

不同地应力条件下含节理岩体爆破的数值模拟

魏晨慧, 朱万成[✉], 白羽, 龙坤

东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819

✉ 通信作者, E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn

摘 要 将爆破损伤视为爆破应力波和爆生气体压力共同作用的结果, 分别考虑不同的地应力条件(侧压力系数 0.5、1 和 2, 竖直方向地应力 5 MPa 和 10 MPa) 和节理角度(30°、45°、60° 和 90°), 开展含节理岩体双孔爆破过程的数值模拟, 研究爆生裂纹萌生—扩展—贯通过程的演化规律。无节理时, 初始应力场对爆生裂纹的扩展具有一定的导向作用, 裂纹扩展主方向趋于最大地应力方向。节理对裂纹的扩展方向具有一定的影响, 节理角度为 30° 时, 爆生裂纹与节理面连通, 形成典型的“之”字形断裂。节理对裂纹萌生和扩展具有明显的促进作用, 有利于孔壁上下侧裂纹沿竖直方向的扩展。

关键词 含节理岩体; 爆破; 地应力; 裂纹; 数值模拟

分类号 TD235

Numerical simulation of jointed rock mass blasting under different in-situ stress conditions

WEI Chen-hui, ZHU Wan-cheng[✉], BAI Yu, LONG Kun

School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

✉ Corresponding author, E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn

ABSTRACT Two-hole blasting of jointed rock mass under different in-situ stress conditions (lateral pressure coefficient: 0.5, 1 and 2; vertical stress: 5 MPa and 10 MPa) and joint angles (30°, 45°, 60° and 90°) was numerically simulated to study the process of crack initiation, propagation and coalescence. In the simulation, rock damage was induced by stress waves and explosion gas pressure. Simulation results indicate that for rock without a joint, the initial stress field has a guide role on crack propagation, and the crack propagation direction coincides with the maximum compressive principal stress. However, the existing joint has effect on the crack propagation direction. When the joint angle is 30°, the blasting induced crack connects with the joint and forms a “z” shape. The existing joint would play a positive role in promoting crack initiation and propagation and favor crack propagation along the vertical direction.

KEY WORDS jointed rock mass; blasting; in-situ stresses; cracks; numerical simulation

在爆破设计和理论研究中通常将岩石视为均质体, 而实际天然岩体通常都含有不同尺度的层理、节理等不连续面, 岩体的力学特性在不同方向不同部位存在差异, 使得岩石的爆破破碎研究更加复杂, 同时为采用合理爆破参数、优化爆破方案、改善爆破效果带来困难^[1-2]。节理对爆破应力波的影响主要体现在阻隔了

爆破应力波的传播, 使其能量大幅衰减。节理对光面爆破效果的影响则主要与节理角度有关^[3-5]。肖同社等^[6]使用含节理有机玻璃(PMMA)模型的爆破试验表明, 当初始裂纹方向与节理面夹角为 30° 时, 裂纹没有穿过节理面继续向前扩展, 而在节理一侧产生一条次生裂纹。Singh 和 Sastry^[7]的试验结果表明, 爆破的平

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304037, 51374049, 51525402); 中国博士后科学基金资助项目(2013M541238); 中央高校基本科研业务费资助项目(N140104007, N140105001)

均块度受结构面与自由面交角的控制, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 随着交角的增大, 平均块度也增大。

另一方面, 在深部地下爆破工程中, 地应力水平大大增加, 初始静态地应力场的效应不能忽略, 岩石爆生裂纹的演化规律将发生改变^[8-11]。谢源^[12]对不同高应力条件下岩石爆破试验的研究表明, 爆破主裂纹的扩展方向不是在主应力线上, 而是与最大主应力成一定角度, 主裂纹以及裂纹总长均随附加载荷的增加而减小。王长柏等^[13]基于理论推导和 ABAQUS 动力有限元计算分析了不同埋深和侧压力系数条件下岩石爆破裂纹的扩展规律。计算结果表明: 随着初始应力的增大, 裂纹扩展半径减小; 随着侧压系数的增大, 岩石有效破碎面积也相应减小; 裂纹扩展主方向趋于最大压应力方向。杨建华等^[14]基于 LS-DYNA 的数值模拟结果表明, 爆炸荷载作用下, 围岩主要表现为拉损伤, 围岩地应力对爆破张拉效应起到非常敏感的“抑制”作用, 围岩爆破累积损伤范围随着应力增加而明显减小。

本文基于已有爆破损伤模型^[15-17], 分别考虑不同的地应力条件和节理角度(节理面与炮孔连线的夹角), 开展双孔爆破过程的数值模拟, 研究地应力条件和节理角度对爆生裂纹萌生和扩展过程的影响机理。

