

文章编号: 1000-7598(2011)12-3812-09

节理几何特征对预裂爆破效果影响的数值模拟

谢冰^{1,2}, 李海波¹, 王长柏^{1,3}, 刘亚群¹, 夏祥¹, 马国伟⁴

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.洛阳理工学院 土木工程系, 河南 洛阳 471003;
3.安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 4.南洋理工大学 土木与环境学院, 新加坡 639798)

摘要:运用有限元软件 AUTODYN 2D 计算爆炸荷载与离散元软件 UDEC 模拟节理岩体相结合的方法研究了节理几何特征对预裂爆破的影响。通过计算可知, 预裂爆破时炮孔间的节理组对预裂成缝的影响明显, 当节理法线与炮孔连线夹角在一定范围内时, 预裂缝沿炮孔连线方向的平直程度随节理与炮孔连线夹角的增大而逐渐趋于平直, 其中当节理组与炮孔连线夹角为 90° 时成缝效果最好, 裂缝与炮孔连线基本重合, 与理论分析较一致; 节理间距对预裂爆破有较大影响, 相同条件下节理间距越小, 越难形成连通裂缝, 减小炮孔间距有利于小节理间距情况下的预裂缝贯通。

关键词: 离散元; 爆炸荷载; 节理岩体; 预裂爆破; 裂缝

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

Numerical simulation of presplit blasting influenced by geometrical characteristics of joints

XIE Bing^{1,2}, LI Hai-bo¹, WANG Chang-bai^{1,3}, LIU Ya-qun¹, XIA Xiang¹, MA Guo-wei⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
4. School of Civil & Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798 Singapore)

Abstract: The result of presplit blasting influenced by geometrical characteristics of joints are combining studied by the software AUTODYN 2D and UDEC. By calculating, the impact of geometrical characteristics of joints can be found through the crack extension between the blasting hole. The straight level of the cracks between the blasting hole are gradually enhanced with the increasing of angle between the joints and the borehole connection; and the angle of 90-degree can get the best result that the crack will be coincided with the borehole connection; and it is also in accord with the theoretical analysis. Joints space has significant impact on the presplit blasting; and the smaller joint space the rock has the more difficult the cracks connected. Reducing the space of boreholes is conducive to form the linked up cracks.

Key words: discrete element method; blasting load; jointed rock mass; presplit blasting; crack

1 引言

预裂爆破作为控制爆破的重要手段在水电工程洞室开挖与隔振、边坡成型以及基坑成型等方面有广泛应用, 预裂爆破的成缝效果、预裂面的平整度对工程质量影响重大, 国内外众多学者针对这一问题进行了广泛研究, 并取得了一些重要成果。肖正学等^[1]通过有机玻璃模型试验研究了断裂控制爆破的裂纹发展规律以及不同爆破方式和装药结构时的

孔壁裂纹扩展速度计算公式; 龚敏等^[2]对松软煤层深孔预裂爆破力学特性进行了数值分析, 研究了因导爆索与乳化炸药传爆速度不同造成的煤层中应力分布差异, 分析了松软煤介质中不同距离抽放孔的位移场变化规律; 孙士国等^[3]、戴俊^[4]、蒋建林等^[5]从不同角度研究了预裂爆破的力学问题与施工效果等。上述研究均是将工程岩体作为均匀连续介质进行考虑的, 与现实情况存在一定差异, 而将工程岩体作为非连续介质考察节理、裂隙对爆破影响的研

收稿日期: 2010-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50809070); 十一五科技支撑计划课题 (No.2008DAB29B00); 河南省教育厅自然科学研究计划项目 (No. 2009B560009)。

第一作者简介: 谢冰, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: rs425@126.com

究多见于研究节理对远区爆炸波的衰减特性影响, 如 Chen 等^[6]、赵坚等^[7]的研究, 而考虑爆破近区节理对于预裂爆破成缝的影响的研究较少。实际工程中炮孔之间存在显著节理的情况是普遍存在的, 其对预裂缝的连通与工程质量影响重大, 如图 1 所示由于节理存在而造成预裂爆破严重超挖的情形出现, 因此, 深入研究节理对预裂爆破的影响很有必要, 但由于目前现场试验条件的限制, 难以寻求含有理想天然节理组的岩体进行系统的研究, 本文尝试采用数值模拟方法利用动力有限元软件 AUTODYN 2D 与离散元计算软件 UDEC 相结合的研究方式对节理影响预裂爆破的关键因素——节理的几何特征对预裂爆破的影响进行研究。



图 1 节理对预裂爆破影响

Fig.1 Impact of joints on presplit blasting

2 节理影响预裂缝成型的理论分析

由于节理的存在必将影响爆炸应力波的传播, 两炮孔连线方向难以形成有效的拉应力而难以贯通成缝, 造成这种情况的影响因素很多, 例如节理的走向、倾向、倾角、节理间距、节理刚度、节理摩擦角、膨胀角、节理抗拉强度、节理中填充物的状态等均会对预裂缝的成型产生影响, 所以进行理论分析难度较大, 在这些影响因素中节理的几何特征影响最大, 即节理的走向、倾向、倾角、节理间距对预裂爆破影响起关键作用, 因为这些几何特征将导致爆炸应力波的传播方向改变, 直接造成炮孔间拉应力区位置改变, 影响裂缝的形成。为了方便研究, 将问题简化为二维情形进行, 如图 2 所示, 其中两炮孔之间设置节理, 其法线与炮孔连线夹角为 β , $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, 节理上存在任意一点 B , 其与炮孔 b_2 中心连线和节理法线夹角设为 β' , 点 B 与炮孔 b_2 中心连线和 $b_1 b_2$ 两炮孔连线之间的夹角为 θ , 假定在 B 位置取单元体, 则当爆破进行时有如图 3 所示的应力状态产生, 根据力学基本原理以及高文学^[8]、张奇等^[9]的研究可知, B 点节理面处单元体的正应力与剪应力分别为

