

高寒地区混凝土桥梁裂缝成因及预防

文 / 伍修胜 四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司

摘要：高寒地区是我国铁路交通布局中的关键区域，其桥梁工程长期承受极端气候条件带来的挑战。本文系统分析了温差应力、冻融损伤、水化滞后、地基冻胀与水泥水化等混凝土桥梁裂缝成因，厘清裂缝产生原因。在此基础上，提出包括材料设计、结构布置与施工控制的综合防裂策略，旨在构建适应寒区环境的混凝土桥梁抗裂技术体系，提升高寒铁路桥梁的工程韧性。

关键词：高寒地区；混凝土桥梁；裂缝成因；预防策略

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.047

引言

高寒地区地处极端气候带，昼夜温差大，季节更替剧烈，冻融循环频繁，混凝土桥梁结构在服役全过程中面临复杂环境变化。同时，混凝土作为脆性材料，对温度、水化高度敏感，极易在冻胀力作用下产生微裂并演化为结构性损伤，制约桥梁全寿命周期。由此深入研究裂缝形成的物理机制，明确其环境条件，是构建高寒地区桥梁工程抗裂体系的基础前提，也是提升高寒地区交通基础设施韧性的支点。

一、高寒地区混凝土桥梁裂缝成因

（一）温差应力频繁交替，诱发结构早期微裂

高寒地区气温波动剧烈，昼夜温差大且季节更替迅速，桥梁混凝土结构长期处于频繁的热胀冷缩应力作用下。在此背景下，混凝土桥梁结构逐渐加剧内部各向异性的温度应力分布，使混凝土截面产生拉压交替的内力状态。由于混凝土材料热传导性能有限，温度梯度在梁体、墩柱等截面厚重部位尤为明显，易在不同区域间形成热应力差，进而引发局部的应力集中。当应力累计超过混凝土抗裂限值，便易在混凝土强度尚未完全发展的情况下形成微裂纹。这类裂缝会在荷载、冻融、水化等多重作用下成为劣化通道，影响结构耐久性。特别在未设有效伸缩缝或温度配筋不足的情况下，温差应力更易在连续结构中形成叠加效应，诱发多点细微裂缝，进而形成贯通性损伤。

（二）冻融循环持续作用，削弱界面黏结性能

高寒地区环境中，气温频繁波动穿越冰点线，会使桥梁混凝土结构长期暴露在高频冻融循环下。在此过程中，混凝土毛细孔隙中的水分会受低温冻结膨胀，扩张局部微裂纹，解冻时又导致孔隙结构塌陷，从而不断削弱混凝土整体密实度。特别在骨料与水泥浆体间的界面过渡区，该部位本身结构松散、强度较低，是冻融破坏敏感环节。频繁冻融也会促使界面黏结层剥离，严重时形成连通通道，为水分二次渗入提供路径，进一步加剧劣化过程。冻融损伤既会削弱混凝土本体的力学性能，还会影响钢筋与混凝土之间的黏结锚固关系，降低整体结构的承载安全。

（三）养护控温波动较大，初凝阶段易发生裂紋

在初凝阶段高寒地区桥梁混凝土就面临显著的环境

温差干扰，早期养护期间若控温不稳定，将直接影响水泥水化反应的均衡进程。水化放热释放的热量在外界低温作用下难以有效积聚，会拉大混凝土内部与表面温差，形成非均匀温度场，诱发拉应力集中。当这种拉应力超过混凝土抗裂限值，即产生温度裂缝。夜间气温骤降或突发降雪天气尤易造成混凝土表面冷缩速率远大于内部热胀，导致结构收缩不协调，出现边角区域裂缝。若未实施充分保温保湿，蒸发速率快于水化补给，也将形成干缩裂缝与温控裂缝。裂缝一旦形成，将影响水化反应的后续发展，下降抗渗性、增加钢筋锈蚀风险，进而削弱桥梁结构整体耐久性性能。

（四）地基冻胀差异显著，桥墩底部易现剪裂

地基土体在高寒地区易受低温影响产生冻胀现象，在土体孔隙中产生冰晶进而膨胀体积导致地基抬升，对桥梁下部结构产生不均匀扰动。当桥墩基础处于不同含水率、土质及覆冰厚度条件下，冻胀幅度存在显著差异，桥墩底部局部区域会承受水平剪应力或竖向拉应力。在多年冻土或间歇性冻土层分布不均的地段，差异性冻胀还会引发墩身偏移、倾斜甚至局部开裂，加剧结构局部破坏，缩短服役年限。