1 数值模型

关于爆破损伤模型, 在文献[15-17]中已有详细介绍。本节所建数值模型见图 1, 模型尺寸为 $12\text{ m} \times 12\text{ m}$, 在其中开挖两个直径为 0.1 m 的圆形炮孔, 孔间距 3 m 。两炮孔间存在一张开型(空)节理。岩石试样的密度为 $2650\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 细观单元弹性模量为 70 GPa , 单轴抗压强度为 157 MPa , 抗拉强度为 15.7 MPa , 泊松比为 0.2 。

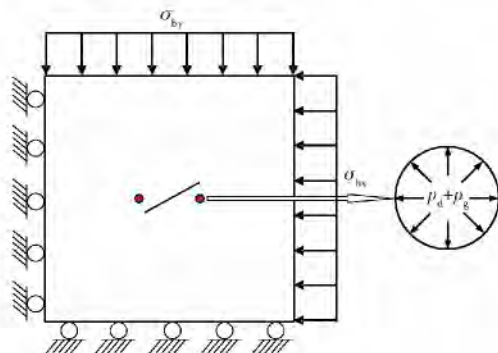


图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

对于动力学分析, 模型四周为透射边界, 孔壁施加爆破应力波 p_d 。对于静力学分析, 模型底部及左侧采用位移约束, 右侧施加水平地应力 σ_{bx} , 上部施加垂直方向地应力 σ_{by} , 孔壁施加爆生气体准静态压力 p_g 。爆破应力波和爆生气体压力的加载曲线见图 2。

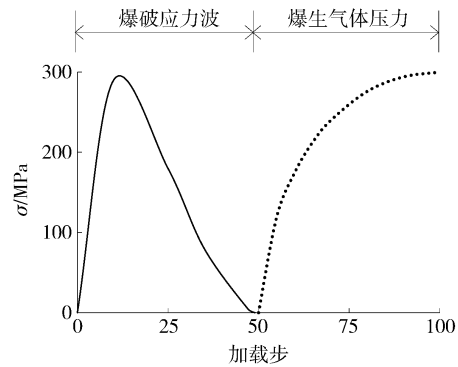


图 2 爆破应力波与爆生气体压力加载曲线

Fig. 2 Load curve of blasting stress waves and explosion gas pressure

为了分析地应力条件和节理角度对裂纹扩展及爆破效果的影响, 在数值计算中, 侧压力系数 λ 分别设置为 0.5 、 1 和 2 , 垂直方向地应力 σ_{by} 分别设置为 5 MPa 和 10 MPa (对应埋深约 200 m 和 400 m), 同时分别设置无节理及节理角度为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 五种情况。

2 模拟结果与分析

2.1 侧压力系数 $\lambda = 0.5$ 时爆生裂纹演化过程

图 3 为侧压力系数 $\lambda = 0.5$ ($\sigma_{by} = 5\text{ MPa}$, $\sigma_{bx} = 2.5\text{ MPa}$) 无节理及节理角度分别为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时, 孔壁周边裂纹在爆破应力波及爆生气体压力作用下的完整演化过程。前 50 步是爆破应力波动态作用阶段, 50 ~ 100 步是爆生气体准静态压力作用阶段。

由图 3(a) 可以看出, 无节理时, 在爆破应力波和爆生气体压力作用下, 在孔壁周边形成一压碎区 (Step 25)。同时由于侧压力系数 $\lambda = 0.5$ 时, 孔周均处于压应力状态, 不利于径向拉伸裂纹的萌生与扩展, 最终仅在压碎区之外形成一径向微裂纹区 (Step 100)。

由图 3(b) 可见, 当两炮孔间存在一 30° 角的节理时, 在爆破应力波作用阶段, 孔壁周边形成一压碎区 (Step 25), 而压碎区之外的径向微裂纹在扩展过程中有向节理端部方向延伸的趋势 (Step 50)。在爆生气体压力作用阶段, 竖向裂纹沿原方向进一步扩展 (Step 60), 靠近节理面一侧的裂纹 (左侧炮孔下部的竖向裂纹和右侧炮孔上部的竖向裂纹) 在扩展过程中继续向节理端部方向偏斜, 最终与节理连通, 而背离节理面一侧的裂纹 (左侧炮孔上部的竖向裂纹和右侧炮孔下部的竖向裂纹) 在扩展过程中也向节理面方向偏斜, 最终形成典型的“之”字形裂纹 (Step 80, Step 100)。

当节理角度为 45° 、 60° 和 90° 时, 在爆破应力波作用阶段, 与图 3(b) 类似, 爆生裂纹沿垂直方向扩展较为明显 (Step 25)。之后在爆生气体压力作用阶段, 由于节理端部与炮孔距离增大, 最终爆生裂纹未能与节理连通 (Step 100)。

