

弓长岭井下矿巷道围岩爆破损伤控制研究

Research on Blasting Damage Control of the Drift Surrounding Rock of
Gongchangling Underground Mine

胡世超, 宫国慧, 马东, 李宗武, 傅利民, 韩雪娇, 李冬

(鞍钢集团矿业弓长岭有限公司, 辽宁 辽阳 111008)

摘要:为了研究巷道掘进爆破对围岩造成的损伤效应,准确获取巷道开挖爆破对巷道围岩的扰动情况,本文利用声波测试法对巷道爆破开挖过程中围岩损伤进行探测,根据声波测试得到的结果,提取可以有效反映损伤特征的参量,根据公式计算测得的爆破声速及爆破损伤结果,进而直观的反映出围岩损伤情况。基于对普通药包及切缝药包进行爆破时的超声波测试,得到装药段及封堵段声速变化,进而根据声速变化值得到爆破对围岩的损伤情况。

关键词:深井矿山; 巷道掘进; 围岩爆破损伤; 声波测试; 切缝药包

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0034-06

Abstract: In order to study the damage effect and accurately obtain the disturbance of drift advancement blasting on surrounding rock, sonic wave test method is used in this paper to detect the surrounding rock damage in the process of drift advancement blasting. According to the results of the sonic wave test, the parameters that can effectively reflect the characteristics of damage are extracted, and the blasting sound velocity and blasting damage results are calculated according to the formula, so as to directly reflect the surrounding rock damage. Based on the ultrasonic test of the blasting using ordinary explosive cartridge and cutting seam cartridge, the sound velocity changes in the charging section and the plugging section are obtained, according to which the damage of blasting to the surrounding rock is obtained.

Key words: deep shaft mine; drift advancement; blasting damage of surrounding rock; sonic wave test; cutting seam cartridge

1 前言

在地下矿山施工中,巷道爆破掘进作业过程势必会引起围岩的损伤,对岩体的稳定性产生影响。前人的大量研究成果和工程试验表明,爆破还会导致围岩的累计损伤,从而降低围岩承载能力,进而影响巷道施工安全^[1]。

声波测试法是一种无损测试的方法,被广泛应用于岩体工程测试勘察中,应用效果良好,也解决了很多实际问题,不仅操作步骤简单,而且可以快速得到测试结果,且测试结果精度易于控制和提高,具有广阔的应用和发展前景,对工程岩体的勘测设计和施工,具有十分重要的意义。有专家学者^[2]对不同爆破条件下爆破前后声波测试速度进行了对比分析。Yongfeng等^[3-4]利用超声波检测对竖井岩体爆破损伤区域进行了测试,并将其

纳入收敛约束法(CCM)和三维数值分析中。单仁亮等^[5]研究了喷射混凝土累积损伤与工作面距离的非线性关系。

随着先进的现场测试方法和测试系统的出现,尤其是声波测试系统的出现,以及实际工程中研究需求的增多,学者们越来越多地通过现场测试的手段来研究爆破动载作用下岩土材料的损伤效应。颜峰、姜福兴等^[6]利用声波测试技术,通过现场爆破实验,研究了爆破荷载作用下露天矿围岩的损伤效应;费鸿禄等^[7]结合声波测试和数值模拟的手段,对回采巷道围岩在爆破掘进过程中的累积损伤效应进行了研究;孟凡兵等^[8]在理论计算的基础上,结合现场声波测试的结果,研究了巷道中夹岩在爆破荷载作用下的累积损伤效应。

钻爆法仍然是地下矿山掘进的主要方法,不仅广泛适用于各种工况,而且施工成本较低,具有很多优点。然而,施工过程中,爆破载荷作用下会对地下矿山围岩产生损伤效应。特别是周边孔,与巷道围岩直接接触,将直接影响到巷道围岩的损伤情况^[9-12]。

[作者简介] 胡世超(1978-),男,工程师,主要从事金属矿山爆破损伤相关方面研究。

[引用格式] 胡世超,宫国慧,马东,等.弓长岭井下矿巷道围岩爆破损伤控制研究[J].中国矿山工程,2022,51(4):34-39.

