

分段装药结构爆破效果的数值模拟研究

胡 涛¹, 李祥龙¹, 关 思², 何丽华³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南民爆昆工爆破工程有限公司, 昆明 650093; 3. 昆明冶金高等专科学校冶金与矿业学院, 昆明 650033)

[摘要] 基于大型非线性动力分析软件LS-DYNA, 选用弹塑性模型*MAT_PLASTIC_KINEMATIC和JWL方程, 建立无限岩体介质中中深孔爆破时连续装药结构和分段装药结构三维模型, 并进行了数值模拟, 再现了两种装药结构爆破过程中的应力发展过程, 对比分析了它们在 Von Mises 有效应力分布、自由面有效应力峰值、孔壁压力分布及加速度等衰减上的差异。结合工程现场爆破实践验证了分段装药结构可以明显改善爆破效果。

[关键词] 中深孔台阶爆破; 分段装药结构; ANSYS/LS-DYNA; 数值模拟

[中图分类号] TU473.1+5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0036-06

1 前言

在露天开采、路堑开挖等台阶爆破作业中, 不同的装药结构(如连续装药、分段装药和径向不耦合装药)会产生不同的爆破效果^[1]。传统的连续装药爆破技术, 炸药主要集中在炮孔下部, 上部岩石由于离炸药太远, 起爆后爆轰能量快速衰减, 不易被破碎, 容易产生大块; 而炮孔下部的炸药又过于集中, 爆轰能量过大易造成过粉碎而不利于运输。为了避免连续装药能量分布不均^[2], 分段装药技术应运而生。在工程实践中主要将炮孔中的炸药分成两段或多段, 相邻两段炸药之间用空气、水或者矿渣(粉)隔开, 采用这种爆破工艺可有效降低岩石大块率, 减少硬底、硬帮和伞檐, 比连续装药的炸药单耗降低50~80 g^[3]。

目前主要采用数值解析解和模型试验等方法研究装药方式对爆破效果的影响, 刘爱华、赵忠信、

石文东等^[4,5]对分段装药的间隔长度, 上下段药量分别占单孔药量的百分比, 以及在不同的位置进行分段进行了研究。A. II. 马柳塔在各段药包之间装填惰性材料或留空气间隔尝试构成分段装药结构, 在现场试验的基础上证明了分段装药可提高矿岩破碎质量, 减少裂缝向岩体深部的延展^[6]。吴从师等通过数学计算得出了填塞料压缩过程中炮孔的 $P-t$ 、 $P-V$ 关系, 并得到了炮孔压力的变化历程图^[7], 但做了过多的假设和简化, 其结果只能反映爆破中的大体趋向。随着计算机技术和理论的发展, 包括无网格法、离散单元法、有限元法、边界元法和有限差分法等数值模拟方法被应用在工程爆破领域, 而LS-DYNA程序适用于高速碰撞、爆炸冲击作用下的大变形等特性, 因此广泛应用于爆炸模拟^[8]。闫国斌^[9]等利用LS-DYNA建立了三维单孔不耦合装药爆破模型, 并进行数值模拟, 再现了不耦合装药爆破的应力发展过程。刘优平^[10]等用LS-DYNA对矿山拟

[收稿日期] 2014-09-01

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51304087); 云南省基金项目(KKSY201404056, KKSA201121083)

[作者简介] 胡 涛, 男, 1991年出生, 云南泸西县人, 硕士研究生, 主要从事工程爆破安全技术方面的研究; E-mail: hutaocug@163.com

采用的不同装药量、不同耦合系数的装药结构建立了数值计算模型,通过分析爆炸仿真过程中的 Von Mises 有效应力信息,结合爆破破岩机制及 Mises 屈服理论,确定了深孔爆破的最佳炮孔装药结构。

本文主要基于动力分析软件 LS-DYNA,对岩石爆破作业中两种不同装药方式(分别采用连续装药和分段装药工艺,其他穿爆参数相同)下的爆破过程进行数值模拟,通过数值仿真计算,将两种工艺下爆破对岩石造成的损伤分布、自由面有效应力峰值、孔壁压力分布曲线以及炸药起爆引起的周围岩石的加速度时程曲线等进行对比分析,深入了解分段装药起爆对改善爆破效果的机理。

