

充填体下切割天井一次爆破成井技术研究与应用

郭鸿德^{1,2}, 杨晓飞³, 刘国栋³, 张晓蕾⁴, 万串串^{1,2,5}, 刘立顺^{1,2}

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628;

3. 山东黄金矿业(莱州)三山岛金矿, 山东 莱州 261442;

4. 莱州市环境卫生管理中心, 山东 莱州 261400;

5. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:爆破成井是中深孔或深孔采矿方法中关键的一个工艺, 主要包括分次或一次爆破成井方式。在中深孔采矿工艺中, 切割天井是重要的采切工程, 通常采用普通法、吊罐法或爬罐法进行施工, 存在较大的安全隐患, 并且掘进效率较低, 严重影响矿山生产。近年来, 三山岛金矿下向中深孔分段采矿面临充填体下中深孔采场切割天井的施工难题, 研究了直孔掏槽法切割天井的一次爆破成井技术及应用效果。通过爆破参数计算, 选用装药孔直径 $\Phi 65$ mm、补偿空孔直径 $\Phi 110$ mm 的钻孔孔径, 综合考虑确定了装药孔与空孔之间的距离为 0.3 m, 能够满足爆破补偿空间及自由面的要求。结合矿岩稳固条件, 选用 9 孔掏槽方式, 进而制定了炮孔布置方案, 即掏槽孔设计 1 个中心装药孔, 12 个空孔作为补偿孔, 辅助孔 4 个, 周边孔 12 个, 共计 29 个孔。在确定炮孔堵塞长度、炸药选择、装药结构、微差时间、起爆顺序等工艺参数之后, 开展了切割天井的现场工业试验。试验表明: 切割天井一次爆破成井方案是可行的, 爆破块度均匀, 无大块和过粉现象, 爆破扰动小, 爆破成形规格满足设计要求, 爆破效果良好, 为其它类似条件的切割天井一次爆破技术应用提供了参考依据。

关键词: 切割天井; 一次成井; 充填体顶板; 九孔掏槽; 爆破效果

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2024)02-0006-08

Research and application of slot raise under the fill with one-time grooved blasting technology

GUO Hongde^{1,2}, YANG Xiaofei³, LIU Guodong³, ZHANG Xiaolei⁴, WAN Chuanchuan^{1,2,5}, LIU Lishun^{1,2}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. National Centre for International Joint Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China;

3. Sanshandao Gold Mine, Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou Shandong 261442, China;

4. Center of Environment and Health Management of Laizhou, Laizhou Shandong 261400, China;

5. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Cut patio construction was a critical process in the medium-deep hole or deep hole mining methods, which mainly included staged blasting or one-time grooved blasting. Cut patio was essential in the medium-deep hole mining technology. The common method, the conventional raising, cage raising and climber raising method was usually used to construct the cutting patio, which has great safety risks and low excavation efficiency, which seriously affects the mine production. In recent years, Sanshandao Gold Mine has researched downward sublevel filling mining with medium and deep hole blasting. This research was currently facing the problem of cut patio construction under the backfill roof. This study demonstrated a one-time grooved blasting method fitting the backfill roof condition and its application. By comparing the characteristics of the straight-hole cutting method and the blasting crater method,

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2902102)

作者简介: 郭鸿德(1979—), 男, 工程师, 采矿工程专业, 主要从事采矿工艺与岩石力学相关研究工作。E-mail: 231767775@qq.com。

the straight-hole cutting method was selected for the cut patio construction. By calculating blasting parameters, the diameter of the charging hole was $\Phi 65$ mm, and the diameter of the compensation hole was $\Phi 110$ mm. The distance between the charging and empty holes was 0.3 m, which could meet the requirements of blasting compensation space and free surface. In consideration of the surrounding rock stability conditions, a nine-hole cutout method was selected, containing 29 holes, where the cutout hole was designed with 1 central charging hole, 12 empty holes as compensation holes, 4 auxiliary holes, and 12 peripheral holes, after determining the blast hole plugging length, explosive selection, charge structure, differential time, detonation sequence and other process parameters, an in-situ industrial test of cut patio construction was carried out. The industrial test showed that the one-time grooved blasting plan for patio construction was feasible. The blasting rock particle size is uniform with no large blocks and excessive powder, the blasting disturbance is minor, and the blasting patio dimensions meet the design requirements. Overall, this test provided experiences and a reference basis for other one-time grooved blasting technical applications with similar conditions.