由于在矿石开采过程中,中深孔爆破时由于单次爆破炸药量大,尤其针对过破碎带矿体,爆破对回采巷道帮、顶板造成一定损伤,易出现顶板冒落、片帮等现象,影响采场安全稳定开采。本文采用声波测试法,通过对普通药包及切缝药包爆破震动进行超声波测试,测试不同药包结构爆破震动对围岩的损伤效应,进而寻找巷道掘进爆破中减振措施,降低爆破震动产生的不利影响。

2 试验方法和试验原理

鞍钢集团弓长岭井下金属矿试验段,巷道掘进每个循环进尺 2.0~2.2 m,为获得爆破对围岩的损伤情况,在巷道内掘进面附近围岩侧壁钻孔,测试孔平行于巷道横断面,用于平行声波测试,编号孔 1、孔 2、孔 3。根据现场实际工程地址条件、施工条件及声波测试需求,设置声波测试钻孔间距为 50~60 cm。孔 1 直径为 42 mm,与掘进面的水平距离约 50 cm,与水平方向的夹角约为 10°~20°。孔 1 与孔 2 之间的剖面编号 1~2,孔 2 与孔 3 之间的剖面编号 2~3,测试点及测孔布置,测孔示意图如图 1 所示。

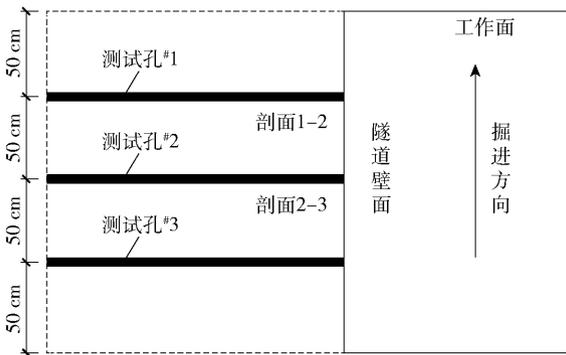


图 1 测试孔平面示意图

进行声波测试前,首先将仪器按顺序连接,同时,更改探头提升方式为手动提升。准备好测试仪器后,开始向测试孔注水,然后将声波发射探头和声波接收探头缓慢插入到测试孔中,到达孔底位置,由孔底开始进行声波测试并对声波速度进行采集。采集结果中,需要始终保持探头相互平行,提升步距约为 7 cm,过程中需要及时补充注水,测试结束后将仪器收好,清理装箱。

1) 测试原理

所谓声波测试就是依据声波在不同围岩中不同的传播特性来计算介质的声波速度。也就是说,声波测试仪向介质中发射出高频率弹性脉冲波,脉冲

波经水介质后到达围岩中,由声波测试仪最初形成的球面声波开始,在声波发生到接受位置之间,形成一个复杂的声波场,当声波经水介质到达围岩后,在围岩的波阻抗界面,声波将发生透射、反射,透射波经岩石介质后被接收探头接收后能量明显降低,根据波的频率变化情况、波形畸变程度、到达时间及能量衰减特性等变化特征,就可以获得测区内围岩声速等参数,图 2 所示为测试原理示意图。

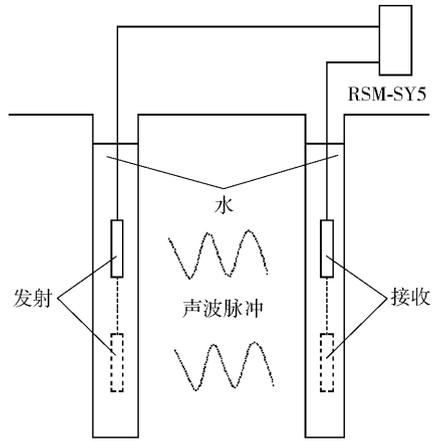


图 2 测试原理

通过声波的传播方向和质点振动方向的关系,声波可分为纵波、横波、表面波等,由于空气介质、水介质均不能承受剪应力,所以空气介质、水介质中只能传播纵波,上述一发一收跨孔平行测量法测量的是纵波分量 C_p 。

声波传播过程受多种因素的影响,如岩体应力状态、岩体结构面、岩性以及风化程度。一般情况下,声波在坚硬致密岩体中传播较快,声速也越大;在较软多裂隙岩体中传播较慢,声速也越小。在相同岩性的情况下,结构面对波速的影响较大,且相同围岩下,含水率越高声速也越大,因此,可采用声波测试法分析围岩稳定性。

