

高压物理学报

岩石爆破损伤演化与动力响应的空孔效应

李涛 倪羽 王志亮

Effect of Empty-Hole on Blasting-Induced Damage Evolution and Dynamic Response of Rock

LI Tao, NI Yu, WANG Zhiliang

引用本文:

李涛, 倪羽, 王志亮. 岩石爆破损伤演化与动力响应的空孔效应[J]. 高压物理学报, 2026, 40(2):025301. DOI: 10.11858/gywlb.20251116

LI Tao, NI Yu, WANG Zhiliang. Effect of Empty-Hole on Blasting-Induced Damage Evolution and Dynamic Response of Rock[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2026, 40(2):025301. DOI: 10.11858/gywlb.20251116

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同不耦合系数下花岗岩爆破损伤特性的离散元模拟

Discrete Element Simulation of Blasting Damage Characteristics of Granite under Different Decoupling Coefficients
高压物理学报. 2022, 36(1): 015301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210804>

高地应力下岩体的爆破损伤及能量特性

Blasting Damage and Energy Characteristics of Rock Mass under High *in-Situ* Stress
高压物理学报. 2022, 36(6): 064202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220599>

非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock
高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230638>

深部煤层水压爆破裂纹扩展规律

Crack Propagation Regularity of Hydraulic Blasting in Deep Coal Seam
高压物理学报. 2022, 36(3): 035301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210912>

不同割缝宽度爆生裂纹扩展行为研究

Study on the Behavior of Blasting Crack Propagation under Different Crack Widths
高压物理学报. 2024, 38(6): 064107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240733>

单向围压下切槽爆破裂纹扩展规律研究

Crack Propagation Law of Notch Blasting under Unidirectional Confining Pressure
高压物理学报. 2023, 37(6): 064102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230716>

岩石爆破损伤演化与动力响应的空孔效应

李涛, 倪羽, 王志亮

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对传统周边爆破易诱发随机裂纹损伤围岩问题, 结合弹性力学理论与基于 ANSYS/LS-DYNA 的数值模拟方法, 对空孔定向爆破中的损伤演化规律与动力响应特性进行了深入分析。首先, 基于弹性力学理论, 阐释了空孔在爆炸荷载下通过应力波反射产生拉应力集中从而实现定向裂纹扩展的控制机制; 接着, 通过建立平面双孔不耦合装药数值模型, 系统研究了炮孔间距和地应力场对损伤演化的影响; 最后, 分析了空孔附近峰值应力和质点峰值振速的动态变化规律。结果表明: 空孔能够显著改变爆炸能量分布, 将其引导至集中于炮孔连线方向, 从而有效抑制非预期裂纹的萌生和扩展; 空孔的定向效果受地应力场的调控, 高地应力条件会削弱空孔水平方向的拉应力集中程度, 进而抑制炮孔间裂纹扩展, 故炮孔宜平行于岩体最大主应力方向布置, 使定向效果最大化, 并减弱地应力的抑制作用; 当炮孔间距为 11~14 倍炮孔直径时, 可促进主裂纹的稳定定向扩展, 抑制非预期裂纹的发育, 显著改善围岩损伤的控制效果。在高地应力工况下, 建议将炮孔间距参考值适当缩小至 8~11 倍炮孔直径。

关键词: 岩石; 空孔效应; 损伤演化; 动力响应; 地应力; 裂纹

中图分类号: TD235; O521.9

文献标志码: A

钻孔爆破法作为岩石开挖的关键技术, 在采矿、隧道掘进及地下空间开发等领域发挥着不可替代的作用^[1]。然而, 传统爆破工艺在炮孔间形成贯穿裂纹的同时, 往往在炮孔壁其他方向产生大量随机裂纹, 显著削弱围岩的完整性和稳定性, 易引发塌方、支护失效、突水突泥等灾害, 不仅大幅增加了施工风险和经济成本, 而且严重威胁人员安全和工程耐久性^[2]。为了满足爆破开挖要求并维持围岩稳定, 岩石定向断裂爆破技术应运而生^[3]。其中, 相较于传统槽爆破等技术, 空孔定向爆破技术因具有成本低、操作简单等优势, 在工程实践中得到大量应用, 且成效显著。该技术通过在炮孔间预设空孔, 使爆炸荷载作用后空孔周围产生应力集中^[4], 引导裂纹萌生并朝空孔方向扩展, 从而优化实际工程爆破效果, 实现精准定向断裂。迄今为止, 已有诸多学者结合理论分析、现场试验和数值模拟方法, 对空孔效应进行了多角度的深入研究。

在理论研究方面, Langefors 等^[5]早在 20 世纪就结合理论分析与工程实践, 率先对直眼掏槽爆破的空孔效应进行了系统研究, 并提出了相应的计算方法。随后, 张召冉等^[6]在掏槽爆破分析的基础上, 推导了爆生裂纹长度的计算公式, 建立了空孔处径向裂纹萌生的判据。田国宾^[7]则通过理论分析阐述了空孔对邻近炮孔爆破的影响, 给出了空孔影响下孔壁应力的计算公式。在实验研究方面, Mohanty^[8]最早通过实验证实了在装药孔两侧设置空孔可诱导产生径向控制裂纹, 其效果与切槽爆破相当。陈秋宇等^[9]的实验进一步表明, 当空孔位于爆炸裂隙区时, 能显著控制裂纹扩展方向。近年来, 数字激光动态焦散线技术在岩石爆破研究中得到广泛应用。Wang 等^[10]利用该技术研究了上部冲击载荷作用下空孔底部预制裂纹的扩展行为, 发现空孔能够改变应力波传播路径, 并吸引裂纹向其延伸。杨仁树等^[11]考

* 收稿日期: 2025-06-23; 修回日期: 2025-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(12272119, U1965101)

第一作者: 李涛(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石动力学研究. E-mail: 3443302510@qq.com

通信作者: 王志亮(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石动力学与爆破工程研究. E-mail: cvewzL@hfut.edu.cn

察了空孔孔径对裂纹扩展的影响,发现在一定范围内孔径越大,导向作用越显著。

近年来,数值模拟方法在爆炸动力学研究中发挥着日益重要的作用^[12]。以 ANSYS/LS-DYNA 为代表的显式有限元程序凭借其在非线性动力响应模拟方面的优势,在爆破工程中获得了广泛应用^[13]。在空孔作用机制研究方面:汪海波等^[14]通过掏槽孔爆破应力场分析,揭示了空孔附近应力波叠加与反射的显著特征;Qin 等^[15]基于空孔效应理论,建立了孔壁动态应力计算模型,成功预测了掏槽区岩体的动态断裂机理;Meng 等^[16]则发现,空孔能显著提升周边岩石的拉应力水平,且这种增强效应与孔径呈正相关关系。

目前,人们对掏槽爆破在创造初始自由面与碎胀空间下的空孔效应的研究较为充分^[17],对于周边爆破,尤其是预裂爆破这类以产生精确导向裂纹、控制围岩损伤为目标的关键技术,在炮孔间距、地应力等不同重要参数下的空孔效应研究相对匮乏。炮孔间距作为控制爆破质量的关键参数,可显著影响爆炸能量分布、裂隙扩展及岩体破碎效果^[18]。此外,随着爆破开挖日益向更深部发展,深部岩体中复杂的地应力环境显著制约岩石破碎过程^[19]。然而,现有研究在侧压力系数 $\lambda(\lambda=p_x/p_y$, 其中, p_x 为水平荷载, p_y 为竖直荷载)、主应力大小差异及主应力方向等关键地应力参数如何系统调控空孔附近的应力集中、裂纹扩展路径及最终损伤模式方面尚显不足,缺乏普适性的规律总结和深入探讨。因此,有必要深入探究空孔定向爆破技术在周边爆破中的应用机制,为工程实践提供更有效的指导。

本研究采用有限元法,首先从理论上对空孔效应的力学机理进行阐释;然后,通过数值模拟,系统研究空孔在周边爆破中对岩石爆破损伤演化的影响,重点考察炮孔间距和地应力的作用;最后,分析空孔附近的峰值应力和质点峰值振速(peak particle velocity, PPV)的变化,力求揭示其应力集中效应与裂纹定向引导机制。