Key words: slot raise; one-time grooved blasting; backfill roof; grooved blasting with nine holes; blasting effect

据不完全统计,目前国内外采用一次爆破成井法最大成井高度:国内 16 m,国外 28 m。我国传统天井施工工艺大多采用普通法,存在劳动强度大、施工效率低、施工成本高、安全风险高等缺点,在安全事故中占比较高^[1-3]。随着矿山开采深度的增加,天井普通法施工安全风险和施工难度随之增加,不断制约矿山安全高效采矿,成为矿山亟需解决的技术难题。三山岛金矿作为国内机械化程度最高的黄金矿山之一,近年来与科研院所合作开展了下向中深孔分段采矿试验工作,其中充填体下采场切割天井的施工问题成为制约中深孔高效采矿的技术难题,为解决此难题,经研究论证,试验成功了切割天井一次爆破成井技术,为中深孔采场切割天井施工提供了理论依据与实践经验。

1 概述

山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿位于莱州市三山岛街道,本试验地点在三山岛金矿西山矿区-945 m 分段 2# 中深孔试验采场,该采场为二步骤回采采场,两侧分别为 1# 和 3# 中深孔采场,前端为 4# 中深孔采场,目前均已回采充填完毕;其顶部有多条进路采场胶结充填构筑成的假顶结构,如图 1 所示。该采场设计宽度 9 m,长度 50 m,高度 15 m,下部-945 水平布置出矿巷道,规格 3.6 m×3.3 m(宽×高,下同),切割横巷规格 4.2 m×4.1 m,切割天井规格 3.0 m×3.0 m,高度 7 m;上部-930 水平布置凿岩巷道,规格 4.2 m×4.1 m。矿体主要赋存于 F₁ 下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩中,水文地质条件较好,岩体质量分级为Ⅲ级。岩石硬度系数 $f=8\sim 10$,岩石密度 2 757 kg/m³,矿岩松散系数 1.5。

