

开采工艺研究

基于 ANSYS/LS-DYNA 的扇形中深孔爆破 参数优化数值模拟

Numerical Simulation of Parameter Optimization for Sector Deep-hole
Blasting based on ANSYS/LS-DYNA

王超, 袁捷欧, 张冲, 王锐, 游文斌

(武汉开圣科技有限责任公司, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对程潮铁矿在引入装药台车后中深孔爆破参数需优化问题,在现爆破方案的基础上,并利用 ANSYS/LS-DYNA 建立流固耦合模型,对比分析4种孔底距与4种交错不装药结构17组方案破坏区质量、炸药单耗与有效应力。结果表明:孔底距为2 m、不装药长度为2 m和6 m为最优爆破参数。在该参数下破碎区质量达820 t,较原方案(592 t)提升38.5%,并且在保证矿岩有效应力大于屈服强度情况下,有最小的炸药单耗。该优化方案在不降低爆破效果条件下,降低了钻孔工程量和炸药单耗,为类似矿山中深孔爆破参数优化提供了可靠技术参考。

关键词:扇形中深孔爆破;孔底距;装药结构;数值模拟

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0001-07

Abstract:To address the optimization of medium-deep hole blasting parameters following the implementation of charging trucks in Chengchao Iron Mine, this study established a fluid-structure coupling model using ANSYS/LS-DYNA based on the existing blasting scheme. Seventeen different configurations combining four borehole bottom spacings and four staggered uncharged section layouts were compared and analyzed in terms of fracture zone mass, explosive consumption per unit, and effective stress. The results demonstrate that the optimal blasting parameters are a borehole bottom spacing of 2 m with uncharged sections of 2 m and 6 m. This configuration achieves a fractured zone mass of 820 tons, representing a 38.5% improvement over the original scheme (592 tons), while maintaining the lowest explosive consumption per unit and ensuring that the effective stress in the ore rock exceeds the yield strength. The optimized approach reduces both drilling work and explosive consumption without compromising blasting effectiveness, offering valuable insights for optimizing medium-deep hole blasting parameters in similar mining operations.

Key words: fan-shaped medium-length hole blasting; hole bottom spacing; charging configuration; numerical simulation

1 前言

中深孔爆破是地下矿山开采最主要的破岩手段。其爆破效果直接关系到矿山生产效率、施工安全、成本控制以及环境影响。爆破效果的好坏,关键在于爆破参数的合理设计与优化^[1-4]。传统的爆破参数设计多依赖于工程经验、理论公式或小规模现场试验^[5-7],存在周期长、成本高、可重复性差、难以全面反映复杂地质条件下岩石破碎机理等局限性。

随着计算机技术的发展,国内外学者在利用数

值模拟研究中深孔爆破参数方面取得了大量研究成果。张要顺等^[8]首先理论计算出最优中深孔爆破参数,再通过数值模拟软件进行模拟验证,获取了适合该矿山不同条件下的最优中深孔爆破参数。张杰等^[9]构建了上向中深孔爆破 FEM-SPH 耦合模型,分析了不同起爆顺序的岩石爆破抛掷规律,并阐明了中间孔先起爆、两边孔后起爆的方案可显著提高爆堆集中度。Gao 等^[10]建立了双孔爆破模型,通过对双孔模型的损伤应力变化对爆破参数进行了模拟分析,对爆破参数进行优化分析。Zhang 等^[11]通过“接触”法建立了断层与围岩的数值模

[作者简介] 王超(1981—),男,湖北襄阳人,工程师,主要从事复杂矿体开采技术及应用研究。

[引用格式] 王超,袁捷欧,张冲,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的扇形中深孔爆破参数优化数值模拟[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):1-7.

型,研究了断层倾角、厚度等因素对介质中爆破能量空间分布的影响,提出随着断层倾角的增大,屏障效应逐渐增大,叠加效应呈现先增大后减弱的非线性变化。

本研究基于现有爆破参数,设计16组爆破参数方案。在此基础上,利用ANSYS/LS-DYNA软件对范围内各方案进行数值模拟,并对比各方破碎区质量、炸药单耗与有效应力,最终得到最优中深孔爆破参数,可为矿山中深孔爆破参数优化工作提供参考。