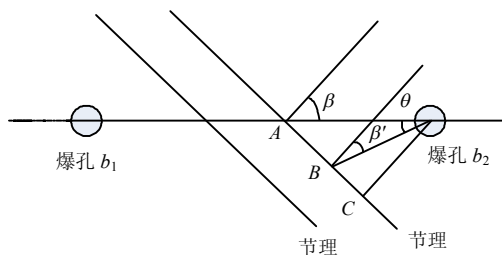


图 2 爆破分析示意图

Fig.2 Sketch of blasting analysis

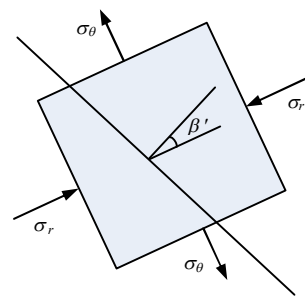


图 3 B 点单元体应力状态

Fig.3 State of stress of unit body at point B

$$\sigma_{\beta'} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \cos 2\beta' \quad (1)$$

$$\tau_{\beta'} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \sin 2\beta' \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = -b\sigma_r \quad (3)$$

式中: σ_r 为径向压应力; σ_θ 为环向拉应力; $b = \frac{\nu}{1-\nu}$, ν 为泊松比。

将式 (3) 代入式 (1) 可得

$$\sigma_{\beta'} = \frac{\sigma_r}{2} [(1-b) + (1+b) \cos 2\beta'] \quad (4)$$

根据图 2 几何关系可知

$$\beta' = \beta - \theta \quad (5)$$

若定义应力状态拉伸为正, 压缩为负, 则令 $\sigma_{\beta'} \leq 0$, 有 $(1-b) + (1+b) \cos 2\beta' \geq 0$, 即

$$-\frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \leq \beta' \leq \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6) 可得

$$\beta - \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \leq \theta \leq \beta + \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \quad (7)$$

当节理处任意点 B 满足式 (7) 所确定的范围时, 其节理处所受应力状态为压应力, 而范围以外的其余部位为拉应力, 当这些部位的拉应力达到一

定程度时节理将发生张开致使压缩波无法通过,即若 $\frac{1}{2}\cos^{-1}\left(\frac{b-1}{b+1}\right) < \beta < 90^\circ$ 时,应力波将有可能无法通过两炮孔连线方向上的节理面,故而无法形成理想预裂缝。在 $0^\circ < \beta < \frac{1}{2}\cos^{-1}\left(\frac{b-1}{b+1}\right)$ 时,由式(4)

可知,当 $\cos 2\beta' = 1$ 、 $\beta' = 0$ 时, $\sigma_{\beta'}$ 出现最大值,亦即当 $\theta = \beta$ 时, $\sigma_{\beta'}$ 为最大值,此时节理面上的点 B 与 b_2 炮孔中心连线即为节理面的法线方向,故而在有节理存在且节理法线与炮孔连线夹角为 $0^\circ < \beta < \frac{1}{2}\cos^{-1}\left(\frac{b-1}{b+1}\right)$ 的条件下,沿炮孔与垂直于节理面方向出现裂纹的可能性最大。

3 数值模型的计算参数

本文所采用的有限元软件 AUTODYN 2D 与离散元软件 UDEC 均各有特点^[10-11]。UDEC 用于研究非连续介质,例如节理岩体、块体等,在静态与动态荷载作用下的响应具有独特的优势^[7, 12],但对于动力分析过程 UDEC 只能在已知初始条件与边界条件作用下使研究对象产生响应,而软件自身不能实现动力荷载的自动产生,故要实现利用 UDEC 进行预裂爆破分析时必须确定炮孔的相应输入荷载,而 AUTODYN 2D 强大的非线性动力计算能力已得到证实^[13-15],同时借鉴 Zhao^[6-7]利用 AUTODYN 2D 及 UDEC 研究爆炸波传播的方法,此次采用 AUTODYN 2D 计算爆炸荷载,然后输入 UDEC 对节理岩体预裂爆破进行研究。

