

# 高温隧道衬砌混凝土温度裂缝成因分析与防治措施研究

蒋运奎

中铁五局集团第一工程责任有限公司, 湖南 长沙 410000

DOI:10.61369/ETQM.2025060009

**摘要 :** 在高温隧道工程里, 衬砌混凝土易出现温度裂缝, 这严重威胁隧道的安全性与耐久性。本文深入剖析其成因并提出防治措施。成因方面, 水泥水化热在大体积衬砌混凝土内部大量积聚, 造成内外温差大, 产生温度应力; 环境温度受施工和季节影响, 持续给混凝土升温, 加大温度应力; 混凝土干燥收缩和自收缩, 在围岩、模板等约束下与温度应力叠加; 施工工艺中, 浇筑速度、振捣及拆模时间不当也易引发裂缝。防治上, 优化混凝土配合比, 选低热水泥、降水泥用量和水灰比; 改善施工工艺, 控制浇筑速度、保证振捣质量、合理拆模; 加强温度控制, 降低浇筑温度、合理埋设冷却水管、做好保温; 增强监测维护, 实时监测并及时处理裂缝。通过这些措施, 可保障隧道衬砌质量和运营安全, 同时推动温控技术持续发展。

**关键词 :** 高温隧道; 衬砌混凝土; 温度裂缝; 成因分析; 防治措施

## Analysis of Causes and Prevention Measures for Temperature Cracks in High-Temperature Tunnel Lining Concrete

Jiang Yunkui

China Railway Fifth Group First Engineering Co., Ltd. Changsha, Hunan 410000

**Abstract :** In high-temperature tunnel projects, lining concrete is prone to temperature cracks, which seriously threaten the safety and durability of the tunnel. This article deeply analyzes its causes and proposes prevention measures. Regarding the causes, the heat of cement hydration accumulates in large volumes of lining concrete, resulting in large temperature differences between the inside and outside, generating temperature stress. The ambient temperature is affected by construction and seasonal factors, continuously increasing the temperature of the concrete and increasing temperature stress. Concrete drying shrinkage and self-shrinkage are superimposed with temperature stress under the constraints of surrounding rocks and formwork. In the construction process, improper pouring speed, vibration, and formwork removal time can also easily cause cracks. In terms of prevention and control, it is necessary to optimize the concrete mix ratio, select low-heat cement, reduce cement consumption and water-cement ratio; improve the construction process, control the pouring speed, ensure the quality of vibration, and reasonably remove the formwork; strengthen temperature control, reduce the pouring temperature, reasonably lay cooling water pipes, and ensure heat preservation; enhance monitoring and maintenance, conduct real-time monitoring, and promptly deal with cracks. Through these measures, the quality of tunnel lining and operational safety can be ensured, while promoting the continuous development of temperature control technology.

**Keywords :** high-temperature tunnel; lining concrete; temperature cracks; cause analysis; prevention measures

## 引言

混凝土具备诸多优良特性, 在隧道衬砌施工领域得到了广泛应用。然而, 高温隧道环境极为特殊, 衬砌混凝土在这样的环境下, 极易出现温度裂缝问题。这些温度裂缝所带来的影响不容小觑, 它们不仅仅会破坏隧道的外观, 更关键的是, 可能会大幅削弱衬砌结构的承载能力, 使得隧道的耐久性和安全性显著降低, 为隧道的长期稳定运营埋下极大的隐患。所以, 全面、深入地剖析高温隧道衬砌混凝土温度裂缝的形成原因, 并依据这些成因有针对性地制定和提出防治措施, 对于切实保障隧道工程质量、确保隧道安全稳定运营而言, 具有不可忽视的重要意义。

## 一、高温隧道衬砌混凝土温度裂缝成因

我国铁路工程建设的重点逐步向西部地区转移。西部地区山峦众多、地形复杂，隧道工程建造过程容易受到不良地质条件、障碍物、复杂严酷环境等的影响<sup>[1]</sup>。在高温隧道建设与运营过程中，衬砌混凝土温度裂缝问题严重威胁着隧道结构的稳定性与耐久性。深入剖析裂缝产生的原因，是制定有效防治措施的重要前提。下面将从水泥水化热、环境温度影响、混凝土收缩和施工工艺等方面，对高温隧道衬砌混凝土温度裂缝的成因展开系统分析。

