

DOI: 10.7672/sgjs2026070086

空孔数量对隧道直孔掏槽爆破效果影响研究*

王亚¹, 覃继华¹, 程兵^{2,3,4}, 叶福², 曹效礼¹, 赵波¹, 苏洪^{2,4}, 李洪伟^{2,4}

(1. 中铁十局集团有限公司, 山东 济南 250010; 2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;
3. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 4. 安徽理工大学安徽省新型爆炸
材料与爆破技术工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

[摘要] 为了获取隧道直孔掏槽爆破的最佳空孔数量, 采用显式动力分析平台 ANSYS/LS-DYNA 开展不同空孔数量下的直孔掏槽爆破数值模拟, 对比分析空孔数量对直孔掏槽爆破效果的影响, 并通过现场爆破试验探究其实际应用效果。结果显示: 随着空孔数量的增加, 直孔掏槽爆破的成腔面积逐渐增大, 当空孔数量 $N = 3, 4, 5, 6, 8$ 时, 成腔面积分别为 1 424, 1 595, 1 724, 1 833, 1 917 cm²; 成腔面积提升率随空孔数量的增加而减小, 当空孔数量从 6 增加到 8 时, 成腔面积仅提高了 4.58%, 综合考虑爆破成本和爆破效果, 建议直孔掏槽爆破使用 6 个空孔; 在现场试验中采用 6 个空孔时, 炮孔利用率为 94.3%、周边孔孔痕率为 86.1%, 试验结果证实了空孔数目 $N=6$ 的工程适用性。

[关键词] 隧道; 爆破; 直孔掏槽; 空孔; 成腔面积; 数值模拟; 试验

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0086-07

Influences of the Number of Empty Holes on Blasting Effects of Parallel Cutting in Tunnels

WANG Ya¹, QIN Jihua¹, CHENG Bing^{2,3,4}, YE Fu², CAO Xiaoli¹, ZHAO Bo¹,
SU Hong^{2,4}, LI Hongwei^{2,4}

(1. China Railway Tenth Bureau Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250010, China; 2. School of Chemistry and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
3. Engineering Research Center of Underground Mine Construction of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 4. Anhui Engineering Research Center of New Explosive Materials and Blasting Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: To obtain the optimal number of empty holes for parallel cutting in tunnels, the explicit dynamic analysis platform ANSYS/LS-DYNA was used to conduct numerical simulations of parallel cutting blasting under different numbers of empty holes to compare and analyze the influence of the number of empty holes on the blasting effects of parallel cutting, and explore its practical application effects through field experiments. The results showed that with the increase of the number of empty holes, the cavity area of parallel cutting blasting increased gradually. When the number of empty holes $N=3, 4, 5, 6, 8$, the cavity areas was 1 424, 1 595, 1 724, 1 833, 1 917 cm², respectively. However, the increase rate of cavity area could gradually decrease with the increase of the number of empty holes. When the number of empty holes increases from 6 to 8, the cavity area only increased by 4.58%. Considering the blasting cost and blasting effect comprehensively, it was recommended to use 6 empty holes in the parallel cutting blasting. In the field experiment, the hole utilization rate of 94.3% and peripheral hole mark rate of 86.1% were obtained when 6 empty holes were adopted, which confirmed

* 安徽省自然科学基金(2408085QA029); 矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金(JYBGCZX2023105)

[作者简介] 王亚, 工程师, E-mail: 815386308@qq.com

[通信作者] 程兵, 博士, 讲师, 硕士生导师, E-mail: 2022053@aust.edu.cn

[收稿日期] 2025-09-15

the engineering applicability of the numbers of empty holes $N=6$.

Keywords: tunnels; blasting; parallel cutting; empty holes; cavity areas; simulation; tests

0 引言

在隧道钻爆开挖过程中,掏槽爆破的作用是为后续炮孔提供新自由面和岩石碎胀补偿空间,从而降低围岩的夹制作用,以便于获取良好的循环进尺和炮孔利用率^[1-2]。目前,常用的掏槽爆破形式主要有直孔掏槽和楔形掏槽,其中直孔掏槽具有施工工艺简单、炮孔深度灵活、槽腔成型规整等特点,因此在隧道爆破工程中得到广泛应用^[3]。

