

预裂缝宽度对爆破效果影响研究^①

张袁娟¹, 王凤凰², 王幸荣²

(1.河南工程学院 资源与安全工程学院,河南 郑州 451191; 2.湖北宜化集团有限责任公司,湖北 宜昌 443000)

摘要:采用 LS-DYNA 软件建立数值模型,模拟分析了预裂缝宽度分别为 3 cm 和 5 cm 时对爆破效果的影响。结果表明,预裂缝越宽,减振效果越好,相差比例最高可达 46%。选择不同孔径预裂爆破进行现场爆破振动监测试验,验证了数值模拟所得规律的正确性。预裂爆破参数的选取需结合现场实际工况和周围建(构)筑物的保护进行综合分析。

关键词: 预裂缝; 峰值振速; LS-DYNA; 数值模拟; 爆破

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.008

文章编号: 0253-6099(2024)02-0031-03

Influence of Pre-split Fracture Width on Blasting Effect

ZHANG Yuanjuan¹, WANG Fenghuang², WANG Xingrong²

(1.School of Resource and Safety Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, Henan, China; 2.Hubei Yihua Group Co Ltd, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: A numerical model was established by using LS-DYNA software and then used to simulate the influence of pre-split fracture with width of 3 cm and 5 cm, respectively, on blasting effect. It is found that wider pre-split fracture can bring a better effect of blasting vibration attenuation, with the maximum amplitude decay rate of 46%. Based on pre-split blasting tests with different borehole sizes, the on-site vibration monitoring results have verified the correctness of the rule. It is concluded that the parameters of pre-split blasting should be selected based on the actual working conditions in consideration of protection of surrounding buildings.

Key words: pre-split fracture; peak vibration velocity; LS-DYNA; numerical simulation; blasting

预裂爆破有很好的降振效果,对矿山边坡稳定性维护起到了很好的保护作用,已广泛应用于矿山爆破工程中。相关学者对预裂爆破进行了理论研究^[1-4]。本文结合爆破振动和现场爆破振动监测试验,论证预裂缝宽度对预裂爆破降振效果的影响,以期扩充预裂爆破降振作用分析方法。

1 数值模拟理论分析

1.1 数值模拟

选用 LS-DYNA 软件进行数值模拟。该软件可以很好地克服数值模型单元畸变引起的计算困难。进行数值模拟前,为更好地再现现场模拟结果,进行了以下假设:① 数值模拟过程中将岩体视为均质的、连续的岩体;② 只考虑预裂缝宽度的影响,不考虑实际工况

中节理裂隙和结构面的影响,且预裂缝中全为空气,不考虑其中碎石等介质对降振效果的影响。

1.2 炸药参数和控制方程

炸药模型选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型。数值模拟中选用 2 号岩石乳化炸药,根据诸多实际工程所使用的乳化炸药情况,选取具体参数为:炸药密度 1 340 kg/m³,炸药爆轰速度 4 200 m/s。

状态方程选用 JWL 方程,其表达式为:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中 P 为压力,Pa; V 为体积变化; A, B, R_1, R_2 和 ω 均为材料常数; E_0 为初始比内能,GPa。根据实际工况,状态方程中各参数取值分别为: $A=214.4$ GPa, $B=0.182$ GPa,

① 收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 河南工程学院博士基金(D2013022); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B440005); 国家自然科学基金(51104111); 郑州市科技攻关项目(141PPTGG375)

作者简介: 张袁娟(1983—),女,陕西渭南人,副教授,主要研究方向为爆破工程。E-mail: zyj_whut@163.com

$R_1 = 4.2, R_2 = 0.9, \omega = 0.15, E_0 = 4.192 \text{ GPa}$ 。

1.3 数值模拟参数和控制方程

空气选用 LS-DYNA 软件自带的 MAT_NULL 材料, 控制方程选用线性多项式状态方程^[5-9], 其表达式为:

$$P = C_1 + C_2\eta + C_3\eta^2 + (C_4 + C_5\eta + C_6\eta^2)E \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{V_0} - 1 \quad (3)$$

式中 V_0 为初始相对体积; $C_1 \sim C_6$ 均为常数; η 为比体积; E 为内能与初始体积之比。

设置空气参数为: 密度 1.248 kg/m^3 , 黏滞系数 17.456×10^{-6} , $C = 343.7, \gamma_0 = 1.4$ 。

1.4 岩石力学参数

数值模拟中岩石介质选用花岗岩。根据假设, 花岗岩材料为无初应力、连续、均质、各向同性的双线性随动强化弹-塑性体材料。花岗岩力学参数如表 1 所示。

表 1 花岗岩力学参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		切线模量/GPa		泊松比	
2 700		5.5		0.27	
抗拉强度/MPa		抗压强度/MPa		弹性模量/GPa	
静载	动载	静载	动载	静力	动力
2.3	39.3	90	117	20	55