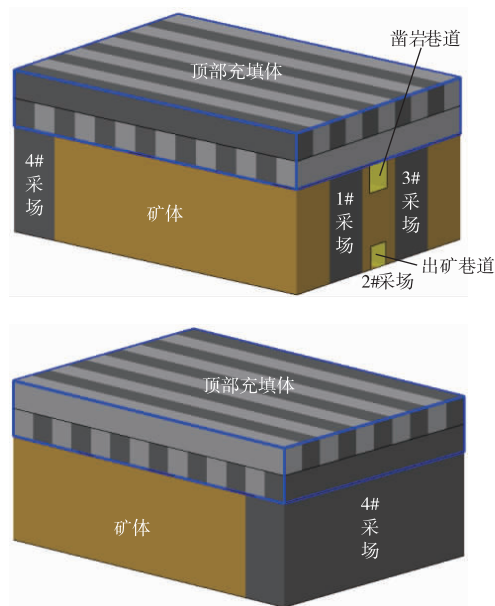


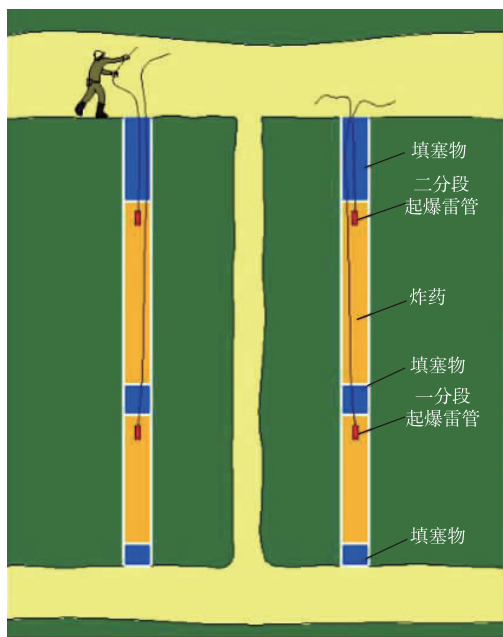
图 1 2# 中深孔试验采场情况

Fig. 1 2# medium-deep hole test stope conditions

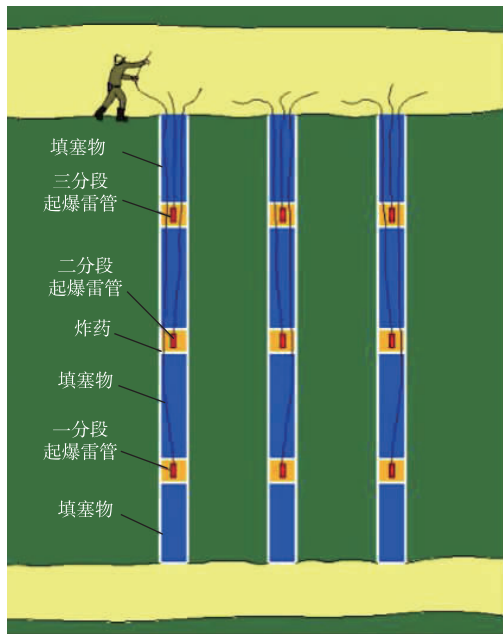
2 一次爆破成井方案选择

一次爆破成井是指在岩体内按照设计断面和高度用钻机钻凿一系列平行钻孔,通过一次爆破形成符合设计要求的成井工艺。通常而言,一次爆破成井方式分为两类:直孔掏槽法和爆破漏斗法。如图 2 所示。直孔掏槽法是利用大孔径空孔为初始自由面和补偿空间,掏槽孔借助空孔通过爆破形成掏槽,然后通过辅助孔和周边孔逐次爆破成井;爆破漏斗法在凿岩形成的平行全高炮孔内按集中药包的形式分段装药,以下端面为自由面,从下至上各分段药包按顺序逐段爆破形成一系列倒置的爆破漏斗直至扩展成设计要求的天井。两种方法的机理不同、工艺要求也不尽相同。一般来说直孔掏槽法对炮孔参

数设计及钻孔精度要求较高,所需炮孔也较多,但其装药结构、起爆顺序比较简单,可操作性强,易于掌握,在分段高度不甚大时较易实现一次成井;爆破漏斗法虽对炮孔精度的要求较低,但对装药结构、起爆顺序要求较高,操作工序比较繁杂,实施困难较大,不便推广普及。



(a) 直孔掏槽法



(b) 爆破漏斗法

图 2 两种成井方式特征

Fig. 2 The characteristic of two raising methods

根据数据统计^[4],普通法、钻井法、爆破漏斗法和直孔掏槽法施工效率和成本综合比较情况如图 3 所示。通过综合效率和成本比较,直孔掏槽法的优

势较为明显。综上所述,本次设计选择直孔掏槽法进行爆破成井。基于设计的切割横巷宽度和高度,并根据切割天井断面越大、一次爆破成井的夹制性越小的原理,选取切割天井断面规格为 3.0 m×3.0 m,采用全高一次爆破成井装药结构。

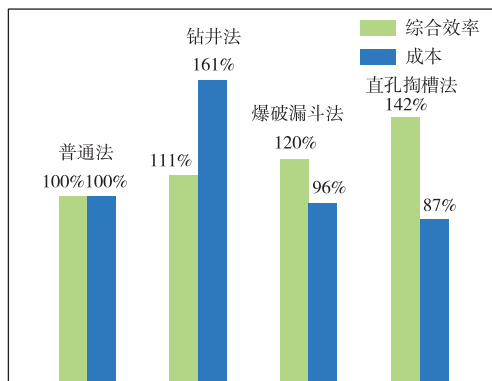


图 3 不同方法综合效率及成本比较柱状图

Fig. 3 Comparison column of combined efficiency and cost of different raising methods

3 爆破参数计算

3.1 钻孔孔径确定

考虑到设计的切割横巷、切割天井断面及高度、矿山现有凿岩设备种类和可凿孔径大小、凿岩效率和凿岩成孔精度要求等,确定选用装药孔直径 $\Phi 65$ mm(Sandvik DS421 台车施工),以此计算掏槽补偿空孔直径。

根据装药孔直径 D 与空孔直径 d 关系^[5]:

$$D/d \geq (1 + \sin \alpha) / (1 - \sin \alpha) = 1.5 \sim 1.7$$

式中: d 为装药孔直径,mm; D 为补偿孔直径,mm。

当 $d = 65$ mm 时, $D \geq 97.5 \sim 110.5$ mm,因此掏槽补偿空孔直径选用 $\Phi 110$ mm,采用 Sandvik DL411 凿岩台车进行施工。

3.2 粉碎圈和裂隙圈半径计算

由于岩石破坏准则判定的多样性,其计算的粉碎圈半径和裂隙圈半径不同^[5]。本文采用 Mises 准则判断岩石破坏,以此计算粉碎圈与裂隙圈半径。

1) 耦合装药条件

粉碎圈半径 r_c :

$$r_c = \left(\frac{\rho_0 \cdot v^2 \cdot A \cdot B}{4\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{a}} r_b, A = \frac{2\rho_p}{\rho_c \rho_p + \rho_0 v},$$

$$B = [(1 + \lambda)^2 - 2\mu_d (1 - \lambda)^2 (1 - \mu_d) + (1 + \lambda^2)] \quad (1)$$

式中: A 、 B 为中间变量,不代表其他含义, ρ_0 为

炸药密度, g/cm^3 ; ρ 为矿岩密度, g/cm^3 ; v 为炸药爆速, m/s ; α 为动荷载传播衰减指数, 前苏联学者给出应力波衰减指数与岩石泊松比之间的经验关系,

$\alpha = 2 \pm \frac{\mu}{1-\mu}$, 冲击波作用取“+”, 应力波作用取“-”; c_p 为纵波在岩石中的传播速度, m/s ; σ_{cd} 为矿岩动载荷抗压强度, MPa ; r_b 为炮孔直径, mm ; λ 为侧压系数, $\lambda = \frac{\mu_d}{1-\mu_d}$; μ_d 为岩石动态泊松比。