3.1 AUTODYN 2D 几何模型与材料参数

用于计算爆炸荷载的 AUTODYN 2D 模型见图 4,模型为边长 2 m 的正方形岩体,其下边缘设置为对称边界,左、右、上边界均设置为无反射边界,为了模拟工程实际情况,模型下边缘中心设置了工程施工中常用的直径为 90 mm 的爆破孔,因下边缘设置为对称边界,故炮孔模型为半孔。由于所研究问题为平面问题,故装药结构按照径向连续不耦合装药进行处理,炮孔中心设置直径为 32 mm 的 TNT 半药卷,药卷与岩石设置空气域进行耦合,用以实现模拟炸药起爆后爆生产物的膨胀空间以及充分考虑空气冲击波的作用。在此需要说明的是,通常在预裂爆破时选择低爆速炸药,而本研究选用爆速较高的 TNT 炸药进行,其原因一是大型商业软件 AUTODYN 2D 材料模型库中的 TNT 炸药参数精确、可靠性高;二是本次研究的装药不耦合系数较高,计算所得孔壁冲击压力较低,作用时间较长,

见后续图 5,因而符合预裂爆破的基本要求。模拟计算时,岩体采用 Lagrange 网格,空气及炸药采用 Euler 网格。设置炮孔附近的 3 个监测点考察爆破作用下岩体的响应,见图 4,其中 1 号测点为在孔壁位置处,坐标为 (1, 0.045), 2、3 测点均在 1 号测点的正上方,坐标分别为 (1, 0.2)、(1, 0.4)。

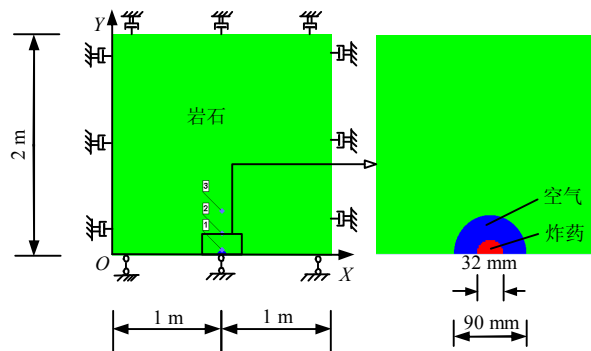


图 4 AUTODYN 2D 计算模型示意图

Fig.4 Sketch of AUTODYN 2D calculating model

根据 Zhu Zhe-ming^[16]的研究,模拟所用岩石材料的状态方程为 Linear 状态方程,即: $p = k[(\rho/\rho_0) - 1] = k\mu$, 其中 k 为体积模量, $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$, ρ/ρ_0 为当前密度与初始密度的比值;研究所选岩石材料为板岩,其力学参数见表 1。

表 1 板岩基本力学参数
Table 1 Mechanical properties of rock mass

密度 ρ /(g/cm ³)	体积 模量 k /GPa	剪切 模量 G /GPa	抗压 强度 σ_c /MPa	内摩 擦角 φ /(°)	黏聚力 c /MPa	抗拉 强度 σ_t /MPa	阻尼比
2.53	36	30.4	133	51	49	13	0.02

空气选用理想气体状态方程,比热比 $k' = 1.4$, 密度 $\rho' = 1.225 \text{ kg/m}^3$; 炸药为 TNT, 其状态方程采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 方程^[10], JWL 方程为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (8)$$

式中: P 为爆炸产生的压力; V 为当压力为 P 时的体积与初始体积的比值; E 为炸药的比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 状态方程参数,具体参数见表 2。

表 2 TNT 炸药基本参数及 JWL 状态方程参数
Table 2 Parameters of TNT and JWL state equation

密度 ρ /(g/cm ³)	爆速 D /(m/s)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E /(GJ/m ³)
1.63	6 930	373.77	3.75	4.15	0.9	0.35	6

经计算可得炮孔壁岩体的爆破冲击压力时程曲线如图 5 中曲线 a 所示, 其最大值为 291.4 MPa, 而安德列夫与别辽耶夫^[17]在研究径向不耦合装药爆破时得到炮孔壁所受冲击压力可按式确定:

$$p = \frac{1}{2(\gamma+1)} \rho D^2 \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 n = \frac{1}{2(\gamma+1)} \rho D^2 \left(\frac{1}{K} \right)^6 n \quad (9)$$

式中: d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径; γ 为绝热指数; K 为装药不耦合系数; n 为爆轰气体碰撞孔壁时的压力增大倍数, 一般取 $n=8 \sim 11$ 。

参照表 2 中炸药的材料参数按照式 (9) 计算可得理论计算孔壁冲击压力约为 217.5 MPa, 此值与数值模拟计算结果稍有差别, 但量级相同, 造成这种差别的原因主要是由于在进行理论计算时爆轰产物按照等熵绝热膨胀考虑, 此时 γ 取值为 3, 造成计算的爆生气体入射压力偏低, 且不耦合系数越大, 计算偏差越大, 所以理论计算结果偏低^[18]。由于相关孔壁爆破冲击压力的理论与试验较少, 精确解不易获得, 考虑到前述分析可知, 数值模拟得到的孔壁冲击压力峰值大小能够较真实地反映孔壁压力峰值, 可满足计算精度的要求。由于炮孔中装药引爆一定时间后, 随着炮孔间贯穿裂纹的形成, 爆生气体将沿裂纹向大气中渗透, 炮孔压力迅速衰减为 0, 故需修正炮孔压力作用总历时, 炮孔作用历时可取为测点振动波的持续时间^[19], 故根据图 6 可知, 数值模拟中的 3 号监测点 Y 向速度时程曲线振动时间约为 0.2 ms, 对数值模拟得到的孔壁压力时程曲线进行修正, 修正后的孔壁压力时程曲线见图 5 中 b 曲线, 后续即以此荷载作为 UDEC 的动力输入荷载。

