

# 高速公路隧道工程二次衬砌脱空率控制措施

秦 勇

(四川公路桥梁建设集团公路隧道分公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 在高速公路隧道工程持续扩张的建设中, 二次衬砌脱空问题已成为制约结构稳定性与使用寿命的严重隐患。基于此, 本文阐述了高速公路隧道工程二次衬砌脱空的原因, 并提出优化浇筑工艺流程、完善防水板铺设规范、合理配置混凝土参数、落实养护时效管理策略, 旨在为降低隧道二次衬砌脱空率、提升高速公路隧道工程的整体质量提供借鉴, 从而为后续隧道运营安全以及养护管理提供坚实稳定的结构保障。

**关键词** 高速公路; 隧道工程; 二次衬砌; 脱空率

中图分类号:U45

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.018

## 0 引言

高速公路作为国家交通骨架的重要组成部分, 其隧道工程建设质量关系到整体通行安全与使用寿命。在隧道结构中, 二次衬砌承载着围岩荷载、保护初支结构、提高耐久性的关键作用。随着隧道施工规模不断扩大, 频繁出现二次衬砌脱空问题已成为影响工程质量的严重隐患。脱空现象产生多源于衬砌与初支之间未形成有效贴合, 混凝土密实性不足、防水板铺设不当及模板支撑变形均可能造成空腔积聚, 严重时还会削弱结构强度并影响衬砌受力作用的完整性。因此, 在隧道结构复杂性不断提升的背景下, 控制脱空率是提升工程整体性能的关键环节。

## 1 高速公路隧道工程二次衬砌脱空原因分析

### 1.1 养护时间欠缺

在高速公路隧道工程中, 二次衬砌的养护环节直接关系到混凝土强度的形成。若衬砌混凝土在未达到早期设计强度前就受到外力作用或暴露于不良环境, 将会对内部结构的稳定性造成干扰<sup>[1]</sup>。养护时间不足往往导致水泥水化反应不充分, 使混凝土表面硬化与内部强度发展不同步, 进而引发内部微裂缝扩展, 在结构接触面产生不稳定空隙。在这种情况下, 二次衬砌难以有效贴合初期支护, 衬砌背后易出现未填实的空腔, 从而导致脱空率上升。在温差较大或通风不畅的隧道段落, 若养护时间控制不合理, 混凝土表层与内部的应力释放不同步, 极易诱发拱顶与拱肩区域的衬砌脱空。脱空现象可能降低其抵抗围岩压力的能力, 在运营期间形成潜在的安全风险。因此, 高速公路隧道工程对通行效率及结构耐久性要求较高, 而养护作为控制脱空率的重要影响因素, 缺失时效性将会削弱整个二次衬砌施工的质量。

### 1.2 防水板松紧失衡

防水板是高速公路隧道工程中二次衬砌环节的重要界面层, 其铺设状态对衬砌贴合质量具有决定性影响。当防水板铺设过紧, 混凝土注入过程中其受力变形将使其局部翘起导致背后出现空腔; 而若铺设过松, 褶皱部分在混凝土压力作用下无法完全展开, 同样会形成不规则的衬砌脱空区域。由于防水层通常位于结构不可见部位, 这类隐性问题在施工过程中难以被及时发现, 却常在后期运营中常演变为脱空率升高的重要诱因<sup>[2]</sup>。二次衬砌在设计中应紧密贴合初支以有效承担围岩荷载, 若防水板状态异常, 衬砌将无法获得可靠支撑易导致应力分布失衡, 在荷载集中的部位引发结构弱化。此外, 防水板的固定方式及搭接密度若不合理, 在混凝土灌注过程中也会发生滑移或局部坍塌, 从而增加脱空隐患。因此, 高速公路隧道对结构闭合度与耐久性有严格要求, 防水板的铺设质量直接影响二次衬砌与初支的贴合程度, 间接决定隧道衬砌的脱空控制水平。

