

# 隧道衬砌背后空洞对结构安全的影响及检测方法

聂建军 王生勇

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 400000

**【摘要】**：为揭示衬砌背后空洞对隧道结构安全的影响机制，结合模型试验、数值模拟与多源探测技术，系统分析空洞成因、力学响应特征及识别方法。结果表明：空洞主要由施工缺陷与长期环境扰动引发，显著改变内力分布，拱腰空洞影响最为不利；地质雷达可高效普查空洞位置，钻孔三维激光扫描适用于大空洞精确定量；基于空洞范围与位置，可划分为轻、中、重三级风险，并对应分级处置策略。

**【关键词】**：衬砌空洞；力学响应；地质雷达；风险分级；注浆整治

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.035

## 引言

地下交通体系不断扩展，衬砌长期处于复杂荷载、渗流与环境扰动中，背后空洞由此更容易在隐蔽位置形成。肉眼难以察觉的微小脱空，往往在周期荷载下促使受力路径改变，使局部区域逐渐积累损伤。多起工程事故表明，空洞已成为影响隧道稳定性的关键隐患之一。如何理解这一隐蔽缺陷的力学表现，并以合适方式识别其规模与位置，已成为结构状态评定过程中不可忽视的部分。基于此，围绕空洞成因、力学影响及检测思路的梳理，将为后续分析奠定必要基础。

## 1 衬砌背后空洞的成因与结构隐患

衬砌背后空洞主要源于施工期注浆不密实、初支与二衬衔接不良形成的初始脱空，并在长期渗流冲刷与列车循环荷载作用下，沿围岩薄弱面逐步扩展演化而成。空洞一旦形成，将打破衬砌与围岩的协同受力体系，使局部区域失去围岩约束，导致内力传递路径中断，衬砌截面承受异常的弯拉与剪切作用<sup>[1]</sup>。拱腰或拱顶部位的空洞易引发受力集中，使裂缝扩展速率加快，并伴随渗水通道扩大、局部刚度下降等连锁反应。由于空洞发展具有隐匿性，初期表现往往难以察觉，但随着损伤持续积累，结构可能出现突发性破坏，对隧道运营安全构成长期威胁。

## 2 空洞影响识别的力学线索与探测路径

衬砌背后空洞的存在会直接改变隧道结构的受力状态，这一力学响应特征成为识别空洞隐患的重要线索。国内学者通过大量模型试验研究发现，空洞的存在打破了衬砌与围岩原有的接触状态，空洞附近衬砌所受的地层抗力消失，受偏压作用衬砌截面发生趋向于空洞处的变形，导致结构整体受力状态恶化<sup>[2]</sup>。具体而言，拱腰背后存在空洞时，该截面弯矩值较无空洞状态可增长约2.78倍，管片外侧受较大拉应力；拱顶背后存在空洞时，空洞所在截面处管片弯矩值显著降低，而两侧临近

截面弯矩值出现增长，原截面弯矩值转由两侧临近截面分担。从动力响应角度看，振动台模型试验结果表明，空洞并不改变隧道洞身的加速度响应特征，但会改变加速度响应峰值，空洞处衬砌加速度峰值大于密实段加速度峰值，且输入地震动峰值越大，空洞对衬砌结构的加速度响应影响越显著。

为准确捕捉上述力学线索，需借助多种探测技术对衬砌内部介质进行精细反演，不同检测方法具有各自的适用条件和检测范围。地质雷达法是当前隧道衬砌质量检测中应用最广泛的技术，它利用高频电磁波在不同介质界面上的反射差异来揭示脱空位置、形态与范围。该技术适用于隧道衬砌的快速普查，可连续检测衬砌厚度及背后空洞沿隧道纵向和环向的分布长度，检测时通常按拱顶、拱腰、边墙等部位布置多条连续测线。需要注意的是，地质雷达对空洞径向尺度的准确判识受介电常数差异和反射面识别等因素影响，检测结果可能存在一定误差。超声波透射法主要依靠波速变化判断混凝土密实度，适用于桩基完整性普查及板状构件厚度测量，当波在空洞附近被折返或衰减时，可通过波形特征定位异常区。冲击回波法对衬砌表面平整度要求较高，检测范围受到一定限制。钻孔三维激光扫描技术则针对大体量空洞的精确检测，通过在衬砌上钻孔（直径不小于55~60mm）将扫描仪探头伸入空区，可实现360°无盲区扫描，获取空洞的三维形态和具体尺寸，该技术检测精度高，但操作相对复杂，适用于常规物探方法难以准确判识的大型空洞。工程实践中，应根据衬砌结构类型、围岩条件和运营状态合理选择探测方法：厚衬砌宜用低频雷达或超声以增强穿透；渗水区需考虑介电常数影响；运营隧道可采用“地质雷达普查+钻孔三维激光扫描精确定量”，实现高效精准检测。