2) 声速的计算

采用跨孔一发一收平行法进行声波测试时,声波速度 C_p 可按式(1)进行计算:

$$C_p = \frac{L}{t} \quad (1)$$

式中: L —声波穿透围岩的实际距离,m;

t —声波透过岩体的时间,s。

3) 损伤的计算

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_f^p}{\Delta \epsilon_f^c} \quad (2)$$

可以根据声波速度和损伤的关系计算中损伤变

量 D 。

根据《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》中关于爆破破坏和岩体质量的描述:同部位的爆破后波速(C_{p2})小于爆破前波速(C_{p1}),其变化率 η 为

$$\eta = 1 - \left(\frac{C_{p2}}{C_{p1}} \right) \quad (3)$$

式中,声波变化率 $\eta < 10\%$,影响或影响甚微; $\eta > 10\%$ 时,判断为爆破破坏或岩体质量差。

3 普通药包和切缝药包声波测试

地下矿山开采中,巷道围岩爆破掘进会造成围岩的损伤,尤其是循环爆破载荷会对围岩造成累计损伤,导致围岩声速明显降低。本文基于超声波测试方法,对爆破作用下围岩的累计损伤展开了研究,对切缝药包爆破及普通药包爆破下围岩爆破损伤情况进行了详细的对比分析,并提出了降低围岩损伤效应的解决措施。图3所示为现场监测示意图。

本次声波测试采用新型 R-SY5 智能声波仪进行测试,仪器精度处于国内领先水平。新型 R-SY5 智能声波仪能够满足不同形式的调平及出发需求,采用双通道的模式,采样间隔为 $0.1 \mu\text{s}$,12位 A/D 转换,12位定点或浮点增益范围 $1 \sim 10\,000$,频率为 60 kHz 。

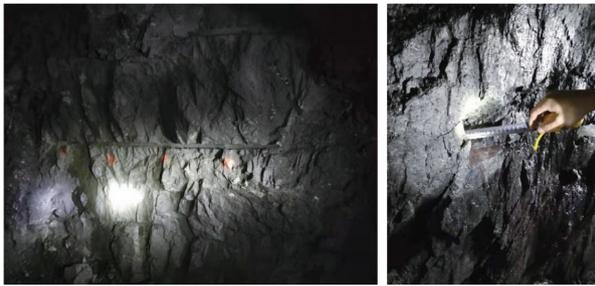


图3 现场监测孔图

测试过程中,可以适当放大增益或调节扫描宽度,从而更好的判别纵波,得到波形清晰、起跳干净、方便辨认;当纵波起跳点有高频成分干扰时,可压缩扫描宽度,然后以高频包络线的中线与基准线的交点作为初至时刻;在波形起跳不够明显时,可尝试移动探头位置、添加注水、或改变耦合条件的办法。

巷道围岩声波测试时,测试探头步长为 0.2 m ,若出现波速较大的情况,可以适当增大测试距离,并保证钻孔内部供水充足,以免造成测试波形异常,部分测试孔可能存在节理裂隙发育,导致注水流失,数据失效。

根据现场监测方案得到了普通药包封堵段、装药段,切缝药包的封堵段、装药段不同深度的声波速度测试值见表1、2、3、4。

从表中可以得到,根据普通药包封堵段声波测试结果可知,本组实验中声波测试最高波速在第一次爆前,孔深 2 m 的位置,最大峰值声速为 $4\,238 \text{ m/s}$ 。声波测试最低声速在第一次爆后,孔深 0.2 m 处,最小峰值声速为 $3\,842 \text{ m/s}$ 。根据普通药包装药段声波测试结果可知,本组实验中声波测试最高波速在第一次爆前,孔深 2 m 的位置,最大峰值声速为 $4\,238 \text{ m/s}$ 。声波测试最低声速在第二次爆后,孔深 0.2 m 处得到最小峰值声速为 $3\,861 \text{ m/s}$ 。