1 空孔作用下的爆破机理

1.1 相邻炮孔间的空孔效应

周边孔分组情况可简化为图1所示的平面应变模型。设无限大平板含有2个圆孔,介质均匀、连续,且具有各向同性。其中:A孔为装药孔,B孔为空孔,炮孔间距为 a 。A孔爆破后释放的能量作用于周围岩体,在其周围形成的裂纹长度记为 l_p ,在B孔周围诱发的裂纹长度记为 l_{pp} 。根据弹性力学理论,空孔附近的应力状态可表示为^[20]

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} \left[(1+k^2)(\sigma_{\theta} - \sigma_r) + (1+3k^4)(\sigma_{\theta} + \sigma_r) \cos 2\theta \right] \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\theta\theta}$ 为空孔附近岩石中某一点的环向应力; σ_r 和 σ_{θ} 分别为炸药爆炸在岩石中引起的某一点的径向和环向应力; θ 为任意一点到空孔中心的径向与水平方向(炮孔连线)的夹角; k 为空孔半径 r_b 与岩石中任意一点到空孔中心的距离 r 的比值,即 $k=r_b/r$ 。

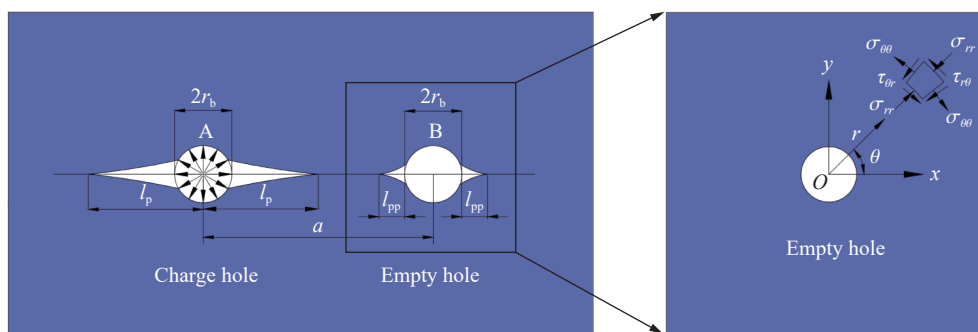


图1 相邻炮孔间裂纹贯穿机理

Fig. 1 Penetration mechanism of cracks between adjacent blastholes

在 B 孔孔壁处($k=1$), 令 $d\sigma_{\theta\theta}/d\theta=0$, 可知: 当 $\theta=0$ 或 $\theta=\pi$ 时, 环向应力取得极大值(拉应力为正, 压应力为负); 当 $\theta=\pm\pi/2$ 时, 环向应力取得极小值。分析表明, 最大拉应力位于相邻炮孔的连线上。当该应力值超过岩石的抗拉强度时, 孔壁便会沿此连线方向萌生拉伸裂纹。进一步分析可知, 此峰值拉应力随炮孔间距增大呈递减趋势。

1.2 地应力对炮孔周围应力分布的影响

深部岩层的地应力环境显著影响岩石的破碎过程。为此, 本研究首先探讨地应力对空孔周边岩石应力场的影响。图 2(a) 展示了相应的平面力学模型, 设无限大平板含 1 个圆孔, 其介质均匀、连续, 且具有各向同性, 同时承受水平荷载 p_x 和竖直荷载 p_y 。基于弹性力学理论, 推导出地应力作用下空孔周围岩石的应力分布规律^[20], 即

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_x + p_y}{2}(1 + k^2) - \frac{p_x - p_y}{2}(1 + 3k^4)\cos 2\theta \tag{2}$$

式中: $\sigma_{\theta\theta}$ 为地应力作用下空孔周围岩石中的环向应力。

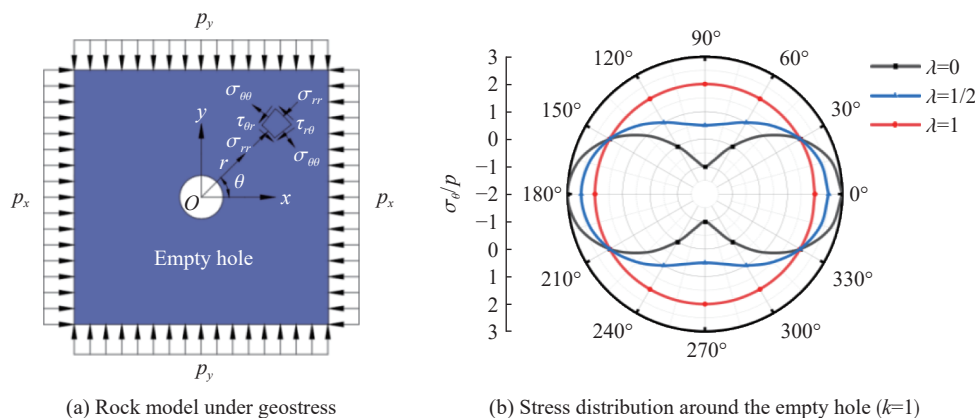


图 2 地应力作用下空孔周围的应力分布
Fig. 2 Stress distribution around an empty hole under *in-situ* stress

图 2(b) 和图 3 揭示了不同应力状态下空孔壁附近岩石的环向应力分布规律。在相同爆距 r 处: 静水压力条件下, 环向应力呈各向同性分布, 并随初始应力的增大而升高; 非静水压力状态下, 环向应力呈各向异性特征, 表现为水平方向上的环向应力随 λ 的增大呈线性减小趋势, 而垂直方向上的变化规律与之相反, 且变化幅度相对较大。在单向地应力作用下, 初始应力作用方向上出现局部拉应力集中现象。考虑到岩石的抗拉强度远低于抗压强度, 该拉应力集中区附近的岩体更易发生破裂。此外, 环向应力集中在炮孔壁处, 并随 r/r_b 的增大最终趋于法向加载应力。需要指出的是, 上述弹性力学分析主要用于揭示空孔诱导应力重分布及裂纹优先生长方向的力学机理, 其结论用于解释后续数值模拟中裂纹演化特征的物理原因, 而非对有限域条件下损伤尺度与应力幅值的严格定量预测。

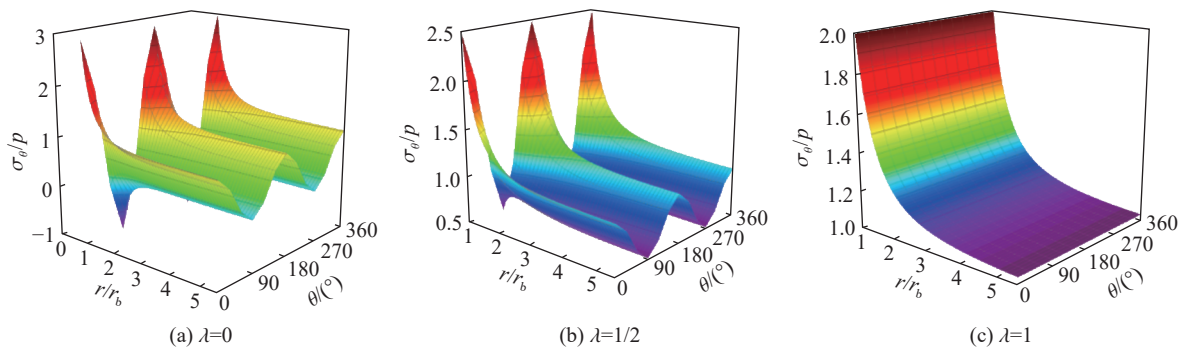


图 3 炮孔周围岩石中的静态应力分布($k<1$)
Fig. 3 Distribution of static stress in rock around the blasthole ($k<1$)

2 本构模型及参数选取

岩石作为典型的脆性材料,其力学行为具有高度复杂性。在 ANSYS/LS-DYNA 软件中,常用 Holmquist-Johnson-Cook(HJC)和 Riedel-Hiermaier-Thoma(RHT)2种本构模型来模拟岩石的爆破损伤。相较于 HJC 模型,RHT 模型不仅能反映岩石在三维应力空间中的强度特征,同时也全面考虑了动-静载耦合作用下深部开挖岩体的应变率、围压、应变硬化和损伤软化对其力学性能的影响^[21]。同时,基于 RHT 模型的损伤分布能有效再现爆破破碎带的形成以及损伤区内裂纹的萌生和扩展过程^[22]。鉴于此,本研究选用 RHT 模型进行岩石爆破数值模拟,具体参数列于表 1^[23],其中: ρ_0 为密度, G 为剪切模量, f_c 为抗压强度, D_1 、 D_2 为损伤因子, f_t^* 、 f_s^* 分别为相对抗拉强度和抗剪强度, p_{crush} 、 p_{comp} 分别为孔隙坍塌和压实压力, n 为孔隙度指数, A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 、 T_1 和 T_2 为状态方程参数, $\dot{\epsilon}_{c0}$ 、 $\dot{\epsilon}_{t0}$ 分别为参考压缩应变率和参考拉伸应变率, β_c 、 β_t 分别为压缩和拉伸应变率指数, A 、 N 为破坏面参数, Q_0 、 B 为 Lode 相关因子, g_c^* 、 g_t^* 分别为压缩和拉伸屈服面参数。