对于直孔掏槽爆破而言,通常会设置若干与装药孔平行的空孔来提高掏槽区域岩石的破碎与成腔效果^[4]。针对空孔的爆破作用机理和实际应用效果,学者们开展了许多研究工作。例如,刘优平等^[5]从理论上对空孔的作用原理进行了分析,阐明了空孔具有应力集中、裂纹导向以及提供岩石碎胀补偿空间的作用。罗剑辉等^[6]通过数值模拟探究了空孔对掏槽区域应力场和爆破损伤分布特征的影响,结果显示空孔可以起到应力集中和引导破坏的效果。孟海利等^[7]采用波动力学原理分析了空孔发生应力集中现象的原因,并基于有限元数值仿真获取了空孔附近应力波入射、反射以及叠加等动态传播历程。左进京等^[8]通过室内掏槽爆破模型试验探究了空孔直径对直孔掏槽爆破效果的影响机理,并通过对槽腔空间尺寸特征和岩石破碎块度进行对比分析得到了最佳空孔直径。朱必勇等^[9]借助有限元数值模拟分析了槽腔岩体损伤特征随空孔直径的变化规律,并通过比较不同工况下的岩石损伤分布特征对空孔直径进行了优化设计。张召冉等^[10]基于爆炸气楔致裂效应与空孔作用原理推导了不同直径空孔与装药孔的合理间距计算公式,并在实际地下掘进工程中取得了良好的应用效果。

基于上述分析可以看出,现有研究主要集中于空孔的爆破作用机理和掏槽效果随空孔直径的变化规律,很少涉及空孔数量对掏槽爆破效果的影响。为此,本研究采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力分析平台开展不同空孔数量($N=3,4,5,6,8$)下的直孔掏槽爆破数值模拟,对比分析不同空孔数量下的破岩成腔效果,以为隧道钻爆掘进工程提供参考。

1 工程概况

钱凯(Chancay)港位于秘鲁利马大区境内,地处南美洲太平洋沿岸的钱凯湾内,是秘鲁和拉丁美

洲枢纽港和太平洋门户港,是中国和秘鲁共建“一带一路”合作项目。钱凯(Chancay)隧道作为秘鲁钱凯港的重要组成部分,其主要功能是连接港区辅建区和码头操作区,全长 1 839m,为单洞三线隧道。隧道设计 II~V 级围岩,其中 II 级围岩 296m, III 级围岩 513m, IV 级围岩 115m, V 级围岩 912m,出口明洞 3m。该隧道使用钻爆法进行开挖, II~IV 级围岩采用两台阶法或全断面法、V 级围岩采用三台阶法和两台阶法+上台阶 CD 法,现场所用爆破器材为电子雷管和乳化炸药。

在 II 级围岩区段的上台阶爆破过程中,设计掏槽孔深度 3.0m,其他炮孔深度 2.8m,采用“1 个装药孔+3 个空孔”的直孔掏槽技术,空孔直径为 90mm。但是,由于岩石较为坚硬,而大直径空孔数目较少,导致掏槽爆破破岩效果不佳,最终影响掘进效率和成型质量。经统计,平均循环进尺为 2.0m,平均炮孔利用率 71.4%,半边孔痕率不足 60%。因此,有必要探索空孔数量对直孔掏槽效果的影响规律,进而对实际隧道直孔掏槽爆破进行优化。

2 数值模拟

2.1 建立数值模型

在实际隧道直孔掏槽爆破中,炮孔长度远大于炮孔直径,在不考虑炮孔两端特殊爆破特性的前提下,可以将模型简化为平面应变问题,模拟时使用“准二维”的单层网格。同时,由于钱凯隧道断面较大,若按照真实断面大小进行建模,有限单元数量较多、计算效率低下,为了降低建模和计算难度,将隧道断面简化直径 3 000mm 的圆形区域。运用 ANSYS/LS-DYNA 建立 5 组爆破模型,各组爆破模型相同之处包括:炮孔直径为 42mm,药卷直径为 32mm,空孔直径为 90mm,空孔与炮孔之间距离为 250mm,空孔均匀分布于炮孔周围并呈圆形布置。各组爆破模型区别之处为空孔数量(N)不同,不同工况下的空孔布置情况如图 1 所示。

在本次模拟中,炸药和空气作为流体材料采用 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)网格,岩体作为固体材料采用 Lagrange 网格,运用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义罚函数约束算法,保障流体材料与固体材料之间的力学信息稳定传递^[11]。为了减少模型边界应力波反射对数值模拟结果精度的影响,模型四周需要施加无反

