

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.011

# 大断面隧道空孔直线掏槽爆破高效掘进方法

王 玮<sup>1</sup>, 怀平生<sup>2</sup>, 降世良<sup>1</sup>

(1. 连云港明达工程爆破有限公司, 连云港 222021; 2. 中铁十二局集团国际工程有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 在阿联酋阿提哈德铁路大断面隧道项目中,为满足当地高标准建设要求和确保按期完工,采用了空孔直线掏槽爆破方法,并组建工程数学模型输出爆破参数指导施工。综合考虑现场钻头直径后,利用数学模型的计算结果设计了4个102 mm空孔和6个64 mm空孔两种空孔直线掏槽方案,理论开挖进尺分别为4.5 m和4 m,作为对比设计了理论开挖进尺为4 m的楔形掏槽方案。经 $T_7$ 隧道现场测试统计,4空孔方案平均每循环进尺为4.3 m,炮孔利用率为95.6%,较对比实施的楔形掏槽方案提高0.6 m每循环。经 $T_{10}$ 隧道现场测试统计,6空孔方案平均每循环进尺为3.8 m,炮孔利用率为95.0%,较对比实施的楔形掏槽方案最大单段药量降低85%,跟踪监测数据显示,最大爆破振动速度始终低于控制指标,保障了 $T_{10}$ 隧道周边燃气管线的安全。空孔直线掏槽在项目中的大量应用验证了工程数学模型的有效性,同时也表明该方法在中硬及坚硬条件下的大断面隧道中,与传统的楔形掏槽爆破方法相比可加快施工进度,降低爆破成本,并能有效地控制爆破振动,具有显著的经济价值。

**关键词:** 大断面隧道; 空孔直线掏槽; 隧道爆破; 爆破进尺; 爆破振动

中图分类号: TD236 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)03-0076-06

## Efficient Driving Method for Large Section Tunnel by Burn Cut Blasting with Uncharged Holes

WANG Wei<sup>1</sup>, HUI Ping-sheng<sup>2</sup>, JIANG Shi-liang<sup>1</sup>

(1. Lianyungang Mingda Engineering Blasting Co., Ltd., Lianyungang 222021, China;

2. International Engineering Co., Ltd. of China Railway 12 Bureau Group Ltd.,  
Beijing 100176, China)

**Abstract:** Burn cut blasting with uncharged holes was adopted in a large-section tunnel project of Etihad Railway in the United Arab Emirates to ensure timely completion of the construction with a high standard. Engineering mathematical models are established to determine blasting parameters and guide the construction process. Considering the bit diameter on site, two burn cut plans with four 102 mm-diameter uncharged holes and six 64 mm-diameter uncharged holes are presented by using mathematical models. The theoretical excavation footage for each of the two plans is 4.5 m and 4 m, respectively. As a contrast, a wedge cut scheme is designed with a theoretical footage of 4m. According to the field test statistics of  $T_7$  tunnel, the average footage per cycle of the 4-uncharged-hole plan is 4.3 m with a hole efficiency of 95.6%, which is 0.6 m more than the footage of wedge cut plan. According to the field test statistics of  $T_{10}$  tunnel, the average footage per cycle of the 6-uncharged-hole plan is 3.8 m with a hole efficiency of 95.0%. Compared to the wedge cut plan, the maximum charge per delay has decreased by 85%, which has controlled the PPV below the allowed value indicated by the monitoring data. Numerous applications of burn cut with uncharged holes in this project have validated the effectiveness of the engineering mathematical model in medium-hard and hard rocks. At the same time, the burn cut plan can speed the construction process, reduce blast costs, and effectively control blast vibrations.

