

DOI: 10.7672/sgjs2026010093

# 浅埋段隧道三台阶法爆破施工振动响应研究\*

贾国平

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

**[摘要]** 浅埋段因其覆土薄,采用爆破施工时围岩与地表结构极易受爆破能量扰动影响。以桑植隧道典型浅埋段为研究对象,基于FLAC3D建立三维数值模型,模拟三台阶法爆破施工全过程。研究表明:浅埋三台阶爆破施工引起的地表沉降呈典型槽型分布,沉降峰值位于隧道轴线正上方,影响范围约为隧道开挖跨度的2倍,与理论经验公式高度一致;爆破振动响应具有典型瞬态特征,速度峰值随台阶由上至下逐级降低,表明爆破位置与传播路径对能量衰减影响显著;当爆破掌子面与监测点在纵向投影重合时,振动峰值显著增大,体现出近场能量集中效应,应加强关键位置的振动监控。

**[关键词]** 隧道;三台阶法;爆破;振动;沉降;数值模拟

**[中图分类号]** U453.5

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)01-0093-06

## Study on Vibration Response of Three-bench Blasting Construction in Shallow Buried Tunnel

JIA Guoping

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** The surrounding rock and surface structure of the shallow buried section are prone to the influence of blasting energy disturbance during blasting construction because of its thin covering soil. Taking the typical shallow buried section of the Sangzhi Tunnel as the research object, a three-dimensional numerical model was established based on FLAC3D to simulate the whole process of three-bench blasting construction. The results indicate that the surface settlement caused by shallow buried three-bench blasting construction is a typical trough distribution. The peak settlement is located directly above the tunnel axis, and the influence range is about twice the tunnel excavation span, which is highly consistent with the theoretical empirical formula. The blasting vibration response has typical transient characteristics, and the peak velocity decreases step by step from top to bottom, indicating that the blasting position and propagation path have a significant effect on energy attenuation. When the blasting face coincides with the monitoring point in the longitudinal projection, the vibration peak increases significantly, reflecting the near-field energy concentration effect, and the vibration monitoring of key positions should be strengthened.

**Keywords:** tunnels; three-bench method; blasting; vibration; settlement; simulation

### 0 引言

随着城市化进程的加快和交通基础设施建设规模的不断扩大,隧道工程呈现出浅埋化、密集化和复杂化的发展趋势。浅埋段隧道由于覆土厚度较小,受地表荷载、地质条件及施工扰动等因素影响显著,施工过程中易引发地表沉降、地面结构变

形及环境振动等问题。爆破法虽具有施工效率高、适应性强等优点,但其瞬时能量释放会以应力波形式在围岩中传播,若控制不当,可能导致衬砌开裂、围岩松动甚至结构失稳。而三台阶法作为浅埋隧道中常用的分部开挖工法,虽能有效控制施工扰动、提高围岩稳定性<sup>[1-2]</sup>,但其爆破荷载时空分布复杂,振动效应受爆破参数、开挖顺序及围岩性质等多因素影响。因此,针对浅埋段隧道三台阶法爆破施工振动响应开展研究可以为隧道安全施工提供

\* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 贾国平,助理工程师,E-mail:shizheng0719@qq.com

[收稿日期] 2025-10-30

一定的工程支撑。

三台阶法作为浅埋隧道爆破开挖中常用的分部施工工法,具有施工组织灵活、围岩暴露面小和开挖扰动可控等优点。目前对于三台阶法爆破施工产生的振动响应研究较多采用现场实测<sup>[3-5]</sup>和数值模拟<sup>[6-8]</sup>的方法。在现场实测方面,钟元庆<sup>[3]</sup>为研究三台阶法施工对原位扩建隧道结构及邻近既有隧道扰动的影响规律,依托福建厦蓉高速公路后祠隧道原位扩建工程,分别对隧道围岩及支护结构应力、松动圈及应力场和邻近既有隧道爆破振动进行了现场监测。在数值模拟方面,楼慧元<sup>[2]</sup>通过数值模拟分析杨家山特大断面隧道采用三台阶法和双侧壁法这两种不同工况中微扰动爆破振动的传播规律;陈国政等<sup>[7]</sup>采用数值模拟的方式结合三台阶七步开挖法对隧道进行洞身开挖施工模拟,研究结果表明采用该工法能够保证围岩的稳定性。

