

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.007

充填体相邻采场低扰动爆破参数优化及应用*

张钦礼¹, 张雁峰¹, 安述庚², 张德明³, 王道林¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 安徽开发矿业有限公司, 六安 237400;
3. 湖南中大设计院有限公司, 长沙 410000)

摘要: 针对李楼铁矿二步回采爆破安全问题, 利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立相应的爆破模拟方案, 按照现场实际采场规格, 两侧充填体长度为 20 m, 中间回采矿体长度为 30 m, 底部巷道规格为 4 m × 4 m, 充填体与矿体高度均为 25 m, 厚度设置与排间距一致均为 2 m; 布置炮孔时, 考虑在矿体靠近充填体边界处内部设置 0.5 m、1.0 m、1.5 m 与 2.0 m 厚度的保护层(即炮孔底部与充填体边界处之间的矿体), 同时设置孔底起爆与孔口起爆方案。模拟不同方案下二步回采炸药起爆后, 在充填体边界处相应位置选取受爆破影响最大的单元进行应力、振速与位移综合分析, 从而对不同方案下充填体整体稳定性进行评价。模拟结果表明: 在适当范围内增大保护层厚度能够有效降低爆破对于充填体的冲击, 同时, 孔口起爆方案由于炸药起爆位置相对距离充填体更远, 其应力波与冲击波衰减后对充填体影响更小。采用孔口起爆方案, 保护层厚度设置为 1.0 m 时, 各监测点在爆破过程中有效应力峰值为 0.03 MPa, 振速峰值为 9.35 cm/s, 合位移峰值为 0.07 mm, 均处于充填体安全判定范围内, 而采用孔底起爆方案时保护层厚度需增至 1.5 m 才能使得各监测点单元处于安全状态内, 相对比之下孔口起爆方案保护层厚度更小, 对于矿石回收率有着更大的增益。通过现场工业试验对于孔口起爆方式, 保护层厚度为 1.0 m 的模拟方案进行验证: 在采场周边布置测振仪, 根据相关数据与萨道夫斯基公式拟合得充填体边界监测点单元振速峰值为 9.37 cm/s, 与模拟结果中对应监测点振速峰值相符合, 且现场爆破效果较为良好, 进一步验证了模拟结果的可靠性与模拟方案的合理性。

关键词: 二步回采; 爆破; 数值模拟; 现场试验; ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0053-09

Optimization and Application of Low Disturbance Blasting Parameters in Stopes Adjacent to Backfill

ZHANG Qin-li¹, ZHANG Yan-feng¹, AN Shu-geng², ZHANG De-ming³, WANG Dao-lin¹

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Anhui Development and Mining Co., Ltd., Lu'an 237400, China;
3. Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the safety problem of second-step mining blasting in Lilou Iron Mine, the finite element software ANSYS/LS-DYNA is used to establish a corresponding blasting simulation scheme. According to the actual stope specifications, the length of the backfill body on both sides is 20 m, and the length of the middle mining body is 30m. The size of the bottom roadway is 4 m × 4 m. The height of the backfill body and the ore body are both 25 m, and the thickness and row spacing are both 2 m. When arranging blast holes, it is considered to set 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m

收稿日期: 2022-06-01

作者简介: 张钦礼(1965-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事矿山地下开采、充填工艺以及工程爆破等方面的研究, (E-mail) zhangqinli@126.com。

通讯作者: 王道林(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山充填与工程爆破等方面研究, (E-mail) daolinw@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(52074351)

and 2.0 m thick protective layer (that is, the ore body between the bottom of the blasthole and the boundary of the filling body) inside the ore body near the boundary of the backfill body, and both bottom and top initiation are used. After simulating the second-step recovery blasting under different schemes, the element most affected by blasting is selected at the corresponding position of the boundary of the backfill body for comprehensive analysis of stress, vibration velocity and displacement, so as to evaluate the overall stability of the backfill body under different schemes. The simulation results show that increasing the thickness of the protective layer in an appropriate range can effectively reduce the impact of blasting on the filling body. At the same time, under the top initiation scheme, the detonation position of the explosive is far away from the filling body, and the stress wave attenuation is more obvious. When the thickness of the protective layer is set to 1.0 m under the top initiation scheme, the effective stress peak value, the peak vibration velocity, and the peak value of the combined displacement of each monitoring point during the blasting process are 0.03 MPa, 9.35 cm/s, and 0.07 mm respectively, all of which are in the safety range of the filling body. However, the thickness of the protective layer needs to be increased to 1.5 m when the bottom initiation scheme is adopted to keep each monitoring point in a safe state. In contrast, the thickness of the protective layer of the top initiation scheme is smaller, which has a better effect on the ore recovery rate. The simulation scheme of the top initiation method and the thickness of the protective layer of 1.0 m is verified through the field industrial tests by arranging a vibration meter around the stope. And the peak particle vibration velocity at the backfill boundary is fitted according to the relevant data and the Sadowsky formula. The peak velocity is 9.37 cm/s, which is consistent with the peak vibration velocity of the corresponding monitoring point in the simulation results. And the blasting effect on site is relatively positive, which further verifies the reliability of the simulation results and the rationality of the simulation scheme.

