考虑巷道层理分布的掏槽方式优化研究*

武卜强[1],韦秉旭[1],黄强[1],刘浩杉[2]

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:巷道中节理层理结构会改变爆破载荷下岩体的应力传播与破坏模式,影响掏槽爆破效果与掘进效率。为揭示层理结构对掏槽爆破响应的影响机制,以某矿巷道为工程背景,构建考虑节理倾角巷道的准三维有限元模型,采用ALE流固耦合算法对比分析了无层理与含层理工况下应力波传播与损伤演化特征。结果表明,层理结构显著削弱了应力波耦合强度,平均有效应力降低幅值达61.64%,导致掏槽中心区域难以形成有效贯通。针对该问题,提出了增加一对辅助掏槽孔的改进方案。数值模拟和现场试验验证结果表明,改进方案有效增强了掏槽中心区域的能量聚集效应,形成了典型的"贯通型高损伤通道",岩体破碎更充分,连续性更好,大块率显著降低。研究成果可为复杂结构面条件下掏槽爆破设计提供理论支持与工程参考。

关键词:层理岩体;掏槽爆破;损伤演化;数值模拟

中图分类号:TD236;TU451 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0073-08

Optimization Study of Cut Patterns Considering Bedding Distribution in Roadway

Wu Buqiang[1], *Wei Bingxu*[1], *Huang Qiang*[1], *Liu Haoshan*[2]

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
2.Faculty of land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: The joint bedding structures in the roadway will change the stress propagation and failure mode of the rock mass under the blasting load, and affect the cutting blasting effect and driving efficiency. In order to reveal the influence mechanism of bedding structure on the response of cut blasting, a quasi-three-dimensional finite element model of roadway considering joint dip angle was constructed based on the engineering background of a mine roadway. The ALE fluid-solid coupling algorithm was used to compare and analyze the characteristics of stress wave propagation and damage evolution under the conditions without bedding and with bedding. The results show that the bedding structure significantly weakens the stress wave coupling strength, and the average effective stress decreases by 61.64%, which causes the difficulty in forming effective penetration in the central area of the cut. Regarding this issue, an improvement scheme for adding auxiliary cutting holes was proposed. The results of numerical simulation and field test show that the improved scheme effectively enhances the energy aggregation effect in the central area of the cut, and forms a typical "through-type high-damage channel". The rock mass is more fully broken, the continuity is better, and the bulk rate is significantly reduced. The research results can provide theoretical support and engineering reference for cutting blasting design under complex structural plane conditions.

Key words: Bedding rock mass, Cut blasting, Damage evolution, Numerical simulation

0 引言

钻爆法因其具有高效、经济的优势,被广泛应用于采矿及土木工程领域,尤其在巷道及隧道开挖等场景中发挥着重要作用[1-2]。在矿山巷道爆破掘进过程中,掏槽爆破效果直接影响整个断面的岩石破碎质量,对后续爆破效率与围岩稳定性具有重要影响[3]。然而,由于实际岩体普遍发育有节理裂隙等地

* **收稿日期**:2025-05-11
基金项目:国家自然科学基金项目(52178413);湖南省自然科学基金项目(2018JJ2431)
作者简介:武卜强(1999—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事隧道掘进方面的研究。E-mail:1332591162@qq.com
通信作者:刘浩杉(1998—),男,四川达州人,博士研究生,主要从事数值仿真方面的研究。E-mail:Liuhaoshan1998@163.com

质不连续面,显著改变了岩石的物理力学特性,进而影响其强度、变形能力及爆破响应行为。因此,深入分析节理分布特征对掏槽爆破效果的影响,对于优化孔网参数设计、提高爆破质量具有重要的工程意义。

