

微波辅助爆破作用下深部铁矿石孔裂隙的演化规律

褚怀保^{1,2}, 陈勇¹, 杨小林^{1,2}, 孙卓宇¹, 温自龙¹, 郭德坤¹

(1.河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000;

2.河南省地下工程智能建造与安全运维重点实验室, 河南 焦作 454000)

摘要: 随着我国深地战略的持续深化, 为资源开发向深部扩展打开了新的局面。同时也需要面对更为复杂的工程难题, 诸如高地应力, 高强度岩体等地质状况。为解决传统爆破深部岩体效率低、能耗高的问题, 提出微波辅助爆破破岩的新方法。本文以铁矿石为研究对象, 开展了模拟深部环境下微波辐射预处理、围压加载、单孔爆破耦合试验, 在试验结果分析的基础上, 结合 X 射线高精度显微 CT 扫描与三维重构技术, 分析了不同加载条件下孔隙体积、表面积、分形维数、孔径结构及裂纹扩展等参数的变化, 探讨了不同加载条件对铁矿石孔裂隙结构演化的影响。研究表明: (1)微波辐射促使孔裂隙发育、萌生。随着微波损伤的增加, 其爆破后铁矿石的孔裂隙体积、表面积、孔裂隙分布复杂度分形维数呈逐步上升的趋势, 相较于延长照射时间, 提高微波功率对铁矿石孔裂隙的发育影响更为显著。当采用高功率微波辐射时, 试样孔裂隙体积与表面积的增幅分别达到最大的 30.48% 和 31.37%。(2)微波辐射能有效提高爆破效果可归因于孔隙和微裂纹的连通和贯穿, 为爆破应力波传播提供更多通道。试样孔隙半径和喉道长度的分布曲线波峰随微波损伤的增加逐渐向更大半径和更长长度的方向偏移、孔隙配位数分布范围增加; (3)围压抑制了微波-爆破协同效应, 随着围压的增加, 裂纹的扩展明显受限, 贯通孔裂隙的体积和最大长度显著减小, 而孤立孔裂隙的体积占比增大。围压改变了主裂纹的扩展方向, 其爆生主裂纹的扩展方向由无围压时的放射状转变成趋向于最大主应力方向扩展。该研究为深部高应力环境下微波辅助爆破技术的工程应用提供参考依据。

关键词: 铁矿石; 微波辅助爆破; 围压; 三维重构; 孔裂隙

中图分类号: O383; TU45

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Evolution law of hole cracks in deep iron ore under microwave-assisted blasting

CHU Huaibao^{1,2}, CHEN Yong¹, YANG Xiaolin^{1,2}, SUN Zhuoyu¹, WEN Zilong¹, GUO Dekun¹

(1.School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000, Henan, China ;

2. Henan Provincial Key Lab of Intelligent Construction and Safety Operation of Underground Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: With the continuous deepening of China's deep strategy, a new situation has been opened for the expansion of resource development to the deep. At the same time, it also needs to face more complex engineering problems, such as high ground stress, high strength rock mass and other geological conditions. In order to solve the problems of low efficiency and high energy consumption of traditional blasting in deep rock mass, a new method of microwave-assisted blasting rock breaking is proposed. This study, the coupling test of microwave radiation pretreatment, confining pressure loading and single-hole

blasting in simulated deep environment is carried out with magnetite as the research object. Based on the analysis of the test results, combined with X-ray high-precision micro-CT scanning and three-dimensional reconstruction technology, the changes of pore volume, surface area, fractal dimension, pore structure and crack propagation under different loading conditions are analyzed. The influence of different loading conditions on the evolution of pore and fracture structure of iron ore is discussed. This study, the similar material samples of simulated magnetite iron ore were prepared by optimizing the mass ratio of cement, iron powder, quartz sand and gypsum, and the central blasthole was reserved for subsequent tests. A series of experiments were carried out under simulated deep in-situ conditions, including microwave pretreatment with controllable power (1.5kW,3kW), irradiation time(20min,40min), and single-hole blasting with a fixed charge of 2g. The self-developed bidirectional static loading platform was used for confining pressure loading (0.5,15MPa). The real stress state of deep rock mass is restored by using the sequential coupling mode of static confining pressure before dynamic blasting load. After the coupling test, high-precision X-ray micro-computed tomography (CT) scanning was performed on the representative samples near the borehole, and three-dimensional reconstruction and quantitative analysis were performed using Avizo 2023 software. The key parameters such as pore volume, surface area, three-dimensional fractal dimension, pore radius distribution, throat length, coordination number and connected fracture rate were extracted and calculated to accurately characterize the pore-fracture network. The research shows that : (1) Microwave radiation promotes the development and initiation of pores and fissures. With the increase of microwave damage, the pore fracture volume, surface area and fractal dimension of pore fracture distribution complexity of iron ore after blasting show a gradual upward trend. Compared with prolonging the irradiation time, increasing the microwave power has a more significant effect on the development of pore fracture of iron ore. When high power microwave radiation is used, the increase of pore volume and surface area of the sample reaches the maximum of 30.48 % and 31.37%, respectively.(2)Microwave radiation can effectively improve the blasting effect, which can be attributed to the connection and penetration of pores and microcracks, providing more channels for the propagation of blasting stress wave. The peak of the distribution curve of pore radius and throat length of the sample gradually shifts to the direction of larger radius and longer length with the increase of microwave damage, and the distribution range of pore coordination number increases. (3) The confining pressure inhibits the synergistic effect of microwave-blasting. With the increase of confining pressure, the crack propagation is obviously limited, the volume and maximum length of the through-hole cracks are significantly reduced, and the volume ratio of the isolated hole cracks is increased. The confining pressure changes the propagation direction of the main crack, and the propagation direction of the main crack is changed from the radial shape without confining pressure to the direction of the maximum principal stress. This study provides a reference for the engineering application of microwave-assisted blasting technology in deep high stress environment.

Keywords: Iron ore; microwave-assisted blasting; confining pressure; three-dimensional reconstruction; pore-fracture structures

0 引言

随着浅部矿产资源的日益枯竭,资源开采活动正逐步向深部拓展。深部金属矿作为国家关键战略资源,其安全、高效开采对国民经济的发展具有重要支撑作用^[1]。然而,深部矿体多处于高地应力环境,岩体强度高、完整性好,传统钻爆法和机械破碎法面临效率低、能耗高的技术难题^[2]。因此,开发适用于高强度岩体的辅助破岩新技术,已成为实现深部矿产资源可持续开采的关键。在众多辅助破岩方法中,微波辐射因能量集中、效率高、环境友好等优势而受到广泛关注^[3]。其作用机制在于,岩石中不同矿物的介电特性差异显著,在微波照射下因热膨胀不一致而产生非均匀热应力,当该应力超过岩石强度时,便会诱发内部微裂纹的萌生与扩展,从而实现岩体的预弱化^[4]。

近年来,微波破岩的基础研究取得了多项重要进展。众多实验证实,微波预处理可显著削弱多种岩石的力学性能。例如,戴俊等^[5]和胡国忠等^[6]分别研究并发现了微波辐射能明显降低花岗岩、页岩的单轴抗压强度、抗拉强度以及弹性模量等关键力学指标,为微波在硬岩开采中的破碎工艺及辅助机

械破岩提供了重要参考。研究表明,在输入相同的微波能量下,高功率短时间处理模式往往取得更优的损伤效果^[7]Error! Reference source not found.。借助 CT 扫描等先进观测手段,研究者进一步揭示了微波致裂的微观机制,实现了对裂纹演化过程的可视化与定量表征^{[8][11]}。这些研究从宏观与微观层面共同验证了微波技术在提升岩体渗透性和可破碎性方面的潜力,为微波在硬岩开采、破碎工艺优化及辅助机械破岩等领域的应用奠定了理论基础。

在爆破破岩研究中,学者们主要关注爆破应力波传播规律、爆生气体作用机制以及裂纹扩展行为。一方面,通过理论建模与数值模拟,研究人员揭示了动载作用下岩石裂纹扩展机理及相关损伤判据^{[12][13]}。另一方面,为精确评估爆破效果,多种无损检测技术被广泛采用。王雁冰等^{[14][15]}运用工业 CT 扫描与三维重建技术,对爆破后岩石内部裂隙网络进行了可视化与定量分析,并引入分形维数、裂隙率等参数,为从微观层面评价爆破损伤提供了有效方法。大量研究表明,围压对爆破裂纹的扩展具有显著抑制作用。张树川等^[16]通过不同围压条件下的爆破试验发现,围压增大能够明显降低煤体的爆破损伤因子,抑制裂隙的生成与贯通。王雁冰等^[17]在室内实验中也观察到,随着围压升高,爆破或等离子体致裂后岩石的裂隙分形维数与损伤度均呈线性下降趋势,裂纹复杂程度和贯通性明显减弱。上述结果一致表明,围压在爆破破岩过程中具有重要影响,它不仅制约爆破裂纹的扩展范围和岩石损伤程度,还能有效抑制裂隙的萌生与贯通,降低爆破形成裂纹的复杂度与连通性。