**Key words:** large section tunnel; burn cut; tunnel blasting; blasting footage; blasting vibration

## 1 工程概况

阿联酋阿提哈德铁路二期 D 标段包含 9 条隧道, 全长 6936 m, 设计为单线隧道。其中  $T_1$ 、 $T_2$  隧道位于拉斯海马酋长国, 剩余 7 条隧道则集中在富吉拉酋长国境内。围岩由辉长岩、方辉橄橄榄岩、石英岩等一种或多种混合组成, 地质情况复杂, 岩石单轴抗压强度为 20 ~ 180 MPa 不等, 围岩支护等级为  $S_1 \sim S_6$  级。

隧道由法国 SYSTRA 公司设计, 美国 Jacobs 公司监理咨询, 执行英国标准, 采用新奥法施工。其典型断面为 14.7 m (宽)  $\times$  10.3 m (高), 面积 128.3 m<sup>2</sup>。对于  $S_4$  级及以上的围岩, 可使用钻爆法开挖洞身。

## 2 爆破方案分析

### 2.1 爆破施工条件

按施工方法要求, 开挖工作实施前由施工方和监理方地质工程师对隧道断面做地质素描, 根据评级确定支护类型与下一循环开挖长度。爆破后的支护需立即跟进, 严禁在未完成支护时开挖下一循环。根据施工规划, 钻爆及锚杆安装施工应在 9 h 内完成, 否则会挤占其他工序时间, 影响后一循环爆破的实施。

自炸药到场至爆后解除警戒的所有爆破工序均在警方的现场监督下实施, 包括清场、装药填塞、起爆、测振、销毁剩余器材等。且每循环仅有一次爆破机会, 不允许二次爆破处理欠挖。爆破器材用量及爆破时间需提前三个工作日上报给警方审批, 一旦爆破申请获得通过, 警方不允许爆破时间、雷管段别、炸药用量等现场施工细节出现变化。如需要在申请通过后变更施工细节, 则应取消后续爆破并等待变更申请的生效。

9 条隧道中的多条附近存在被保护物, 如民居、高压线塔、燃气管线等。这些被保护物的产权方均提出了爆破振动监测的要求, 若未及时提供监测数据或爆破振动超标, 产权方则有权对施工方采取罚款或停工处罚。

### 2.2 爆破方案选择

同样取 90% 炮孔利用率, 孔深 3 m 两天 3 次爆破与孔深 4.5 m 每天 1 次爆破的掘进效率是一致的。但是受多种严苛要求的制约, 与短进尺、高频次

的爆破方案相比, 大进尺、低频次的爆破方案更能适应项目的现实条件。

若想实现 4.5 m 的理论循环进尺, 则需要使掏槽孔达到 4.7 m 的垂直进深。对于楔形掏槽方案, 常规单排掏槽的掏槽角度一般不大于 60°, 此时掏槽孔的孔深为 5.4 m, 超出了钻杆长度。另一方面, 楔形掏槽孔为爆破振动峰值出现部位<sup>[1,2]</sup>, 过深的炮孔将导致掏槽孔装药增多, 不利于控制爆破振动; 复式掏槽虽可以解决掏槽角度限制问题, 但需要钻凿多排掏槽孔<sup>[3]</sup>, 还需考虑到不同排掏槽孔之间的延期时间选择及后响炮孔内炸药的冲击波减敏现象<sup>[4]</sup>, 这将使整个钻爆施工复杂化且炮孔利用率不高<sup>[5]</sup>。

空孔直线掏槽则提供了另一种选择, 相较楔形掏槽其循环进尺仅与钻杆长度和空孔所创造的补偿空间有关<sup>[6]</sup>。优点为爆后岩石块度均匀, 爆堆集中于铲装, 方案优化完成后炮孔位置和孔内起爆雷管段别可持续沿用不受进尺影响, 单段最大药量容易控制等。缺点为钻孔设备昂贵、对钻孔精度要求较高、对钻孔设备操作人员的素质要求较高等。

## 3 工程数学模型

爆破参数通常是与爆破器材品种、地质条件、断面大小、钻头直径等因素相关的, 业内缺乏公认的爆破参数计算方法。因施工中地质条件多变, 通过有限元等方法从微观上模拟非均质岩石较为困难, 且有限元软件也难以在施工一线应用普及。因此主要通过宏观统计建立的经验数学模型来计算爆破参数。

