

无砟道岔道床混凝土防裂技术研究

曲景甲

中铁三局集团线桥工程有限公司 河北 廊坊 065200

【摘要】：无砟道岔道床是高速铁路安全运营的枢纽节点，其大体积混凝土基座的高质量构筑是保障轨道平顺性的核心前提。聚焦复杂工况下的实际建造过程，道床结构长期面临着水化积热催生温度应力、低水胶比加剧自生收缩，以及截面突变诱发局部应力集中等多重开裂风险。在深入剖析上述裂缝演化机制的基础上，工程实践需从优化低热微膨胀配比抑制本源收缩、布设柔性隔离层与防裂钢筋分散应力，以及实施全周期梯级温控管理等方面精准发力。相关综合防御体系有助于系统化解大体积现浇与严苛边界约束叠加的施工难题，将截面温差与表观裂缝严控于规范阈值之内，从而推动现代高铁基础设施向长寿命、高可靠的高质量方向迈进。

【关键词】：无砟道岔；道床；大体积混凝土；防裂技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.048

引言

作为线路“咽喉”，无砟道岔承载着严苛的动载冲击。然而，受超大现浇体量与复杂几何边界制约，道床基体在浇筑早期极易因水化积热和外部强约束而诱发非荷载型裂缝。这不仅会破坏轨道的几何平顺度，更将严重损耗结构的长期耐久性。因此，亟需从工程本源切入，探索系统化的早期防裂干预机制，以彻底破解这一制约轨道高质量建设的技术瓶颈。

1 无砟道岔道床混凝土裂缝成因分析

1.1 水化积热催生温度应力

铁路建设工程中造成混凝土裂缝产生的原因有很多，例如铁路建设修建的年代久远、地质地形条件复杂、常年高温多雨、混凝土材料质量不达标、施工存在技术上的漏洞、设计不合理等，所有这些原因在铁路建设高负荷运作的影响下，都会造成铁路建设混凝土的严重裂缝。无砟道岔道床具备典型的大体积混凝土构造特征。浇筑早期，胶凝材料剧烈水化并释放大量热能。较大的截面厚度阻碍了内部热量的向外传导，致使芯部温度急剧攀升。同时，表层混凝土直接接触外部环境，散热速率较快。这种传热条件的空间差异在截面方向形成了显著的温度梯度。内部的热膨胀与表层的冷收缩变形产生相互制约，在结构表面诱发拉应力。当该应力突破混凝土同龄期的极限抗拉强度时，表层即发生损伤开裂，进而演变为宏观温度裂缝。

1.2 低水胶比加剧自生收缩

现代无砟道岔道床普遍采用低水胶比配合比设计，以满足严苛的结构力学指标。这种致密的基体构造导致外部养护水分难以向内部有效渗透。随着水泥水化进程的深入，胶凝材料不

可逆地消耗大量拌合水，致使体系内部相对湿度急剧下降。微观层面上的水分亏缺会在毛细孔隙内引发强烈的弯月面张力，进而转化为宏观上的自生体积收缩。当该收缩变形受到底座板或复杂的预埋件系统约束时，混凝土内部将积聚拉应力。一旦该应力越过材料同期的抗拉强度临界值，道床结构极易萌生非荷载型收缩裂缝。

1.3 截面突变诱发应力集中

无砟道岔区为安装转辙设备与扣件，道床板内常预留大量基坑与孔槽。这种非连续几何构型破坏了截面完整性，直接阻断了力在结构内部的均匀传导路径。当混凝土受温差或收缩作用产生体积变形时，上述尺寸剧变处会阻碍基体自由伸缩，成为能量释放的薄弱环节。局部拉伸应变在这些几何畸变点高度富集，形成显著的应力集中效应。一旦该处积聚的拉应力峰值突破材料同期的极限抗拉强度，微裂纹便会从孔槽角部率先萌生，并沿应力梯度向外扩展为宏观裂缝。

2 无砟道岔道床混凝土防裂关键技术体系

2.1 材料端：低热微膨胀抗裂配合比设计

道床混凝土配合比设计需从源头削减水化热并补偿结构收缩。配制环节宜选用低热硅酸盐水泥，并大掺量引入矿渣微粉等矿物掺合料。该胶凝体系可大幅压降发热总量并推迟温升峰值。针对低水胶比易引发自生收缩的难题，配方须精准复配微膨胀剂。硫铝酸钙或镁质外加剂在水化初期生成大量晶体，依靠结晶张力产生稳定微膨胀。此物理机制直接抵消基体硬化期的尺寸回缩，从本源处提高材料极限拉伸应变能力，切实阻断微裂缝的初始萌生。

2.2 结构端：应力释放与防裂构造优化

道岔区复杂的几何边界决定防裂构造须兼顾约束释放与局部强化。底座板与道床板间铺设的柔性滑动层是释放应力的关键。该隔离层大幅削弱下部基础对混凝土体积变形的摩擦阻力，为结构温度伸缩提供物理自由度。针对转辙机基坑、孔槽及截面突变等易诱发应力集中的非连续区域，需针对性增设防裂钢筋网片。此局部配筋策略直接重塑内部传力路径，将富集的拉应力均匀耗散至周边基体，有效遏制薄弱截面萌生宏观断裂。