裂隙圈半径 r_t :

$$r_t = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\rho_0 \cdot v^2 \cdot A \cdot B}{4\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (2)$$

式中: σ_{td} 为矿岩动载荷抗拉强度, MPa 。其它符号含义同上。

2) 不耦合装药条件

粉碎圈半径 r_c :

$$r_c = \left(\frac{\rho_0 \cdot v^2 \cdot n \cdot B \cdot l_e}{8\sqrt{2}\sigma_{cd}} \cdot \left(\frac{A_c}{A_b} \right)^6 \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (3)$$

式中: n 为爆轰产物与炮孔壁碰撞时反射压力为入射压力倍数, 一般 4~20, 接近耦合装药时取大

值; A_c 为药卷面积, mm^2 ; A_b 为炮孔面积, mm^2 。其它符号含义同上。

裂隙圈半径 r_t :

$$r_t = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\rho_0 \cdot v^2 \cdot n \cdot B \cdot l_e}{8\sqrt{2}\sigma_{cd}} \cdot \left(\frac{A_c}{A_b} \right)^6 \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (4)$$

式中: β 为应力波传播衰减指数, $\beta = 2 - \frac{\mu_d}{1-\mu_d}$ 。

其它符号含义同上。

选取 2 号岩石乳化炸药, 炸药密度 ρ_0 为 $1\,200\text{ kg}/\text{m}^3$, 爆速 D 为 $4\,000\text{ m}/\text{s}$, 岩石密度 ρ 为 $2\,757\text{ kg}/\text{m}^3$, 岩石纵波速度 c_p 为 $4\,568.5\text{ m}/\text{s}$, 岩石动态泊松比 μ_d 为 0.24, 岩石抗压强度为 103 MPa , 岩石抗拉强度为 8.54 MPa , 粉碎区抗压动加载应变率为 $1\,000\text{ s}^{-1}$, 裂隙区抗压动加载应变率为 100 s^{-1} , 抗拉动加载应变率为 4 s^{-1} , 炮孔直径 r_b 为 65 mm , 爆轰产物与炮孔壁碰撞时反射压力为入射压力倍数 n 取值 10。以此计算耦合与不耦合装药条件下粉碎圈及裂隙圈的半径, 如表 1 所示。

表 1 耦合装药与不耦合装药粉碎圈及裂隙圈半径范围值

Table 1 Crushing and fracture circle radius of coupled and uncoupled charging

项目	耦合装药		不耦合装药		
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
r_c/m	0.19	0.17	0.14	0.11	0.09
$r_c : r_b$	3.00	2.62	2.09	1.70	1.40
r_t/m	1.47	1.29	1.03	0.83	0.69
$r_t : r_b$	22.64	19.80	15.80	12.84	10.60

$r_c : r_b$ 和 $r_t : r_b$ 为粉碎圈和裂隙圈与炮孔半径的比值, 经计算, 岩石粉碎圈半径约为炮孔半径的 1.4~3 倍, 裂隙圈半径约为炮孔半径的 10.6~22.64 倍。哈努卡耶夫的研究认为^[6], 埋入岩石中的炸药爆炸后, 形成的粉碎圈半径为装药半径的 2~3 倍, 裂隙圈半径为装药半径的 10~15 倍, 计算结果与上述研究较为吻合。

掏槽孔与空孔之间的距离主要由补偿空间、炸药破碎范围和钻孔偏斜等确定, 掏槽爆破主要通过装药孔的爆破贯穿提供补偿空间及初始自由面的空孔来形成槽腔, 装药孔与空孔要满足能够为两孔之间的被爆岩石提供足够的补偿空间与自由面的要求。

a) 补偿空间理论

补偿空间应满足矿岩碎胀后所需要体积, 不然就会发生“挤死”, 导致爆破失败。

由图 4 可知:

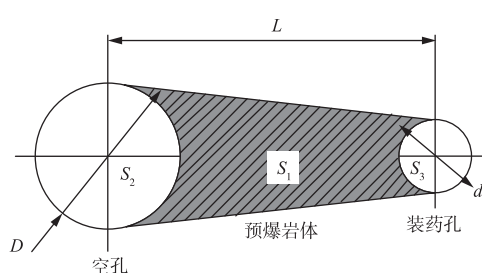


图 4 装药孔与空孔补偿原理图

Fig. 4 Compensation diagram of the charging hole and empty hole

$$S_1 \cdot K \leq S_1 + S_2 + S_3 \quad (5)$$

式中: S_1 为预爆岩体的横截面积, m^2 ; S_2 为空孔横截面积, m^2 ; S_3 为装药孔横截面积, m^2 ; K 为岩石碎胀系数, 一般为 1.5~1.6, 根据地质资料取 1.5。

