

DOI: 10.7672/sgjs2025110014

上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析

王正庆¹, 郭运华², 王明明¹, 张敏锋¹, 刘同安¹, 翟浪宝², 石 浚²

(1. 中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810007;

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

[摘要] 以武汉市轨道交通7号线北延线(前川线)工程第9座车站巨龙大道站工程为背景,开展三维有限元动力分析,研究不同单响药量爆破下距离掌子面不同位置时隧道最大振幅变化规律。研究表明,采用中隔壁法(CD法)进行施工爆破作业时,应重点考虑爆破振速的高程振动放大效应及边墙放大效应。基于数值分析结果提出安全爆破单响药量控制指标,数值分析和现场监测结果均表明采用该控制指标可有效、安全地控制隧道爆破作业。

[关键词] 隧道;复合地层;爆破;振动速度;安全控制;数值模拟

[中图分类号] U455.6

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0014-05

Blasting Safety Control of Large Section Tunnel in Upper Soft and Lower Hard Composite Strata

WANG Zhengqing¹, GUO Yunhua², WANG Mingming¹, ZHANG Minfeng¹,
LIU Tongan¹, ZHAI Langbao², SHI Jun²

(1. Sinohydro Engineering Bureau No. 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810007, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: A three-dimensional finite element dynamic analysis is carried out to study the variation law of the maximum amplitude of the tunnel at different positions of the tunnel face with different single charge blasting distances based on the Julong Avenue Station Project, the ninth station of the North Extension Line (Qianchuan Line) Project of Wuhan Rail Transit Line 7. The results indicate that the elevation vibration amplification effect and side wall amplification effect of blasting vibration velocity should be considered when the center diaphragm (CD method) is used for construction blasting. The control indices of single charge of safety blasting are proposed based on the results of numerical analysis. The results of both numerical analysis and field monitoring indicate that the control indices can effectively and safely control the tunnel blasting operation.

Keywords: tunnels; composite strata; blasting; vibration velocity; safety control; simulation

0 引言

上软下硬复合地层隧道涉及变化频繁的岩土物理学参数,具有施工工艺复杂、施工效果难以保证等特点。目前,有关隧道掘进施工分析大都聚焦于隧道岩层和支护体系受力破坏机理研究,主要研究方法包括数值分析^[1-4]和模型试验^[5-7],其中爆破等动力荷载作用对隧道结构及周边环境的影响

也越来越受到关注。Xiao等^[8]研究了隧道岩爆的演化机制,提出了基于实时微振信息综合判断岩爆演化过程中岩体破坏类型的方法;黄惟^[9]针对上软下硬复合地层隧道施工稳定性风险开展了相关研究,研究表明,相对于传统的萨多夫斯基公式,上软下硬地层爆破振动速度与爆破中心间距并非绝对成正比,而与开挖面岩性条件密切相关;张庆彬等^[10]采用爆破模型试验对炸药单耗进行研究,结果表明,上覆层厚度在被爆体3倍尺寸内时会对地表产生影响;李峰^[11]为避免隧道下硬围岩中爆破施工

[作者简介] 王正庆,副高级工程师,E-mail:94216087@qq.com

[通信作者] 翟浪宝,硕士研究生,E-mail:1316296927@qq.com

[收稿日期] 2024-12-30

对上导软弱围岩及支护结构产生较大的扰动,提出上软围岩采用弧形导坑预留核心土法施工,下硬围岩爆破施工时,在炮孔内采用水不耦合装药微差减振静态爆破施工技术;李志堂等^[12]建立了上软下硬地层中爆破振动有限元分析模型,对爆破荷载作用下上部初期支护和围岩振动响应及空洞效应进行了研究。尽管已有较多涉及复合地层隧道爆破施工的研究,基于工程实践的爆破控制与改善方法也有一些进展^[13-15]。本文以武汉市轨道交通 7 号线北延线(前川线)工程第 9 座车站巨龙大道站工程为研究对象,对上软下硬复合地层矿山法施工爆破振动扰动规律进行分析,确定复合地层中隔壁法(CD 法)施工爆破设计技术指标,解决复合地层矿山法施工安全控制技术难题。