节理裂隙广泛赋存于岩体中,其数量、产状及闭合程度会对爆破过程中应力波的传播路径与能量释放特征产生显著影响。其中,节理相对于自由面的取向被认为是决定爆生裂纹演化、损伤范围扩展及块体运动模式的关键因素[4-5]。Yuan Haiping 等[6]提出基于近距离摄影的岩体质量评估方法,有效克服了传统调查中劳动强度大、分类主观性强等问题,为后续节理参数建模提供了高效手段。杨国梁等[7]利用数字图像相关方法(DIC)对不同切缝角度的页岩试件进行了爆破试验,发现当层理方向与切缝方向平行时,破坏主要沿弱面集中发展。Rong Hai 等[8]引入地应力-节理耦合作用,指出节理在一定程度上可对裂纹扩展产生屏蔽效应,显著改变裂纹萌生及扩展路径。随后,大量研究通过数值模拟手段,系统量化了节理参数对爆破掘进的影响。Yu Qiuyang 等[9]基于 ALE 方法建立含不同节理倾角的有限元模型,发现节理角度显著影响掘进过程中的超/欠挖范围。张建国等[10]基于 LS-DYNA 建立了 5 种不同夹角的双孔爆破模型,发现夹角减小时,炮孔间贯通能力减弱,光面爆破效果下降。在有关现场试验中,Himanshu 等[11]结合现场爆破监测与有限元分析,指出节理走向对岩体破碎模式具有决定性影响。魏东[12]研究了裂隙岩体台阶爆破的破坏机制,提出了基于节理导向的爆破参数优化方法,并建立了预测块度分布的工程模型。刘吉鹏[13]针对水平节理岩体隧道,采用 LS-DYNA 模拟不同节理参数对应力波传播及裂纹演化的作用机制,提出的优化爆破方案显著降低了超挖量。尽管当前已有研究构建了多种节理模型以评估其对爆破响应的影响,但多数仍基于理想化的均质介质设定。叶海旺等[14]利用 MATLAB 对爆破模型中的 K 文件进行重构,将节理裂隙按照统计规律嵌入有限元模型中,为在数值模拟中实现岩体非均质性的真实表达提供了重要参考。

鉴于此,本文以某矿巷道掘进为工程背景,基于 Ansys LS-DYNA 建立含层理巷道的准三维有限元模型,采用 ALE 流固耦合算法,系统分析了层理对掏槽爆破过程中应力波传播与破碎模式的影响。在此基础上,提出优化掏槽孔布置策略,通过数值模拟与现场试验验证其有效性,旨在为复杂节理条件下掏槽爆破设计与参数调控提供理论支持与实践依据。

1 工程概况

某矿西矿段巷道掘进过程中,爆破作业后常出现大块以及浮石现象,主要原因在于倾斜层状矿岩内部存在显著的层理结构,层理倾角多在 30°~60°之间。掘进巷道典型层理如图 1 所示。节理发育程度越高,岩体完整性越差,进而削弱其对爆炸载荷的抵抗能力,导致爆破效率下降。当前巷道掘进采用楔形掏槽方式,掏槽孔数量为 6 个,与工作面夹角约为 85°,配合辅助孔 12 个、周边孔 15 个以及底孔 7 个。钻孔直径统一为 42 mm,装药使用直径为 32 mm 的 2 号岩石乳化炸药,起爆方式为孔底反向起爆。采用连续耦合装药,最大单段起爆药量达 12 kg。设计每循环进尺为 2.5 m。然而,在现有爆破设计方案中,实际平均循环进尺仅为 2.0 m,炮孔利用率约为 80%。岩体层理结构显著改变了爆破应力波的传播路径,爆炸能量易沿节理或夹层泄散,导致掏槽效果不佳,爆后易形成大块进而影响后续作业。

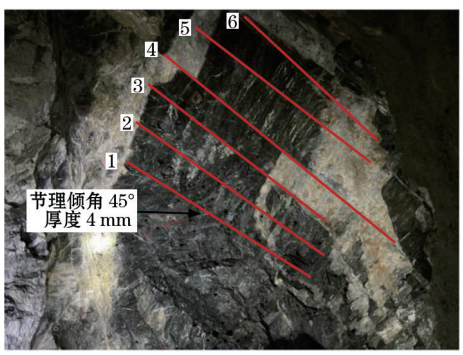


图 1 掘进巷道典型层理

Fig.1 Typical bedding structures in a tunneling roadway

2 数值模拟研究

2.1 模型建立与算法

根据矿山巷道掘进的现场实际情况,使用 Ansys 有限元软件建立了数值仿真模型,如图 2 所示。考虑到孔口堵塞段是掏槽爆破中最难贯通区域,建立巷道断面大小尺寸为 400 cm×400 cm×1 cm,即简化巷道掏槽工况为准三维数值模型。在模型中,孔口距设置为 100 cm,排间距为 50 cm,炮孔直径为 42 mm,装药直径为 32 mm。为探讨层理结

构对掏槽爆破效果的影响，构建了两组对比模型：其一为均质岩体巷道模型（见图 2(a)），其二为考虑层理分布特征的岩体模型（见图 2(b)），层理倾角设为 45°，层理间距为 40 cm。