2 计算模型与参数

爆破过程涉及炸药介质和岩石介质及炮孔内的空气垫层等在高速碰撞、爆炸和模压等大变形动力下的响应^[8],因此本文采用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力分析软件,分别建立其本构模型并计算。

2.1 岩石模型及材料参数

岩体是一种非连续、非均质、各向异性并且带有不同缺陷的流变介质,很难进行定量分析。严格来说,线弹性模型只能描述岩土介质的初始变形,而在爆炸荷载作用下,被爆岩石先后出现弹、塑性变形。为了合理地描述变形以及破坏规律,本文选用与工程实际具有很好的契合度的 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 弹塑性模型^[11],该模型考虑了材

料的弹塑性性质,并且能够对材料的强化效应(随动强化和各向同性强化)和应变率变化效应加以描述,同时带有失效应变,岩石材料参数见表1。

表1 岩石材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock material

名称	密度 (kg·m ⁻³)	弹性模量 /Pa	泊松 比	屈服应 力/Pa	切线模 量/Pa
白云岩	2.76×10 ³	2.24×10 ¹⁰	0.224	6.23×10 ⁶	1.0×10 ⁷

2.2 炸药模型和状态方程

在数值模拟中,精确描述装药爆轰时的压力变化历程对最终计算结果非常重要,本文采用高能炸药材料 MAT—HIGH—EXPLOSIVE—BURN 和 JWL(Jones—Wilkins—Lee)状态方程描述整个爆腔的动力膨胀。JWL 方程^[8]定义了压力为相对体积和内能的函数,能精确描述爆炸过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性,一般表现为如下形式:

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

式(1)中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为输入参数; V 为炸药相对体积; E_0 为炸药内能。本次数值模拟采用的是1号岩石乳化炸药,其密度为1 200 kg/m³,爆速为4 500 m/s, $k=3$ (见表2)。

表2 1号岩石乳化炸药参数

Table 2 Parameters of 1 rock emulsion explosive

ρ /(kg·m ⁻³)	D /(m·s ⁻¹)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	Ω	E_0 /GPa
1.2×10 ³	4.8×10 ³	293.9	21.73	6.366	2.152	0.206 9	3.14

3 数值计算与对比分析

3.1 有限元计算模型

为了考察两种装药方式爆炸对岩石介质的破坏作用,结合工程实例本文设炮孔孔径为150 mm,孔深为11.5 m,超深1 m。建模时,每个计算域大小为10 m×11 m×15 m(见图1),为了节省计算时间,利用模型的对称性,可取右1/4作为研究对象,大小为5 m×11 m。计算边界条件为:左边界和上边界为对称边界,右边界以及下边界为透射边界。

对于连续装药,装药长度 L 为8 m,炮孔上部用矿渣填塞 L_1 为3.5 m;对于分段装药,11.5 m的炮孔

深度不足以分多段装药,因此采用总装药长度一分为二的二分阶段间隔装药结构,相关文献^[12]推荐间隔长度0.7~1.3 m,本文取两段炸药中间间隔长度 L_2 为1 m,而钻孔内上、下段药量分别占单孔药量的20%和80%^[3],为保证炮孔上部破碎效果,上端填塞高度适当降低, L_1 取3.0 m^[13]。

LS-DYNA 计算时,炸药、填塞与周围岩土之间均采用共节点的 ALE 算法^[10],并且设定药卷上部的堵塞材料参数和周围的岩土参数一致。炸药采用两个起爆点同时起爆方式起爆,连续装药起爆点坐标为(0,2.5,4.5)和(0,2.5,10);分段装药起爆点坐标为(0,2.5,4.5)和(0,2.5,11),考虑到爆炸扩展过程持