### 3.1 炮孔数量

工作面上的炮孔数量可用式(1)、(2)估算<sup>[7]</sup>

$$N = 3.3 \sqrt[3]{fS^2} \quad (1)$$

$$f = F/10^7 \quad (2)$$

式中:  $N$  为炮孔总数;  $f$  为岩石坚固性系数;  $F$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $S$  为隧道爆破断面面积, m<sup>2</sup>。

### 3.2 炸药单耗

影响炸药单耗的主要因素有炸药的品种、岩石性质、自由面的数量等。可按 Pokrovsky 提出的经验公式计算<sup>[8]</sup>

$$q = q_1 e f_1 k_{cons} \quad (3)$$

式中:  $q$  为修正爆破单耗, kg/m<sup>3</sup>;  $q_1$  为未修正爆破单耗, 取 0.1 倍的岩石坚固性系数;  $e$  为炸药换算系数, 为 TNT 爆热与所用炸药爆热的比值;  $f_1$  为岩石结构系数, 致密岩石取 0.8, 脆性岩石取 1.1, 板岩和含细碎裂隙岩石取 1.3, 粘性和多孔岩石系数取 2.0;  $k_{cons}$  为自由面系数, 只有一个自由面时按下式确定

$$k_{cons} = \frac{6.5}{\sqrt{S}} \quad (4)$$

式中:  $S$  为自由面面积,  $m^2$ 。

### 3.3 底板孔参数

底板孔在起爆顺序中靠后, 延期时间较长。爆破时有大量岩石覆盖, 因此岩石移动的阻力较大, 孔距  $S_L$  和排距  $B_L$  的计算方法与其它炮孔不同。可按下式计算<sup>[9]</sup>

$$B_L = 0.9 \sqrt{\frac{q_e PRP_{ANFO}}{f_2 (S_L/B_L)}} \quad (5)$$

式中:  $q_e$  为线装药密度,  $kg/m$ ;  $PRP_{ANFO}$  为相对做功能力, 为所用炸药爆热与 ANFO 爆热的比值;  $f_2$  为系数, 一般取 1.45;  $S_L/B_L$  为底板孔炮孔密集系数, 一般为 1~2。

### 3.4 周边孔和崩落孔参数

周边孔因线装药密度较低, 不耦合系数大, 孔距  $S_p$  按两倍的压缩破坏半径  $R_{sh}$  确定。崩落孔则为应力波和高压气体联合作用破碎岩石, 其孔距  $S_s$  及排距  $B_s$  等于破裂破坏半径  $R_{fr}$ 。

压缩区和破裂区半径可使用 Andrievskij 提出的经验公式<sup>[8]</sup>

$$R_{sh} = d \sqrt{\frac{\rho D^2}{8f_1 10^7}} \quad (6)$$

式中:  $R_{sh}$  为压缩区半径,  $m$ ;  $d$  为炮孔直径,  $m$ ;  $\rho$  为炸药密度,  $kg/m^3$ ;  $D$  为炸药爆速,  $m/s$ 。

$$R_{fr} = 0.7 d_{sh} \sqrt{\frac{\rho D^2 r}{8R_{sh} \tau_c}} \quad (7)$$

式中:  $R_{fr}$  为裂隙区半径,  $m$ ;  $d_{sh}$  为压缩区直径,  $m$ ;  $r$  为炮孔半径,  $m$ ;  $\tau_c$  为岩石抗剪强度, 一般为抗压强度的 0.1~0.4。

### 3.5 掏槽孔参数

根据爆破施工目的和使用的机具, 常见的空孔直线掏槽空孔数量为 1~4 个, 5 空孔和 6 空孔的布置方法较为少见<sup>[10-13]</sup>, 为确定空孔直径与空孔数量可按下式计算<sup>[14]</sup>

$$d_e = \frac{(3.2L)^2}{\sqrt{N_1}} \quad (8)$$

$$D_e = d_e \sqrt{N_1} \quad (9)$$

$$a = 1.5D_e \quad (10)$$

式中:  $d_e$  为空孔直径,  $mm$ ;  $L$  为理论循环进尺,  $m$ ;  $N_1$  为空孔数量;  $D_e$  为与多个空孔起到相同作用的单个空孔等效直径,  $mm$ ;  $a$  为中心装药孔至空孔距离,  $mm$ 。

