

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.05.008

# 节理特征对岩体爆破裂纹扩展的影响\*

费鸿禄 杨鹏亮 郭纪委 胡刚 丁焱  
辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

**[摘要]** 通过数值模拟,研究了节理的数量、宽度、位置和角度等特征对岩体爆破裂纹扩展的影响规律。采用RHT模型,构建了双孔爆破数值模型,分析了不同节理条件下爆炸应力波和爆生气体的传播特性及对裂纹扩展的作用。结果表明:当与炮孔连心线平行位置设置1层水平节理时,节理中部区域先后受到爆炸应力波和爆生气体的叠加作用,损伤和破裂显著增大;且节理宽度的增加对爆炸应力波和爆生气体传播的阻滞作用更明显。节理宽度从1 cm增加到15 cm时,端部裂纹长度从108.6 cm减至49.7 cm,表明节理宽度的增加可导致爆生气体聚集程度降低,阻碍了端部裂纹的扩展。节理角度为30°时,两炮孔间爆生裂纹连通效果最差;节理角度为45°或60°时,连通效果显著。而节理宽度的增加则减弱了这种连通效果,表明节理角度和节理宽度对裂纹连通性的影响趋势相反。利用桂林鲁山水泥厂矿山工程实例验证了模拟结果的合理性。可为提高岩体工程的爆破能量利用效率、破岩效果及安全性提供参考。

**[关键词]** 节理岩体爆破;节理特征;数值模拟;裂纹扩展

**[分类号]** TD235

## Influence of Joint Characteristics on Crack Propagation in Rock Blasting

FEI Honglu, YANG Pengliang, GUO Jiwei, HU Gang, DING Wen

Institute of Blasting Technology, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

**[ABSTRACT]** The influence of the number, width, position, and angle of joints on the propagation of rock blasting cracks was studied by numerical simulation. A numerical model of double-hole blasting was constructed using RHT model, and the propagation characteristics of explosive stress waves and explosive gases under different joint conditions were analyzed, as well as their effects on crack propagation. The results show that when a single layer of horizontal joint is set parallel to the centerline of the blast hole, the central area of the joint is subjected to the superposition of stress waves and explosive gases, resulting in significantly increased damage and fracturing. And the increase in joint width has a more significant blocking effect on the propagation of explosive stress waves and explosive gases. When the joint width increases from 1 cm to 15 cm, the length of the end cracks decreases from 108.6 cm to 49.7 cm, indicating that the increase in joint width can lead to a decrease in the concentration of explosive gas and hinder the propagation of the end crack. When the joint angle is 30°, the connectivity effect of the explosive cracks between the two blast holes is the worst. When the joint angle is 45° or 60°, the connectivity effect is significant. The increase in joint width weakens this connectivity effect, indicating that the influence of joint angle and joint width on crack connectivity tends to be opposite. The rationality of the simulation results was verified using the mining engineering example of Guilin Lushan Cement Plant. It can provide references for improving the efficiency of blasting energy utilization, rock breaking effect, and safety in rock engineering.

**[KEYWORDS]** blasting of jointed rock; joint characteristics; numerical simulation; crack propagation

## 0 引言

炸药破碎岩体时,炮孔近区的岩体会被爆炸冲

击波率先冲击。且爆炸冲击波会随着传播距离的增大而衰减为应力波,继续使岩体破裂。同时,爆生气体的准静态压力作用会促使裂纹持续扩展,进而影响节理岩体的破坏模式和裂纹的扩展范围。

\* 收稿日期:2024-11-26

基金项目:辽宁省教育厅基本科研项目(青年项目)(JYTQN2023206)

第一作者:费鸿禄(1963—),男,教授,博导,主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作。E-mail:feihonglu@163.com

