

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.07.003

不同静应力和节理条件下岩体爆破破岩机制研究

张凤鹏¹, 彭建宇¹, 范光华¹, 李邵军², 李元辉¹

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 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, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 考虑不同应力条件和岩体节理属性, 对静应力作用下含有长节理和局部短节理花岗岩的爆破破岩机制进行研究, 探讨静应力、节理位置和充填介质物性等因素对爆破效果的影响。在节理间充填弹性弱介质和空气两种情况下研究半无限长节理面反射拉伸破坏效应和端部衍生翼裂纹扩展特性; 在不同静应力作用下, 改变爆源与节理间的距离, 研究长节理面反射效应对爆破裂纹扩展的影响规律; 在保持节理近端与爆源距离和节理长度不变的情况下, 研究短节理端部衍生翼裂纹产生、扩展的规律。通过比较表明, 当节理充填介质时, 节理面的反射拉伸破坏作用弱于不充填情况, 而前者的端部翼裂纹发育明显比后者充分; 长节理阻断了爆破主裂纹的扩展, 节理面反射拉伸应力波产生的拉裂纹与爆破主裂纹耦合贯通在爆源与节理之间岩体内产生密集裂纹网, 改善了该区域岩体的破碎效果, 但随爆源与节理之间距离的增大以及静应力增高, 这种破岩效应逐渐消失; 入射角对节理端部衍生翼裂纹的产生与扩展影响显著, 而静应力对翼裂纹起抑制作用。

关 键 词: 静应力; 岩体爆破; 节理; LS-DYNA; 裂纹扩展; 入射角

中图分类号: O 383.1; TD 853

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 07 - 1839 - 09

Mechanisms of blasting-induced rock fractures under different static stress and joint properties conditions

ZHANG Feng-peng¹, PENG Jian-yu¹, FAN Guang-hua¹, LI Shao-jun², LI Yuan-hui¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The aim of this paper is to investigate failure mechanisms of granite with long and local short joints induced by blasting under different static stress conditions. The effect of static stress, location of the joint and filling material properties on blasting results is discussed and analyzed in detail. The extension failure behaviour caused by reflection along the semi-infinite joint plane and wing crack propagation characteristics at the end of the joint are examined by filling the weak elastic material or air. Under different static stress conditions, numerical simulations are performed by changing the distance between blasting source and joint to determine the influence of reflection of stress waves from the long joint plane on blasting crack propagation. Then, we study the generation and expansion laws of wing cracks by diffracted stress wave at short joint tips under different incident angles by maintaining the joint length and the distance between the proximal joint and blasting source. It is indicated that the reflected tensile failure near the surface of joint with filling material is more likely to occur instead of joint without filling. However, wing cracks at the former tip develop are more obvious than the latter. The long joint to great extent blocks the propagation of blasting induced cracks. The dense crack networks produced in the rock mass between blasting source and joints are caused by the coupling coalescence of extension cracks that are induced by the reflected stress wave and main crack. Although it heavily enhances the crushing effect of the rock mass, the effect disappears gradually when the distance between blasting source and joints or the static stress is increased. The generation and propagation of wing cracks are significantly influenced by the incident angle, and the wing cracks are restrained by static stress.

Keywords: static stress; rock blasting; joint; LS-DYNA; crack propagation; incident angle

收稿日期: 2015-05-30

基金项目: 国家科技支撑计划课题(No. 2013BAB02B01, No. 2013BAB02B03); 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金资助项目(No. 201302). This work was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAB02B01, 2013BAB02B03) and the Open Fund of Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines (201302).

第一作者简介: 张凤鹏, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhangfengpeng@mail.neu.edu.cn
通讯作者: 李邵军, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石工程安全性评估与监控方面的教学与研究工作。E-mail: sjli@whrsm.ac.cn

1 引 言

随着我国深部金属矿山开采、西部水利水电与交通工程建设的大规模推进,由于构造活动强烈、地质条件复杂、地应力高,深部工程安全开挖(开采)过程中的爆破破岩机制是需要重点弄清的关键科学问题之一。深部岩体往往处于较高的地应力环境中,开挖爆破过程是岩体在高静应力和爆炸动应力联合作用下的复杂破裂过程。高应力条件下岩体爆破问题日益受到国内外学者重视^[1-7],人们采用试验、理论分析和数值模拟等方法对高静应力岩体爆破过程进行研究,探讨静应力对爆炸应力波传播、裂纹起裂与扩展以及爆破参数设计的影响。一些学者采用平面模型研究垂直炮孔截面内爆生裂纹的扩展规律, Ma 等^[4]基于 Johson-Holmquist 材料模型,采用 LS-DYNA 软件研究了应力加载速率、单向静应力场以及节理对爆破的影响。Donze 等^[5]采用离散元研究了爆炸应力波波峰压应力、频率对裂纹扩展速度和长度的影响,以及单向静应力作用下裂纹区形状。Yilmaz 等^[6]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则,采用 FLAC^{3D} 模拟了柱状药包爆破过程,研究了爆炸应力加载速率、静应力和侧压力系数等对爆破裂纹区的影响,结果表明,破裂区形状受静应力场侧压力系数影响显著。戴俊等^[7]以柱装药爆破漏斗理论为基础,对高地应力巷道崩落爆破标准漏斗形成进行研究,认为静应力对巷道掘进爆破起抑制作用,使爆破漏斗体积减小。众多研究成果表明^[4-8],最大主应力方向是爆破裂纹扩展的主导方向,高静应力抑制爆破裂纹扩展,使破坏区出现明显方向性。此外,开挖爆破应力波以及高地应力瞬态卸载动态效应诱发的围岩损伤及破坏问题也受到工程界的重视, Li 等^[9]通过分析隧洞周边应力波的反射与折射效应引起的质点振动速度和应力分布规律预测隧洞稳定性。Lu 等^[10]的研究结果表明,高应力岩体在爆破开挖过程中,爆炸荷载和地应力瞬态卸载所诱发的围岩损伤程度和范围均随地应力量级的提高而显著增大,损伤区分布随着侧压力系数的增大而向应力集中区发展。