2 工程概况

程潮铁矿采用无底柱分段崩落法,长期以来,矿山采用孔径为71 mm的中深孔进行爆破作业,并主要依赖传统人工装药方式。为提升装药作业的效率、安全性及装药质量稳定性,程潮铁矿引入了先进的装药台车替代传统人工装药,并将孔径提升至80 mm。而爆破参数依旧沿用人工装药时期参数。现需要对爆破参数进行优化,以适应新的工况要求。

目前,采场的阶段高度70 m,分段高度17.5 m,

进路间距15 m,炮孔直径80 mm,排距2 m,平均孔底距1.8 m,孔口距0.5~0.7 m,孔边角60°,孔数为11个,在装药时各孔孔口留出2 m不装药。

3 模拟参数选取

1) 炸药参数

数值模拟中炸药材料选用LS-DYNA模拟软件库中的高能炸药材料,其关键字为* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN,并且为描述爆炸过程中爆生产物所产生的体积、压力以及能量变化特性,需引入* EOS_JWL状态方程进行修饰,JWL状态方程见式(1)。矿山所提供的二号岩石乳化炸药其炸药性能见表1^[12]。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{1}$$

式中: P 为炸药爆轰压力, GPa; V 为炸药在爆轰过程中的相对体积; E_0 为炸药初始内能, GPa; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料量纲常数。

表1 炸药材料参数

密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	爆速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	压力/GPa	JWL 状态方程参数					
			A/GPa	B/GPa	E_0/GPa	R_1	R_2	ω
1.21	4 100	5.73	236	0.198	4.29	4.47	1.2	0.33

2) 空气参数

空气在数值仿真计算时作为流体,因此同时有所对应的本构方程及状态方程来对空气进行定义。空气材料选择材料库中关键字* MAT_NULL定义,状态方程选择* EOS_LINEAR_POLYNOMIAL^[13]。空气状态方程见式(2)。空气材料参数见表2。

$$p_a = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5 + C_6\mu^2)e_0 \tag{2}$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为状态方程各系数材料; e_0 为初始单位体积内能; μ 为比体积。

表2 空气材料参数

密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	空气材料参数						e_0/GPa	V_0	
	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	0.025	0

3) 矿岩参数

为了反应磁铁矿石在爆破作用下的受损情况,铁矿石模型选择材料库中的272号卡片* MAT_RHT定义^[14]。根据程潮提供《地质概况与岩石力研究报告》,磁铁矿物理力学参数见表3。

表3 磁铁矿物理力学参数

名称	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	纵波波速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa
磁铁矿	4.427	4 958	99.7	5.96	76.3	0.31	45.3	21.6

4 中深孔孔底距与装药结构优化数值拟

4.1 数值模型方案与建立

利用ANSYS/LS-DYNA软件,以g-cm- μ s单位

制建立还原实际情况的数值模型。装药采用耦合连续装药,由于原装药方式过于密集,设计交错不装药长度为2 m/2 m、2 m/4 m、2 m/6 m、2 m/8 m的4种装药结构。参考类似矿山的数据,按表4所示因素

开展全因素的数值模拟计算。

表4 数值模拟因素水平

因素	孔底距/m	不装药长度/m
水平1	1.9	2/2
水平2	2	2/4
水平3	2.1	2/6
水平4	2.35	2/8

根据上述方案,加之现行爆破参数,共建立 17 个数值模型,炮孔布置与数值模拟如图 1 所示。模型共有 3 个部分,分别为矿岩、空气和炸药。为了避免模拟计算过程中变形过大无法继续计算的问题,采用流固耦合算法。将空气与炸药设置为 ALE 单元,矿岩设置为 Lagrange 单元。在模型表面中线上选取 4 个测点,编号为 A、B、C、D,用以监测爆破过程中正面自由面上的应力时程曲线。其中 D 点距巷道 1 m,各测点间距均为 6.5 m。巷道表面为自由面,其他面均为无反射面。起爆方式为孔底逐孔起爆,炮孔按起爆时间进行分段,一段炮孔起爆时间为 0 μs,段间起爆间隔为 50 μs,总计算时间为 5 000 μs。