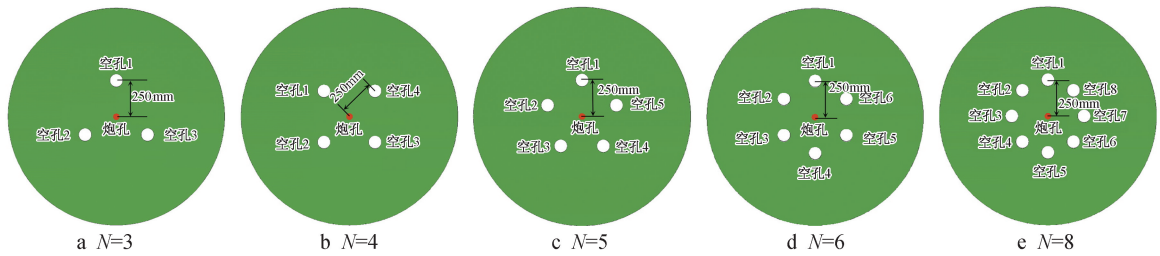


图 1 空孔布置情况

Fig. 1 Empty hole arrangement

射边界条件,通过 * DOUNDRY _ NON _ REFLECTING 和 * SET _ SEGMENT 关键字进行设定^[12]。

2.2 材料模型与参数

炸药采用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能燃烧材料模型,同时使用 JWL 经典状态方程表征爆轰压力,JWL 状态方程表达式如下^[13]:

$$P_e = A_e \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_e \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P_e 为爆轰压力; A_e, B_e 为炸药材料参数; R_1, R_2, ω 为炸药材料常数; V 为爆轰产物相对体积; E_0 为单位体积初始比内能。现场采用 2 号岩石乳化炸药,炸药材料与状态方程参数根据文献^[14]进行选取,具体如表 1 所示。

表 1 炸药材料及状态方程参数

Table 1 Parameters of explosive material and state equation

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A_e / GPa	B_e / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
1 200	3 200	276.20	0.23	5.25	1.60	0.28	8.56

空气采用 * MAT_NULL 空材料模型,同时采用线性多项式方程作为状态方程:

$$p_0 = C_0 + C_1 \xi + C_2 \xi^2 + C_3 \xi^3 + (C_4 + C_5 \xi + C_6 \xi^2) E_1 \quad (2)$$

$$\xi = 1 - 1/V_0 \quad (3)$$

式中: p_0 为压强; $C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数; ξ 为黏滞系数; E_1 为单位体积内能; V_0 为初始相对体积。空气材料及状态方程参数如表 2 所示。

表 2 空气材料及状态方程参数

Table 2 Parameters of air material and state equation

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0

针对爆破过程对中岩体产生的大变形问题,本

次模拟采用 HJC 本构模型来模拟岩石的动态响应历程^[15]。该模型不仅考虑了大应变、静水压、损伤累积等对强度的影响,还综合考虑了高应变率 and 高压效应,因此被广泛应用于爆炸冲击领域的结构响应特性研究。通过对现场所取岩样进行测试,得到其物理力学性能参数,具体如表 3 所示。