3.2 UDEC 几何模型与材料参数

在运用 UDEC 进行计算时, 岩体几何尺寸与边界条件见图 7, 图中模型的左下角点坐标为 (0, 0), 右上角点坐标为 (2.4, 3.0), 沿中轴线设置 3 个炮孔, 按照预裂爆破炮孔间距为 7~15 倍炮孔孔径的原则^[20], 设置炮孔间距为 0.8 m, 炮孔中心坐标分别为 (0.4, 1.5)、(1.2, 1.5)、(2.0, 1.5)。由于预裂爆破时, 最为关注的是预裂炮孔连线方向的裂缝成型与贯通, 故定义节理与炮孔连线方向的夹角为 θ , 炮孔连线之间的节理间距为 d , 后续可以通过改变 θ 、 d 的取值考察节理的几何参数对预裂爆破的影响。模型四周边界均设置为黏性边界, 计算时采用 Mohr-Coulomb 模型, 岩石材料基本参数同 AUTODYN 2D, 节理参数取值见表 3。

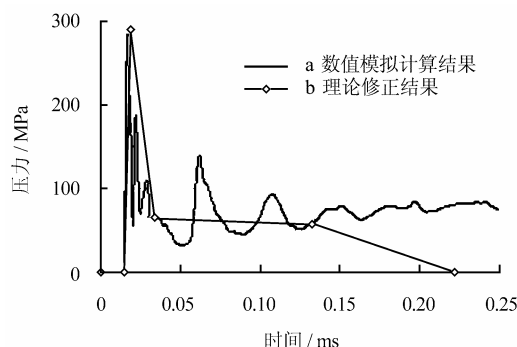


图 5 孔壁压力时程曲线

Fig.5 Time-history curve of borehole pressure

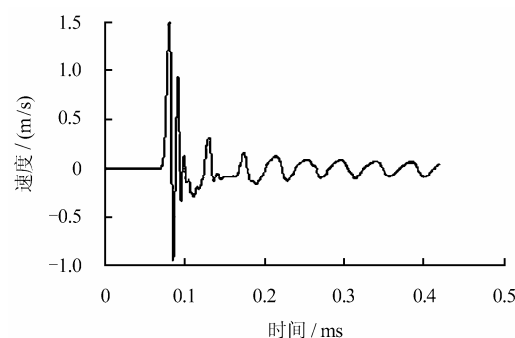


图 6 孔壁 Y 向速度时程曲线

Fig.6 Time-history curve of borehole velocity in Y-direction

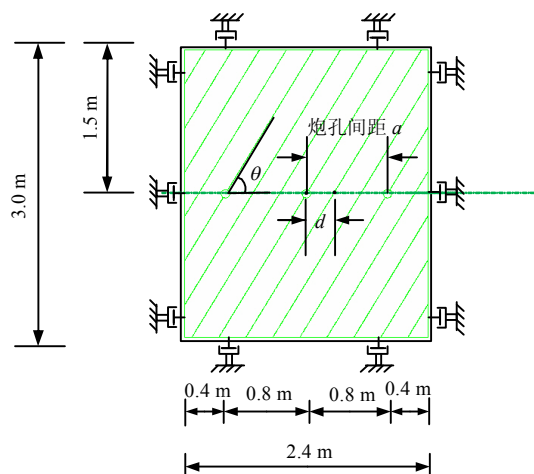


图 7 UDEC 计算模型示意图

Fig.7 Sketch of UDEC calculating model

表 3 岩体节理参数

Table 3 Properties of rock joints

法向刚度 K_n /(GPa/m)	切向刚度 K_s /(GPa/m)	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)	抗拉强度 σ_t /MPa
48	20	3.2	28	2

4 预裂爆破的数值分析

由于节理的存在, 在进行预裂爆破时, 爆炸应

力波在传播过程中遇到节理将产生反射与透射现象, 节理位置反射应力波区域岩体将更加破碎, 更为重要的是透射过节理的应力波将继续做功促成裂缝形成, 故重点需要考察节理存在情况下, 应力波的透射问题。

在研究应力波穿越可滑移节理时, 李夕兵^[21]通过研究得出了应力波穿越节理时透反射关系的精确解, 形式较复杂, 由于本次研究重在考察节理存在对于预裂成缝效果的影响, 而在精确解的解析式中需考虑的因素较多, 参数不易获取, 故采用文献[22]介绍的相对简单的表达式(10)进行研究。

