

巷道爆破环间延时对岩石抛掷距离的影响*

冯银, 陈辉

(新疆大学, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830046)

摘要:在巷道爆破中,岩石抛掷距离会影响装载和运输等后续作业,甚至还会造成围岩的二次损伤,引发安全事故。应用数码电子雷管在新疆备战铁矿开展了巷道掏槽爆破环间延时对岩石抛掷的影响试验。每次爆破试验的岩石抛掷距离和爆堆高度通过红外测距仪测量并进行分析。结合碰撞理论和现场研究表明,环间延时的选择对岩石的抛掷起重要作用,随着环间延时时间的增加,抛掷距离、爆堆高度分别呈逐渐减少、逐渐升高的趋势,如环间延时时间为50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms的巷道爆破延时抛掷距离分别为62 m、48 m、28 m、26 m、20 m,爆堆高度分别为1.78 m、1.86 m、2.14 m、2.23 m、2.59 m。环间延时时间为50 ms的巷道掏槽爆破对岩石的抛掷作用具有显著提升效果。

关键词:巷道掘进;掏槽爆破;环间延时;岩石抛掷;碰撞理论

0 引言

在地下矿山巷道爆破中,相关研究表明,不良的岩石抛掷会造成爆堆分散、设备损坏、掘进速度降低和成本增加^[1]。对岩石抛掷的研究可以追溯到 C. W. Liningston 爆破漏斗模型,该模型揭示了炸药放置深度对岩石抛掷的影响^[2]。此外,相关研究表明,岩石抛掷受多因素控制,如炮孔倾角^[3-4]、炸药单耗^[3]、岩石特性^[5]等。

目前,中国数码电子雷管基本全面开展应用,越来越多的研究表明,环间延时对岩石破碎具有重要作用。宗琦等^[6]建立了延迟时间的计算公式,通过模型试验和工业试验验证了公式的正确性和合理性,研究表明,适当增大延迟时间可以改善破碎效果和减少抛掷作用,提高掘进速度和降低成本。许绍明等^[7]通过增大辅助掏槽眼和掏槽眼间起爆延迟时间,减小了岩石抛掷距离,利于装载作业。根据岩石爆破机理,上述研究主要从自由面形成原理和足够的补偿空间去确定环间延时,并不能解释环间延时对岩石抛掷的影响机理和规律。

基于上述分析,基于碰撞过程中的运动和岩石的爆破过程,建立了环间碰撞巷道爆破模型,分析了环间延时对岩石抛掷的影响。然后再进行现场爆破试验,探究环间延时对岩石抛掷的影响。

1 原有巷道掘进爆破方案

备战铁矿由露天开采转为挂帮矿开采。矿石的金属矿物主要为磁铁矿,其次为黄铁矿、磁黄铁矿,少量闪锌矿、黄铜矿,矿岩岩性主要以绿帘石化矽卡岩、磁铁矿化矽卡岩、晶屑凝灰岩为主,平均单轴抗压强度为65.94 MPa,平均单轴抗拉强度为8.73 MPa,矿岩具体力学参数见表1。根据钻孔RQD值统计结果:矿区大部分岩体完整性为差至中等,岩石质量为中等,质量等级为Ⅲ至Ⅳ级。

表1 矿岩物理力学参数

岩性	波速/ (km/s)	单轴抗拉 强度/MPa	单轴抗压 强度/MPa	杨氏模量/ GPa	泊松比
绿帘石化矽卡岩	3.24	7.7	56.4	38	0.20
磁铁矿化矽卡岩	4.11	10.2	82.1	44	0.27
晶屑凝灰岩	3.53	8.3	59.3	35	0.20

试验区域巷道断面尺寸为4.2 m×4.0 m。该处原有巷道掘进爆破设计见表2和图1,采用双楔形掏槽和光面爆破开挖,钻孔设备采用手持式凿岩机,共50个炮孔,除周边眼和上部断面炮孔为直眼,下部断面其余炮孔为斜眼,与掌子面的夹角(θ)从巷道断面中线沿水平方向到断面轮廓线逐渐增加。炸药采用2号岩石乳化炸药,单次爆破消耗220卷,共计

* 收稿日期: 2023-03-09

作者简介: 冯银(1998—),男,四川蓬溪人,主要研究巷道掘进爆破,E-mail: fengyin9834@163.com。

66 kg。雷管使用雪峰公司生产的数码电子雷管和普通导爆管雷管,单次爆破消耗 50 发雷管,其中数码电子雷管爆破方案采用环间延时爆破,环间延时间为 100 ms。雷管延时误差为 1~2 ms,具有较高的精度,满足此次现场试验的要求。故试验雷管采用数码电子雷管,在原有爆破方案下设置不同的环间延时时间,研究环间延时时间对岩石抛掷的影响。