根据切缝药包封堵段声波测试结果可知,本组实验中声波测试最高波速在第一次爆前,孔深 2 m 的位置,最大峰值声速为 $4\,295 \text{ m/s}$ 。声波测试最低声速在第二次爆后,孔深 0.2 m 处得到最小峰值声速为 $3\,882 \text{ m/s}$ 。根据切缝药包装药段声波测试结果可知,本组实验中声波测试最高波速在第一次爆前,孔深 2 m 的位置,最大峰值声速为 $4\,299 \text{ m/s}$ 。声波测试最低声速在第二次爆后,孔深 0.2 m 处得到最小峰值声速为 $3\,876 \text{ m/s}$ 。

根据4次测试结果可知,声波测试速度随孔深深度增加总体上呈上升的趋势,距离孔口越近的位置声波测试速度越小。通过声波测试的原理可以判定在孔深越深的位置围岩的质量越好,距离孔口越近,岩石较破碎且波速的离散型较大。

围岩的声波测试速度与其破碎程度存在相关性,破碎程度越大也即围岩的松动情况越大,声波测试速度波速越小,围岩质量越差。声波测试得到的结果是围岩松动区范围的一个近似值,可更好的了解爆破工程中扰动区范围,进而可以根据得到的结果调整爆破装药结构及装药量,并且有利于在爆后及时支护围岩破碎区,为实际工程提供参考依据。

通过对普通药包封堵段、普通药包装药段,切缝药包封堵段、切缝药包装药段围岩进行了声波测试,基于表1至表4,得到不同孔深度的声波变化规律曲线。

从图4至图7可以直观的看出,普通药包堵塞段、装药段,切缝药包堵塞段、装药段都随着孔深增加声速整体增加的趋势,只有普通药包第二次爆破后声速出现较小的波动,总体趋势大致相同。普通药包堵塞段小于装药段的声波变化值,切缝药包堵塞段小于装药段的声波变化值,堵塞段的岩体损伤总体小于装药段。

表1 普通药包封堵段声波测试值

| 孔深/m | 第一次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破 损伤值 D_1 | 第二次爆破 损伤值 D_2 |
|------|---|---|---|---|--------------------|--------------------|
| 0.2 | 4 093 | 3 842 | 4 043 | 3 850 | 0.118 888 | 0.093 195 |
| 0.4 | 4 107 | 3 977 | 4 067 | 3 881 | 0.062 305 | 0.089 376 |
| 0.6 | 4 143 | 4 029 | 4 081 | 3 957 | 0.054 275 | 0.059 846 |
| 0.8 | 4 178 | 4 052 | 4 101 | 4 006 | 0.059 406 | 0.045 794 |
| 1.0 | 4 184 | 4 078 | 4 112 | 4 022 | 0.050 027 | 0.043 295 |
| 1.2 | 4 197 | 4 110 | 4 126 | 4 068 | 0.041 028 | 0.027 917 |
| 1.4 | 4 211 | 4 128 | 4 143 | 4 094 | 0.039 032 | 0.023 514 |
| 1.6 | 4 217 | 4 154 | 4 165 | 4 128 | 0.029 656 | 0.017 688 |
| 1.8 | 4 220 | 4 162 | 4 170 | 4 145 | 0.027 299 | 0.011 954 |
| 2.0 | 4 238 | 4 229 | 4 170 | 4 162 | 0.004 243 | 0.003 833 |

表2 普通药包装药段声波测试值

| 孔深/m | 第一次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破 损伤值 D_1 | 第二次爆破 损伤值 D_2 |
|------|---|---|---|---|--------------------|--------------------|
| 0.2 | 4 078 | 3 870 | 4 057 | 3 861 | 0.099 409 239 | 0.094 289 |
| 0.4 | 4 113 | 3 964 | 4 078 | 3 886 | 0.071 140 831 | 0.091 947 |
| 0.6 | 4 134 | 4 031 | 4 098 | 3 857 | 0.049 209 898 | 0.114 159 |
| 0.8 | 4 186 | 4 056 | 4 111 | 3 961 | 0.061 147 332 | 0.071 643 |
| 1.0 | 4 190 | 4 106 | 4 119 | 4 016 | 0.039 693 554 | 0.049 386 |
| 1.2 | 4 199 | 4 158 | 4 137 | 4 071 | 0.019 433 119 | 0.031 652 |
| 1.4 | 4 206 | 4 171 | 4 150 | 4 083 | 0.016 573 645 | 0.032 028 |
| 1.6 | 4 217 | 4 154 | 4 165 | 4 128 | 0.029 656 | 0.017 688 |
| 1.8 | 4 220 | 4 162 | 4 170 | 4 145 | 0.027 299 | 0.011 954 |
| 2.0 | 4 238 | 4 229 | 4 170 | 4 162 | 0.004 243 | 0.003 833 |