进一步对比图 3 中不同节理角度时爆生裂纹的最

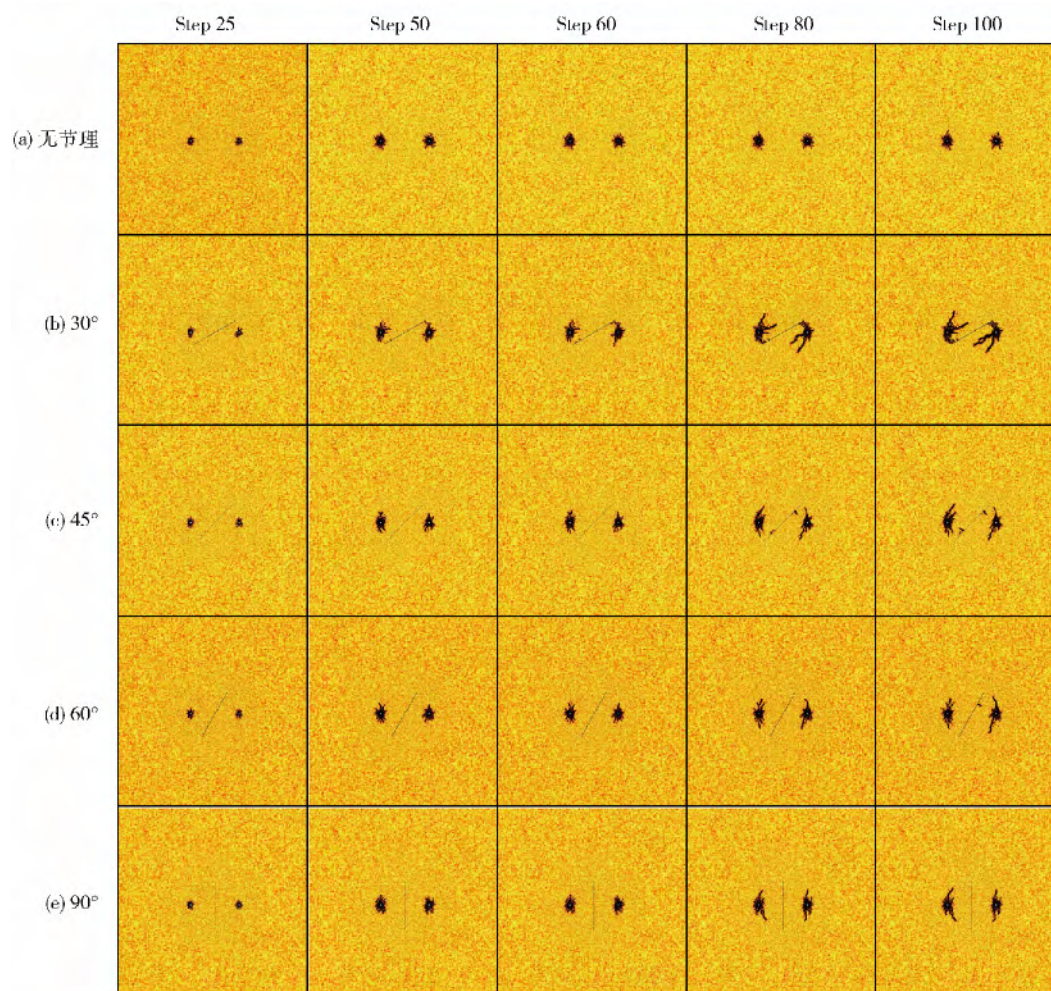


图3 侧压力系数 $\lambda = 0.5$ ($\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_{bx} = 2.5 \text{ MPa}$) 时含节理岩体爆生裂纹演化过程

Fig. 3 Evolution of blasting induced cracks in jointed rock with the lateral pressure coefficient λ of 0.5 ($\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_{bx} = 2.5 \text{ MPa}$)

终分布形态可以看出: 侧压力系数 $\lambda = 0.5$ 时, 与无节理相比, 当炮孔间存在节理时, 竖向裂纹延伸更长, 即裂纹扩展主方向趋于最大地应力方向, 最终的裂纹区面积也更大; 节理角度为 30° 时对爆生裂纹的影响最大, 爆生裂纹与节理面连通, 形成典型的“之”字形断裂。

2.2 侧压力系数 $\lambda = 1$ 时爆生裂纹演化过程

图4所示为侧压力系数 $\lambda = 1$ ($\sigma_{bx} = \sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$) 无节理以及节理角度分别为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时, 孔壁周边裂纹在爆破应力波及爆生气体作用下的完整演化过程。