综上所述,目前关于微波辅助破岩的研究主要集中于微波辅助机械破岩领域,而将其与爆破技术相结合的研究尚较为匮乏。基于此,本文以磁铁矿石为研究对象,开展模拟深部围压条件下的微波辐射与单孔爆破耦合试验。运用 CT 扫描与三维重构技术,对微波-爆破耦合作用后的试样进行精细表征,系统探讨微波功率、照射时间及围压对爆破后铁矿石孔裂隙结构演化特征的影响。本研究旨在为深部铁矿石的高效、低耗破岩提供理论依据与试验支撑,并为相关工程应用的参数优化提供参考。

1 试验概况

1.1 岩样制备

原岩样品选自某矿山的磁铁矿石。由于天然岩体的开采和运输困难,本试验采用相似模拟材料模拟铁矿石,并通过 12 轮预实验系统地研究各组分比例对材料宏观性能的影响。同时,结合小试块的力学与物理特性测试,最终确定目标相似材料的最优组分质量比为水泥:铁粉:石英砂:石膏=9:5:5:1。在实验室中制作了尺寸为 500mm×500mm×500mm 的试块。在试块制备过程中,中心预留了一个直径为 25mm、深度为 300mm 的炮孔。试块及其材料组分的示意图见图 1(a)、(b)。

1.2 试验方案

为系统研究不同加载条件对铁矿石在爆破荷载下孔裂隙结构演化的影响,本试验通过控制微波参数和围压两个变量来进行设计。试验设置微波功率为 1.5kW 与 3kW,辐射时间为 20min 与 40min。对微波处理后的试样施加不同的围压,围压分别为 5MPa 和 15MPa。本次爆破试验选用规格为直径 25mm 的岩石乳化炸药,并将单孔装药量设定为 2g。为保证试验的安全性,在起爆方式上,采用了由数码电子雷管构建的远程起爆网络。试验设置了 7 组加载方案,具体见表 1。

表 1 试验方案设计

Table 1 Experimental Design

试件编号	微波功率/kW	辐射时间/min	围压/MPa	炸药量/g	试样个数
M1	0	0	0	2	1
M2	1.5	20	0	2	1
M3	1.5	40	0	2	1
M4	3	20	0	2	1
M5	3	40	0	2	1
M6	1.5	20	5	2	1
M7	1.5	20	15	2	1

1.3 试验装置及步骤

微波辐射试验使用中国鼎运科技公司生产的拓思品牌工业级微波试验装置，该装置包括微波发生器、传输系统及液冷降温系统，如图 1(c)所示。该装置能够生成频率为 2.45GHz、功率为 1.5-3kW 的单模微波，微波输出通过电控系统进行调节。微波装置的波导连接一铜管，利用铜管良好的导热性，将微波能量均匀辐射到炮孔内壁，从而确保均匀的能量分布，避免局部能量不均影响后续分析。微波照射过程见图 1(d)。

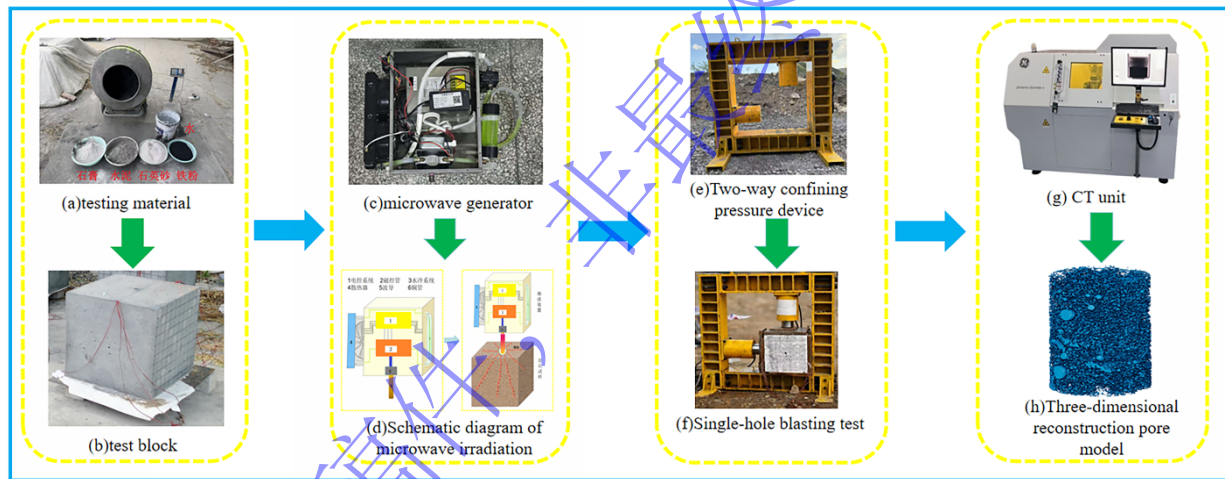


图 1 基本试验步骤

Fig.1 Basic Experimental Steps

试验中使用的微波功率分别为 0、1.5 和 3kW，辐射时间分别为 0、20 和 40min。微波处理后的试样冷却至室温后，进行单孔爆破试验。试验使用自主研发的可双向施加围压的爆破平台，如图 1(e)、(f)所示。围压加载采用恒载控制模式，加载速率为 0.1 MPa/s，以避免加载速率过快导致试样产生额外损伤。应力路径设计为：首先同步施加双向围压至预定值，保持稳定后维持围压恒定，再进行爆破起爆。该加载方式模拟了深部岩体在长期地应力作用下经受爆破扰动的实际工况，明确了围压静载与爆炸动载的耦合时序为“先静载后动载”的顺序耦合模式。围压稳定保持时间不少于 5 min，以确保试样内部应力场分布均匀。并用红黏土封堵孔口，以限制能量释放并延长气体作用时间，从而提高爆破能量利用率。试验通过远程控制系统实现安全、可控的起爆。

爆破后，选取炮孔附近的碎块进行高精度 X 射线显微 CT 扫描，使用 GES240 工业 CT 扫描装置，装置主要技术参数分别如表 2 所示。

表 2 工业 CT 主要技术参数

Table 2 Main Technical Parameters of Industrial CT

实物图	主要技术指标	
	最大功率 (X 射线管)	320W
	电压 (X 射线管)	10kV~240kV
	分辨率	<2 μ m
	像素数量	1024 \times 1024
	可检测试件最大尺寸	ϕ 230mm \times 420mm
	转台最大承重	30kg
	转台速度	10 μ m/s~80mm/s
	泄露率 (X 射线)	<1.0 μ Sv/h
	温度范围	10~30 $^{\circ}$ C
	相对湿度	\leq 85%, 无冷凝

经过反复调试, 确定采用 X 射线管电压为 150 kV, 电流为 110 μ A, 扫描分辨率为 20 μ m 条件下进行扫描试验。待扫描结束后, 试件三维数据被存储系统控制和图像采集系统, 借助系统控制和图像采集系统调用被储存数据进行段断面切片分割, 获取切片数量为 1500 张, 层间距为 0.05 mm, 切片的像素为 2024 \times 2024 pixel。扫描数据通过 Avizo 2023.2.0.0 软件进行三维重构与处理。重构过程中, 体素尺寸设置为 20 μ m, 采用线性插值算法进行图像重建, 以确保重建图像的几何精度和灰度连续性。最终生成不同加载条件下的三维重构模型, 如图 1(h)所示, 并对其进行处理、计算和统计分析。

2 微波参数对铁矿石孔裂隙分布特征的影响

2.1 裂隙结构识别与提取

CT 探测器接收各物质信号并输出至计算控制系统, 通过投影图像重建样本各截面二维图像。在利用 Avizo 软件对二维 CT 切片进行矢量叠加重构时, 为避免因重构尺寸过大及计算机硬件配置限制导致数据处理时间过长、效率降低, 选取代表性体积单元 (RVE) 进行对比分析。现有研究^{[18][19]}基于孔隙率变化确定 RVE 尺寸, 经从小到大的多次调试发现, 当 RVE 尺寸超过 2 \times 2 \times 2 mm 时, 单元内孔隙率变化趋于稳定。据此, 本章选取尺寸为 ϕ 20 mm \times 30 mm 的圆柱体三维重构模型作为研究对象, 三维模型构建流程如图 2 所示。