1.5 数值模型建立

根据某露天矿具体工况参数, 选取主爆孔直径 140 mm、最小抵抗线 4 m、台阶高度 10 m、堵塞长度 4 m、炮孔深度 11 m 进行数值模拟, 其中超深选取 1 m。在预裂缝数值模拟模型中, 预裂缝宽度分别为 3 cm 和 5 cm, 主爆孔距离预裂缝 4 m; 采用耦合装药和底部起爆方式, 计算时间设为 0.06 s, 在模型底部建立厚 0.5 m 的岩石作为基岩, 设置侧面和底部为无反射人工边界以减少计算时间和缩小计算模型、提高计算精度。数值模拟建模尺寸如图 1 所示。

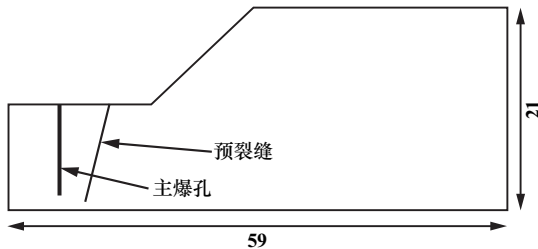


图 1 数值模拟建模尺寸(单位:m)

2 数值模拟结果分析

因预裂缝 3 cm 和 5 cm 两种工况下数值模型划分

单元网格节点不同, 为了后续分析方便, 将模型自坡顶线中心节点依次划分为 D1, D2, D3, D4 和 D5 共 5 个监测点, 以 D1 为基点, 沿炮孔中心轴线剖面, 分别对预裂缝宽度 3 cm 和 5 cm 工况模型以 10 m 为监测距离递进选取相同爆心距节点并对节点峰值振速进行提取。以 3 cm 预裂缝工况数值模型为例, 数值模拟监测点选取如图 2 所示。

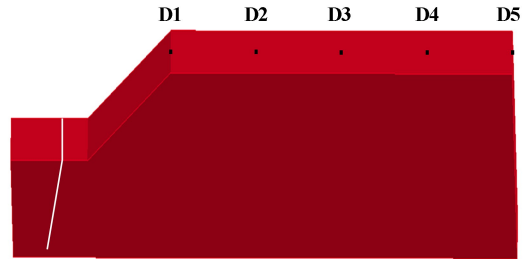


图 2 3 cm 预裂缝数值模型节点选取图

为了更好地阐述两种工况的降振效果差异, 引入相差比例概念, 其计算公式为:

$$B = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中 B 为相差比例; V_i 为预裂缝 3 cm 时的峰值振速; V_f 为预裂缝 5 cm 时的峰值振速。

预裂缝 3 cm 和 5 cm 两种工况下的峰值振速 PPV 见表 2, 两种工况下峰值振速相差比例见表 3。其中 x 方向为水平径向, y 方向为垂直向, z 方向为水平切向。

表 2 不同预裂缝宽度下的峰值振速

监测点	PPV _x /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		PPV _y /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		PPV _z /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	3 cm	5 cm	3 cm	5 cm	3 cm	5 cm
D1	0.538	0.361	0.642	0.541	0.043	0.035
D2	0.487	0.264	0.542	0.482	0.037	0.021
D3	0.392	0.214	0.433	0.391	0.021	0.018
D4	0.274	0.172	0.352	0.273	0.015	0.012
D5	0.142	0.095	0.135	0.092	0.009	0.006

表 3 两种工况下峰值振速相差比例

监测点	$B_x/\%$	$B_y/\%$	$B_z/\%$
D1	34	16	19
D2	46	11	43
D3	45	10	14
D4	37	22	25
D5	33	32	33

由表 2 可知, 预裂缝有很好的降振效果, 离爆源越近, 振动峰值振速越大; 预裂缝越宽, 降振效果越好, 且垂直向峰值振速最大。结合表 3 分析, 两种工况相差比例较大, 水平径向相差比例最大为 46%, 垂直向相