学者们针对节理岩体爆破以及裂纹的演化规律进行了研究。魏晨慧等<sup>[1]</sup>对不同节理角度和地应力进行数值模拟,发现初始地应力场的压应力不利于爆生裂纹的萌生及扩展。李秀虎等<sup>[2]</sup>指出,节理数量和宽度增加时,应力波的反射强度增强,透射强度减弱,且衰减加快。赵安平等<sup>[3]</sup>指出,应力波通过单节理时,有延时和振幅衰减现象;通过多节理时,透射应力波幅值降低,等效波速减小。沈世伟等<sup>[4]</sup>指出,爆炸载荷作用分为加载和卸载 2 个阶段;卸载阶段,裂纹尖端应力强度因子逐渐减小,但扩展速度大,占主导地位。杨仁树等<sup>[5]</sup>结合实验与 LS-DYNA 研究了爆炸应力波与爆生气体对被爆介质的作用,结果表明,粉碎区微裂纹由爆炸应力波形成,裂隙区裂纹由爆生气体形成。刘一帆等<sup>[6]</sup>通过数值模拟,探讨了节理长度对岩体裂纹萌生和扩展的影响,分析了地应力的作用机理,结果表明,翼裂纹的长度随竖向节理长度的增大而减小,地应力的环向压应力可抑制爆生裂纹的扩展。费鸿禄等<sup>[7]</sup>基于 RHT 本构模型,分析了节理的宽度、长度、弯度等对爆破裂纹扩展的影响,发现宽度的增加会促进炮孔与节理间的裂纹扩展,长度的增加会抑制节理端部翼裂纹的扩展,弯度的增大则会促进裂纹的扩展。王雁冰等<sup>[8]</sup>利用高速纹影、超压测试系统及 AUTO-DYN 探究了爆炸冲击波和爆生气体的波动机理,结果表明,两者首先伴随扩展,随后逐渐分离,且冲击波的传播速度大于爆生气体的扩散速度。王海洋等<sup>[9]</sup>通过数值模拟研究了不同应力差和节理角度下水压爆破裂纹的扩展过程,结果表明,应力差对岩体损伤区域的影响明显,节理角度影响应力波叠加。Singh 等<sup>[10]</sup>研究了节理方向对实验室中砂岩模型爆破碎裂的影响,发现节理方向对碎片平均质量有显著影响。Chakraborty 等<sup>[11]</sup>通过实验模型和现场调查研究了岩体质量和节理方向对隧道爆破破碎的影

响,发现冲击波的传播受到节理面限制,爆破结果受到节理方向的显著影响。

从上述研究现状来看,虽然已有研究涉及了节理特征、填充条件、地应力、应力差等多种因素对岩体爆破裂纹扩展的影响,但对于这些因素相互耦合作用下爆炸应力波和爆生气体对裂纹扩展的影响规律的认识还不够全面<sup>[12-16]</sup>。因此,构建岩体中含有不同节理的数量、宽度、位置和角度的双孔爆破数值模型,分析各参数共同作用下岩体爆破裂纹扩展的规律,以为岩体工程爆破提供一定的理论参考。

## 1 材料模型参数确定

文献[1]中发现,节理对爆生裂纹具有明显的引导和促进作用,裂纹扩展形态主要受控于节理,而非地应力条件。文献[17]中发现,炮孔近区的爆生裂纹的扩展几乎不受地应力的影响。在爆炸载荷的瞬时作用下,爆炸应力波和爆生气体的动态效应占据了主导地位,故对节理的数量、宽度、位置和角度等特征研究,不考虑地应力。

岩体选取 RHT 模型,具体参数见表 1<sup>[18]</sup>。参数的物理意义见文献[18]。

建立尺寸为 400 mm × 300 mm × 1 mm 的有限元模型。耦合装药方式。炮孔半径 3 mm,采用流固耦合算法,外表面施加无反射边界,模型中竖向节理左侧面、水平节理左侧面距炮孔中心分别为 20、48 mm,节理宽度均为 1 mm,竖向节理长 60 mm,水平节理长 30 mm。损伤云图如图 1 所示。

由图 1 可得:炮孔左侧无节理时,由于应力分布较为均匀,产生了径向裂纹;当爆炸载荷作用于竖向节理时,节理左侧引起较大的应力集中和应力波反射;同时,节理端部因应力集中产生翼裂纹并延伸,且水平节理可以引导裂纹扩展,进一步扩大了损伤

表 1 岩石本构模型参数

Tab. 1 Parameters of the constitutive model of rocks

$\rho_0 /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$f_s^* /$ MPa	$f_t^* /$ MPa	$G /$ MPa	$f_c /$ MPa	$D_1$	$D_2$	$\varepsilon_{c0}$	$\varepsilon_{t0}$
2 660	0.18	0.05	21.9	167.8	0.04	1	$3 \times 10^{-11}$	$3 \times 10^{-11}$
$\varepsilon_c$	$\varepsilon_t$	$\beta_c$	$\beta_t$	$A$	$N$	$Q_0$	$B$	$g_c^*$
$3 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{19}$	0.032	0.036	1.60	0.61	0.68	0.01	0.9
$g_t^*$	$\varepsilon_{mp}$	$A_f$	$N_f$	$N_p$	$\alpha$	$P_{e1}$	$P_{c0}$	$B_0$
0.7	0.01	1.60	0.61	3.0	1.006	125	6	1.22
$B_1$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$T_1$	$T_2$	$X_1$		
1.22	35.27	39.58	9.04	25.7	0	0.5		