续时间,求解时间设置为20 ms,计算过程中每隔0.1 ms

输出一步结果文件,数值模型采用 m-kg-s 单位制。

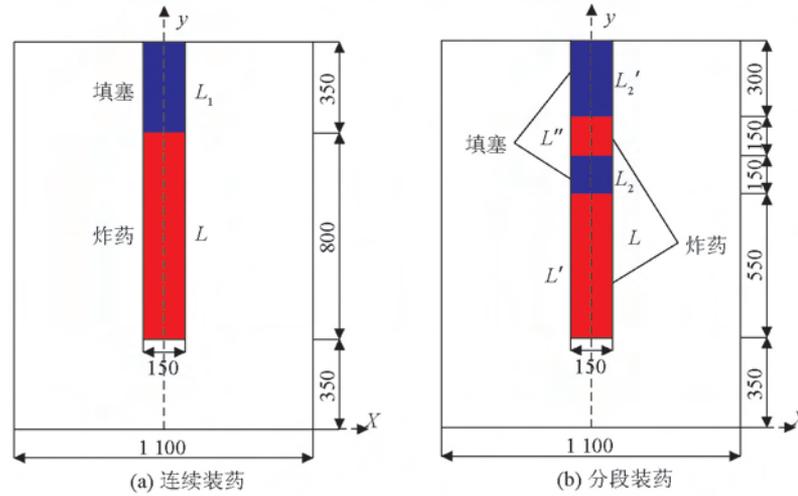


图1 计算域示意图(单位:mm)

Fig. 1 Computational domain representation(unit:mm)

3.2 模拟结果与对比分析

岩石介质在爆破过程中所遵循的屈服准则,借鉴大量爆破工程领域专家的经验^[14],此次模拟用 Von Mises 准则作为岩石介质在炸药爆破过程中所遵循的屈服判定准则,具体就是将材料的动抗拉强度值跟 Von Mises 有效应力做比较,本文屈服应力取 6.23×10^6 Pa。

图2显示了两种装药方式下不同时刻的应力分布情况,可以看出,在药包起爆后,有效应力从药卷

中心传出,以柱面波的形式向四周扩散,无论采用何种装药方式,在炸药外围均形成一个椭圆形的损伤分布区域;对于分段装药, $t=10.2$ ms 时,两段药柱的应力波开始叠加,但采用分段装药时周围岩石介质中的损伤范围以及爆炸中心区的破碎情况均要明显小于连续装药时,这主要是由于中部填塞间隔层对冲击波起到了一个缓冲作用,降低了冲击波的峰值压力。

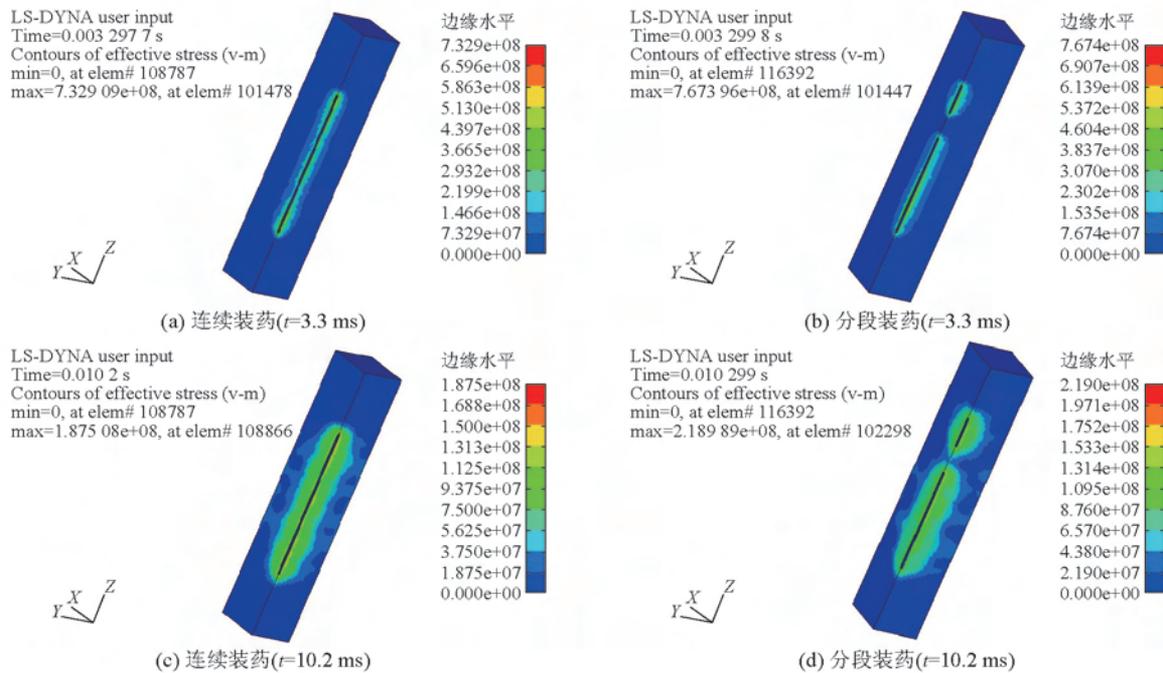


图2 两种装药方式爆破过程不同时刻有效应力场云图

Fig. 2 Effective stress nephogram of blasting process different moments and two charging structures