表 3 岩体材料参数

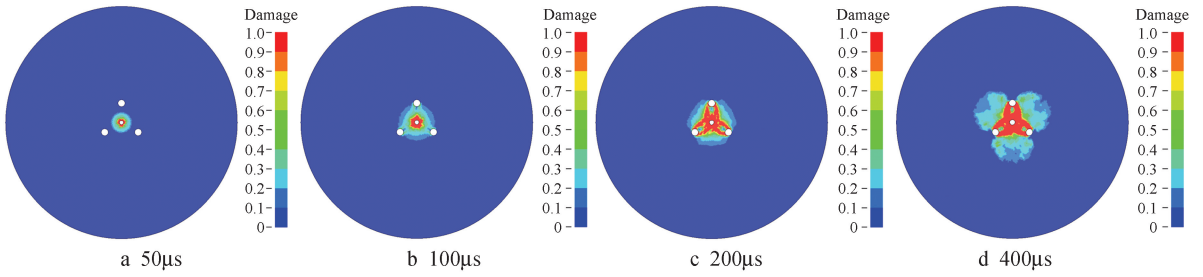
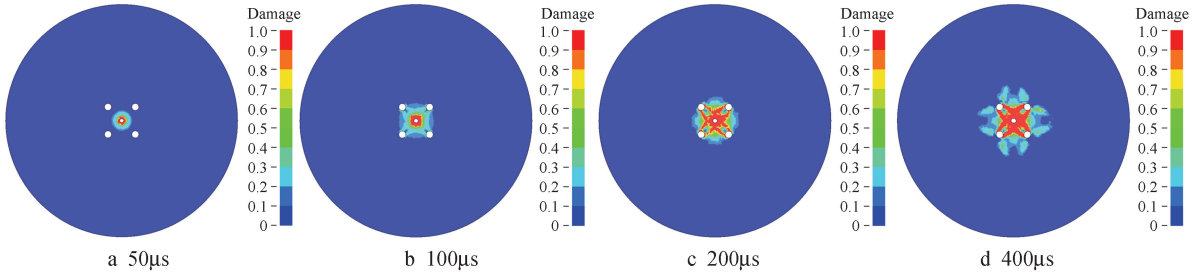
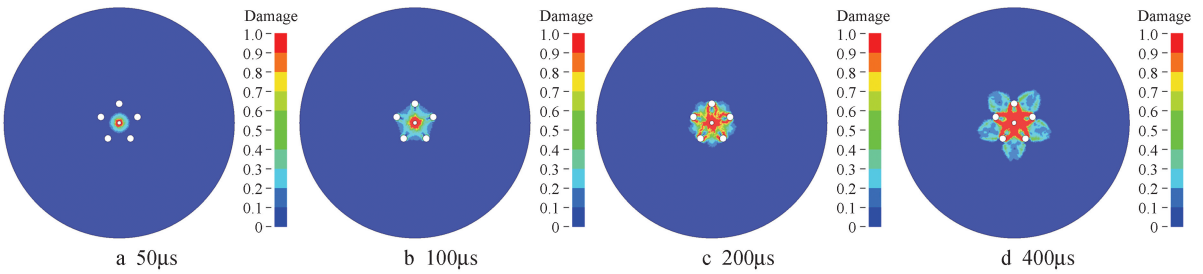
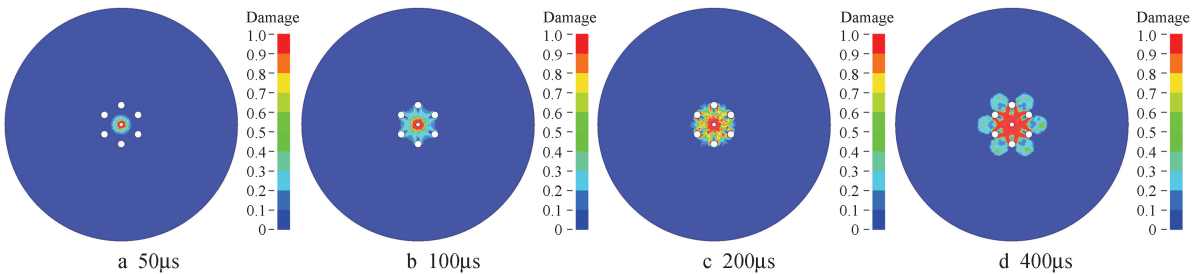
Table 3 Parameters of rock mass material

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/GPa	泊松比	抗压 强度/MPa	抗拉 强度/MPa
2 500	27.6	0.24	68	6.2

3 模拟结果分析

不同空孔数量下($N=3, 4, 5, 6, 8$)的岩体爆破损伤演化历程如图 2~6 所示。根据图 2~6 可以看出,当炸药在炮孔中起爆之后,迅速释放巨大能量在周围岩体中激起爆炸荷载,使得岩体开始发生损伤破坏。但是在炸药爆炸初期,由于与周围空孔有一定距离,炮孔近区的损伤呈圆形向四周扩展。在 $100\mu\text{s}$ 时刻,损伤逐渐演化至空孔附近,此时损伤不再呈圆形向外扩展,而是优先沿着空孔方向延伸,这主要是因为空孔对损伤演化具有引导作用^[16]。随后,损伤继续朝着空孔方向发展,并在空孔方向产生累积损伤。随着爆破历程的推进,装药孔与空孔之间、空孔附近的岩体损伤程度不断加剧,直至 $400\mu\text{s}$ 时刻爆炸能量消耗殆尽,岩体损伤演化终止。而在没有空孔的方向,红色高度损伤区向内凹陷,表明该方向上的岩体未能得到充分有效的破坏。