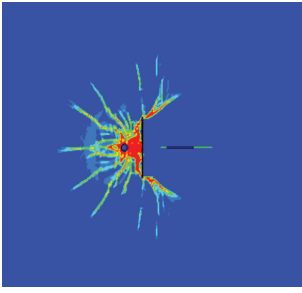


图1 模型的损伤云图

Fig. 1 Damage cloud diagram of the model

范围。所得结果与文献[19]中PMMA实验结果吻合。因此,确定了选取的相关材料参数的合理性。

## 2 数值模拟方案

如图2所示,建立岩体中含不同节理的数量、宽度、位置和角度 $\alpha(0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ)$ 的双孔爆破模型。模型尺寸 $400\text{ cm} \times 400\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ ,炮孔半径 $4\text{ cm}$ ,间距 $100\text{ cm}$ ,双孔同时起爆。采用流固耦合算法,模拟时将边界条件、网格尺寸、求解时间等设置一样。

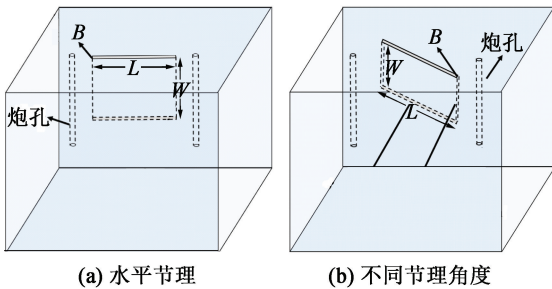


图2 岩体双孔爆破模型

Fig. 2 Double-hole blasting model of rocks

图2(a)中,水平节理长度 $L=80\text{ cm}$ 、厚度 $B=1\text{ cm}$ 、端部距炮孔中心 $10\text{ cm}$ 。研究水平节理层数取 $1 \sim 4$ 、节理层间距 $10\text{ cm}$ 时不同节理宽度 $W(1、5、10、15\text{ cm})$ 对岩体爆破裂纹扩展的影响。图2(b)中,节理长度 $L=120\text{ cm}$ 、厚度 $B=1\text{ cm}$ ,研究两炮孔中心连线处节理角度为 $30^\circ、45^\circ、60^\circ$ 时不同节理宽度 $W(5、10、15\text{ cm})$ 对岩体爆破裂纹扩展的影响。

## 3 爆破裂纹扩展数值模拟结果分析

### 3.1 水平节理对爆破裂纹扩展的影响

与炮孔连心线平行位置设1层节理时,分别与炮孔连心线平行位置处设置 $1、5、10、15\text{ cm}$ 不同

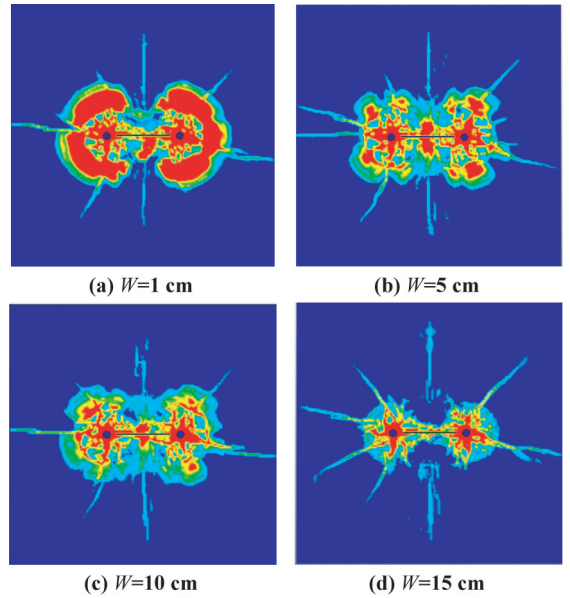


图3 1层水平节理时不同节理宽度对岩体爆破损伤的影响

Fig. 3 Influence of different joint widths on blasting damage of the rock when the number of horizontal joint layers is 1