本文以桑植隧道中的典型浅埋段隧道为研究对象,基于 FLAC3D 软件建立三台阶法爆破施工的三维数值模型,分析不同施工阶段的爆破振动传播规律及其对围岩和衬砌结构的动态影响,为爆破参数优化、振动控制措施制定以及浅埋隧道安全施工提供科学依据和工程参考。

## 1 工程概况

### 1.1 线路情况

桑植隧道起讫里程为 DK147+276.75—DK152+335,全长 5 058.25m,其中,隧道Ⅲ级围岩 2 975m,占 58.8%,Ⅳ级围岩 1 735m,占 34.3%,Ⅴ级围岩 348.25m,占 6.9%。本隧道为双线隧道,洞身最大埋深 449.5m,DK151+720—DK151+810 为浅埋段,最小埋深仅为 4m,如图 1 所示。隧道采用出口 1 座平导辅助施工,平导起讫里程为 PK148+816—PK152+359,长 3 543m。地表可溶岩与非可溶岩的分界处位于 DK148+570 里程处,隧道进口至此为非可溶岩段落。

隧道开挖易发生地表塌方、冒顶,地表为溶丘、洼地相间地貌,洼地中分布较多岩溶漏斗及落水洞,地表径流与地下水有强水力联系。根据钻探及物探资料揭示该段隧道位于岩溶水平径流带附近的季节交替带,仅高出地下水位十几米,雨季该段隧道开挖极有可能遇到大的突涌水现象。

### 1.2 工程地质条件

桑植隧道工程区位于中、低山区地带,地形起伏较大,地势相对陡峻。区内植被覆盖良好,以乔木林为主。局部山间盆地、谷地及缓坡地带分布有村落与农田,区域内国道及省道沿地形起伏蜿蜒展

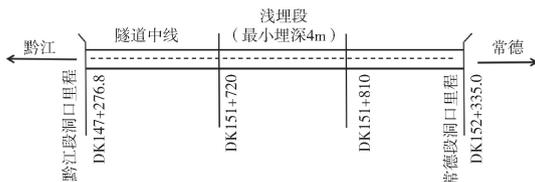


图 1 工程线路概况

Fig. 1 Overview of engineering line

布。工程区地层主要由第四系全新统坡洪积层组成,岩性以粉质黏土、碎石土为主,基岩层主要包括灰岩、白云岩、页岩及砂岩等。研究隧道段主要穿越的地层为碎石土,该岩层结构及物性特征对隧道施工条件具有重要影响,浅埋段穿越主要岩土层参数如表 1 所示。

表 1 浅埋段穿越主要岩土层参数

Table 1 Parameters of the corresponding geotechnical layers

岩土名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ $(^\circ)$
碎石土	2 100	0.4	0.30	38

### 1.3 施工方案

桑植隧道 DK151+720—DK151+810 段围岩级别为Ⅳ级,采用三台阶法爆破施工,采用光面爆破技术,每循环进尺控制在 3m 以内,施工顺序:超前支护→上台阶开挖→支护→中台阶单侧开挖→支护→下台阶单侧开挖→支护→仰拱、填充→拱墙衬砌。三台阶法隧道断面分部如图 2 所示。

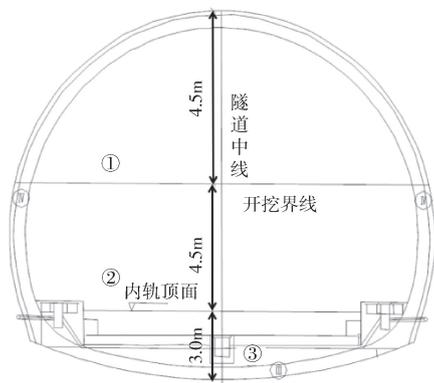


图 2 三台阶法隧道断面分部

Fig. 2 Layout of the three-bench excavation method for the tunnel cross-section

## 2 隧道施工数值模拟

### 2.1 计算模型建立

本文以桑植隧道中的典型浅埋段隧道为研究对象,根据浅埋隧道的位置关系,采用 FLAC3D 软件建立隧道三维数值模型,针对浅埋段隧道三台阶法爆破施工产生的振动响应开展数值模拟分析,建立