1 工程概况

武汉市轨道交通 7 号线北延线(前川线)工程第 9 座车站巨龙大道站为 7 号线北延线、2 号线和规划 18 号线的三线换乘站,设计为地下 3 层、宽度为 13m 的岛式车站。巨龙大道站 1 号工作井位于盘龙大道路侧,2 号工作井位于巨龙大道与盘龙大道交叉口地块空地内,为巨龙大道暗挖段工作井。1 号工作井与 2 号工作井、2 号工作井与车站之间的停车线和线路右线采用矿山法施工,长 321.796m。矿山法施工以 2 号工作井为界,分 2 段同期施工,一段从 1 号工作井大里程端开始开挖向南至 2 号工作井小里程端,另一段从 2 号工作井大里程开始开挖向南至巨龙大道站主体结构。开挖方式为 1.5m 循环进尺弱爆破开挖。

矿山法隧道上半部分穿越中风化泥质粉砂岩地层,如图 1 所示,钻探取芯率较高,岩芯呈柱状,属软岩~极软岩,敲击声闷,岩体基本质量等级为 V 级;下部为中风化砾岩,砾状结构,厚层状构造,钙质胶结,岩芯多呈柱状,岩体基本质量等级为 V 级,因而该段隧道所处地层为上软下硬地层,属于 V 级围岩。土体及各类结构材料参数如表 1 所示。

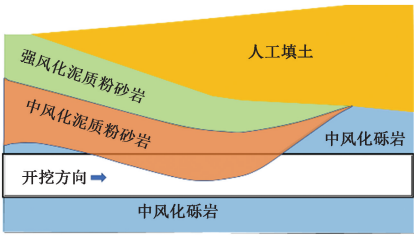


图 1 CD 法施工段地质条件

Fig. 1 Geological conditions of the CD method construction section

表 1 材料参数
Table 1 Material properties

名称	厚度/ m	天然重度/ (kN · m ⁻³)	弹性 模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)
杂填土	22.0	14.0	11	0.24	8	23
强风化泥质粉砂岩	6.0	21.0	42	0.28	0	38
中风化泥质粉砂岩	13.5	22.3	40	0.26	0	43
中风化砾岩	38.5	25.0	50	0.20	0	45
中隔壁	—	78.0	49 000	0.20	—	—
初期支护	—	26.0	85 200	0.20	5 000	62

2 数值分析模型建立与参数选取

采用 FLAC3D 软件对地铁大断面暗挖隧道 CD 法施工开挖爆破响应进行分析,数值模型如图 2 所示,模型长、宽、高分别为 80,60,80m,隧道外围使用渐变放射网格模拟。隧道顶部埋深 34m,净高与净宽分别为 8.8,12.8m,为马蹄形断面。隧道被 0.2m 中隔壁划分为左幅与右幅,左上台阶掌子面与右上台阶掌子面间距为 5m,左中台阶掌子面与右中台阶掌子面间距为 5m。模型共采用 187 758 个网格节点,179 040 个有限差分单元体。

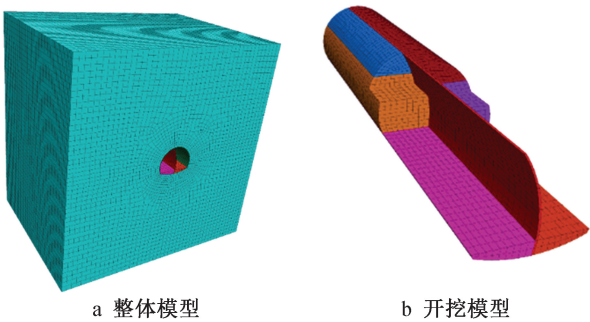


图 2 数值分析模型

Fig. 2 Numerical analysis model

暗挖隧道施工土体与隧道均采用莫尔-库仑弹性本构模型模拟,上表面(土层表面)设为自由边界,其他面设置法向位移约束。现场施工过程中,施工段较长、地质围岩条件复杂,隧道上部为软土,数值模拟时,将矿山法隧道设置在上软下硬的地层条件中,爆破点设在下台阶仰拱。

基于圣维南荷载等效原理,将作用在炮孔壁上的爆破荷载等效后施加于同排炮孔连心线或面上,以模拟爆炸作用。利用 fish 语言在与爆孔连接的垂直平面上施加竖直 z 向等效荷载峰值时程曲线,以模拟炸药爆破,同时通过调整水平 x 向荷载施加距离,以控制爆破单响药量。