宽度的水平节理。从图3可得,由于应力波的传播速度大于爆生气体的扩散速度,应力波先到达水平节理端部,并形成应力集中,使节理端部损伤变大,裂纹扩展;随后,爆生气体在节理端部进一步引起应力集中和裂纹扩展;同时,图3中各模型节理面中部区域损伤增大。表明节理中部先后受到爆炸应力波和爆生气体的叠加作用,应力集中超过节理面强度,导致节理面及附近岩体的损伤和破裂增大。且节理宽度增加时,节理中部损伤和破碎程度减小,说明节理宽度的增加对爆炸应力波传播以及爆生气体膨胀至节理中部的阻滞作用更明显。

为深入研究节理特征对岩体裂纹扩展的影响,在节理中部下方 $1\text{ cm}$ 设测点 $1^\#$ ,且每隔 $5\text{ cm}$ 设一个测点,用 $2^\#、3^\#、4^\#$ 表示,见图4。图5为节理宽度为 $1、10\text{ cm}$ 时各测点的有效应力时程曲线。

由图5可得,压缩应力波到达各测点时,单元有效应力迅速增大至第1次峰值。由于应力波遇到节理会发生反射,反射拉伸波出现后,各测点的有效应力再次增长至第2次峰值。测点 $2^\#、3^\#、4^\#$ 的峰值有

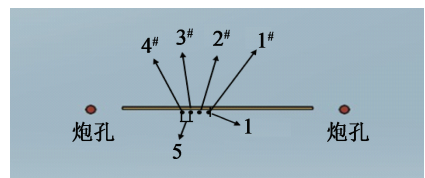
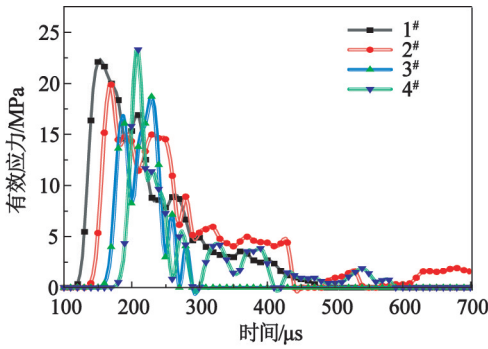
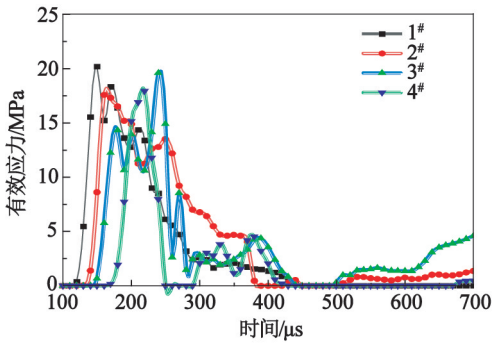


图4 各测点的位置(单位:cm)

Fig. 4 Location of each measuring point (Unit: cm)



(a)  $W = 1 \text{ cm}$



(b)  $W = 10 \text{ cm}$

图5 各测点的有效应力时程曲线

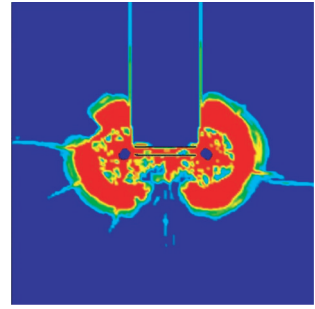
Fig. 5 Time history curve of effective stress at each measuring point

有效应力随着离炮孔距离的增加依次减小,符合应力衰减规律。因测点1#在应力波叠加处,有效应力变大,导致岩体破碎程度变大,裂纹数量密集;且节理宽度增加时,有效应力呈下降趋势,表明节理宽度增加时应力叠加效应减弱,导致岩体破碎程度减小,裂纹数量变少。

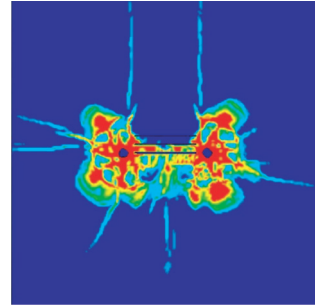
在第1层节理上方每隔10 cm分别设置第2、3、4层节理。不同节理层数和宽度引起的岩体爆破裂纹扩展的模拟结果见图6。

