

急倾斜薄矿体中深孔预裂爆破开采技术研究

党建东¹, 阚忠辉¹, 董凯程^{2,3}, 陈刚¹

(1. 安徽铜冠(庐江)矿业有限公司, 安徽 庐江 231500;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628)

摘要:某铜矿薄矿体主要采用浅孔留矿嗣后充填法开采, 开采效率低下, 贫化及损失指标难以控制。针对薄矿体开采存在的技术难题, 运用中深孔对矿岩界限进行预裂爆破形成预裂缝, 对矿体和围岩进行预分离。利用矿体内布置的中深孔爆破, 改变矿体内岩石的稳固性, 从而实现采场矿体的自然崩落落矿并与围岩进行有效的分离。研究表明: 薄矿体中深孔预裂爆破开采技术通过矿岩界限预裂爆破分离矿体及围岩, 矿体内炮孔爆破贯通对矿体稳固性改性后实现自然崩落落矿, 能够控制采场回采边界, 为采场的大规模开采创造有利的外部条件; 开采技术适用于急倾斜薄矿体的地下高效开采, 可大幅提高开采效率, 有效控制矿体开采经济指标。

关键词: 急倾斜薄矿体; 中深孔; 预裂爆破; 地下高效开采; 自然崩落

中图分类号: TD235.371

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2022)01-0001-05

Study on long hole pre-splitting blasting mining technology in steeply inclined thin ore body

DANG Jiandong¹, KAN Zhonghui¹, DONG Kaicheng^{2,3}, CHEN Gang¹

(1. Anhui Tongguan(Lujiang) Mining Co., Ltd., Lujiang Anhui 231500, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China)

Abstract: The thin ore body of a copper mine is mainly mined by Shallow-hole shrinkage mining method with subsequent filling. The mining efficiency is low, and the dilution and loss indexes are difficult to control. Aiming at the technical problems existing in thin orebody mining, the long hole was used to pre-split the ore-rock boundary to form pre-crack, and the ore-body and surrounding rock were separated. The long hole blasting arranged in the ore body can change the stability of the rock in the stope, hence, the ore body natural caving in the stope can be realized and the orebody and rock can be effectively separated. The results showed that the long hole pre-splitting blasting mining technology using in thin ore body can separate ore body and rock by the ore-rock boundary pre-splitting blasting, and realize the orebody natural caving after the stability changed by the perforation blasting, which can control the stope mining boundary and create favorable external conditions for the large-scale mining of the stope. The mining technology is suitable for the efficient underground mining of steeply inclined thin orebody, which can greatly improve the mining efficiency and effectively control the economic index of orebody mining.

Key words: steeply dipping thin ore body; long hole; pre-splitting blasting; efficient underground mining; the natural caving

投稿日期: 2021-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0123000)

作者简介: 党建东(1987—), 男, 工程师, 采矿工程专业, 主要从事采矿技术及采矿生产管理工作。

沙溪铜矿主矿体厚大, 主要采用大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法开采。对于主矿体周围的薄矿体主要利用浅孔留矿空场嗣后充填采矿法开采。对于薄矿体开采而言, 常用的有浅孔留矿法和削壁

充填采矿法。上述两种采矿法在国内外应用得较为普遍,但人员设备都要直接进入采场内作业,作业安全性较差,开采的效率较低,贫化损失率指标难以控制^[1-2]。同时,采用浅孔留矿法开采需要施工大量的人行天井及联络道,施工难度大,作业过程存在较高的安全风险。

对于薄矿体开采技术,国内众多矿山及科研机构也进行了大量的研究探索,总体来说是采用小孔径、小药量、控制爆破的方法,尝试采用中深孔爆破的方式尽可能减少采切工程量,提高回采率,控制回采的边界。另外,针对部分品位较高的矿体,通过扩大采场宽度,控制总体的贫化率,以提高回采的综合经济效益^[3-4]。针对矿山的开采条件研究制定相应的技术方案,开展针对性的薄矿体开采技术研究与工程应用,亦为其它类似矿山薄矿体开采提供参考。

1 急倾斜薄矿体开采条件分析

沙溪铜矿急倾斜薄矿体主要赋存在主矿体周边,矿体的平均厚度为1~2 m,矿体倾角约70°,矿岩硬度大,稳固性极好。通过现场开采形成的采空区分析,阶段高度60 m采空区稳定性极佳,为后续阶段开采提供了良好条件。

目前开采主要利用主矿体形成的开拓系统,但采用浅孔留矿法开采面临的最大问题是:高阶段人形天井施工难度极大,人员作业安全保障性差。另外,由于矿体厚度较薄,开采过程采场边界难以控制,因此造成的矿石贫化率较高,采场出矿的品位偏低。采用浅孔落矿需要施工大量的联络巷工程,落矿的效率偏低。