计算过程中采用 ALE（Arbitrary-Lagrangian-Eulerian）流固耦合算法，该方法可有效模拟爆炸荷载作用下岩体的剧烈变形与破坏行为，保证仿真过程的稳定性与准确性。模型包括岩体的固体域，以及空气与炸药构成的流体域。单元类型采用 3D SOLID 164 单元，模型网格采用映射加扫略的划分思路，对炮孔周围的网格进行加密处理，以提升掏槽区域的计算精度。为更真实地反映爆破在无限介质中的传播特性，在模型边界施加非反射边界条件。

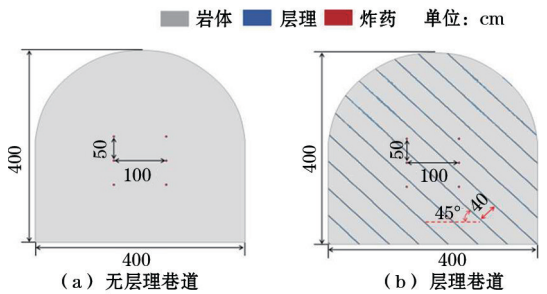


图 2　有限元模型示意

Fig.2　Schematic of the finite element models

2.2　材料参数确定

2.2.1　岩石材料

岩石使用 Riedel-Hiermaier-Thoma（RHT）材料模型进行建模，该模型是一种适用于混凝土和岩石等脆性材料的高级损伤塑性模型，被广泛应用于爆炸荷载下的岩体裂纹扩展研究[16-17]。RHT 机制模型结合了强度和损伤，能够描述材料的一般力学行为，如孔隙压实、压力硬化、应变硬化、拉伸和压缩下的应变率硬化等。RHT 强度模型包含 3 个应力面：失效面、弹性极限面和残余强度面，如图 3 所示。

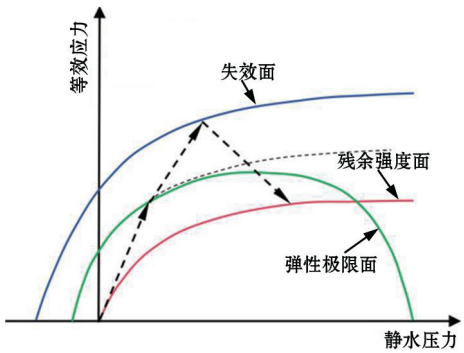


图 3　RHT 模型不同面向的静态压缩子午线

Fig.3　Static compressive meridians in different orientations of the RHT model

RHT 模型的损伤值 D 由公式(1) 计算获得。

$$D=\sum \frac{\Delta\varepsilon^{p}}{\varepsilon^{f}} \tag{1}$$

式中：$\Delta\varepsilon^{p}$ 为累积塑性应变；ε^{f} 为失效应变。

其中损伤界限 $D=0.2$ 通过比较试验与数值仿真确定[18]，即损伤值 $D>0.2$ 的单元可视为爆炸引起的裂纹。RHT 本构模型参数见表 1。

表 1　RHT 本构模型参数

Table 1　RHT constitutive model parameters

ρ_0/(kg·m^{-3})	G/GPa	f_c/MPa	N	β_t	B_0	B_1	T_1
2 600	28.7	154	0.697	0.011 5	1.68	1.68	30.64
PCO/GPa	F_t^*	F_s^*	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	Q_0	T_2
6	0.08	0.40	30.64	51.47	31.46	0.68	0
B_2	*EOC*/s^{-1}	*EOT*/s^{-1}	A_4	*PEL*/MPa	G_c^*	G_t^*	*XI*
0.01	3.0E-5	3.0E-6	2.92	102	0.4	0.7	0.5
D_1	D_2	β_c	A_f	N_f	N_p		
0.04	1	0.008 3	1.62	0.6	3		

注：ρ_0 为材料密度；G 为剪切模量；f_c 为单轴抗压强度；A_1、A_2、A_3、B_0、B_1、T_1、T_2 为状态方程参数；D_1、D_2 为损伤参数；β_c 和 β_t 分别是压缩和拉伸条件下的材料参数；*EOC* 和 *EOT* 分别是压缩、拉伸条件下的参考应变率；G_c^* 和 G_t^* 分别是压缩和拉伸条件下的屈服面参数；F_s^* 和 F_t^* 分别为相对剪切强度和相对拉伸强度；A_4 和 N 为破坏面参数；B_2 和 Q_0 为罗德角参数；A_f 和 N_f 为残余面参数；*PEL* 和 *PCO* 分别是材料压实时的压力和破坏时的压力；XI 为剪切模量缩减因子；N_p 为孔隙度指数。