对比图4(a)和图3(a)可以看出, 无节理时, 爆破应力波和爆生气体压力的致裂效果都不明显, 最终仅在孔壁周边形成小范围的压碎区和径向微裂纹区, 径向主裂纹区不明显, 两孔间裂纹也远没有贯通。这是由于侧压力系数 $\lambda = 1$ 时会在孔壁周边形成压应力区, 与应力波和爆生气体产生的环向(切向)拉伸应力相反, 抑制了拉伸裂纹的萌生与扩展。

由图4(b)可以看出, 当两炮孔间存在 30° 角的节

理时, 在爆破应力波作用阶段, 首先在孔壁周边萌生径向微裂纹(Step 25), 之后垂直方向的裂纹进一步扩展延伸, 而水平方向的裂纹则扩展不明显(Step 50)。这是由于节理的存在改变了节理周边的应力场分布, 爆破应力波传至节理面发生反射形成拉伸应力, 对靠近节理一侧爆生裂纹的扩展具有促进作用, 而靠近节理一侧爆生裂纹的扩展也进一步促进了背离节理一侧爆生裂纹沿垂直方向的扩展。在爆生气体压力作用阶段, 靠近节理面一侧的裂纹继续扩展并向节理端部方向偏斜, 最终与节理连通, 而背离节理面一侧的裂纹在扩展过程中也向节理面方向偏斜, 最终形成与节理面几乎平行的主裂纹。

当两炮孔间存在 45° 或 60° 角的节理时, 在爆破应力波作用阶段, 与图4(b)类似, 首先在孔壁周边萌生几条径向微裂纹(Step 25), 其中垂直方向的微裂纹扩展较明显(Step 50)。在爆生气体压力作用阶段, 原有竖向裂纹进一步扩展(Step 60), 其中靠近节理面一侧的竖向主裂纹在扩展过程中向节理端部偏斜, 而背离节理面一侧的竖向主裂纹在扩展过程中也向节理方向