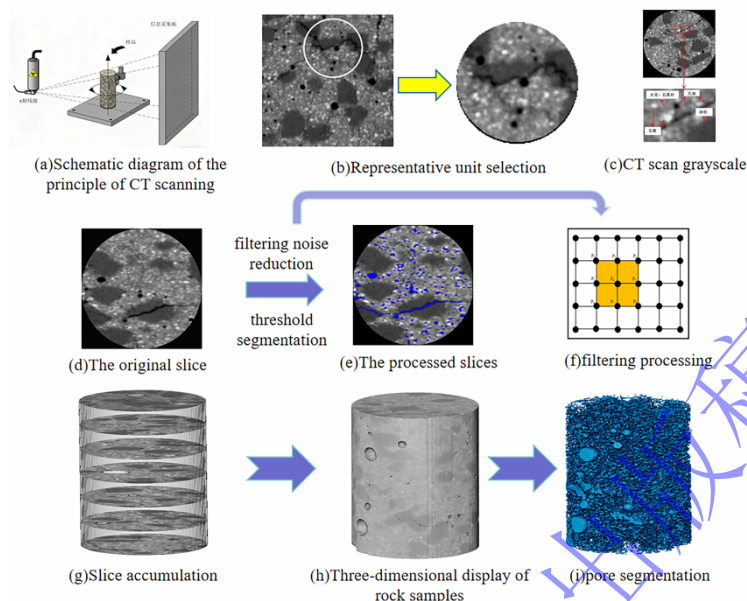


图 2 CT 扫描原理及三维重构示意图

Fig.2 Schematic of CT Scan Principle and 3D Reconstruction

在孔隙三维重构过程中，使用“InteractiveThresholding”命令进行阈值分割。本文采用 Avizo 2023.2.0.0 软件进行分析，其内置的分水岭算法相较于其他算法，在各物相交界面处能更准确地识别体素。图像灰度值与矿物致密程度呈一定线性关系，亮度越高、灰度值越大，物质越致密。利用“Line Probe”命令可分析线段上各物相的灰度值，为保证阈值分割准确性，选取含物相较多的线段进行分析（图 3），并对各矿物质进行分割处理，展示其在切片上的分布位置（图 4）。本次扫描的二维图像中，亮度较高的为矿物成分，亮度最暗部分为孔裂隙。岩石基质、孔裂隙及矿物组分在灰度分布上呈现明显的多峰特征，孔裂隙对应低灰度区域，岩石基质对应中高灰度区域。本研究选取直方图两峰之间的谷底灰度值作为孔裂隙的初始阈值(0-40)。为保证不同试件(M1~M7)孔裂隙参数的可比性，所有试件均采用相同阈值进行分割提取，最终得到铁矿石孔裂隙图像,如图 2(e)所示。与原始切片图 2(d)相比，预处理后的切片更清晰地展示了孔隙分布。随后，通过 Avizo 软件进行 CT 图像矢量化处理，并利用“VolumeRendering”模块对裂隙形貌和分布特征进行三维展示。

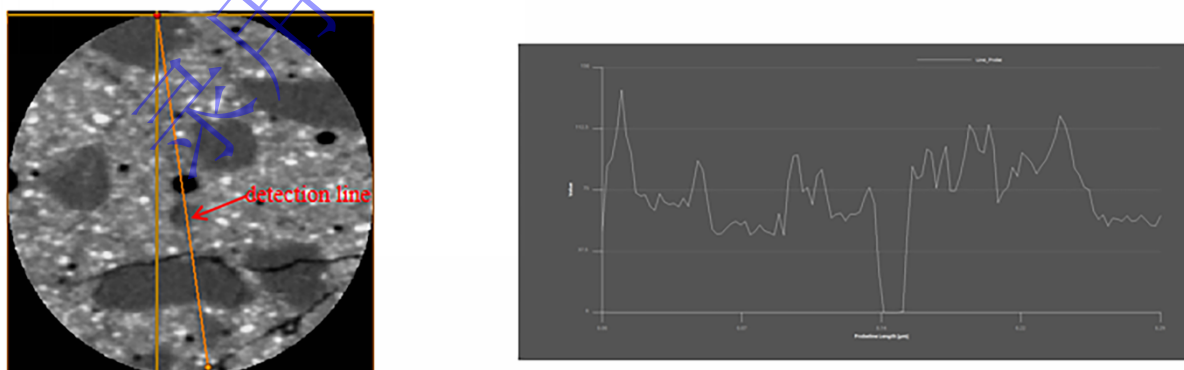


图 3 各个物相的灰度值分布

Figure 3 Grayscale Value Distribution of Each Phase

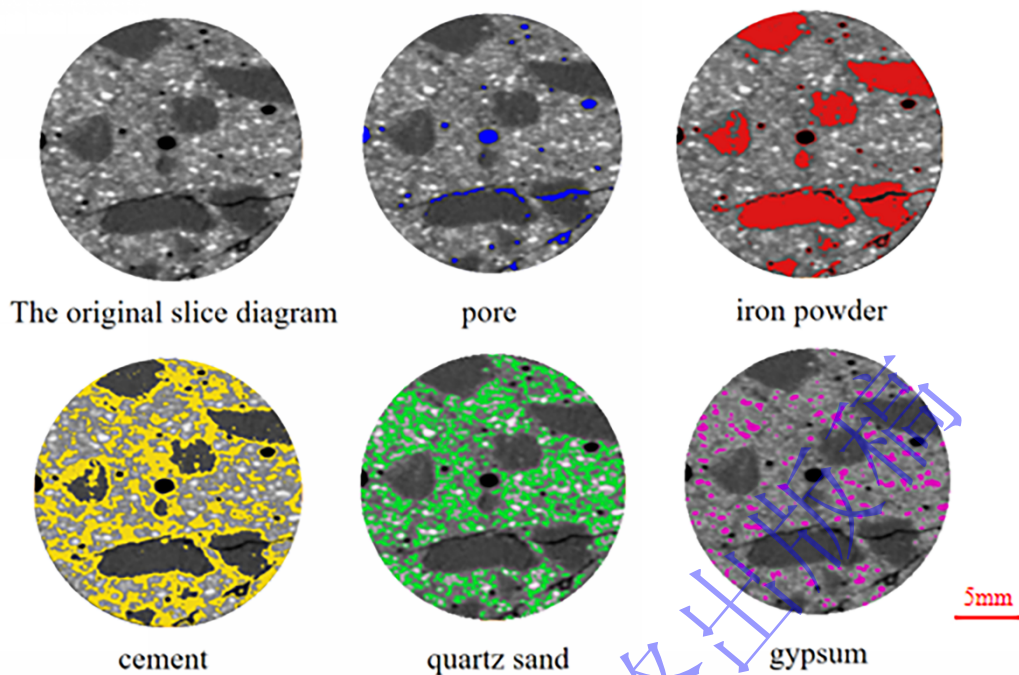


图4 各物相分割示意图

Figure 4 Schematic Diagram of Phase Segmentation

2.2 对孔裂隙面积影响的 CT 切片分析

通过 Avizo 软件对无围压工况(M1、M2、M3、M4、M5)CT 切片图像进行分析, 定性观察孔裂隙形态变化, 并定量统计孔裂隙面积及增长幅度, 分析微波功率与照射时间对爆破后铁矿石孔裂隙发育的影响。图中蓝色区域表示孔裂隙, 灰色及浅灰色区域为铁矿石基体, 直观展示了不同微波预处理条件下孔裂隙的空间分布差异。

定量统计结果显示, 基准试样 M1 的 CT 切片孔裂隙面积为 21.6456mm^2 。经不同程度微波损伤与爆破耦合作用后, M2(1.5kW、20min)、M3(1.5kW、40min)、M4(3kW、20min)、M5(3kW、40min) 的孔裂隙面积分别增至 24.0332mm^2 、 26.9124mm^2 、 35.0766mm^2 、 38.9426mm^2 , 与 M1 相比, 孔裂隙面积分别增加了 11.03%、24.33%、62.04%、79.91%。当微波功率从 1.5kW 提升至 3kW 时, 孔裂隙面积增幅最大, 达 37.71%。

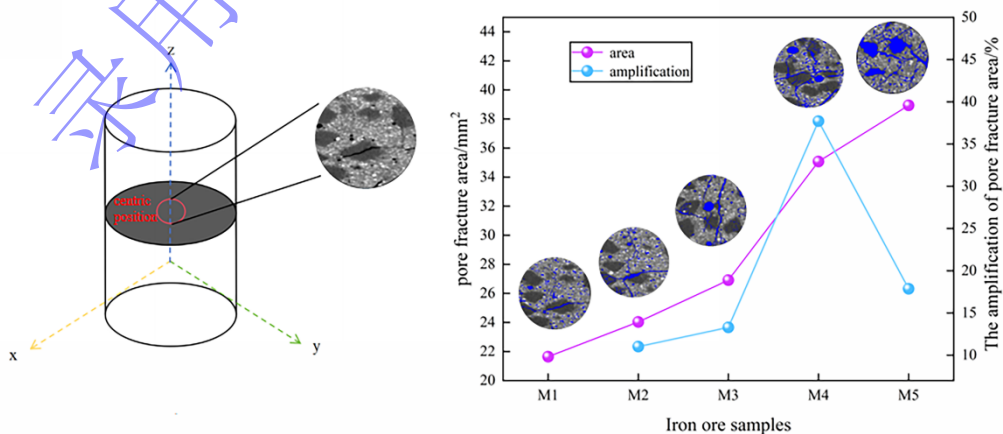


图5 切片选取、孔裂隙面积变化曲线图

Fig.5 Slice Selection and Pore-Fracture Area Variation Curve

在仅受到爆破荷载(M1)的铁矿石试样中, 爆炸应力波虽能诱发裂纹, 但因铁矿石自身的高强度和良好完整性, 裂纹扩展受限, 爆破能量主要转化为弹性波, 裂纹萌生的应力集中效应较弱, 且缺乏微裂纹扩展路径, 导致试样仅有一条主裂隙、少量微裂纹和孤立孔隙, 孔隙贯通性差。