数值模型如图 3 所示。

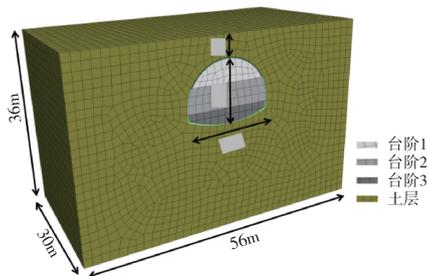


图 3 数值模拟计算模型

Fig. 3 Numerical simulation model

依托现场工程概况,考虑到模型的边界效应,本文建立 1 个长 56m、高 36m、厚 30m 的三维数值模型,模型中隧道横断面最大宽度为 16m,最大高度为 12m,隧道两侧均有盈余,盈余距离为过 20m。

根据桑植隧道的位置关系,模型中隧道埋深对应实际工况设置为 4m,爆破面在 FLAC3D 软件中设置为 3 个组,分别为台阶 1~3,以实现分台阶爆破施工。网格划分时对隧道部分进行加密处理。模型四周及底部均设置为固定约束。数值模型采用 Rayleigh 定义的黏性比例阻尼( $C = \alpha M + \beta K$ ),为了避免边界效应对模型计算结果产生影响,将模型四周及底部设置为安静边界条件。

依托现场地层工况,本研究区段开挖隧道围岩主要由碎石土组成,岩体结构力学性质差异较小。根据地质勘察结果,夹层分布不连续且厚度较薄,对围岩整体力学特性影响有限。综合考虑数值模拟的计算效率及模型的合理性,在不影响整体力学响应规律的前提下,将研究区段岩土层简化为单一等效岩层进行计算。该简化可有效减少模型复杂度,提高计算稳定性与收敛性,同时能够较好地反映该区段 IV 级围岩的整体受力与变形特征<sup>[9]</sup>。在后续数值模拟过程中为了实现施工模拟,将土层模型设置为莫尔-库伦模型(Mohr-Coulomb),地层参数设置参考表 1。衬砌管片为 C50 混凝土,设置为弹性模型(Elastic),爆破开挖部分设置为空模型(Null),根据设计文件其他参数取值如表 2 所示。

表 2 模型结构参数设置

Table 2 Model structure parameterization

结构名称	材料	本构模型	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
衬砌	C50	弹性模型	$2.08 \times 10^4$	$1.26 \times 10^4$	2 400

## 2.2 监测点布置

为系统研究浅埋段隧道三台阶法爆破施工振

动响应影响,本文在隧道轴线上方地表布设了一系列监测点,监测点布置遵循代表性及横向分布原则。模型监测点布置如图 4 所示。其中,横向布设的监测点形成剖面,以获取沉降槽形态及影响范围,沉降槽的布设位置如图 4 所示,隧道与沉降槽测点的相对位置关系如图 5 所示。沿隧道开挖中心线与沉降槽相交的监测点 A 为本文的典型监测点,可用于分析施工全过程中地表沉降及振动速度响应的时空演化规律,为后续监测点沉降量、振动速度随时间变化分析提供可靠的数据基础。