$$T = \frac{A_{\text{joint}}}{A_{\text{intact}}} \quad (10)$$

式中: T 为透射率; A_{joint} 为存在节理时某节点的振动幅值; A_{intact} 为无节理岩体对应节点的振动幅值。

4.1 节理与炮孔连线夹角对预裂爆破的影响

为了考察节理与炮孔连线夹角对预裂爆破的影响, 建立如图 8 所示模型, 无节理以及对应节理与炮孔连线的夹角分别为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° , 每相邻炮孔之间平均设置 2 条节理, 即 $d=0.266$ m。在此, 并未考察节理与炮孔连线成 0° 的情况, 这是因为当节理与炮孔连线夹角为 0° 时节理正好穿越炮孔连线, 由表 1、3 可知, 节理本身的黏聚力、抗拉强度等力学参数数值相对完整岩石的力学参数数值小很多, 故在此种情况下进行预裂爆破必将沿节理位置开裂。为了考察预裂爆破效果在 $(0.4, 1.5) \sim (0.8, 1.5)$ 连线之间设置系列监测点, 通过计算可得各测点的振动速度以及节理后节点的透射率, 见图 9、10。从图 9 中可以观察到当应力波传播至节理面位置处将发生明显的反射现象, 同时造成节理面附近的质点振动速度加大, 而由于节理的存在使得节理后的质点振动速度明显降低。图 10 中可以观察到随着节理角度的逐渐加大, 平均透射率逐渐加强, 其中节理与炮孔连线 90° 夹角时节理后的平均透射率最大, 说明炮孔连线部位节理后的应力随着节理角度的增加而增加, 亦即随着节理夹角的增大, 沿炮孔连线的预裂缝越易形成。图 11 为计算所得的预裂缝成型图, 从图中可以观察到炮孔周围裂缝形成后在跨越节理时, 由于与炮孔连线呈夹角 90° 方向的透射率最大, 所以将优先沿着垂直于这个方向发展, 后与已破坏的节理面连通, 形成裂缝, 从图 11 中还可知, 随着节理与炮孔连线夹角的增大, 裂缝连线将逐渐趋于平整, 即预裂面的形成将趋于平整, 当节理组与炮孔连线夹角为 90° 时, 成缝效果最好,

裂缝与炮孔连线基本重合。以上结论与图 12 中 Worsey^[23]所作的模型试验结果较一致, 同时也与前述理论分析较符合。

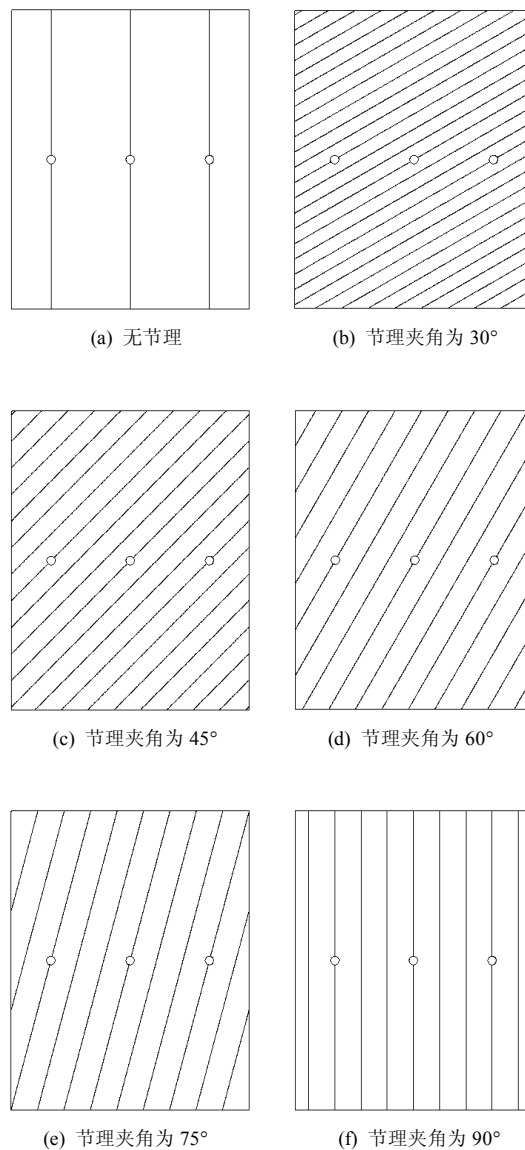


图 8 不同节理夹角岩体模型示意图

Fig.8 Sketch of jointed rock model with different angles

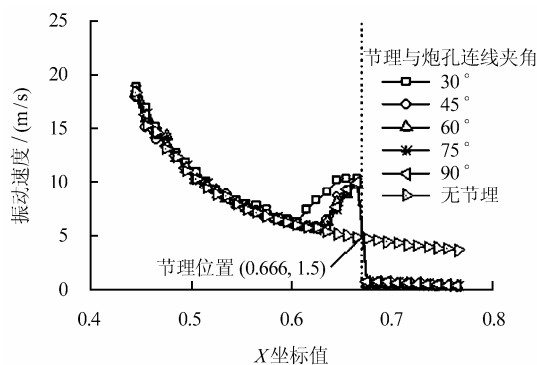


图 9 各测点振动速度

Fig.9 Vibration velocity values of gauges

4.2 节理间距对预裂爆破的影响

炮孔间节理组的不同间距将对预裂爆破产生不同的影响, 在此通过改变炮孔连线方向的节理间距 d 考察节理间距对预裂爆破的影响, 其中 d 按两炮孔之间距离平均设置 1、2、3、4 条节理取值分别为 0.400、0.266、0.200、0.160 m。建立数值计算模型如图 13 所示, 所加爆破荷载曲线同前, 经过计算可得不同节理间距情况下孔间成缝示意图如图 14, 从图中可以看出, 节理间距越小, 即节理密度越大时, 预裂爆破裂缝越难贯通, 在此算例中当炮孔连线方向节理间距为 $d=0.400$ m 和 $d=0.266$ m 时裂缝连

