

高台阶金属矿山爆破研究与应用

Research and Application of Blasting in High-bench Metal Mines

曹俊(山西中条山有色金属集团有限公司, 山西 垣曲 043700)

摘要:随着科技不断发展,数码电子雷管实现任意 ms 设置,本文结合冲击波理论、数值模拟和现场试验的方法对延期爆破应力分布规律进行研究。通过理论计算延期 3~8 ms 创造的自由面较多,爆破效果最佳。紧接着并借助 ANSYS 有限元建立 26 m 高台阶孔内延期爆破模型,基于不同时刻下空气间隔位置处冲击波作用于岩石的能量衰减程度,研究起爆后应力分布的规律。研究得出:孔内延期 3 ms 气体间隔起爆,能量衰减较慢,起到良好的储能缓冲作用;岩体中应力扩散范围大,持续达到破岩强度时间长,应力峰值衰减慢。最后,将理论研究成果运用到现场得到证实。

关键词:高台阶;延期爆破;应力分布;空气间隔

中图分类号: TD235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)01-0041-04

Abstract: With the continuous development of science and technology, digital electronic detonators can achieve arbitrary ms settings. This paper studies the stress distribution law of delayed blasting in conjunction with shock wave theory, numerical simulation and field test methods. Theoretical calculation shows that there are more free surfaces created by delaying 3-8 ms, and the blasting effect is the best. Subsequently, with the help of ANSYS finite element, a delayed blasting model in a bench hole with a height of 26 m was established. Based on the energy attenuation of the shock wave acting on the rock at different air spacings at different times, the law of stress distribution after detonation was studied. The results show that by delaying the detonation in the hole by 3 ms, and the energy decays slowly, which plays a good role in energy storage and buffering; The stress diffusion range in the rock mass is large, the time to reach the rock breaking strength is long, and the stress peak value decays slowly. Finally, the theoretical research results are applied to the field for confirmation.

Key words: high bench; delayed blasting; stress distribution; air spacing

1 前言

由于爆破内部的过程难以可视化,随着科技的发展,计算模拟手段得到很大的应用。相关研究者对延期爆破效果进行深入研究,陈土海,胡帅伟,初少凤^[1]根据振动波的特点,研究装药结构以及微差时间变化对爆破振动的影响。岳中文,张士春,邱鹏,等^[2]采用激光动态焦散线对不同组切缝药包微差爆破孔间裂纹的动态力学行为进行研究。以上文献^[3-7]大多都围绕爆破振动波、冲击波与爆轰波对破碎方面进行各自的研究分析,并多以孔内起爆位置的作用机理和试验分析研究为主,针对高台阶柱状药包孔内微差起爆的应力场规律的变化研究较少。因此,通过合理设置孔内延期时间,充分利用爆

轰波、冲击波碰撞进行调整炸药爆炸能量的分布,分析孔内起爆应力场变化规律指导不同工程的实际需要很有必要性。结合山西某金属矿高台阶扩帮爆破,引用文献^[3]中的冲击波经验公式表示爆炸过程中冲击波超压变化规律,分析其破岩机理,揭示应力场变化规律。

2 延期时间以及破岩理论

面的形成时间为基础,对哈努卡耶夫公式进行孔内延期的计算

$$t = 2w/c_p + w/u_{tr} + s/u_r \quad (1)$$

式中: t ——孔内延期时间;

w ——底盘线;

c_p ——纵波速度;

u_{tr} ——裂缝传播速度;

s ——裂缝宽度;

u_r ——抛掷岩石的平均速度。

延期时间由炸药起爆后应力波往返至临空面所需时间、形成最小底盘抵抗线裂缝长度所用时间、形成宽约 8~10 mm 裂缝所需时间组成。假设起爆

[作者简介] 曹俊(1978-),男,山西垣曲人,采矿工程专业,工程师,主要从事有色金属矿山采矿技术及管理工作。

[基金项目] 山西省科技攻关项目(2016032101504)

[引用格式] 曹俊.高台阶金属矿山爆破研究与应用[J].中国矿山工程,2022,51(1):41-44+76.