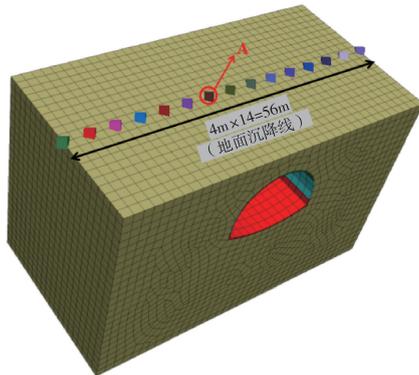


图 4 模型监测点布置

Fig. 4 Layout of monitoring points in the numerical model

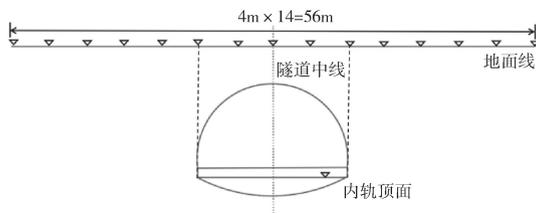


图 5 沉降槽监测点布置

Fig. 5 Layout of monitoring points of settlement tank

## 2.3 爆破荷载

炸药爆炸作用时间非常短,通常认为炸药爆破时冲击波作用的持续时间约  $1.0 \times 10^{-6} \sim 0.1 \text{ s}$ ,爆轰气体压力作用时间约为  $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1 \text{ s}$ 。根据相关文献<sup>[10-11]</sup>,隧道在爆破过程中的爆破荷载可简化为具有上升阶段和下降阶段的三角形线性荷载。根据隧道爆破荷载施加的加载时间公式,可确定本次隧道爆破过程中的荷载总时间。爆破荷载加载的上升阶段荷载时间为 0.01s,总的荷载时间为 0.06s,爆破荷载的最大值为 25.9MPa,荷载曲线如图 6 所示。

## 2.4 模拟爆破开挖过程

为再现三台阶法爆破施工全过程,本文在 FLAC3D 软件中建立了三维围岩-衬砌数值模型并按施工时序分步计算。为简化计算过程并降低模

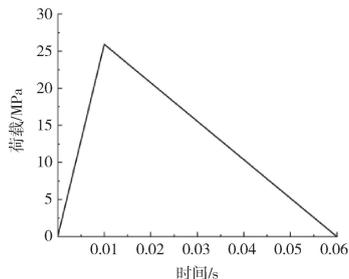


图6 爆破荷载加载曲线

Fig. 6 Blasting loading curve

型参数不确定性,本文在建立初始应力平衡后直接从上台阶爆破开挖开始模拟,根据现场施工方案,在数值模拟的过程中模拟步骤设置如下。

1) 初始地应力平衡:在FLAC3D中建立三维围岩-衬砌数值模型,并按施工时序进行分步计算。模型初始采用Mohr-Coulomb弹塑性本构,并施加重力与边界约束以获得初始地应力场,为后续施工过程提供初始条件。

2) 爆破开挖:爆破过程采用显式动力学方法模拟,在拟爆破面施加图6所示的爆破荷载,根据设计进尺3m划分台阶开挖区域,采用显式动力计算模块模拟爆破过程,在模型中爆破计算时间设置为1s。当爆破荷载施加完毕后,将被开挖区域设置为

空模型(Null)生成洞室,以模拟岩体被破碎及卸荷后的空腔形成。

3) 施作支护:爆破完成后立即对应激活爆破台阶相应的前一段支护结构(Elastic),重新平衡系统,模型平衡时间设置为1s。

4) 上述过程在上、中、下三台阶中按施工顺序循环实施,整个施工过程被分为13个开挖阶段,开挖阶段对应的开挖顺序及开挖台阶如表3所示。

### 3 模拟计算结果分析

#### 3.1 开挖完成后地表沉降分析

为了系统研究隧道施工引起的沉降影响范围与沉降槽形态特征,沿隧道横向布设地表监测剖面,在13个施工阶段全部完成后对沉降槽进行分析。开挖完成后地面沉降槽对比如图7所示。

分析图7可知,隧道开挖完成后地表沉降槽呈典型的槽型沉降分布特征,沉降最大值出现在隧道中心线上方附近的位置,随着距离隧道轴线的增大逐渐减小。沉降槽左右基本对称,说明围岩受力与变形较为均衡。此外,沉降槽边界变形趋缓,沉降影响范围约为隧道开挖跨度的2倍,整体符合Peck经验公式所提出的高斯型沉降模式。由此可见,本次数值分析的变形规律与理论规律一致,模型具有