## 4 实例分析

本项目钻孔设备为铁建重工 ZYS113 型三臂凿岩台车, 钻孔直径  $\phi 45 \sim 140 \text{ mm}$ , 可满足炮孔、地质探孔、大直径空孔等钻凿要求。爆破所使用炸药为奥瑞凯 Senatel Magnafrac 乳化炸药, 周边孔及与周边孔相邻崩落孔所用药卷规格为  $\phi 32 \text{ mm} \times 550 \text{ mm} \times 0.5 \text{ kg}$ , 其余炮孔所用药卷规格为  $\phi 40 \text{ mm} \times 360 \text{ mm} \times 0.5 \text{ kg}$ , 炸药密度  $1.15 \text{ g/cm}^3$ , 爆速  $5000 \text{ m/s}$ , 爆热  $2800 \text{ kJ/kg}$ 。孔内起爆雷管为奥瑞凯 Exel LP 高精度抗拉导爆管雷管, 雷管段别及延期时间见表 1。

表 1 雷管段别表

Table 1 Delay number and delay times

段别	延期时间/ms	段别	延期时间/ms	段别	延期时间/ms
1	100	8	800	15	1800
2	200	9	900	16	2000
3	300	10	1000	17	2400
4	400	11	1100	18	2800
5	500	12	1200	19	3200
6	600	13	1400	20	3600
7	700	14	1600	21	4000

孔外连接雷管为奥瑞凯生产的 Exel HTD 导爆管传爆雷管, 延期时间有 0 ms、9 ms、17 ms、25 ms 四种可选。导爆索规格为 40 g/m, 作为光面爆破装药使用。

### 4.1 空孔直线掏槽掏槽爆破

#### 4.1.1 4 空孔直线掏槽

$T_7$  隧道围岩为辉长岩, 隧道总长 1090 m, 取样测试岩石抗压强度为 97~142 MPa, 围岩等级大部分为  $S_2 \sim S_3$  级。根据使用目的不同现场配备了 45 mm、64 mm、102 mm 三种尺寸的钻头, 由进尺 4.5 m 以及公式 (8) 和 (9) 可求得空孔直径为 102 mm 时, 需使用 4 个空孔方能满足循环进尺 4.5 m 的需求, 此时掏槽区域孔位布置见图 1, 爆破参数计算结果见表 2。

表 2 爆破参数计算表

Table 2 Calculated blasting parameters

炮孔数量	单耗/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	周边孔 孔距/m	崩落孔 孔距/m	底板孔 孔距/m	底板孔 排距/m
202	0.99	0.5	1.0	0.8	0.6

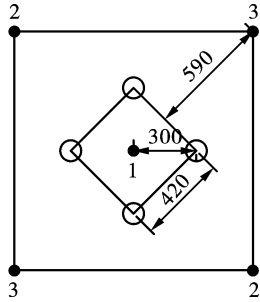


图 1 4 空孔直线掏槽布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout of burn cut with 4 empty holes section(unit:mm)

结合施工经验对计算得到的爆破参数微调后,形成炮孔布置图 2 与爆破参数表 3。其中炮孔 201 个,

周边孔孔排距 0.5 m × 0.55 m、崩落孔孔排距 1.1 m × 1 m、底板孔孔排距 0.9 m × 0.6 m。每循环钻孔总延米 906.3 m, 合计装药量 600 kg, 单耗 1.04 kg/m<sup>3</sup>。使用 0 ms、9 ms、17 ms、25 ms 四种孔外连接雷管将隧道断面划分为田字网格区域, 除周边孔外最大同段炮孔数量为 6 个, 最大单段药量 27 kg。

爆后爆堆集中, 岩石块度均匀, 最大粒径在 0.9 m 以下。经 213 次爆破后综合统计, 共掘进 914.8 m, 平均每炮进尺 4.3 m。现场操作中曾因围岩变弱而将循环进尺降低至 3.5 ~ 4 m, 除减少孔深和总装药量以外, 剩余其它参数仍保持原方案不变, 因此实际炮孔利用率高于 95.6%。