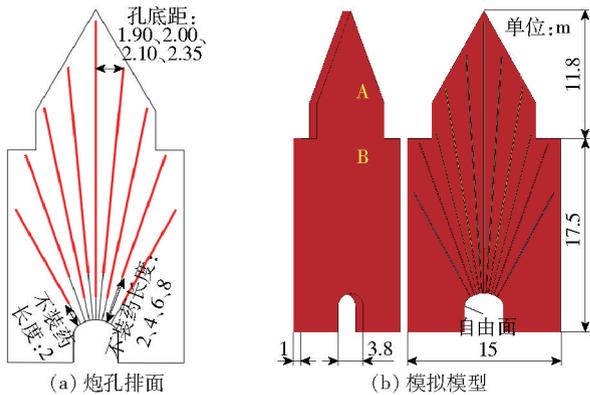


图1 炮孔排面与数值模型

4.2 不同孔底距与装药结构破坏区分析

在 RHT 本构模型中,岩石损伤判定范围见表 5^[15]。将损伤参数大于 0.11 部分统称为破坏区,表示矿岩能够得到有效的破坏。

表5 RHT 本构爆破损伤判定范围

伤分区	损伤参数 Damage
粉碎区	$0.5 < D \leq 1$
破裂区	$0.11 < D \leq 0.5$
非破坏区	$D \leq 0.11$

在起爆时,炸药爆轰,释放大量能量。紧邻炮孔

壁的一圈矿岩,受到强烈破坏,形成一个粉碎区,此过程会消耗大部分爆轰能量。剩余的能量以应力波的形式在矿岩中传播,萌生新的裂纹并延径向扩展,形成破裂区,最终形成以炮孔为中心,粉碎破裂区、非破坏区依次分布。选取典型的损伤云图如图 2 所示。

从非破坏区分布分析,不同孔底距与装药结构下,在孔底处均非破坏区有非破坏区出现,说明在保证一定的孔底距大小下,这些非破坏区与孔底距关系不大,故不作考虑。

对比分析图 2(a)与图 2(b),图 2(a)中,由于孔底距较大,炮孔间矿岩破坏不充分,存在大量非破坏区。图 2(b)中,模型中部没有非破坏区产生。

从图 2(b)至图 2(d),孔底距一致,不装药长度逐渐增加。由图可知,破坏区分布仅在不装药部分出现差异。在图 2(a)中,破坏区主要以粉碎区的形式存在,而随着不装药长度的增加,不装药部分孔底炮孔间距也在增加,使得在不装药部分矿岩损伤参数逐渐变小。这种变化主要体现在两边的不装药部分,因为越靠近模型中线,炮孔越密集,使得即使不装药,炮孔附件矿岩也是处于粉碎状态。两边的不装药部分矿岩从粉碎区向着非破坏区转变,在图 2(c)中,不装药部分矿岩处于破裂区状态,且没有明显的非破坏区,相比于图 2(a),虽然破坏程度有所降低,但任能满足爆破要求。而在图 2(d)中,相同位置已出现大量非破坏区,已不能保证未装药部分矿岩的破坏程度要求。

利用 LS-PROPOST 后处理软件,统计裂纹稳定后破坏区的体积与所用炸药体积,计算出破坏区质量与炸药单耗,具体如图 3 所示。由图所示,当孔底距一致时,不同装药结构对破碎区质量影响较小,破碎区质量主要取决于孔底距,因此在描述孔底距对破碎区质量影响时以该孔底距四组方案的平均质量为参考。孔底距为 1.9 m、2 m、2.1 m、2.35 m 时,破碎区质量平均质量分别为 518.75 t、820.00 t、483.25 t、489.50 t。现爆破方案破碎区质量的质量为 592.00 t。随着孔底距的增大,破碎区质量大致呈现出先增加后减小的趋势,并在孔底距为 2 m 时达到最大值,较原方案提升 36.8%,且远大于其他 3 种孔底距方案。