根据图 2~6 还可以看出,随着空孔数量的改变,槽腔岩体的损伤形态也会相应发生变化。损伤形态发生变化的原因在于:一方面,空孔对损伤演化具有导向作用,空孔数量的增加能够促进槽腔岩体的损伤破坏;另一方面,由于每个空孔都会分走一部分爆炸能量,这可能致使每个空孔附近岩体的损伤程度稍有降低。可见,在增加空孔数量的过程中,空孔的损伤引导作用与能量分散作用并存,共同对破岩成腔效果产生影响。

图 2 $N=3$ 时岩体爆破损伤演化历程Fig. 2 Evolution of blasting damage of rock mass at $N=3$ 图 3 $N=4$ 时岩体爆破损伤演化历程Fig. 3 Evolution of blasting damage of rock mass at $N=4$ 图 4 $N=5$ 时岩体爆破损伤演化历程Fig. 4 Evolution of blasting damage of rock mass at $N=5$ 图 5 $N=6$ 时岩体爆破损伤演化历程Fig. 5 Evolution of blasting damage of rock mass at $N=6$

为了进一步探究空孔数量对掏槽爆破成腔效果的影响,在后处理软件 LS-PREPOST 中对高度损伤的岩石单元进行隐藏,所呈现的空白区域即可视为槽腔。根据文献[17],将损伤值 0.8 设为损伤隐藏的临界阈值,具体结果如图 7 所示。需要特别说明的是,尽管空孔与装药孔之间有部分岩石未实现充分的损伤破坏,但该部分岩石已与整体围岩脱

离,因此可以将其视作槽腔的一部分。然后,利用 ImageJ 图像识别软件,对不同工况下的掏槽成腔面积进行识别,并将识别数据绘制成如图 8 所示的折线图。根据图 8 可以看出,当空孔数量 $N=3, 4, 5, 6, 8$ 时,对应的掏槽爆破成腔面积分别为 $1\ 424, 1\ 595, 1\ 724, 1\ 833, 1\ 917\text{cm}^2$,表明掏槽爆破的成腔面积随着空孔数量的增加而逐渐增大。

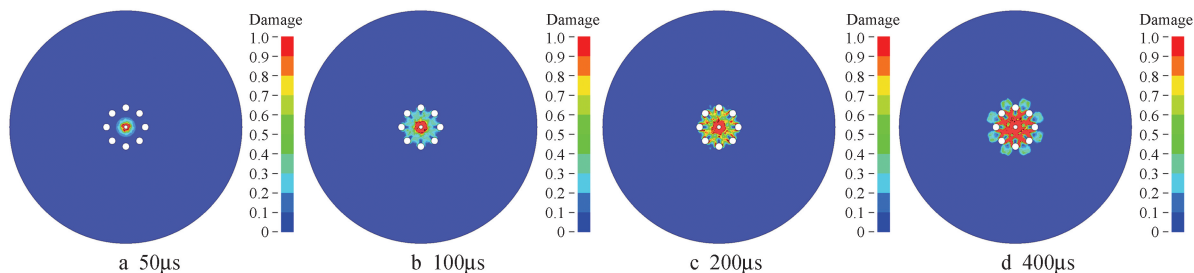
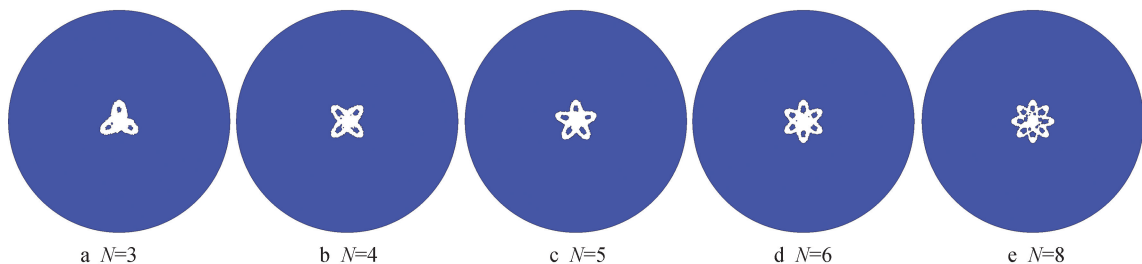
图6 $N=8$ 时岩体爆破损伤演化历程Fig. 6 Evolution of blasting damage of rock mass at $N=8$ 