低功率 1.5kW 微波照射后, 铁矿石中矿物的介电特性差异导致微波能量的选择性吸收, 产生不均匀的热膨胀并形成局部热应力。由于照射时间较短, 微波输入能量有限, 仅诱发少量初始微裂纹。在后续爆破荷载作用下, 这些初始微裂纹成为应力集中点, 引导爆破应力波传播, 促进裂纹扩展。由于初始微裂纹数量较少且难以形成贯通性良好的孔隙网络, 孔裂隙面积增幅较小, 仅为 11.03%。随着照射时间的延长, 微波能量增加, 热应力累积效应增强, 在提高微波功率后, 这种效应更加显著。高功率 3kW 微波照射下, 不同矿物间的温差进一步扩大, 产生更强的热应力, 迅速诱发大量密集微裂纹, 裂纹网络贯通性显著增强, 内部缺陷更加明显。在爆破过程中, 密集的微裂纹为应力波提供能量导向通道, 直接驱动裂纹贯通, 形成切片中的网状结构, 面积增幅最大, 达 37.71%。随着照射时间延长, 孔裂隙面积的增长态势已趋于平缓, 增幅为 17.87%。

对试样的显微 CT 图片分析可知, 微波辐射对孔裂隙面积的影响主要通过热应力、微裂纹积累与扩展来实现^[20]。高功率的微波辐射能够显著增强岩石的裂纹发育, 并为爆破过程提供有利条件, 从而促进岩石的破碎。

2.3 对孔裂隙体积影响的三维重构分析

为定量表征微波预处理对铁矿石试样孔裂隙的影响, 使用 Avizo 软件截取尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的圆柱体区域, 分析其孔裂隙随微波功率与照射时间变化的演化特征。孔裂隙三维重构图表明(如图 6 所示), 随着微波功率与照射时间增加, 试样孔裂隙逐渐发育、扩展并相互连通, 孔裂隙结构复杂化, 体积增大。

仅受爆破作用的基准试样 M1 孔裂隙体积为 424.12mm^3 , 表面积为 256.46mm^2 , 主要由少量片状主裂隙和孤立大孔隙构成, 孔隙连通性差, 整体结构简单, 难以形成复杂的裂隙网络。微波辐射处理后再进行爆破的试样(M2、M3、M4、M5)的孔裂隙体积分别增至 536.73mm^3 、 581.73mm^3 、 836.81mm^3 、 1435.30mm^3 , 表面积分别增至 473.04mm^2 、 570.50mm^2 、 831.24mm^2 、 1321.48mm^2 。图 6 可见随着微波辐射的加入, 微小孔隙数量显著增多, 原有孤立孔隙周围出现辐射状微裂纹, 孔裂隙网络逐渐复杂化。

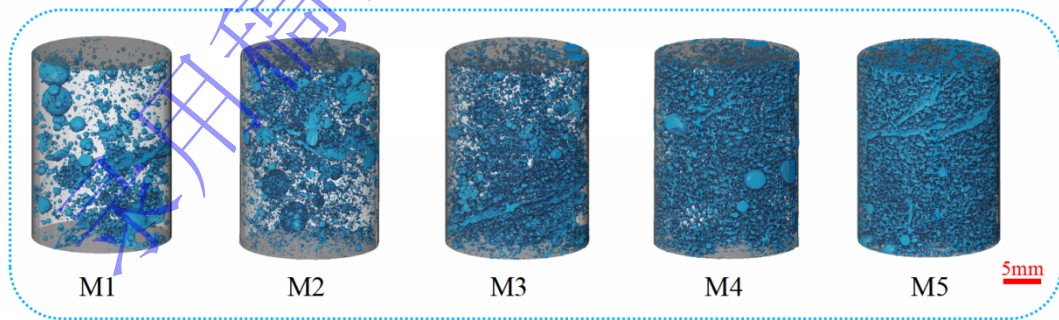


图 6 试样孔裂隙三维重构图

Fig.6 Three-dimensional reconstruction of specimen pore-fracture

如图 7 所示, 微波参数的变化对铁矿石孔裂隙体积、表面积及分形维数的影响呈现出显著的阶段性特征。随着微波功率由 1.5 kW 提升至 3 kW, 孔裂隙体积与表面积的变化曲线出现陡升段: M4(3 kW-20 min)相较于 M3(1.5kW-40min)的孔裂隙体积增幅达 30.48%(581.73mm^3 增至 836.81mm^3), 表面

积增幅达 31.37%(570.50mm² 增至 831.24mm²)，三维图像显示，此时孔裂隙分布密集程度显著提升；而在高功率 3kw 功率条件下，延长照射时间至 40 min 时，试样损伤效果更为显著，M5(3 kW-40min) 相较于 M4(3kW-20min) 的体积增幅达 59.47%(581.73mm³ 增至 1435.30mm³)，表面积增幅达 56.83% (570.50mm³ 增至 1321.48mm³)，孔裂隙网络进一步贯通并融合，形成若干连续的大尺度孔隙通道，整体结构趋向“海绵状”。可见微波辐射通过改变铁矿石的孔隙结构和裂隙连通性，为爆破提供了重要的前期准备，显著提高了爆破的效果和效率。

同时由上述数据表明，微波功率的提升对孔裂隙发育的促进作用远大于延长照射时间，其原因在于高功率微波能够在短时间内使矿物颗粒间形成更大的瞬态温差，产生更强的热应力冲击效应，从而迅速诱发大量微裂纹的萌生与扩展；而低功率长时间照射虽能累积热量，但热应力产生速率较慢，裂纹扩展效率相对较低。

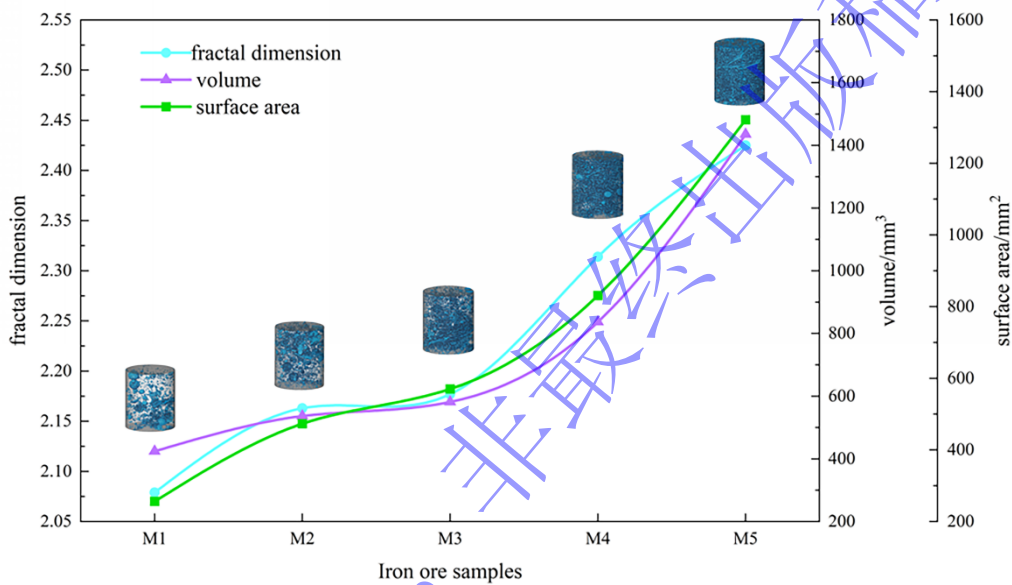


图 7 不同加载条件下试样孔裂隙体积、表面积、分形维数的变化曲线图

Fig.7 Variation curves of specimen pore fracture volume, surface area, and fractal dimension under different loading conditions

铁矿石内部遍布着形态不规则、结构错综复杂的微小孔裂隙，其形状和尺寸难以精准表征。但有研究表明，岩石孔裂隙的几何结构在不同尺度上呈现出相似性，分形维数作为一种描述物体复杂度的几何方法，可以用来定量表征岩样内部孔裂隙的复杂程度^[21]。

在三维重构模型中利用 Avizo 计算出不同工况下试样孔裂隙的三维分形维数。分形维数变化曲线如图 7 所示。爆破冲击后，M1 试样的三维分形维数为 2.079，经过微波作用后，M2 试样的三维分形维数增至 2.163，较 M1 上升 4.04%。延长微波照射时间后，M3 试样的三维分形维数增至 2.18，较原样上升 4.71%。提高微波功率至 3kW 后，M4 试样的三维分形维数增至 2.314，较原样上升 11.30%。此时，大量微小孔裂隙相互连通，孔隙网络复杂度显著提升。延长微波照射时间后，M5 样本的分形维数增至 2.425，较原样上升 16.64%。总体来看，分形维数随微波功率和照射时间增加呈上升趋势，且微波功率的影响更显著。随着能量输入增加，分形维数增幅趋于平缓。