表3 开挖状态

Table 3 Excavation Conditions at different stages

开挖阶段	上台阶进尺/m	上台阶状态	中台阶状态	下台阶状态
1	0~3	爆破转空模型(0~3m)	—	—
2	3~6	爆破转空模型(3~6m)- 衬砌(0~3m)	爆破转空模型(0~3m)	—
3	6~9	爆破转空模型(6~9m)- 衬砌(3~6m)	爆破转空模型(3~6m)- 衬砌(0~3m)	爆破转空模型(0~3m)
4	9~12	爆破转空模型(9~12m)- 衬砌(6~9m)	爆破转空模型(6~9m)- 衬砌(3~6m)	爆破转空模型(3~6m)- 衬砌(0~3m)
5	12~15	爆破转空模型(12~15m)- 衬砌(9~12m)	爆破转空模型(9~12m)- 衬砌(6~9m)	爆破转空模型(6~9m)- 衬砌(3~6m)
6	15~18	爆破转空模型(15~18m)- 衬砌(12~15m)	爆破转空模型(12~15m)- 衬砌(9~12m)	爆破转空模型(9~12m)- 衬砌(6~9m)
7	18~21	爆破转空模型(18~21m)- 衬砌(15~18m)	爆破转空模型(15~18m)- 衬砌(12~15m)	爆破转空模型(12~15m)- 衬砌(9~12m)
8	21~24	爆破转空模型(21~24m)- 衬砌(18~21m)	爆破转空模型(18~21m)- 衬砌(15~18m)	爆破转空模型(15~18m)- 衬砌(12~15m)
9	24~27	爆破转空模型(24~27m)- 衬砌(21~24m)	爆破转空模型(21~24m)- 衬砌(18~21m)	爆破转空模型(18~21m)- 衬砌(15~18m)
10	27~30	爆破转空模型(27~30m)- 衬砌(24~27m)	爆破转空模型(24~27m)- 衬砌(21~24m)	爆破转空模型(21~24m)- 衬砌(18~21m)
11	不进尺	衬砌(27~30m)	爆破转空模型(27~30m)- 衬砌(24~27m)	爆破转空模型(24~27m)- 衬砌(21~24m)
12	不进尺	—	衬砌(27~30m)	爆破转空模型(27~30m)- 衬砌(24~27m)
13	不进尺	—	—	衬砌(27~30m)

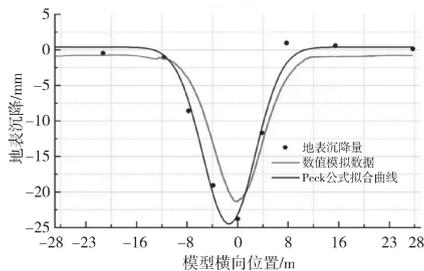


图7 开挖完成后地面沉降槽

Fig. 7 Ground surface settlement trough after excavation

较好的可靠性,可用于后续施工影响评估与支护参数优化研究。数值模拟显示最大沉降值为21.26mm,小于规范规定的警戒值30mm,表明结构整体稳定性良好,爆破施工方案具有可行性与安全性。

### 3.2 监测点 A 速度时程分析

考虑爆破卸荷效应的瞬态特点,引入沉降速度作为动态响应指标,对监测点 A 速度时程曲线进行分析,为施工振动控制提供支持。在计算过程中,每次的爆破时间设置为1s,爆破完成之后迅速转为空模型,后对同一台阶的上一阶段爆破开挖后转变为空模型的部分施作衬砌,再进行1s的模型平衡。监测点 A 沉降速度时程曲线如图8所示。

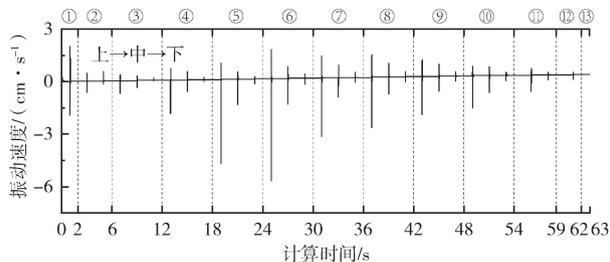


图8 监测点 A 沉降速度时程曲线

Fig. 8 Time history curve of settlement velocity at monitoring point A

由图8可知,监测点 A 在三台阶爆破工况下表现出典型的瞬态速度响应特征,即爆破作用产生明显速度峰值,随后迅速衰减至稳定状态。不同开挖阶段的振动速度峰值差异显著,上台阶最大,中台阶段次之,下台阶最小。出现这一现象主要由两方面原因共同造成:①上台阶爆破位置最接近地表,爆破能量在向上传播过程中衰减最小,因此地表得到的振动速度响应最大;②随着施工推进,中、下台阶爆破时上部围岩已被开挖并形成空腔,传播路径中存在介质不连续面,爆破能量在空腔边界处发生反射和折减,使得到达监测点 A 的有效能量进一步降低,产生这一现象的原因可能是这两种因素共同作用的结果。