图7 掏槽爆破成腔效果

Fig. 7 Cavity forming effects of cutting blasting

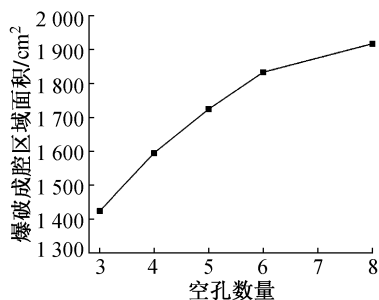


图8 掏槽爆破成腔面积

Fig. 8 Cavity areas of cutting blasting

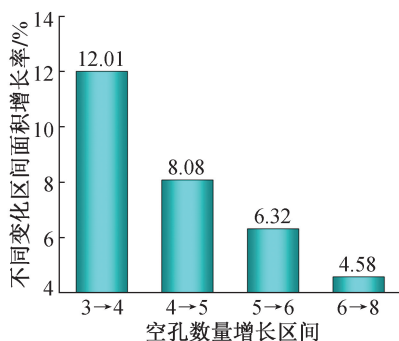


图9 成腔面积增长率

Fig. 9 Growth rates of cavity area

根据上述数据计算掏槽爆破成腔面积的增长率,并将计算结果绘制成如图9所示的柱状图。由图9可知,空孔数量从3增加到4、从4增加到5、从5增加到6、从6增加到8时,直孔掏槽爆破的成腔面积分别增长了12.01%、8.08%、6.32%、4.58%。可见,随着空孔数量的增加,虽然掏槽成腔面积在不断扩大,但是成腔面积的提升率却在逐渐减小。当空孔数量 $N=8$ 时,尽管掏槽成腔面积最大,但与空孔数量 $N=6$ 相比,成腔面积增长率仅为4.58%,此时空孔数量的增长梯度较大,但成腔面积增长不明显。在实际隧道钻爆工程中,空孔数量的增加,通常会伴随着更高的钻孔投入。而且,空孔数目较多时,为避免相邻空孔打穿,对空孔的平行度要求很高,钻孔施工难度较大。因此,在综合考虑施工成本、钻孔难度和爆破效果后,最终确定空孔数量 $N=6$ 用于实际隧道直孔掏槽爆破。

4 现场试验

4.1 爆破方案优化

基于模拟结果对Ⅱ级围岩区段的上台阶爆破进行优化,优化后的方案采用“1个装药孔+6个空孔”的直孔掏槽技术,空孔的直径为90mm。周边孔采用光面爆破技术,使用“导爆索+空气间隔”装药结构,其他炮孔采用连续装药结构。采用上台阶一次起爆方法,按照“中心孔→扩槽孔→辅助孔→周边孔和底孔”的顺序,进行毫秒延时爆破。具体的炮孔布置和爆破参数如图10和表4所示。

4.2 爆破效果统计分析

在Ⅱ级围岩区段,采用优化后的直孔掏槽技术实施若干次隧道爆破掘进试验,然后对整体爆破效果进行统计分析,借助循环进尺、炮孔利用率、周边孔半边孔痕数和半边孔痕率来间接反映掏槽爆破效果。全断面爆破效果统计如表5所示。

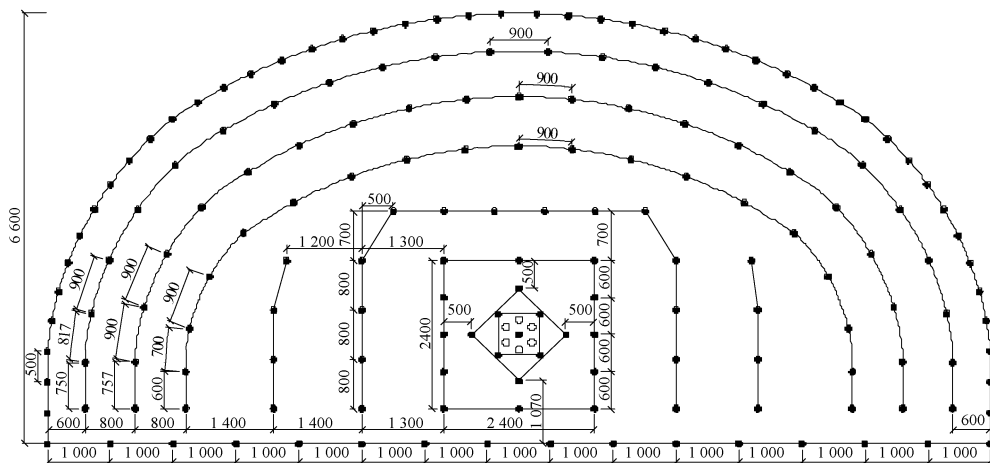


图 10 炮孔布置(单位: mm)