3 微波参数对铁矿石孔径结构的影响

3.1 微波参数对孔径分布的影响

为具体分析微波参数对铁矿石孔裂隙演化的影响，基于 Avizo 软件平台，选取具有代表性且能反映整个样品内部孔裂隙的分布与形态特征的三维表征体元(3D-REV)，所截取表征体元的长宽高分别

为 $200\text{px} \times 200\text{px} \times 400\text{px}$ ($4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 8\text{mm}$), 基于最大球算法, 本研究从三维图像数据中提取并构建了等效的孔隙网络模型 (即球棍模型)。在此模型中, 孔隙与喉道的拓扑结构分别由相互连接的球体和棍体予以表征。

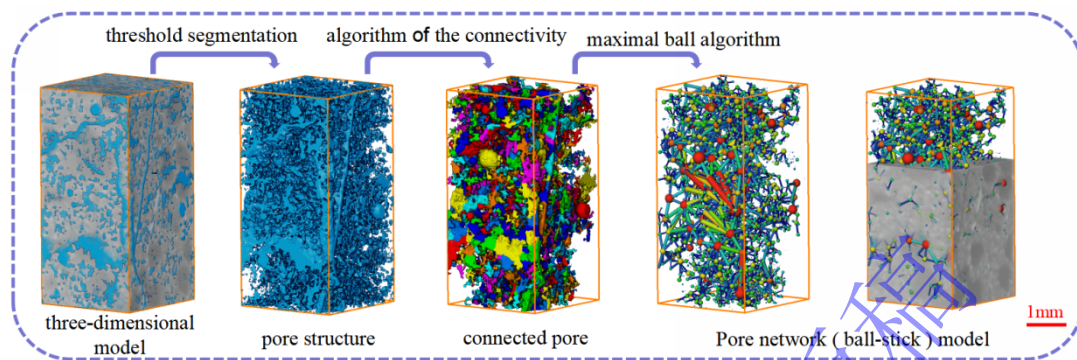


图 8 孔隙网络(球棍)等效模型表征过程

Fig.8 Porous Network (Ball-and-Stick) Equivalent Model Characterization Process

试样 M1 (无微波辐射、无围压) 表现出简单的孔隙网络, 孔隙之间的连通性差, 以孤立的大孔隙和少量的微小孔隙为主, 爆破应力波难以有效扩展。在较低功率条件下, 微波辐射主要促进了微小孔隙以及孔隙之间喉道的初始发育。试样 M2 (1.5kW 微波、20 分钟辐射) 在微波辐射下产生了更多的微小孔隙, 并且孔隙之间出现了更多的连通路径。随着微波照射时间的延长, 试样 M3 (1.5kW 微波、40 分钟辐射) 显示出更加复杂的孔隙结构, 裂纹网络逐渐趋向完整, 孔隙的连通性增强, 形成了初步的孔隙网络。

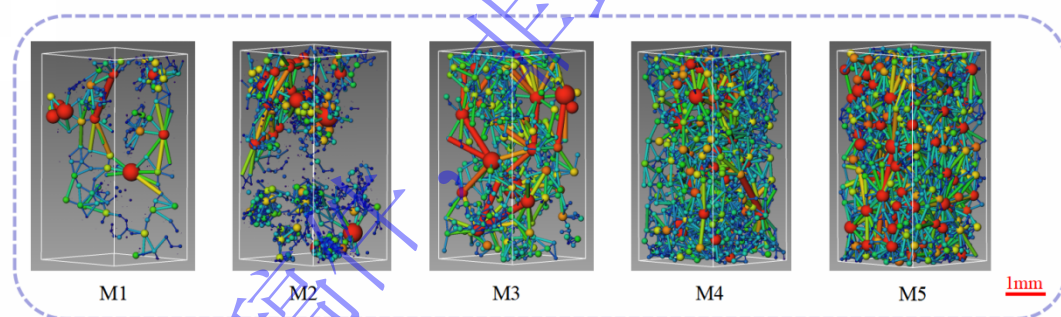


图 9 不同加载条件下试样的孔隙网络模型图

Fig.9 Pore network model of the sample under different loading conditions

试样 M4 (3kW 微波、20 分钟辐射) 则在较高功率下迅速诱发大量微小孔隙, 这些孔隙之间的连通性较 M2 和 M3 更为明显, 孔隙分布更加密集, 孔隙的连通性进一步提高, 爆破应力波沿裂纹迅速扩展, 孔隙网络的复杂性大大提高。试样 M5 (3kW 微波、40 分钟辐射) 在高功率与长时间微波照射下, 孔隙网络进一步复杂化, 不同孔隙间的连通性达到最大, 裂隙体系变得高度复杂。这表明, 随着微波功率和照射时间的增加, 铁矿石内部的孔隙网络变得更加复杂且连通性更好, 为爆破冲击提供了更多的扩展路径, 促进了裂纹的贯通并形成大范围的裂隙网络。

3.2 孔裂隙结构的定量分析

为精确量化孔隙网络模型中孔隙与喉道的空间构成关系, 对表示二者的球体与棍体进行独立计量与统计分析。

表 3 不同工况下孔隙网络模型数据统计对比

Table 3 Statistical comparison of equivalent model data of pore networks under different working conditions

参数	M1	M2	M3	M4	M5
模型尺寸/mm			4×4×8		
球体数	1834	2006	2130	2313	2572
球体最大半径/ μm	153.34	183.45	205.65	238.14	253.43
球体平均半径/ μm	61.35	68.42	77.30	91.40	108.53
棍体数	462	978	2023	4310	5389
棍体最大长度/ μm	586.12	687.77	783.13	834.84	928.48
棍体平均长度/ μm	250.11	263.14	271.42	284.39	301.34

(1)不同加载条件下试样内 RVE “球体” 参数

由表 3 和图 10 分析可知，微波预处理显著改变了爆破后试样的孔隙结构特征。相较于对照组 M1，经微波处理的试样 M2 至 M5，其表征孔隙的球体数量依次增加了 9.38%、16.14%、26.12%和 40.24%；同时，最大球体半径分别增长了 19.64%、34.11%、55.30%和 65.27%，平均球体半径也分别增加了 11.52%、26.0%、48.98%和 76.90%。从孔隙尺寸的分布结构演变来看，仅爆破的对照组 M1，其球体半径分布峰值位于 50-70 μm 的较小尺寸区间。经微波预处理后，该区间的占比下降，孔隙分布整体向大尺寸方向迁移。特别是在更高的微波能量输入下，M3、M4 分布峰值转移至 90-110 μm 区间，占比分别达到 24.35%和 27.82%。这清晰地表明，微波作用能有效减少试样内部小孔径孔隙的占比，同时显著增加大孔径孔隙的数量与比例。

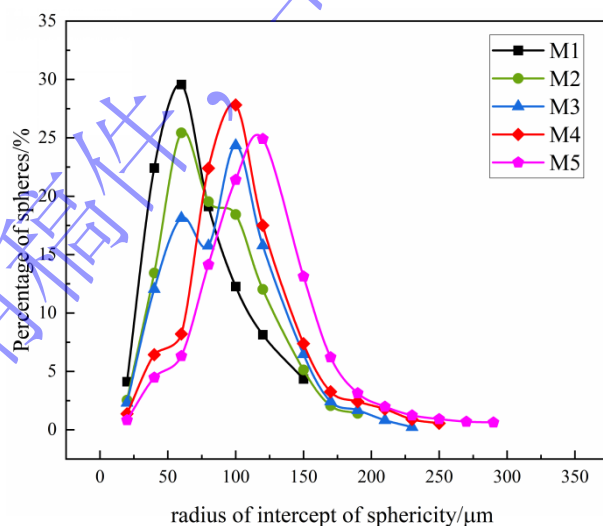


图 10 不同工况下球体分布对比

Fig.10 Comparison of Sphere Distribution under Different Conditions

(2)不同加载条件下试样内 RVE “棍体” 参数

由表 3 和图 11 可以看出，与仅爆破冲击的对照组相比，进行微波预处理再爆破冲击后的试样 (M2、M3、M4、M5)的棍体数量分别增加了 1.12 倍、3.38 倍、8.33 倍和 10.66 倍。最大棍体长度分别增加了 17.34%、33.61%、42.43%和 58.41%。由结果可知，微波辐射对棍体数量、最大长度影响较大。经统计发现，仅爆破冲击后喉道长度多集中 150-250 μm ，该范围内的喉道长度占比最高，为

23.35%。经过微波预处理再进行爆破冲击后，喉道长度占比峰值向右发生偏移（即整体喉道长度有所增加），通过改变微波功率和微波照射时间，喉道长度普遍增加，且最大喉道长度也得到了提高。

