

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.011

矿岩分离露天爆破毫秒延时间隔研究^{*}

李顺波^① 李泽华^① 杨 军^② 王洪强^① 余德运^①

①北方爆破科技有限公司(北京,100089)

②北京理工大学爆炸科技与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 在露天矿山开采过程中,矿石损失与贫化反映了矿产资源的有效利用程度,是评价矿床开采水平的主要指标之一。露天台阶爆破推进至矿岩交界处时,损失、贫化都会相应增加。通过应力波相互作用关系和自由面形成所需的时间对矿岩分离爆破毫秒延时间隔进行了分析,得到了矿岩分界线两侧的孔需要同时起爆,与其相邻孔的延时间隔时间设定为 100 ms 的爆破方法。现场试验应用表明,在矿岩分界线处可以形成明显的拉沟现象。

[关键词] 矿岩分离;损失;贫化;毫秒延时

[分类号] TD235.2⁺2;TD801

Research on Millisecond Delay Interval of Open Blasting for Separation of Ore and Rock

LI Shunbo^①, LI Zehua^①, YANG Jun^②, WANG Hongqiang^①, YU Deyun^①

①North Blasting Technology Co., Ltd. (Beijing, 100089)

②State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] In the process of open-pit mining, ore loss and dilution which reflect the utilization efficiency of mineral resources is one of the main indicators to evaluate the level of mining. When the open-pit bench blasting is advanced to the junction of ore and rock, the loss and dilution will increase correspondingly. The millisecond delay time interval of ore-rock separation blasting was analyzed by the interaction of stress wave and the formation of free surface. The blasting method that the delay time interval between the two sides of ore-rock boundary needs to be set at 100 ms is identified. Application of field test shows that obvious trenching phenomenon can be formed at the ore-rock boundary.

[KEYWORDS] separation of ore and rock; loss; dilution; millisecond delay

引言

随着大型露天挖运设备的投入运行,露天采矿规模和强度的不断加大,与之相配的生产计划的爆破矿块只有达到一定规模才能使设备能力充分发挥作用。而有色金属等复杂矿体的储存形态严重限制了生产计划的矿块划分尺寸,大爆区高强度开采与小矿块复杂矿岩界限的矛盾,直接导致矿山生产效率降低或造成矿石损失、贫化率增加。露天矿产资源开采始终伴随着损失贫化,对矿山企业的经济效益产生直接影响。矿石损失与贫化反映了矿产资源的有效利用程度,是评价矿床开采水平的主要指标之一。

国内不少学者都致力于采矿过程中矿石损失贫化控制技术的研究。李纪玉等^[1]在焦家金矿针对不同的上盘围岩条件,选用与其相适应的采矿方法,优化安全生产环境,降低采矿损失贫化率。文献[2-3]在无底柱分段崩落法的研究中提出了低贫损开采模式,即在开采过程中,通过调整放矿方式,优化采场结构参数,以适应崩落矿石的移动规律,改善放矿条件,放出更多的纯矿石,并控制了废石放出。余铁钢等^[4]在瓮福磷矿英坪矿段开采中根据矿山地质及爆破条件,通过设计炮孔穿孔方式、起爆时序和确定合理的延迟时间,提出了矿岩分离爆破方案,可以实现对岩石爆破移动方向的控制,从而使矿岩分离。张乐等^[5]通过等时线辅助分析软件,便捷地设计炮孔起爆时序,再根据矿山地质及爆破

^{*} 收稿日期:2018-10-22

第一作者:李顺波(1985 -),男,博士,主要从事岩石破碎块度和爆破振动控制研究。E-mail:lishunbo@126.com

条件确定合理的延迟时间,可以实现对岩石爆破移动方向的控制,并使矿岩分离。国外的学者^[6-7]也对爆破导致的矿石损失与贫化进行了研究。

目前,在露天台阶爆破采矿中,受到地质勘查和成矿条件的复杂性等因素的影响,矿石和岩石的分界线在采矿不同阶段经常处于调整变化状况,当露天台阶爆破推进至矿岩交界处时,损失和贫化都会相应增加。如能实现矿岩混爆分离,不仅能够按照设备生产能力划分矿块、计划开采,还可以有效地控制矿石损失与贫化。因此,研究矿岩爆破分离技术在复杂矿体露天开采中具有重要的经济价值。

1 矿岩分离爆破毫秒延时间隔分析

矿岩分离爆破就是在矿岩混合的爆区利用爆破技术在爆堆的矿岩分界位置产生明显的沟槽(也称拉沟),以便装运设备能够根据爆堆矿岩分界分别作业,防止因矿岩混合产生矿石损失和贫化。