由图6(b)可得,3层节理时,第3层节理背爆侧出现小范围裂纹。这是绕射作用使节理背爆侧的局部拉伸应力超过岩体抗拉强度所致。由图6(c)可得,4层节理时,第4层节理背爆侧的裂纹范围比第3层更小。说明节理层数和宽度的增加使爆炸应力波在传播中能量逐渐衰减,导致第4层节理背爆侧拉伸应力减小,裂纹范围也相应变小。

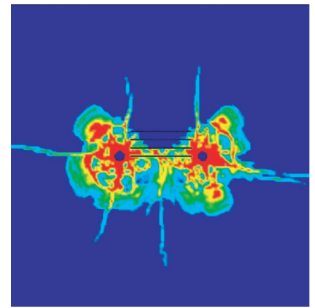
不同节理层数和宽度下端部裂纹的长度的变化见图7。节理宽度分别为1、5、10、15 cm时,端部裂纹长度分别从108.6、85.1、73.8 cm和49.7 cm减至72.8、61.5、60.1 cm和35.9 cm。说明节理层数增加,爆炸应力波和爆生气体的衰减和损耗增大,阻碍端部裂纹的延伸扩展;节理宽度增加,爆炸应力



(a) 水平节理2层( $W = 1 \text{ cm}$ )



(b) 水平节理3层( $W = 5 \text{ cm}$ )



(c) 水平节理4层( $W = 10 \text{ cm}$ )

图6 水平节理不同层数和宽度时岩体的爆破损伤

Fig. 6 Blasting damage of the rock with different layers and widths of horizontal joints

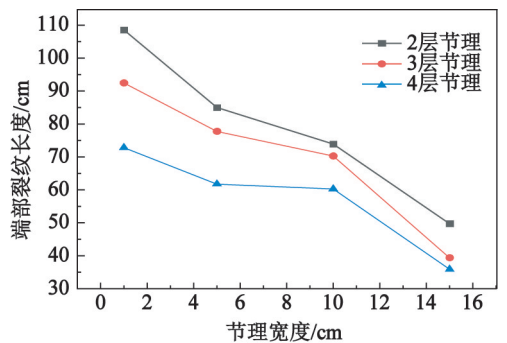


图7 不同节理层数和宽度下端部裂纹的长度

Fig. 7 Crack length at the lower end with different joint layers and widths

波在节理内部散射增加,爆生气体在节理中流动路径增加,导致节理端部的应力集中作用,爆生气体聚

集程度降低,阻碍端部裂纹的扩展。在节理发育的岩体中,炮孔间距应根据节理的密度和宽度进行调整。对于节理较宽且数量较多的区域,可适当减小炮孔间距,以确保爆破能量能够充分作用于岩体,提高破碎效果。