在数值模拟过程中,在第6阶段出现了振动速度峰值,第6阶段监测点 A 沉降速度时程曲线如图9所示。

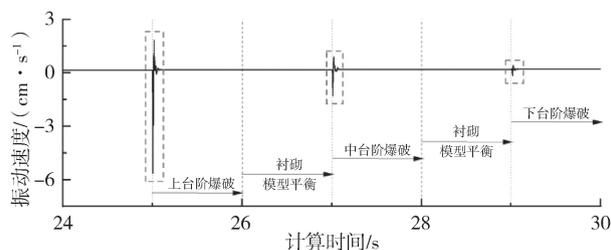


图9 开挖阶段6监测点 A 沉降速度时程曲线

Fig. 9 Time history curve of settlement velocity at monitoring point A during excavation stage 6

分析图9可知,本次隧道爆破施加的爆破荷载引起的监测点 A 振动速度峰值为5.55cm/s,该阶段的爆破掌子面位于距模型前界面15m处,监测点 A 在地表处亦距前界面15m,即在纵向投影上两者处于同一位置,出现该峰值的原因是由于爆破掌子面与监测点在竖向投影上重合,形成最直接的能量传递通道,导致近场能量集中而使速度响应增大。

## 4 结语

本研究通过数值模拟对浅埋段隧道三台阶法爆破施工产生的振动响应进行研究,可以得出以下主要结论。

1) 浅埋三台阶爆破施工引起的地表沉降呈典型槽型分布,沉降峰值位于隧道轴线正上方,影响范围约为开挖跨度的2倍,整体符合高斯型形态特征。

2) 爆破施工下地表振动具有明显的瞬态特征:监测点速度在爆破瞬间急剧上升至峰值,随后迅速衰减并趋于稳定。振动速度峰值呈上台阶>中台阶>下台阶的规律,主要受爆破位置与地表距离及围岩卸荷产生的空腔效应共同影响。上台阶爆破能量向地表传播衰减最小,而中、下台阶开挖使上覆围岩产生不连续界面,能量在传播过程中反射与耗散增强,从而降低了到达地表的有效能量。

3) 振动响应在空间上表现为显著的近场能量集中效应。监测点 A 振动速度最大值出现在开挖阶段6,对应爆破掌子面与监测点在纵向投影位置重合,能量传播路径最短、传递最直接,因此速度峰值显著升高。该特征表明爆破能量沿近场方向传播更为敏感,应在掌子面逼近地表关键位置时加强振动监测与安全控制。

### 参考文献:

[1] 何艳春,李翱,周璞,等.特大断面隧道上软下硬地层工法转

- 换时机研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(13): 106-113.
- HE Y C, LI A, ZHOU P, et al. Research on conversion time of construction method in upper-soft and lower-hard stratum in super-large section tunnel[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 106-113.
- [ 2 ] 楼慧元. 特大断面隧道工程微扰动爆破对初支混凝土喷层扰动效应研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 56-63.
- LOU H Y. Study on disturbance effect of micro-disturbance blasting on initial concrete shotcrete layer in large section tunnel engineering[J]. Construction technology, 2025, 54(10): 56-63.
- [ 3 ] 钟元庆. 采用三台阶工法开挖的原位扩建隧道现场监测及分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 170-179.
- ZHONG Y Q. Field monitoring and analysis of in situ tunnel extension by three-bench method [ J ]. Modern tunnelling technology, 2019, 56(5): 170-179.
- [ 4 ] 张桂清, 杨秀竹, 雷金山, 等. 爆破荷载作用下邻近运营隧道衬砌安全性影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(1): 39-45.
- ZHANG G Q, YANG X Z, LEI J S, et al. Study on safety analysis of adjacent operation tunnel under blasting load[J]. Construction technology, 2025, 54(1): 39-45.
- [ 5 ] 王正庆, 郭运华, 王明明, 等. 上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(11): 14-18.
- WANG Z Q, GUO Y H, WANG M M, et al. Blasting safety control of large section tunnel in upper soft and lower hard composite strata[J]. Construction technology, 2025, 54(11): 14-18.
- [ 6 ] 周环羽. 路堑高陡边坡岩体爆破振动响应数值模拟研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 12-17, 24.
- ZHOU H Y. Numerical simulation study on blasting vibration response of high-steep slope rock mass in road cutting [ J ]. Construction technology, 2024, 53(24): 12-17, 24.
- [ 7 ] 陈国政, 孟陈祥, 万波, 等. 三台阶七步开挖法在超大断面扁平隧道的应用[J]. 价值工程, 2023, 42(32): 86-89.
- CHEN G Z, MENG C X, WAN B, et al. Application of three-step and seven-step excavation method in super-large section flat tunnel[J]. Value engineering, 2023, 42(32): 86-89.
- [ 8 ] 曹明星, 刘子阳, 张东, 等. 立体交叉隧道爆破振动响应分析[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 93-99.
- CAO M X, LIU Z Y, ZHANG D, et al. Analysis of blasting vibration response of crossing tunnel [ J ]. Engineering blasting, 2020, 26(5): 93-99.
- [ 9 ] WANG Y, GAO T Y, WANG R, et al. Study on the mutual interference and propagation characteristics of three-dimensional vibration during shield tunnel construction in hard rock strata [ J ]. Scientific reports, 2025, 15: 14875.
- [ 10 ] 于咏妍, 高永涛. 钻爆法地铁隧道开挖对地下管线的影响[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 6-10.
- YU Y Y, GAO Y T. Effect of subway tunnel excavation by drill-blasting method on pipeline [ J ]. Engineering blasting, 2015, 21(4): 6-10.
- [ 11 ] 费鸿禄, 吕金齐, 刘梦, 等. 新建隧道上跨既有隧道爆破振动响应研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 54-58.
- FEI H L, LÜ J Q, LIU M, et al. Study on blasting vibration response of the existing tunnel crossing the new tunnel [ J ]. Engineering blasting, 2017, 23(4): 54-58.