4.3 不同孔底距与装药结构有效应力分析

为了获取更清晰的云图,以便于观看应力分布和传播规律,调出了爆破排面 0~100 MPa 的应力分

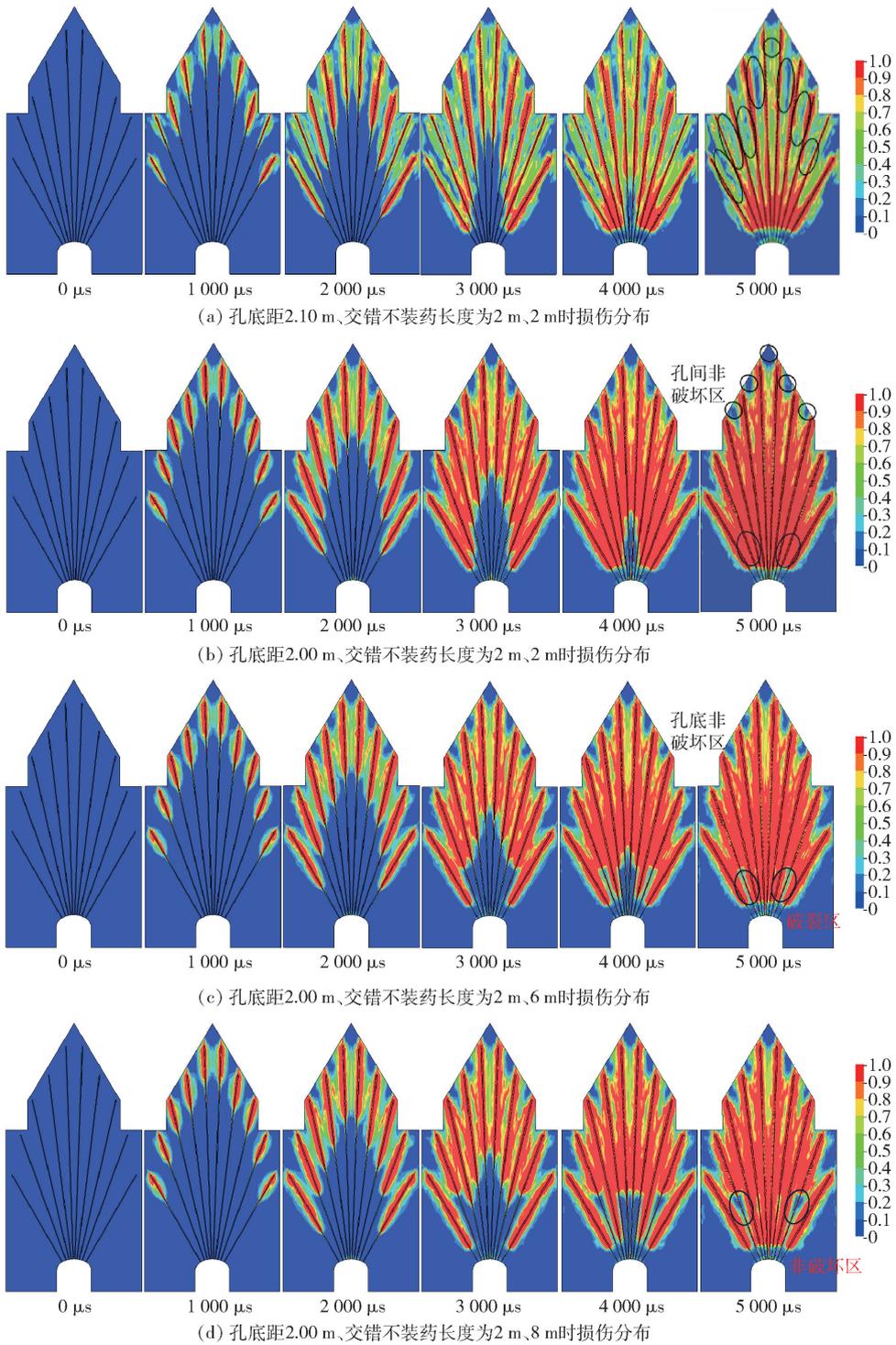


图2 典型方案损伤云图

布,典型方案有效应力分布如图4所示,图中红色部分为高应力区。

对比图4(a)与图4(b),图4(b)中高应力区面积显著多于孔底距图4(a)。且在图4(a)中,3000 μs后,孔底高应力区开始出现明显衰减,至5000 μs时孔底基本无高应力区,只在孔口留有少

量高应力区。而在图4(b)中,直至模拟结束,依然存在着大量高应力区。对比图4(b)与图4(c),当孔底距一致时,模型主要部分的有效应力云图差别不大,高应力区分布范围基本一致,仅在爆破结束后,残余应力的分布有少量不同。