### 3.2 节理角度对爆破裂纹扩展的影响

在节理宽度为 5、10 cm 下,建立节理角度为 30°、45°、60°的数值模型。爆破裂纹的扩展如图 8 所示。

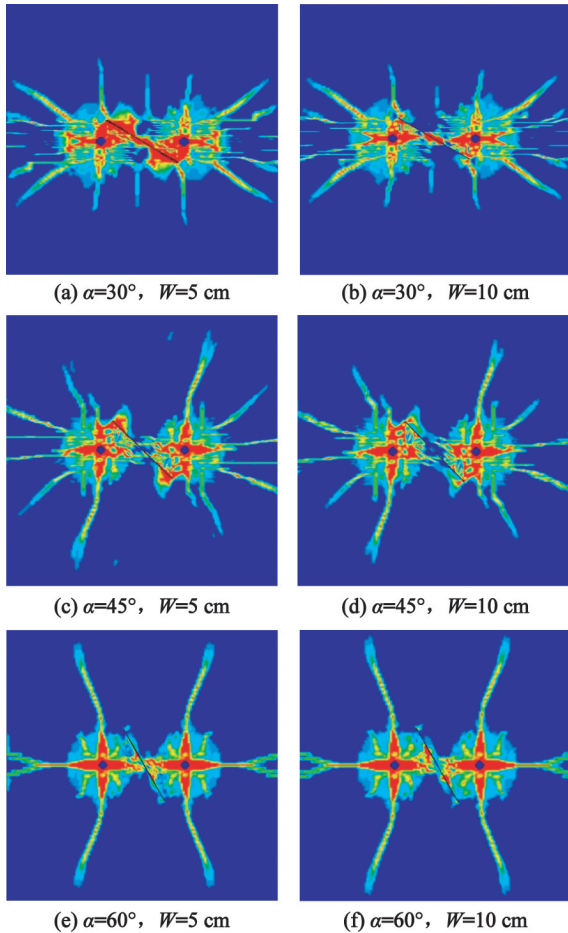


图 8 爆破裂纹的扩展

Fig. 8 Propagation of blasting cracks

由图8(a)~图8(b)可得:节理角度30°时,在爆炸应力波作用阶段,孔壁周边形成粉碎区;同时,节

理端部由于应力集中,拉应力超过岩体抗拉强度,使得该位置萌生拉伸裂纹。在爆生气体压力作用阶段,应力集中效应使节理端部的拉应力持续增大,导致已萌生的拉伸裂纹加速扩展,且靠近节理端部的爆生裂纹在扩展过程中沿着拉应力集中的方向不断延伸。

节理角度为 30°或 45°时,随着节理宽度增加,节理端部应力集中程度降低,导致裂纹演化驱动力减小,端部裂纹扩展长度减小;节理角度为 60°时,随着节理宽度增加,节理端部裂纹扩展长度几乎相等,这是离炮孔过远所致。

节理角度 30°时,两炮孔间爆生裂纹贯通效果最差;节理角度为 45°或 60°时,两炮孔间爆生裂纹连通效果显著。说明随着节理角度的增加,对炮孔间裂纹贯通的阻滞作用减弱。文献[20]中,结构面与光面爆破理想断裂面的夹角在 30°左右时,难以控制光面爆破效果;当夹角大于 60°时,结构面不会影响光面爆破光滑壁面在强度方面的形成。这与本文中得出的结论相符合。且在节理角度 30°、45°、60°时,随着节理宽度的增加,两炮孔间爆生裂纹连通效果减弱,说明节理角度和节理宽度对两炮孔间裂纹连通效果影响趋势相反。节理角度对爆破效果有显著影响。在实际工程中,应尽量使炮孔与节理面的夹角大于 45°,以提高裂纹的贯通程度和岩体的破碎效果。

## 4 工程实例

以文献[21]中的桂林鲁山水泥厂矿山(灰岩)爆破实验为例,验证前文所得的模拟结果。

该矿山爆区 A 组、B 组节理特性见表 2;爆破参数见表 3。

B 组节理延伸性好,密度小,规模大。因此,选 B 组为实验对象。为满足矿山岩体爆破块度小于 45 cm 的实际要求,通过控制炮孔与节理面夹角获得最佳破碎效果。图 9 分别为实验炮孔、数值模拟

表 2 鲁山水泥厂灰岩矿山节理特性

Tab. 2 Joint characteristics of limestone mine of Lushan Cement Plant

组号	倾角/(°)	密度条/cm	充填胶结情况	连通性	规模	分类	抗剪强度/( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	抗压强度/( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	抗拉强度/( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	
A	170 ~ 190 75 ~ 80	1 ~ 3	铁质胶结,风化后亚黏土充填	好	数米至数十米	构造节理	73	40	1 095.46	56.34
B	40 80	2 ~ 7	铁质,局部有方解石脉胶结,风化后黏土充填	较 A 组稍差	数米至数十米	构造节理	78	45	896.35	30.09

表 3 爆破参数

Tab. 3 Blasting parameters

孔号	钻孔角度/ (°)	单孔装药量/ kg	炸药单耗/ (kg · m <sup>-3</sup> )	最小抵抗线/ m	爆破块度(占比)/ cm(%)
1 <sup>#</sup>	25	0.30	0.129	1.17	>60(3);47~60(4);<20(40)
2 <sup>#</sup>	70	0.30	0.255	1.05	45~60(5);20~45(40);<20(55)
3 <sup>#</sup>	15	0.15	0.102	0.75	45~60(10);20~45(40);<20(50)
4 <sup>#</sup>	15	0.15	0.114	0.80	>60(7);45~60(13);<45(20)
5 <sup>#</sup>	60	0.15	0.139	0.80	45~50(5);20~45(80);<10(15)
6 <sup>#</sup>	35	0.15	0.135	1.10	45~60(7);20~45(7);<20(30)
7 <sup>#</sup>	5	0.38	0.090	1.30	>60(15);45~60(20);20~45(35)
8 <sup>#</sup>	5	0.45	0.070	1.20	>60(10);45~60(25);20~40(30)
9 <sup>#</sup>	40	0.40	0.143	1.20	>45(5);20~45(55);<20(40)
10 <sup>#</sup>	0	0.40	0.180	0.50	>45(5);20~45(55);<20(40)
11 <sup>#</sup>	10	0.15	0.157	0.60	>45(5);20~45(40);<20(55)
12 <sup>#</sup>	20	0.15	0.130	0.70	>45(20);20~45(55);<20(25)