表 2 原有巷道掘进爆破参数

炮孔名称	孔号	孔数	装药量/ kg	环间 延时/ms
第一级掏槽孔	1~4	4	3.6	0
第二级掏槽孔	5~14	10	15	100
第一级辅助眼	15~22	8	12	200
第二级辅助眼	23~31	9	12	300
帮眼	32~37	6	7.2	400
底眼	38~43	6	9	500
顶眼	44~50	7	7.2	600
合计		50	66	

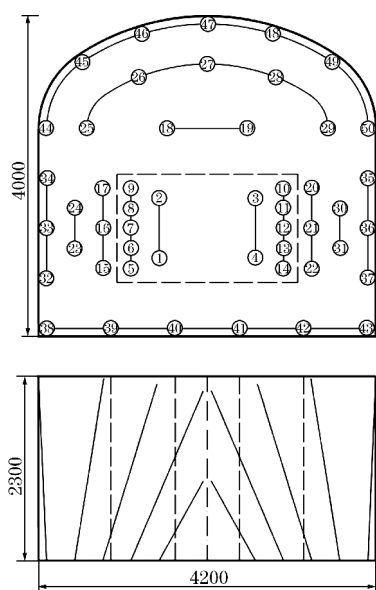


图 1 原有巷道掘进爆破方案(单位:mm)

2 岩石抛掷理论分析

2.1 岩石抛掷机理

目前公认的岩石爆破理论是应力波与爆生气体相互作用理论,如图 2 所示,岩石在冲击波的作用下形成空腔和破碎区。衰减成压缩应力波,使得岩石产生环向和径向裂隙,同时爆生气体膨胀使得裂隙扩展。应力波到自由面反射形成拉应力波,使得自

由面附近出现片落现象和裂纹进一步扩展,或者以地震波的形式传入远端。最后在爆生气体作用下岩石被抛掷。相关研究表明,应力波对岩石抛掷作用较小,主要还是爆生气体的作用^[8-9]。根据自由面的形成时间,哈努卡耶夫认为后爆炮孔以先爆破孔刚好形成爆破漏斗,且爆岩脱离岩石形成 0.8~1.0 cm 宽的裂缝时起爆为宜^[10]。

$$\Delta T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

式中, t_1 为弹性波传到自由面并返回的时间,s; t_2 为形成裂缝的时间,s; t_3 为破碎岩石离开岩体一定距离的时间,s。

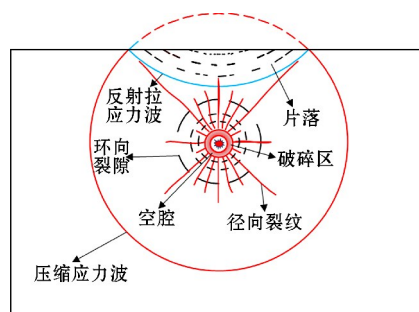


图 2 岩石与爆炸荷载相互作用机理

基于此,将 t_1 与 t_2 总时间认为是炸药起爆后自由面形成的时间,在冲击波和爆生气体的作用下裂缝已经完全形成,具有明显的爆破漏斗轮廓线;将 t_3 作为岩石抛掷一定距离的时间。爆生气体继续膨胀将碎石抛掷出一定距离,直到爆破完成。

2.2 碰撞理论

本文基于非对心碰撞理论模型分析了碰撞过程中的运动。如图 3 所示,假设有 A、B 两小球,质量分别为 m_A 和 m_B ,小球具有非弹性性质且表面粗糙。为了方便讨论,假定 B 静止不动,A 取 A、B 的相对速度 v 向 B 运动。

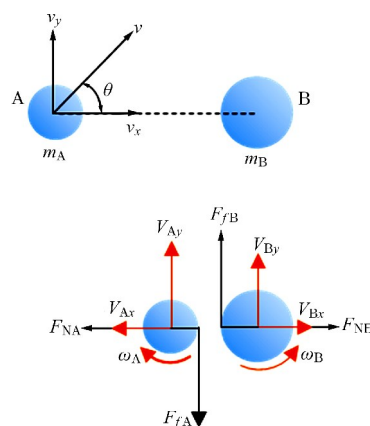


图 3 非对心碰撞理论模型

如图 3 所示,非对心碰撞时相对速度的方向与两球中心连线的夹角为 θ ($0 < \theta < \frac{\pi}{2}$),水平和竖直方向的分量分别为 v_x 和 v_y , $v_x = v \cos \theta$, $v_y = v \sin \theta$ 。分别在水平和竖直方向上讨论碰撞时的能量损耗。

