

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 14

微波辐射参数对砂岩力学及损伤特征影响

孙晓宇^{1,2}, 王航龙¹, 彭俊², 王林飞², 潘堃²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;
2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院有限公司 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:微波辐射作为新兴破岩技术在辅助机械破岩方面展现出了广泛的应用前景,为探究微波辐射对石英砂岩的损伤作用机制,研究了不同功率微波和不同微波辐射时间作用下石英砂岩单轴抗压强度、波速等性质的变化规律及宏观损伤特征。结果表明:随微波辐射功率和辐射时间增大,石英砂岩单轴抗压强度和弹性模量整体呈下降趋势;P波和S波波速整体呈下降趋势;损伤因子呈上升趋势,并且辐射时间越长,损伤因子上升的幅度越大。随微波辐射功率和辐射时间增大,石英砂岩破碎程度显著增加,碎块尺寸逐渐减小,数量逐渐增多;破坏形式从单一的剪切破坏转变为沿脆弱面的剪切破坏和劈裂破坏;SEM图像和分形维数 D 值结果表明,随微波辐射时间增大,试样内部裂纹的数量、长度、宽度和深度均呈增加趋势,从初始的单一裂纹逐渐演变为叠加裂纹。

关键词:石英砂岩;微波辐射;单轴抗压强度;波速

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0528-11

The Influence of Microwave Radiation Parameters on the Mechanical Properties and Damage Behavior of Sandstone

Sun Xiaoyu^{1,2}, Wang Hanglong¹, Peng Jun², Wang Linfei², Pan Kun²

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Sinosteel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, P. R. China)

Abstract: Microwave radiation, as an emerging rock-breaking technology, shows promising applications in assisting mechanical rock fragmentation. To explore the damage mechanisms of microwave radiation on quartz sandstone, this study investigates the variations in uniaxial compressive strength, wave velocity, and macro-microscopic damage characteristics of quartz sandstone under different microwave powers and exposure times. The results indicate that with increasing microwave power and exposure time, the uniaxial compressive strength and elastic modulus exhibit a decreasing trend, while peak strain gradually increases. Both P-wave and S-wave velocities show an overall decline. The damage factor shows an upward trend, and the longer the radiation time, the greater the increase in the damage factor. As microwave power and exposure time increase, the degree of quartz sandstone fragmentation significantly intensifies, resulting in smaller and more numerous fragments. The failure mode shifts from a single shear failure to shear and cleavage along fragile planes. SEM images and fractal dimension (D -value) results

收稿日期: 2025-04-20(修改稿)

作者简介: 孙晓宇(1999—),男,山东滨州人,硕士生,主要从事岩石力学等领域科研工作。

E-mail: sxyedu_mail@163.com

通讯作者: 王航龙(1983—),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,主要从事露天矿开采设计、边坡稳定、边坡灾害防治等方面的研究。E-mail: 93544060@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC2905700);国家重点研发计划(2023YFC2907201);国家自然科学基金重点项目(52130403);安徽省自然科学基金(2208085ME120);安徽省重点研发计划(2022m07020001)

indicate that as microwave exposure time increases, the number, length, width, and depth of internal cracks in specimens show an increasing trend, evolving from initial single cracks to superimposed fractures.

Keywords: quartz sandstone; microwave radiation; uniaxial compressive strength; wave velocity

0 引言

随着社会的发展,矿产和油气资源开采、水利水电建设以及地下空间开发的规模和力度不断加大,以上工程实际都离不开破岩工作。目前传统爆破法和机械破岩法依旧是应用最广的破岩方法^[1-3],其中传统爆破法有着对原岩扰动大,施工精度低等一系列缺点^[4],机械破岩的刀具磨损是此方法面临的主要问题^[5]。为了针对深部硬岩难以破碎的问题,在研究新型破岩工具的同时,也出现了一些新兴破岩技术来辅助机械法破岩,例如:等离子体破岩、微波破岩、激光破岩以及热力综合破岩等^[6]。其中微波辅助破岩技术被认为具有广泛的应用前景,其具有即时性、整体加热性以及加热高效性等特点,能够显著降低硬岩强度,辅助机械破岩,减少破岩刀具磨损^[7]。