矿体RQD平均值83%,单孔最大值91%,单孔最小值77%;顶板(±10 m)RQD平均值81%,单孔最大值88%,单孔最小值68%;底板(±10 m)RQD平均值82%,单孔最大值89%,单孔最小值70%。总体岩体较完整,岩石质量较好。从现场工程来看,巷道顶板稳固光滑,节理构造不发育。

2 中深孔预裂爆破技术

预裂爆破可实现在爆破开挖区和保留区之间预

先形成一条孔间贯通的裂缝,使爆破区爆破时产生的应力波传到预裂缝时,部分被反射掉,从而减少透射到保留区应力波的强度,达到减振并保护保留区的目的。同时,主爆区岩体爆破后产生的裂缝向保留区贯通时被切断,从而使保留区岩体更加完整,遭受爆破区破坏影响范围控制到最小^[5]。对于薄矿体开采而言,如何控制小采幅采场开采过程中的开采边界,对贫损指标的控制非常关键。通过研究中深孔预裂爆破技术,对采场内矿岩进行预分离,为后续的矿体爆破开采提供条件。对于中深孔预裂爆破开采薄矿体,重点是选择炮孔参数及起爆方式,矿体开采前形成矿岩间的预裂缝,以对后期薄矿体的开采控制形成有利条件。

2.1 预裂孔不耦合系数

采用炮孔不耦合装药,炸药起爆后爆生气体在孔内形成空气柱,再通过裂缝进行扩展。不耦合装药爆破可以有效减少炸药爆破后粉碎区的范围,提高爆生气体对外扩展作用,在光面爆破、预裂爆破中应用较为广泛。不耦合系数的大小直接关系到孔内炸药爆破后能量传播和预裂缝形成效果,影响到爆炸能量的传播和预裂缝形成状况,而预裂缝形成的状况直接关乎主爆区爆破减震及裂缝扩展控制的效果。为了达到良好的预裂缝减震和控制爆破的效果,矿岩界限处布置的预裂孔爆破后既要形成裂缝,使得矿岩有效分割,又不能在矿岩界限处形成粉碎圈。因此,孔壁上初始冲击压力要小于岩石动态抗压强度大于岩石动态抗拉强度^[6],即:

$$\sigma_{td} \leq P_c \leq [\sigma_{cd}] \quad (1)$$

$$\sigma_{cd} = N \cdot N_D \cdot [\sigma_c] \quad (2)$$

式中, σ_{td} 为动态抗拉强度,MPa,其值随加载应变率变化很小,在岩石工程爆破的加载应变率范围内,可以取 $\sigma_{td} = \sigma_t$, σ_t 为岩石的单轴静态抗拉强度,MPa; σ_{cd} 为动态抗压强度,MPa。 N 是抗压强度提高系数,一般取7~10,软岩取大值,硬岩取小值,沙溪铜矿岩体强度很高(如表1所示),因此 N 取7; N_D 是岩石动态强度提高系数; σ_c 是岩石单向静态抗压强度,MPa; P_c 为环形不耦合柱状装药在预裂炮孔中爆炸后对孔壁施加的强冲击载荷,MPa。

表1 矿岩主要岩石力学参数

Table 1 Main rock mechanics parameters of ore and rock

岩性	黏结力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	动弹性模量/ GPa	动泊松比
石英闪长玢岩 (含铜矿体)	12.90	42.13	10.82	178.57	57.37	0.25	86.15	0.20
石英闪长斑岩 (主要顶底板围岩)	23.70	51.81	7.16	169.85	51.96	0.30	69.98	0.26

按照上述理论公式可以计算出预裂爆破炮孔的不耦合系数,当采用耦合装药的时候,不耦合系数设为1,实际工程参考理论计算结果进行设计。

2.2 炮孔间距

对于薄矿体开采预裂爆破而言,矿岩界限处布置的柱状不耦合炸药爆炸后,爆破产生的应力波首先作用于孔壁形成初始裂隙圈,孔内产生的爆生气体膨胀挤入孔壁内的初始径向裂缝及原岩裂隙,使初始裂缝得到不同程度的扩展,最终使孔与孔之间相互贯通,形成孔间的预裂缝,达到爆破预裂的效果。由于爆破后产生的粉碎区对爆生气体的扩展影响不大,孔间距应满足爆破后炮孔之间的贯通,使爆生气体扩展裂隙达到设计要求。在进行预裂爆破参数工程设计时,孔间距和不耦合系数是实现预裂爆破效果最重要的参数,其参数的确定一般依赖于理论研究、工程类比、经验公式以及现场试验等方法^[6-7]。

沙溪铜矿开拓系统采用的阶段高度为60 m,依据矿山开采条件及设备配比情况,薄矿体开采拟采用直径65 mm炮孔、2#岩石炸药,由于粉状炸药施工过程中难以实现不耦合装药,设计采用全长耦合装药。