根据孔间距离、孔面积及两孔之间覆盖的面积, 结合上式, 能够推导出装药孔与空孔需要满足的距

离关系式如下:

$$(L_1 \frac{D+d}{2} - \frac{\pi D^2}{8} - \frac{\pi d^2}{8})K \leq \frac{D+d}{2}L_1 + \frac{\pi D^2}{8} + \frac{\pi d^2}{8}$$

$$L_1 \leq \frac{\pi}{4} \frac{(D^2 + d^2)(K+1)}{(D+d)(K-1)} \quad (6)$$

计算得到: $L_1 = 0.366 \text{ m}$ 。

b) 破碎范围理论

炸药爆破时产生的爆炸能量应满足孔间岩体爆破所需要的能量要求,否则炸药量过少将不能充分爆破岩体,炸药量过多将产生冲孔现象。需满足以下条件:

$$L_2 \geq \frac{D}{2} + (2 \sim 3) \frac{d}{2}, L_2 \leq \frac{D}{2} + (10 \sim 15) \frac{d}{2} \quad (7)$$

计算得到: $0.15 \text{ m} \leq L_2 \leq 0.54 \text{ m}$ 。

c) 钻孔偏斜经验

凿岩设备在凿岩过程中不可避免存在孔偏斜,炮孔偏斜率一般取1%,设计孔间距应满足避免因钻孔偏斜导致相邻钻孔穿孔的要求。需满足以下条件:

$$L_3 \geq \frac{D+d}{2} + 2H \sin \beta \quad (8)$$

计算得到: $L_3 \geq 0.23 \text{ m}$ 。

根据以上三个条件,综合考虑装药孔与空孔之间的距离 $L = 0.3 \text{ m}$ 。

3.3 掏槽方式选择

常见掏槽方式有以下几种^[6](图5):

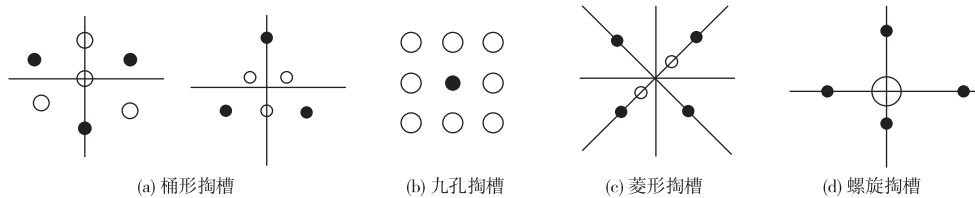


图5 常见的掏槽方式

Fig. 5 Several cutting modes

各掏槽方式优缺点比较见表2^[6]。

表2 不同掏槽方式的对比

Table 2 Characteristic comparison of different cutting modes

掏槽方式	特点	使用效果	优缺点
桶形掏槽	各个掏槽孔相互平行且对称布置	掏槽孔爆破后与空孔相通,比较容易成功	优点:易贯通 缺点:炮孔数目多,间隔近
九孔掏槽	孔布置为矩形或正方形,比较对称	爆破后的形状相当规整呈方形	优点:爆破后断面规整 缺点:炮孔数目较多
菱形掏槽	炮孔以中心空孔为轴对称布置	形状规整,空间相对较小	优点:雷管段位少 缺点:掏槽空间小
螺旋掏槽	掏槽眼呈螺旋状,各装药眼至空眼的距离依次递增	爆堆均匀,基本无大块,超挖、欠挖不明显	优点:孔数相同条件下,掏槽形成的面积较大 缺点:首响孔爆破对结爆破效果影响大

根据常用掏槽孔优缺点比较分析,结合矿岩稳固条件,本次选用九孔掏槽布置方式。

3.4 补偿空间计算

采用全段高一次爆破成井可显著缩短辅助作业时间,提高作业效率和作业安全系数,实施一次爆破成井技术的必要条件需满足:碎胀的岩石体积(V_z)必须小于天井下部巷道可作为补偿空间的体积(V_b)。

$$V_b = S'L \quad V_z = SH(K-1) \quad (9)$$

$$\text{由此得出: } H < \frac{S'L}{S(K-1)}$$

代入数据得到: $H < 22.6 \text{ m}$ 。

切割天井断面规格取 $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,碎胀系数 K 取 1.5。下部巷道规格(长×宽×高)取 $8 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$ 。经计算,切割天井高度应小于 30.6 m 。切割井爆破后体积为 94.5 m^3 ,下部切割横巷体积为 137.76 m^3 ,则对于 7 m 的切割天井,采用一次爆破成井,下部巷道的补偿空间较为充足。

3.5 炮孔数量确定

一般而言,天井掘进面上的炮孔总数与掘进面大小有关,同时也与岩石的种类、性质、炸药单耗、炮孔直径等有直接联系。一般来讲,天井断面越大或者岩石普氏系数越高,则所需要的炸药量越多,所需