后,作用于炮孔单元上的压力 d_p ,任意时刻压力 $p_{(t)}$ 非负数,本文假设爆压为 p_0 , $p_0 = 4\ 000\ \text{kg/cm}^2$ 。结合^[8-9]单排爆破量 $V^p = awH$,其爆破量约为单孔爆破量0.79倍,根据文献^[10-11]逐孔起爆最佳孔内延时控制在10~15 ms,对于岩性坚硬的白云岩本次孔内延期爆破时间约为3~8 ms。

从整体分析岩石破碎:炸药起爆后,瞬间产生冲击波,孔壁处形成粉碎;短时间内衰减为爆炸应力波,应力波作用于岩体中,发生岩体的压缩、剪切和拉伸破坏;在此期间伴有热能的传输,在爆生气体作用下贯通裂隙使得岩体发生膨胀、对裂隙的挤压等综合作用。岩石发生破坏应该满足 Mises 屈服条件为 $\sigma_s \leq [\sigma]$,岩石屈服强度为

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

式中: σ_s ——岩石屈服强度;
 σ_1 ——第一主应力;
 σ_2 ——第二主应力;
 σ_3 ——第三主应力;
 $[\sigma]$ ——Mises 应力。

3 延期爆破模拟与现场验证

建立1/2的高台阶模型尺寸:高度30 m、宽度20 m、纵向深度15 m,坡角75°,具体模型如图1所示。采用cm-g-us单位制,划分约40多万个实体单元网格,并按现场实际建立起爆组合模型:B段延期(3 ms、5 ms、7 ms)+D段底部+B段顶部起爆方式,对爆破后不同时刻冲击波作用岩石的范围、持续达到岩石屈服时间进行定量分析。A是上部堵塞段7 m,B是上部装药段6 m,C是中间填塞段5 m,D是下部装药段8 m。

由许多材料的动力实验研究表明^[12],岩石的动

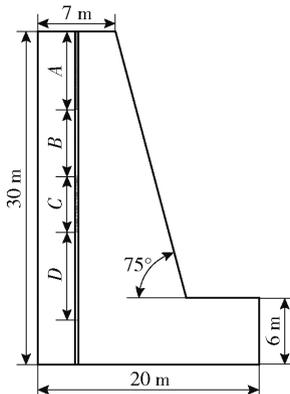


图1 装药结构模型

态屈服应力比静态屈服应力呈指数倍的增加。本文选取 Cowper-Symonds 关系式建立起 Plastic Kinematic 本构模型,表达式为

$$\sigma_Y = [1 + (\varepsilon^*/C)^{1/P}] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p) \quad (3)$$

式中: σ_Y ——岩石动态屈服强度;

ε^* ——应变率;

C, P ——与材料有关的常数, $C = 40, P = 3$;

σ_0 ——初始屈服强度;

β ——可调参数, $\beta = 1$;

E_p ——塑性硬化模量, $E_p = 24\ \text{MPa}$;

ε_{eff}^p ——等效塑性应变。

堵塞物密度 ρ 为 $1.85\ \text{g/cm}^3$,抗拉强度 $E_1 = 1.2\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu_1 = 0.38$,切线模量 $E_2 = 0.1\ \text{MPa}$,屈服强度 $\sigma_p = 0.8\ \text{MPa}$;岩石实体单元设置为*sect-lag,岩石容重 $\rho = 2.43\ \text{g/cm}^3$,弹性模量 $E_3 = 5\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu_2 = 0.30$,抗拉强度 $E_4 = 5.0\ \text{MPa}$,抗压强度 $E_5 = 80\ \text{MPa}$;孔内间隔充填气体采用*sect-ale,采用Mat-Null材料模型^[13-15],其他参数使用默认,状态方程为*EOS-001,表达形式为

$$p = (\gamma - 1)\rho E / \rho_1 \quad (4)$$

式中: p ——压强,MPa;