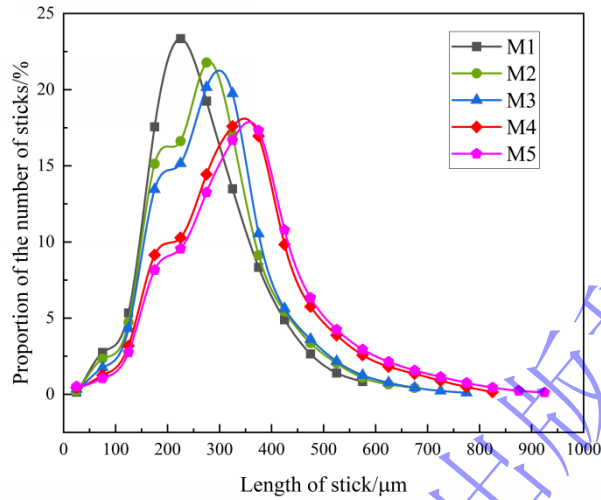


图 11 不同工况下棍体分布对比

Fig.11 Comparison of rod distribution under different operating conditions

因此在加入微波辐射后，孔隙和喉道的数量和半径和长度均有了进一步的增加，表明微波损伤对试样的孔隙结构分布有很大影响。微波预处理与后续爆破加载对岩石孔隙结构的改造体现在两个方面。其一，微波作用产生的热应力会破坏岩石的初始孔隙结构，同时诱发新的微裂纹，这有助于增加孔隙的总数量。其二，爆破冲击产生的应力波能够扩展孔隙与裂隙的宽度、延伸其长度。因此，在更高的微波能量输入下，试样内的孔隙与微裂纹（喉道）数量获得显著提升。微波损伤对试样的孔隙结构有着显著的影响，试样的爆破效果在一定程度上取决于微波功率和微波照射时间。

(3)微波参数对球体配位数的影响

球体配位数是量化孔隙结构连通性的重要指标，球体配位数越大则连通性越好^{[22][23]}。如图 12 所示，微波作用显著改变了配位数分布。对照组 M1 的最大配位数仅为 9，且分布高度集中于低值 0-1 范围内，其中孤立孔隙（配位数为 0）占比达 52.20%，此类孔隙对应应力波传播贡献很小。经微波 (3kW, 40min) 处理后，M5 试样的配位数范围显著拓宽，最大配位数达 26，孤立孔隙占比降至 10.23%。相比 M1，其最大配位数提升 1.88 倍，孤立孔隙比例减少 80.40%。

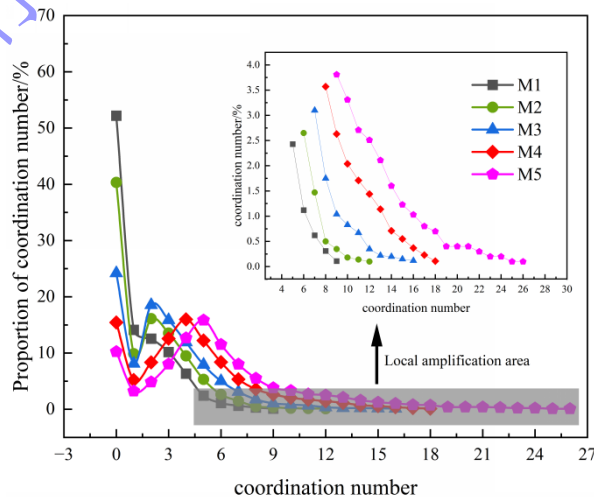


图 12 不同工况下配位数变化曲线图

Fig.12 Curve of Coordination Number Changes under Different Operating Conditions

微波辐射通过改善孔隙结构连通性，与爆破应力波产生协同增效。定量表征显示，随微波参数增强，代表性体积单元(RVE)中最大配位数及其占比范围上升，M2、M3 和 M4 试样的最大配位数分别为 12、16 和 18。而孤立孔隙（配位数为 0）的比例则从 40.34%显著下降至 15.43%。这证实微波作用促进了微裂纹生成与孔隙的连通，构建了连通性更好的三维网络。该结构劣化有效提升了岩石的可破碎性，优化了应力波传播路径并最终强化了爆破效果。基于高分辨率 CT 图像重建所得的三维孔裂隙数据具有高度的空间代表性，所观察到的孔裂隙参数变化趋势在不同微波功率、照射时间及围压条件下表现出良好的一致性，且与现有文献中微波辅助破岩的机理相符，增强了结论的可靠性。

4 围压对微波-爆破协同效应的抑制作用

4.1 围压对孔裂隙参数的影响

岩石发生破坏的主要原因是内部孔裂隙的贯通和发展。基于岩样的三维重构模型定量分析其孔裂隙，能够微观角度解释围压对爆破冲击后铁矿石岩样孔裂隙演化的影响^[24]。本文在分析时将岩样内部的孔裂隙分为贯通孔裂隙和独立孔裂隙，其中岩样破裂的主要原因是内部孔裂隙在外力的作用下连接成片并贯穿岩样的贯通孔裂隙，剩下未贯穿岩样的孔裂隙为独立孔裂隙。选取孔裂隙的体积、贯通孔裂隙的最大长度作为参数进行量化分析。具体分析结果如表 4、图 13 所示：

表 4 不同工况下岩样的孔裂隙参数变化

Table 4 Variation of pore and fracture parameters of rock samples under different working conditions

岩样状态	总体积 (nm ³)	贯通孔裂隙体积 占比	独立孔裂隙体积 占比	贯通孔裂隙最大长度 (nm)
无围压爆破冲击后	1383720	89%	11%	332
围压 5MPa 爆破冲击后	950846	66%	34%	318
围压 15MPa 爆破冲击后	619566	28%	72%	291

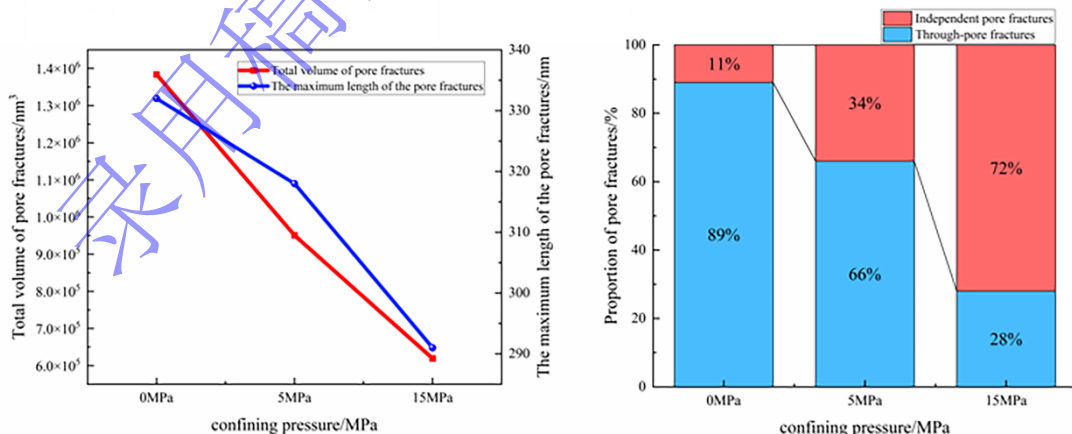


图 13 孔裂隙最大长度和体积变化、两种孔裂隙占比变化

Fig.13 Changes in the maximum length and volume of fractures, and changes in the proportion of two types of fractures

从表 4、图 13 可以看出，在没有围压的情况下，贯通孔裂隙占据了 89%的总体积，这表明在无围压作用下，微波-爆破耦合作用下试样内部已经形成高度连通的孔裂隙网络。随着围压的加入，受

冲击后岩样内部贯通孔裂隙的占比降低，这是由于围压通过压缩孔裂隙网络和约束裂纹的扩展路径，限制裂纹之间的连通性导致的。围压增至 15MPa 后，贯通孔裂隙占比降低至 28%，相较于围压 5MPa 时下降幅度更为显著，表明试样内部孔隙网络结构发生了根本性变化，高围压充分抑制了微裂纹的扩展，显著降低了孔隙网络的连通性。另外，孔裂隙的最大长度以及总体积也出现不断减小的趋势。以上定量分析的结果说明了围压使得岩石内部的微裂隙发生部分闭合，特别是孔隙和裂纹之间的连通性降低。这种作用进一步削弱了裂纹的传播路径，抑制了孔裂隙发展。在实际爆破过程中，围压的存在会使岩石的破裂区域和裂纹网络相对封闭，无法完全形成贯穿性的裂纹网络，因此削弱了爆破的破碎效果。

4.2 围压对宏观裂纹扩展的影响

深部硬岩中的爆破破坏，实质上是岩体本身所受到的高地应力与炸药爆炸所生动力载荷相互叠加、共同作用的结果。其中，预先存在的静态地应力场扮演着关键角色，它显著地影响并主导了爆生裂纹最初的起裂与扩展方向^[25]，爆后试样裂纹的扩展情况如图 12 所示。