2.2.2　层理材料

层理岩体中的弱面在爆破或冲击荷载下发生塑性滑移和变形，这种行为具有一定的屈服特征，＊MAT_PLASTIC_KINEMATIC中的屈服准则与应变硬化机制可以很好地近似描述这一过程。层理材料参数引用文献[18]，其基本参数见表 2。

表 2　层理岩体本构参数

Table 2　Parameters of thelayered rock mass

密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	剪切模量/GPa
2 500	30	0.3	4	11.5

2.2.3　炸药材料

高性能爆炸物材料模型选择 ＊MAT_HIGH_

EXPLOSIVE_BURN,结合 Jones_Wilkens_Lee(JWL)状态方程,描述高能炸药引爆后的关键材料特性,即爆炸产物的压力和体积应变之间的关系。JWL 状态方程见式(2):

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \tag{2}$$

式中:P 为爆轰产物压力,GPa;A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程参数;E_0 为初始内能,GPa。

2.2.4 空气材料

空气材料模型使用 * MAT_NULL 关键字定义,结合状态方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 描述的理想气体定律来模拟空气材料。状态方程是由一般线性多项式形式推导出来的,表示为式(3):

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E \tag{3}$$

式中:$C_0\sim C_6$ 为常数;μ 为体积比;E 为炸药内能,MPa。

3 数值模拟结果分析

3.1 有效应力传播

图 4 展示了无层理巷道条件下,掏槽孔起爆后的有效应力演化云图(颜色标识见电子版)。由图 4 可知,当 $t=60$ μs 时,各炮孔周围形成明显的红橙色同心高应力环,尚未发生应力波干涉,波前呈典型球面扩展特征;$t=100$ μs 时,排间炮孔之间的应力波开始接近并轻微重叠,局部区域出现应力叠加强化现象;$t=140$ μs 时,排间区域有效应力持续上升;$t=200$ μs 时,应力波传播范围显著扩展,掏槽中心区域应力叠加趋于饱和,表明该区域岩体已发生充分破碎;$t=300$ μs 时,有效应力基本覆盖整个巷道断面,掏槽区域破碎轮廓初步形成。

图 5 为含层理巷道模型中掏槽爆破的应力演化过程。从图 5 可以看出,相较于无层理型,层理结构显著削弱了炮孔间应力波的干涉与耦合作用,使应力波在垂直于层理方向的传播受阻趋向于沿层理倾向传播。在 $t=60$ μs 初期,应力波前即呈现明显的非对称扩展特征;$t=140$ μs 时,排间炮孔的应力叠加范围明显缩小,爆破能量集中性减弱,岩体破碎程度降低;$t=200$ μs,应力场整体衰减,并在层间产生滑移状应力分布,波干涉区破碎能力显著下降,掏槽中心区域尚未形成有效贯通;$t=300$ μs 时,应力传播明显沿层理方向扩展,远场呈“条带状”发散,箭头所示区域为能量释放主方向,说明层理倾角对掏槽爆破效果具有明显制约作用。