岩体中含有大量节理、裂隙等缺陷,破坏了岩体的完整性,导致岩体力学参数劣化,使爆破破岩问题变得更复杂,含节理岩体的爆破问题同样受到众多学者的关注^[11-16]。杨风威等^[11]利用离散元软件 UDEC 模拟了应力波在含倾斜节理岩体中的传播过程,计算了透射系数和反射系数,分析了波型转换规律。杨鑫等^[12]应用有机玻璃材料研究人工裂隙与

爆源距离对爆炸裂纹扩展的影响。胡荣等^[13]应用 PMMA 材料研究了爆炸动载荷作用下应力波入射角对裂纹起裂及扩展影响规律。刘际飞^[14-15]等采用相似材料试验研究了节理走向对爆炸应力波传播以及预裂爆破中裂纹贯穿性的影响。Zhu^[16]等利用 ANSYS AUTODYN 2D 研究了圆柱状岩体内爆破动态裂纹的扩展过程,探讨了局部节理厚度及其填充物(土和空气)对爆破效果的影响。

然而,上述研究中很少涉及静应力作用下节理岩体爆破方面的内容。LS-DYNA 是通用的显式动力分析软件,适合求解爆炸等非线性动力学问题,被广泛应用于岩体爆破数值分析中^[4, 17]。为此,本文利用 LS-DYNA 软件对不同静应力作用下含节理花岗岩爆破过程进行模拟,研究静应力和节理位置对爆破效果的影响规律。

2 计算模型

2.1 计算几何模型

节理对爆破效果的影响主要表现为两方面:一是应力波在节理面处发生反射,应力波由入射压应力波转化为反射拉伸波,在节理与炮孔间形成反射拉伸裂纹区;二是应力波在节理端部形成翼裂纹区,类似于波的衍射效应。基于上述情况,将节理按长度及其与炮孔的相对位置划分为无限长节理、半无限节理和短节理:当节理长度远大于炮孔直径,爆破过程中节理两端部均不出现翼裂纹的节理为无限长节理,简称长节理;当节理长度远大于炮孔直径,爆破过程中节理一端出现翼裂纹,而另一端不出现的节理为半无限节理;节理长与炮孔直径为同一数量级,两端均出现翼裂纹的节理为短节理。

本文主要研究静应力与爆破动应力联合作用下节理的反射拉伸特性和端部翼裂纹扩展特征,为此建立了含长节理、短节理几何模型进行计算分析。

2.1.1 含长节理岩体爆破模型

取含节理垂直药柱的矩形区域为研究对象,所建模型见图 1(a)。模型尺寸为 $60d \times 60d$,炮孔直径 $d=5 \text{ mm}$,位于岩石中心,在距炮孔中心为 R 处设置一条宽度为 $0.1d$ 、平行右侧边界的节理;模型左侧、底侧采用位移约束,右侧施加垂直节理面的静应力 σ_0 ;模型四周边界均施加无反射边界条件,消除人为边界反射波对结构动响应的影响。采用 4 节点四边形单元进行离散,炸药与岩石之间、岩石与节理之间共用节点,总单元数为 180 880,总节点数为 183 071,其中岩石单元数为 179 980,炸药单元数为 600,节理单元数为 300。

2.1.2 含半无限长节理岩体爆破模型

所建模型见图 1(b),与图 1(a)比较表明,图 1(b)只是将图 1(a)中长节理换成半无限长节理,其他条件均相同。将炮孔和节理端连线与节理的夹角 α 定义为应力波入射角。仍然采用 4 节点四边形单元进行离散,总单元数、总节点数以及炸药单元数均与长节理相同,岩石单元数为 180 080,节理单元数为 200。

2.1.3 含短节理岩体爆破模型

取含短节理垂直药柱的矩形区域为研究对象,所建模型如图 1(c)所示。模型尺寸为 $50d \times 50d$,炮孔直径 $d=5 \text{ mm}$,位于模型左下角,局部节理长为

$8d$,厚度为 $0.1d$,节理面平行上、下边界,节理近端与炮孔中心的距离为 R 。将炮孔和节理近端连线与节理的夹角 α 定义为应力波入射角。模型左侧、底侧采用位移约束,右侧施加垂直边界的静应力 σ_0 ,四周边界均施加无反射边界条件。为了分析 α 对爆破裂纹产生与扩展的影响,本文建立 7 组合局部短节理岩体的爆破模型, α 分别取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° , $R=16d$ 。采用 4 节点四边形单元进行离散,炸药与岩石之间、岩石与节理之间共用节点,总单元数为 96 724,总节点数为 97 447,其中岩石单元数为 96 286,炸药单元数为 388,节理单元数为 50。