## 3 基于力学表现与探测结果的安全归纳

衬砌背后空洞对结构安全的影响程度与空洞的大小、位置密切相关，建立定量的风险等级划分标准是实现科学评估的关

键。国内研究通常采用数值模拟与模型试验相结合的方法,对空洞影响下的衬砌受力特性进行系统分析<sup>[1]</sup>。从空洞位置看,不同空洞位置对隧道结构安全性影响排序为:拱腰>拱顶≥拱底,拱腰背后空洞对结构受力最为不利。从空洞大小看,研究人员基于荷载结构模型对隧道衬砌背后单空洞10°、20°、30°、40°范围和双空洞组合10°、20°、30°范围进行数值模拟,引入衬砌安全系数作为评价指标,分析不同空洞范围下轴力、弯矩、安全系数的变化规律,据此提出双空洞下的安全预警分级。当空洞范围较小时(如中心角小于10°),衬砌内力变化幅度有限,结构仍处于相对安全状态;随着空洞范围扩大(中心角达到20°~30°),空洞边缘位置出现明显的应力集中效应,弯矩变化率显著增大,衬砌安全系数下降;当空洞范围进一步扩大(中心角超过40°)或出现双空洞组合时,结构受力状态严重恶化,可能触发突发性破坏风险。拱顶背后空洞尺寸增大至一定值时,拱顶两侧甚至会出现反弯点,拱顶弯矩值发生反向,由原受正弯变为受负弯状态,空洞所在截面处弯矩变化率较大,管片易受集中荷载作用。基于上述规律,可将空洞风险初步划分为轻度(空洞范围小、位于拱顶或拱底非主要受力部位)、中度(空洞范围中等、位于拱腰附近或空洞组合出现)和重度(空洞范围大、位于关键受力部位、伴随衬砌明显变形或渗漏)三个等级,为分级处置提供依据。

在多源探测信息与力学表现综合分析的基础上,建立空洞风险的应急处理流程是保障隧道运营安全的重要环节。当检测发现衬砌背后存在空洞时,首先应通过地质雷达或钻孔验证明确空洞的具体位置、范围及径向深度,对空洞规模进行定量描

述。随后结合空洞所在部位进行力学影响评估:拱腰部位的空洞需重点关注弯矩和剪力的变化;拱顶部位的空洞需关注是否存在反弯点及拉应变集中;拱底部位的空洞需关注沉降变形特征。根据风险评估结果采取相应处置措施:对轻度风险的空洞,可采用回填注浆方法予以充分填充,注浆材料可选用水泥浆液(水灰比1:3),注浆压力控制在0.3~0.5MPa,必要时进行二次注浆以确保回填密实;对中度风险的空洞,除注浆填充外,还需对空洞周边衬砌进行补强加固,可在衬砌内侧布设钢筋网并浇筑补偿收缩混凝土;对重度风险的空洞,特别是大体量空洞,必须采用钻孔三维激光扫描等技术精确探测空洞三维形态,设计针对性的整治方案,注浆前需设置透气孔(间距约1m),注浆时采取隔孔循环作业方式,注浆结束后通过钻孔取芯法(检查孔数量不少于注浆孔总数的5%且不少于3个)对注浆效果进行检查。处理过程中应同步监测衬砌的变形和应力变化,确保施工安全。通过建立“探测定位—风险评估—分级处置—效果检验”的完整技术流程,可使空洞引发的结构不稳定因素得到及时有效控制,为衬砌长期安全运行提供可靠保障。

#### 4 结语

衬砌背后空洞作为隐蔽性极强的结构缺陷,其演化过程与力学效应已形成较清晰的认知框架。未来需进一步融合智能感知、数字孪生与实时监测技术,提升空洞早期识别精度与风险动态评估能力,推动隧道运维从被动处置向主动防控转型,保障地下交通基础设施长期安全服役。

#### 参考文献:

- [1] 杨润,王江东,卢浩,等.直墙式隧道衬砌背后空洞缺陷安全性评价[J].中国水运,2026,(02):131-133.
- [2] 郭长龙,王平让,汪德才,等.隧道衬砌背后空洞地质雷达探测模型试验研究[J].北方交通,2024,(09):84-87+91.
- [3] 曹卓颖,侯勇,杜鹏,等.隧道衬砌背后小尺寸空洞用聚氨酯注浆材料探究[J].建筑材料学报,2024,27(07):645-652.