表 1 RHT 模型的材料参数^[23]
Table 1 Material parameters of the RHT model^[23]

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	f_c/MPa	β_t	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa	p_{comp}/GPa
2606	19.8	64.1	0.024	1.6	1.6	19.5	19.5	6.0
f_t^*	f_s^*	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	Q_0	B	$\dot{\epsilon}_{c0}/\text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_{t0}/\text{s}^{-1}$
0.012	0.15	19.5	31.2	17	0.685	1.6	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-6}
p_{crush}/MPa	g_c^*	g_t^*	D_1	D_2	β_c	A	N	n
42.7	0.8	0.9	0.036	1	0.019	2.27	0.98	4

炸药采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,状态方程采用*EOS_JWL,其表达式为

$$p_j = A_j \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_j \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_j}{V} \quad (3)$$

式中: p_j 为爆轰产物压力, V 为爆轰产物的相对体积, E_j 为比内能, A_j 、 B_j 、 R_1 、 R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数。具体参数取值列于表 2^[24],其中 D 为爆速。

表 2 炸药的材料参数^[24]
Table 2 Material parameters of the explosive^[24]

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_j/GPa	E_j/GPa	A_j/GPa	B_j/GPa	R_1	R_2	ω
1180	5122	9.53	3.87	276.2	8.44	5.2	2.1	0.5

空气采用*MAT_NULL 材料模型,状态方程采用*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,其表达式为

$$p_a = C_0 + C_1 \mu_a + C_2 \mu_a^2 + C_3 \mu_a^3 + (C_4 + C_5 \mu_a + C_6 \mu_a^2) E_0^a \quad (4)$$

式中: p_a 为空气压力, $C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数, E_0^a 为空气体积内能, μ_a 为动态黏度系数。通常 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$, $C_4=C_5=0.4$ 。

为评估所选模型参数的适用性,本研究基于 Banadaki^[25]的试验开展数值模拟。图 4(a)为基于上述模型参数的数值结果。炸药起爆后,炮孔附近区域在冲击波作用下首先形成压碎区。随着冲击波能量衰减并转化为应力波,其峰值应力低于岩石的动态抗压强度,压碎区范围不再扩展。此时,径向应力波压缩岩石产生切向拉应力,岩石因其较低的抗拉强度而开裂,导致径向裂纹萌生形成裂隙区。除径向裂纹外,在裂隙区还有明显的环向拉伸裂纹。对比图 4(b)中的岩石单孔爆破试验结果可知,本数值模拟结果与之高度吻合,表明本研究所采用的参数能够有效描述岩石爆破裂纹的扩展过程,可将其用于后续空孔作用下爆破裂纹扩展的数值模拟。

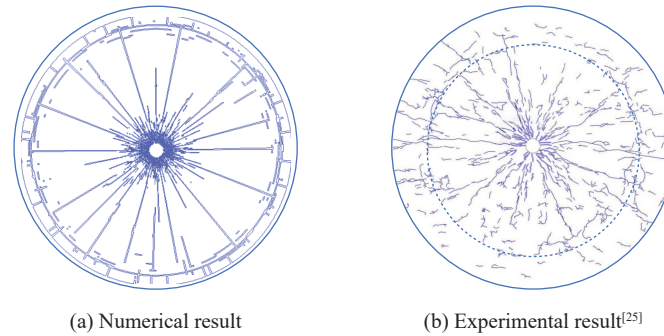


图 4 岩石单孔爆破裂纹扩展对比

Fig. 4 Comparison of crack propagation in rock under single-hole blasting

3 数值模拟及结果分析

为研究爆破中空孔的定向断裂作用,本研究基于双孔爆破平面应变模型(介质均匀、连续,且具有各向同性),利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 构建了如图 5 所示的计算模型。模型的几何尺寸为 $150\text{ cm}\times 200\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$,包含 2 个炮孔及位于其中心位置的 1 个导向空孔,孔径均为 4.2 cm ^[20];采用不耦合装药形式,炸药直径为 3.0 cm 。模型四周为无反射边界,前后设置法向位移约束。计算中采用 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 单位制,炸药和空气介质采用任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)单元,岩石采用 Lagrange 单元,并通过定义流固耦合与多物质组关键字,实现爆炸荷载向岩体的有效传递。

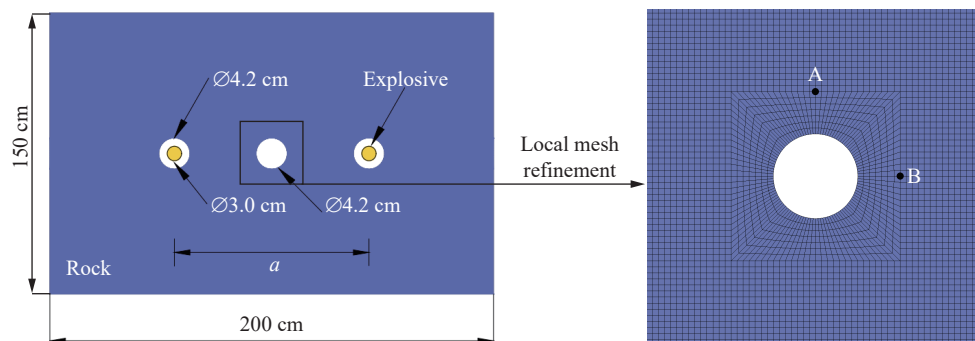


图 5 数值模型概况

Fig. 5 Overview of the numerical model

3.1 空孔作用下定向爆破损伤裂纹发育特征

基于验证的材料参数,首先对空孔作用下孔间裂纹的扩展过程进行数值模拟(无地应力,炮孔间距 a 取 0.6 m)。图 6 和图 7 分别描述了不同时刻爆炸应力波的传播过程以及炮孔间损伤裂纹的萌生-扩展-贯通过程,其中:图 6(d)和图 7(d)为对照组,2 个炮孔之间无空孔。炸药引爆后,爆炸冲击波产生并在岩石中向外传播,如图 6(a)所示。冲击波首先作用于炮孔周围岩石,使其发生严重破碎,形成压碎区,压碎区直径约为炮孔直径的 3 倍,如图 7(a)所示。冲击波在传播过程中因能量耗散及波阵面的扩大,强度逐渐降低,衰减为应力波,其应力峰值低于岩石的抗压强度,压碎区范围不再扩展。然而,径向应力波压缩岩石将形成切向拉应力,岩石因其较低的抗拉强度而开裂,导致径向裂纹萌生形成裂隙区。从图 6(b)可以看出, $t=100\text{ }\mu\text{s}$ 时,应力波在空孔处叠加,在炮孔连线方向形成明显的拉应力集中区域(深蓝色部分)。当拉应力幅值超过岩体的动态抗拉强度时,空孔处围岩发生破裂,萌生初始裂纹(见图 7(b)),该裂纹随后沿炮孔连线定向扩展。 $t=200\text{ }\mu\text{s}$ 时,如图 6(c)所示,随着应力波继续向外传播,两炮孔间的裂纹贯穿,径向裂纹充分扩展(见图 7(c))。

此外,对比图 7(c)和图 7(d)可知,存在空孔时,水平方向上的裂纹发育程度明显高于垂直方向,炮孔之间出现的裂纹数量较少,但宽度较大,且裂纹扩展趋向于空孔,这是爆炸应力波在空孔附近反射叠