根据 Mises 屈服准则,对于存在自由面的爆破,

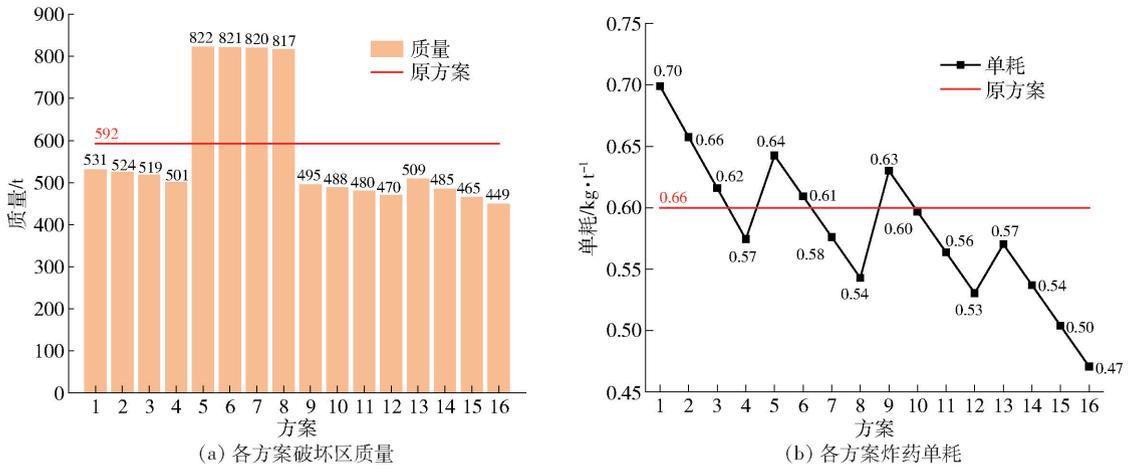


图3 碎区质量与炸药单耗

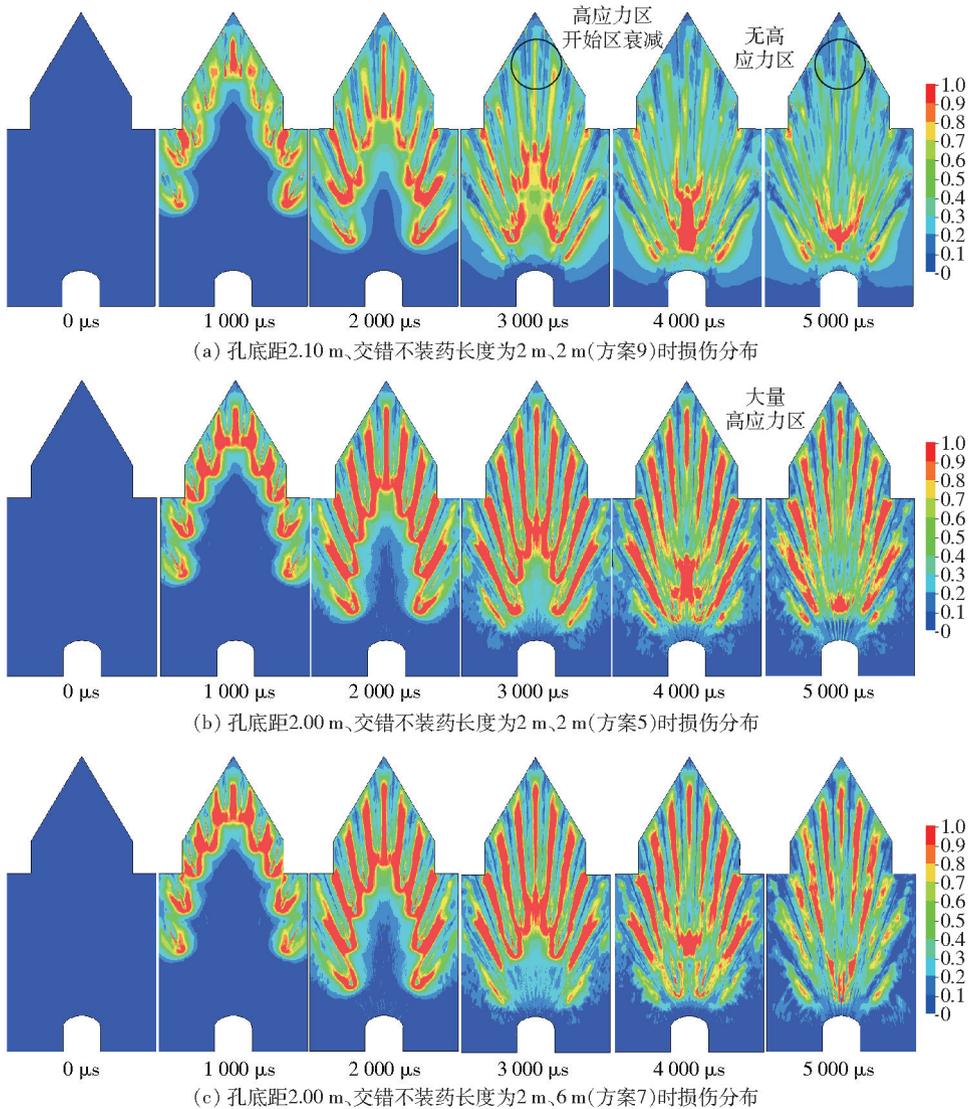


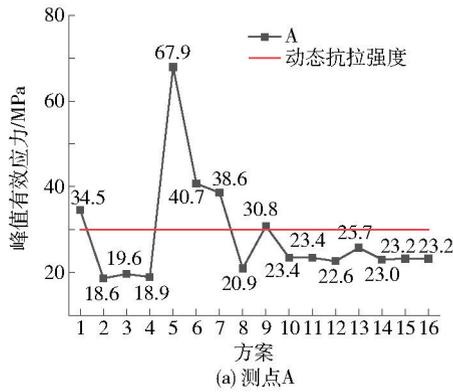
图4 典型方案有效应力云图

矿岩破坏形式主要为拉伸破坏,因此主要考虑矿岩的动态抗拉强度与有效应力的关系。矿岩的动态抗拉

强度经验公式见式(3)。最终确定的动态抗拉强度为30 MPa。提取各方案4个测点峰值有效应力并与矿

岩动态抗拉强度作比较,具体如图5所示。

$$\sigma_{id} = (4 \sim 8) \sigma_t \quad (3)$$



式中: σ_{id} 为动态抗拉强度,MPa; σ_t 为静态抗拉强度,MPa。

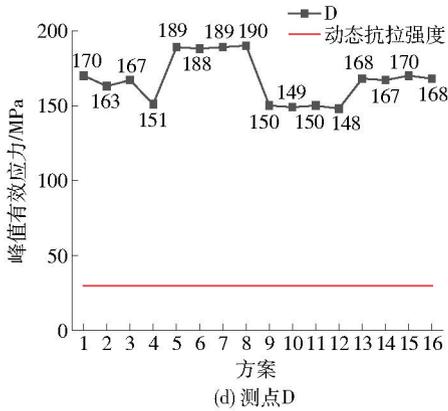
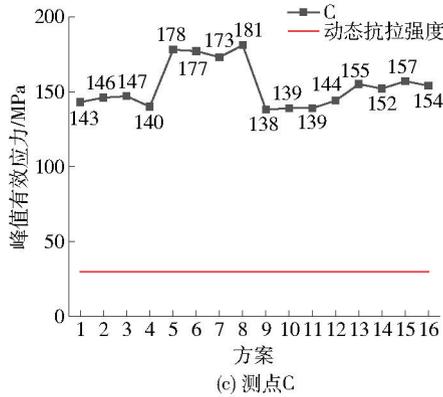