Key words: second-step mining; blasting; numerical simulation; field engineering test; ANSYS/LS-DYNA

由于充填采矿法在安全回采及控制地压方面的优越表现,不同矿山因地制宜演变出契合自身矿体赋存性质的充填采矿方法^[1]。其中,以大跨度高中段为主要特征的空场嗣后充填法,凭借其生产效率高、回采工艺简单、一次崩矿量大等优点,在围岩较为稳固的金属矿山得到广泛应用。例如冬瓜山铜矿采取隔一采一的回采顺序^[2],矿房、矿柱宽均为18 m,采场最大高度超70 m。安庆铜矿采用两步骤回采方式^[3],矿房矿柱宽度均为15 m,采场高度高达114 m。在二步回采过程中,充填体不仅受到上覆围岩的静载荷压力,还会受到二步回采时爆破振动产生的动载荷影响。因此为降低爆破扰动,一般会在临近充填体一侧设置一定厚度的矿体保护层,但根据“应采尽采”的资源回收原则,保护层厚度设置过大会造成不必要的矿产资源浪费,过小又起不到降低爆破扰动的作用。目前,在保证充填体强度的基础上,通过优化保护层厚度、炸药单耗、起爆方式等手段降低爆破作业对充填体的动力学扰动,是保证充填体稳定性,提高矿山安全生产水平的关键举措。刘优平等采用LS-DYNA分析凡口铅锌矿间柱采场近充填体炮孔的爆炸应力场^[4],对比分析充填体内一系列节点的振动速度,以优化炮孔装药结构,从而控制爆破对充填体的影响。文兴等利用阿舍勒铜矿现有微震监测系统^[5],对于现场爆破振动

进行测试并计算优化现有爆破孔网参数,提高了二步骤采场的安全性;张金等通过分离式霍普金森压杆(SHPB)试验获得矿石和充填体的动力学参数^[6],并以此利用LS-DYNA对不同孔底距、排间距等多种方案的充填体响应进行模拟分析,得到了能够对应满足充填体稳定性且爆破效果最佳的方案。朱瑞鹏等通过分析爆炸应力波在胶结充填体内部空隙中的透反射规律^[7],建立了充填体张拉破坏理论模型,为胶结充填体在二步回采中稳定性分析提供了新的参考依据。姜立春等采用弹性力学半逆解法^[8],建立边界力耦合作用下胶结充填体的临界爆破振速相对于充填体灰砂比、高度与宽度等尺寸因素之间理论模型。

研究者们针对爆破对充填体的影响及控制措施进行了大量研究,但研究方法相对较为单一,影响因素考虑不全面,且很难与现场实际工况相符。有鉴于此,以李楼铁矿二步回采对充填体的爆破扰动为研究对象,利用LS-DYNA软件构筑充填体-矿体-炸药三者耦合作用模型,获得不同保护层厚度及起爆方式下充填体的动力学响应规律,并通过现场工业试验对数值模拟结果进行验证。

1 工程概况

李楼铁矿矿床南北走向长约3.4 km,东西宽约

500 m。矿体埋深 90 ~ 341 m,斜深 100 ~ 767 m,最大控制深度为 -862 m 标高,上覆农田。李楼铁矿采取分段凿岩阶段矿房法进行回采,一步采结束后进行充填,待充填体固结稳定后再进行二步回采(见图 1)。每阶段矿房高 100 m,分四个分段,每分段高度为 25 m,凿岩巷道规格为 4 m × 4 m 的正方形,布置于二步采的矿体底部,并从凿岩巷道向上钻扇形孔。爆破选用规格为 80 mm 的扇形孔,排距为 1.7 ~ 1.9 m,边孔孔角为 30° ~ 40°,采取连续耦合装药,起爆方式采用孔底起爆及孔口起爆,如图 2 所示。根据现有爆破现场工况发现,进入二步回采后,相邻采场的爆破振动会造成充填体的边帮片落甚至大幅凹陷,进而影响回采率及充填体稳定性的生产难题。鉴于需要满足李楼铁矿 500 万 t/a 的产能刚需,很难对装药密度进行优化。因此,亟待开展不同保护层厚度下爆破对充填体的影响研究,进而确定安全、经济、合理的保护层厚度,为矿山的爆破设计提供理论支撑。

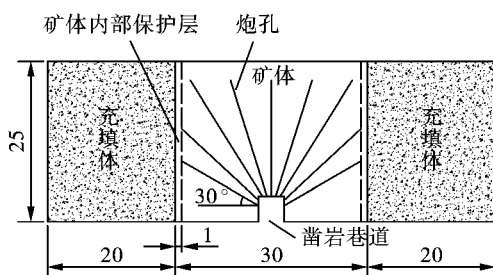


图 1 二步采爆破示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of second-step mining and blasting(unit:m)

2 爆破响应数值模拟

2.1 材料参数选取

2.1.1 炸药

在工程爆破中,定义炸药材料模型通常是在模型建立完毕后,通过修改 K 文件来设置炸药模型属性,对于不同的炸药,其密度以及 JWL 状态方程也有所不同^[9]。本次模型炸药采用 LS-DYNA 常用的炸药材料模型“HIGH_EXPLOSIVE_BURN”模型以及 JWL 状态方程用来描述炸药的爆炸过程^[10],JWL 方程具体如式(1)。