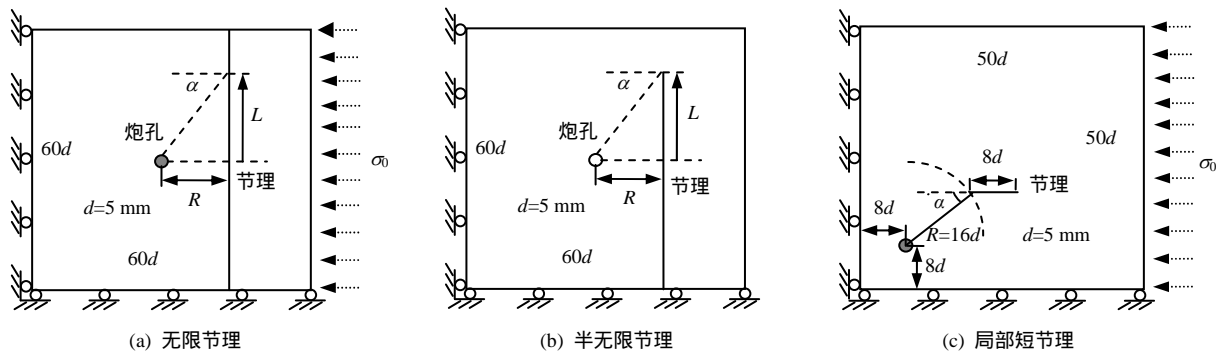


图 1 含节理岩体爆破模型

Fig.1 Blasting models of rock mass with different joints

2.2 炸药状态方程

本文模拟 TNT 炸药在花岗岩中的爆破过程。LS-DYNA 软件能够模拟高能炸药的爆轰过程,炸药起爆后,任意时刻爆源内一点的压力采用 JWL 状态方程模拟^[17-19]:

$$p = Fp_{eos} \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} \frac{2(t-t_1)DA_{cmax}}{3v_e} & t > t_1 \\ 0 & t \leq t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$p_{eos} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_V}{V} \quad (3)$$

式中: p 为爆炸压力 (Pa); F 为炸药化学能释放率; D 为炸药爆速 (m/s); A_{cmax} 和 v_e 分别为炸药最大横截面积和体积; t 、 t_1 分别为当前时间和炸药内一点的起爆时间 (s); p_{eos} 为炸药的爆轰压 (Pa); V 为相对体积; E_V 为内能参数 (Pa); A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数。具体炸药参数见表 1。

表 1 TNT 炸药参数

Table 1 Parameters of TNT explosive							
密度 ρ /(kg/m ³)	爆速 D /(m/s)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_V /GPa
1 630	6 930	371	7.43	4.15	0.95	0.3	7

2.3 岩体材料模型

本文采用双线性随动硬化模型作为岩体的弹塑性屈服模型,屈服应力 σ_Y 与应变率 $\dot{\epsilon}$ 的关系为^[17]

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/P}\right] (\sigma_{Y0} + \beta E_P \epsilon_p^{eff}) \quad (4)$$

$$E_P = \frac{E_0 E_{tan}}{E_0 - E_{tan}} \quad (5)$$

式中: σ_{Y0} 为初始屈服应力 (Pa); $\dot{\epsilon}$ 为应变率 (s⁻¹); C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数,对于花岗岩取 $C=2.5 \text{ s}^{-1}$ 和 $P=4.0$; β 为硬化参数 $0 \leq \beta \leq 1$; E_P 为塑性硬化模量 (Pa); E_0 为弹性模量 (Pa); E_{tan} 为切线模量 (Pa); ϵ_p^{eff} 为岩体有效塑性应变,由下式定义:

$$\epsilon_p^{eff} = \int_0^{t_p} d\epsilon_p^{eff} \quad (6)$$

$$d\varepsilon_p^{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p \quad (7)$$

式中： t_p 为发生塑性应变累计时间 (s)； ε_{ij}^p 为岩体塑性应变偏量分量。

爆破过程中粉碎区采用 Mises 屈服破坏准则：

$$\sigma_{\text{VM}} > \sigma_{\text{cd}} \quad (8)$$

式中： σ_{VM} 为岩体中任一点的 Mises 有效应力 (Pa)； σ_{cd} 为岩体的单轴动态抗压强度 (Pa)。

而裂纹区采用拉伸破坏准则：

$$\sigma_t > \sigma_{\text{td}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{ij} \sigma_{ij} \quad (10)$$

式中： σ_t 为爆破产生的拉应力 (Pa)； σ_{td} 为岩体的单轴动态抗拉强度 (Pa)，与静态强度的关系取为^[19]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{cd}} &> \sigma_c \dot{\varepsilon}^{1/3} \\ \sigma_{\text{td}} &> \sigma_{t0} \dot{\varepsilon}^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： σ_c 和 σ_{t0} 分别为岩体的单轴静态抗压强度和抗拉强度 (Pa)。

2.4 节理及其填充介质

节理对爆破裂纹扩展的影响与节理两侧岩体性质、节理内填充介质、节理厚度等因素有关，节理厚度越大、节理内填充介质物性与两侧岩体物性差异越大，节理影响越明显^[11, 16, 20]。本文主要研究节理长度和相对位置、岩体内初应力对爆破效果的影响，故取节理厚度为 $0.1d$ 且保持不变，节理充填介质为软岩，并假设爆破过程中节理充填介质不发生破坏。