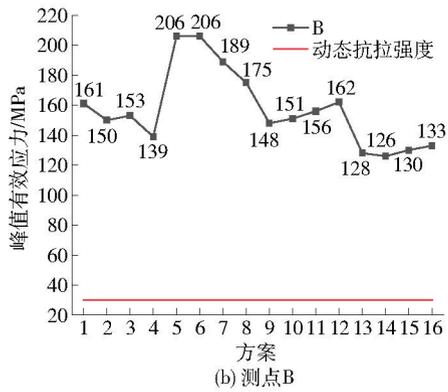


图5 测点峰值有效应力

由图可知,各方案中B、C、D测点峰值有效应力均远大于矿岩动态抗拉强度,说明靠近模型中上部分区域的矿岩均能得到有效破坏,则主要根据测点A的峰值应力作为选择依据。当孔底距为2 m时,各测点的峰值有效均为相同装药结构中峰值有效应力的最大值,因此选择2 m为最优孔底距。当孔底距为2 m、不装药长度为2 m和2 m时,测点A峰值有效应力最大,为67.9 MPa。随着不装药长度增加,A点峰值应力逐渐下降,最终在不装药长度为

2 m和8 m时时达到最小值,为20.9 MPa。不装药长度为2 m和6 m时,测点A峰值应力为38.6 MPa,为单耗最小而满足处爆破效果要求的方案。

结合3.2节对破坏区的分析,综合选择孔底距2 m、不装药长度为2 m和6 m为最优爆破方案。孔底距2 m、不装药长度为2 m和6 m现爆破方案的钻孔长度等经济指标见表6。由表可知,最优方案能用更少的孔数、钻孔长度与装药量取得更小的单耗,同时满足爆破要求与经济效益要求。