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

式中: P 为爆轰压力; V 为相对体积; E 为单位体积内能;其他均为炸药材料相关的参数。模拟采用 2 号岩石乳化炸药,具体参数如表 1 所示。

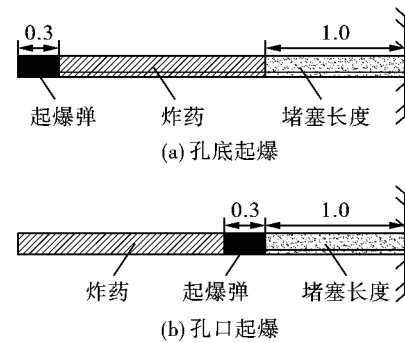


图 2 孔底起爆与孔口起爆装药示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of bottom initiation and top initiation(unit:m)

表 1 2#岩石乳化炸药材料模型主要参数

Table 1 2# Main parameters of rock emulsion explosive material model

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(m \cdot s^{-1})$	P_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.20	4300	4.0	214	1.82	4.16	0.96	0.3	3.14

2.1.2 矿岩体与充填体

根据岩石力学相关研究内容可知,岩体是内部结构复杂,不均匀,各向异性的介质材料,炸药爆炸会急剧破坏药包附近岩体的应力场,引起复杂的应力变化^[11]。在本次模拟中对于充填体受拉破坏采用 Von Mises 屈服准则判断^[12],即弹性畸变能达到一定值,材料便开始产生塑性变形。式 2 与式 3 分别为弹性畸变能 V_d 与 Von Mises 有效应力 $\bar{\sigma}$ 表达式。

$$V_d = \frac{1 + \mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

式中: V_d 为弹性畸变能; μ 为泊松比; E 为剪切模量; $\bar{\sigma}$ 为 Von Mises 等效应力, σ_1, σ_2 与 σ_3 为三向应力。结合式 2 与式 3 可得

$$V_d = \frac{1 + \mu}{3E} (\bar{\sigma})^2 \quad (4)$$

可以看出,弹性畸变能的大小和等效应力呈正相关。而根据李楼铁矿现场实际工况,爆破对充填

体的破坏主要是产生的应力波在充填体内的传播造成的拉伸破坏,从而造成充填体呈片状或块状进行垮落,而非粉末状破坏,需结合充填体的极限拉应力对爆破影响区域进行分析。矿体与充填体模型采取

LS-DYNA 中的塑性随动材料“MAT_PLASTIC-KINEMATIC”,参考李楼铁矿具体的力学参数,矿体与充填体的材料参数如表 2 所示。

表 2 李楼铁矿矿体与充填体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of Lilou iron ore body and filling body

类型	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	切线模量/ GPa
矿体	3.487	25.119	0.202	45.924	4.826	10.449
充填体	1.766	0.610	0.310	2.450	0.278	0.230

2.2 破坏判据

炸药爆轰传播过程基本分以下几个阶段^[13]:

(1) 爆破发生极短时间内,冲击波超过岩体动态抗压强度,将炮孔周围岩石压碎并扩大炮孔空间。(2) 随时间推移,炸药爆炸产生的压力不足以压碎岩石,但当应力波产生的切向拉应力超过岩体抗拉强度时,仍能导致岩石产生拉伸破坏,这也是充填体受爆破影响最主要的破坏形式。结合 Von Mises 屈服准则,当模拟充填体单元所受有效应力大于充填体极限抗拉强度时,判定为失稳状态。

振速标准根据《爆破安全规程》(GB6722—2014)规定^[14],二步采生产过程中充填体单元受爆破振动影响的峰值振速不得超过 12 cm/s。

充填体合位移标准根据过往研究的等效破坏原则结合李楼现场工况所定,当充填体单元合位移值处于 0.1~0.3 mm 时,即认为该位置上的单元受到较大影响或较小损伤。后续模拟方案中充填体稳定性分析将综合考虑以上标准来开展研究。

2.3 建立数值模型

以扇形炮孔中心剖面与沿凿岩巷道方向为对称面,建立 1/4 大小的模型(见图 3)。二步采爆破模拟结构模型共分为 4 个 Part:炸药、ALE 虚拟空间,矿体和充填体,其中 ALE 虚拟空间在模拟中仅用于炸药传递爆破冲击力于矿体中。炸药与虚拟空间采用 ALE 算法,矿体与充填体采用 Lagrange 算法。计算模型采用单元类型为三维实体 solid164,模型计算尺寸为 35 m×2 m×25 m,充填体长度为 20 m,矿体长度为 15 m,分段高度为 25 m,厚度为 2 m。二步采炮孔为上向扇形孔,炮孔直径为 80 mm,单排起爆。模型的上、下、左、后表面通过关键字 Non-Reflection-Boundary 施加无反射边界约束,在模型的右边与前边设置对称条件,单位采用 cm-g- μ s。结合李楼铁矿二步采实际生产状况,分别对孔底起爆与孔口起爆时,四种保护层厚度(0.5 m、1 m、1.5 m、