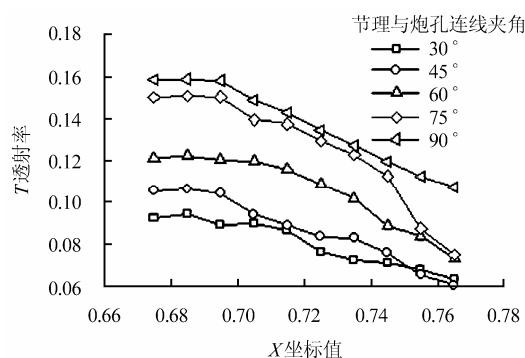


图 10 各测点透射率

Fig.10 Transmission rate of gauges

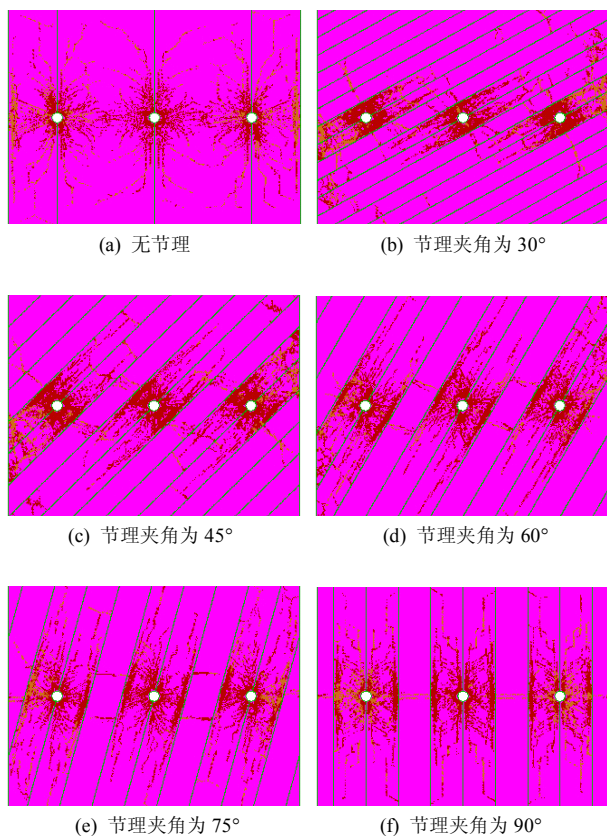
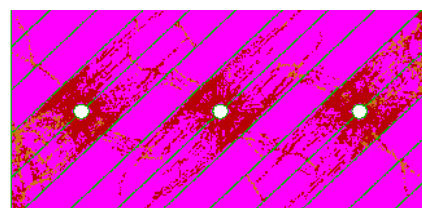
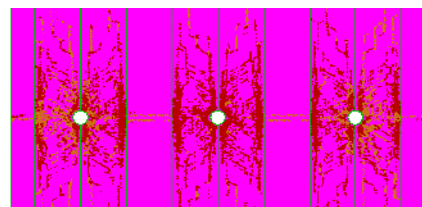