本文对含节理花岗岩爆破过程进行模拟，花岗岩及节理材料参数见表 2。

表 2 花岗岩及节理材料参数

Table 2 Material parameters of granite and joint

岩类	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 E_0 / GPa	泊松比 μ	切线模量 $E_{\text{tan}} / \text{GPa}$	屈服强度 σ_{y0} / MPa	抗拉强度 σ_{t0} / MPa	抗压强度 σ_c / MPa	Cowper-Symonds 参数	
								C / s^{-1}	P
花岗岩	2.60	51.8	0.33	4.0	75	15	150	2.5	4.0
节理	1.60	20.0	0.30	2.5					

3 数值模拟结果及分析

3.1 半无限节理节理面反射及端部效应分析

首先研究在炸药爆炸动应力作用下半无限节理端部衍生翼裂纹扩展特征和节理面反射拉伸破坏效应，几何模型如图 1(b)所示。分别以表 2 中节理材料和空气 (不填充) 两种介质填充节理，探讨充填物以及炮孔与节理之间的距离对爆破破坏效果的影响。当节理不填充时，建模过程中在节理面间加入接触单元，本文以图 1(b)中 $\alpha = 45^\circ$ 为例进行分析，具体结果见图 2。

图 2 给出了 $R=5d$ 时节理不填充 (见图 2(a)) 填充 (见图 2(b)) 和 $R=10d$ 时节理填充 (见图 2(c)) 3 种工况的节理面反射拉伸破坏状况和端部衍生翼裂纹扩展状况。结果表明：无论节理填充与否，节理面处均出现平行界面的反射拉伸裂纹，并与爆炸产生的径向放射裂纹相互作用，在炮孔与节理面之间形成裂纹密集破坏区。由于节理的几何不对称性，受反射拉伸效应的影响，裂纹区有由节理端部沿节理面向外扩展的趋势。比较图 2(a)和图 2(b)的结果表明，节理间无填充 (空气) 时反射拉伸破坏严重，这是因为该情况下爆炸应力波几乎全部在节理面处

反射形成拉伸波，而节理内充填介质后，爆炸应力波一部分透过节理面进入到节理外侧的岩体内继续向外传播，只有部分反射形成拉伸波，节理内充填的弱介质性能与岩体越接近，反射拉伸效应越弱、透射波比重越大^[11, 20]。为了简化计算，本文接下来的研究中将节理材料假定为线弹性材料，不考虑因爆破作用导致充填材料开裂与损伤引起的性能弱化，因此，所得到的结论是反射拉伸破坏的下限、透射波引起破坏的上限。比较图 2(a)和图 2(b)结果还可以看出，两种情况均出现了端部衍生翼裂纹，当节理内充填介质时，由于透射波较强，端部区域岩体在透射波和绕射波的共同作用下翼裂纹扩展更显著。但当节理与炮孔间距离增加到 $R=10d$ 时 (见图 2(c))，尽管节理内有充填介质，翼裂纹仍然消失了，节理面处的拉伸破坏效应也明显减弱，由图可见，随距离 R 增大，节理的影响减弱并会逐渐消失。

杨鑫等^[12]应用有机玻璃薄板爆破试验研究了半无限人工裂隙与爆源距离对爆炸裂纹扩展的影响，试验结果见图 3。结果表明：当节理 (填充介质是空气) 与炮孔距离较近时，反射拉伸裂纹与径向裂纹贯通形成爆炸空腔，端部出现翼裂纹 (图 3(a)、图 3(b))。随距离增大，尽管出现了爆炸空腔，

但拉伸破坏效应减弱,翼裂纹消失(见图 3(c))。由图可见,本文结果与文献[12]的试验符合得很好,说明本方法能够很好地模拟爆破过程中节理面的反射拉伸破坏效应以及端部翼裂纹扩展特征。

接下来本文分别以长节理为例(见图 1(a))研究节理面处反射拉伸破坏规律和静应力的影响,以局部短节理为例(见图 1(c))研究节理端部衍生翼裂纹的产生与扩展规律和静应力的影响。

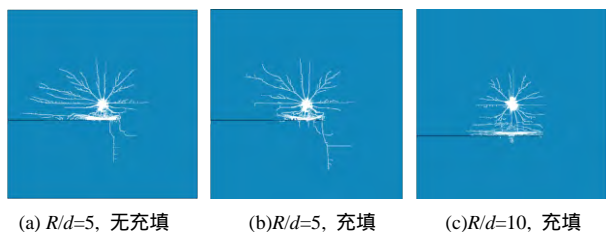


图 2 半无限节理对爆炸破裂效果的影响
Fig.2 Effect of semi-infinite joint on blasting fracture

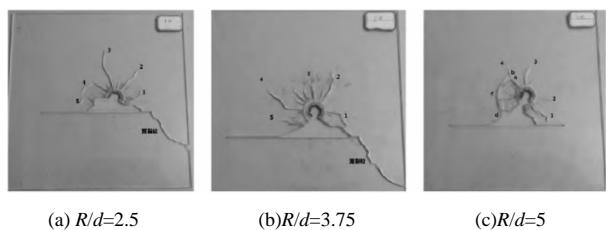


图 3 爆炸后的有机玻璃模型^[12]
Fig.3 Acrylic glass model after explosion^[12]

3.2 节理面反射拉伸效应分析

以长节理、静应力垂直节理面情况为例(见图 1),对节理面反射拉应力波引起岩体拉伸破坏效应和静应力对裂纹扩展影响进行研究。

3.2.1 节理与炮孔间距对爆破裂纹扩展影响分析

为了研究节理位置和静应力对爆破效果的影响,本文模拟了 R/d 分别 5、10、15、20、25 以及 σ_0 分别为 0、5、10、20、30、40 MPa 几种情况下花岗岩内含一条长节理爆破裂纹扩展过程,计算模型见图 1(a)。