加的结果。在无导向空孔条件下,炮孔间已生成的 2 条裂纹形成新的自由面,诱发裂纹相互吸引并发生偏转,最终在炮孔间贯通呈相互勾连状,与实验中观察到的现象^[26]一致。图 6(c)中空孔左右两侧有较明显的拉应力集中区域,而无空孔作用时,由于缺乏空孔的应力集中效应,两炮孔之间的应力分布较紊乱,如图 6(d) 所示。上述现象同时验证了在爆破工程中通过设置空孔实现定向断裂控制的可行性。

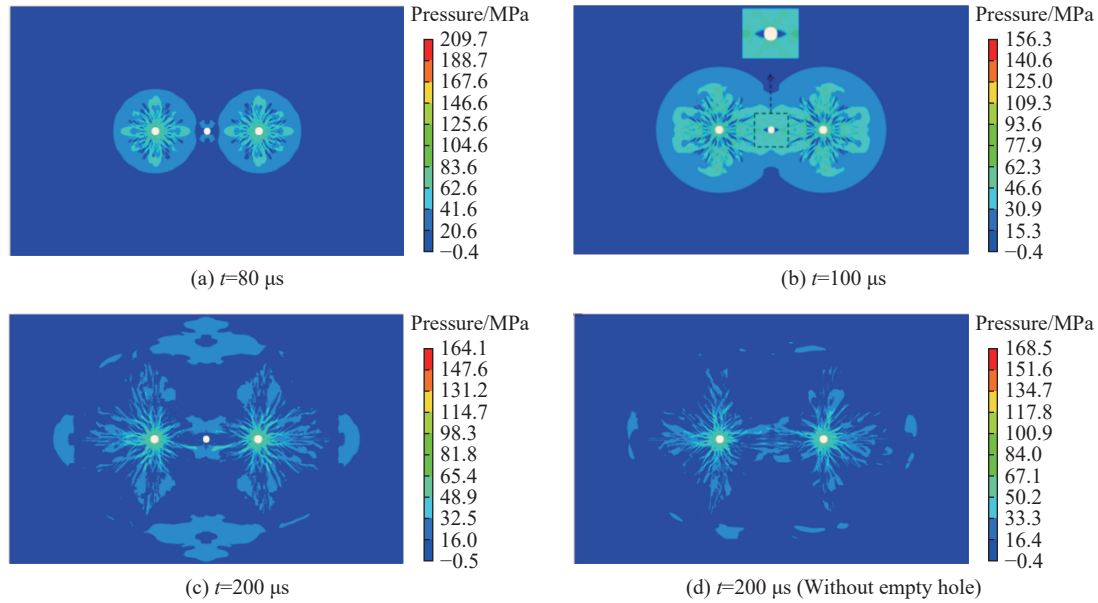


图 6 空孔作用下的应力云图

Fig. 6 Contours of blasting-induced stress under the action of empty hole

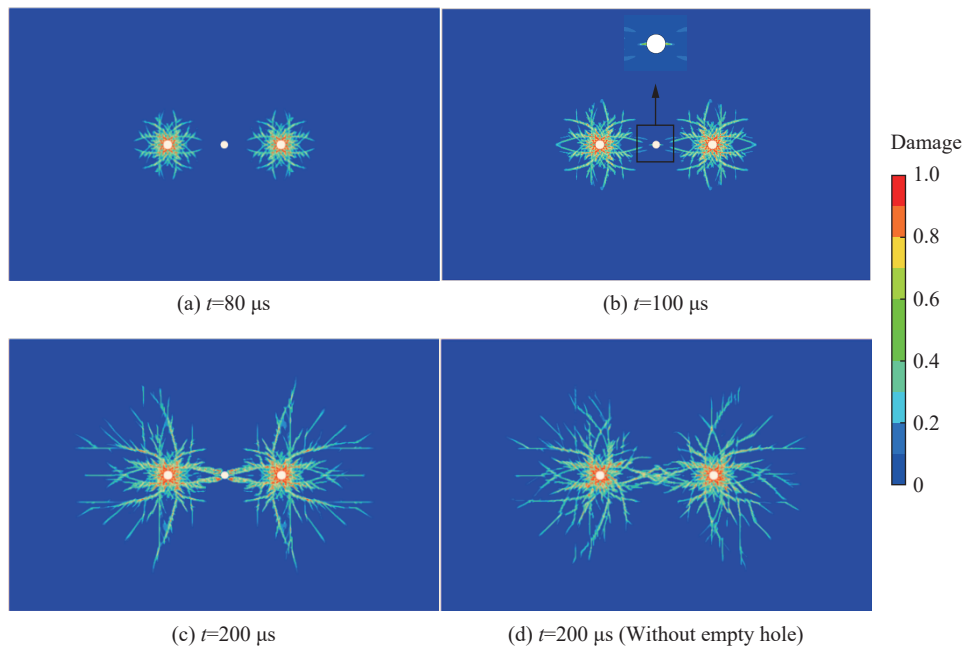


图 7 空孔作用下的爆破损伤云图

Fig. 7 Contours of blasting-induced damage under the action of empty hole

3.2 炮孔间距对空孔作用下定向爆破的影响

分别对不同炮孔间距下的有、无空孔模型进行了数值研究,炮孔间距 a 分别取 8、11、14、17、20 倍炮孔直径,为便于网格划分, a 分别取 0.36、0.48、0.60、0.72 和 0.84 m。图 8 展示了不同炮孔间距下岩石的爆破损伤。其中,图 8(f) 为无空孔作用下的爆破损伤云图。从图 8(a)~图 8(e) 可以看出,起爆

孔与空孔之间的间距是影响裂纹长度和数量的关键参数。随着 a 从 0.36 m 逐渐增加到 0.84 m, 应力波叠加效应减弱, 导致炮孔之间形成的损伤裂纹数量减少, 而在炮孔非预期方向, 裂纹数量增加, 空孔效应减弱。当炮孔间距为 0.36、0.48 和 0.60 m 时, 炮孔附近的岩石破碎效果、裂纹数量和裂纹贯穿情况均较好。然而, 过小的炮孔间距 (如 $a=0.36$ m) 导致炮孔间裂纹密集分布且短小, 缺乏明显的方向性, 无法有效地体现空孔对裂纹扩展的导向作用。当 $a>0.60$ m 时, 炮孔间的贯通裂纹数量减少, 各装药孔周围形成独立的破碎区。 a 增至 0.84 m 时, 炮孔之间仅有一条贯穿裂纹。

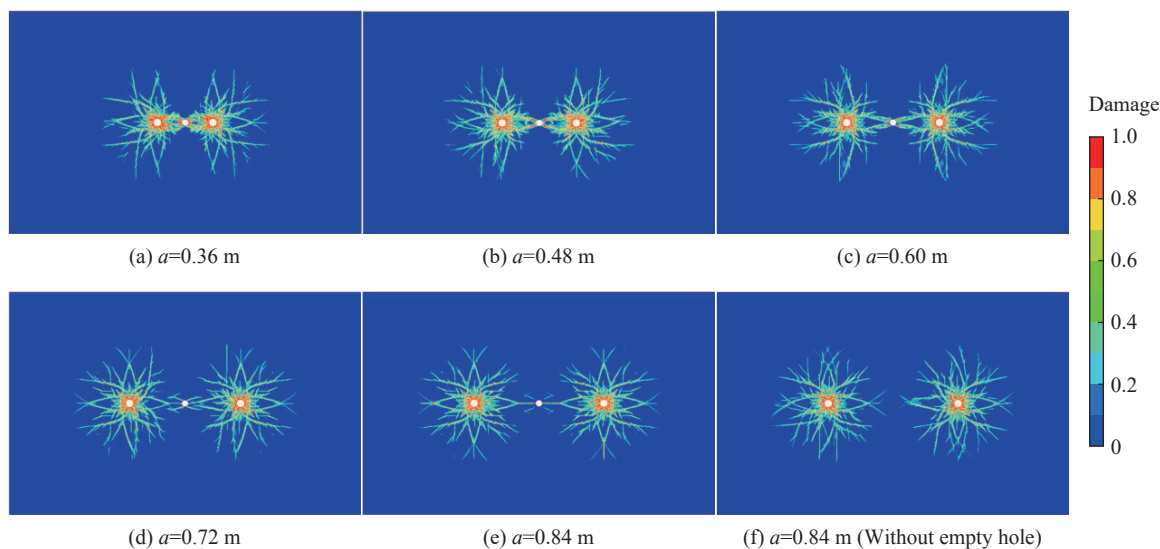


图8 空孔作用下不同炮孔间距时的爆破损伤云图

Fig. 8 Contours of blasting-induced damage with different blasthole spacing under the action of empty hole