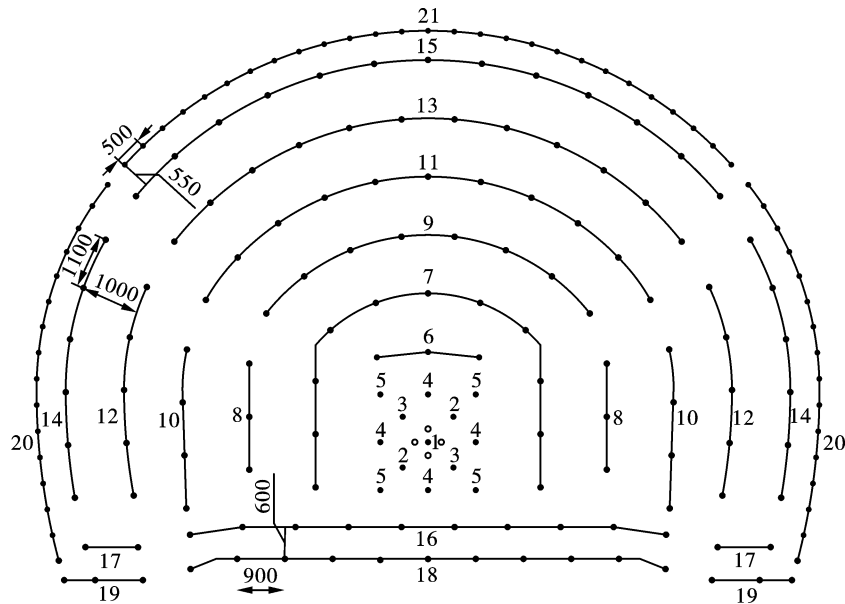


图 2 全断面炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 2 Holes layout of full section(unit:mm)

表 3 爆破参数表

Table 3 Blasting parameters

炮孔类型	孔深/m	填塞/m	孔数	延期时间/ms	装药直径/mm	单孔药量/kg	总装药量/kg
空孔	4.7		4				
掏槽孔	4.7	1.1	5	100/200/300	40	5.0	25.0
辅助孔	4.5	1.6	11	300/500/600	40	4.0	44.0
崩落孔 1	4.5	1.6	11	700	40	4.0	44.0
崩落孔 2	4.5	1.6	14	800/900	40	4.0	56.0
崩落孔 3	4.5	1.6	19	1000/1100	40	4.0	76.0
崩落孔 4	4.5	1.6	22	1200/1400	40	4.0	88.0
崩落孔 5	4.5	1.2	25	1600/1800	32	3.0	75.0
底板孔 1	4.5	2.0	14	2000/2400	40	3.5	49.0
底板孔 2	4.5	1.3	17	2800/3200	40	4.5	76.5
周边孔	4.5	0.5	59	3600/4000	32	1.0	59.0
合计			201				592.5

#### 4.1.2 6空孔直线掏槽

$T_{10}$ 隧道围岩为辉长岩,隧道总长966 m,取样测试岩石抗压强度为79~107 MPa,围岩等级大部分为 $S_2 \sim S_3$ 级。使用公式(8)和(9)可求得空孔直径为64 mm时,布置6个空孔理论循环进尺为4 m,此时掏槽区域孔位布置见图3。

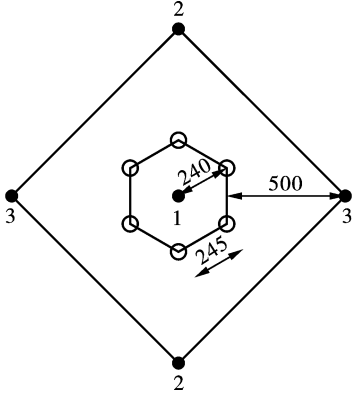


图3 6空孔直线掏槽布置图(单位:mm)

Fig. 3 Layout of burn cut with 6 empty holes section(unit:mm)