2 m)下爆破作业对充填体的影响进行分析。

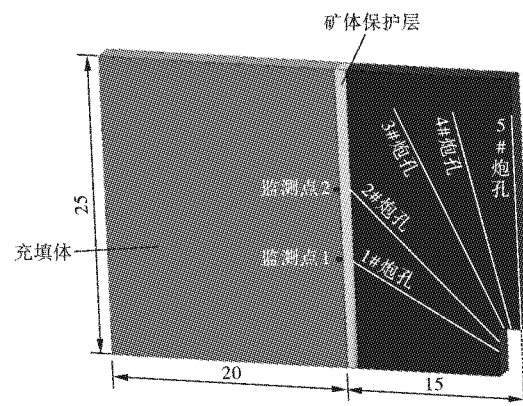


图 3 二步采爆破模拟结构模型建立(单位:m)

Fig. 3 Second-step mining and blasting simulation structure model establishment (unit: m)

3 基于 LS-DYNA 的保护层厚度优化

运行后处理软件 LS-PREPOST 对不同方案模拟结果进行读取并进行分析。以充填体抗拉强度为上限,分别提取孔底起爆方案与孔口起爆方案应力云图于图 4 与图 5。

应力云图显示,在两种起爆方式下,距离炮孔最近的充填体边界部位所受应力波影响都最为显著,而其他边界部位受应力波影响较小,其原因是充填体本身性质可以被视为软岩,反射能力强,高应力波抵达充填体边界处时会快速扩散。同时,随保护层厚度的增加,应力波传播至充填体所需时间更长,充填体内部受影响深度也越小。若以充填体抗拉强度为上限,在孔底起爆方式下保护层为 0.5 m 的模拟方案中充填体内部受应力波影响深度将近 1.5 m,而在保护层为 1.0 m 的方案中则缩减至 0.6 m,直观反映出了保护层的设置对于充填体的保护作用;而当采取孔口起爆方式时,保护层厚度为 0.5 m 的方案充填体内部受影响范围仅为 0.3 m,相对于孔

底起爆同保护层厚度方案而言,孔口起爆产生的应力波传播需要更长时间,衰减程度更大。

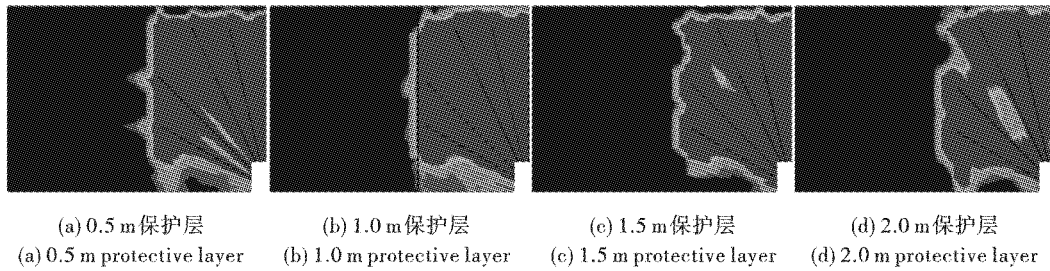


图 4 孔底起爆模拟方案等效应力云图分布

Fig. 4 Equivalent stress cloud distribution of bottom-hole initiation simulation scheme

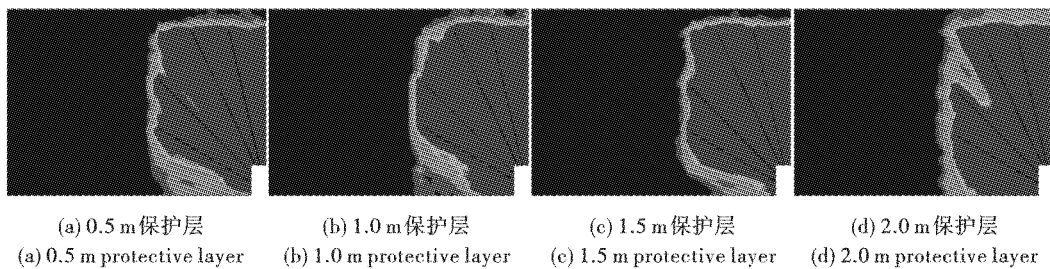


图 5 孔口起爆模拟方案等效应力云图分布

Fig. 5 Equivalent stress cloud distribution of top-hole initiation simulation scheme

为研究爆破对于充填体的具体影响,作不同模拟方案充填体与矿体交界面的等效应力云图于图 6 与图 7,并对模型按照 XZ 方向镜像得到 1/2 模型。如图,不同方案中应力波在交界面上的传播均呈现出球形扩散,距离 1#、2#炮孔最近的单元处于球心位置,且所受应力波影响最为显著。因此,选取距离 1#炮孔最近的单元 26635(测点 1)以及 2#炮孔最近的单元 30415(测点 2)作为监测点(如图 3 所示),记录并分析两测点的等效应力、振速、合位移在不同时刻下的变化,从而对模拟方案中的充填体的稳定性做出评价。

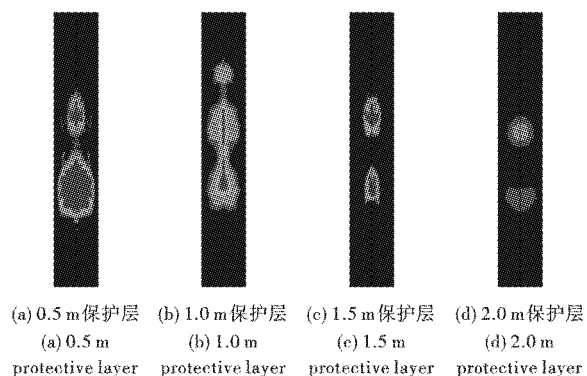


图 7 孔口起爆模拟方案充填体交界面等效应力云图分布

Fig. 7 Equivalent stress cloud distribution of filling body interface in top-hole initiation simulation scheme