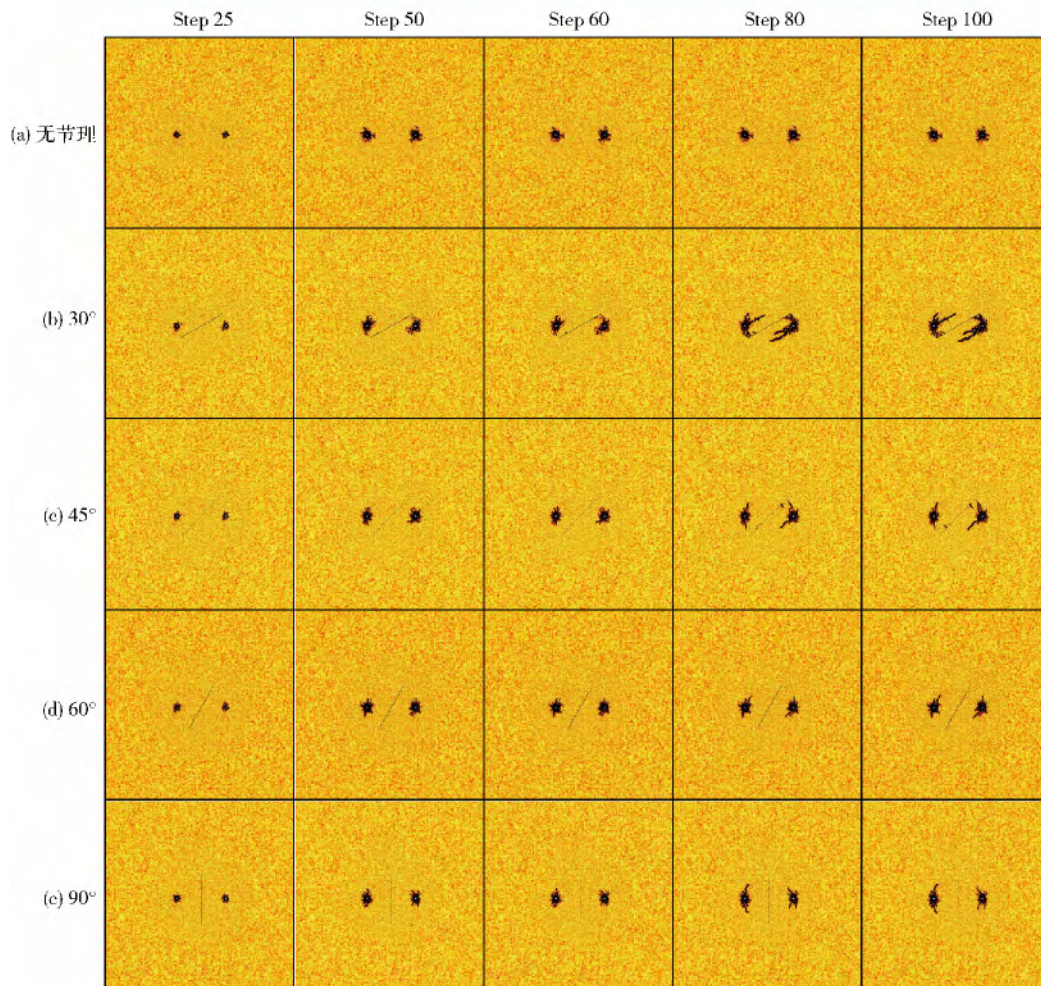


图4 侧压力系数 $\lambda = 1$ ($\sigma_{hx} = \sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$) 时含节理岩体爆生裂纹演化过程

Fig. 4 Evolution of blasting induced cracks in jointed rock with the lateral pressure coefficient λ of 1 ($\sigma_{by} = \sigma_{hx} = 5 \text{ MPa}$)

偏斜,最终走向与节理面近乎平行(Step 100)。

当两炮孔间存在一 90° 角的节理时,对比图 4(e) 与图 4(a) 可以看出,在爆破应力波和爆生气体准静态压力的整个作用过程中,节理端部对爆生裂纹的扩展具有明显的导向和促进作用,最终在孔壁上下侧形成较为明显的竖向裂纹。

进一步对比图 4 中不同节理角度时爆生裂纹的演化过程可以看出:当初始地应力为静水压力状态时,炮孔周围岩体受压应力作用,不利于爆生裂纹的萌生与扩展;与无节理相比,当节理角度为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时,节理对爆生裂纹的扩展具有明显的导向作用,促进了孔壁上下侧裂纹沿竖向方向的扩展,最终形成的裂纹区面积也更大。

2.3 侧压力系数 $\lambda = 2$ 时爆生裂纹演化过程

图 5 所示为侧压力系数 $\lambda = 2$ ($\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_{hx} = 10 \text{ MPa}$),无节理以及节理角度分别为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时,孔壁周边裂纹在爆破应力波及爆生气体作用下的完整演化过程。

由图 5(a) 可见,无节理时,在孔壁周边萌生径向

拉伸裂纹,其中水平方向的裂纹扩展较为明显,而竖直方向的裂纹扩展则受到限制(Step 100)。这是由于当侧压力系数 $\lambda = 2$ 时,水平方向地应力大于竖直方向地应力,这种压应力不利于裂纹的萌生与扩展,因此竖向裂纹与水平裂纹相比受到更大的限制。

由图 5(b) 可以看出,当两炮孔间存在 30° 角的节理时,在爆破应力波作用阶段,爆破应力波传至节理面发生反射形成拉伸应力,在节理距炮孔最短距离位置萌生局部损伤(Step 50)。在爆生气体压力作用阶段,之前由应力波传至节理时发生反射引起的拉伸损伤进一步诱导两炮孔间爆生裂纹向节理端部方向继续扩展并与节理连通(Step 60, Step 80),而背离节理面一侧的裂纹则在扩展过程中向节理方向偏斜,形成与节理面近乎平行的裂纹(Step 100)。

当节理角度为 45° 、 60° 和 90° 时,在爆破应力波作用阶段,与图 5(a) 相比,由于节理对初始应力场的影响,地应力对爆生裂纹的导向作用减弱,最终在孔壁周边形成若干条径向微裂纹(Step 50)。在爆生气体压力作用阶段,靠近节理面一侧的微裂纹进一步向节理端