### 1.3 混凝土配比失调

混凝土配合比是影响二次衬砌成型质量的关键技术参数, 在高速公路隧道工程中, 对配比精度的依赖程度更为显著。一旦水胶比、外添加剂或骨料级配存在偏差, 混凝土的密实性、流动性及抗收缩能力均会受到干扰。过高的水胶比会导致混凝土内部毛细孔率升高, 结构致密性下降, 容易产生干缩裂缝削弱衬砌层的整体粘结力; 若掺合料配比不当, 早期强度发展不稳定, 混凝土可能会出现不均匀沉降, 促使拱顶及拱肩部位易形成空洞, 进而引发二次衬砌脱空。基于此, 混凝土作为衬砌与初支之间唯一的填充介质, 其流变

性能必须与施工环境相适应。配合比失调将削弱结构对形变的适应能力，使衬砌在复杂围岩压力作用下难以保持良好贴合。因此，控制脱空率必须依托混凝土在结构内部的均匀填充能力，而这一性能本质上取决于科学设定配合比及严谨执行施工环节。在高速公路隧道中，隧道断面大、作业面长、环境差异显著，对混凝土性能的适应性提出了更高要求，任何参数控制失衡都可能成为诱发脱空的隐性因素。

## 2 高速公路隧道工程二次衬砌脱空率控制策略

### 2.1 优化浇筑工艺流程，提升隧道衬砌密实效果

在高速公路隧道工程建设中，混凝土浇筑作为二次衬砌的核心环节，其工艺流程对衬砌结构的密实度具有直接影响。衬砌混凝土若在浇筑过程中出现分层离析、振捣不均或填充不完整等问题，容易导致其与初期支护贴合不严，从而形成背后空腔增加脱空率。这类质量缺陷在结构拱顶或边墙等部位更为突出，长期运行过程中容易引起裂缝扩展、荷载失衡，甚至影响整体耐久性。在浇筑前的技术准备阶段，若未严格核查模板台车、支撑装置及结构对位情况，将使整个衬砌流程存在不稳定因素，进而破坏混凝土结构连续性降低贴合紧密性<sup>[3]</sup>。

在具体施工中，相关工作人员可围绕模板台车的浇筑准备展开多项关键操作，控制隧道工程二次衬砌的脱空率。在进场前需全面检查模板台车整体结构，精准复核各项尺寸，保证模板能严格匹配隧道断面。在检查模板面板时，相关工作人员应重点关注其平整度及光洁度，发现翘曲、凹陷或老化区域需立即更换，避免这些缺陷在混凝土接触面形成不规则空隙。在拼缝处理过程中，相关工作人员可利用焊接方式稳固连接模板板块，同时使用磨具将焊缝打磨至平顺无突棱状态，从源头减少混凝土泌水、漏浆造成的密实缺陷。在此基础上，也需逐一测试液压装置与电气运行状态，保证台车在调整模板张开闭合角度时无卡滞及震动现象，这一过程能为混凝土均匀注入提供稳定的封闭空间。随后施工人员可反复检验台车承重结构，评估其刚度和稳定性是否满足混凝土自重及侧压力的综合承载要求，并加设钢楔定位防护，防止台车在混凝土注入时发生错位或跑模。采用这些浇筑前的准备工作，相关工作人员能够有效避免模板变形、漏浆、模板间隙振裂等一系列衍生问题，使混凝土在衬砌过程中获得连续均匀的支撑环境，明显提升衬砌贴合效果。这种精细化操作可使高速公路隧道工程在结构密实性方面获得实质保障，从而为后续降低二次衬砌脱空率提供可靠基础。