对比图 8(e) 和图 8(f) 可知, 在没有空孔的情况下, 由于 a 过大, 已经无法形成贯穿裂纹。相反, 存在空孔时, 炮孔之间依然能形成裂纹, 且趋向于空孔扩展, 充分体现了爆破过程中空孔的定向控制作用。总体上看, 装药孔与空孔连线上萌生的裂纹在长度和密度上均显著优于其他方向, 证实了空孔对裂纹扩展路径的定向引导机制。该方向优先形成长贯通裂纹的同时, 其他方向的裂纹长度较短、数量较少。这一现象表明, 空孔诱导爆炸荷载能量重新分布, 使得能量更多集中于装药孔与空孔轴线区域, 弱化了其他方向的能量密度, 从而抑制了非预期方向裂纹的萌生和扩展。

为探究空孔定向爆破中岩石的破裂机理, 在上述模型中选择 2 个岩石单元 (单元 A 位于空孔垂直方向上方 4.2 cm 处, 单元 B 位于空孔水平方向右侧 4.2 cm 处, 见图 5), 通过提取并分析不同位置处的峰值压力和质点峰值速度, 对空孔附近的动力响应特征进行研究。

图 9 展示了不同炮孔间距下单元 A 和单元 B 的峰值压力演变规律。整体上看, 各模型的单元 A 和单元 B 的峰值压力变化趋势基本一致, 即随着 a 的增大, 峰值压力逐渐减小, 这是爆炸应力波在岩石中传播和衰减导致的结果, 与 1.1 节的理论分析结果相吻合。在无空孔工况下, 单元 A 和单元 B 的峰值压力差异较小, 且随着 a 的减小逐渐趋于一致。当 a 较小时, 峰值压力受起爆孔处爆破荷载的影响较大, 单元 A 距起爆孔较远, 因此, 峰值压力较小。随着 a 的增大, 应力波叠加效应减弱, 单元 A 和单元 B 的峰值压力逐渐趋于一致。当模型存在空孔时, 单元 A 的峰值压力始终高于单元 B, 表明空孔垂直方向的压力相对较高。尽管二者的峰值压力均随 a 的增大而逐渐减小, 但空孔附近的最大压力始终出现在其顶部, 即垂直于炮孔连线的方向, 该结果与图 6(b) 中观察到的现象一致。根据式 (1), 空孔垂直方向的最大压应力大于水平方向, 从而在该方向形成更高的压力, 解释了单元 A 的峰值压力大于单元 B 的原因。需要指出的是, 裂纹的萌生与扩展主要受拉应力分量控制, 而非峰值压力直接决定, 因此尽管空孔垂直方向的峰值压力较大, 裂纹仍优先在水平方向拉应力集中的区域发育。

值得注意的是, 图 9 中单元 A 的峰值压力始终大于无空孔工况下对应位置的峰值压力, a 从

0.36 m 增至 0.48、0.60、0.72 和 0.84 m 时, 峰值压力分别增大了 23.1、20.0、18.6、12.1 和 14.6 MPa, 单元 B 处的峰值压力总是小于无空孔时的峰值压力, 分别减小了 30.4、26.3、18.3、12.8 和 8.7 MPa, 随着 a 的增大, 空孔定向爆破与普通爆破在单元 A 和单元 B 处产生的峰值压力差值逐渐减小。这可能是因为空孔在两炮孔之间形成了新的自由面, 应力波在自由面反射转变为拉伸波, 产生拉应力集中。由于空孔在不同方向反射的拉伸波切向分量不一致, 斜入射应力波产生的拉伸应力小于正入射应力波, 因此, 水平方向的压应力减小; 而垂直方向缺少反射, 产生应力波集中, 压应力增大。这表明空孔附近的岩石在水平方向上以拉应力分量为主, 而在垂直方向上以压应力分量为主; 随着 a 的增大, 由空孔诱导的应力集中效应逐渐减弱。

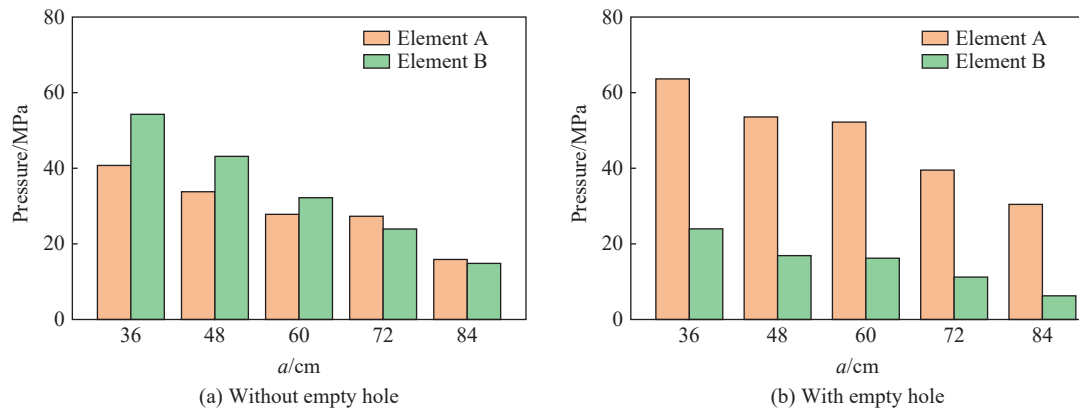


图 9 峰值压力随炮孔间距的变化
Fig. 9 Variations of peak pressure with blasthole spacing

图 10 展示了不同炮孔间距下各模型中单元 A 和单元 B 处的质点峰值振速变化规律。可见, 不同模型中单元 A 和单元 B 处质点峰值振速的变化趋势保持一致, 即随着 a 的增大, 质点峰值振速逐渐减小, 其变化规律与峰值压力的变化趋势相似。无空孔时, 单元 A 与单元 B 的质点峰值振速基本相同。当有空孔作用时, 单元 A 处的质点峰值振速与无空孔时相比变化较小, 而单元 B 处的质点峰值振速明显大于无空孔时的情况, a 从 0.36 m 增至 0.84 m 时, 峰值振速分别增大 6.57、3.12、2.27、0.88 和 0.22 m/s。岩体的抗拉强度远低于其抗压强度, 空孔周围裂纹的萌生与扩展主要受拉应力分量控制, 而压应力分量的影响相对较小。由图 8 的分析结果可知, 空孔垂直方向上以压应力分量为主, 而水平方向以拉应力分量为主。结合质点峰值振速变化规律可以得出, 空孔周围的岩石损伤裂纹主要由水平方向的拉伸应力引起, 从而很好地解释了单元 B 的质点峰值振速明显大于单元 A 的原因。由于 a 增大, 应力集中效应减弱, 故从整体上看, 各模型中单元 A 和单元 B 处的质点峰值振速差异逐渐减小至趋于一致。

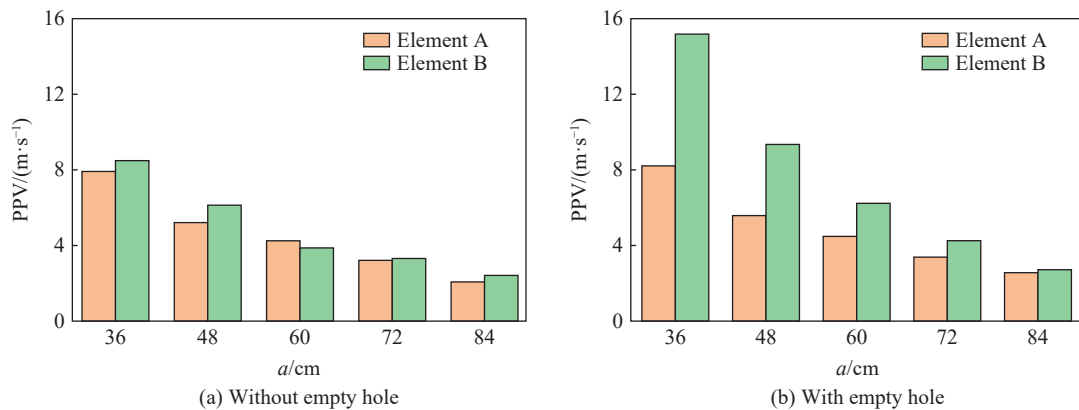


图 10 质点峰值振速随炮孔间距的变化
Fig. 10 Variations of PPV with blasthole spacing

上述结果表明,当 $a < 0.48$ m(如 $a = 0.36$ m)时,虽能形成贯通裂纹,但其方向性差,空孔的定向引导作用被削弱,且峰值应力过大可能导致炮孔间岩石过度破碎,不利于轮廓面平整。当 $a > 0.60$ m时,应力波叠加效应减弱,贯通裂纹数量减少甚至消失,非预期方向裂纹增多,空孔效应减弱。当 a 在 $0.48 \sim 0.60$ m范围内时,空孔效应显著,炮孔间能形成贯通且方向性良好的主裂纹,岩石破碎效果理想。因此,可选取此时的 a 作为工程设计的参考值,即11~14倍炮孔直径。