由图 14 可以看出，具有围压作用的试样 M6、M7 爆后效果与无围压下试样 M1 相比发生较大改变。M1 试样的爆后效果基本符合单孔爆破的试验现象^[26]。随着围压的增加，裂隙区的范围逐渐减小，爆后试样上的裂纹变得稀疏。在无围压条件下，岩石单孔爆破产生的裂纹通常以炮孔为中心，向周围各个方向近似均匀地扩展。施加围压后，裂纹的扩展便表现出显著的“方向”选择性。以试件 M6 为例，其最长的主裂纹清晰地沿着与轴向呈 45° 夹角的斜向延伸。这一现象与既双向等荷载约束条件下的爆破模型试验所揭示的裂纹扩展规律相符^[27]。随着围压的继续增大，M7 试样仅有两条沿 45° 的主裂纹。另外，围压的施加还限制了裂纹的数量。随着围压的增大，爆后试样的裂纹减少，从图 14 中可以清晰观察到，不同试件间主裂纹数量存在显著差异。试件 M1 上共发育有 7 条主裂纹，而试件 M6 与 M7 的主裂纹数量则分别减少至 5 条和 2 条。

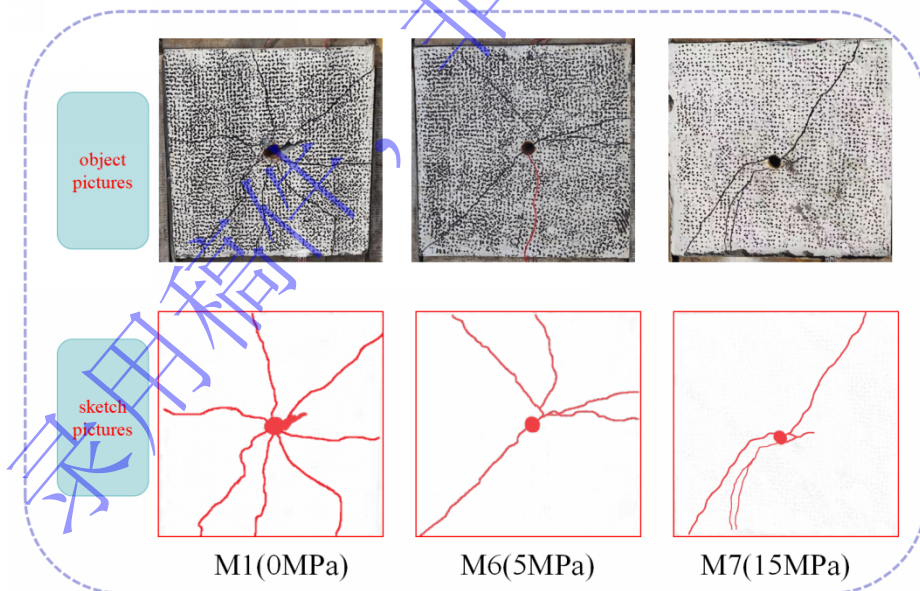


图 14 宏观裂纹示意图

Fig. 14 Schematic Diagram of Macroscopic Cracks

综上所述，随着围压的增加，岩体的爆破裂纹扩展方向受到了限制，主裂纹沿对角线扩展，即最大主应力方向。同时围压环境下裂纹的数量减少。上述结果也验证了围压作用下微观孔裂隙演化与宏观裂纹扩展之间的联系：随着围压的升高，岩石内部孔裂隙总体积下降 55.2%，贯通孔裂隙的体积占比由 89% 降至 28%，最大长度减小 12.3%；这一变化在宏观尺度上表现为爆后主裂纹数量由 7 条减少

至 2 条, 裂隙区范围显著收缩。上述对应关系表明, 围压通过压缩孔裂隙空间并抑制裂纹尖端的应力集中, 削弱了微裂纹之间的相互连通, 进而制约了宏观裂纹的发育与扩展。同时围压条件改变了爆破损伤区的应力场分布, 对裂纹的扩展路径起到了显著的定向致裂效果, 从放射状无序扩展到趋向于最大主应力方向扩展, 限制了岩体的进一步破裂和破碎。从微观三维孔裂隙演化和宏观裂纹扩展相结合的方式揭示围压对微波-爆破协同致裂效果的抑制作用。

4.3 围压抑制作用的力学机制探讨

从断裂力学角度分析, 围压对裂纹扩展的抑制作用可从能量耗散与应力场叠加两个层面分析。围压加载于试样边界, 在试样内部形成压缩应力场。一方面, 该应力场使岩石颗粒间产生预应力, 裂纹扩展需克服颗粒间的初始压应力才能形成张拉裂纹^[28], 同时围压水平的提高使剪切裂纹比例和颗粒间摩擦效应显著增加, 导致形成相同数量裂纹所需消耗的能量增大, 即裂纹扩展阻力提高; 另一方面, 压缩应力场与爆炸应力场叠加后改变了裂纹尖端的应力状态^[29], 抵消了部分爆炸波引起的环向拉应力, 从而降低了裂纹尖端的拉应力水平, 使裂纹扩展的动力减弱。上述两种机制共同作用, 既增加了裂纹扩展所需的能量耗散, 又降低了裂纹尖端的扩展驱动力, 使得微波预处理阶段形成的微裂纹在爆破荷载作用下更难扩展与贯通, 裂纹网络更难形成, 进而抑制了孔裂隙的发育与连通。上述实验数据清晰地揭示了围压的抑制作用: 随着围压从 0 MPa 增至 15 MPa, 贯通孔裂隙的体积占比由 89% 急剧下降至 28%, 而孤立孔裂隙的体积占比则从 11% 攀升至 72%。这一变化也从侧面反映, 围压显著提高了裂纹贯通所需的能量门槛, 同时削弱了裂纹扩展的驱动力, 导致大量微裂纹因无法有效连接而孤立存在。

除了抑制裂纹网络的整体发育外, 围压还显著改变了裂纹的扩展路径。从断裂力学角度看, 裂纹总是倾向于沿阻力最小的方向扩展。无围压时, 爆炸能量各向同性释放, 裂纹沿炮孔径向均匀萌生, 如图 14 中 M1 试样所示; 而施加围压后, 从图 14 可以看出, 围压的存在起到了明显的定向致裂效果, 抑制了裂纹的扩展, 主裂纹沿对角线方向发展。这是由于在高地应力环境下, 促使主应力方向与爆炸应力波传播方向趋于一致, 二者碰撞并发生叠加作用, 在其碰撞的切向伴生拉应力, 当合成拉应力超越岩石的抗拉强度时, 即会诱发岩石沿主应力方向发生破裂^[30]。由此可见, 围压对微波-爆破协同效应的控制作用主要体现在两个方面: 一方面通过提高能量耗散和降低裂纹扩展驱动力, 限制了裂纹网络的规模与连通性; 另一方面通过主应力场主导裂纹的优势扩展方向, 改变了裂纹的发育路径。

5 结论

1) 微波作用促进了铁矿石内部孔裂隙的发育与萌生。在影响孔裂隙发育的因素中, 提升微波功率后的损伤效果更为显著。当微波功率由 1.5 kW 提升至 3 kW 时, 爆破后铁矿石的孔裂隙体积与表面积增幅分别达到最大的 30.48% 和 31.37%, 分形维数由 2.079 增至 2.425。微波能量累积通过引发岩石内部热应力, 诱导微裂纹的萌生与扩展, 为爆破应力波提供了优势传播通道, 从而显著提高了爆破破碎效果。

2) 微波作用有效改善了孔隙连通性与孔裂隙网络复杂度。随微波损伤的增加, 铁矿石孔隙半径分布峰值由 50-70 μm 迁移至 90-110 μm , 喉道长度分布曲线波峰也向更长长度的方向偏移、孔隙配位数分布范围增加, 最大配位数由 9 增至 26, 孤立孔隙占比从 52.20% 降至 10.23%。微波作用下孔隙之间的连通性改善为爆破应力波传播提供更多通道, 为岩石爆破破碎提供有力条件。

3) 围压对微波-爆破协同致裂具有显著的抑制作用。随着围压增加, 铁矿石内部孔裂隙的连通和发育受到了限制, 贯通孔裂隙体积占比由 89% 降至 28%, 孤立孔隙体积占比增大, 孔裂隙总体积下降, 主裂纹数量由 7 条减少至 2 条。宏观裂纹从放射状无序扩展到趋向于最大主应力方向扩展, 导致爆破效果显著减弱。

4) 实际工程中建议采用高功率、短时间微波预处理模式, 以充分发挥热应力致裂效应。深部高

应力环境下, 围压虽抑制裂纹扩展, 但可通过充分的微波预处理诱发岩体内部产生密集微裂纹、增加岩体内部损伤程度, 可为爆破应力波提供优先扩展通道, 从而有效削弱围压的约束作用, 提升破岩效果; 建议建立微波-爆破参数协同优化机制, 根据岩性和围压匹配微波辐射时间与炸药装药量;