为使有限元建模及分析过程更简洁方便,本文

将喷射混凝土和钢拱架联合支护体系等效为实体单元,等效后的初期支护密度为 $2.60\times10^3\text{kg/m}^3$,弹性模量为 85.2GPa 。

3 现场监测

监测内容包括隧道变形监测和隧道振动速度监测,其中隧道变形监测为拱顶沉降监测,监测点为 G1 和 G2;左幅隧道拱腰振动速度监测点为 B1 点,右幅隧道拱腰振动速度监测点为 D2 点(见图 3)。隧道变形监测共设 4 个断面,分别距左幅隧道掌子面 0,5,10,15m;振动速度监测断面较多,左右幅隧道分别有 24 个和 23 个监测断面。

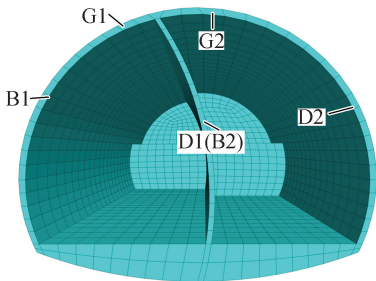


图 3 监测点布置

Fig. 3 Layout of monitoring points section

4 安全控制分析

未经安全控制的数值模拟 CD 法直接开挖后,隧道衬砌与隧道内土体塑性破坏如图 4 所示,红色区域表示已经发生破坏的区域,而绿色区域则表示发生了塑性变形但未发生破坏的区域。由图 4 可知,左右幅隧道衬砌钢拱架锁脚土体存在塑性区或破坏区,表明左右幅隧道衬砌钢拱架锁脚土体发生破坏。同时,中隔壁与土体和隧道衬砌接触的区域同样存在塑性区或破坏区,尤其是中隔壁与隧道衬砌接触的区域,由于围岩应力作用与刚性接触的原因,该区域易发生塑性破坏。此外,隧道掌子面出现了明显的破坏区域,说明该段区域在 CD 法施工过程中易塌落失稳。

针对围岩损失安全控制而言,左右幅隧道掌子面处施工过程中需及时喷射混凝土,隧道衬砌中的钢拱架需与围岩紧贴,而左右幅隧道衬砌钢拱架锁脚需及时锁固。在隧道掘进时应合理规划,尽量减弱爆破振动对隧道的影响。