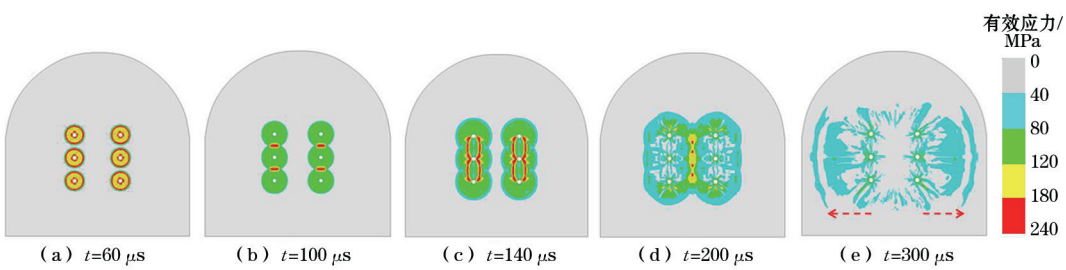


图 4 无层理巷道应力波传播云图

Fig.4 Stress wave propagation contours in a non-bedding roadway

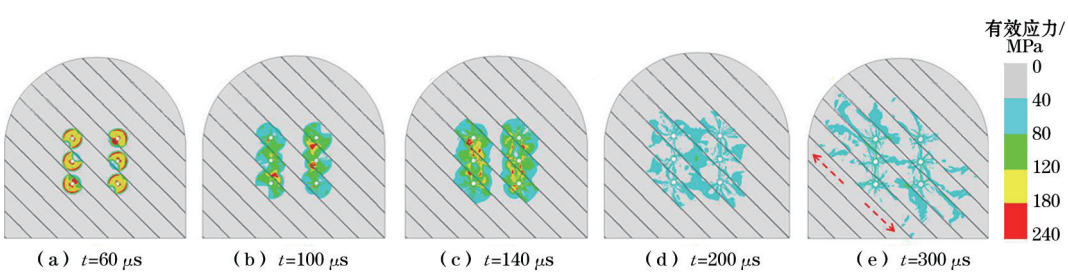


图 5 层理巷道应力波传播云图

Fig.5 Stress wave propagation contours in a bedding roadway

为进一步分析掏槽中心区域有效应力的时空演化特征,在模型中布置应力监测点 $M_1\sim M_5$,如图 6 所示。其中,测点 M_1 位于掏槽中心位置,其余测点沿垂直中轴线方向等距离布设,测点间距均为 10

cm,旨在捕捉该方向上应力波的耦合与衰减规律。

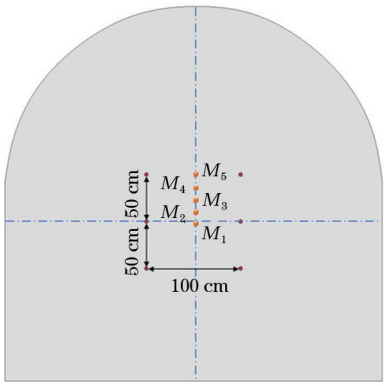


图 6 掏槽区域监测点布置示意

Fig.6 Layout of monitoring points in the cut area

图 7 对比展示了两种工况(无层理与含层理)下测点 M_1～M_5 的有效应力峰值分布情况。

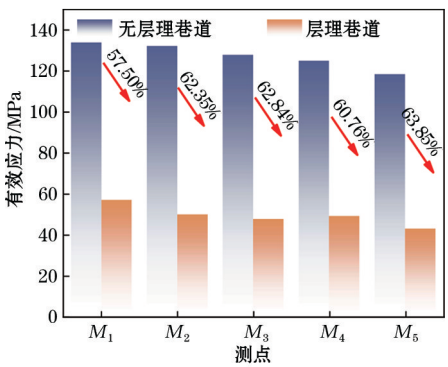


图 7 不同工况掏槽区域应力峰值对比

Fig.7 Comparison of peak stress in the cut area under various conditions

在无层理条件下,各测点的应力峰值整体高于含层理工况。其中,M_1 受爆炸荷载耦合作用显著,应力峰值最大,体现出明显的能量集中效应。沿垂直中轴线方向,测点位置逐渐远离掏槽中心,峰值应力缓慢衰减,但仍整体超过岩体破坏强度。而在含层理条件下,应力波在传播过程中受到层理结构的扰动与削弱,耦合效应明显减弱,各测点的应力峰值显著低于无层理条件,平均有效应力降低幅值达 61.64%。表明层理结构在一定程度上起到了能量耗散与传播路径阻断的作用。

3.2 损伤分析

掏槽区域的破坏贯通程度对巷道爆破整体效果具有关键性影响。图 8 展示了无层理与含层理条件下掏槽区在不同时刻的爆破损伤演化过程。从图 8 可以看出,在无层理工况中,应力波沿径向传播并在炮孔之间迅速形成连续的高损伤带,掏槽区实现有效贯通,形成完整的破碎区,促进爆炸产生的气体和应力波向自由面方向快速释放。而在含层理条件下,由于层理结构对应力波的反射、折射及耗散作用,应力波耦合受限,损伤主要沿层理方向扩展,垂直层理方向的破坏受到显著抑制,贯通性大幅下降,导致爆破能量局部滞留进而增加了爆后大块率。

高质量的掏槽贯通不仅有助于降低大块率、减少机械二次破碎作业量与成本,还能提高爆破、出渣与支护作业的整体效率;反之,掏槽效果不佳则易形成空腔残留、炮眼夹石等不良现象。因此,优化掏槽结构设计、增强掏槽区域应力波耦合与贯通能力,是提升复杂地质条件下巷道爆破质量与经济效益的关键途径。