（五）水泥适温适湿性差，低温滞留水化应力

在高寒地区混凝土桥梁施工过程中，气温常处于或接近冰点，水泥水化反应速率较慢，早期强度增长迟滞。低温环境下，水化产物不均，孔隙结构发育迟缓，水泥浆体与骨料间的界面过渡区致密性不足，内部残留未参与反应的自由水。此类水分在温度波动中可能冻结膨胀，诱发微裂纹，形成水化应力集中区域。当外界温度升高后，滞留水再次融化造成局部应力再分布，加剧结构内部应力的不均衡状态。这种由低温引发的水化不均，在多次热胀冷缩循环中易形成贯穿性裂缝，影响桥梁结构的整体稳定性。

二、高寒地区混凝土桥梁裂缝预防措施

（一）精控线性膨胀系数，协同调配温度应力

高寒地区混凝土桥梁在运行过程中受强烈昼夜温差与季节冷热交替影响，若构件线性膨胀系数设计失衡，将使各部位热变形不同步，进而造成界面错位，诱发温度裂缝。基于此，施工单位可以在设计阶段精确控制混

混凝土与结构钢材的线性膨胀系数差异，缓释因热胀冷缩而产生的内应力积聚。线性膨胀系数（ α ）影响温差应力变化，其理论计算表达为：

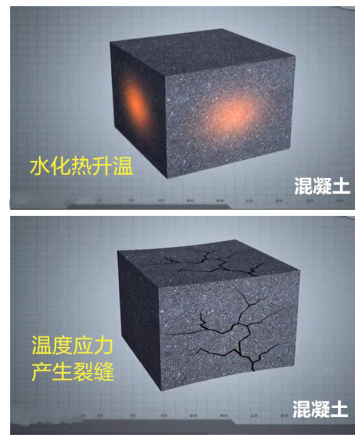
$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

在高寒区铁路桥梁建设中，常见跨线桥、连续梁桥等结构跨度大、构造复杂，受温度作用影响明显。施工设计时，设计人员匹配协调梁体、支座与桥墩间材料热性能。针对混凝土梁体选用矿渣硅酸盐水泥等低热膨胀系数的水泥品种，掺加粉煤灰或硅灰以降低混凝土整体的 α 值至 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下，进而使钢筋及桥面附属构件的热变形趋势接近，减少热力不均导致的相对滑移。结构设计方面，施工人员布设限位装置、缓冲垫层及变形缝组合结构，增强热变形自由度。如在铁路连续梁桥中，端部设置柔性支座，中部配置滑动支座，结合温度变形缝槽布置，允许构件在长距离热胀过程中获得纵向位移缓冲空间，有效防止结构强制约束而引发的温度裂缝。施工阶段温控措施也不可忽视，施工人员要采取分层浇筑与控温模板，控制入模温度 $\leq 18^{\circ}\text{C}$ ，避免浇筑后早期水化放热引发热胀速率过快（如图一所示）。冷季施工时桥梁各部位安装温度传感器实时监测结构温度，保证实际温控数据反馈指导施工工艺。除此之外，针对铁路桥梁支座与附属金属构件，还要选用抗温差形变能力强的耐候钢材料或涂层处理，降低热敏应力集中风险，显著提升高寒铁路桥梁的裂缝控制能力。

（二）强化界面抗冻性能，优化集料级配结构

在长期冻融循环作用下，高寒地区桥梁混凝土其界面过渡区易发生劣化。而强化界面抗冻性能需从材料配比与微结构控制入手，选用高致密性、低吸水率骨料，配合高效矿物掺合料改善水泥浆体性能，形成致密、均匀的界面层结构。同时优化的集料级配还有助于提升混凝土整体密实度，减缓水分迁移速度，从根本上削弱冻融破坏的内在条件，是保障高寒桥梁混凝土长期稳定性的重要技术手段。