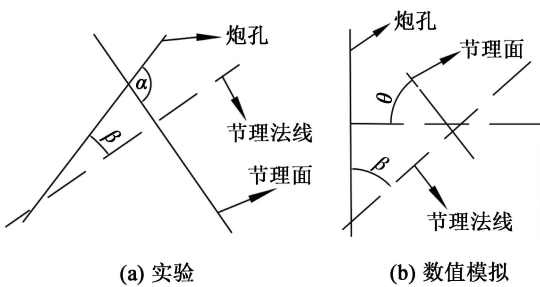


图 9 炮孔与节理夹角

Fig. 9 Angles between the blast hole and the joint

炮孔与节理面夹角。

从图 9 可得,实验与数值模拟中,当炮孔与节理面夹角  $\alpha$ 、炮孔连心线与节理面夹角  $\theta$  增大时,炮孔与节理面法线的夹角  $\beta$  也随之增大。

岩体中不同节理角度会对裂纹贯通程度与岩体破碎程度产生影响。选取表 3 中孔 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>,绘制节理角度为 15°、30°、40°、60°时岩体爆破块度在 20~45 cm 之间的曲线,并与数值模拟 30°、45°、60°岩体双孔裂纹贯通程度进行对比,如图 10 所示。对比发现,节理角度越大,岩体破碎程度越好,验证了前文数值模拟中,节理角度越大,双孔裂纹贯通程度越好的结论。因此,实验与数值模拟说明,节理面角度  $\alpha$  较小时,裂纹贯通程度差,岩体破碎效果差;节理角度  $\alpha$  较大时,裂纹贯通程度好,岩体破碎效果好。

通过数值模拟结果可以看出,节理宽度和层数对裂纹扩展的影响较为显著,尤其是节理宽度的增加会显著阻碍裂纹的扩展。而节理角度的增加则有助于两炮孔间裂纹的贯通。这些结果表明,节理宽

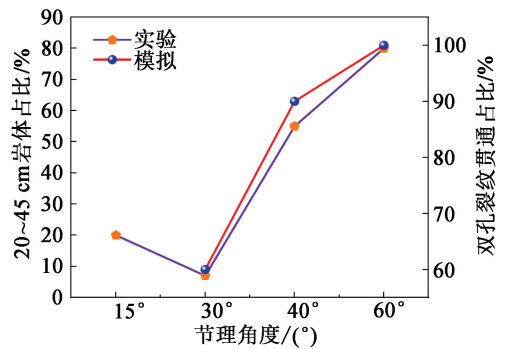


图 10 实验结果与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of test results and simulation results

度和角度是影响裂纹扩展的主要因素,而节理层数的影响相对较小。

## 5 结论

采用数值模拟建立了含有不同节理的数量、宽度、位置和角度的岩体的双孔爆破数值模型。证明各参数共同作用时,对爆炸应力波和爆生气体传播以及爆破裂纹的扩展有显著影响。并通过工程实例进行验证。结论如下:

1) 与炮孔连心线平行位置设置 1 层水平节理时,中部区域先受两侧炮孔爆炸应力波的叠加作用,后受爆生气体叠加作用,导致损伤增大。且节理宽度增加时,对爆炸应力波和爆生气体向节理中部传播的阻滞作用更明显。

2) 随着节理层数和宽度的增加,爆炸应力波和爆生气体的衰减和损耗增大,导致爆生气体聚集程

度降低,使节理间损伤和裂纹范围减小,阻碍了节理端部裂纹的延伸和扩展。

3) 相比于 $30^\circ$ 节理角度,节理角度为 $45^\circ$ 或 $60^\circ$ 时,节理端部产生拉伸裂纹扩展速度和程度相对较小。随着节理角度的增加,两炮孔间爆生裂纹连通效果显著。说明节理角度增加,对两孔间裂纹贯通的阻隔作用减弱。而随着节理宽度的增加,两炮孔间爆生裂纹连通效果减弱,表明节理角度和节理宽度对两炮孔间裂纹连通效果有着相反的影响趋势。