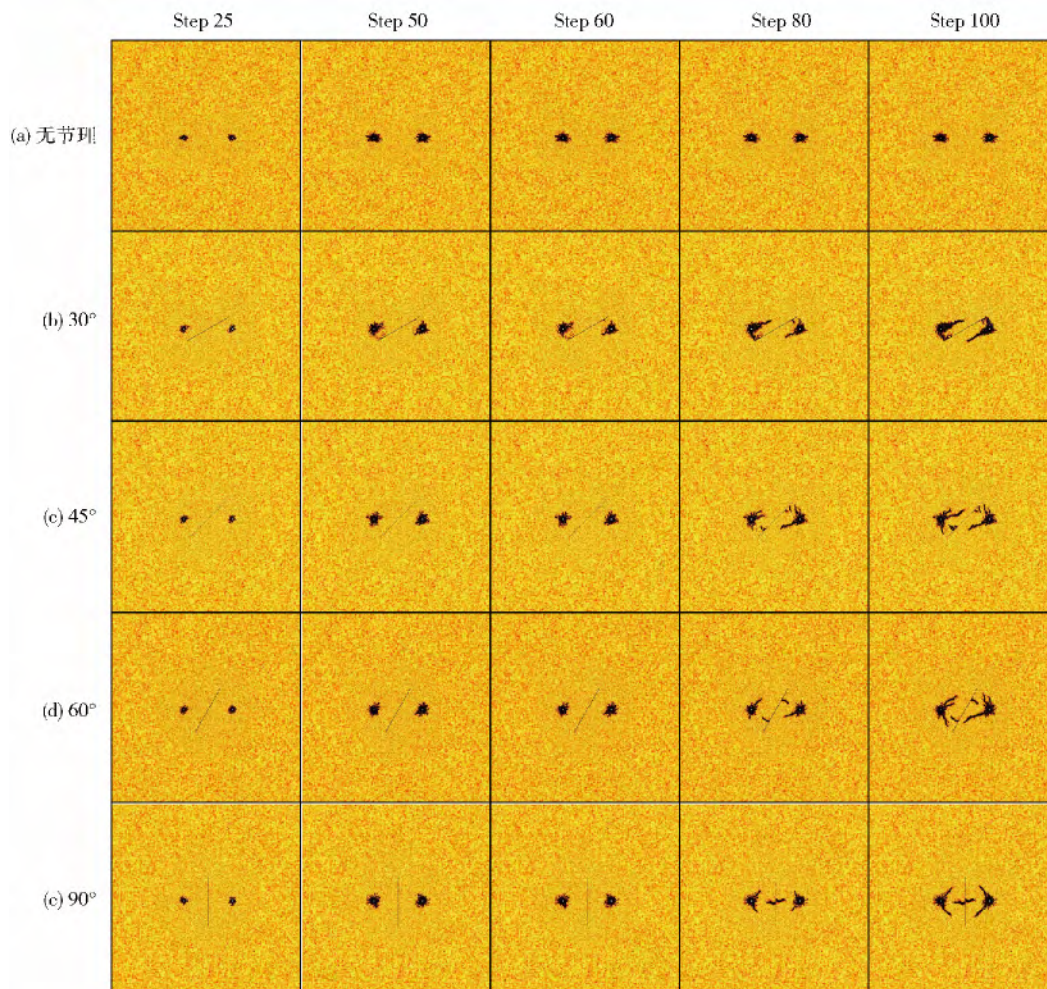


图5 侧压力系数 $\lambda = 2$ ($\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_{bx} = 10 \text{ MPa}$) 时含节理岩体爆生裂纹演化过程

Fig. 5 Evolution of blasting induced cracks in jointed rock with the lateral pressure coefficient λ of 2 ($\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$, $\sigma_{bx} = 10 \text{ MPa}$)

部方向扩展(Step 80),而背离节理面一侧的裂纹则没有得到充分扩展。

进一步对比图5中不同节理角度时爆生裂纹的演化过程可以看出:无节理时,裂纹扩展主方向趋于水平方向,与最大地应力方向一致;与无节理相比,当节理角度为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时,节理对爆生裂纹的扩展具有明显的导向作用,促进了竖直方向裂纹的扩展。

2.4 埋深条件对岩石爆破效果的影响

图3~图5中竖直方向地应力 $\sigma_{by} = 5 \text{ MPa}$,对应埋深约为200 m。如果保持侧压力系数 λ 不变而增大埋深,爆破效果又会有所不同。图6所示即为 $\sigma_{by} = 10 \text{ MPa}$ (对应埋深约为400 m),侧压力系数 $\lambda = 0.5$ 、1和2时最终形成的爆生裂纹分布图。对比图6与图3~图5可以看出:如果侧压力系数 λ 保持不变,竖直方向地应力由5 MPa增大至10 MPa,裂纹演化规律和最终分布形态基本一致,但裂纹长度和裂纹区面积都有所减小。显然,随着埋深增加和地应力增大,裂纹的萌生与扩展受到了更大的抑制。该结论也与杨建华等^[14]的研究结果相吻合。

图7进一步给出前面各计算工况条件下最终形成的爆破损伤区(裂纹区)面积。其中竖直方向地应力 σ_{by} 分别设置为5 MPa和10 MPa,侧压力系数 λ 分别设置为0.5、1和2,节理角度分别设置为 30° 、 45° 、 60° 和 90° ,节理角度 0° 时表示无节理。由图7可以看出:(1)相同侧压力系数,相同节理角度时,爆破损伤区面积随埋深增大而减小;(2)含节理岩体爆破损伤区面积大于无节理岩体;(3)侧压力系数 λ 等于0.5和1时,爆破损伤区面积随节理角度增大而减小,节理角度为 30° 时损伤区面积最大;(4)侧压力系数 λ 等于2时,爆破损伤区面积与节理角度之间的规律性较差,分析其机理认为在该计算工况条件下,由于地应力较大,爆破应力和地应力的共同作用会导致节理周边产生损伤,而其他工况条件主要是在爆破孔周边产生损伤。