3.3 地应力对空孔作用下定向爆破的影响

基于图5中的模型($a = 0.60$ m),对其在不同地应力下的工况进行数值模拟研究,分析不同地应力对岩石裂纹扩展的影响,研究方案分为4组,对应的 λ 为0、1/2、1、2。不同工况下的应力加载条件如表3所示。

表3 地应力加载条件
Table 3 *In-situ* stress loading conditions

λ	Case	p_x/MPa	p_y/MPa	λ	Case	p_x/MPa	p_y/MPa
0	S1	0	10	1	S7	10	10
	S2	0	15		S8	15	15
	S3	0	20		S9	20	20
1/2	S4	5	10	2	S10	10	5
	S5	10	20		S11	20	10
	S6	15	30		S12	30	15

在单向应力工况下($\lambda=0$)爆炸后岩石的裂纹扩展情况如图11(a)~图11(c)所示。观察可知,相较于水平方向(无地应力方向),垂直方向的径向裂纹发育更为显著,而水平方向的径向主裂纹和次生裂纹扩展明显受到抑制。此外,起爆孔垂直方向的裂纹随着地应力增大明显有沿垂直方向扩展的趋势,且该扩展模式受影响的程度也逐渐增大。此外,空孔附近的裂纹数量随着地应力增加而明显减小。为了探究地应力条件下空孔对爆破裂纹扩展的影响,本研究对 $p_x=0$ MPa、 $p_y=20$ MPa工况下的双孔爆破(无空孔)进行了研究,模拟结果如图11(m)所示。可以看出,无空孔时,2个炮孔之间由于地应力的抑制作用已经不能产生贯穿裂纹。图11(c)表明,地应力环境下,空孔对爆破裂纹路径仍具有显著的导向功能。单向应力工况下,空孔周边最大主应力方向的径向裂纹扩展受到促进,而垂直方向被抑制,证实空孔在应力场中维持定向调控能力。

在静水压力作用下($\lambda=1$)爆炸后岩石的裂纹扩展情况如图11(g)~图11(i)所示。静水压力下,炮孔壁在各方向上均受环向压应力(见图2)的作用,爆破裂纹扩展受阻。随着围压的增大,主、次生裂纹数量减少且长度收缩,45°斜向主裂纹消失,扩展优势表现在水平和垂直主应力方向。对 $p_x=20$ MPa、 $p_y=20$ MPa工况进行无空孔下的对照实验,结果如图11(n)所示,可见,孔间贯穿裂纹消失,证明空孔对地应力场中的裂纹贯通具有促进作用。需要注意的是,虽然没有贯穿裂纹,但是水平应力仍促使孔间形成较长损伤裂纹(区别于含空孔工况,见图11(m))。

在非静水压力作用下($\lambda=1/2, 2$)爆炸后岩石的裂纹扩展情况如图11(d)~图11(f)和图11(j)~图11(l)所示。非静水压力场中的裂纹扩展优势表现在最大主应力方向,即裂纹沿较高初始地应力方向扩展,较低初始应力方向受到抑制。尽管侧压力系数保持不变,但是当水平与垂直方向地应力的差异较大时,裂纹扩展差异明显。值得注意的是,当 $\lambda=2$ 时,较高的应力将促使孔间裂纹显著贯通。为充分表现空孔在地应力场中对裂纹贯通的促进作用,开展了 $p_x=15$ MPa、 $p_y=30$ MPa、 $a=0.36$ m的对照实验,如图11(o)所示。结果表明,减小 a 将促进空孔在地应力场中的导向作用,与3.2节中的结论相吻合。

为进一步探究不同地应力下空孔定向爆破中空孔周围的应力场情况,在各模型中选择2个岩石单元A和单元B(见图5),其压力时程曲线如图12和图13所示。可以看出:相同 λ 时,单元A与单元B的压力演化趋势基本一致;不同 λ 下,地应力对压力的影响在水平与垂直方向上的表现不同。在水平

方向上, λ 不变时, 单元 B 的峰值压力随水平与竖直方向地应力差的增大而递增, 但始终低于单元 A 的峰值压力。

在竖直方向上, λ 不变时, 单元 A 的峰值应力表现稳定。随着 λ 增大, 单元 A 的峰值应力在 $\lambda=0$ 至 $\lambda=1/2$ 区间升高, 后续趋于稳定。值得注意的是, $\lambda=0$ (竖直方向的地应力为零) 时, 初始应力主方向出现拉应力集中, 导致压应力削弱, 有效阐释了单元 A 的峰值应力在 $\lambda=0$ 时偏低的现象。上述分析表明, 地应力增大时, 空孔竖直方向的峰值压力基本不受影响, 水平方向上由空孔效应形成的拉应力集中作用减弱, 压应力水平增加, 炮孔之间的裂纹扩展受到抑制, 并且这种抑制作用随着水平方向与垂直方向上的地应力差的增大而加强。