Fig. 10 Blasting hole layout (unit: mm)

表 4 爆破参数

Table 4 Blasting parameters

炮孔类型	炮眼数量/个	炮孔直径/mm	炮孔深度/m	装药量/kg	
				单孔	小计
掏槽孔	1	42	3.0	2.24	2.24
空孔	6	90	3.0	0	0
扩槽孔	8	42	2.8	1.68	13.44
辅助孔 1	12	42	2.8	1.40	16.80
辅助孔 2	14	42	2.8	1.40	19.60
辅助孔 3	8	42	2.8	1.40	11.20
辅助孔 4	19	42	2.8	1.40	26.60
辅助孔 5	21	42	2.8	1.40	29.40
辅助孔 6	24	42	2.8	1.40	33.60
周边孔	46	42	2.8	0.56	25.76
底板孔	16	42	2.8	1.40	22.40
合计	175(含空孔)	—	—	—	201.04

表 5 爆破效果统计

Table 5 Statistics of blasting effects

试验序号	循环进尺/m	炮孔利用率/%	周边孔孔痕数/个	周边孔孔痕率/%
1	2.65	94.6	40	87.0
2	2.60	92.9	42	91.3
3	2.55	91.1	41	89.1
4	2.65	94.6	38	82.6
5	2.70	96.4	36	78.3
6	2.65	94.6	39	84.8
7	2.65	94.6	40	87.0
8	2.60	92.9	42	91.3
9	2.65	94.6	38	82.6
10	2.70	96.4	40	87.0
平均值	2.64	94.3	39.6	86.1

由表 5 可知,在 II 级围岩区段上台阶爆破过程中,采用含 6 个空孔的直孔掏槽爆破方法时,平均循环进尺为 2.64m,平均炮孔利用率为 94.3%,周边孔平均半边孔痕数和半边孔痕率分别为 39.6 和 86.1%。试验结果表明,当 $N=6$ 时,掏槽爆破破岩

效果达到了设计要求,既能够保证较高的钻爆掘进效率,还可以获得良好的周边成型质量。

5 结语

1) 空孔对爆破损伤具有引导作用,可以促使损伤朝着空孔方向发展,进而提高空孔与装药孔之间、空孔附近的岩体损伤程度。当空孔数量 $N=3, 4, 5, 6, 8$ 时,掏槽爆破成腔面积分别为 1 424, 1 595, 1 724, 1 833, 1 917 cm^2 ,表明掏槽爆破成腔面积随着空孔数量增加而逐渐增大。

2) 空孔数量从 3 增加到 4、从 4 增加到 5、从 5 增加到 6、从 6 增加到 8 时,成腔面积分别提高了 12.01%, 8.08%, 6.32%, 4.58%,表明随着空孔数量的增加,成腔面积的增长率在逐渐减小。在综合考虑爆破成本和爆破效果情况下,建议隧道直孔掏槽爆破的空孔数量 $N=6$ 。

3) 当掏槽爆破采用 6 个空孔时,循环进尺和炮孔利用率分别为 2.64m 和 94.3%,周边孔的孔痕数和孔痕率分别为 39.6 和 86.1%,表明空孔数量 $N=6$ 在隧道直孔掏槽中具有良好适用性。

参考文献:

- [1] 李清,马润东,周睿,等.大断面高铁隧道掘进爆破振动传播规律研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(10):27-33.
LI Q, MA R D, ZHOU R, et al. Study on propagation laws of blasting vibration during excavation of large section tunnel in high-speed railway[J]. Journal of safety science and technology, 2020, 16(10): 27-33.
- [2] 程兵,汪泉,汪海波,等.侧向环形切缝装药爆破效应及其在硬岩掏槽中的应用[J].含能材料,2023,31(12):1245-1254.
CHENG B, WANG Q, WANG H B, et al. Blasting effects and of lateral annular slit charge and application in hard rock cutting [J]. Chinese journal of energetic materials, 2023, 31(12): 1245-1254.
- [3] 刘霞,陶铁军,娄乾星,等.大断面隧道楔形掏槽孔布设优化