的炮孔数就越多。

$$N = 3.3 \sqrt[3]{fS^2} \quad (10)$$

式中: N 为炮孔数量; f 为岩石坚固性系数, 取 8; S 为切割天井断面面积, 为 9 m^2 。

计算得到: $N=29$ 。根据设计装药结构、装药孔数量、切割天井断面和岩体比重, 计算炸药单耗为: $80.01 \text{ kg}/175.77 \text{ t}=0.46 \text{ kg}/\text{t}$, 与同类型切割天井爆破比较, 炸药单耗处于合理范围之内。

4 炮孔布置方案

辅助孔: 在确保补偿空间和自由面宽度的前提下, 尽量增大槽腔面积, 同时考虑孔偏影响, 避免穿孔。同时应布置在掏槽孔空孔连线的延长线上, 以避免掏槽孔爆破时对其造成冲击。参考其它矿山经验, 共设计 4 个辅助孔, 辅助孔至临近掏槽孔的中心距取 712 mm , 距离空孔 500 mm 。

周边孔: 根据公式 $l = (12 \sim 16)d$ 计算, 炮孔间距为 $780 \sim 1040 \text{ mm}$, 同时满足切割天井规格和补偿系数的要求, 周边眼间距取 1.0 m , 共设计 12 个周边孔。

由于该采场为二步骤回采采场, 其顶部、端部及两侧采场都已回采结束并进行了充填, 构成了四面充填体包裹环境, 为降低该采场爆破对四周充填体的扰动影响, 根据上述确定的爆破参数, 此采场切割天井的炮孔布置方案如图 6 所示, 即掏槽孔设计 1 个中心装药孔, 12 个空孔作为补偿孔, 辅助孔 4 个, 周边孔 12 个, 共计 29 个孔。

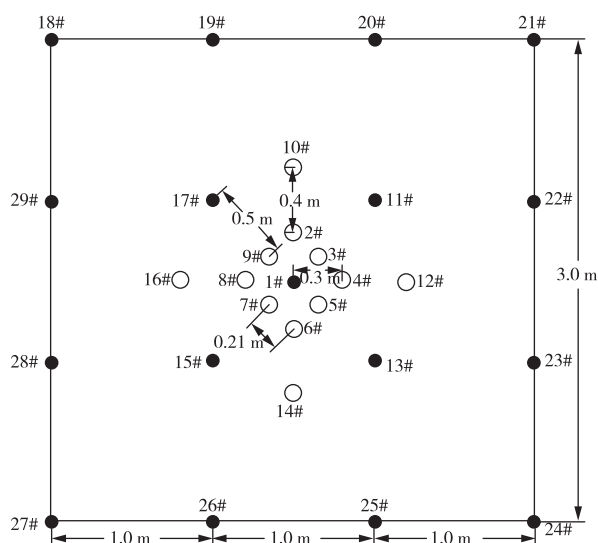


图 6 切割天井炮孔布置方案

Fig. 6 Borehole layout plan of cut raise

4.1 炮孔堵塞长度确定

a) 上部堵塞: 该采场切割天井爆破时, 上部有凿岩巷道和顶部充填体, 下部有切割横巷和出矿巷道, 满足切割天井爆破补偿空间的需要。为减少一次成井爆破对四周充填体的扰动及上部凿岩巷道的破坏, 设计加强上部炮孔的堵塞, 满足形成松动爆破漏斗时炮孔堵塞长度, 实现松动破碎岩石在自重作用下向下掉落。

b) 下部堵塞: 切割天井下部空间充分, 按照抛掷爆破漏斗时炮孔堵塞长度设计, 抛掷爆破漏斗半径不能破坏后续爆破的炮孔, 同时掏槽孔应能较好地击穿与空孔之间的原岩。堵塞长度满足如下条件:

$$L_s = (0.5 \sim 0.7)W, W = (25 \sim 30)d \quad (11)$$

式中: L_s 为炮孔堵塞长度, W 为最小抵抗线。

经计算, 最小抵抗线 W 为 $1.6 \sim 2.0 \text{ m}$, 堵塞长度 L_s 为 $0.8 \sim 1.4 \text{ m}$ 。

4.2 炸药选择

本次切割天井炮孔采用上向装药, 根据矿山目前成熟的装药工艺, 采用成品乳化药卷, 单个药卷长 300 mm , 直径为 $\Phi 32 \text{ mm}$, $0.3 \text{ kg}/\text{卷}$, 由 3 节乳化炸药用胶布捆扎成一捆, 用装药管将其推入孔中进行人工装药。如图 7 所示, 在捆扎时, 用力将 3 节药卷捆紧, 使得药卷捆扎后直径小于炮孔直径, 满足装药条件。