图 11 预裂成型图

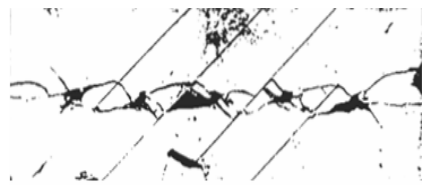
Fig.11 Sketch of presplit effect



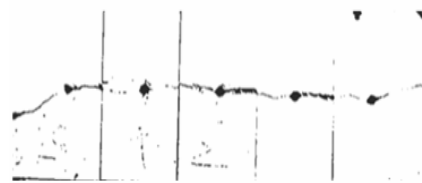
(a) 节理夹角为 45°



(b) 节理夹角为 90°



(c) 节理夹角为 45°



(d) 节理夹角为 90°

图 12 Worsey 预裂爆破模型试验结果

Fig.12 Result of Worsey's presplit test

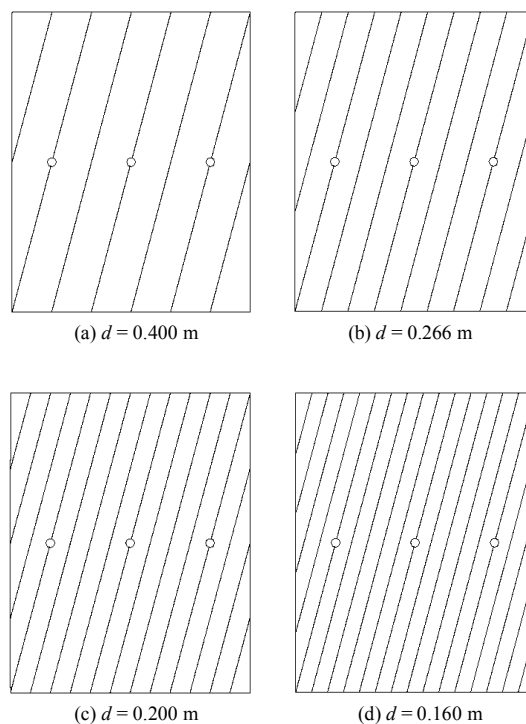


图 13 不同节理间距岩体模型示意图

Fig.13 Sketch of jointed rock model with different joint spaces

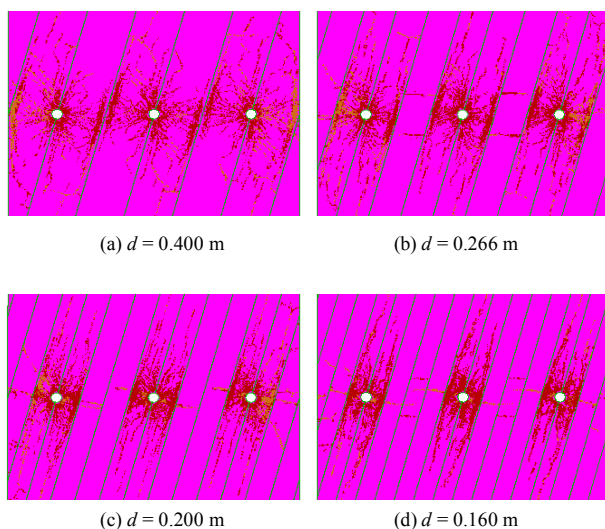


图 14 不同节理间距岩体预裂成型图

Fig.14 Sketch of presplit effect with different joint spaces

通而当间距减小到 $d = 0.200\text{ m}$ 、 $d = 0.160\text{ m}$ 时裂缝未能贯通；同时从图中还可以观察到，当节理间距较大时，炮孔周围的裂纹较稀疏，而节理间距较小时，炮孔周围的裂纹明显变得密集，容易产生粉碎，这是由于节理距离炮孔越近，其节理处的反射应力波越大，此特点从图 15 的炮孔连线区域振动速度曲线也可以观察到，图中当节理间距小时，由于节理的反射作用造成节理周围的振动速度明显比节理间距大时节理周围振动速度大。

由图 14(d)可知，在小间距节理情况下预期想要得到的贯通裂缝未能形成，要想得以预期裂缝，主要手段有二，一是加大炮孔装药量，二是缩短炮孔间距。对于预裂爆破来讲，手段一不可取，因为从图 15 中可知，当节理间距较小即节理距离炮孔较近时，增加药量将更易造成强烈的反射效应，加大破碎区域范围，不利于形成相对平整的预裂面，而手段二在不改变药量的情况下缩短炮孔间距可以改善炮孔间区域的联通效果。为了验证上述分析，通过计算得到图 16 节理间距均为 0.160 m 时不同炮孔间距的裂缝成型图，图 16(a)为炮孔间距取值按照经验公式^[20]进行取值的 8.9 倍炮孔直径情况，图 16(b)为按照经验公式^[20]下限确定的炮孔间距为 7 倍炮孔直径的情况，而图 16(c)按照炮孔间距为 5 倍炮孔直径，从图中可以看到在图 16(a)、(b)情况下裂缝依然未能联通，而图 16(c)情况时裂缝则可以联通。从以上分析可知，在工程实践中当孔间节理分布较密集时，可通过在试验炮基础上及时调整炮孔间距而获得较好的预裂爆破效果。

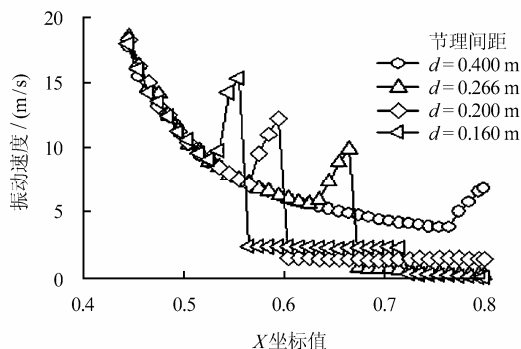


图 15 孔间测点振动速度

Fig.15 Vibration velocity values of the gauge between the borehole

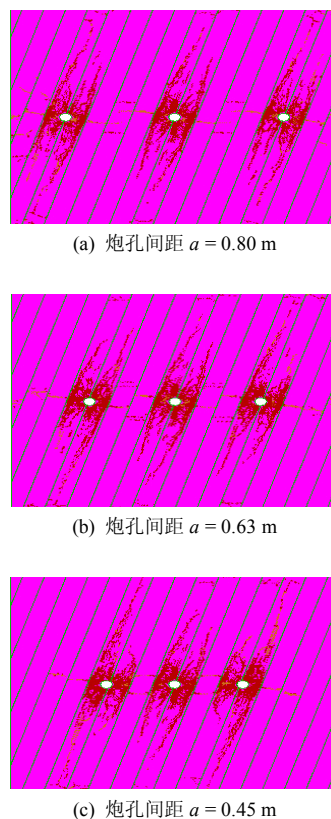


图 16 各测点透射比

Fig.16 Ratios of transmission rate of measured points

5 结 论

(1) 验证了运用有限元软件 AUTODYN 2D 与离散元软件 UDEC 相结合计算爆炸近区节理岩体响应与节理岩体裂纹扩展问题的可行性。

(2) 当节理与炮孔连线的夹角满足一定条件时，由于节理的存在爆炸应力波将可能无法通过炮孔连线，这是造成预裂爆破时由于节理存在而出现锯齿状裂缝的根本原因。

(3) 计算了与炮孔连线成不同角度的节理组对应应力波的影响，结果表明，随节理组与炮孔连线夹

角的增大应力波透射率增强, 预裂成缝逐渐趋于平直, 其中节理与炮孔连线呈 90° 夹角时成缝效果最好。

(4) 节理间距对预裂爆破裂缝贯通有重大影响, 相同条件下节理间距越小越不易形成贯通裂缝, 为了改善爆破效果, 可以通过在场地试验炮的基础上及时调节炮孔孔距进行。