5 数值模拟结果分析

5.1 爆破振动峰值分布规律

左幅隧道不同位置仰拱爆破时,左右幅隧道拱腰振动速度峰值分布规律如图 5,6 所示。由于 CD 法施工的原因,图 6 左幅隧道爆源位置皆向前移动 5m。

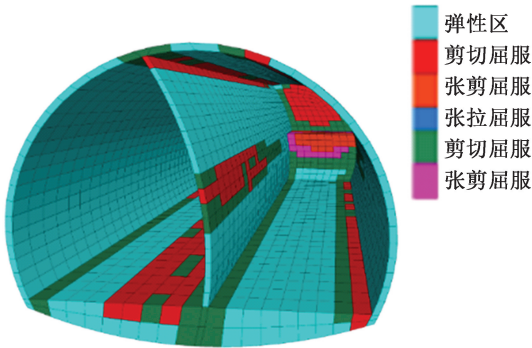


图 4 隧道塑性破坏分布

Fig. 4 Distribution of plastic damage in tunnels

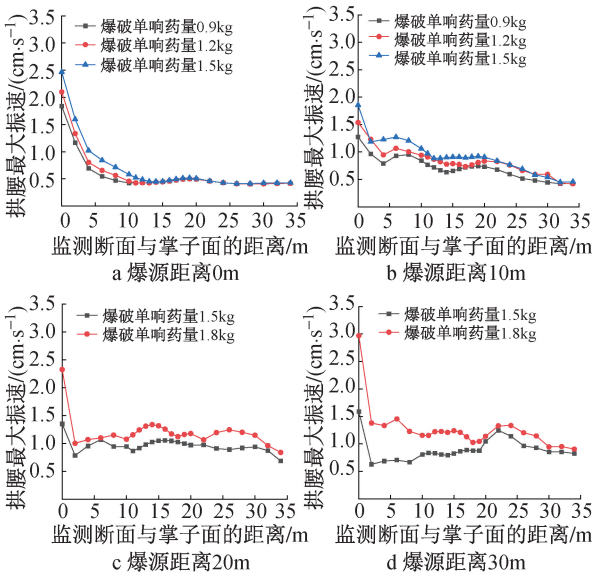


图 5 右幅隧道拱腰振动速度峰值分布规律

Fig. 5 Distributions of peak vibration velocity of the right tunnel arch waist

由图 5,6 可知,当左幅隧道仰拱爆破位于同一位置时,左右幅隧道拱腰均出现了爆破振动速度放大效应,并且左幅隧道拱腰爆破振动速度放大效应大于右幅隧道拱腰,说明隧道边墙临空存在绕射叠加作用,爆源同侧拱腰放大效应大于爆源异侧拱腰,该放大效应可能是由隧道断面发生变化导致的,且该放大效应随着爆破药量的增大而增强。由于掌子面附近爆破振速均存在边墙放大效应,故靠近掌子面的隧道断面爆破振速不符合萨道夫斯基公式规律。

仰拱爆破点远离左幅隧道掌子面 2 倍跨度(跨度 12m)时,在边墙临空面导致的放大效应与前面提及的变截面导致的放大效应存在重叠,该放大效应不仅随着爆破药量的增大而增强,也随着掌子面距离的增加而增强。

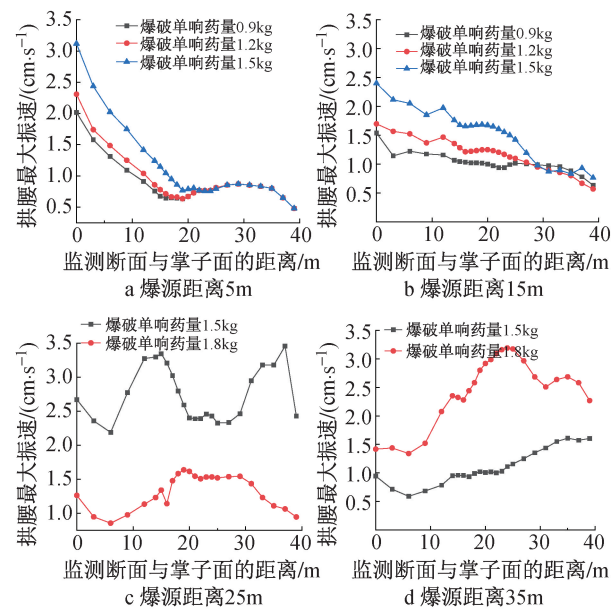


图6 左幅隧道拱腰振动速度峰值分布规律
Fig. 6 Distributions of peak vibration velocity of the left tunnel arch waist

5.2 安全单响药量控制

综合考虑 GB 6722—2023《爆破安全规程》与 DL/T 5135—2013《水电水利工程爆破施工技术规范》中关于隧道安全允许振速和支护新浇混凝土最大允许振速之后,将最大振动速度 2cm/s 作为仰拱爆破的安全控制阈值。

左右幅隧道仰拱在不同单响药量爆破时,左右幅隧道拱腰振速最大值如表 2 所示,对比左右幅隧道拱腰振速最大值,与上述安全单响药量的控制阈值对比后确定相对应的爆破安全单响药量。爆破点距离左幅隧道掌子面 5, 15, 25, 35m 时,仰拱的最大(安全)单响药量分别为 0.9, 1.2, 1.5, 1.5kg。爆破点距离右幅隧道掌子面 5, 15, 25m 仰拱的最大(安全)单响药量分别为 0.6, 0.9, 1.5kg。左幅隧道在距离其掌子面 25m 范围内的仰拱中爆破时,安全爆破单响药量与其距离呈线性正相关关系;而爆源距离超过 25m 时,其爆破安全单响药量几乎不变化。当爆源距离在 25m 范围内,右幅隧道爆破时安全爆破单响药量与爆源距离大致也呈线性正相关关系。