结合施工经验对计算得到爆破参数微调后,炮孔186个,周边孔孔排距 $0.5\text{ m} \times 0.55\text{ m}$ 、崩落孔孔排距 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 、底板孔孔排距 $1.0\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。钻孔总延米746.2 m,合计装药量500 kg,单耗 $0.97\text{ kg/m}^3$ 。使用9 ms孔外连接雷管以串并联连接起爆网络,除周边孔外最大同段炮孔数量降低至3个,最大单段药量12 kg。

爆后爆堆集中,岩石块度均匀,最大粒径在0.8 m以下。经3次爆破后综合统计,共掘进11.4 m,平均每炮进尺3.8 m,炮孔利用率95.0%。

#### 4.2 楔形掏槽爆破

$T_7$ 隧道施工初期采用楔形掏槽全断面爆破方式,设计开挖进尺4 m。其中炮孔200个,周边孔孔排距 $0.5\text{ m} \times 0.55\text{ m}$ 、崩落孔孔排距 $1.1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、底板孔孔排距 $0.9\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。钻孔总延米816.8 m,合计装药量575 kg,单耗 $1.12\text{ kg/m}^3$ 。掏槽孔布置如图4所示。使用孔内延期起爆网络,除周边孔外最大同段炮孔数量为16个,最大单段药量为80 kg,最大单段装药产生部位为第一排掏槽孔。若在楔形掏槽隧道爆破中使用孔内外双延期方案控制爆破振动,则会将掏槽孔分割为不同段别,破坏了左右两侧掏槽孔的联合抛掷作用,不利于将掏槽中心多达 $51\text{ m}^3$ 的岩石抛出。

爆后部分岩石被抛掷到70~100 m,且最大岩

石粒径达到了1.8 m。对掌子面岩石喷漆始终表明,大块岩石为掏槽中心部位产生。经11次爆破后综合统计,共掘进40.3 m,平均进尺3.7 m,炮孔利用率92.5%。

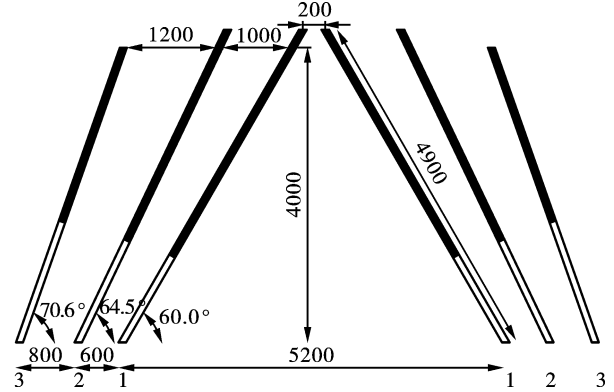


图4 楔形掏槽布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout of wedge cut(unit:mm)

#### 4.3 对比分析

空孔直线掏槽爆破进尺较楔形掏槽爆破提高了0.6 m/循环,按 $T_7$ 隧道80%长度采用空孔直线掏槽爆破计算,则减少爆破35次,可提前一个月完成隧道开挖任务。同时也可以节约炸药、雷管、钻孔数量,经济效益显著。由于钻杆长度为5 m,现案仍未达到进尺极限,存在0.4 m左右的进尺提升空间,因此可以预计空孔直线掏槽爆破进尺较传统楔形掏槽爆破的掘进效率最大可增加25%。

在获得同样循环进尺的情况下,空孔直线掏槽爆破方案较楔形掏槽单段最大药量可降低85%。对41~110 m处的燃气管线进行了28次爆破振动监测,获得的最大爆破振动速度为2.86 cm/s,低于燃气公司提出的5 cm/s控制指标,表明空孔直线掏槽结合孔内外双延期起爆网络在不缩短循环进尺的情况下可有效的降低爆破振动。