参 考 文 献

- [1] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546—549.
XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, GUO Xue-bin. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 546—549.
- [2] 龚敏, 黄毅华, 王德胜, 等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1674—1671.
GONG Min, HUANG Yi-hua, WANG De-sheng, et al. Numerical simulation on mechanical characteristics of deep-hole presplitting blasting in soft coal bed[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1674—1671.
- [3] 孙士国, 邓婷. 预裂爆破在实际施工中的几大问题分析[J]. 水利水电技术, 2006, 27(6): 36—37.
SUN Shi-guo, DENG Ting. Discussion on problems from presplit blasting in actual construction[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2006, 27(6): 36—37.
- [4] 戴俊. 深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 493—498.
DAI Jun. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2004, 24(6): 493—498.
- [5] 蒋建林, 张耀威. 高碾压混凝土双曲薄拱坝坝基开挖预裂爆破技术[J]. 水利水电技术, 2007, 38(7): 66—68.
JIANG Jian-lin, ZHANG Yao-wei. Pre-splitting blasting technology for foundation excavation of high RCC double-curvature thin arch dam[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2007, 38(7): 66—68.
- [6] CHENG S G, ZHAO J. A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(1): 93—99.
- [7] 赵坚, 陈寿根, 蔡军刚, 等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 31(2): 111—115.
ZHAO Jian, CHEN Shou-gen, CAI Jun-gang, et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2003, 31(2): 111—115.
- [8] 高文学. 非均质含裂隙岩体预裂爆破成缝的理论分析[J]. 爆破, 1990, 31(3): 9—14.
- [9] 张奇. 层状岩体内光面爆破断裂过程的研究[J]. 东北煤炭技术, 1989, 31(2): 29—33.
- [10] ANSYS, Inc. ANSYS AUTOYN Manuals Version 11.0[M]. Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc., 2007.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC(universal distinct element code) user's manual(Version 3.0) [M]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2004.
- [12] CAI J G, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent wave attenuation in rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 661—682.
- [13] THAM C Y. Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D[J]. **Finite Elements in Analysis and Design**, 2005, 41(14): 1401—1410.
- [14] WANG Ming, HAO Hong, DING Yang, et al. Prediction of fragment size and ejection distance of masonry wall under blast load using homogenized masonry material properties[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2009, 36(6): 808—820.
- [15] RYAN S, SCHAEFER F, RIEDEL W. Numerical simulation of hypervelocity impact on CFRP/Al HC SP spacecraft structures causing penetration and fragment ejection[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2006, 33(1): 703—712.
- [16] ZHU Zhe-ming, MOHANTY B, XIE He-ping. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and

- propagation in rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(3): 412—424.
- [17] 徐颖, 宗琦. 地下工程爆破理论与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [18] 杜俊林, 罗强, 宗琦. 空气不耦合装药爆破孔壁冲击压力分析[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 306—310.
- DU Jun-lin, LUO Qiang, ZONG Qi. Analysis of preliminary shock pressure on borehole of air-decoupling charging[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2005, 25(3): 306—310.
- [19] 卢文波, 陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 140—146.
- LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. Theoretical analysis of the pressure-variations in borehole for presplitting explosion[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1994, 14(2): 140—146.
- [20] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [21] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 334—342.
- LI Xi-bing. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress waves[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1993, 13(4): 334—342.
- [22] 石崇, 徐卫亚, 周家文. 二维波穿过非线性节理面的透射性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1645—1652.
- SHI Chong, XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen. Research on transmission behaviors of nonlinear joints with 2D wave propagation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1645—1652.
- [23] WORSEY P N, FARMER I W, MATHESON G D. The mechanics of pre-splitting in discontinuous rock[C]//The 22nd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). [S. l.]: American Rock Mechanics Association, 1981.
-
- 上接第 3811 页
- [8] DOLBOW J, MOES N, BELYTSCHKO T. An extended finite element method for modeling crack growth with frictional contact[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2001, 190(51—52): 6825—6846.
- [9] 郑宏, 江巍. 基于互补理论的非连续变形分析方法[J]. 中国科学 E 辑: 科学技术, 2009, 39(10): 1702—1708.
- ZHENG Hong, JIANG Wei. Discontinuous deformation analysis based on complementary theory[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2009, 39(10): 1702—1708.
- [10] 丁晶. 扩展有限元在断裂力学中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [11] 江巍. 基于互补理论的非连续变形分析方法[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [12] FISCHER A. A special Newton-type optimization method[J]. **Optimization**, 1992, 24(3—4): 268—284.
- [13] ZHENG H, LIU D F, LEE C F, et al. A new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surfaces[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2005, 64(1): 1—16.
- [14] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.