图 4 给出了 $R=10d$ 的岩体爆破裂纹扩展过程。

从图中可以看出,炸药爆炸后,爆炸应力波均匀向四周传播(见图 4(a)),当应力波遇到节理后,入射应力波分化为反射拉伸波和透射压应力波,应力值在节理面处出现了不连续,反射拉伸应力波使节理内侧岩体产生裂纹并向炮孔方向扩展,拉裂纹与径向裂纹交汇贯通,在节理内侧附近形成裂纹密集区。透射波继续在岩体内传播(见图 4(b)),透射波没有在节理外侧岩体内产生新裂纹,由图可见,节理阻断径向裂纹的进一步扩展(见图 4(c))。

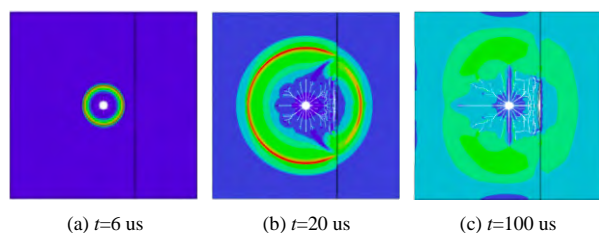


图 4 含长节理岩体爆破过程
Fig.4 Blasting process of rock mass with a long joint

图 5 给出了 R 不同时爆破完成后岩体内形成的裂纹分布图形。结果表明:只有距离较小情况下少量爆炸主裂纹穿透了节理,但扩展长度较小(见图 5(a)),随着距离增大,节理完全阻断了爆炸主裂纹的扩展,但节理面处产生的反射拉伸应力波使爆源与节理间的岩体破坏程度明显加强,改善了该区域的爆破破岩效果(见图 5(b)、5(c))。节理的反射拉伸破坏效应随 R/d 增大而逐渐减弱,当 R 达到 15d 以上时,节理对爆破的影响消失(图 5(d)、5(e))。

3.2.2 静应力对爆破裂纹扩展影响分析

将爆破过程中节理处出现反射拉伸裂纹的爆源与节理间最大距离定义为极限距离 R_0 ,即当 $R > R_0$ 时,节理的反射拉伸破坏效应将消失。图 6 给出了 $R/d=15$ 时反射拉伸区随静应力变化的规律,由图可见,随静应力增大,反射拉伸破坏区形状并未发生明显变化,只是垂直静载荷方向的尺寸略有减小,导致反射拉伸破坏区的面积不断减小,但极限距离 R_0 并未因静应力增大而减小。

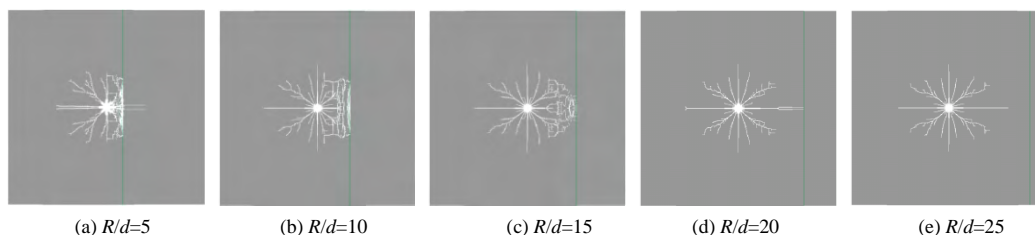


图 5 节理位置对爆炸破裂效果的影响
Fig.5 Effect of joint location on blasting fracture

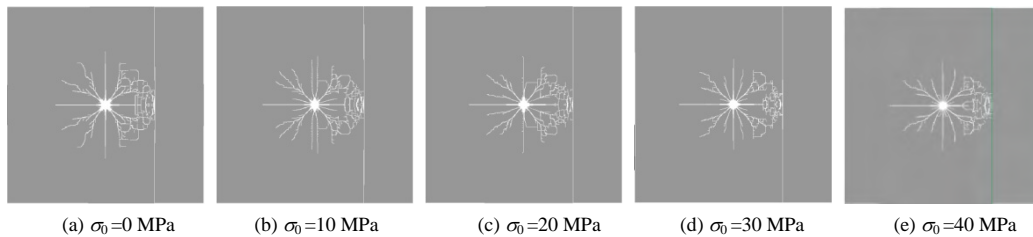


图6 静应力对节理反射拉伸破坏效果的影响 ($R/d=15$)

Fig.6 Effect of static stress on tensile fracture of rock by the reflected wave at joint ($R/d=15$)

3.3 节理端部衍生翼裂纹扩展特性分析

应力波在节理面处的反射和透射特性与入射角、节理面两侧材料物性、入射应力波波长及频率密切相关,关系复杂,即包含反射、透射波,还出现横、纵波形的转变^[11,20]。本文以含短节理岩体爆破为例(见图1(c)),探讨节理与炮孔相对位置和静应力对节理端部翼裂纹产生与扩展的影响,为此,文中在保持节理长度、厚度和充填物不变的前提下,模拟了静应力 σ_0 分别为0、10、20、30和40 MPa,入射角 α 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° ,共35中工况的爆破过程,具体结果见图7、8,其中,炮孔与节理近端距离均为 $R=15d$ 。