为确定整个爆破过程炸药对岩石的破坏作用,提取两种装药方式爆破过程中自由面上一系列单元的有效应力时程曲线,获取其峰值应力,然后用该应力值与其动态抗拉强度(即岩石材料屈服应力)比较,当该值大的时候,则此处岩石会产生屈服,当该值小时则此处岩石不能被破坏。为使结果具有可比性,均分别提取 14 个具有代表性的单元,相邻单元之间为等距离,将所获取的数据用曲线形式表示,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,两种装药方式自由面上有效

应力峰值均远远超过了岩石的屈服强度,说明两种装药方式均能达到爆破效果。其中,H150 单元离炮孔最近,因此有效应力峰值最大,H101250 单元距离炮孔最远,有效应力峰值最小,但依然超过了岩石的屈服强度,岩石能够被破坏。从整体上看,采用分段装药方式,自由面的有效应力峰值基本上大于连续装药时,这是由于分段装药时两段炸药之间 1.5 m 的填塞使药柱最上端上升了 0.5 m,使自由面充分利用了爆炸能量,这也是分段装药降低了大块率的根本原因。

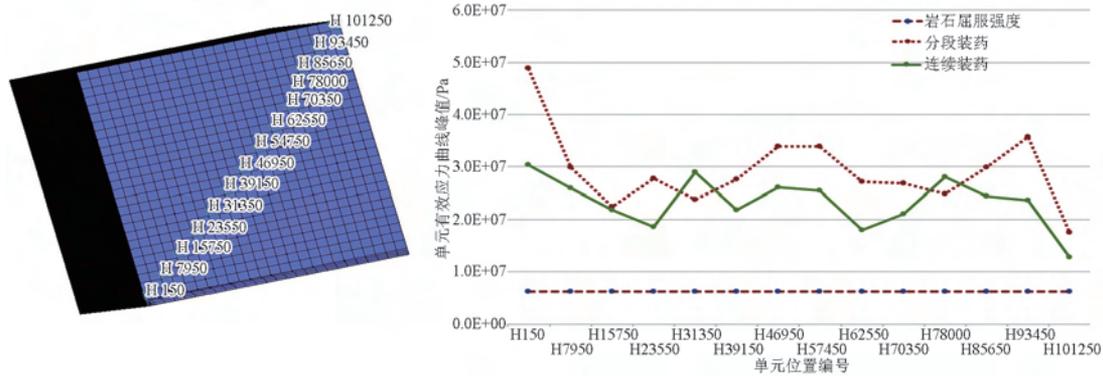


图 3 两种装药方式下自由面一系列单元有效应力峰值曲线

Fig. 3 Effective stress peak curve of units in free surface of two charging structures

图 4 给出了两种装药方式下 H101393 单元孔壁压力-时间曲线图,单元位于炮孔中部。可以看出,对于连续装药,在炮轰的瞬间孔壁压力即达到最大值,然后快速衰减至岩石屈服强度以下;而对于分段装药,孔壁一开始所受压力远小于连续装药时孔壁所受压力,经过一段时间的积累压力才达到压力峰值,较连续装药孔壁压力衰减速度变慢。这是因为,分段装药时中间间隔对爆轰气体能量有一定缓冲作用,从而降低了爆轰产物及应力波作用于孔壁的初始压力,但延长了作用时间,既减少了炮孔周围的过渡破碎,还有利于爆炸能量的有效利用。

吴从师^[7]等通过数学计算也得出:由于中间填塞段和孔口填塞段的压缩,分段装药炮孔的压力急剧下降,然后趋于缓和,压力最低时,只有连续装药炮孔压力的 70% 左右。