3 结论

本文针对不同地应力条件下含节理岩体爆破过程开展了数值模拟,得到以下主要结论:

(1) 相同侧压力系数,相同节理角度时,爆破损伤

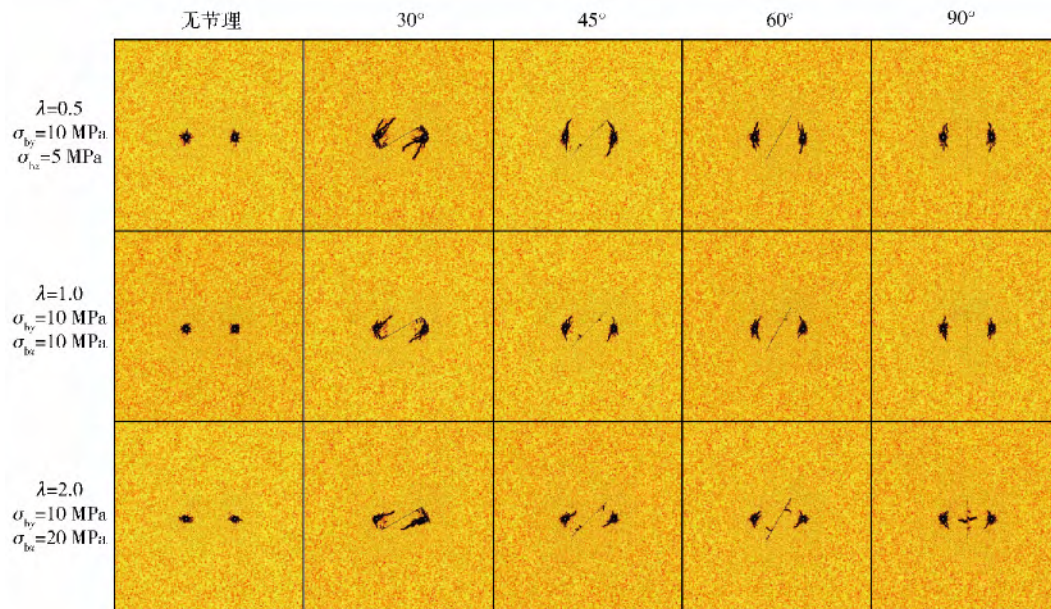
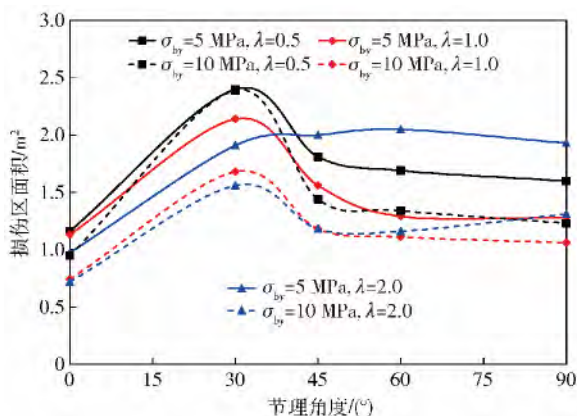
图6 竖直方向地应力 $\sigma_{by} = 10 \text{ MPa}$ 时最终形成的爆生裂纹对比Fig. 6 Blasting induced crack distribution under the vertical stress $\sigma_{by} = 10 \text{ MPa}$ 

图7 各计算工况条件下最终形成的爆破损伤区面积

Fig. 7 Area of the blasting induced damage zone under different calculation cases

区(裂纹区)面积随埋深增大而减小;

(2) 已有节理有利于孔壁上下侧爆生裂纹沿竖直方向的扩展,含节理岩体爆破裂纹区面积大于无节理岩体;

(3) 侧压力系数 λ 等于 0.5 和 1 时,爆破裂纹区面积随节理角度增大而减小,节理角度为 30° 时裂纹区面积最大;

(4) 地应力条件对爆生裂纹的萌生和扩展具有一定的影响,其影响程度和规律与侧压力系数有关,同时受控于节理角度。

参 考 文 献

[1] Ji R S. *Experimental Analysis of Blasting Loads on Rock Mass Containing Discontinuity Planes* [Dissertation]. Beijing: China Uni-

versity of Geosciences, 2008

(季荣生. 含不连续面岩体爆炸加载试验研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2008)