图7给出了入射角 $\alpha=30^\circ$ 、 $\sigma_0=20$ MPa时岩体的爆破过程。由图可见,当应力波传播遇到短节理时,在节理两端部出现应力集中,同时改变了炮孔与节理近端岩体内的应力分布(见图7(b))。翼裂纹首先在节理远端产生并向外扩展(见图7(b))。近端翼裂纹出现略晚,出现后向炮孔方向扩展,与径向放射裂纹交汇贯通,形成新的裂纹分布网(见图7(c))。

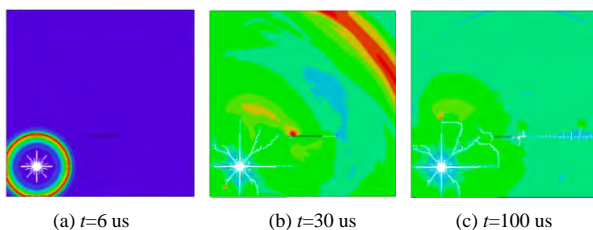


图7 节理夹角 $\alpha=30^\circ$ 时的爆破过程

Fig.7 Blasting process for the joint angle of 30°

3.3.1 入射角对节理端部衍生翼裂纹扩展影响分析

应力波入射角是影响节理衍生翼裂纹产生与扩展的主要因素^[13-15],现以不施加静应力情况为例,进一步探讨入射角对节理岩体爆破的影响。图8(a1)~8(g1)给出了静应力为0时的爆破裂纹图样,结果表明,节理两端均出现衍生翼裂纹。近端翼裂纹向爆源方向扩展,与径向放射状裂纹相互贯通,不同程度地改善了节理与炮孔间岩体的破碎效果。

远端翼裂纹向背离炮孔方向发展,随着入射角的改变,扩展路径出现明显差别: α 在 $0\sim 15^\circ$ 之间时,爆生径向裂纹、节理以及两端翼裂纹贯穿成一字型裂纹(图8(a1)、8(b1)); α 在 $30^\circ\sim 75^\circ$ 之间时,远端衍生翼裂纹发生分叉扩展形成较大的新生裂纹区,称之为节理诱导破岩区, $\alpha=60^\circ$ 时诱导破岩区裂纹分布均匀,面积最大(图8(c1)~8(f1)); α 接近 90° 时,节理影响明显减弱,成为节理影响弱化区(图8(g1))。胡荣等^[13]通过有机玻璃薄板爆破试验研究了入射角对爆炸裂纹扩展的影响,具体结果见图9。由于文献中节理填充介质是空气,本文节理充填介质为软岩,虽然翼裂纹产生与扩展趋势与本文结果基本一致,但由于节理处应力波的反射与透射效应存在差异,使得本文中节理两端的翼裂纹扩展范围比较大,且分叉效应明显。

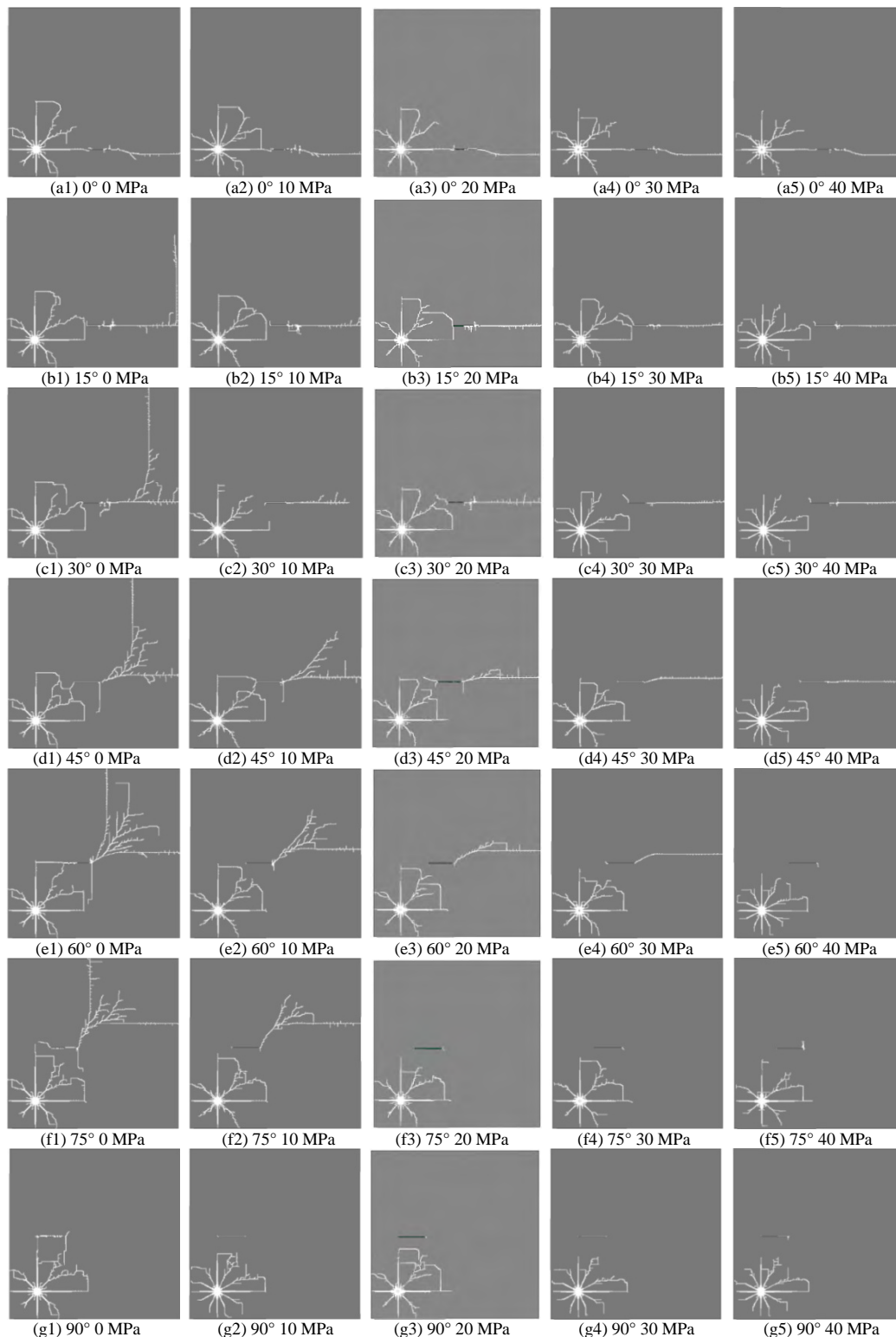
上述结果表明,爆破设计时可通过优化炮孔布置方式和位置,通过调整入射角实现不同的爆破目的:入射角较小时(0° 最佳),有利于炮孔间裂缝贯通,提高提高光面爆破、预裂爆破的效果^[14-15];入射角在 $30^\circ\sim 75^\circ$ 之间时(60° 最佳),可充分利用节理的诱导破岩效应,扩大破岩范围,提高爆破效率;入射角接近 90° 时,节理能够有效屏蔽径向裂纹的扩展,减小节理外岩体的损伤^[16]。