表3 切缝药包封堵段声波测试值

| 孔深/m | 第一次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破前/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第二次爆破后/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 第一次爆破 损伤值 D_1 | 第二次爆破 损伤值 D_2 |
|------|---|---|---|---|--------------------|--------------------|
| 0.2 | 4 097 | 3 976 | 4 015 | 3 882 | 0.058 195 | 0.065 154 |
| 0.4 | 4 135 | 4 033 | 4 035 | 3 930 | 0.048 726 | 0.051 367 |
| 0.6 | 4 149 | 4 052 | 4 057 | 3 974 | 0.046 212 | 0.040 498 |
| 0.8 | 4 155 | 4 076 | 4 078 | 3 998 | 0.037 665 | 0.038 85 |
| 1.0 | 4 168 | 4 107 | 4 087 | 4 030 | 0.029 056 | 0.027 699 |
| 1.2 | 4 197 | 4 133 | 4 111 | 4 066 | 0.030 265 | 0.021 773 |
| 1.4 | 4 230 | 4 172 | 4 130 | 4 102 | 0.027 235 | 0.013 513 |
| 1.6 | 4 251 | 4 203 | 4 133 | 4 107 | 0.022 455 | 0.012 542 |
| 1.8 | 4 276 | 4 241 | 4 141 | 4 132 | 0.016 303 | 0.004 342 |
| 2.0 | 4 295 | 4 265 | 4 148 | 4 141 | 0.013 921 | 0.003 372 |

表4 切缝药包装药段声波测试值

| 孔深/m | 第一次爆破前/ $m \cdot s^{-1}$ | 第一次爆破后/ $m \cdot s^{-1}$ | 第二次爆破前/ $m \cdot s^{-1}$ | 第二次爆破后/ $m \cdot s^{-1}$ | 第一次爆破 损伤值 D_1 | 第二次爆破 损伤值 D_2 |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| 0.2 | 4 068 | 3 944 | 4 007 | 3 876 | 0.060 034 | 0.064 317 |
| 0.4 | 4 084 | 4 015 | 4 032 | 3 931 | 0.033 505 | 0.049 472 |
| 0.6 | 4 118 | 4 064 | 4 063 | 3 982 | 0.026 054 | 0.039 475 |
| 0.8 | 4 145 | 4 081 | 4 080 | 4 016 | 0.030 642 | 0.031 126 |
| 1.0 | 4 168 | 4 106 | 4 091 | 4 040 | 0.029 529 | 0.024 777 |
| 1.2 | 4 175 | 4 125 | 4 110 | 4 069 | 0.023 809 | 0.019 852 |
| 1.4 | 4 128 | 4 171 | 4 121 | 4 074 | -0.020 94 | 0.022 68 |
| 1.6 | 4 253 | 4 201 | 4 136 | 4 118 | 0.024 304 | 0.008 685 |
| 1.8 | 4 284 | 4 246 | 4 137 | 4 127 | 0.017 662 | 0.004 829 |
| 2.0 | 4 299 | 4 267 | 4 158 | 4 139 | 0.014 832 | 0.009 118 |