差比例最大为 32%, 水平切向相差比例最大为 33%。

3 现场试验分析

为了更好地分析预裂缝宽度对降振效果的影响, 进行了现场试验。现场试验选择在某露天矿进行, 该矿生产爆破孔径 250 mm, 为大孔径爆破; 且该矿已形成大于 200 m 的高陡边坡, 对降振效果要求较高; 该矿岩石节理裂隙发育, 稳定性较差。为了更好地达到降振效果, 生产爆破临近边坡设置为缓冲爆破加预裂爆破联合使用。由于预裂缝由预裂爆破拉缝形成, 现场试验分别选择在两次生产爆破中进行, 预裂孔孔径分别为 90 mm 和 140 mm, 装药方式为径向不耦合装药, 其余生产爆破参数不变。考虑到实际工况节理裂隙发育, 能量损失较多, 为了保证预裂爆破的成缝效果, 孔径 90 mm 预裂孔使用 50 mm 乳化炸药药卷, 孔径 140 mm 预裂孔使用 70 mm 乳化炸药药卷, 主爆孔最大段起爆药量均为 450 kg, 高差均为 20 m, 不耦合装药系数基本相同。结果表明, 孔径 140 mm 预裂孔形成预裂缝相对较宽。现场测振分别选择在南露天矿平盘 2 和平盘 3 进行, 选用成都中科动态仪器有限公司生产的 EXP4850 爆破振动仪及其配套的速度传感器监测爆破振动, 两种工况下爆破振动峰值振速监测如表 4 所示, 各监测点相差比例结果见表 5。

表 4 现场试验爆破振动峰值振速

监测点	爆心 距/m	PPV _x /(cm·s ⁻¹)		PPV _y /(cm·s ⁻¹)		PPV _z /(cm·s ⁻¹)	
		90 mm	140 mm	90 mm	140 mm	90 mm	140 mm
平盘 2-1	98.76	4.12	2.97	5.74	4.67	2.98	1.77
平盘 2-2	150.95	2.38	1.95	3.24	2.87	1.57	0.86
平盘 3-1	79.58	4.75	3.54	6.48	5.74	3.31	2.68
平盘 3-2	112.67	3.91	2.15	4.62	3.68	2.04	1.18

表 5 现场试验相差比例结果

测点部位	B _x /%	B _y /%	B _z /%
平盘 2-1	27	18	40
平盘 2-2	18	11	45
平盘 3-1	25	11	19
平盘 3-2	45	20	42

由表 4~5 可知, 预裂爆破有很好的降振效果, 实测峰值振速各向相差比例比数值模拟值小, 但规律性相同。这是因为数值模拟中假定岩石为连续、均质的材料, 但实际工况中岩石存在节理裂隙结构面等地质形态。由数值模拟和实测结果分析可知, 预裂缝越宽, 减振效果越好, 但预裂缝宽度由预裂爆破的拉伸破坏

形成, 为得出适宜的预裂缝宽度, 在设计预裂爆破参数时, 一定要综合考虑工况地质条件、边坡稳定性以及爆破周围建(构)筑物的影响。

4 结 论

从数值模拟角度出发, 结合预裂爆破现场试验并进行爆破振动监测, 得出以下结论:

1) 数值模拟结果表明, 距离爆源越近, 爆破峰值振速越大, 预裂缝越宽, 降振效果越好。

2) 两种工况下现场试验结果表明, 数值模拟很好地弥补了爆破振动监测仪器不能靠近爆源的不足, 为现场试验生产预裂爆破生成不同宽度预裂缝的降振效果研究提供了理论依据。

3) 现场试验进一步验证了数值模拟的结论。但由于实际工况中岩石存在节理裂隙等地质形态, 实际监测数据相差比例较数值模拟小, 但规律性相同。

4) 由数值模拟结合现场试验结果可知, 预裂缝有很好的降振效果, 且预裂缝越宽, 降振效果越好。但在实际工况中应结合工况地质条件、爆破对周围建(构)筑物和边坡稳定性的影响进行综合考虑对预裂爆破进行参数设计, 以期达到更好的爆破效果和对边坡、建(构)筑物的有效保护。

参考文献:

- [1] 李 杰, 赵明生, 杜 炼. 露天矿山边坡预裂爆破导向空孔技术研究及应用[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(9): 14-21.
- [2] 张由夫. 坝肩顺层岩边坡开挖预裂爆破参数优化现场试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(9): 15-17.
- [3] 夏钢源, 方建国. 预裂爆破在晋宁磷矿露天坑边坡的应用[J]. 现代矿业, 2021(12): 156-159.
- [4] 张士磊. 预裂爆破作用下节理岩质边坡损伤区测试研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 74-76.
- [5] 张袁娟, 王公忠, 可 杰, 等. 基于数值模拟的预裂缝降振效果研究[J]. 化工与矿物加工, 2015(8): 29-31.
- [6] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 张袁娟. 两条减震沟对爆破振动效应的影响研究[J]. 煤, 2021(1): 8-10.
- [8] 刘玉丰, 方 芳, 李海谦, 等. 不耦合装药结构爆炸孔壁压力分布特性的数值模拟[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 30-33.
- [9] 张袁娟, 王公忠, 任少峰, 等. 不同耦合介质对预裂缝减振效果影响研究[J]. 矿冶工程, 2015(4): 20-22.

引用本文: 张袁娟, 王凤凰, 王幸荣. 预裂缝宽度对爆破效果影响研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2): 31-33.