参考文献

- [1] 蔡美峰, 谭文辉, 吴星辉, 等. 金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3409-3421. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42115
CAI M F, TAN W H, WU X H, et al. Current Status and Development Strategies of Intelligent Deep Mining in Metal Mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3409-3421. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42115
- [2] 王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, (12): 3883-3912. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43082
WANG S F, SUN L C, ZHOU Z L, et al. Development and Prospect of Non-Blasting Rock Theory and Technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, (12): 3883-3912. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43082
- [3] 魏建平, 蔡玉波, 刘勇, 等. 非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势[J]. 煤炭学报, 2024, 49(02): 801-832. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1199.
WEI J P, CAI Y B, LIU Y, et al. Research Progress and Trends in Non-Tool Rock Breaking Theory and Technology [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(02): 801-832. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1199.
- [4] 田军, 卢高明, 冯夏庭等. 主要造岩矿物微波敏感性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2066-2074. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0363.
TIAN J, LU G M, FENG X T, et al. Experimental Study on the Microwave Sensitivity of Major Rock-Forming Minerals [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2066-2074. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0363.
- [5] 戴俊, 朱清耀, 冯昌超, 等. 微波照射下花岗岩强度损伤规律研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 54-60+67+7-8. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2021.06.009.
DAI J, ZHU Q Y, FENG C C, et al. Study on the Strength Damage Law of Granite under Microwave Irradiation [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 54-60, 67, 7-8. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2021.06.009.
- [6] 胡国忠, 朱杰琦, 朱健等. 微波辐射下页岩微结构的损伤特性与致裂效应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10), 3471-3479. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0209.
HU G Z, ZHU J Q, ZHU J, et al. Damage Characteristics and Fracturing Effects of Shale Microstructure under Microwave Radiation [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10), 3471-3479. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0209.
- [7] Li J, Kaunda R B, Arora S, et al. Fully-coupled simulations of thermally-induced cracking in pegmatite due to microwave irradiation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(2): 242-250. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.12.007
- [8] Li H, Lin B Q, Yang W, et al. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 154/155: 82-91. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.010
- [9] 戴俊, 孟振, 吴丙权. 微波照射对岩石强度的影响研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014, 3(1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9492.2014.03.014
DAI J, MENG Z, WU B Q. Study on the Effect of Microwave Irradiation on Rock Strength [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014, 3(1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9492.2014.03.014
- [10] 戴俊, 师百垒, 杨凡, 等. 微波照射下岩石损伤 CT 试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(5): 616-620. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdx.2016.0502.
DAI J, SHI B L, YANG F, et al. CT Experimental Study on Rock Damage under Microwave Irradiation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(5): 616-620. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdx.2016.0502.

- [11]Kumar H, Lester E, Kingman S, et al. Inducing fractures and increasing cleat apertures in a bituminous coal under isotropic stress via application of microwave energy[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88(1): 75-82. DOI: 10.1016/j.coal.2011.07.007
- [12]杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J]. *爆炸与冲击*, 2001, (02): 111-116.
Yang Xiaolin, Wang Mengshu. Mechanism of Rock Crack Propagation Under Explosive Gas Action[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, (02): 111-116
- [13]杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤断裂的细观机理[J]. *爆炸与冲击*, 2000, (03): 247-252.
Yang Xiaolin, Wang Shuren. Micro-mechanism of Rock Fracture and Damage in Blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, (03): 247-252
- [14]王雁冰, 王兆阳, 付代睿, 等. 爆后岩石裂隙结构可视化及定量表征方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(03): 1388-1402. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0801.
WANG Y B, WANG Z Y, FU D R, et al. Visualization and quantitative characterization of rock fracture structure after explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(03): 1388-1402. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0801.
- [15]王雁冰, 于冰冰, 孔骥, 等. 室内小药量岩石爆破损伤评价方法及装置[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(06): 624-631. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2020.06.004.
WANG Y B, YU B B, KONG J, et al. Evaluation Methods and Devices for Small-Scale Indoor Rock Blasting Damage [J]. *Journal of Mining Science*, 2020, 5(06): 624-631. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2020.06.004.
- [16]张树川, 张缓缓, 王锦波, 等. 不同加载模式煤体爆炸荷载作用下损伤和裂隙演化研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(09): 127-131. DOI: 10.11799/ce202109025
ZHANG S C, ZHANG H H, WANG J B, et al. Study on Damage and Fracture Evolution of Coal under Explosion Load under Different Loading Modes [J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(09): 127-131. DOI: 10.11799/ce202109025
- [17]王雁冰, 李雪, 王兆阳, 等. 围压作用下等离子体的爆破破岩效应[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(04): 136-152. DOI: 10.11883/bzyej-2024-0089
WANG Y B, LI X, WANG Z Y, et al. Blasting Rock-Breaking Effect of Plasma under Confining Pressure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(04): 136-152. DOI: 10.11883/bzyej-2024-0089
- [18]Song S, Liu J, Yang D, et al. Pore structure characterization and permeability prediction of coal samples based on SEM images[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 67: 160-171. DOI:10.1016/j.jngse.2019.05.003.
- [19]Wang G, Yang X, Chu X, et al. Microscale Numerical Simulation of Non-Darcy Flow of Coalbed Methane[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(5): 2547-2561. DOI:10.1007/s13369-017-2802-x.
- [20]胡国忠, 杨南, 朱健, 等. 微波辐射下含水分煤体孔渗特性及表面裂隙演化特征实验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 813-822. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0148.
HU G Z, YANG N, ZHU J, et al. Experimental study on the porosity and permeability characteristics of water-containing coal under microwave radiation and the evolution characteristics of surface fractures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 813-822. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0148.
- [21]Li Zhao, Ni Guanhua, Wang Yan. et al. Semi-homogeneous model of coal based on 3D reconstruction of CT images and its seepage-deformation characteristics[J]. *Energy*, Volume 259, 2022, 125044, ISSN 0360-5442. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.125044
- [22]Zhang D, Zhang X, Guo H, et al. An anisotropic pore-network model to estimate the shale gas permeability[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 7902. DOI: 10.1038/S41598-021-86829-4
- [23]张兴昊, 林丹彤, 胡黎明. 基于等效孔隙网络模型的水动力弥散数值模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(12): 1906-1914. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.22.011.
ZHANG X H, LIN D T, HU L M. Numerical simulation of hydrodynamic diffusion based on equivalent pore network model[J]. *Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition)*, 2022, 62(12): 1906-1914. DOI:

- 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.22.011.
- [24]石学文, 王青, 张景缘, 等. 川南长宁区块龙潭组煤系储层孔裂隙结构、连通性特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2025, 99(09): 3133-3146.DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024394.
- SHI X W, WANG Q, ZHANG J Y, et al. Pore-Fracture Structure, Connectivity Characteristics, and Geological Significance of Coal Reservoirs in the Longtan Formation, Changning Block, Southern Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(09): 3133-3146. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024394.
- [25]马泗洲, 蒋海明, 周朝兰, 等. 围压与爆破耦合作用下节理岩体裂纹的扩展行为与影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(06): 6-23.DOI: 10.11883/bzycj-2024-0424
- MA S Z, JIANG H M, ZHOU C L, et al. The propagation behavior and influencing factors of fractures in jointed rock masses under the combined action of confinement and blasting[J]. Explosion and Shock, 2025, 45(06): 6-23. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0424
- [26]刘帅, 王卫华, 张恒根, 等. 岩体单孔爆破损伤的三维数值模拟研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(01): 10-18.DOI: 10.19931/j.EB.20210186.
- LIU S, WANG W H, ZHANG H G, et al. Three-dimensional numerical simulation study of single-hole blasting damage in rock mass [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(01): 10-18. DOI: 10.19931/j.EB.20210186.
- [27]GE J J, XU Y, HUANG W, et al.Experimental study on crack propagation of rock by blasting under bidirectional equal confining pressure load [J]. Sustainability, 2021, 13 (21) : 12093.DOI: 10.3390/SU132112093
- [28]Li, D., Li, X., Liu, H. et al. Influence of confining pressure on rock fracture propagation under particle impact[J].Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour. 10, 133 (2024).DOI: 10.1007/s40948-024-00862-x
- [29]Zhen Liu, Renshu Yang, Jinjing Zuo, Yong Zhao, Yuanyuan You, Fengyuan Ge, Caiyan Zhang, Mechanism of explosive crack propagation under the coupling of high crustal stress field and explosion stress field[J].International Journal of Impact Engineering, Volume 208, 2026, 105549, ISSN 0734-743X, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105549.
- [30]葛进进, 徐颖, 程琳, 等. 深部岩石爆破主裂纹扩展方向与地应力的关系[J]. 振动与冲击, 2023, 42(04): 54-64.DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.04.007.
- GE J J, XU Y, CHENG L, et al. The Relationship Between the Main Crack Propagation Direction of Deep Rock Blasting and Ground Stress [J]. Vibration and Shock, 2023, 42(04): 54-64. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.04.007.