露天矿台阶爆破为了控制后翻,通常在爆区最后一排有意制造拉沟。也就是通过适当增加后排孔延时间隔,改变后排孔的矿岩移动距离,在爆区后边界的爆堆上形成一道明显沟槽。矿岩分离爆破就是将后排孔的这种拉沟原理用于矿岩分界线。

矿岩分离爆破的核心问题,实际上就是考虑矿岩分界线两侧炮孔的毫秒延时间隔和其相邻孔的延迟时间设定的问题。

如图 1 中所示,矿岩分界线两侧有炮孔 1[#]~炮孔 4[#],要保证矿岩两侧实现分离爆破,需要孔 2[#]和孔 3[#]在 t 时刻同时起爆,且孔 1[#]和孔 4[#]早于孔 2[#]和 3[#]起爆,为其创造新的自由面。孔 1[#]和孔 2[#]的毫秒延时间隔与孔 4[#]和孔 3[#]的毫秒延时间隔 Δt 的设定是关键,其延时间隔包含了裂纹扩展形成时间和岩体抛掷运动一段距离的时间。

爆炸冲击波在岩石中的动压力关系为^[8-9]

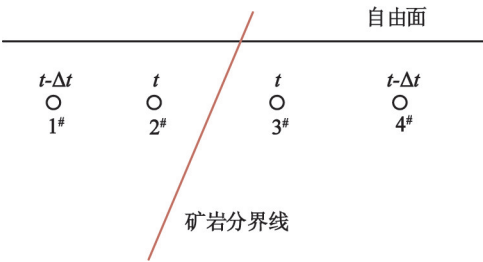


图 1 矿岩分离爆破延时间隔设计示意图
Fig. 1 Schematic diagram of delay interval of ore rock separation blasting

$$p(t) = p_0 \left(e^{-\frac{not}{\sqrt{2}}} - e^{-\frac{mot}{\sqrt{2}}} \right) \tag{1}$$

式中: n 和 m 为无量纲,是与距离有关的阻尼参数; ω 为圆频率, $\omega = 2 \sqrt{2} c_p / 3 a$ 。

图 2 给出了图 1 中孔 2[#]和孔 3[#]在同时起爆和具有延时间隔情况下的应力波传播示意图(两孔的装药量相等)。由式(1)可知,在图 2(a)同时起爆条件下,孔 2[#]和孔 3[#]在分界线处产生的压力相等,分界线处的岩体和矿体向两侧移动。在图 2(b)中,孔 2[#]在分界线处产生的压力要小于孔 3[#]产生的压力;因此,二者的合力方向朝孔 2[#]方向,分界线处的岩体运动方向朝孔 2[#]方向,造成了二者的混合。

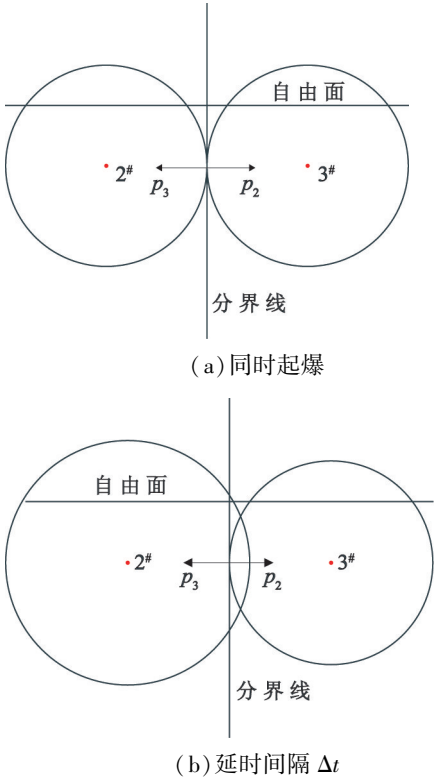


图 2 相邻孔应力波传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress wave propagation in adjacent holes

假定应力波从爆源出发,经过自由面反射后和裂纹扩展相遇,裂纹扩展方向和自由面形成的夹角为 ϕ ,从图 3 中的几何关系可以得到

$$h = \frac{e}{\tan 2\phi}; \tag{2}$$

$$g = \frac{e}{\sin 2\phi} \tag{3}$$

应力波经过 $(g + h)$ 距离所用的时间和裂纹扩展长度 e 所用的时间相同,可以得到

$$t_{\text{crack}} = \frac{e}{v_{\text{crack}}} = \frac{g + h}{c_p} = t_{\text{wave}} \tag{4}$$