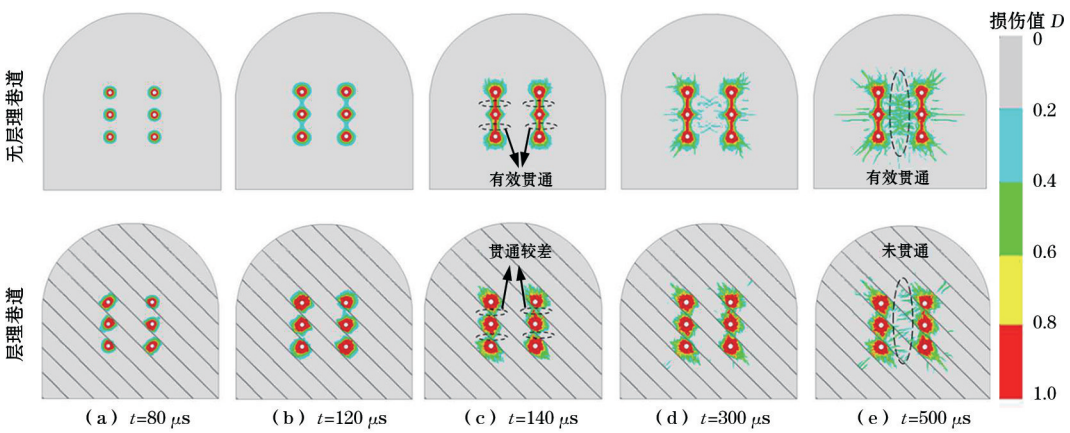


图 8 不同工况掏槽区域损伤云图对比

Fig.8 Comparison of damage distribution in the cut area under various conditions

图 9 对比了不同工况下测点 M_1～M_5 的岩体损伤程度。基于 RHT 本构模型的损伤变量定义,$D<0.2$ 表示岩体未发生破坏,$D\geqslant 0.2$ 表示岩体已产生裂纹或完全破碎。由图 9 可见,在无层理巷道

条件下,各测点的损伤值普遍高于含层理工况,尤其是位于掏槽中心的 M_1 点,其损伤值最大,约为 0.31,表明该区域岩体已发生完全破碎,形成良好的贯通通道,符合掏槽爆破对核心区域破碎的设计目标。而在含层理工况中,各测点的损伤值均低于 0.1,未达到岩体破坏的判定阈值,说明未形成有效的破碎连通带,上述差异表明,层理结构对爆破能量的传递与聚集具有显著抑制作用,不仅降低了应力波之间的耦合强度,也显著削弱了掏槽区域的贯通破碎能力。这种破碎差异将直接影响实际工程中爆破产物的粒径分布与施工效率:无层理条件更易实现岩体充分破碎,有利于获得可控的细粒产物,降低大块率与机械破碎负荷;而含层理条件下由于破碎程度不足,易导致爆后形成残留大块、空腔夹石等问题,增加清渣与支护难度,延长施工周期,提高了工程成本。

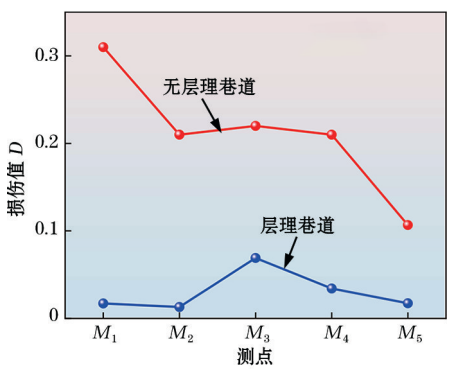


图 9　不同工况掏槽区损伤程度对比

Fig.9　Comparison of damage levels in the cut area under various conditions

3.3　掏槽孔优化方案

通过前述数值模拟对比分析可知,在层理巷道条件下,原掏槽区域在孔间及排间未能形成有效贯通破碎,掏槽效果明显受限。原爆破设计方案的循环进尺为 2 500 mm,掏槽形式采用普通楔形掏槽,布置 3 对掏槽孔,孔间距为 500 mm,掏槽角度设为 85°,孔深为 2 700 mm(含 200 mm 超深),孔底排距控制在 200 mm。改进后的掏槽方案炮孔布置见图 10。该方案在原掏槽孔的基础上,新增 2 对辅助掏槽孔,用以强化中心区域的能量聚集与应力波的耦合效果;孔深 1 000 mm,布置角度为 90°,以增强中心区域贯通能力;周边眼布置角度为 5°,其余辅助孔角度均为 90°。按设计方案进行分组装药,依次连接数码电子雷管,并将引线卡扣与起爆线紧密连接,最后采用起爆器控制整体起爆过程,确保爆破时序与能量释放的精准控制。