γ ——绝热指数, $\gamma = 1.4$;

ρ_1 ——空气密度, $\rho_1 = 1.29\ \text{g/L}$;

ρ ——此时密度;

E ——比内能。

通过米海里逊线求得炸药密度 $\rho = 1.2\ \text{g/cm}^3$ 、爆速 $v = 0.4\ \text{cm}/\mu\text{s}$ 。乳化炸药采用JWL状态方程,JWL方程形式为

$$P = A[1 - w/(R_1 V)] e^{-R_1 V} + B[1 - w/(R_2 V)] e^{-R_2 V} + wE/V \quad (5)$$

式中: P ——所要求的压力值;

E ——单位体积爆轰产物的内能, $E = 50\ \text{GPa}$;

V ——爆轰产物的体积大小;

$A = 2.14 \times 10^{11}$,软件中的字母代表常数;

$B = 1.82 \times 10^9$,软件中的字母代表常数;

$R_1 = 4.15$,软件中的字母代表常数;

$R_2 = 0.95$,软件中的字母代表常数;

$w = 0.5$,软件中的字母代表常数。

3.1 孔内延期的确定

模拟参数调试完好,通过改变DYNA中LS功能键进行延期时间间隔为3~8 ms任意设置。为了准确判断岩石能够破坏,根据采场岩样的物理力学测试白云岩平均抗拉强度为5 MPa,并以此抗拉强

度值作为 Mises 应力云图中岩体处于临界或塑性应变状态的判据。图 2 所示为高台阶孔内延期 3 ms 起爆后,不同时刻有效应力变化云图。其他模型应力云图类似,以图 2 起爆描述有效应力云图变化。炸药起爆后,瞬间 0.3 ms 下部药柱出现爆轰源,随后爆轰波自下而上向孔顶呈梨形传播,并且保持于坡面一定角度向坡面传播,伴随爆轰波能量的增加到一定值后衰减,正值应力衰减小于岩石屈服强度

的一刻,上部装药段延期 3 ms 起爆,3.5 ms 时图中红色代表爆轰波的能量弥补下部应力衰减区域,应力波发生碰撞持续到 4.2 ms 后应力呈现减小趋势,最终达到平衡。高台阶孔内延期爆破在不同时刻的 Mises 应力云图的变化情况可知,上、下药柱爆轰波的叠加使得岩体内的应力衰减的速度较前期慢,再加上炮孔内的空气间隔起到延长爆轰作用岩体的时间,使得岩体屈服时间得以延长,达到完美的破岩效果。

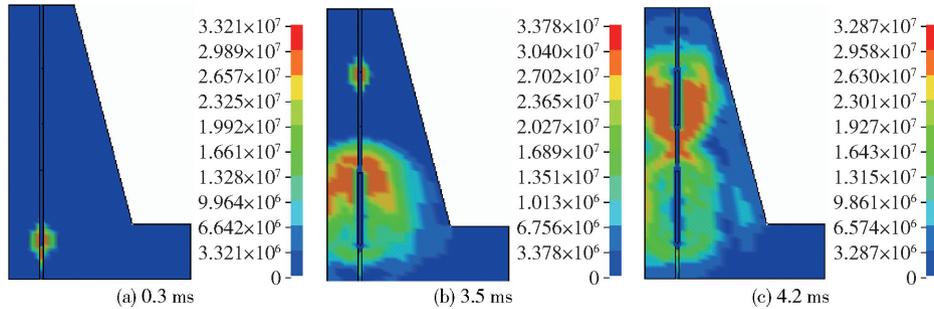


图 2 延期 3 ms 爆破的不同时刻等效应力云图

为定量分析冲击波作用岩体变化规律,在空气间隔段等距间隔取点 H12021 ~ H11981,具体如图 3 所示。而空气间隔段主要起均衡上下两段爆轰气体压力峰值,引导上下药柱段爆炸能量向中间扩展,但气体相对岩体阻力小,所以将能量有效储存在空气段中直到极限释放能量用于破岩,起到延长爆轰气体作用时间;由于该段没有炸药,爆轰能量不足,应力分布相对较少。