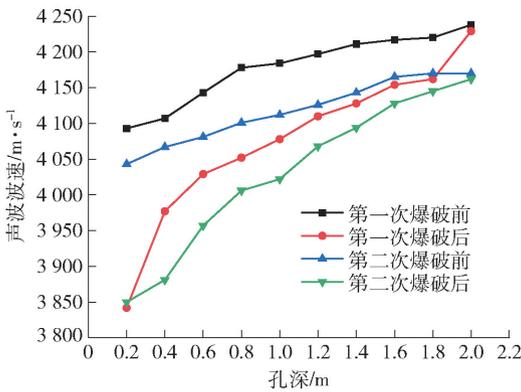


图4 普通药包封堵段声波速度变化规律

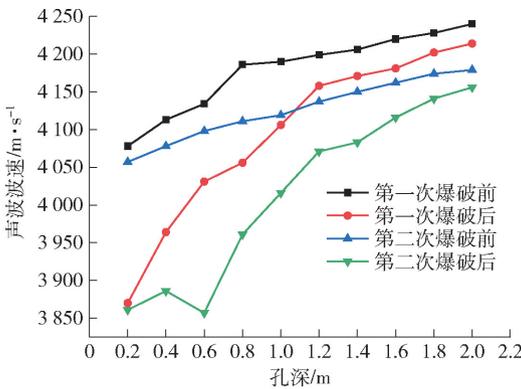


图5 普通药包装药段声波速度变化规律

图8至图11所示为爆破损伤值线性拟合图,通过线性拟合分析,可以非常直观的对爆破损伤情况进行量化分析。由图8、图9可知,切缝药包爆破在封堵段和装药段的损伤明显小于普通药包爆破产生的损伤,且爆破损伤值与孔深深度成负相关关系。由图10、图11可知,药包爆破在装药段产生的损伤明显大于在封堵段产生的损伤,且爆破损伤值与孔深深度成负相关关系。

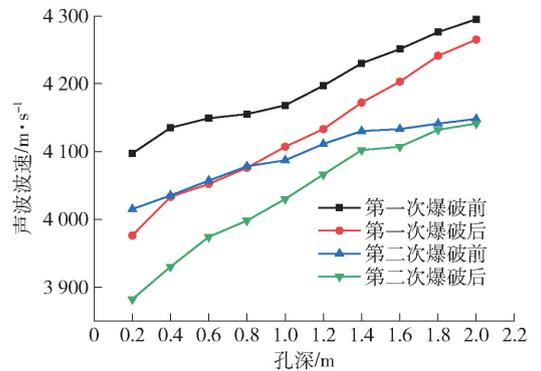


图6 切缝药包封堵段声波变化规律

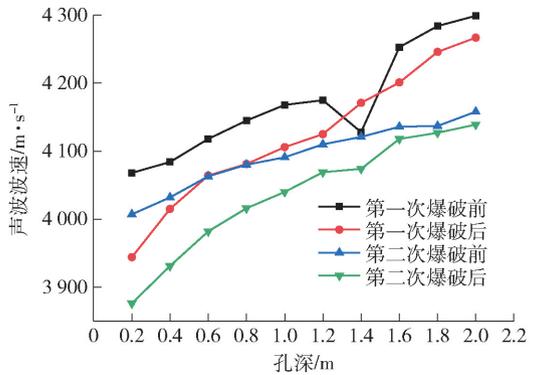


图7 切缝药包装药段声波变化规律

因此可以得到,声速随孔深呈正相关关系,孔深越深,得到的声速值一般也越大,药包堵塞段声速一般小于装药段的声速值,总而言之,孔口附近围岩损伤最严重,孔深越深,损伤程度减小;装药段岩体损伤较非装药段岩体损伤严重,装药附近岩体损伤程度更高。