表6 现爆破方案与最优方案经济指标

方案	孔数	钻孔长度/m	单排装药量/kg	每米崩矿量/ $t \cdot m^{-1}$	炸药单耗/ $kg \cdot t^{-1}$
现方案	11	180	935.4	9	0.65
最优方案	10	174.8	828.2	10.83	0.58

5 结论

在程潮铁矿原有爆破参数的基础上,设计了孔底距为1.9 m、2 m、2.1 m、2.35 m的4种工况。出于减少装药量、提高爆破能量利用率考虑,设计交错不

装药长度为2 m/2 m、2 m/4 m、2 m/6 m、2 m/8 m的4种装药结构。对17个方案进行数值模拟对比分析,得到如下结论:

(1)分析各方案破坏区,结果表明,当孔底距为2.00 m时破坏区面积大,破坏区质量为820 t,远大

于其他3种孔底距与现爆破参数。同时,孔底距为2 m时炸药单耗也小于其他方案。

(2)分析各方案有效应力分布与测点峰值有效应力,孔底距2 m时各测点峰值应力均为最大。由于各方案B、C、D测点峰值有效应力均远大于矿岩动态抗拉强度,选择A的峰值应力作为选择依据。孔底距2 m、不装药长度为2 m和6 m时,测点A峰值应力为38.6 MPa,为单耗最小而满足处爆破效果要求的方案。

(3)孔底距2 m、不装药长度为2 m和6 m时孔数、钻孔长度、装药量与炸药单耗均小于现爆破方案,能够同时满足爆破效果与经济效益要求。

本研究利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,对不同方案爆破参数进行数值模拟。对比分析不同方案破坏区质量、炸药单耗与有效应力,最终获得最佳爆破参数,可为优化程潮铁矿中深孔爆破参数,并为相似矿山提供技术与经验参考。

[参考文献]

- [1] 尹东升,熊国熊,贾贝,等.铜绿山矿中深孔爆破参数优化研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):8-12+19.
- [2] 谷亚洲,李闯,陈南海,等.扇形中深孔爆破孔网参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(4):96-103.
- [3] 殷锦训,王维,游喻豪,等.湖北三鑫金铜矿扇形中深孔爆破参数优化数值模拟研究[J].爆破,2022,39(2):85-93.
- [4] 孙刚友,金爱兵,武耀硕,等.急倾斜薄矿脉硬岩中深孔爆破参数优化研究[J].金属矿山,2025(4):174-183.
- [5] 刘猛.地下采场中深孔爆破参数设计与应用[J].中国矿山工程,2017,46(4):12-14.4.
- [6] 刘亮,宋柏树,刘志强.中深孔爆破成井技术在萨热克铜矿的应用研究[J].中国矿山工程,2017,46(5):1-4+68.
- [7] 徐喜.深孔爆破一次成井技术在铜绿山矿的应用[J].中国矿山工程,2020,49(1):12-15.
- [8] 张要顺,陈彬彬,王成财,等.基于 ANSYS/LS-DYNA 的平川铁矿中深孔爆破参数研究[J].中国矿业,2025,34(s1):477-483.
- [9] 张杰,邱贤阳,田志刚,等.地下矿山上向扇形中深孔爆破爆堆控制技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(10):58-64.
- [10] Gao F, Li X, Xiong X, et al. Refined design and optimization of underground medium and long hole blasting parameters—a case study of the Gaofeng Mine [J]. Mathematics, 2023,11(7):1612.
- [11] Zhang J H, An L, Li Y H, et al. Characteristics of energy distribution and precise control technology of fan-shaped medium-deep hole blasting under the condition of immediately adjacent faults[J]. Mining, Metallurgy & Exploration (2025):1-19.
- [12] 王鑫,张昌锁.基于 ANSYS/LS-DYNA 的工业炸药材料参数标定方法[J].爆破,2022,39(1):36-42+50.
- [13] 宗琦,程兵,汪海波.偏心不耦合装药孔壁压力与损伤效应数值模拟[J].爆破,2019,36(3):76-83.
- [14] Wang Z L, Wang H C, Wang J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2021,135:104172
- [15] 黄永辉,孙博,张智宇,等.岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证[J].北京理工大学学报,2023,43(6):565-574.