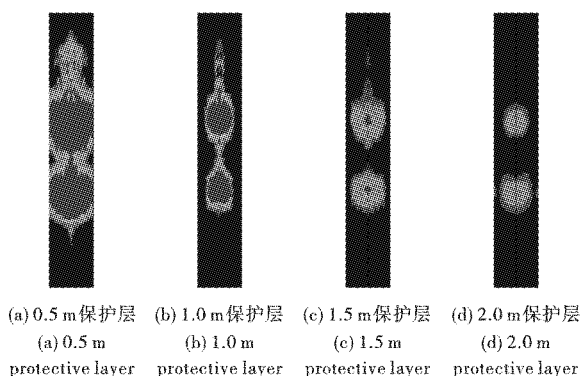


图 6 孔底起爆模拟方案充填体交界面等效应力云图分布
Fig. 6 Equivalent stress cloud distribution of filling body interface in bottom-hole initiation simulation scheme

图 8 与图 9 为不同起爆方式下保护层厚度设置为 0.5 m 时,监测点单元所受等效应力、合振速以及合位移时程曲线。采用孔底起爆时,最大等效应力为 0.44 MPa,峰值振速为 59.02 cm/s,最大等效位移为 0.21 mm,均出现于单元 30415(2#测点),远超充填体相应稳定判据;当采用孔口起爆时,监测点各项指标均小于孔底起爆方案,其中,最大等效应力为 0.26 MPa,略低于充填体抗拉强度,但峰值振速为 44.97 cm/s,仍高于充填体稳定振速标准。对图 8 中 2#测点(单元 30415)应力时程曲线(见图 1-a)进行分析:在爆破开始后第 2 ms 左右,1#炮孔爆破产生的应力波抵达 2#测点,并在充填体边界处发生

扩散,在图中表现为等效应力迅速上升至峰值0.44 MPa,然后快速衰减至0.10 MPa;随后,其他炮孔爆破产生的应力波同样传递至充填体边界,导致等效应力再度攀升,但并未超过前峰;随着应力波在充填体内部的折射与衰减,2#测点所受等效应力逐渐震荡衰减,最终呈现出稳定趋势;从振速时程曲线

来看,监测点峰值振速与峰值应力出现时间点相对应,且监测点的等效合位移时程曲线走势与等效应力大致相同。同时,虽然1#测点(单元26635)的爆破响应特征曲线与2#测点相类似,但由于距离其他炮孔较远,其等效应力、振速以及合位移的峰值均低于2#测点对应值。

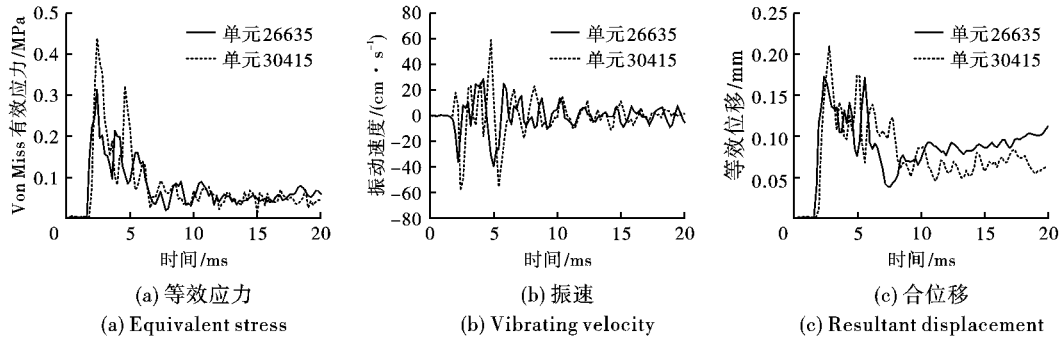


图8 0.5 m保护层孔底起爆方案监测点特征时程曲线

Fig. 8 Characteristic time-history curve of monitoring point of 0.5 m protection layer bottom-hole initiation scheme

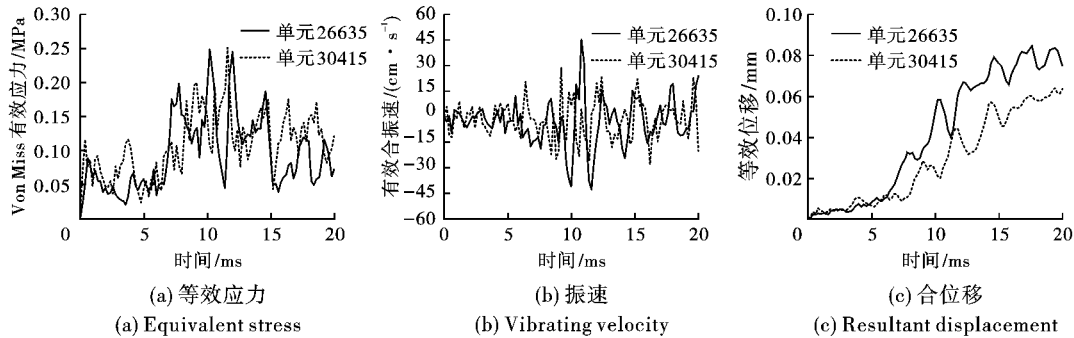


图9 0.5 m保护层孔口起爆方案监测点特征时程曲线

Fig. 9 Characteristic time-history curve of monitoring point of 0.5 m protection layer top-hole initiation scheme