### （一）水泥水化热

水泥在水化反应进程中，会持续且大量地释放热量。在高温隧道场景下，衬砌混凝土通常以大体积形式存在，这就使得热量在其内部难以有效散发。水化热在混凝土内部不断累积，导致混凝土内部温度以较快速度急剧攀升。与此同时，混凝土表面因直接与隧道内空气接触，散热相对较为迅速，这就使混凝土内部和表面之间形成较大的温度梯度。基于这种温度梯度，混凝土内部会产生温度应力。当该温度应力超过混凝土自身的抗拉强度极限时，就会致使混凝土结构开裂，进而引发温度裂缝<sup>[2]</sup>。诸多研究表明，水泥品种、用量和水灰比等关键参数，对水化热的释放有着不可忽视的影响。不同品种水泥的矿物组成存在差异，导致其水化热释放速率和总量各不相同，高水化热水泥会促使混凝土内部温度快速上升。水灰比过大时，为满足施工和易性，水泥用量会相应增多，从而加剧水化热的产生，显著增加温度裂缝出现的可能性。

### （二）环境温度影响

隧道内部温度场时刻处于动态变化，施工环境、季节交替、围岩高温和环境温度共同对衬砌混凝土性能及隧道安全产生严重影响。

高温季节施工时，隧道内环境温度很高，衬砌混凝土浇筑后不断吸收外界热量，温度持续上升<sup>[3]</sup>。若通风不好，热量排不出去，隧道会形成高温封闭空间，加上高温围岩持续传热，混凝土温度会升得更高。

在隧道运营阶段，若通风系统设计有问题或维护不到位，外界环境高温和围岩高温产生的热量会在隧道内不断累积，持续给衬砌混凝土升温。混凝土温度上升，内部温度应力逐渐增大，而其承受应力的能力有限，一旦应力超出极限，混凝土结构就会被破坏，出现温度裂缝的可能性大增。

温度裂缝不仅影响隧道衬砌外观，还会降低衬砌结构的承载能力和耐久性，严重威胁隧道长期安全运营。所以，在隧道施工和运营过程中，一定要重视温度场变化对衬砌混凝土的影响，综合考虑各种因素，采取有效的温控措施，尽量减少温度裂缝，保障隧道安全稳定。

### （三）混凝土收缩

混凝土在硬化进程中，内部水分会逐渐散失，这是其产生体积收缩的内在原因。在高温隧道环境里，其空气相对湿度普遍较低，这一特殊环境使得混凝土表面的水分蒸发速度大幅加快，从而极大地加剧了混凝土的干燥收缩程度。当混凝土的收缩变形受到围岩、模板等外界因素的限制时，混凝土内部便会产生收缩应力。与此同时，混凝土内部因温度变化而产生的温度应力依旧存

在，这两种应力相互叠加，给混凝土结构带来了更大的压力，促使混凝土结构出现裂缝，最终形成温度裂缝，对隧道衬砌的结构安全造成严重威胁<sup>[4]</sup>。

自收缩是混凝土在恒温绝湿的特殊条件下，由胶凝材料的水化作用引发的自身收缩现象。在高温环境中，水泥的水化反应速度加快，致使混凝土内部的化学收缩增多，进而使自收缩量相应增大。自收缩产生的应力进一步提升了混凝土内部的应力水平，同样提高了混凝土出现温度裂缝的风险，严重影响了隧道衬砌的耐久性与稳定性。这不仅会缩短隧道的使用寿命，还可能在运营过程中引发安全事故，因此必须高度重视并采取有效措施加以防范。

### （四）施工工艺问题

在混凝土浇筑环节，浇筑速度的把控至关重要。若浇筑速度过快，混凝土内部热量无法及时散发，各部位散热速率差异较大，便会形成较大的温度梯度，显著增加混凝土内部的温度应力。此外，浇筑过程中振捣作业不可或缺，振捣不密实，混凝土内部会出现蜂窝、麻面等缺陷，存在较多空隙。这些空隙削弱了混凝土的整体结构，降低了其整体强度以及抗裂性能，使其在温度应力作用下，更容易产生裂缝。

模板拆除的时机同样关键。过早拆除模板，混凝土强度还未达到设计要求，难以承受自身重力和外界的荷载<sup>[5]</sup>。此时，温度应力与其他应力相互叠加，导致混凝土结构变形，极易出现裂缝。并且，拆模时若工人操作不当，对混凝土结构产生较大的冲击力，会直接损伤混凝土的内部结构，也可能引发裂缝，降低衬砌混凝土的质量与耐久性。