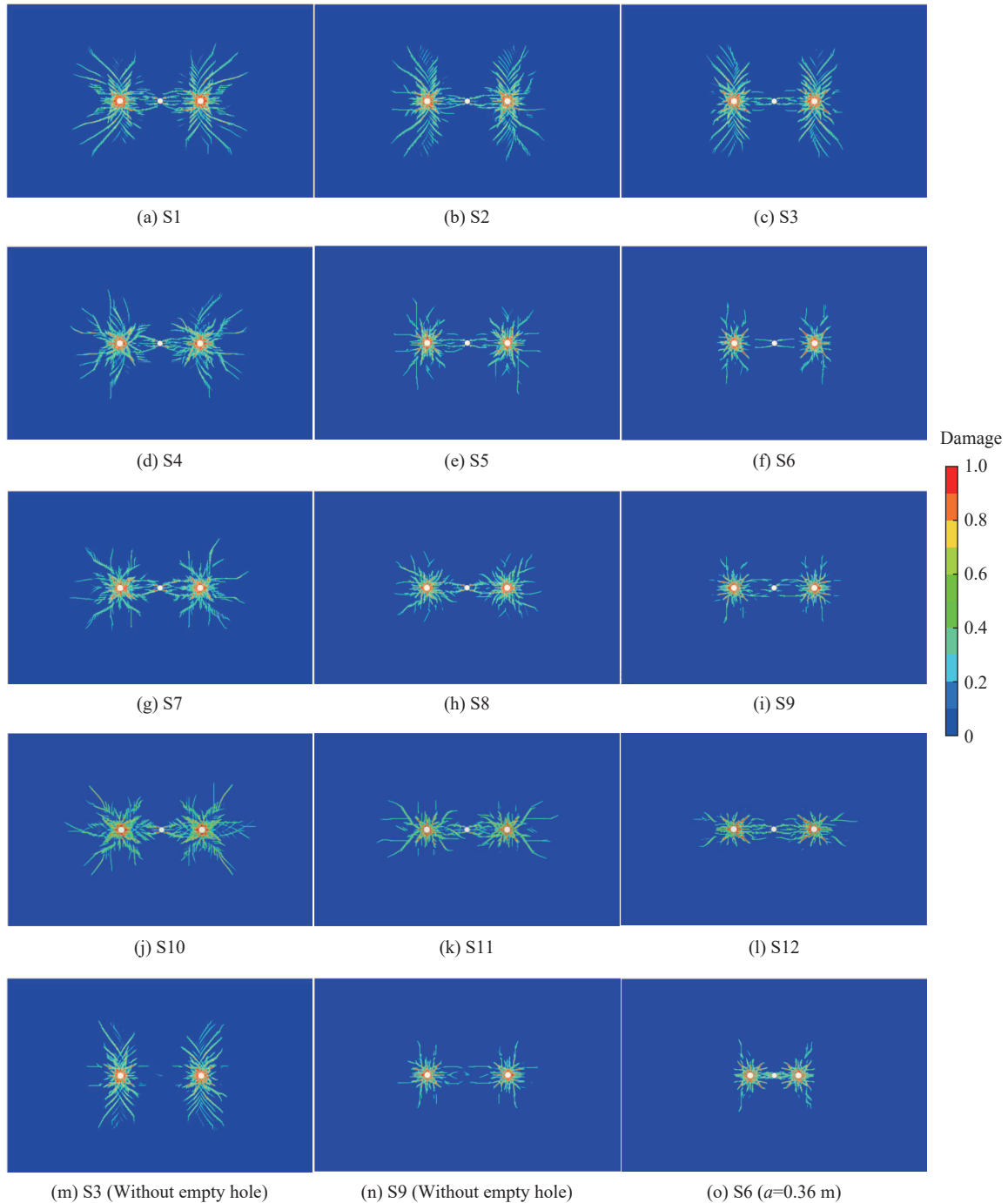


图 11 不同地应力下爆破损伤云图

Fig. 11 Contours of blasting-induced damage under different *in-situ* stress

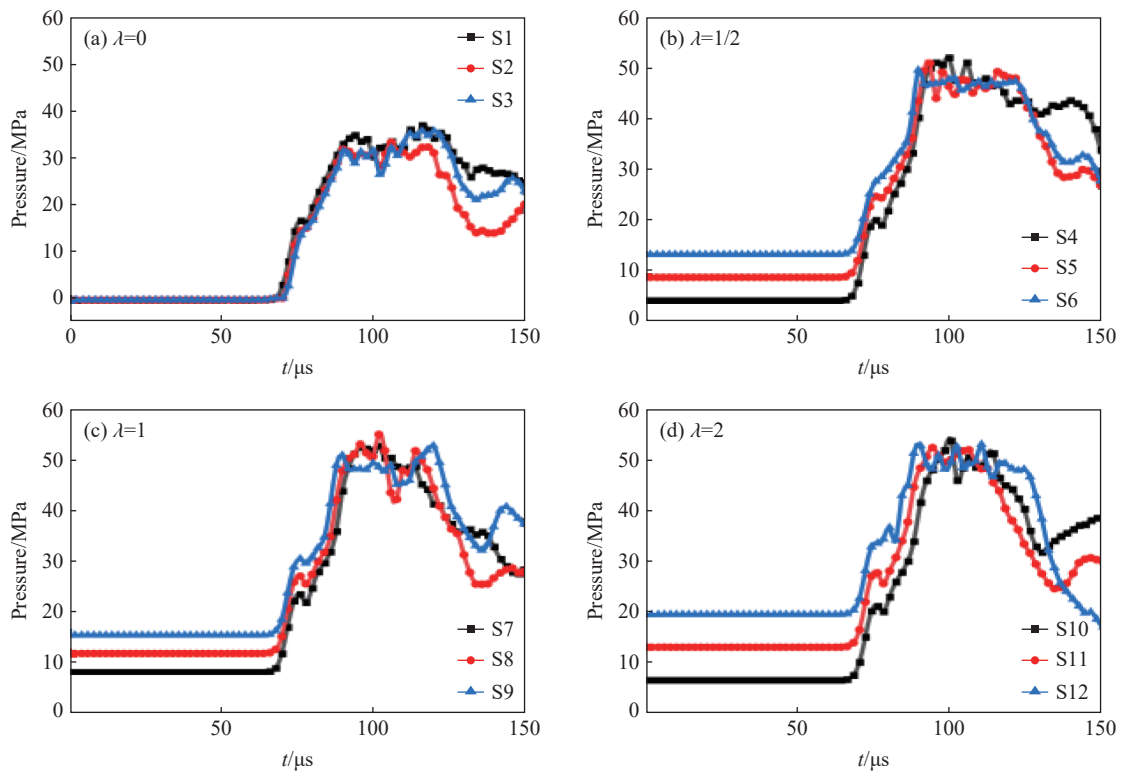


图 12 垂直方向的应力时程曲线
Fig. 12 Stress time-history curves in the vertical direction

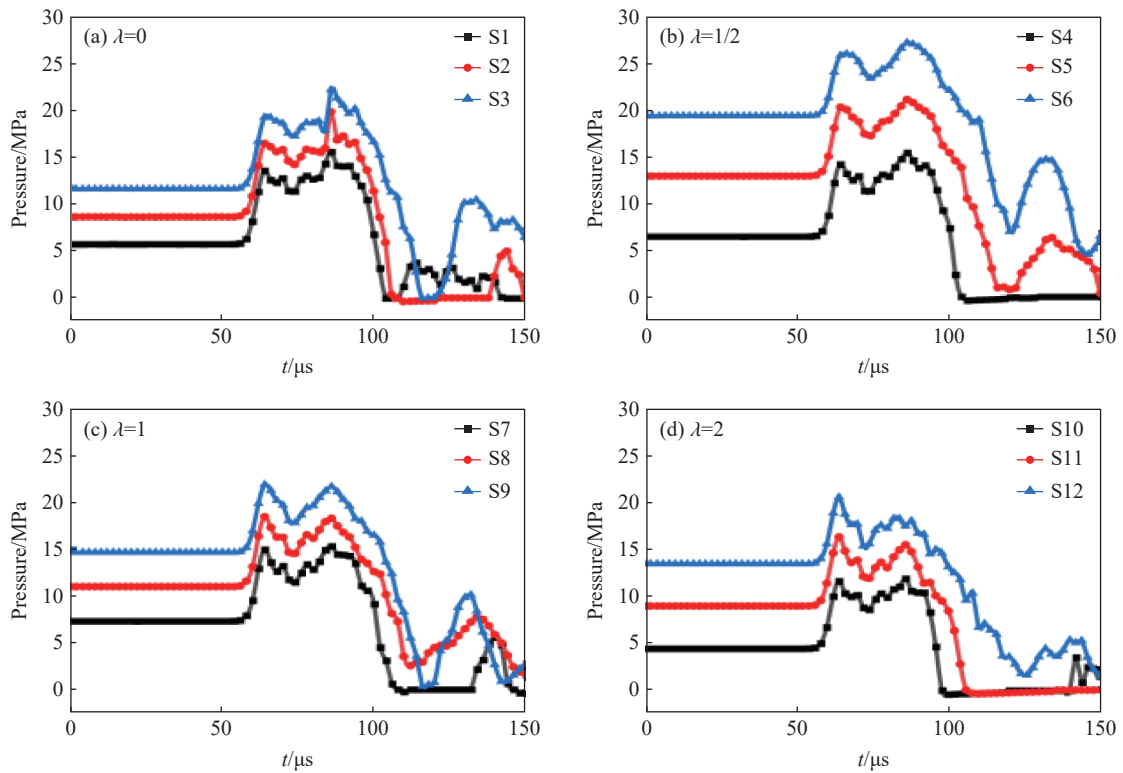


图 13 水平方向的应力时程曲线
Fig. 13 Stress time-history curves in the horizontal direction

上述结果表明,高地应力会显著抑制裂纹扩展。因此,为实现孔间裂纹有效贯通,在高地应力区应将 a 相比无地应力下的参考值(11~14倍炮孔直径)适当减小。例如:在工况S6中, $a=0.60$ m时,贯通效果差; a 减小至0.36 m后仍可贯通,验证了缩小 a 的有效性。因此,建议高地应力区 a 的设计参考值缩小为0.36~0.48 m(约8~11倍炮孔直径),并需通过现场试验确定最优值。同时,由于裂纹扩展受最大主应力方向控制,为使空孔定向效果最大化并减弱地应力的抑制作用,在非静水压工况下,炮孔宜平行于最大主应力方向布置,以优化裂纹贯穿和岩石破碎效果。

4 结 论

本研究基于弹性力学理论,阐明了空孔对爆生裂纹的导向机理,系统分析了含空孔岩石爆破的静、动态应力场特征;通过数值模拟,探讨了不同炮孔间距 a 和地应力下空孔定向爆破的损伤演化规律和动力响应特征,得到如下主要结论。