监测点单元在不同起爆方案下随保护层厚度的爆破响应特征变化趋势见表3。当选用孔底起爆方式,保护层厚度增至1.0 m时,监测点单元峰值振速由72.68 cm/s降至28.68 cm/s,降低了约60.6%,但仍高于充填体允许最大振速;最大有效应力则从0.44 MPa降低至0.12 MPa;最大合位移则降低较小,仅降低0.02 mm。当保护层厚度为1.5 m时,监测点峰值应力低于充填体抗拉强度,且等效位移仅为0.10 mm,峰值振速也小于《爆破安全规程》(GB6722—2014)中的充填体最大允许振速12 cm/s,可以认定此时监测点单元处于安全稳定状态。此后,当保护层厚度继续增加时,充填体稳定性得到进一步加强,然而过厚的保护层厚度会使得矿体的回收率变差,对实际生产经济而言会产生负面影响,同时,相应峰值应力、振速以及合位移指标降幅较小,对充填体稳定性增益不大,因此,采用孔底

起爆方案时最佳的保护层厚度为1.5 m。对孔口起爆而言,当保护层厚度增至1 m时,监测点所受最大有效应力已降至0.03 MPa,同时,最大振速相对降幅更大,从44.97 cm/s降至9.35 cm/s,合位移也降至0.07 mm,各项指标均在充填体安全范围内,可以判定此时充填体已处于稳定状态。因此,对于孔口起爆方案只需设置保护层厚度为1.0 m即可保证第二步回采的安全进行。相对于孔底起爆方式的1.5 m保护层厚度而言,减小了1/3的保护层厚度,对第二步采矿石回收而言具有更大的增益。

4 现场工业试验

模拟结果显示,采用孔口起爆,保护层厚度设置为1.0 m的爆破回采方案不管是充填体的稳定性还是矿石的回收率都能够得到有效的改善。为验证模拟结果,选取李楼铁矿某第二步回采矿房进行现场工业试验。

表 3 不同模拟方案监测点爆破响应特征

Table 3 Blasting response characteristics of the monitoring point of the hole bottom initiation scheme

方案编号	起爆方式	保护层厚度/m	最大有效应力/MPa	最大振速/(cm·s ⁻¹)	最大合位移/mm
1	孔底起爆	0.5	0.44	72.68	0.21
2	孔底起爆	1.0	0.12	28.68	0.18
3	孔底起爆	1.5	0.04	10.47	0.11
4	孔底起爆	2.0	0.02	8.97	0.08
5	孔口起爆	0.5	0.26	44.97	0.13
6	孔口起爆	1.0	0.03	9.35	0.07
7	孔口起爆	1.5	0.02	7.19	0.07
8	孔口起爆	2.0	0.02	5.21	0.04

在现场爆破过程中,由于充填体内部应力与位移较难监测,因此在二步采场侧帮充填体的相邻位置安装微震测振仪,在爆破回采时记录相关振速数据后,再通过回归分析获得振速与距离的规律公式并推算出充填体质点振动速度,从而与数值模拟对应结果互相印证。振动速度采用 iSV-420 型一体化测振仪进行测量,集三轴向振动传感器和数字化测量、存储、无线传输于一体,如图 10 所示。为保护仪器,在距离起爆位置 27 m、30 m、32 m、34 m 处布置 4 个测点,分别为 1#~4#测点,具体布置位置见图 11,二步采矿房炮孔布置图如图 12 所示,保护层厚度设置为 1.0 m,采用单段孔口起爆方式,装药密度与模拟方案选用一致,单段药量为 400 kg。

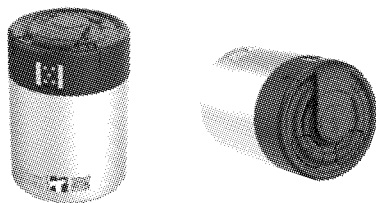


图 10 iSV-420 型一体化测振仪

Fig. 10 iSV-420 Integrated Vibration Tester

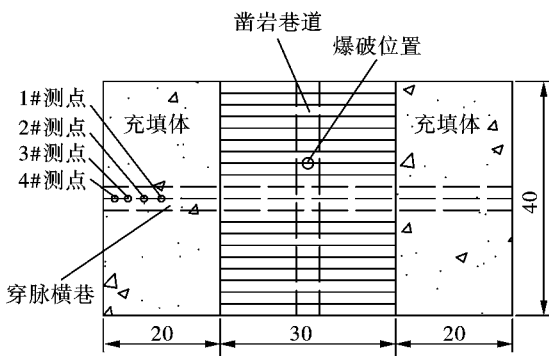


图 11 爆破位置及爆破振动仪安装位置俯视图(单位:m)

Fig. 11 Top view of blasting position and installation position of blasting vibrator(unit:m)