- [2] Hu R, Zhu Z M, Zhang X Y, et al. Effect of joint orientation on rock blasting. *J Sichuan Univ Eng Sci Ed*, 2012, 44(Suppl 2): 41
(胡荣, 朱哲明, 张晓燕, 等. 节理方位对岩石爆破的影响规律. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2): 41)
- [3] Wu L, Tao X. Theoretical analysis experiment study of the influence of rock structural planes on blasting effect. *Min Res Dev*, 1999, 19(1): 40
(吴立, 陶鲜. 岩体结构面影响爆破效果的理论分析与试验研究. 矿业研究与开发, 1999, 19(1): 40)
- [4] Xie B, Li H B, Wang C B, et al. Numerical simulation of presplit blasting influenced by geometrical characteristics of joints. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(12): 3812
(谢冰, 李海波, 王长柏, 等. 节理几何特征对预裂爆破效果影响的数值模拟. 岩土力学, 2011, 32(12): 3812)
- [5] Qu S J, Liu J F. Numerical analysis of joint angle effect on crack-ing with presplit blasting. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(1): 189
(瞿世杰, 刘际飞. 节理角度对预裂爆破成缝效果的影响研究. 岩土力学, 2015, 36(1): 189)
- [6] Xiao T S, Yang R S, Zhuang J Z, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock. *Explos Shock Waves*, 2007, 27(2): 159
(肖同社, 杨仁树, 庄金钊, 等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 159)
- [7] Singh D P, Sastry V R. Role of weakness planes in bench blasting-a critical study // *Process of the 2nd International Symposium on Rock Fragment by Blasting*. Keystone, 1987
- [8] Yang L Y. *Experimental Study on Rock-Type Materials Dynamic Fracture and Blasting Crack Propagation under Confining Pressure* [Dissertation]. Beijing: China University of Mining and Technol-

- ogy, 2011
(杨立云. 岩石类材料的动态断裂与围压下爆生裂纹的实验研究[学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2011)
- [9] Yang D, Li H B, Xia X, et al. Study of blasting-induced dynamic damage of tunnel surrounding rocks under high in-situ stress. *Rock Soil Mech*, 2014, 35(4): 1110
(杨栋, 李海波, 夏祥, 等. 高地应力条件下爆破开挖诱发围岩损伤的特性研究. 岩土力学, 2014, 35(4): 1110)
- [10] Zhao B Y, Wang H D. Feasibility of deep-hole blasting technology for outburst prevention and permeability enhancement in high-gas-content coal seams with low-permeability subjected to high geo-stresses. *Explos Shock Waves*, 2014, 34(2): 145
(赵宝友, 王海东. 深孔爆破技术在地应力低透气性高瓦斯煤层增透防突中的适用性. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 145)
- [11] Zhu J, Yang J H, Lu W B, et al. Influence of blasting vibration on the sidewall of underground tunnel. *Explos Shock Waves*, 2014, 34(2): 153
(朱俊, 杨建华, 卢文波, 等. 地应力影响下隧洞边墙的爆破振动安全. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 153)
- [12] Xie Y. The modelling experiment for regularity of blasting crackle spread of rock under high stress conditions. *Hunan Nonferrous Met*, 2002, 18(4): 1
(谢源. 高应力条件下岩石爆破裂纹扩展规律的模拟研究. 湖南有色金属, 2002, 18(4): 1)
- [13] Wang C B, Li H B, Xie B, et al. Analysis of influencing factors of blasting crack expansion. *Coal Sci Technol*, 2010, 38(10): 31
(王长柏, 李海波, 谢冰, 等. 岩体爆破裂纹扩展影响因素分析. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 31)
- [14] Yang J H, Lu W B, Hu Y G, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels. *Rock Soil Mech*, 2014, 35(2): 511
(杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性. 岩土力学, 2014, 35(2): 511)
- [15] Zhu W C, Wei C H, Li S, et al. Numerical modeling on destress blasting in coal seam for enhancing gas drainage. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2013, 59: 179
- [16] Bai Y, Zhu W C, Wei C H, et al. Numerical simulation on two-hole blasting under different in-situ stress conditions. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(Suppl 1): 466
(白羽, 朱万成, 魏晨慧, 等. 不同地应力条件下双孔爆破的数值模拟. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 466)
- [17] Wei J, Zhu W C, Wei C H, et al. Numerical simulation on contribution of guide-hole to crack coalescence of two boreholes. *Eng Mech*, 2013, 30(5): 335
(魏炯, 朱万成, 魏晨慧, 等. 导向孔对两爆破孔间成缝过程影响的数值模拟. 工程力学, 2013, 30(5): 335)