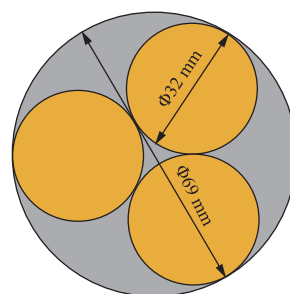


图 7 乳化药卷装药方案

Fig. 7 Ammunition plan of emulsified explosive

4.3 装药结构

根据炮孔堵塞长度计算结果, 掏槽孔上部堵塞 0.8 m , 下部堵塞 0.5 m , 其余炮孔上部堵塞 1.0 m , 下部堵塞 0.8 m 。各个孔采用连续装药结构, 孔上部堵塞完成后, 用数码电子雷管固定在全长导爆索的端部, 与 1 捆药进行绑扎装至孔底, 炮孔其余部分用捆装药装至下部填塞位置后完成堵塞即可。装药结构如图 8 所示。

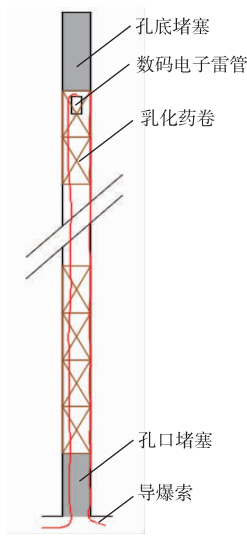


图8 装药结构示意图

Fig. 8 Charging structure diagram

4.4 毫秒延时时间计算

一次成井毫秒延时微差爆破作用机理复杂,存在许多计算微差时间的公式,而且不同公式之间并非完全一致,计算结果往往也有一定的差距。一般而言,有空孔掏槽爆破槽腔形成过程大致可以分为三个阶段,一为岩石破碎阶段,二为岩石渣抛掷充满槽腔阶段,三为岩石碎渣轴向排渣形成有效槽腔阶段。通过理论公式计算结果表明:小抵抗线,高炸药单耗下产生裂隙和岩石碎渣抛向空壁的时间很小,因此槽腔所需时间主要取决于槽腔内岩石碎渣轴向排渣时间。

根据大多数矿山爆破成井的经验^[7-9],一般辅助孔与掏槽孔微差时间 100 ms 左右,周边孔与辅助孔微差时间大于 150 ms。

4.5 起爆顺序

根据现场凿岩情况,增加装药孔 4 个,将掏槽的对角的 4 个空孔进行装药,因此爆破顺序总体为掏槽孔→辅助孔→周边孔。起爆顺序及微差时间见表 3,起爆顺序如图 9 所示,其中 T_n 代表第 n 次起爆顺序,

表3 不同炮孔类型的微差时间

炮孔编号	炮孔类型	起爆顺序	微差时间/ms
1 #	掏槽孔	1	10
2 #、6 #	掏槽孔	2	200
4 #、8 #	掏槽孔	3	400
11 #、15 #	辅助孔	4	500
13 #、17 #	辅助孔	5	600
19 #、20 #、22 #、23 #、25 #、26 #、28 #、29 #	周边孔	6	700
18 #、21 #、24 #、27 #	周边孔	7	750

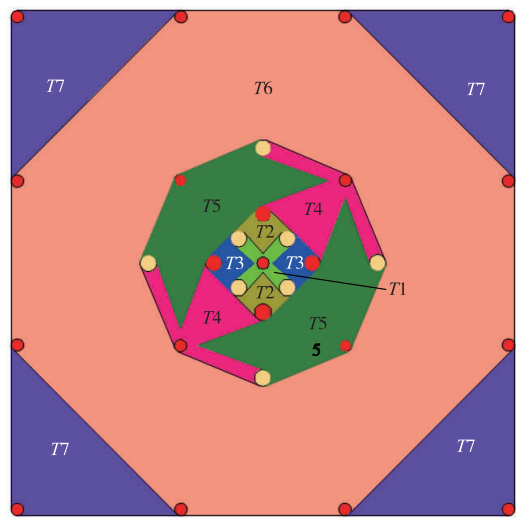


图9 起爆顺序图

Fig. 9 Detonation sequence diagram

$n=1,2,\dots,7$ 。

5 爆破效果

5.1 凿岩验孔

成孔质量决定了一次爆破成井的成败,一次成井炮孔布置的特点是炮孔集中,尤其掏槽孔间距较小。为保证炮孔施工质量,施工中主要把控以下几个环节:1)选择良好的凿岩设备。通过调研矿区凿岩设备,选择施工精度较高的台车设备。2)做好凿岩硐室和凿岩巷道的施工质量,保证凿岩硐室顶底板平整,检查不符合条件的及时处理;3)做好测量放点工作,技术人员要严格按照设计,将每一个孔标定在凿岩硐室的顶板上,并对作业人员进行技术交底;4)做好现场施工过程管理,施工前做好设备检查和维护工作,减少设备故障率;设备放置好后检查钻机的水平和垂直度是否满足要求,做到开孔准确;施工完成后组织相关人员对炮孔质量进行验收,对不满足要求的炮孔及时处理,保障后续装药顺利进行。