## (上接第92页)

- [ 4 ] 于海涛. 爆破振动对周边建筑物影响的三维数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(11): 16-18.
- YU H T. Three-dimensional numerical analysis of influence of blasting vibration on surrounding buildings [ J ]. Guangdong architecture civil engineering, 2023, 30(11): 16-18.
- [ 5 ] 王晗, 闫鹏, 张云鹏, 等. 基于 SSA-Elman 神经网络的爆破振动速度预测[J]. 工程爆破, 2025, 31(3): 140-150.
- WANG H, YAN P, ZHANG Y P, et al. Prediction of blasting vibration velocity based on SSA-Elman neural network [ J ]. Engineering blasting, 2025, 31(3): 140-150.
- [ 6 ] 李洪超, 张继, 石玉莲, 等. 基于 APO-VMD 联合小波阈值的爆破振动信号去噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(15): 249-258.
- LI H C, ZHANG J, SHI Y L, et al. Denoising method for blasting vibration signals based on APO-VMD combining wavelet threshold [ J ]. Journal of vibration and shock, 2025, 44(15): 249-258.
- [ 7 ] 刘干, 肖双双, 龚伟, 等. 基于 Transformer-LSTM 耦合模型的露天矿爆破振动峰值速度预测[J]. 煤矿安全, 2025, 56(9): 71-80.
- LIU G, XIAO S S, GONG W, et al. Prediction of peak particle velocity from open-pit mining blasting based on Transformer-LSTM coupled model [ J ]. Safety in coal mines, 2025, 56(9): 71-80.
- [ 8 ] 伍海龙, 梁家琴, 梁兴印, 等. 基于 FLAC3D 软件分析爆破施工对既有砂岩隧道的影响[J]. 建筑施工, 2020, 42(9): 1794-1796.
- WU H L, LIANG J Q, LIANG X Y, et al. Analysis of influence of blasting construction on existing sandstone tunnel based on FLAC3D software [ J ]. Building construction, 2020, 42(9): 1794-1796.
- [ 9 ] 于咏妍, 高永涛. 钻爆法地铁隧道开挖对地下管线的影响[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 6-10.
- YU Y Y, GAO Y T. Effect of subway tunnel excavation by drill-blasting method on pipeline [ J ]. Engineering blasting, 2015, 21(4): 6-10.
- [ 10 ] 费鸿禄, 吕金齐, 刘梦, 等. 新建隧道上跨既有隧道爆破振动响应研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 54-58.
- FEI H L, LÜ J Q, LIU M, et al. Study on blasting vibration response of the existing tunnel crossing the new tunnel [ J ]. Engineering blasting, 2017, 23(4): 54-58.