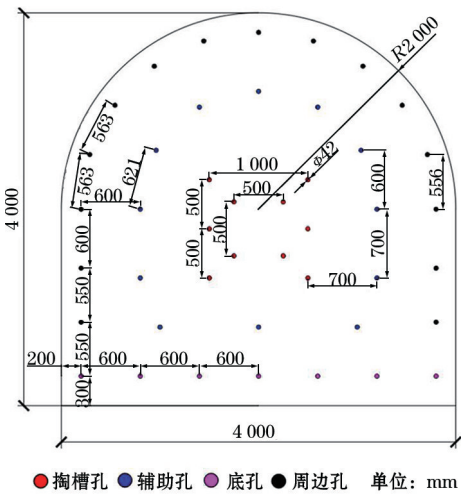


图 10　改进掏槽方案炮孔布置

Fig.10　Blast hole layout of improved cut blasting

图 11 对比展示了原掏槽方案与增加掏槽孔后的改进方案在含层理巷道中的损伤演化结果(颜色标识见电子版)。由图 11(a)可见,在原始掏槽方案下,虽然部分炮孔周围形成高损伤区(红色区域),但由于层理结构对波传播的削弱作用,未形成完整的破碎通道,掏槽效果较差。而图 11(b)中,改进后的掏槽方案增加两对掏槽孔后,显著增强了中心区域的波耦合效应,使得局部高应力波得以集中叠加,形成“贯通式”损伤带,掏槽区破碎更充分、连续性更好,表现为典型的有效贯通结构,此改进不仅提高了层理影响条件下掏槽区的破碎能力,而且对整段巷道成型质量具有积极作用。

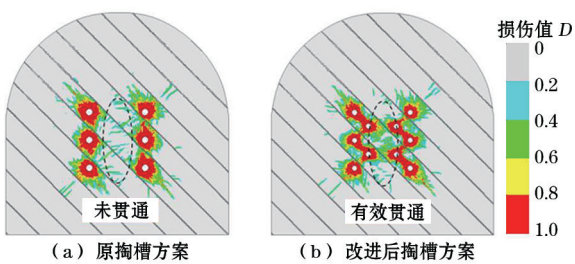


图 11　改进方案与原方案对比

Fig.11　Comparison of improved and original schemes

4　现场试验

基于上述数值模拟方案,对巷道进行炮孔布置(见图 12)。图 13 为改进掏槽方案实施后的巷道爆破现场实拍图。从图 13 可以观察到,掏槽区域岩体

破碎充分,块度整体较小,堆积松散均匀,未见明显的大块或夹石残留,表明掏槽区域形成了良好的能量释放通道。块体形状呈不规则状碎裂,符合爆破能量充分耦合下的典型破碎特征。相比传统方案中常见的大块率偏高问题,该改进方案有效促进了中心区域贯通破碎,使爆破气体快速卸载扩散,进一步推动后排孔岩体的解体与崩落。现场试验与前述数值模拟结果中"贯通型高损伤通道"表现一致,验证了在含层理复杂地质条件下,通过增加掏槽孔以强化应力波耦合的设计策略能够显著改善爆破效果,为后续矿石转运与支护作业创造了有利条件,具有良好的现场推广价值。

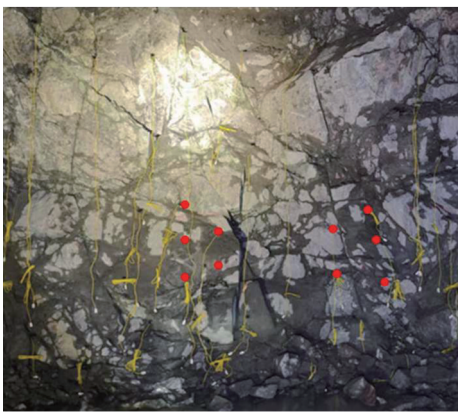


图 12 现场炮孔布置

Fig.12 On-site blasthole layout



图 13 改进掏槽方案的爆堆

Fig.13 Blast pile of improved cut blasting scheme

5 结论

(1) 层理结构对掏槽爆破的应力波传播与破碎形态具有显著影响。数值模拟结果表明,层理显著削弱了应力波在炮孔之间的传播能力,平均有效应力降幅达 61.64%,导致孔间应力波耦合受阻,掏槽区域破碎不贯通,整体掘进效果下降。

(2) 提出了改进后的掏槽孔方案,即在原有楔形掏槽方案中增设辅助掏槽孔,孔深 1 000 mm,布置角度为 90°。可有效增强中心区域的能量聚集效应,改善应力波耦合效果。模拟结果显示,优化方案下掏槽区形成了典型的"贯通型高损伤通道",岩体破碎更充分、连续性更好。

(3) 现场试验验证了改进掏槽方案的有效性,优化方案实施后,掏槽区域破碎充分,块度整体减小,大块率显著下降,有效提升了出矿效率,具备良好的现场推广价值。

参考文献(References):

[1] 马伟斌.铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望[J].铁道学报,2022,44(3):64-85.
Ma Weibin. Development and prospect of key technology of drilling and blasting for railway mountain tunnels [J]. Journal of the China Railway Society,2022,44(3):64-85.