为提高混凝土抵抗冻融破坏的能力，设计阶段应优先选用抗冻等级不低于F200的混凝土，明确骨料抗冻性指标，确保其质量等级符合《铁路混凝土结构设计规范》要求。同时采用坚硬致密、吸水率低于1.5%的天然碎石或玄武岩类岩石充当粗骨料，避免吸水量大的多孔岩料进入主集料体系。水泥品种选用矿渣硅酸盐或复合硅酸盐水泥，增加C-S-H凝胶含量提升水泥浆体致密性。矿物掺合料方面，混合使用粉煤灰与硅灰可优化浆体微结构，施工人员需控制硅灰用量在5%~10%，有助于填充水泥水化生成物之间的孔隙，显著降低界面过渡区的渗透通道。施工人员适当调整水胶比至0.38~0.42，配合减水剂控制工作性能，也能有效避免因流动性不足导致施工压实度下降而形成孔洞，为水分渗透提供通路（如表一所示）。级配优化方面，技术人员依照连续粒径设计原则，组合5~20mm粗骨料与0.15~2.36mm中砂，提高堆积密度，使浆体在施工中充分包裹骨料，减少界面间空隙，并配合振捣工艺与机械找平，进一步保证混凝土密实度，进而而在高寒铁路桥梁建设中显著降低混凝土开裂风险，提升结构耐久性，形成针对寒区环境特性的抗裂技术体系。



图一：水化热作用下的混凝土裂缝示意图

表一：高寒地区桥梁混凝土裂缝防治措施要点

防治要点	核心措施	目的与效果
抗冻性能提升	高致密低吸水骨料、矿物掺合料	延缓冻融破坏
骨料选用	天然碎石或玄武岩，满足抗冻等级	控制水分迁移、防止开裂
水泥配置	矿渣硅酸盐或复合硅酸盐水泥	增强浆体致密性与耐久性
水胶比控制	水胶比 0.38 ~ 0.42，配减水剂	提高施工密实度，防止孔洞

（三）设置分层控温体系，延缓水化放热峰值

铁路桥梁混凝土在高寒地区会因水泥水化反应迅速释放热量，若温控措施不当，极易在短时间内形成显著的内外温差，进而集中温度应力，引起早期裂缝。基于此，施工人员应利用分阶段浇筑、缓释热量峰值等方法设置分层控温体系，可控化温度梯度，降低热胀冷缩造成的内力突变风险。同时控制水化放热曲线上升速率，延缓

升温峰值，使混凝土在温度变化过程中具有更强的结构适应性，减少裂缝发生概率，提高工程整体耐久性。

在高寒地区铁路连续梁桥、大体量墩柱及现浇梁等结构中，为有效调控早期水化热反应，管理人员应在设计施工中构建完整的分层控温体系。材料降温阶段，能使用低水化热水泥或掺加粉煤灰、矿渣粉等缓凝材料，减缓水泥反应速度，抑制早期峰值热量。以矿渣粉为例，

当掺量达到 30% 时，最大水化温升可降低 8 ~ 12℃，推迟峰值出现时间，显著提升控温稳定性。分层浇筑时，技术人员需按厚度分层分批施工，每层间隔 6 ~ 8 小时以上，配合表层保温毯与临时遮挡材料，减少热量快速流失。同时，选用多层复合型保温棉作为保温覆盖材料，控制导热系数在 $\leq 0.035\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，延缓混凝土表面温度下降速率。除此之外，施工过程中，技术人员还可安装数字化智能测温系统，在梁体中预埋温度传感器，形成温控曲线实时反馈平台，并依据反馈数据动态调整浇筑节奏，避免温度突变诱发内外应力失衡。具体数据见表二。

表二：高寒铁路桥梁混凝土施工中控温关键参数表

控制环节	关键参数	技术标准或控制范围
材料选配	水泥品种	低热矿渣硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥
	矿物掺合料掺量	粉煤灰 20% ~ 30%，硅灰 5% ~ 10%
	水胶比	控制在 0.38 ~ 0.42 之间
浇筑方式	分层厚度	每层不超过 40cm
	分层间隔时间	不少于 6 小时
温控监测	升温速率	不超过 2.5℃ /h
	降温速率	不超过 1.5℃ /h
	温度差梯度	控制在 $\leq 15^\circ\text{C}$

(四) 提升基础抗冻等级，分区布设隔热垫层

施工部门需从基础抗冻性能入手，提升材料强度等级、优化施工工艺，并配合分区隔热设计以稳定地温梯度。同时设置不同功能区的隔热垫层，在桥梁基础周边构建控温缓冲带，延缓冻层下移速度，减缓土体含水状态变化，降低冻胀力集中作用。此类方法既能提升地基抗裂能力，还能有效阻止冻胀剪裂由下向上传导至上部结构。