假设裂纹扩展速度和纵波波速 c_p 成正比, K 为

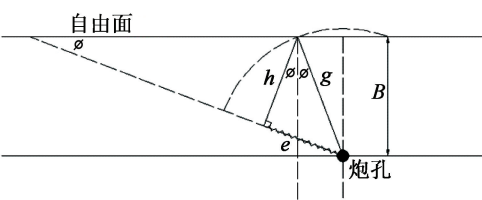


图3 应力波反射和裂纹扩展的几何关系

Fig.3 Geometric diagram of stress wave reflection and crack propagation

常数,有

$$v_{crack} = Kc_p \circ \tag{5}$$

由式(4)、式(5)可以得到

$$\frac{g+h}{e} = \frac{1}{K};$$

则

$$\frac{1}{\sin 2\phi} + \frac{1}{\tan 2\phi} = \frac{1}{K};$$

$$\tan \phi = K. \tag{6}$$

因为裂纹扩展速度和岩石中纵波波速可以表示为

$$v_{crack} = 0.38c_p, \tag{7}$$

所以 $\phi = \tan^{-1}0.38 = 20.8^\circ. \tag{8}$

由图4可得

$$d+n = \frac{B}{\sin \phi}; \tag{9}$$

$$d = \frac{a}{2\cos \phi}. \tag{10}$$

延迟时间表示为

$$t_d = \frac{d}{v_{crack}} = \frac{\frac{a}{2}}{0.38c_p \cos \phi}; \tag{11}$$

$$t_{d+n} = \frac{d+n}{v_{crack}} = \frac{B}{0.38c_p \sin \phi}. \tag{12}$$

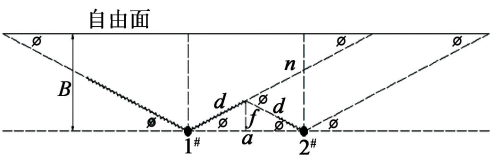


图4 两炮孔所形成的区域

Fig.4 The area formed by two holes

在台阶爆破中,若采用垂直孔,由于台阶倾角的影响,使得台阶底部抵抗线大于台阶顶部抵抗线,因此,应根据二者分别计算出自由面形成所需要的时间,台阶上部抵抗线为4.5 m,岩石纵波波速3 000 m/s,台阶高度7.5 m,则其台阶底部形成自由面所需的时间约为12 ms。形成自由面的最小时间为12 ms,同时需要考虑坡面岩石抛掷初速度达到最大

值,结合文献[10]中的相关研究成果,从而将图1中孔1#和孔2#,孔3#和孔4#的毫秒延时间隔时间设定为100 ms。

2 现场应用

2.1 工程概况

湖山铀矿位于西南非洲纳米比亚,紧邻大西洋的沙漠之中,是近十年来全球范围内最大的铀矿。

湖山矿现在开发区域分为1号坑、2号坑。每个坑分为2期开采(开采区、扩帮区),所以从形态上看,目前总共有4个坑,即1号坑1期、1号坑2期、2号坑1期、2号坑2期。其中,两个坑的1期已见矿,承担出矿任务;两个坑2期主要为扩帮,主要为后期开发拓展开采空间。

1号坑1期开采至11台阶,1号坑2期扩帮,目前开采的主要台阶有5、6、7、8台阶。2号坑1期目前开采至21台阶,2号坑2期目前开采至11台阶。总体来看,两个坑的1期已全面进入硬岩区域,承担出矿任务。两个坑的2期主要以松散岩石、表土为主,局部见到硬岩。

湖山铀矿矿体分布不连续,且分散度高,矿体厚度也不均匀(图5)。目前,矿块最小开采单元为2 000 t,即体量小于2 000 t的矿块放弃开采。2 000 t的矿块,矿体开采台阶高度为7.5 m,矿块厚度为3.0~7.5 m时,矿块面积也只有100~260 m²,面积较小。

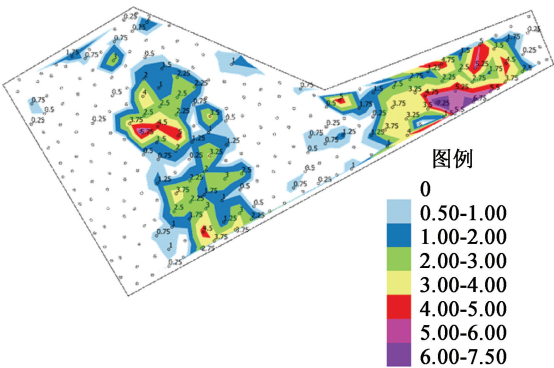


图5 典型矿石品位分布(单位:m)