[2] 谭杰,刘志强,宋朝阳,等.我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势[J].金属矿山,2021(5):13-24.
Tan Jie, Liu Zhiqiang, Song Zhaoyang, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China [J]. Metal Mine,2021(5):13-24.

[3] 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.

[4] Zheng Yun, Chen Congxin, Liu Tingting, et al. Slope failure mechanisms in dipping interlayered sandstone and mudstone revealed by model testing and distinct-element analysis [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2018,77(1):49-68.

[5] Gou Yonggang, Shi Xiuzhi, Qiu Xianyang, et al. Propagation characteristics of blast-induced vibration in parallel jointed rock mass [J]. International Journal of Geomechanics,2019,19(5):04019025.

[6] Yuan Haiping, Chen Chenghao, Wang Yixian, et al. Joint investigation and 3d visual evaluation of rock mass quality [J]. Advances in Civil Engineering,2020,2020(1):8858322.

[7] 杨国梁,毕京九,董智文,等.定向断裂控制爆破下层理页岩的致裂机理[J].爆炸与冲击,2024,44(6):3-17.
Yang Guoliang, Bi Jingjiu, Dong Zhiwen, et al. Fracturing mechanism of bedding shale under directional fracture-controlled blasting[J]. Explosion and Shock Waves,2024,44(6):3-17.

[8] Rong Hai, Li Nannan, Cao Cheen, et al. Numerical simulation of rock blasting under different in-situ stresses and joint conditions[J]. PloS One,2024,19(4):e0299258.

[9] Yu Qiuyang, Xu Pengfei, Dai Zhenxue, et al. Numerical analysis of rock joints in tunnel construction during blasting [J]. Arabian Journal of Geosciences,2021,15:32.

[10] 张建国,杨文,汪海波,等.层理面与炮孔夹角对隧道光面爆破效果的影响[J].工程爆破,2025,31(1):24-33.
Zhang Jianguo, Yang Wen, Wang Haibo, et al. The influence of angle between the bedding plane and borehole on smooth blasting effect of tunnels[J]. Engineering Blasting, 2025,31(1):24-33.

[11] Himanshu V K, Mishra A K, Roy M P, et al. Influence of joint orientation and spacing on induced rock mass damage due to blasting in limestone mines[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2023,40(6):2349-2359.

[12] 魏东.裂隙岩体台阶爆破破坏机制研究[D].武汉:武汉大学,2021.
Wei Dong. Study on failure mechanism of bench blasting in fractured rock mass[D]. Wuhan:Wuhan University,2021.

[13] 刘吉鹏.水平层理围岩爆破裂纹扩展与控制研究:以王岗山隧道为例[D].成都:成都理工大学,2021.
Liu Jipeng. Study on blasting crack propagation and control of horizontal bedding surrounding rock: a case study of Wanggangshan tunnel[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2021.

[14] 叶海旺,韦文蓬,周汉红,等.裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟[J].爆破,2023,40(4):44-51.
Ye Haiwang, Wei Wenpeng, Zhou Hanhong, et al. Refined numerical model construction and blasting simulation of fractured rock mass[J]. Blasting,2023,40(4):44-51.

[15] Ding Yuqing, Tang Wenhui, Zhang Ruoqi, et al. Determination and validation of parameters for riedel-hiermaier-thoma concrete model [J]. Defence Science Journal,2013,63(5):524-530.

[16] Huo Xiaofeng, Yu Zhi, Qiu Xianyang, et al. Investigation of water-coupling presplit blasting considering the role of stress wave parameters [J]. Engineering Fracture Mechanics,2025,321:111067-111067.

[17] 冯庆杰,谷亚州,周颜军.三贵口铅锌矿中深孔爆破参数优化研究与应用[J].矿业研究与开发,2025,45(3):66-73.
Feng Qingjie, Gu Yazhou, Zhou Yanjun. Optimization and application of medium and deep hole blasting parameters in Sanguikou lead-zinc mine [J]. Mining Research and Development,2025,45(3):66-73.

[18] Tian Xingchao, Tao Tiejun, Liu Xia, et al. Calculation of hole spacing and surrounding rock damage analysis under the action of in situ stress and joints[J]. Scientific Reports, 2022,12(1):22331.