### 2.2 完善防水板铺设规范，减少隧道脱空风险点

防水板作为二次衬砌与初期支护之间的关键隔离层，其铺设状态对结构贴合效果有直接影响。基于此，防水层若铺设松紧失衡、搭接方向不合理或固定密度不足，会导致混凝土浇筑后在局部区域产生滑移、紧绷或褶皱现象。这些变形将阻碍混凝土充分贴合初支，使衬砌背后形成潜在空腔加大脱空率风险。发生脱空是多个施工细节失误叠加所引发的结构隐患，防水板铺设作为前置工序，其规范化程度将直接决定后续混凝土注入的稳定性。与此同时，规范化的铺设流程能控制铺设质量，减少由于水压扰动、振捣空鼓等因素引发的衬砌不密实区域，从而有效降低高速公路隧道工程中二次衬砌脱空率<sup>[4]</sup>。

在施工过程中，相关工作人员需严格围绕防水板的铺设顺序及搭接方向展开全过程把控，保证铺设符合隧道工程二次衬砌精度要求。在作业初期应明确分工，自中心拱顶向两侧依次铺设防水板，使其自重均匀分布，避免因重力集中引发滑移或变形。此铺设方式还便于左右两侧施工人员同步作业，保证彼此之间互不干扰，进而有效提高焊接作业空间的利用率。在搭接处理环节，相关工作人员采用下坡压上坡的搭接方向可以保证防水层在水流作用下不会引导渗水进入焊缝区域。每道板缝搭接前，作业人员会对初期支护面实施表面清理处理，消除混凝土残渣及锐角凸起，使防水板紧贴初支且不被局部撕裂。铺设过程中当遇凹凸不平或交叉变截面区域，相关工作人员应及时实行裁剪及热风焊处理，保证每一张板材的过渡自然、连接紧密。在完成每段铺设后，技术员会组织焊缝检测抽检焊缝强度及密封性，并修复虚焊、漏焊部位，以免混凝土灌注时出现局部冲破。以上操作环节能够形成闭合而稳定的防水结构，使衬砌混凝土在注入后可均匀填充至初支面与防水板之间的间隙，从而明显提升整体密实度。在此基础上，相关工作人员强化过程管控，精细处理每一处铺设细节能使高速公路隧道工程的二次衬砌空间具备良好的封闭条件，有效压缩因防水板异常引发的衬砌脱空风险点。

### 2.3 合理配置混凝土参数，控制二次衬砌脱空率

在衬砌施工中，若混凝土参数设置不当极易引发泌水、离析、沉降等问题，从而在初支与二衬之间形成空隙增加脱空率。混凝土作为结构材料的物理状态必须适应隧道作业空间的受限特点，其可泵性、抗收缩性等指标应随衬砌部位的不同精准调整。与此同时，控制水胶比、砂率及坍落度之间的平衡关系可以避免

出现强度下降或密实不足的问题，从而在浇筑过程中保障混凝土能够填满全部空腔，紧密贴合初期支护。只有混凝土性能精准匹配结构形态与施工节奏，二次衬砌才能发挥稳定的力学作用，从而有效奠定控制脱空率的技术基础<sup>[5]</sup>。

在一次隧道工程衬砌施工中，相关工作人员需展开精细化的配合比调整工作。在水胶比控制上，技术员需反复调试试验，结合现场实际坍落度及振捣表现将水胶比稳定在0.45的区间，既保证混凝土的可泵性，又能控制收缩风险。为提升拱顶部位的流动性能，现场人员可将拱部混凝土坍落度调至18cm左右，使其更容易充盈钢模板上缘曲面，并结合小幅提高保水性参数避免混凝土在浇筑过程中泌水导致拱顶产生离析层。边墙区域则应减小坍落度并提升骨料级配密度，增强混凝土的抗剪性能，防止在立模空间中出现局部滑移现象。在此基础上，砂率需控制在40%左右，在保证细集料有效填充的同时，避免混凝土因过多细砂导致的粘滞现象，增强振捣后的成型密实效果。施工人员结合这些调配操作能使混凝土在各部位具备良好的适应性，满足不同衬砌结构的性能需求。此次调整混凝土配合比能有效控制结构脱空隐患，显著提升了高速公路隧道工程中二次衬砌的结构性能，为后续通风、排水及运营安全提供了有力支撑。在此基础上，相关工作人员精准控制参数能强化结构贴合效果与脱空率控制之间的关联，从而为今后同类施工提供可参考的技术方向。