## 5 结论

(1)空孔直线掏槽爆破炮孔均匀分布在隧道断面上,掏槽区域炮孔被划分成5个延期段别,爆破后岩石块度小、爆堆集中。

(2)空孔直线掏槽爆破可通过孔内外双延期方案降低最大单段药量,减小爆破振动。在周边存在被保护物时,相较楔形掏槽爆破可获得更大的循环进尺。

(3)空孔直线掏槽爆破的大进尺爆破方案对小进尺向下兼容,减小开挖进尺时只需要减少孔深和

装药量,其余参数保持不变。

(4)空孔直线掏槽爆破所设置的大直径空孔可根据现场硬件情况灵活调整,通过空孔直径、空孔数量与循环进尺的匹配,建立动态的替代方案。

### 参考文献 (References)

- [1] 石洪超,张继春. 并行小净距隧道楔形掏槽爆破振动效应研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(2):607-613.
- [1] SHI Hong-chao,ZHANG Ji-chun. Blasting vibration effect of wedge cut blasting in parallel small-distance tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(2):607-613. (in Chinese)
- [2] 李胜林,方真刚,杨 瑞,等. 浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析[J]. 爆破,2019,36(2):111-116,130.
- [2] LI Sheng-lin,FANG Zhen-gang,YANG Rui,et al. Analysis of ground vibration caused by blasting construction of shallow buried tunnel [J]. Blasting,2019,36(2):111-116,130. (in Chinese)
- [3] CHENG Bing,WANG Hai-bo,ZONG Qi,et al. Study of the double wedge cut technique in medium-depth hole blasting of rock roadways[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2021,46(5):4895-4909.
- [4] 郑卫东,吴 均,潘伟纲,等. 岩石结构中的爆炸应力波对乳化炸药性能的影响[J]. 爆破器材,2020,49(5):24-28.
- [4] ZHENG Wei-dong,WU Jun,PAN Wei-gang,et al. Effect of explosive stress waves in rock structures on the performance of emulsion explosives[J]. Explosive Materials,2020,49(5):24-28. (in Chinese)
- [5] 郑 静,李启月,赵新浩,等. 楔形掏槽爆破进尺影响因素探究[J]. 矿冶工程,2020,40(5):19-23.
- [5] ZHENG Jing,LI Qi-yue,ZHAO Xin-hao,et al. An exploration into influencing factors for footage of blasting with wedge cut [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2020,40(5):19-23. (in Chinese)
- [6] 汪 平. 某地下金属矿直眼掏槽爆破试验及控制措施[J]. 金属矿山,2021(8):52-56.
- [6] WANG Ping. Straight-hole cutting blasting test and control measures in an underground metal mine[J]. Metal Mine,2021(8):52-56. (in Chinese)
- [7] 汪 洋. 金属矿山巷道掘进掏槽爆破优化及应用研究[J]. 工程建设,2021,4(11):61-63.
- [7] WANG Yang. Study on optimization and application of tunnel excavation blasting in metal mine[J]. Engineering Construction,2021,4(11):61-63. (in Chinese)
- [8] KONONENKO M,KHOMENKO O,SAVCHENKO M,et al. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives [J]. Mining of Mineral Deposits,2019,13(3):22-30.
- [9] ZOU D. Theory and technology of rock excavation for civil engineering[M]. Springer Singapore,2017.
- [10] 黄宝龙. 大直径中空直眼掏槽技术在隧道救援中的应用[J]. 爆破,2018,35(4):74-77,83.
- [10] HUANG Bao-long. Application of parallel cut blasting with large empty hole in tunnel rescue [J]. Blasting,2018,35(4):74-77,83. (in Chinese)
- [11] CHANDRAKAR S,PAUL P S,SAWMLIANA C. Influence of void ratio on “Blast Pull” for different confinement factors of development headings in underground metalliferous mines [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,108:103716.
- [12] 赵国彦,赵井清,李启月. 9孔桶形掏槽一次成井技术[J]. 科技导报,2013,31(16):21-25.
- [12] ZHAO Guo-yan,ZHAO Jing-qing,LI Qi-yue. Nine-hole parallel cutting technology of the shaft excavation in one-step[J]. Science & Technology Review,2013,31(16):21-25. (in Chinese)
- [13] HIMANSHU V K,MISHRA A K,ROY M P,et al. Numerical simulation based approach for assessment of blast induced deformation pattern in slot raise excavation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,144:104816.
- [14] ALLEN M R. An analysis of burn cut pull optimization through varying relief hole depths[D]. Missouri University of Science and Technology,2014.