在水平方向与正撞模型相似,在碰撞时间内,将产生轴力 F_{NA} 和 F_{NB} 。其中 F_{NA} 使得物体 A 的水平速度先减小,可能减小到 0 再反向增加到 V_{Ax} ,但不会超过原来的速度^[11]。 F_{NB} 使得物体 B 的水平速度增加到 V_{Bx} 。

在竖直方向,在碰撞时间内物体 A、B 发生相对运动,将产生摩擦力 F_{fA} 和 F_{fB} ,且 $F_{fA} = F_{fB} = \mu F_N$,摩擦力 F_{fA} 使得物体 A 竖直方向的速度减少为 V_{Ay} , F_{fB} 使得物体 B 竖直方向的速度增加到 V_{By} ,同时摩擦力 F_{fA} 和 F_{fB} 分别使得物体 A、B 产生旋转(ω_A 和 ω_B),故 y 方向上碰撞后部分动能主要转化为热能和角动能,而热能和角动能不利于物体的抛掷。

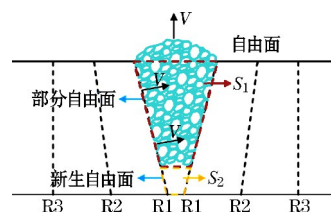
由上述分析可知,小球在碰撞作用下,某一方向的速度可能增加或者减少。而这种碰撞作用可能改变岩石的抛掷。

2.3 基于环间爆岩碰撞的巷道掘进爆破模型

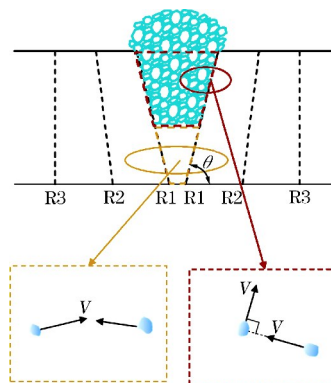
基于碰撞理论和岩石抛掷过程,建立了环间爆岩碰撞的巷道掘进爆破模型,分析环间延时对岩石抛掷的影响,如图 4(a)所示。其中 R1、R2、R3 分别代表掏槽眼、辅助眼和周边眼; S_1 为 R1 起爆后未抛出的碎石的空间, S_2 为新的补偿空间,为了便于分析,定义原有自由面为自由面, S_2 区域与 R1 的共有部分为新生自由面, S_1 区域与 R1 的共有部分为部分自由面。假设每环所用炸药量相同,两环碎片的移动速度大小相同和自由面产生的时间相同,即碎石所具有的动能相同。

如图 4(a)所示,环间延时为 Δt_1 ,爆破后经历 Δt_1 的时间。由最小抵抗线原理可知,R2 起爆后与 S_1 区域相临的岩石沿部分自由面抛掷, S_2 处的岩石向新生自由面抛掷。当延时时间增加时,取 $\Delta t_2 > \Delta t_1$,如图 4(b)所示,爆破后经历 Δt_2 的时间。在 S_1 区域,R2 起爆后爆岩在部分自由面碰撞 R1 起爆后的爆岩,根据碰撞理论,在碰撞作用下 R1 爆岩在垂直于自由面方向速度增加,抛掷更远。同理可知,在 S_2 区域同环间的爆岩碰撞并不会使得 R2 的爆岩垂直于自由面方向的速度增加。由此可知, S_1 区域更利于岩石抛掷,可以看出延时时间 Δt_2 相比

于 Δt_1 , S_1 区域逐渐减小, S_2 区域逐渐增加,故随着环间延时时间的增加,岩石抛掷距离会逐渐减小。同时还应注意当环间延时足够小时,岩石的抛掷作用可能会减弱,这是因为 R1 起爆后可能还未形成部分自由面,此时 R2 的爆岩会受到岩石的夹制作用,甚至可能导致巷道掘进爆破失败。



(a) 环间延时为 Δt_1 ,爆破经历 Δt_1



(b) 环间延时为 Δt_2 ,爆破经历 Δt_2

图 4 不同环间延时巷道爆破模型

3 现场爆破试验

3.1 试验方案

为了探究环间延时时间对爆堆形态的影响,在矿山原有爆破设计基础上,将环间延时时间分别设置为 50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms,除环间延时时间不同,其余爆破参数均相同,如炮孔分布、起爆顺序以及对应孔装药量等参数均相同。现场炮孔的布置如图 5 所示。