3.3.2 静应力对衍生翼裂纹影响分析

从图8可以看出,在入射角相同的情况下,随着静应力由0增加到40 MPa,爆生径向裂纹区面积逐渐较小,但径向裂纹条数增加,密度增大,说明静应力增大使爆炸能量消耗更集中于炮孔周围较小范围内,使该区域岩体破碎更充分,但爆破量减少,也降低了爆破对周围岩体的损伤。而静应力对节理衍生翼裂纹产生与扩展的影响更复杂,且与入射角密切相关:与无静应力情况比较,当 $\sigma_0=10$ MPa时,同一节理产生的翼裂纹区面积明显减小, $\alpha=60^\circ$ 和 75° 两种节理近爆源端的翼裂纹消失(见图8(e2)、8(f2)), $\alpha=90^\circ$ 节理的双侧翼裂纹均消失(见图8(g2));当 $\sigma_0=20$ MPa时,远端翼裂纹的分叉基本消失,裂纹近似线型, $\alpha=75^\circ$ 节理的双侧翼裂纹均

消失 (见图 8(f3)); 当 $\sigma_0=30$ MPa 时, $\alpha=45^\circ$ 节理近端翼裂纹消失 (见图 8(d4)); 当 $\sigma_0=40$ MPa 时, $\alpha=30^\circ$ 节理近端翼裂纹消失 (见图 8(c5)), $\alpha=60^\circ$ 节理的双侧衍生裂纹均消失 (见图 8(e5))。但入射角较小时 ($\alpha=0 \sim 15^\circ$), 静压应力对由径向裂纹、节理和翼裂纹贯通形成的近似一字型裂纹的扩展影

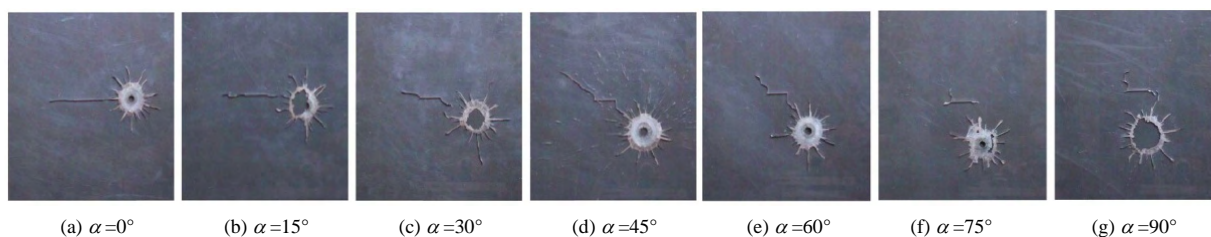
响不明显, 研究表明^[8], 最大主应力方向是爆破裂纹扩展的主导方向, 因此, 当入射角较小时静应力对节理衍生的一字型翼裂纹有促进作用。上述结果表明, 在深部高静应力情况下, 可根据岩体内节理分布状况和地应力水平进行爆破设计, 适当提高炸药单耗, 减小孔网参数, 以取得预期破岩效果。



注: 0、10、20、30、40 MPa 为静应力, 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90° 为入射角。

图 8 不同静应力、不同入射角情况下的爆破结果

Fig.8 Blasting results of rock mass under different stresses and incident angles

图 9 不同应力波入射角时裂纹扩展图^[13]Fig.9 Crack propagation patterns under various incident angles of stress waves^[13]

4 结 论

(1) 将节理充填介质作为线弹性材料, 不考虑因爆破作用导致充填材料开裂与损伤引起的性能弱化, 得到的结论是反射拉伸破坏的下限、透射波引起破坏的上限。

(2) 长节理阻断了爆炸主裂纹的扩展, 但节理面处产生的反射拉伸应力波使爆源与节理间的岩体破坏程度明显加强, 改善了该区域的爆破破岩效果。节理的反射拉伸破坏效应随爆源与节理距离 R 增大而逐渐减弱, 当 R 达到极限距离时, 节理对爆破的影响消失, 反射拉伸破坏区面积随静应力增大而减小。