工程实践中，施工单位应选用高抗冻混凝土材料，提高施工质量控制，并建立有效的隔热分区结构以调控地温变化。混凝土设计方面，选用抗冻等级不低于 F300 的高性能混凝土，配合抗冻外加剂，提高结构抗冻胀扰动的承载力。基础埋深设计中，设计人员要依据区域多年冻土深度数据确定不冻层稳定埋置高度，埋深一般大于当地最大冻土深度 1.2 倍，以规避强冻胀区间。除此之外，施工人员还要按照“地表隔热一侧向防护一底部缓冲”等部分设计隔热层分区，在地表层铺设导热系数 $\leq 0.035\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的聚苯乙烯泡沫板，控制厚度在 50mm ~ 100mm 之间，覆盖基础周边 3 ~ 5m 范围，抑制地表低温向下传导。桥墩侧壁外缘设置厚度不低于 30mm

的复合保温砂浆层或发泡水泥保护层，阻断基础与冻土的直接热交换。底部区域采用砂砾 - 泡沫玻璃粒组合，铺设双层隔热垫层，构建低导热率与良好排水性的复合结构，以分散冻胀力，进而缓解桥墩底部冻胀变形风险，提升基础长期承载能力。

(五) 优化钢筋锚固方式，构建应力释放通道

钢筋是混凝土结构的主要受力骨架，其锚固方式直接影响构件的应力传递效率。施工人员优化钢筋锚固构造，构建可调节、可耗能的应力释放路径，是减缓内力突变、抑制裂缝发展的有效手段。基于此，技术人员可调整锚固长度、优化锚固区截面构造，进而在保证结构强度前提下，引导应力向非关键区域扩散，减少混凝土开裂风险，提升结构整体的耐久性能。

锚固构造方面，技术人员应优先在关键区域采用直锚加弯钩形式增强钢筋握裹力，在非关键区域布置滑移段或缓冲环提升结构延性。如，在墩身与承台连接处，延伸纵向钢筋至基础底部并设置锚固段长度为 40d ~ 45d，同时在锚固区添加钢筋锚固胶，提高低温下钢筋与混凝土间的有效黏结力。在桥面连续梁或湿接缝区域等抗裂敏感构件中，施工人员还能采用机械连接件，精准控制接缝处钢筋应变释放路径，协调跨构件应力。除此之外，在温差显著变化区域技术人员还宜设置预应力钢筋，配套软垫板或中空锚头，在不降低结构承载力的前提下，提升温变应力调节能力。施工过程中管理人员还要加强钢筋锚固区的质量验收，实时采用超声波技术检测锚固密实度，从而有效应对高寒环境下应力积聚，提升铁路桥梁抗裂性能。

结语

高寒地区混凝土桥梁所面临的裂缝问题，本质上是结构力学、材料性能与极端环境相互作用的结果。为有效应对这些隐性问题，施工单位需从设计理念、材料适配与施工工艺中构建多层级防控体系，调节应力释放路径、提升界面稳定性及构件柔性响应能力，进而建立动态适应外界变化的结构韧性框架。

参考文献

- [1] 乔鹏飞. 高原寒冷地区隧道混凝土防裂技术研究 [J]. 中国水泥, 2025 (2): 117-119.
- [2] 陆宽, 刘斌. 高寒阴湿地区预应力混凝土梁板裂缝成因分析及应对措施 [J]. 甘肃科技纵横, 2024, 53 (2): 68-73.
- [3] 李建普. 高原高寒地区路桥裂缝修补施工技术 [J]. 中国高新科技, 2023 (2): 75-77.
- [4] 鲁燕杜, 元欣. 高原高寒地区桥梁墩台混凝土裂缝成因及防治技术 [J]. 云南水力发电, 2021, 37 (12): 3.
- [5] 孙宝林, 杨永清, 严猛, 等. 高寒地区后张箱梁纵向裂缝成因分析, 验证及处理 [J]. 桥梁建设, 2021, 51 (3): 8.

作者简介：伍修胜 (1973.02-), 男, 汉族, 四川荣县, 本科, 中级工程师, 研究方向: 路基、桥梁、隧道施工。