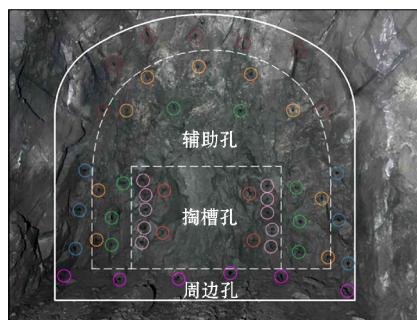


图 5 现场炮孔的布置

3.2 试验区域

测试区域如图6所示。本次研究选择在备战铁矿3464平台进行爆破测试。为了能较好地测量爆破后岩石的抛掷距离,需要保证巷道的距离要大于岩石抛掷距离,同时为减少岩性带来的试验误差,选择了JL1(图中紫色区域)作为试验地点(颜色区分见电子版),该试验区域距离主巷有足够的距离且位于成矿区域。JL1区域进行了50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms共5组环间延时爆破试验。

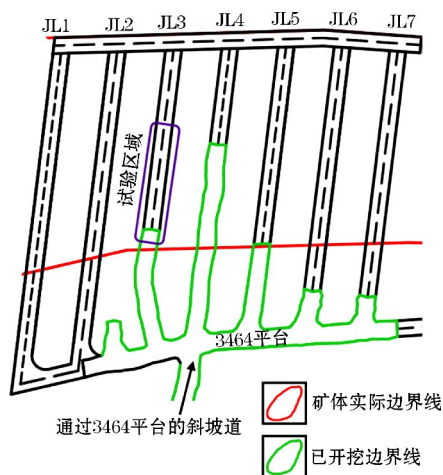


图6 爆破试验区域

3.3 现场试验数据的获取

在本次研究中,采用红外测距仪测量岩石抛掷距离。不仅获取了岩石的抛掷距离数据,还获取了

爆堆高度数据以及巷道掘进进尺。如图7所示,岩石抛掷距离不计入飞石抛掷距离,同时根据现场前期的调研,不同环间延时爆破岩石抛掷距离差距较大,故距离收集时取整数。对于爆堆高度的获取,先在爆堆最高点测量其到巷道拱顶的距离 h ,则此时的爆堆高度为巷道高度 $H-h$ 。对于掘进进尺的获取,在爆破前离巷道断面2 m和离地2 m处用红漆标注,爆破结束后测出标注处距新巷道断面的距离 a ,则巷道进尺为 $(a-2)$ m。

3.4 现场试验结果

本次试验共收集了5组现场试验数据,每组试验收集3个试验结果数据,整理试验结果得到数据集。试验结果见表3、图8、图9和图10。

岩石抛掷距离见表3和图8。从表3和图8可以看出环间延时对延时抛掷具有显著影响,在本次试验中随着环间延时时间的增加,爆破抛掷距离逐渐减小,如环间延时时间为50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms的巷道爆破,抛掷距离分别为62 m、48 m、28 m、26 m、20 m。并未出现本文2.3节提到的环间延时过小导致岩石抛掷减弱的情况,这可能是因为环间延时时间为50 ms时形成了部分自由面,该试验结果符合环间延时对岩石抛掷的影响规律。研究结果表明,在这次试验中延时时间为50 ms的巷道爆破更利于岩石抛掷。

爆堆高度见表3和图9。随着环间延时时间的

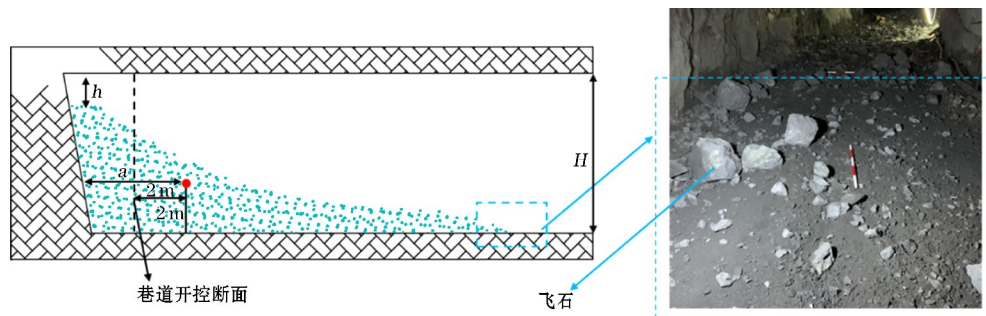


图7 岩石抛掷距离、爆堆高度数据及掘进进尺的收集方法

表3 现场试验数据

环间延时时间/ms	抛掷距离/m	爆堆高度/m	掘进进尺/m
50	62	1.78	2.12
100	48	1.86	2.15
150	28	2.14	2.12
200	26	2.23	1.98
500	20	2.59	2.18