5.3 爆破安全控制效果分析

基于前述计算结果,合理规划不同爆源距离下的最大单响药量,通过数值模拟得到左右幅隧道不同位置仰拱爆破时,左右幅隧道掌子面处拱顶沉降变化如表 3 所示。隧道少数沉降为负值表示拱底出现向上抬升,这主要是由爆破作用下中隔壁振动的影响所致。拱顶沉降均符合规范控制要求,说明选

表 2 不同单响药量在隧道不同部位的振动响应
Table 2 Vibration response with different single charge at different parts of the tunnel

隧道 爆破 部位	爆源 距离/ m	低药量		高药量		安全 单响 药量/kg
		单响 药量/ kg	拱腰振速 最大值/ (cm·s ⁻¹)	单响 药量/ kg	拱腰振速 最大值/ (cm·s ⁻¹)	
左幅 隧道	5.0	0.9	2.016	1.2	2.318	0.9
	15.0	1.2	1.696	1.5	2.399	1.2
	25.0	1.5	1.639	1.8	3.343	1.5
	35.0	1.5	1.608	1.8	3.191	1.5
右幅 隧道	5.0	0.6	1.768	0.9	3.251	0.6
	15.0	0.9	2.032	1.2	2.397	0.9
	25.0	1.5	2.005	1.8	3.544	1.5

取的爆破最大单响药量较合理。

表 3 不同位置仰拱爆破时的隧道拱顶沉降
Table 3 Settlement of tunnel vault during blasting of inverted arch at different positions

隧道 爆破 部位	爆源 距离/ m	最大 单响 药量/ kg	左幅隧道拱顶 沉降/mm		右幅隧道拱顶 沉降/mm		
			掌子面下台阶	下台阶 后 5m	掌子面下台阶	下台阶 后 5m	下台阶 后 5m
左幅 隧道	5	0.9	0.80	0.50	0.10	-0.20	-0.40
	15	1.2	0.60	-1.20	2.20	1.90	1.10
	25	1.5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	35	1.5	-0.10	-0.10	-0.80	-0.10	0.70
右幅 隧道	5	0.6	0	-0.10	0	0	0
	15	0.9	0.10	0.06	0	0.12	0.10
	25	1.5	0	0	0	0.05	0.10

基于数值模拟结果对巨龙大道站矿山法段进行实际施工指导,当暗挖隧道开挖时,拱顶沉降与净空收敛的监测频率为 1 次/d,当暗挖隧道开始支撑时,拱顶沉降与净空收敛的监测频率为 1 次/2d,当暗挖隧道施工完成后,拱顶沉降与净空收敛的监测频率为 1~3 次/月。以监测时间 2021 年 12 月 1 日—2022 年 4 月 15 日为例,隧道拱顶沉降监测结果如图 7 所示。由图 7 可知,左右幅隧道拱顶沉降基本为-2~3mm,与表 3 中隧道拱顶沉降数值计算结果基本一致,可见数值分析的计算结果较为可靠。

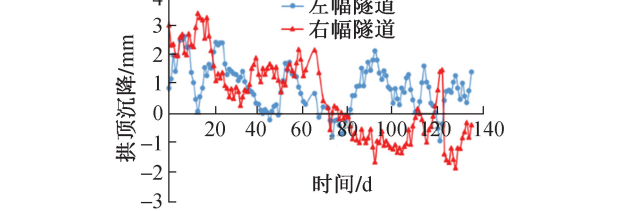


图 7 左右幅隧道拱顶沉降变化曲线
Fig. 7 Vault settlements of both left and right tunnels

6 结语

1) 围岩损伤控制的技术关键在于左右幅隧道掌子面处施工过程中需及时喷射混凝土,隧道衬砌中的钢拱架需与围岩紧贴,左右幅隧道衬砌钢拱架锁脚需及时锁固。

2) 隧道CD法施工爆破作业时,应考虑变截面振动放大效应及边墙放大效应,控制最大单响药量以确保隧道施工安全。

3) 针对现场工程实际,提出了不同爆破点的安全单响药量控制阈值。左右幅隧道在距离掌子面25m范围内的仰拱中爆破最大单响药量与爆源距离呈线性正相关。

参考文献:

- [1] LEI X Y, SWOBODA G, ZENZ G. Application of contact-friction interface element to tunnel excavation in faulted rock [J]. Computers and geotechnics, 1995, 17(3): 349-370.
- [2] 贾剑青, 王宏图, 李晓红, 等. 深埋隧道软硬交替复合顶板岩体变形破坏分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 937-940, 950.
JIA J Q, WANG H T, LI X H, et al. Analysis of deformation and failure of soft and hard alternating composite roof rock mass in deep buried tunnel [J]. Rock and soil mechanics, 2005, 26(6): 937-940, 950.
- [3] YASSAGHI A, SALARI-RAD H. Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran: A case study [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2005, 42(1): 95-108.
- [4] 汪宏, 蒋超. 浅埋偏压隧道洞口坍方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3481-3485.
WANG H, JIANG C. Numerical analysis and treatment of collapse at portal of shallow buried bias tunnel [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(11): 3481-3485.
- [5] 申玉生, 邹成路, 靳宗振, 等. 穿越软硬交界面隧道结构动力响应特性研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 95-102.
SHEN Y S, ZOU C L, JIN Z Z, et al. Study on dynamic response characteristics of tunnel structure crossing soft and hard interface [J]. Modern tunnel technology, 2015, 52(3): 95-102.
- [6] 陈红军, 刘新荣, 王成, 等. 倾斜软硬互层隧道破坏过程的围岩应力研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 68-76.
CHEN H J, LIU X R, WANG C, et al. Study on the surrounding rock stress in the failure process of inclined soft and hard interbedded tunnel [J]. Modern tunnel technology, 2017, 54(4): 68-76.
- [7] 崔光耀, 孟令瀚, 张军徽, 等. 隧道洞口软硬围岩交接段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 84-90.
CUI G Y, MENG L H, ZHANG J H, et al. Large-scale shaking

table model test on seismic response of soft and hard surrounding rock at tunnel portal [J]. Advanced engineering sciences, 2018, 50(6): 84-90.

- [8] XIAO Y X, FENG X T, LI S J, et al. Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rock bursts in tunnels [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2016, 83: 174-181.
- [9] 黄惟. 上软下硬复合地层隧道施工稳定机理及风险评估研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
HUANG W. Study on the stability mechanism and risk assessment of tunnel construction in upper-soft and lower-hard composite strata [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [10] 张庆彬, 阳军生, 吴从师, 等. 上覆岩土条件下孤石爆破预处理炸药单耗实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 695-702.
ZHANG Q B, YANG J S, WU C S, et al. Explosive unit consumption experiment of boulder blasting pretreatment under overlying rock and soil conditions [J]. Explosion and shock waves, 2016, 36(5): 695-702.
- [11] 李峰. 朔州隧道上软下硬土石分界微差减震静态爆破施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2013(S2): 87-90.
LI F. Millisecond shock absorption static blasting construction technology of upper-soft and lower-hard soil-rock boundary in Suzhou tunnel [J]. Railway construction technology, 2013(S2): 87-90.
- [12] 李志堂, 尹荣申, 孟亚锋, 等. 土岩交错地层隧道爆破施工的振动响应及空洞效应分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 588-593.
LI Z T, YIN R S, MENG Y F, et al. Analysis of vibration response and cavity effect of tunnel blasting construction in soil-rock staggered stratum [J]. Tunnel construction, 2018, 38(4): 588-593.
- [13] 李洋溢, 虞杨, 秦鲜卓. 隧道下穿既有省道不稳定坡体微扰动施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(9): 93-97.
LI Y Y, YU Y, QIN X Z. Study on micro disturbance construction technology of tunnel under crossing existing provincial highway unstable slope [J]. Construction technology, 2022, 51(9): 93-97.
- [14] 王超. 毫秒延期爆破技术在喀斯特岩溶地区特大高边坡施工中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 66-70.
WANG C. Application of millisecond delay blasting technology in construction of extremely high slope in karst area [J]. Construction technology, 2023, 52(11): 66-70.
- [15] 杨瑞, 罗韩军, 陈雁斌, 等. 隧道光面爆破参数优化及应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(22): 97-102.
YANG R, LUO H J, CHEN Y B, et al. Study on optimization and application of tunnel smooth blasting parameters [J]. Construction technology, 2023, 52(22): 97-102.