2.3 施工端：全流程梯级温控与水热管理

现场施工须执行贯穿全周期的梯级温控体系。拌合阶段，拌合站采取骨料预冷及加冰拌合工艺，严格压降混合料入模初温。针对道岔超厚截面，技术人员提前预埋冷却循环水管网。浇筑成型后，现场依据芯部温度实时监测数据，动态调控冷却介质流速，主动削平内部水化热波峰。同时，作业班组立即实施表面覆膜保湿与覆盖蓄热，彻底隔绝气温骤变造成的冷热冲击。该水热管控流程将结构内外温差及降温速率严控在安全阈值内，有效规避温度裂缝萌生。

3 防裂技术在实际工程中的应用与效果分析

3.1 依托工程概况与施工边界条件

以某高速铁路客运专线枢纽标段为依托工程，该区段正线铺设多组 18 号及 42 号高速无砟道岔。道岔道床板采用 C40 高性能混凝土连续整体浇筑，单组最大成型方量突破 300 立方米，呈现典型的大体积混凝土构件特征。该节点主体施工作业期横跨盛夏，日间环境气温常态化超过 35℃。这种极端光热条件显著拉高了拌合物的入模初温，并急剧加速了胶凝体系的早期水化发热进程。同时，道岔区直接承托于高刚度底座板与桥面结构之上，底层界面对道床板施加了强烈的切向摩擦与法向约束。庞大的水化热基数与严苛的外部物理约束相叠加，导致结构内部积聚的温度应力极易越过材料同期的极限抗拉阈值。这一复杂的客观施工作业边界，对现场防裂技术体系的实操有效性提出了严峻考验。

3.2 防裂关键技术的现场实操方案

3.2.1 低热抗裂配合比的试配与参数敲定

针对无砟道岔大体积道床的开裂风险，现场试验室围绕低热与微膨胀双重目标开展配合比试配设计。胶凝体系选用中低水化热的 P·O42.5 级硅酸盐水泥，并联合引入粉煤灰与粒化高炉矿渣粉。技术团队通过多组正交试验，将矿物掺合料的总取代率锁定在 35% 至 40% 区间。该双掺方案在满足 C40 设计强度等级的前提下，有效削平了早期水化发热峰值。

骨料配置方面，试验室优选线膨胀系数低、连续级配良好的坚硬碎石，并严格限制含泥量以降低整体需水量。为达到高

速铁路结构的耐久性指标，技术人员将水胶比严格限定在 0.35 以内，从物理源头控制自由水含量，抑制体系后期的干燥收缩。

面对低水胶比极易引发基体自生收缩的工程难点，技术人员在试配阶段按胶凝材料总量 8% 的基准比例，精准掺入硫铝酸钙-氧化镁复合膨胀剂。该外加剂在水化初期自发生成钙矾石晶体，依靠结晶膨胀力在结构内部建立微量预压应力，直接抵消硬化阶段的体积回缩。经室内全面测试，最终拌合物的坍落度扩展度、抗压强度及绝热温升参数均符合《铁路混凝土工程施工质量验收标准》(TB10424) 规定，试验室据此正式敲定现场施工配合比。

3.2.2 减摩隔离层与防裂钢筋网的实体构筑

为缓解大体积混凝土的温度应力与收缩变形，施工作业应严格落实界面解耦与局部配筋双重力学干预措施。例如，可以在底座板与道床板界面，全面铺设“两布一膜”复合滑动隔离层。铺装前，班组对底座表面精细打磨，消除局部凸起以避免机械咬合。隔离层铺设保持平展拉紧，卷材搭接宽度严控在 150 毫米以上，所有接缝均使用专用防水胶带实施全封闭粘贴。该铺装工艺彻底阻断了液态水泥浆的下渗，防止上下结构因漏浆形成刚性“锚固”，从而最大限度降低基底摩擦系数，为道床板后续的自由伸缩释放物理空间。针对转辙机预留基坑、排水槽端部及截面渐变区等应力集中节点，技术方案要求针对性构筑高强防裂钢筋网。现场实操优选小直径、密间距的 HRB400 带肋钢筋，并在几何突变锐角处精准增设斜向附加构造筋。钢筋骨架绑扎执行梅花型全节点紧固工艺，配合加密高强垫块锁定保护层厚度。此配筋体系直接介入基体内部的传力路径，将局部高度富集的拉应力强制均化并分散至周边区域，从力学源头有效遏制了薄弱截面微裂纹的萌生与扩展。