该处岩石原本受到衰减的有效应力再次出现叠加增强,起到充分的破岩的效果。4 ms 后,以水波的形式继续传播直至衰减为 0。

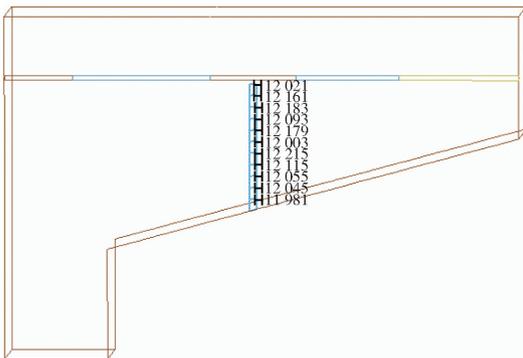
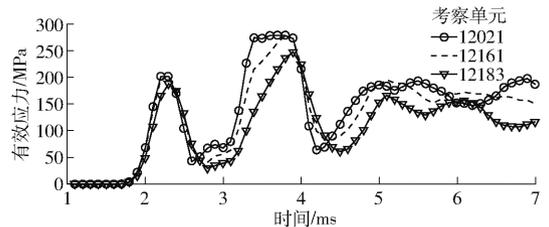
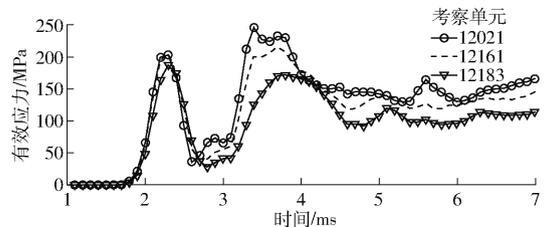


图 3 空气间隔部位等距监测点位置

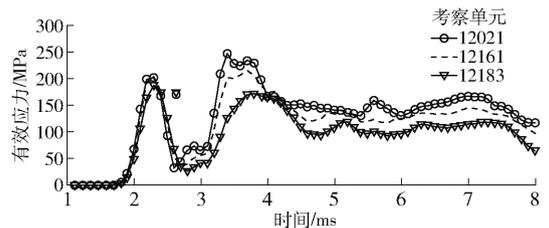
图 4 所示为监测点有效应力曲线变化图,孔内延期 3 ms 可以达到延期 5 ms、7 ms 同等效果,根据图中考察单元的整体变化,炸药起爆后 2 ms 考察单元有效应力出现急剧增长的趋势,大约在 2.3 ~ 2.5 ms 时达到最大值,随后呈下降变化,呈现波浪趋势。3 ms 后,考察单元的有效应力再次出现较第一次峰值大的二次峰值,处于该位置的岩石出现二次破碎,



(a) 孔内延期3ms考察单元有效应力时程曲线图



(b) 孔内延期5ms考察单元有效应力时程曲线图



(c) 孔内延期7ms考察单元有效应力时程曲线图

图 4 监测点有效应力时程曲线变化图

根据三组模型得出各点应力时程曲线,并将考察点达到有效应力峰值采用 Origin 画出变化规律,

具体如图5所示。随着等距监测单元距炮孔距离的增加,有效应力峰值的整体波形均为降低的趋势,直至某点达到平衡,但各考察点有效应力峰值点不尽相同,延期3 ms下考察单元有效应力峰值较延期5 ms、7 ms大;在0~5 m整体波形考察单元的有效应力峰值衰减较5~12 m快,极值点均大于岩体屈服强度。随着考察点距空气柱的距离增大,考察点有效应力峰值下降速率即曲线平缓程度不同,在0~6 m,延期3 ms较5 ms、7 ms曲线斜率大;6~12 m,三条曲线变化基本一致,爆炸后能量的均匀程度最为均匀,有利于爆炸能量的充分利用,结合 Mises 应力云图,最终选取延期3 ms 参数进行起爆。