爆破完成后,将测振仪所采集到数据通过无线信号传输至计算机中并导入测振仪配套软件拓普测控 imServer,得到三向峰值振速。由于 X 向振动速度与采场走向垂直,与充填体相对采场方向一致,因此取其峰值振速进行萨道夫斯基公式进行回归^[15,16]。4 个测点的相关监测数据如表 4 所示。

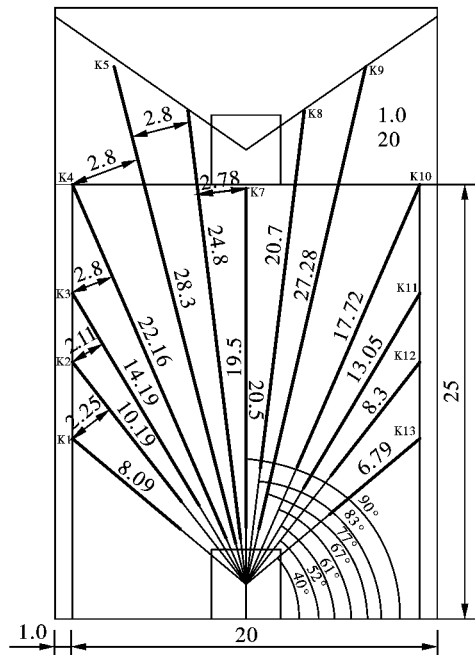


图 12 现场工业试验孔口起爆方案炮孔布置图(单位:m)

Fig. 12 Layout of blast hole in field industrial test top initiation scheme(unit:m)

萨道夫斯基公式见式(5)。

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (5)$$

式中:V 为监测点最大振速,cm/s;Q 为单段爆破药量,kg;R 为爆心距,即爆破点到监测点的直线距离,m;K 与 α 分别为与环境条件相关的衰减指数。在式(5)两边取对数得式(6)。

$$\lg V = \lg K + \alpha \lg \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) \quad (6)$$

以 $\lg V$ 为纵坐标, $\lg \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$ 为横坐标, 利用表 4 中数据进行线性拟合得到回归曲线, 并采用趋势线拟合程度指标 R^2 进行显著性检测。计算得 $K = 34.17$, $\alpha = 1.82$, 样本相关性指标 $R^2 = 0.972$, 证明拟合程度高, 拟合得 X 向振速的萨道夫斯基公式为

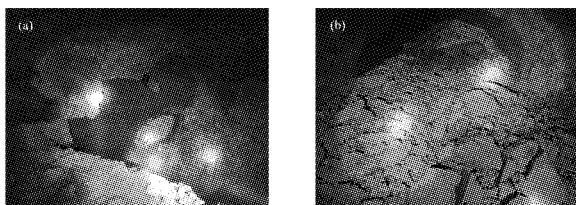
$$V = 34.17 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.82} \quad (7)$$

采场中充填体监测点与爆心的距离为 $L = 15 \text{ m}$, 代入萨道夫斯基公式 7 计算得峰值振速 $V = 9.37 \text{ cm/s}$, 与模拟所得结果基本一致。

表 4 不同测点 X 向爆破振动速度峰值与爆心距对应表格
Table 4 Correspondence table of X -direction blasting vibration velocity peak value and blasting center distance at different measuring points

测点编号	爆心距/m	单段药量/kg	X 向振速 $V/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1#	27	400	3.21
2#	30	400	2.65
3#	32	400	2.35
4#	34	400	2.11

图 13 为爆破后现场照片, 从照片上可以清晰地看到采场侧帮裸露出充填体, 且整体完好, 基本无损伤, 而崩落的矿石块度较为均匀, 大块较少, 爆破效果较好。因此, 从现场工业试验来看, 数值模拟结果与实际生产结果相对吻合, 利用 LS/DYNA 软件进行数值模拟对于研究充填体受爆破扰动稳定性具有可行性。



(a) 爆破后的充填体
(a) Filling body after blasting
(b) 爆破崩落的矿石
(b) Ore after blasting and collapsing

图 13 爆破后采场与崩落矿石现场照片

Fig. 13 Photographs of stope and caving ore site after blasting

5 结论

运用 LS-DYNA 软件对李楼铁矿二步回采过程中充填体爆破响应特征进行数值模拟并对结果进行

分析, 并通过现场工业试验对模拟结果进行验证, 得到以下结论:

(1) 二步回采过程中, 爆破对于充填体的影响主要集中于充填体的边界处, 若充填体失稳, 将首先从距离炮孔最近的部位产生破坏, 且其破坏形式为拉伸破坏。

(2) 模拟结果显示, 对于孔底起爆而言, 保护层厚度需设置 1.5 m 才能保证充填体的稳定性, 而对于孔口起爆而言保护层厚度缩减至 1.0 m , 从而增加矿石回收率, 同时保证充填体单元有效应力, 振速以及位移处于安全范围内, 为充填体稳定性提供保障。

(3) 针对孔口起爆与保护层厚度设置为 1.0 m 的起爆方案进行现场工业试验, 利用现场检测数据拟合得到垂直于矿房走向的萨道夫斯基公式为 $V = 34.17 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.82}$, 拟合得到充填体相应单元峰值振速与数值模拟结果振速分别为 9.37 cm/s 与 9.35 cm/s , 吻合较好, 说明数值模拟结果可靠, 对于充填体稳定性研究而言是较好的研究手段。

