初压和复压, 确保在混合料温度降至不可压实状态前完成全部碾压工序^[4]。近年来, 温拌沥青(WMA)技术的应用为解决这一难题提供了革命性的方案。该技术通过添加有机添加剂、发泡技术或化学添加剂等方式, 能在比传统热拌沥青低20-40°C的温度下进行拌合、摊铺和压实, 不仅大幅降低了能耗和有害气体排放, 更重要的是显著延长了低温环境下的有效压实时间, 有效保障了路面的压实度和路用性能。此外, 摊铺前必须彻底清除基层上的冰雪和浮尘, 并确保基层完全干燥, 可在摊铺前短时间内喷洒快裂型乳化沥青作为粘层, 以保证新旧层间的良好粘结。

2.4 施工组织与安全保障强化措施

成功的冬季施工离不开科学严谨的组织管理和坚实的安全保障。项目伊始, 就必须编制详尽的《冬季施工专项方案》, 对人员、设备、材料、工艺流程、应急预案等进行全面规划和部署。合理安排施工工序, 尽量将对温度敏感的作业(如混凝土浇筑、沥青摊铺)集中在一天中气温相对较高的时段进行, 以规避极端低温的影响。在人员安全方面, 必须为施工人员配备全套防寒劳保用品, 设置取暖休息室, 实行轮班作业制度, 避免长时间暴露在严寒中, 并加强冬季施工安全教育培训, 重点防范高处坠落、机械伤害和因取暖设备使用不当引发的火灾等事故。在设备保障方面, 要加强机械设备的冬

季保养, 及时更换适合低温环境的润滑油和防冻液, 并储备充足的易损件和备用设备, 确保施工的连续性和可靠性。随着科技的发展, 引入智能化监测技术已成为提升冬季施工管理水平的重要方向。通过在关键结构部位预埋温度、湿度传感器, 利用物联网(IoT)技术实现对施工全过程环境参数和结构状态的实时、远程监控, 可以为科学决策提供精准的数据支持, 实现从经验驱动向数据驱动的转变。

3 结语

寒冷地区公路冬季施工是一项复杂的系统工程, 其技术难点集中体现在路基的冻融稳定性、混凝土的低温防冻、沥青混合料的保温压实以及全方位的安全管理等方面。单纯依赖某一项技术或措施难以奏效, 必须构建一个集“材料-工艺-装备-管理”于一体的综合应对体系。未来, 随着新材料(如相变储能材料用于保温)、新工艺(如3D打印技术用于小型构件预制)、新技术(如BIM+GIS技术用于施工模拟与调度)的不断发展, 寒冷地区公路冬季施工的技术水平将得到进一步提升。同时, 应更加注重绿色低碳理念, 在保障工程质量的前提下, 最大限度地降低冬季施工的能耗和环境影响。通过持续的技术创新和精细化管理, 我们完全有能力将冬季的“劣势”转化为建设的“优势”, 为国家高寒地区的经济社会发展提供坚实可靠的交通支撑。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程冬期施工规程(JGJ/T104-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2]沙庆林. 高速公路沥青路面早期损坏与对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3]凌贤长, 王臣, 王永卫. 寒区工程服役性能与安全保障[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [4]李祝龙, 赵述曾, 俞文生. 多年冻土地地区公路修筑技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.