在参考矿山前期理论计算数据及生产经验的基础上,确定沙溪铜矿薄矿体开采预裂爆破炮孔的关键技术参数。炮孔孔径为65 mm,炮孔长度10 m左右,炮孔的间距为0.5 m。采用2#岩石炸药,全长耦合装药。为保证孔内炸药起爆效果,孔内全长铺设导爆索,多孔同时起爆。炮孔布置见图1。

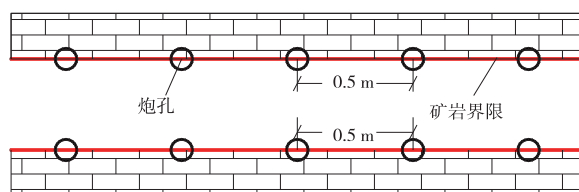
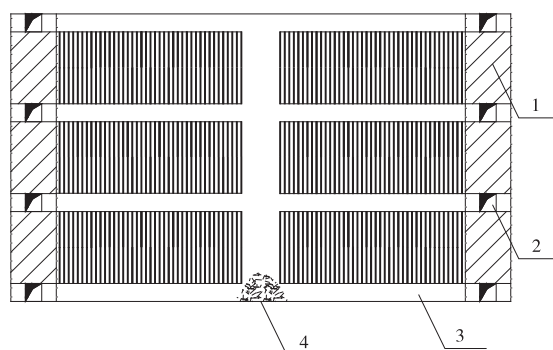


图1 矿岩界限预裂炮孔布置平面图

Fig. 1 Pre-splitting blast-hole layout plan of ore-rock boundary

3 薄矿体开采方案

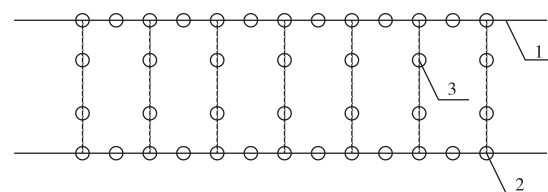
传统的薄矿体开采一般采用浅孔留矿法或削壁充填法开采。传统采矿方法具有一定的适用性且在国内外应用较多^[8-9],本文创新提出边孔预裂后自然崩落采矿方法,以提高回采效率及控制贫损指标。采矿工艺如图2、3所示。



1—矿柱;2—分段巷道;3—中段运输巷道;4—崩落矿石

图2 采矿方法剖面图

Fig. 2 Mining method profile



1—矿岩界限;2—预裂孔;3—正常孔

图3 炮孔布置图

Fig. 3 Blasting hole layout

沿矿体高度方向上划分中段和分段,沿矿体走向方向上划分矿房及矿柱。采场的上部及下部为中段巷道,中段巷道内部留设数个分段巷道。中段巷道及分段巷道均与脉外斜坡道联通,凿岩在脉内的分段巷道,出矿水平位于中段巷道。采场的长度20~50 m,间柱宽度为3~8 m。分段高度5~20 m,阶段高度15~60 m。由采场中段向两端或一端向另一端开采,分段爆破、阶段出矿。凿岩巷道内施工上向或下向中深孔,中深孔爆破矿岩界限的预裂孔及落矿炮孔。采场炮孔爆破分为两个步骤,预裂炮孔的爆破超前中间破岩炮孔一个步距,步距的宽度为3~5 m。首先是起爆矿岩界限的预裂炮孔,形成分离矿岩的预裂缝,同时为阻断中间炮孔爆破对周围围岩的影响。预裂缝形成后,中间破岩炮孔爆破使得炮孔之间以及矿体内部的构造互相贯通,改变坚硬矿体的稳固性状况,使其产生自然崩落。矿岩预裂分离后,中间炮孔爆破落矿。采场底部采用平底底部结构并布置相应的出矿进路,落矿后通过中段运输水平布置的出矿进路铲运至溜井或运至主矿体运输系统。

通过分段凿岩巷道施工上向或下向中深孔,每排炮孔的数量根据矿体厚度或者采场宽度确定。预裂孔两排,布置在矿体两侧的矿岩交界面处,炮孔间距为0.5 m,用以对矿岩进行预裂爆破,形成矿岩的

预分离。中部炮孔布置2~3排,采用平行布置的方式,炮孔排距为1.0 m,中间孔爆破后,孔与孔之间通过爆破方式联通,改变矿石自身稳固性状态,与矿体周围岩进行分离后形成自然崩落。