(1) 空孔能够显著改变爆炸能量分布,并引导裂纹定向扩展。在本研究所分析的典型工况中,当 a 在0.36~0.84 m时,相比于无空孔工况,空孔使水平方向的峰值压力降低8.7~30.4 MPa,垂直方向的峰值压力提高12.1~23.1 MPa,同时水平方向的质点峰值振速也显著增加。这表明空孔有效地促使爆炸能量集中分布于炮孔连线方向,从而抑制其他方向裂纹的萌生和扩展。

(2) 地应力对空孔定向效果具有调控作用。单向应力($\lambda=0$)促进垂直方向的裂纹扩展,但抑制水平方向的裂纹扩展;静水压力($\lambda=1$)全域抑制裂纹扩展;非静水压力($\lambda=1/2, 2$)促使裂纹沿较高初始地应力方向扩展。高地应力会削弱空孔水平方向的拉应力集中,从而抑制炮孔间裂纹扩展。为最大化空孔定向效果并减弱地应力的不利影响,炮孔宜平行于岩体最大主应力方向布置。

(3) 优化炮孔间距 a 可有效改善围岩的损伤。当 a 小于11倍炮孔直径时,过度的岩石破碎会削弱空孔的导向作用;而当 a 大于14倍炮孔直径时,空孔的应力集中效应显著减弱,导致炮孔间难以形成贯通裂纹。因此,将 a 设置为11~14倍炮孔直径可有效平衡导向效果与裂纹贯通性。在高地应力条件下,建议将 a 的参考范围适当缩小至8~11倍炮孔直径,并结合现场试验进一步确定最优值。

参考文献:

- [1] 单仁亮,赵岩,王海龙,等. 下穿铁路隧道爆破振动衰减规律研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 085201.
SHAN R L, ZHAO Y, WANG H L, et al. Attenuation of blasting vibration in a railway tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 085201.
- [2] 蒲传金,杨鑫,肖定军,等. 爆炸载荷下双孔裂纹扩展的数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15): 300-311.
PU C J, YANG X, XIAO D J, et al. Numerical simulation of double-hole crack propagation under explosion load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 300-311.
- [3] ISAKOV A L. Directed fracture of rocks by blasting [J]. *Soviet Mining*, 1983, 19(6): 479-488.
- [4] 余绍山,王薇,李姚伟奇. 周边眼偏位空孔爆破设计优化研究与应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(4): 1509-1520.
YU S S, WANG W, LI Y W Q. Research and application of offset hole for peripheral blasting design and optimization [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(4): 1509-1520.
- [5] LANGEFORS U, KIHLESTRÖM B. The modern technique of rock blasting [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1978.
- [6] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(Suppl 2): 791-800.
ZHANG Z R, CHEN H Y, JIAO W G, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(Suppl 2): 791-800.
- [7] 田国宾. 周边空孔对爆破断裂与损伤控制的机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
TIAN G B. Research on directional fracture and damage control mechanism of empty hole in perimeter blasting [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [8] MOHANTY B. Explosion generated fractures in rock and rock-like materials [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(4/5): 889-898.

- [9] 陈秋宇, 李海波, 夏祥, 等. 爆炸荷载下空孔效应的研究与应用 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(11): 2749–2755.
CHEN Q Y, LI H B, XIA X, et al. Research and application of empty hole effect under blasting loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2749–2755.
- [10] WANG Y B, YANG R S, ZHAO G F. Influence of empty hole on crack running in PMMA plate under dynamic loading [J]. *Polymer Testing*, 2017, 58: 70–85.
- [11] 杨仁树, 陈程, 王煦, 等. 不同直径空孔对爆生裂纹扩展行为影响规律的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2498–2503.
YANG R S, CHEN C, WANG X, et al. Experimental investigation on the influence of different diameter empty holes on the crack growth behavior of blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2498–2503.
- [12] ZHAI J J, WANG Z L, WANG J G, et al. Numerical study on blast dynamic response of jointed rock mass under high geostress field [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2025, 25(3): 04025005.
- [13] WANG Z L, NI Y, WANG J G, et al. Improvement and performance analysis of constitutive model for rock blasting damage simulation [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2025, 138: 103043.
- [14] 汪海波, 宗琦, 赵要才. 立井大直径中空孔直眼掏槽爆炸应力场数值模拟分析与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(Suppl 1): 3223–3229.
WANG H B, ZONG Q, ZHAO Y C. Numerical analysis and application of large diameter cavity parallel cut blasting stress field in vertical shaft [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl 1): 3223–3229.
- [15] QIN H F, ZHAO Y, WANG H L, et al. Damage prediction and improvement method based on cutting mode of circular empty hole [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 11322.
- [16] MENG N K, BAI J B, SHEN W L, et al. Study on the influences of empty hole and *in-situ* stress on blasting-induced rock damage [J]. *Geofluids*, 2021: 6643042.
- [17] 陶子豪, 李祥龙, 胡启文, 等. 掏槽爆破成腔空孔效应数值模拟研究与分析 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(12): 4246–4258.
TAO Z H, LI X L, HU Q W, et al. Study and analysis on numerical simulation of empty hole effect induced by cutting blasting [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(12): 4246–4258.
- [18] 李洪伟, 雷战, 江向阳, 等. 不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(4): 044103.
LI H W, LEI Z, JIANG X Y, et al. Numerical analysis of impact of shot hole spacing on crack growth in rock [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(4): 044103.
- [19] NI Y, WANG Z L, LI S Y, et al. Numerical study on the dynamic fragmentation of rock under cyclic blasting and different *in-situ* stresses [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 172: 106404.
- [20] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
DAI J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [21] FENG C C, WANG Z L, WANG J G, et al. A thermo-mechanical damage constitutive model for deep rock considering brittleness-ductility transition characteristics [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(7): 2379–2392.
- [22] 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.
- [23] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
LING T L. Study on blasting damage and cumulative effect of surrounding rock in excavation of great wall station [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2019.
- [24] YI C P, JOHANSSON D, GREBERG J. Effects of *in-situ* stresses on the fracturing of rock by blasting [J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 104: 321–330.
- [25] BANADAKI M M D. Stress-wave induced fracture in rock due to explosive action [D]. Toronto: University of Toronto, 2010.
- [26] 岳中文, 田世颖, 陈志远. 炮孔间距对切缝药包爆生裂纹扩展规律的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2460–2467.
YUE Z W, TIAN S Y, CHEN Z Y. Influence of the interval between holes on crack propagation in slit charge blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2460–2467.

Effect of Empty-Hole on Blasting-Induced Damage Evolution and Dynamic Response of Rock

LI Tao, NI Yu, WANG Zhiliang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Aiming at the issue that traditional perimeter blasting easily induces random crack damage in surrounding rocks, this study conducts an in-depth analysis of the damage evolution laws and dynamic response characteristics in empty-hole directional blasting by integrating elastic mechanics theory with numerical simulation methods based on ANSYS/LS-DYNA. Firstly, drawing on the theory of elastic mechanics, the mechanical mechanism was elucidated whereby empty holes generate tensile stress concentration through stress wave reflection under explosive loading, thereby controlling the propagation of directional cracks. Subsequently, by establishing a numerical model of planar double-hole decoupled charge blasting, the effects of blasthole spacing and *in-situ* stress field on damage evolution were systematically investigated. Finally, the dynamic variation patterns of peak stress and peak particle vibration velocity near the empty hole were analyzed. The results indicate that empty holes can significantly alter the distribution of explosion energy, guiding it to concentrate along the line connecting the blastholes, thereby effectively suppressing the initiation and propagation of unintended cracks. The directional effect of empty holes is modulated by the *in-situ* stress field; high *in-situ* stress conditions reduce the degree of tensile stress concentration in the horizontal direction of the empty hole, thus inhibiting crack propagation between blastholes. Therefore, blastholes should be arranged parallel to the maximum principal stress direction of the rock mass to maximize the directional effect and mitigate the inhibitory influence of *in-situ* stress. When the blasthole spacing is 11–14 times the blasthole diameter, stable directional propagation of main cracks is promoted, the development of unintended cracks is suppressed, and the control of surrounding rock damage is significantly improved. Under high *in-situ* stress conditions, it is recommended to appropriately reduce the reference hole spacing to 8–11 times the blasthole diameter.

Keywords: rock; empty hole effect; damage evolution; dynamic response; geostress; crack