3.2.3 连续浇筑与全过程温控体系的工序执行

高温期拌合站全面启动骨料预冷与冰水拌合系统，严格压降混合料的入模初温。针对道岔区不规则大体积构件，作业团队可以采用“斜向分层、水平推移、连续整体”的浇筑工艺。现场技术人员精准把控层间覆盖时效，确保上层浇筑在底层初凝前完成交接，彻底规避冷缝隐患。在预留孔槽与截面突变处，振捣手实施高频加密振捣，以强化基体内部均质性。

例如，为破解超厚截面散热阻滞难题，现场引入了主动热量干预机制。作业班组提前在核心发热区预埋循环冷却水管网。浇筑成型后，技术人员依据温度传感器实时反馈的芯部热力数据，动态调控冷却水流速，平缓削减水化发热波峰。表层状态管控与内部降温同步推进。道床收浆抹平后，施工班组立即紧贴基面覆盖塑料薄膜封闭自由水分，阻断早期塑性干缩路径。随后，在薄膜上方加盖双层土工布进行蓄热保温。这种“内散外捂”的梯级温控策略有效平抑了表层热量散失速率，将结构截面的内外温差牢牢压制在 20℃ 规范限值之内，最终实现了

无砟道床整体的无缝隙高质量构筑。

3.3 核心监测数据剖析与防裂成效评价

3.3.1 芯部温度场演变规律与参数验证

现场基于预埋的分布式温度传感器,对道岔大体积区段浇筑成型后的全周期热力学状态进行了连续动态采集。监测曲线显示,受低热胶凝体系与主动水冷干预的协同作用,结构芯部主温升阶段的爬升速率显著放缓。水化热峰值的出现时间得到有效推迟,且核心最高绝对温度被严格压制在《铁路混凝土工程施工质量验收标准》限定的 65°C 安全红线以内。进入降温阶段后,得益于表层覆膜与加盖双层土工布的梯级蓄热保温策略,基体表面的热量散失被大幅迟滞。数据比对证实,截面核心区与外表层的温度梯度演变平缓,监测周期内的最大内外温差始终稳定在 20°C 的核心控制指标之下。同时,现场通过动态调节冷却水管网的介质流速,将结构整体的日均降温速率稳妥控制在 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 的规范阈值内。

上述热工参数的平滑演进,客观印证了现场综合温控方案成功熨平了早期剧烈的温度波动。监测数据表明,基体内部未发生强烈的非均匀热胀冷缩,从热力学传导层面直接排除了温差拉应力突破同期混凝土极限抗拉强度的可能,有力验证了该温控防裂体系的科学性与工程适宜性。

3.3.2 结构表观质量检验与微裂缝控制评估

养护周期届满后,现场技术人员对脱模成型的无砟道岔道床开展了全覆盖的表观质量勘验。巡视重点被直接锚定在转辙

机基坑周边、截面厚度突变带以及预留孔槽端部等极易萌生应力集中的敏感节点。实地排查结果显示,道床整体线形顺直,表面未现贯穿性结构裂缝。这一状况客观印证了前置的柔性隔离层与局部加密配筋技术,已成功截断了底层物理约束与畸变应力对混凝土基体的破坏路径。面对大体积区段偶发的极少量浅表层微干缩裂缝,技术团队利用游标裂缝测宽仪实施了逐一点测。实测读数表明,该类非结构性微裂缝的峰值缝宽均被严密限制在现行《高速铁路无砟轨道工程施工质量验收标准》法定的 0.2 毫米安全阈值以内,未对构件的长期耐久性能与抗渗等级构成任何实质性威胁。

4 结语

无砟道岔道床作为高速铁路的枢纽节点,其混凝土防裂水平直接决定了高铁干线的长期运营安全与全生命周期运维成本。本文立足热工学与力学交叉视角,提炼了旨在化解高水化热与复杂环境约束的综合防御逻辑,推动大体积道岔基座的裂缝治理由传统的“被动修补”向“主动设防”全面演进。展望未来,伴随高铁网络向高寒、大温差等极端气候地域不断延伸,道床的服役边界将面临更为严苛的挑战。下一代防裂技术亟需向智能化与前沿材料科学纵深跨越。业内应加速研发基于数字孪生技术的自适应温控感知系统,实现早期应力演化的精准预警与水热动态调控;同时,需深化自修复微胶囊及超低碳高韧性胶凝体系的工程化攻关,从微观本源为现代轨道交通铸就长寿命、高可靠的坚实基座。

参考文献:

- [1] 潘自立,徐健,刘剑光,等.高原无砟轨道混凝土抗裂性能提升技术研究[J].铁道工程学报,2021,38(10):37-43.
- [2] 曹瑞恒,肖杰灵,陈醉,等.基于声发射技术的无砟轨道混凝土开裂演化规律分析[J].铁道标准设计,2022,66(7):65-70.
- [3] 赵磊.路基地段双块式无砟轨道连续式道床板裂缝控制技术[J].铁道建筑,2022,62(11):22-27.
- [4] 潘利,王育江,杨睿.双块式无砟轨道道床板混凝土裂缝控制技术[J].铁道建筑,2022,62(3):31-33.