### 参 考 文 献

- [1] 魏晨慧,朱万成,白羽,等. 不同节理角度和地应力条件下岩石双孔爆破的数值模拟[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 926-935.  
WEI C H, ZHU W C, BAI Y, et al. Numerical simulation on two-hole blasting of rock under different joint angles and in-situ stress conditions [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 926-935.
- [2] 李秀虎,郭连军,潘博,等. 节理岩体爆破数值模拟研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40(5): 390-395.  
LI X H, GUO L J, PAN B, et al. Numerical simulation of blasting in jointed rock mass [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2017, 40(5): 390-395.
- [3] 赵安平,冯春,郭汝坤,等. 节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2027-2036.  
ZHAO A P, FENG C, GUO R K, et al. Effect of joints on blasting and stress wave propagation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2027-2036.
- [4] 沈世伟,廖文旺,徐燕,等. 不同节理间距条件下岩体双孔爆破动焦散试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2180-2186.  
SHEN S W, LIAO W W, XU Y, et al. Dynamic caustics test of rock mass under different joint spacing conditions with two-hole blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2180-2186.
- [5] 杨仁树,王晨曦,王雁冰,等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3501-3506.  
YANG R S, DING C X, WANG Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl.2): 3501-3506.
- [6] 刘一帆,王梅,王晨龙,等. 地应力下节理岩体爆破损伤演化数值研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 61-68.  
LIU Y F, WANG M, WANG C L, et al. Numerical study on blasting damage evolution of jointed rock mass under in-situ stress [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4): 61-68.
- [7] 费鸿禄,山杰,包士杰,等. 节理几何特征对爆破裂纹扩展的数值模拟研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 12-21.  
FEI H L, SHAN J, BAO S J, et al. Numerical simulation study of joint geometric characteristics for explosion crack propagation [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 12-21.
- [8] 王雁冰,孔维文,左进京,等. 爆炸冲击波和爆生气体的动态作用演化机制的实验和数值分析[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊1): 1-13.  
WANG Y B, KONG W W, ZUO J J, et al. Experimental and numerical analysis of dynamic action evolution of blast shock wave and detonation gas [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(Suppl.1): 1-13.
- [9] 王海洋,万圣鑫,陈祥,等. 应力差和节理角度对水压爆破岩体损伤影响研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(1): 1-8.  
WANG H Y, WAN S X, CHEN X, et al. Study on the influence of stress difference and joint angle on rock mass damage caused by hydraulic blasting [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(1): 1-8.
- [10] SINGH D P, RAO Y V A, SALUJA S S. A laboratory study of effects of joints on rock fragmentation [C]// The 21st U. S. Symposium on Rock Mechanics (US-RMS). Rolla, MO, US, 1980.
- [11] CHAKRABORTY A K, JETHWA J L, PAITHANKAR A G. Effects of joint orientation and rock mass quality on tunnel blasting [J]. Engineering Geology, 1994, 37(3/4): 247-262.
- [12] JAYASINGHE L B, SHANG J L, ZHAO Z Y, et al. Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 116: 103207.
- [13] 王卫华,张恒根,李夕兵. 爆破载荷下岩石的拉压损伤模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 3918-3929.  
WANG W H, ZHANG H G, LI X B. Tension-compression damage model of rock under blasting load [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 3918-3929.

[14] 边俊城. 爆炸应力波在节理岩体中传播规律的数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.  
BIAN J C. Numerical simulation of the propagation of stress wave in jointed rock mass [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.

[15] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.

[16] VARMA M, MAJI V B, BOOMINATHAN A. Influence of rock joints on longitudinal wave velocity using experimental and numerical techniques [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141: 104699.

[17] 曹泽铭, 杨建华, 叶志伟, 等. 地应力对岩体爆破块度分布特征的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(10): 2202-2211.  
CAO Z M, YANG J H, YE Z W, et al. Influences of in-situ stress on distribution characteristics of rock blasting fragmentation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(10): 2202-2211.

[18] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 19-33.

[19] 杨仁树, 苏洪. 爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 482-489.  
YANG R S, SU H. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosion load [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 482-489.

[20] 张奇. 层状岩体光面爆破效果的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(1): 60-66.  
ZHANG Q. Theoretical analysis of smooth blasting effects in layered rock structure [J]. Explosion and Shock Waves, 1988, 8(1): 60-66.

[21] 张平, 吴德伦. 节理爆破的工程实践[C]//重庆岩石力学与工程学会. 重庆岩石力学与工程学会第一届学术讨论会论文集. 重庆, 1992.

## 版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部