炮孔直径45~65 mm,孔内填装粉状或粒状铵油炸药,炮孔全长铺设导爆索。爆破时,预裂孔先响,形成矿岩预切割,中部炮孔后响,形成矿石自然崩落。预裂孔爆破时多孔同时起爆,每次同段起爆的炮孔个数为3~5个,形成孔间的贯通。采场中部的炮孔采用微差爆破的方式,前排先响、后排后响。雷管与导爆索连接,孔内导爆索与主导爆索连接后形成起爆网络。

薄矿体一般规模较小,且边角矿体一般距离主矿体较远。因此薄矿体采场开采结束后,尽可能采用封闭或非胶结充填,对主矿体或相邻矿体开采有

影响的区域采用尾砂胶结充填。

4 技术经济指标

薄矿体采矿方法研究最重要的目的是提高开采效率,控制贫损指标,降低开采成本。本文提出的采矿方法一方面通过预裂爆破控制薄矿体开采边界,同时利用中深孔落矿提高采矿效率。通过技术经济指标分析评价,分析浅孔留矿法、削壁充填法各项技术经济指标,充分评估研究提出技术方案的经济可行性,同时为方案的进一步优化提供借鉴^[8-10]。

从表2可以看出,浅孔留矿法、削壁充填法、预裂自然崩落法3种方法中,预裂自然崩落法采用矿岩界限预裂孔的方式对矿岩进行预分离,其贫损指标控制最好。同时,采用中深孔落矿,采矿效率及采矿成本指标控制方面具有明显的优势。

表2 技术经济指标

Table 2 Technical-economic indicator

采矿方法	损失率/%	贫化率/%	直接成本/(元·t ⁻¹)	开采效率/(t·d ⁻¹)
浅孔留矿法	10	48	73.14	100~120
削壁充填法	8	15	86.76	50~80
预裂自然崩落法	6	10	72.50	120~150

5 结论

对沙溪铜矿倾斜/急倾斜薄矿体采矿方法进行的研究,提出边孔预裂后自然崩落采矿方法并对相关技术参数进行研究,通过技术经济分析对比论证,得到以下结论:

1)预裂自然崩落法采用矿岩界限处的炮孔预裂、矿体内炮孔爆破改性后自然崩落落矿的方式,有利于开采过程中贫化损失的控制。

2)利用中深孔落矿,大幅减少采切工程量,提高采矿效率,降低采矿成本。

3)预裂孔的孔径根据理论研究计算并在实践中进一步优化,推荐65 mm炮孔全长耦合装药的炮孔间距为0.5 m。在生产实践中探索不同岩性及岩体质量条件下预裂爆破的关键技术参数。

4)本文研究的采矿方法由于需要施工中深孔,对炮孔的精度要求较高,因此主要适用于急倾斜矿体,后续需要对不同产状的矿体加强研究,增强其应用的广度及适用性。

参 考 文 献

[1] 曹帅,宋卫东,朱先洪,等.高海拔地区急倾斜薄矿体采矿方法优选[J].金属矿山,2013,42(2):14-17.
CAO Shuai, SONG Weidong, ZHU Xianhong, et al. Mining method optimization of sharply-inclined thin ore-body in alpine

high altitude area[J]. Metal Mine, 2013, 42(2): 14-17.

- [2] 刘峰光.贵州李家湾锰矿急倾斜极薄—薄矿体采矿方法[J].现代矿业,2015,31(12):25-26.
LIU Fengguang. Mining method of steeply inclined ultra-thin ore body in Lijiawan manganese mine Guizhou province[J]. Modern Mining, 2015, 31(12): 25-26.
- [3] 赵明亮.大村铜矿极薄矿体小孔径小药卷爆破技术的实践与应用[J].有色金属(矿山部分),2014,66(6):84-86.
ZHAO Mingliang. Practice and application of blasting technology of small diameter blasting hole with small cartridge for extra-narrow orebody in Dacun copper mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2014, 66(6): 84-86.
- [4] 赖伟,刘婉莹,王刚,等.急倾斜极不稳固薄矿体脉外分段空场采矿法[J].矿业研究与开发,2017,37(10):93-95.
LAI Wei, LIU Wanying, WANG Gang, et al. Extra unstable and thin orebody with steep incline mined by vein sublevel open-stope method[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(10): 93-95.
- [5] 唐海,梁开水,游钦峰.预裂爆破成缝机制及其影响因素的探讨[J].爆破,2010,27(3):41-43.
TANG Hai, LIANG Kaishui, YOU Qinfeng. Discussion on mechanism and effect factors of cracks resulted from pre-splitting blasting[J]. Blasting, 2010, 27(3): 41-43.
- [6] 楼晓明,赖红源,唐小军.预裂爆破参数的理论计算及应用[J].矿业研究与开发,2011,31(5):109-111.
LOU Xiaoming, LAI Hongyuan, TANG Xiaojun. Theoretical calculation and application of pre-splitting blasting parameters[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(5): 109-111.

(下转第25页)