4 结论

(1)通过测得的数据可知,孔口附近围岩声速变化幅度大于孔底围岩声速变化幅度,由此可知,爆

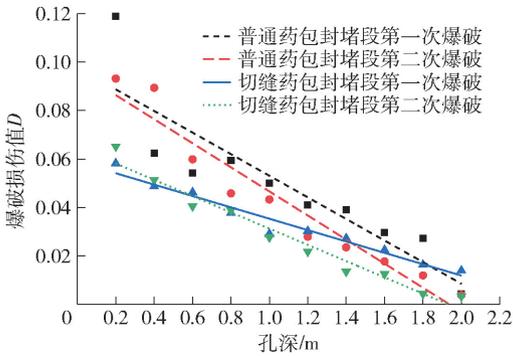


图8 不同药包封堵段爆破损伤值线性拟合图

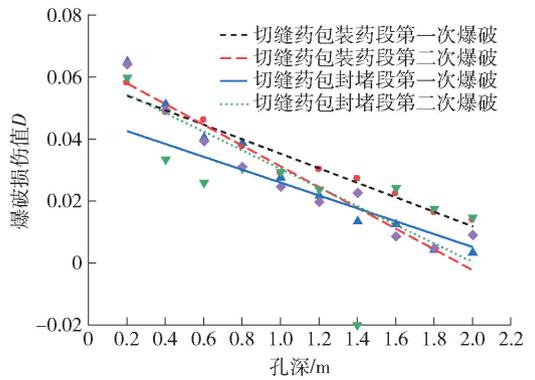


图11 切缝药包封堵段与装药段爆破损伤值线性拟合图

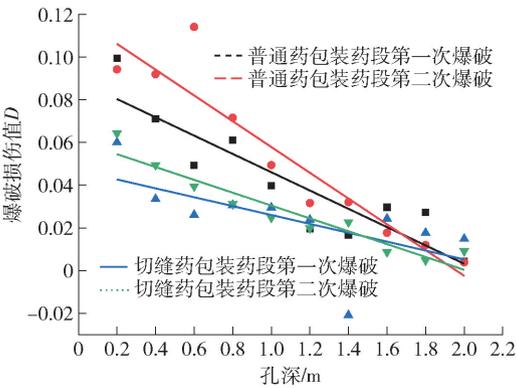


图9 不同药包装药段爆破损伤值线性拟合图

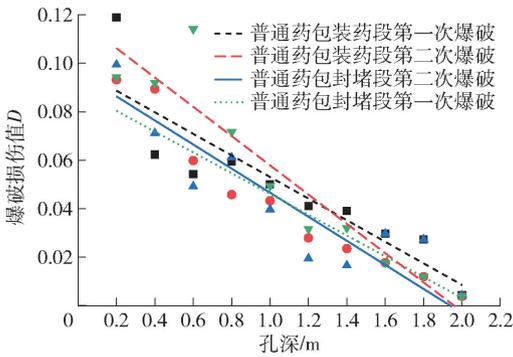


图10 普通药包封堵段与装药段爆破损伤值线性拟合图

源附近和围岩帮部临空面附近围岩损伤程度越高。

(2)普通药包光面爆破时声速的变化量大于切缝药包爆破时孔口周边声速变化量,由此可知,切缝药包爆破对围岩的影响相对普通药包小。

(3)基于试验现场实验结果可知,切缝药包爆破后巷道断面炮孔半眼痕率相对普通药包有明显提高,超欠挖现象降低,对围岩的扰动和破坏明显减少,轮廓平整度提高,周边成型效果更好,围岩稳定性越高。

(4)通过对普通药包及切缝药包爆破震动进行

超声波测试,根据测试结果得出切缝药包爆破震动对围岩的损伤效应较小,切缝开挖爆破具有较好的减振措施。

[参考文献]

[1] 宋肖龙,高文学,季金铭,等. 爆破振动对巷道围岩累积损伤效应的影响[J]. 振动与冲击,2020,39(24): 54-62.

[2] 王海龙,李帅,赵岩. 累积效应下初支混凝土爆破损伤规律研究[J]. 工程爆破,2021,27(4):29-33+50.

[3] 夏文俊,卢文波,陈明,等. 白鹤滩坝址柱状节理玄武岩爆破损伤质点峰值振速安全阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2997-3007.

[4] 曹辉,杨小聪,解联库,等. 某矿岩石力学特性及力学参数相关性研究[J]. 中国矿业,2010,19(7):84-87.

[5] 单仁亮,黄博,耿慧辉,等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验[J]. 爆炸与冲击,2016,36(3):289-296.

[6] 颜峰,姜福兴. 爆炸冲击载荷作用下岩石的损伤实验[J]. 爆炸与冲击,2009,29(3):275-280.

[7] 费鸿禄,杨卫风,张国辉,等. 金属矿山矿柱回采时爆破荷载下采空区的围岩稳定性[J]. 爆炸与冲击,2013,33(4):344-350.

[8] 孟凡兵,林从谋,蔡丽光,等. 小净距巷道爆破开挖中夹岩累积损伤计算方法及其应用[J]. 岩土力学,2011,32(5):1491-1494+1499.

[9] 胡振铎,吴子燕,李政. 喷射混凝土衬砌爆破损伤的数值分析[J]. 矿业研究与开发,2005(5):75-79.

[10] 梁东彪. 周边孔爆破参数对巷道围岩损伤及超欠挖的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[11] 闫长斌. 基于声波频谱特征的岩体爆破累积损伤效应分析[J]. 岩土力学,2017,38(9):2721-2727+2745.

[12] 李健钰,蒲传金,陈贵新,等. 不同位置间隔装药爆破损伤实验[J]. 金属矿山,2017(12):21-27.