- 研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15358-15366.
- LIU X, TAO T J, LOU Q X, et al. Research and application of wedge cut slot layout optimization for large section tunnel[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(34): 15358-15366.
- [4] 程兵,汪海波,宗琦,等. 基于切缝装药定向预裂的中深孔掏槽爆破研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 322-329.
- CHENG B, WANG H B, ZONG Q, et al. Mid-deep hole cutting blasting technology based on slit charge directional presplitting[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(3): 322-329.
- [5] 刘优平,黎剑华,林大能,等. 掏槽爆破中空孔效应的理论与试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(5): 75-77.
- LIU Y P, LI J H, LIN D N, et al. Theoretical and experimental study on effects of empty hole in cut blasting[J]. Mining research and development, 2007, 27(5): 75-77.
- [6] 罗剑辉,程兵,汪海波,等. 中空孔对直眼掏槽爆破效果的影响数值模拟[J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 223-226.
- LUO J H, CHENG B, WANG H B, et al. Numerical simulation of influence of hollow hole on blasting effect of parallel cut[J]. Safety in coal mines, 2020, 51(4): 223-226.
- [7] 孟海利,孙鹏昌,薛里,等. 大直径中空孔直眼掏槽爆破的空孔应力集中效应研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 60-65, 153.
- MENG H L, SUN P C, XUE L, et al. Study on stress concentration effect of large-diameter empty hole in burn cut blasting[J]. Blasting, 2023, 40(4): 60-65, 153.
- [8] 左进京,杨仁树,肖成龙,等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(4): 335-341.
- ZUO J J, YANG R S, XIAO C L, et al. Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drivage[J]. Journal of mining science and technology, 2018, 3(4): 335-341.
- [9] 朱必勇,贺严,焦文字,等. 直孔掏槽爆破中空孔效应的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 58-61.
- ZHU B Y, HE Y, JIAO W Y, et al. Numerical simulation research on empty hole effect in parallel cut blasting[J]. Mining research and development, 2020, 40(2): 58-61.
- [10] 张召冉,王岩,刘国庆. 空孔对直眼掏槽参数及爆破效果的影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(1): 139-154.
- ZHANG Z R, WANG Y, LIU G Q. Theoretical study of the influence of empty-hole on both the blasting parameters and the blasting effect of straight-hole cutting[J]. Explosion and shock waves, 2023, 43(1): 139-154.
- [11] 程兵,叶福,汪泉,等. 数值模拟技术在爆破安全课程教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(3): 88-93.
- CHENG B, YE F, WANG Q, et al. Application of numerical simulation technology in blasting safety course teaching[J]. Research and exploration in laboratory, 2025, 44(3): 88-93.
- [12] 段继超,宗琦,汪海波,等. 起爆顺序对台阶岩石破碎块度及爆破振动影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 192-199.
- DUAN J C, ZONG Q, WANG H B, et al. Study on influence of initiation sequence on fragmentation of step rock and blasting vibration[J]. China safety science journal, 2024, 34(2): 192-199.
- [13] 费鸿禄,王天恒,荆广杰. 露天矿富水裂隙岩体台阶爆破的殉爆机理和防殉爆研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(1): 166-182.
- FEI H L, WANG T H, JING G J. On mechanism and prevention of sympathetic detonation of bench blasting in water-rich fissure open-pit mine[J]. Explosion and shock waves, 2025, 45(1): 166-182.
- [14] 解北京,栾铮,李晓旭,等. 岩体双孔爆破损伤特征的影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(9): 20-26.
- XIE B J, LUAN Z, LI X X, et al. Study on influencing factors of damage characteristics in double-hole blasting of rock mass[J]. Journal of safety science and technology, 2023, 19(9): 20-26.
- [15] 杨帅,刘泽功,张健玉,等. 爆炸荷载作用下深部煤体损伤特征试验研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(19): 276-286.
- YANG S, LIU Z G, ZHANG J Y, et al. Test study on damage features of deep coal body under explosive load[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(19): 276-286.
- [16] 杨赛群,葛立芳,李洪伟,等. 地应力影响下的五孔掏槽爆破岩石损伤效应研究[J]. 火工品, 2025(1): 89-96.
- YANG S Q, GE L F, LI H W, et al. Study on the rock damage effect of five-hole cutting blasting under in-situ stress influence[J]. Initiators & pyrotechnics, 2025(1): 89-96.
- [17] 刘亮,卢文波,陈明,等. 钻爆开挖条件下岩体临界破碎状态的损伤阈值统计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1133-1140.
- LIU L, LU W B, CHEN M, et al. Statistic damage threshold of critical broken rock mass under blasting load[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(6): 1133-1140.