#### 2.4 落实养护时效管理，稳固高速衬砌结构稳定

混凝土在硬化初期处于强度敏感阶段，若在此时外界荷载或环境变化干扰其强度增长，极易在内部形成微裂缝，造成局部贴合不牢，进而诱发脱空现象<sup>[6]</sup>。在拱部与墙体连接区域，若脱模时机控制不严，混凝土尚未具备足够强度承受结构压力，很容易导致衬砌发生偏移、开裂或局部失稳等风险<sup>[7]</sup>。与此同时，养护时效管理的核心在于释放协调结构应力与发展混凝土强度的关系。降低脱空率离不开混凝土在早期阶段对应力的适应能力，而建立这种能力依赖于精准把握养护时间与拆模强度之间的平衡点<sup>[8]</sup>。

在高速公路隧道衬砌作业中，相关工作人员需对拱顶及边墙混凝土实行分段观察与强度数据记录。混凝土浇筑完成后，需设置标准试块并同步实行现场硬度对比，持续监测强度增长趋势，同时结合设计要求确定合理的脱模时机。在未承受围岩压力的中部墙段，相关工作人员可依据混凝土表面收光状态及棱角完整

度来目测判断，在表层无粉化、无破损迹象且试块强度达到5MPa后，应安排轻微拆模操作并全程监测模板受力变化。而在承压明显的拱肩部位及端头封口区域，养护人员可严格按照混凝土达到设计强度70%以上的标准实施时间推移管理，使用温控布点记录早期热释放规律，并随混凝土硬化进程逐点抽查抗压强度数据。在未达到预期强度前，所有承压模板均不予拆除，安排定时洒水养护能保持表层湿润状态，防止因失水收缩引起表面裂纹。拆模完成后，相关工作人员需立即贴合检查，重点检测衬砌层是否存在空鼓、裂缝及剥离等迹象。在此次养护过程中，相关工作人员能够有效契合各关键节点的时效控制，促使混凝土在应力释放中形成稳固贴合，保证二次衬砌结构未出现空腔残留，从而为高速公路隧道工程质量提供坚实的支撑。

### 3 结语

在高速公路隧道工程的质量管理中，二次衬砌脱空问题是影响结构整体性能的深层次技术隐患。其本质反映的是协同施工工艺、匹配材料参数及控制过程管理之间的精准度问题。衬砌结构作为隧道中承载防护的关键界面，其密贴状态决定结构内部受力路径的完整性。因此，从准备工艺到调配材料、从铺设质量到养护时效，各环节都应以结构功能为核心导向，协同推进技术融合与质量精准控制，为高速公路隧道工程构建更具韧性的衬砌质量保障路径。

### 参考文献：

- [1] 魏平.大跨度软弱围岩条件下高速公路隧道施工技术研究[J].建筑机械,2025(06):294-296,302.
- [2] 吴佳润,林宇亮,邢浩,等.基于改进Stacking多模型融合的高速公路隧道建设碳排放预测模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(05):57-65.
- [3] 王成.高速公路长隧道机电交安工程施工安全管理探索及应用[J].新疆钢铁,2025(02):188-190.
- [4] 金建军.高速公路隧道与桥梁连接段的路基工程关键技术研究[J].产品可靠性报告,2025(04):147-148.
- [5] 王键.高速公路隧道项目进洞施工重点技术分析[J].交通科技与管理,2025,06(07):131-133.
- [6] 熊中浩.高速公路隧道工程开挖方法比选分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(01):93-96.
- [7] 张洁.高速公路隧道工程不良地质处治施工技术[J].交通世界,2025(Z1):209-211.
- [8] 郝秀丽.高速公路隧道工程超前支护结构及施工技术研究[J].河南科技,2025,52(01):64-68.