(3) 节理端部衍生翼裂纹明显影响爆破效果: 当入射角小于 30° 时, 爆生径向裂纹、节理和翼裂纹贯通形成一字型裂纹, 有利于光面爆破、预裂爆破的裂纹形成与贯通; 当入射角在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 之间时, 节理端部衍生翼裂纹分叉效应明显, 导致爆破破坏区明显增大。因此, 根据岩体内节理产状与分布规律合理布置炮孔, 充分发挥短节理对裂纹的衍生诱导作用, 提高爆破效率。

(4) 静应力对节理岩体爆破影响显著: 一方面使爆破主裂纹区的面积减小; 另一方面抑制了节理端部翼裂纹的产生与扩展, 只有当入射角较小时, 静应力对一字型翼裂纹的产生与扩展起促进作用。因此, 在高静应力情况下, 需提高炸药单耗, 减小孔网参数, 才能取得预期破岩效果。

参 考 文 献

- [1] FENG X T, HUDSON J. Rock engineering design[M]. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011.
- [2] JUNG W J, UTAGAVA M, OGATA Y, et al. Effects of rock pressure on crack generation during tunnel blasting[J]. *Japan Explosives Society*, 2001, 62(3): 138 - 146.
- [3] SAHARANM R, MITRI H. Destress blasting as a mines safety tool: Some fundamental challenges for successful

applications[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 37 - 47.

- [4] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45: 966 - 975.
- [5] DONZE F V, BOUCHEZ J, MAGNIERS A. modeling fractures in rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1152 - 1163.
- [6] YILMAZ O, UNLU T. Three-dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 266 - 278.
- [7] 戴俊, 钱七虎. 高地应力条件下的巷道崩落爆破参数[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(3): 272 - 277.
- DAI Jun, QIAN Qi-hu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(3): 272 - 277.
- [8] 肖正学, 张志呈, 李端明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(5): 497 - 501.
- XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, LI Duan-ming. The influence of initial stress field on blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(5): 497 - 501.
- [9] LI J C, LI H B, MA G W, et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 35: 227 - 234.
- [10] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 53: 129 - 141.
- [11] 杨风威, 李海波, 李建春, 等. 斜入射线弹性节理应力波传播特征的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2013, 5(3): 901 - 907.
- YANG Feng-wei, LI Hai-bo, LI Jian-chun, et al. Numerical simulation of transmission characteristics of oblique incidence of stress waves across linear elastic joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 5(3): 901 - 907.

of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio[J]. **Journal of ASTM International**, 2011, 9(2): 1 - 17.

- [29] ANASTASIADIS A, SENETADIS K, PITILAKIS K, et al. Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, part II: Effect of rubber content on G/G_0 - γ -DT curves and volumetric threshold strain[J]. **Journal of ASTM International**, 2011, 9(2): 1 - 12.
- [30] BAHADOR H, MANAFI S. Investigation on the dynamic properties of saturated sand-tire chips mixture by shaking table[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris: [s. n], 2013, 883 - 886.
- [31] 岁小溪. 橡胶颗粒—砂混合物的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

SUI Xiao-xi. Study on seismic isolation performance of granulated rubber-sand mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.

- [32] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 359 - 365.
- LI Li-hua, XIAO Heng-lin, TANG Hui-ming, et al. Dynamic properties variation of tire shred-soil mixtures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 359 - 365.
- [33] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Geotechnical Research Institute of Nanjing Hydraulic Research Institute. Technical manual of geotechnical testing[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

上接第 1846 页

- [12] 杨鑫, 蒲传金, 唐雄, 等. 人工裂隙对爆炸裂纹扩展影响的试验研究[J]. 爆破, 2014, 31(2): 26 - 31.
- YANG Xin, PU Chuan-jin, TANG Xiong, et al. Experimental study of effects of manual crack on blasting cracks propagation[J]. **Blasting**, 2014, 31(2): 26 - 31.
- [13] 胡荣, 朱哲明, 胡哲源, 等. 爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 7(32): 1476 - 1481.
- HU Rong, ZHU Ze-ming, HU Ze-yuan, et al. Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 7(32): 1476 - 1481.
- [14] 刘际飞, 璩世杰. 预裂爆破中节理走向角度对预裂缝贯通性的影响[J]. 金属矿山, 2014, (4): 6 - 11.
- LIU Ji-fei, QU Shi-jie. Effect of angle of joint strike on the pre-cracking penetrating during pre-splitting blasting[J]. **Metal Mine**, 2014, (4): 6 - 11.
- [15] 刘际飞, 璩世杰. 节理走向角度对爆炸应力波传播影响的试验研究[J]. 爆破, 2014, 31(2): 57 - 66.
- LIU Ji-fei, QU Shi-jie. Experimental study of influence of joint angle of strike on explosive stress wave

propagation[J]. **Blasting**, 2014, 31(2): 57 - 66.

- [16] ZHU Z M, MOHANTY B, XIE H P. Numerical investigation of blasting induced crack initiation and propagation in rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44: 412 - 424.
- [17] LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livemore Software Technology Corporation, 2003.
- [18] LIU L, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(2): 217 - 231.
- [19] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1987 - 1991.
- XIA Xiang, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1987 - 1991.
- [20] 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, 4(5): 334 - 342.
- LI Xi-bing. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress wave[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1993, 4(5): 334 - 342.