5.2 装药起爆

根据一次爆破成井的布孔设计和装药结构设计,本次爆破采用数码电子雷管和导爆索起爆网路,起爆方式采用孔底起爆。在完成孔底堵塞之后,导爆索绑扎捆药按照炮孔全长装入至孔底堵塞处,孔口预留约 50 cm 长的导爆索,捆药连续装药装至距离孔底 1 m 时,再装入预先绑扎好的数码电子雷管作为起爆弹,继续连续装药至孔口堵塞位置,用炮泥按照要求进行填塞。所有炮孔装药结束之后,进行堵塞检查和连线,雷管脚线和起爆母线要悬挂于巷道

边帮,防止掉石冲击。最后将起爆母线引至约 200 m 处的起爆区域,在完成爆破警戒之后进行起爆。

5.3 爆破效果

爆破完成之后,经现场确认,爆破块度均匀,无大块和过粉现象,上部充填体和下部巷道无明显片

帮情况发生,说明爆破扰动小。出矿完成后用三维激光扫描仪对其成形空间进行扫描,通过 3DMine 软件三维模型与设计参数进行对比,设计规格 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$,爆破成井井颈断面平均达到 $3.0\text{ m} \times 2.9\text{ m}$,爆破效果良好。如图 10 所示。



图 10 爆破成井效果及三维扫描情况

Fig. 10 Cut raise effect and three-dimensional scanning result

6 结论

1)通过直孔掏槽法与爆破漏斗法的特征对比,选用直孔掏槽法进行爆破成井。通过爆破参数计算,选用装药孔直径 $\Phi 65\text{ mm}$ 、补偿空孔直径 $\Phi 110\text{ mm}$ 的钻孔,综合考虑确定了装药孔与空孔之间的距离为 0.3 m ,能够满足爆破需要。

2)通过对比不同掏槽方式的优缺点,选用九孔掏槽布置方式,在此基础上,制定了切割天井一次爆破成井的炮孔布置方案,即掏槽孔设计 1 个中心装药孔,12 个空孔作为补偿孔,辅助孔 4 个,周边孔 12 个,共计 29 个孔。

3)开展了切割天井一次爆破成井的现场工业试验,并通过三维激光扫描仪对其成形空间进行扫描,通过数据对比可知,设计规格 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$,爆破断面达到 $3.0\text{ m} \times 2.9\text{ m}$,爆破效果良好,并且爆破块度均匀,无大块和过粉现象,爆破对四周充填体的扰动破坏小,因此,上述制定的切割天井一次爆破成井方案是可行的,可为其它类似条件的切割天井一次爆破技术应用提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 解世俊. 金属矿床地下开采[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
XIE Shijun. Underground mining of metal mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006.

[2] 李启月. 深孔爆破破岩能量分析及其应用[D]. 长沙:中南大学,2008.
LI Qiyue. Energy analysis of rock fragment by deep hole exploding and its application [D]. Changsha: Central South University,2008.

[3] 李启月,李夕兵,范作鹏,等. 深孔爆破一次成井技术与应用案例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(4):664-670.
LI Qiyue, LI Xibing, FAN Zuopeng, et al. One time deep hole raise blasting technology and case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 664-670.

[4] STERK P V. Development of drop raise blasting at Home stake mine[C]//Proceeding of the 17th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. 1991:239-250.

[5] 徐敏. 中深孔爆破一次成井技术研究及应用[D]. 长沙:中南大学,2012.
XU Min. Research and application of blasting to form a shaft by one step with medium-length hole[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[6] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
WANG Xuguang. Handbook of blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[7] 王辉,徐泽林,李永明. 超深孔一次爆破扩井在深井施工中的应用探索[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(4):120-122.
WANG Hui, XU Zelin, LI Yongming. Exploration on the application of once ultra-deep hole blasting technology for extension well in deep well construction[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(4): 120-122.

[8] 黄华桃,何翔,刘龙琼,等. 一次爆破成井技术在自然崩落法聚矿槽施工中的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2023,75(1):39-44.
HUANG Huatao, HE Xiang, LIU Longqiong, et al. Application of one-shot blasting technique in ore-gathering trough excavation of block caving mining method [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(1): 39-44.

[9] 姚高辉,李宜鑫. 中深孔一次爆破成井的掏槽爆破方式优化研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(9):21-25.
YAO Gaohui, LI Yixin. Study on optimization of undercut blasting method of disposable blasting well in middle-deep holes[J]. Mining Research & Development, 2023, 43(9): 21-25.