Fig.5 Classification distribution map of ores (unit:m)

2.2 2B23D009 区块试验

2B23D009 区块主要岩石类型为花岗岩,抗压强度156.3 MPa,设计钻孔深度9.0 m,超深1.5 m,钻孔直径165 mm。共计482个孔,装药量246 969

kg,采用高精度导爆管雷管连接,孔内 500 ms,孔间 42 ms,排间 65 ms。拟拉沟两侧的孔同时起爆,与其相邻孔的毫秒延时设定为 100 ms 以上。钻孔信息见表 1。

表 1 钻孔信息

Tab.1 Borehole information

m

孔号	排距	孔距	超深	孔深
ROW B	3.0	3.0	1.8	9.3
ROW C	4.5	5.0	1.5	9.0
ROW D	4.5	5.0	1.5	9.0
CREST ROW	4.0	3.0	1.8	9.3

从图 6 中可以看出,矿体(图中蓝色部分)呈现一个圆形分布,未连线部分本次没有爆破孔。在图 7、图 8 中可以看出爆破后形成肉眼可以辨识的界限,验证了相关设计原则的可行性。

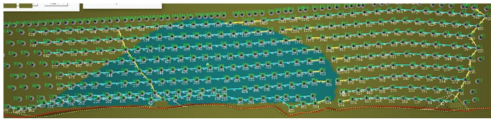


图 6 2B23D009 网路连接图

Fig. 6 2B23D009 connection diagram of blasting network



图 7 2B23D009 区块爆破前

Fig. 7 2B23D009 block before blasting



图 8 2B23D009 区块爆破后

Fig. 8 2B23D009 block after blasting

延时设计原则为:矿岩分界线两侧的孔需同时起爆,与其相邻孔的毫秒延时间隔时间设定为 100 ms。

参 考 文 献

[1] 李纪玉,陈广宁,刘福安,等. 采矿损失贫化管理的探讨[J]. 黄金,2006,27(6): 24-26.
LI J Y, CHEN G N, LIU F A, et al. Discussions on management of mining loss and dilution[J]. Gold,2006, 27(6): 24-26.

[2] 任凤玉,刘兴国. 无底柱分段崩落法采场结构与放矿方式研究[J]. 中国矿业,1995,4(6):31-34.
REN F Y, LIU X G. Study on the layout of mining drifts and the approach of ore drawing in sublevel caving[J]. China Mining Magazine,1995,4(6):31-34.

[3] 过江. 基于矿山 3D 数据库的采场贫损与稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2008.
GUO J. Study on dilution control and stability analysis based on 3D mining database [D]. Changsha: Central South University,2008.

[4] 余铁钢,彭业宣. 矿岩分离爆破技术在瓮福磷矿英坪矿段开采中的应用[J]. 采矿技术,2013,13(4):119-120.

[5] 张乐,颜景龙,张宪玉,等. 露天采矿矿岩分离爆破技术探索[J]. 工程爆破,2011,17(3):77-80.
ZHANG L, YAN J L, ZHANG X Y, et al. Blasting technology research for ore and rock separation in open-pit mine[J]. Engineering Blasting, 2011,17(3):77-80.

[6] PICHE A, LIU Q, TRAN H, et al. Drilling and blasting research at the noranda technology centre [J]. CIM Bulletin, 2000,93(1039):38-44.

[7] SUORINENI F T, TANNANT D D. KAISER P K. Determination of fault-related sloughage in open stopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999, 36(7): 891-906 .

[8] DUVALL W I. Strain-wave shapes in rock near explosions[J]. Geophysics,1953,18(2):310-326.

[9] DUVALL W I, ATCHISON T C. Rock breakage by explosives; Report of Investigation 5356 [R]. Bureau of Mines, United States,1953.

[10] 黄永辉,刘殿书,李胜林,等. 高台阶抛掷爆破速度规律的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2014,34(4):495-500.
HUANG Y H, LIU D S, LI S L, et al. Numerical simulation on pin-point blasting of sloping surface[J]. Explosion and Shock Waves,2014,34(4):495-500.

3 结 论

通过对矿岩分离毫秒延时间隔的分析和现场试验,得到在矿岩分界线可形成明显拉沟现象的毫秒