## 二、高温隧道衬砌混凝土温度裂缝防治措施

鉴于高温隧道衬砌混凝土温度裂缝成因涵盖水泥水化热、环境温度、混凝土收缩和施工工艺等多方面，极为复杂。为切实提升隧道衬砌质量，保障隧道安全稳定运行，必须从多维度、系统性制定防治措施。优化混凝土配合比，可选用低热水泥、降低水泥用量和水灰比等；改善施工工艺，严格把控浇筑速度、振捣质量与拆模时间；加强温度控制，降低浇筑温度、合理埋设冷却水管；增强监测与维护，实时监测并及时处理裂缝。下面将围绕这些方面，对温度裂缝的防治展开深入探讨。

### （一）优化混凝土配合比

在高温隧道衬砌混凝土施工中，水泥品种的选择是控制水化热的关键因素。优先选用低热或中热水泥，能够显著减少水泥水化热的生成<sup>[6]</sup>。这是因为这类水泥的矿物成分和结构特性，使其水化热释放速率相对较低，从而有效抑制混凝土内部温度的快速上升。以矿渣硅酸盐水泥为例，与普通硅酸盐水泥相比，它在水化过程中，水化反应更为缓和，释放的水化热更低，因此在高温隧道衬砌施工是值得优先考虑的水泥品种。

在满足混凝土强度与施工性能的前提下，应尽量降低水泥用量和水灰比。合理使用粉煤灰、矿渣粉等掺合料，部分替代水泥，既能减少水泥水化热的产生，又能改善混凝土的和易性，增强其抗渗性，提升混凝土的耐久性。此外，优化骨料级配，选用粒径较大、级配良好的骨料，能有效减少水泥浆用量，降低单位体积混凝土的水化热，进而更好地控制混凝土内部温度，减少温度裂缝的产生。这些措施相互配合，能够从多个方面降低水化热

对混凝土的影响,提高隧道衬砌混凝土的质量,保障隧道的安全稳定运行。

## (二) 改善施工工艺

在混凝土浇筑阶段,严格把控浇筑速度是关键一环。浇筑速度过快,混凝土内部热量堆积难以散发,易形成较大温度梯度,引发温度裂缝;而浇筑速度过慢,则会导致施工冷缝,降低混凝土整体性。因此,维持均匀的浇筑速度,能促使混凝土内部热量均衡散发,减小温度梯度<sup>[7]</sup>。振捣环节同样不可忽视,确保振捣密实,能排出混凝土内部气泡,增强其密实度与抗裂性能。采用分层浇筑、分层振捣的工艺,每层厚度控制在合理范围,可有效提升振捣效果。

拆模时间的确定对混凝土质量影响显著。需根据混凝土强度增长情况以及实际施工条件,合理安排拆模。在混凝土强度未达设计要求时,过早拆模会致使混凝土因无法承受自身与外界荷载而开裂<sup>[8]</sup>。拆模时,规范操作方法,避免对混凝土造成机械损伤。通过在混凝土内部预埋温度传感器,实时掌握其内部温度和强度变化,为精准确定拆模时间提供可靠依据。

## (三) 加强温度控制

在高温季节开展隧道衬砌混凝土施工时,为确保工程质量,必须采取一系列有效措施来降低混凝土浇筑温度。对原材料进行降温是关键一环,例如对骨料实施喷水冷却,水在蒸发过程中会吸收大量热量,从而降低骨料的温度;还可以采用加冰搅拌的方式,冰融化时会吸收热量,进而降低混凝土拌和物的温度<sup>[9]</sup>。与此同时,应尽量缩短混凝土的运输时长,选择隔热性能良好的运输设备,最大程度减少运输途中混凝土对热量的吸收。在浇筑现场搭建遮阳棚也十分必要,遮阳棚能够阻挡阳光直射,有效降低混凝土浇筑时的温度。

在混凝土内部合理埋设冷却水管同样重要,需依据混凝土结构尺寸、温度场分布的实际情况,精确确定水管间距、管径和通水时间。同时,要严格控制通水温度与流量,避免因冷却速度过快而使混凝土内部产生过大的温度应力。

混凝土浇筑完成后,及时做好表面保温工作不容忽视。覆盖草帘、棉被等保温材料,可以减缓混凝土表面的散热速度。喷洒养护剂在混凝土表面形成保护膜,这不仅能减少水分蒸发,还能起到保温保湿的双重功效,有效减小混凝土内外温差,降低温度裂缝产生的风险。