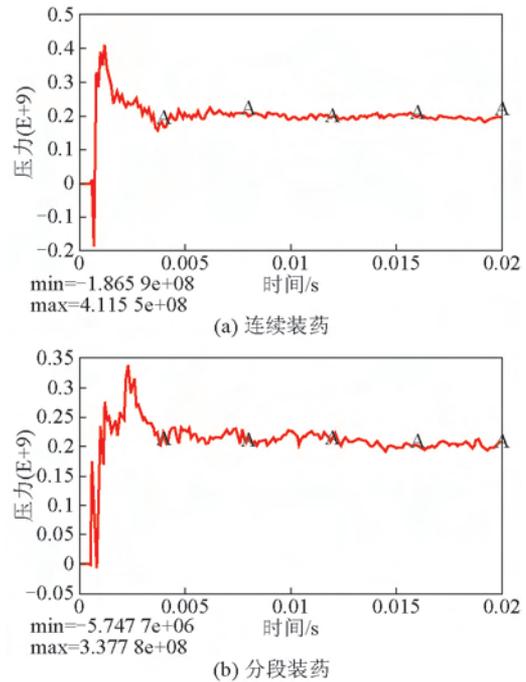


图 4 两种装药方式下孔壁压力时程曲线图

Fig. 4 Time travel curves of bore wall stress of two charging structures

图5给出了炸药爆轰结束后,H110006单元在炸药的巨大爆破冲击下径向上向外的加速度时程曲线,在20 ms计算时间内,连续装药方式下,获取的加速度值很大,峰值达 8.1466×10^6 m/s,几乎为分段装药的20倍,而连续装药情形中,虽然在较长时间内保持有一定值的加速度,但其产生的振动不至于使周围建筑物产生很大的振动破坏。

3 爆破实例与实验结果

云南某矿山爆破作业采用中深孔台阶方式,台阶高度15 m;钻孔设备为阿特拉斯 $\phi 152$ 钻机,孔径以150 mm为主,垂直钻孔,三角形布孔,使用塑料导爆管起爆网路逐孔延期起爆,炸药主要以岩石膨化硝铵炸药为主,2009年3月至2009年8月分别对该矿南帮975、983、991、1004、1010水平进行现场试验,其中部分采用连续装药,其余采用分段装药,布孔和装药参数见表3。

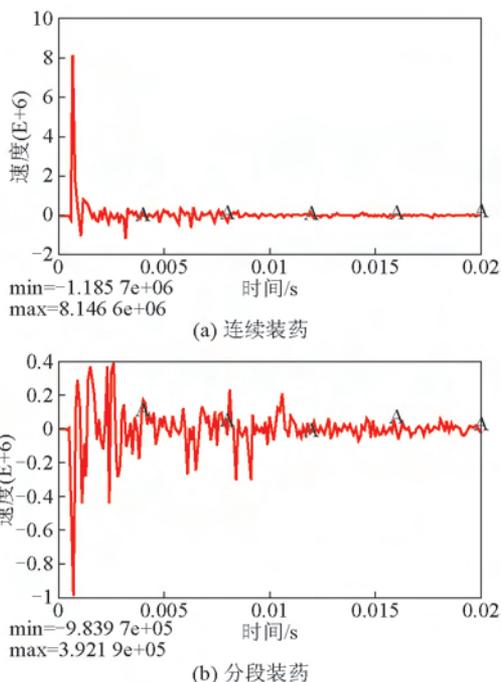


图5 两种装药方式下单元加速度时程曲线

Fig. 5 Time travel curves of unit acceleration of two charging structures

表3 爆区设计孔网参数表

Table 3 Parameters of the blasting hole

参数名称	孔径/mm	孔距/m	排距/m	孔深/m	最小抵抗线/m	装药长度/m	上部填塞长度/m	中部填塞长度/m	炸药单耗/kg
连续装药	150	5.5	5.0	11.5	4.5	8.0	3.5	—	0.28
分段装药	150	5.5	5.0	11.5	4.5	7.0	3.0	1.5	0.25