增加,爆堆的高度逐渐增加,如环间延时时间为50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms的巷道爆破,爆堆高度分别为1.78 m、1.86 m、2.14 m、2.23 m、2.59 m。

掘进进尺见表3和图10。从表3和图10可以看出,环间延时时间对其影响无规律,这可能是由于测量误差导致的,因为爆破后的巷道断面是不平整的。

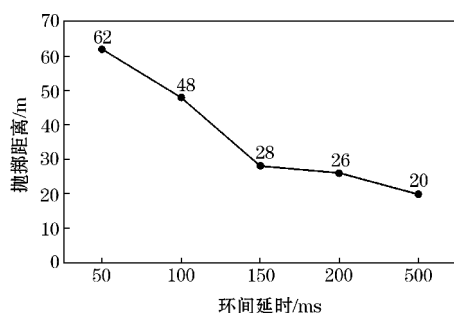


图 8 环间延时时间与岩石抛掷的关系

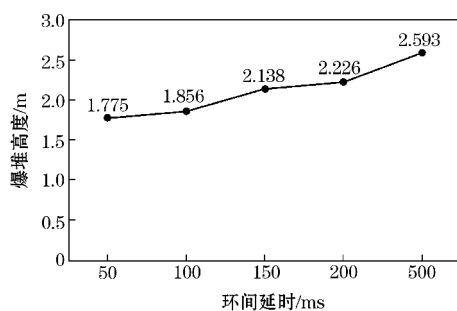


图 9 环间延时时间与爆堆高度的关系

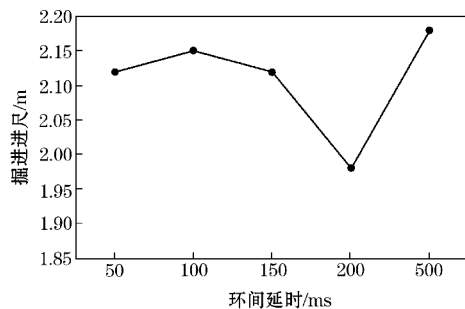


图 10 环间延时时间与掘进进尺的关系

6 结论

基于碰撞理论和爆破过程分析,建立了环间碰撞的巷道掏槽爆破模型,分析了巷道掘进爆破中环间延时对岩石抛掷的影响,发现环间延时时间的选

择可以通过环间岩石碰撞控制岩石的抛掷,随环间延时的增加,岩石抛掷距离越远,但过小的环间延时会减弱岩石的抛掷。通过巷道掘进爆破的环间延时现场试验,得到以下结论。

(1) 环间延时时间能明显地控制岩石的抛掷。环间延时时间为 50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms 的巷道爆破,抛掷距离分别为 62 m、48 m、28 m、26 m、20 m。

(2) 环间延时时间为 50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、500 ms 的巷道爆破,爆堆高度分别为 1.78 m、1.86 m、2.14 m、2.23 m、2.59 m。

参考文献:

- [1] 宗琦,罗云滚.增大岩巷掘进爆破延迟时间以减少抛掷作用[J].金属矿山,2001(10):24-25+38.
- [2] 李夕兵.凿岩爆破工程[M].长沙:中南大学出版社,2011.
- [3] 钟贵峰,汤明才,林海祥,等.银山铅锌矿一次成井掏槽爆破工业试验[J].采矿技术,2022,22(6):137-140.
- [4] 周宇,段应明.炮孔倾角对抛掷爆破效果的影响分析[J].化工矿物与加工,2022,51(9):6-9.
- [5] 吴德义.多孔断裂爆破抛掷速度随最小抵抗的变化规律[J].煤矿爆破,1996(1):18-20.
- [6] 宗琦,刘积铭,徐颖.合理延迟时间的理论分析和试验研究[J].中国矿业大学学报,1998(1):88-91.
- [7] 许绍明,宗琦.煤矿大断面岩巷掘进新型微差起爆技术应用研究[J].煤矿爆破,2013(1):32-34.
- [8] 马力,李克民,丁小华,等.抛掷爆破岩体抛掷距离影响因素研究[J].工程爆破,2013,19(增刊1):50-53.
- [9] 张奇.球形装药岩石抛掷爆破初速度的数值模拟[J].煤炭学报,1993(5):27-32.
- [10] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(1):218.
- [11] 王建中.碰撞过程机械能损失公式的推广及简化[J].浙江科技学院学报,2001(4):40-45.