## (四) 增强监测与维护

在隧道衬砌混凝土施工以及后续漫长的运营阶段,于混凝土

内部科学地埋设温度传感器与应力传感器是极为关键的环节。借助先进且高精度的监测系统,能够对混凝土的温度与应力变化展开实时、精准的监测。这一过程如同为隧道衬砌安装了“智慧大脑”,时刻掌握其内部状态<sup>[10]</sup>。一旦监测数据超出预先设定的阈值,便能迅速做出反应,及时调整施工工艺。例如,当温度异常升高时,可优化浇筑速度,使混凝土内部热量更均匀地散发;同时调整冷却水管通水参数,确保混凝土内部温度得到有效控制。此外,同步改进温度控制措施,以此维持混凝土的温度与应力始终处于安全范围之内。

在隧道运营期间,定期开展衬砌检查工作必不可少。利用专业检测设备,能够及时发现诸如温度裂缝等病害。针对不同情况的裂缝,需要采取适配的处理方法。若裂缝宽度较小,可采用表面封闭法,使用密封材料对裂缝表面进行细致封闭,防止水分和有害介质侵入,避免裂缝进一步发展。当裂缝宽度较大时,压力灌浆法较为适用,通过向裂缝中注入高强度灌浆材料,填充裂缝空间,恢复衬砌结构的完整性,确保其承载能力满足运营要求,保障隧道安全稳定运行。

## 三、结束语

高温隧道衬砌混凝土温度裂缝的产生,是水泥水化热、环境温度、混凝土收缩以及施工工艺等多种因素协同作用的复杂结果。水泥水化热在大体积衬砌混凝土内部大量积聚,致使内部温度急剧上升,与表面形成显著温度梯度,进而产生温度应力。环境温度受施工环境和季节变化的影响,持续向混凝土传递热量,使温度应力不断增大。混凝土在硬化过程中,干燥收缩和自收缩在围岩、模板等约束下,与温度应力叠加,加速裂缝形成。施工工艺方面,浇筑速度、振捣效果以及拆模时间等不当操作,也为裂缝产生创造了条件。

为有效防治温度裂缝,需多管齐下。在优化混凝土配合比上,选择低热或中热水泥、合理降低水泥用量和水灰比、利用掺合料和优化骨料级配;改善施工工艺,控制浇筑速度、保证振捣密实、合理确定拆模时间;加强温度控制,降低浇筑温度、科学埋设冷却水管、做好表面保温;增强监测与维护,实时监测温度应力并及时调整施工,定期检查衬砌并处理裂缝。实际工程中,应依据隧道具体情况制定防治方案,严格控制施工。随着隧道工程技术发展,还需持续研究温度裂缝的形成机理与防治方法,完善温控技术,确保隧道衬砌混凝土质量和运营安全。

## 参考文献

- [1]王家赫,黄法礼,李化建,等.铁路隧道衬砌混凝土温度裂缝原因分析与防治措施[J].铁道建筑,2020,60(09):73-77.
- [2]张天放.隧道衬砌混凝土裂缝的成因与防治[J].今日科苑,2009,(12):104-105.
- [3]段亚辉,樊启祥.水工隧洞衬砌混凝土温度裂缝控制理论与应用[M].中国水利水电出版社:202110.448.
- [4]赵一杰.隧道主体结构混凝土裂缝成因分析及预防措施[J].四川建材,2024,50(05):175-177.
- [5]崔竣尧.隧道混凝土管片的孔洞和裂缝成因及控制方法研究[J].地下水,2022,44(04):297-298+305.DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2022-04-104.
- [6]练强,冯恺.公路隧道复合衬砌结构裂缝成因分析及处治措施[J].土工基础,2022,36(03):383-386.
- [7]雷明林,侍鸿刚.大跨径隧道衬砌裂缝成因分析及处治方案[J].产业创新研究,2022,(10):118-120.
- [8]杨清翔.隧道衬砌混凝土裂缝成因及施工防治措施[J].中国高新科技,2020,(10):113-114.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2020.10.44.
- [9]张已学.水工隧洞衬砌混凝土裂缝成因分析及控制措施分析[J].门窗,2019,(11):195.
- [10]王雪红.北方高铁隧道无砟轨道道床混凝土裂缝成因分析及处理[J].四川水泥,2018,(07):347.