从最终的爆破效果来看,尽管分段装药方式下的装药量减少了10%~13%,但所有爆区矿岩的破碎质量和台阶底盘状况都属良好,两种不同装药方式爆破下均达到了预期爆破效果,而采用分段装药的实验组爆破过程中噪声较小,无明显震感,未产生较大烟尘与爆破飞散物,从振动观测数据来看,采用分段装药方式比普通连续装药质点振动速度低15%~50%;从爆后现场统计数据来看,采用分段装药结构比采用连续装药结构爆后岩体大块率相对降低76%,其中分段装药组大块率为0.0603%,连续装药组大块率为0.2517%。爆后现场如图6、图7所示。

4 结语

通过对连续装药结构和分段装药结构两种模型的数值模拟计算,结合工程实践应用,得到如下



图6 连续装药结构爆后效果

Fig. 6 Blasting effect of continuous charge

结论。

1)采用分段装药结构台阶底盘状况符合标准,爆下的矿岩块度均匀,质量优良,而且爆堆表面大块比连续装药降低70%~76%。



图7 分段装药结构爆后效果

Fig. 7 Blasting effect of divided charge

2)采用分段装药结构,降低了压缩应力波和爆轰气体产物作用于孔壁的初始压力,监测点压力峰值为连续装药的82.1%,避免了炮孔周围的过渡破碎;但这种压力的有效作用时间较连续装药延长了近10 ms,这大大提高了炸药能量的有效利用率。

3)采用分段装药结构,爆破周围质点振动速度降低了15%~50%,而且炸药装药量减少了10%~13%,为矿山企业带来了较好的社会及经济效益。

参考文献

- [1] 陈先锋,王玉杰.不同装药结构对孔壁压力影响的分析[J].工程爆破,2003(2):16-18.
- [2] 璩世杰,陈广平,尚峰华,等.台阶爆破垂直中深孔间隔装药技术的理论分析与应用[J].工程爆破,1999(4):57-61.
- [3] 赵忠信.分段装药爆破技术在龙门山石灰石矿生产中的应用与改进[J].轻金属,2004(5):9-11.
- [4] 刘爱华.分段装药的间隔长度计算[J].爆破器材,1990(3):22-23.
- [5] 石文东,李柯,周征,等.采用中部分段底部间隔装药方法降低大块率[J].矿业工程,2010(5):46-48.
- [6] A. II. 马柳塔,辛立中.北部采选公司五一露天矿分段间隔装药爆破矿岩的经验[J].国外金属矿山,1996(2):3-5.
- [7] 吴从师,齐宝军,刘宇峰.边坡分段装药炮孔的压力变化与爆破效果[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001(4):414-416.
- [8] LSTC.LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [9] 闫国斌,于亚伦.空气与水介质不耦合装药爆破数值模拟[J].工程爆破,2009(4):13-19,65.
- [10] 刘优平,龚敏,黄刚海.深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用[J].岩土力学,2012(6):1883-1888.
- [11] 夏祥.爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D].武汉:中国科学院研究生院,2006.
- [12] 李继一,李元刚.分段装药在土城子矿的应用及分析[J].中国矿业,2000(S1):209-211.
- [13] 秦入平,顾文彬,李裕春,等.深水岩石钻孔爆破连续与间隔装药爆破效果研究[J].工程爆破,2013(Z1):10-14.
- [14] 周传波.深孔爆破一次成井模拟优化与应用研究[D].武汉:中国地质大学,2004.

Numerical simulation of structure performance under blasting with piecewise charge

Hu Tao¹, Li Xianglong¹, Guan Si², He Lihua³

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Minbao-Kungong Blasting Engineering Co. Ltd., Kunming 650093, China; 3. Faculty of Metallurgy and Mining Engineering, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China)

[Abstract] This paper numerically simulates the stress development and generates a three-dimensional model of the medium-deep hole blasting in infinite rock mass for continuous charge and divided charge in blasting by using the large-scale nonlinear dynamic analysis software LS-DYNA and the elastic-plastic model *MAT_PLASTIC_KINEMATIC and JwL. The difference of the decreasing rate in Von Mises effective stress of blasting, element effective stress peak in free face, the bore wall stress and acceleration are investigated. It is shown that divided charge could greatly improve the blasting effect by engineering blasting practice.

[Key words] moderate long hole bench blasting; divided charge; ANSYS/LS-DYNA; numerical simulation