参考文献 (References)

- [1] 王新民, 秦健春, 张钦礼, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的姑山驻留矿采矿方法优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1131-1137.
- [1] WANG Xin-ming, QIN Jian-chun, ZHANG Qin-li, et al. Optimization of Gushan resident mine mining method based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2013, 44(3): 1131-1137. (in Chinese)
- [2] 汪洪涛, 隋少飞. 冬瓜山铜矿隔离矿柱开采方法及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2013(3): 39-41.
- [2] WANG Hong-tao, SUI Shao-fei. Mining method and stability analysis of isolated pillar in Dongguashan Copper Mine [J]. Metal Mine, 2013(3): 39-41. (in Chinese)
- [3] 方志甫, 唐绍辉. 安庆铜矿深部特大型采场充填体稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2007(3): 1-2, 27.
- [3] FANG Zhi-fu, TANG Shao-hui. Study on the stability of the filling body in the deep super large stope of Anqing Copper Mine [J]. Mining Research and Development, 2007(3): 1-2, 27. (in Chinese)
- [4] 刘优平, 龚敏, 赵江倩, 等. 近充填体崩矿过程爆破振动控制研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(5): 13-17.
- [4] LIU You-ping, GONG Min, ZHAO Jiang-qian, et al. Study on blasting vibration control in the process of collapse

- near filling body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(5):13-17. (in Chinese)
- [5] 文兴,赵亮,郭晓强. 爆破振动在充填体中的传播规律研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5):32-35.
- [5] WEN Xing, ZHAO Liang, GUO Xiao-qiang. Study on the propagation law of blasting vibration in backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(5):32-35. (in Chinese)
- [6] 张金,金爱兵,陈帅军. 嗣后充填采场爆破与充填体稳定协同效应研究[J]. 金属矿山, 2021(9):8-17.
- [6] ZHANG Jin, JIN Ai-bing, CHEN Shuai-jun. Study on the synergistic effect of subsequent filling stope blasting and filling stability[J]. Metal Mine, 2021(9):8-17. (in Chinese)
- [7] 朱鹏瑞,宋卫东,曹帅,等. 爆破动载下胶结充填体的张拉力学响应机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3):605-611.
- [7] ZHU Peng-rui, SONG Wei-dong, CAO Shuai, et al. Tension mechanics response mechanism of cemented backfill under blasting dynamic load[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(3):605-611. (in Chinese)
- [8] 姜立春,苏勇. 胶结充填体矿柱失稳的临界爆破振动理论模型及应用[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(11):2663-2670.
- [8] JIANG Li-chun, SU Yong. Theoretical model and application of critical blasting vibration velocity for cemented backfill pillar instability[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2019, 29(11):2663-2670. (in Chinese)
- [9] 张艳军,陈岩武,雷美荣,等. 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析[J]. 爆破, 2021, 38(3):45-49, 129.
- [9] ZHANG Yan-jun, CHEN Yan-wu, LEI Mei-rong, et al. Analysis of the blockage length of blast hole in borehole blasting[J]. Blasting, 2021, 38(3):45-49, 129. (in Chinese)
- [10] 王永顺,贾宪振,刘瑞鹏. 含铝炸药爆轰产物JWL状态方程参数的预估方法研究[J]. 爆破, 2019, 36(1):49-54.
- [10] WANG Yong-shun, JIA Xian-zhen, LIU Rui-peng. Study on the method of predicting the parameters of the JWL equation of state for the detonation products of aluminum-containing explosives[J]. Blasting, 2019, 36(1):49-54. (in Chinese)
- [11] 张馨,孙金山,张湘平,等. 钻孔爆破炮孔孔壁压力计算模型[J]. 爆破, 2021, 38(3):1-5.
- [11] ZHANG Xin, SUN Jin-shan, ZHANG Xiang-ping, et al. Calculating model of borehole wall pressure for borehole blasting[J]. Blasting, 2021, 38(3):1-5. (in Chinese)
- [12] 骆浩浩. 大红山铜矿爆破参数及装药结构研究[D]. 昆明, 昆明理工大学, 2019.
- [12] LUO Hao-hao. Research on blasting parameters and charge structure of Dahongshan Copper Mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 杨仁树,丁晨曦,王雁冰,等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2):3501-3506.
- [13] YANG Ren-shu, DING Chen-xi, WANG Yan-bing, et al. Study on the effect of explosive stress wave and explosive gas on detonated medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2):3501-3506. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [14] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 6722—2014 Blasting Safety Regulations[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [15] 安胜杰,易吉祥,池恩安,等. 爆破地震波传播规律试验研究[J]. 爆破, 2021, 38(2):32-36, 166.
- [15] AN Sheng-jie, YI Ji-xiang, CHI En-an, et al. Experimental study on the propagation law of blasting seismic waves[J]. Blasting, 2021, 38(2):32-36, 166. (in Chinese)
- [16] 闫常陆,王峰. 基于萨道夫斯基公式拟合的爆破振动规律研究[J]. 现代矿业, 2018, 34(6):109-111.
- [16] YAN Chang-lu, WANG Feng. Study on the law of blasting vibration based on Sadowski's formula fitting[J]. Modern Mining, 2018, 34(6):109-111. (in Chinese)