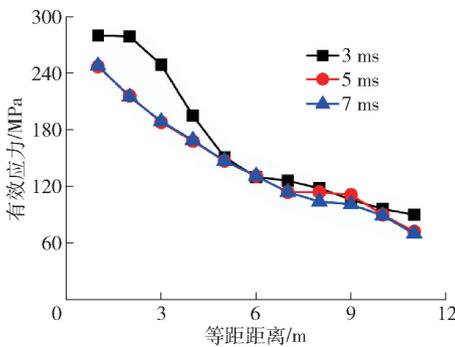


图5 等距监测点有效应力峰值变化图

3.2 现场试验结果

将理论研究成果运用在现场,达到理论与实践进行联系。爆破效果的提升源于技术的提升,山西某金属矿是一座国内超大型现代化露天矿,以 KY-310 型牙轮钻机开采矿山,以 4410 大型电动轮矿车采掘设备为主。为了达到年开采量计划,现需要向北进行扩帮,为提高扩帮效率,通过改造设备,1536-1510 段为原来 12 m 和 14 m 生产台阶并段形成的 26 m 高台阶,平台宽度为 8 m,一次性穿孔。此时孔内装药长度随台阶高度的加大也增加,孔内延期起爆的参数设置仅凭经验确定缺乏理论支撑。本次延期爆破参数采用有限元模拟的最优结果进行起爆。为减弱爆破振动的影响,孔内延期时间设置为 3 ms,排间施行分段起爆。起爆后,现场效果如图 6 所示。

由现场试验结果可看出,大块没有,爆破后块度均匀,整体的块度满足铲车的铲装要求,装车效率由原来的 4'23" 加快到 3'30"。前冲在 20 m 左右,后冲和侧冲由于其它未爆岩体的限制,距离比较小,在 3 m 左右。爆堆整体块度破碎效果较好,爆堆抛掷距离大于 25 m,现场爆破效果具体数据见表 1。



图6 高台阶爆破效果效果图

表1 爆破效果统计表

爆破米道/m	爆破量/t	爆破量/m ³	延米爆量/ t·m ⁻¹
679	163 876	52 962	241.35
单耗/kg·m ⁻³	单耗/g·t ⁻¹	导爆管/发	爆破费用/元
0.171	171	377	122 907

4 结论

在山西某金属矿 26 m 高台阶孔内微差爆破条件下,采用有限元分析三组不同延期时间起爆的模型,得到爆炸后应力场在岩体中的分布规律,并为孔内微差起爆参数的确定提供了强有力的依据,并得到如下结论:

(1)有效应力持续时间较长孔内间隔延期 3 ms 起爆方式,各个考察单元有效应力峰值最大,衰减较慢,作用岩体的时间较充分,可以将岩石充分破毁,达到理论指导现场实践。

(2)由于露天矿山尤其金属露天矿的开采水平逐年下降,露天矿边坡高度随之增加,露天矿边坡滑坡失稳造成重大地质灾害的风险也逐步增加。爆破规模的增大,不可避免的会增加炸药的使用量,爆破振动有害效应也会同时增加,今后的研究应该结合边坡进行参数的确定。

[参考文献]

[1] 陈士海,胡帅伟,初少凤. 微差时间及柱状装药特征对爆破振动效应影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(S2):3974-3983.

[2] 岳中文,张士春,邱鹏,等. 切缝药包微差爆破爆生裂纹扩展机理[J]. 煤炭学报,2018,43(3):638-645.

[3] 张社荣,李宏壁,王高辉,等. 空中和 underwater 爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸效应对比分析[J]. 水利学报, 2015,46(3):298-306.

[4] 胡亮亮,黄瑞源,李世超,等. 水下爆炸冲击波数值仿真研究[J]. 高压物理学报,2020,34(1):1-13.

[5] 谢先启. 精细爆破发展现状及展望[J]. 中国工程科学,2014,16(11):14-19.