国内外学者在利用微波辐射软化破碎岩石方面展开了大量研究。Lu 等^[8]和田军等^[9]从矿物尺度对造岩矿物进行了测试,观察到不同的造岩矿物在微波处理下的磁化率差异很大,大多数主要造岩矿物都是弱微波吸收剂,同一种矿物由于来源不同或杂质种类和含量不同,其微波吸收特性也不同。Zheng 等^[10]对 3 种火成岩进行微波加热,试验结果表明,单模微波系统可以通过产生热致裂纹或直接融化、粉碎试样来达到弱化岩石承载能力的效果。Lu 等^[11]采用固定功率微波研究了微波处理后玄武岩样品在单轴压缩和常规三轴压缩试验下的力学行为。Zhang 等^[12]通过试验研究了不同真三轴应力条件下硬岩微波致井内压裂的特征及机理,刘志义等^[13]采用微波照射与霍普金森压杆(SHPB)相结合的试验方法,开展不同微波参数照射前、后铁矿石动力学性能及破碎特征研究。Zhao 等^[14]和戴俊等^[15]通过对比干燥砂岩和饱和砂岩的加热特性,研究了水在微波加热过程中的影响,并通过压汞孔隙度测试进一步解释了水在微波加热过程中的影响。Feng 等^[16]以旋转式开放式微波辐照硬岩压裂真三轴试验系统为研究对象,研究了不同转速下微波照射硬岩在无应力和真三轴应力条件下的裂纹扩展特性,揭示了旋转微波照射硬岩的破裂机理。Ma 等^[17]利用微波和 DLCWA 对不同平面尺寸和厚度的闪长岩试样进行了微波辐射试验,研究了试样平面尺寸、厚度以及微波能

量对裂纹特征的影响。Ma 等^[18]调查了波导天线类型对岩石破裂的影响,发现根据所使用的岩石类型和天线的不同,岩石通常会以开裂、剥落、融化或两者结合的方式破裂或削弱。还有一些学者通过数值模拟的方法研究了微波辐射下矿物的升温特性^[19-20]、岩石的升温特性^[21]和岩石的电磁-热-力多物理场耦合问题^[22-24]。

微波辐射对岩石强度的影响已经受到许多学者的广泛关注和深入研究。然而,关于不同微波辐射功率和辐射时间对岩石力学特性的影响,大多数研究都集中在玄武岩和花岗岩,而不同类型岩石对微波辐射的敏感性存在显著差异,且微波辐射引起的岩石损伤机制也各不相同。因此,研究微波辐射对石英砂岩强度的影响是非常有必要的。本文以石英砂岩为研究对象,开展微波辐射前后,其单轴压缩力学性能演化规律、波速变化及破碎损伤特征的研究,对比分析其宏观和细观损伤特征的差异,揭示微波辐射对石英砂岩损伤的作用机制,为现场试验和工程实践提供理论支持。

1 试样制备和试验方案

1.1 试样制备

试验选用取自山东的致密石英砂岩,表面无明显节理裂隙。按照 ISRM(国际岩石力学与工程学会, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering)标准,制备符合试验标准的直径为 50 mm,高度为 100 mm 的圆柱体试样。图 1 为室温条件下的石英砂岩试样,该石英砂岩成分主要为石英(74.9%),高岭石(16.8%),伊利石(8.3%)。

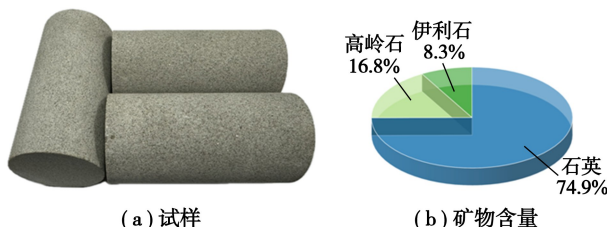


图 1 石英砂岩

Fig. 1 Quartz sandstone

图 2 为室温条件下石英砂岩试样的 X 射线衍射图谱。石英砂岩试样的基本物理参数如表 1 所示。

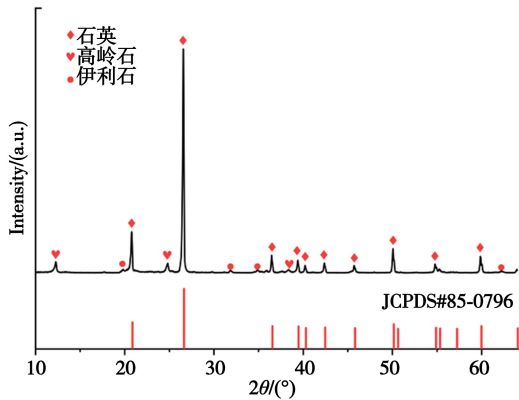


图 2 室温下石英砂岩试样 X 射线衍射图谱
Fig. 2 XRD patterns of quartz sandstone specimen at room temperature

表 1 岩石物理性质参数

Table 1 Physical property parameters of rock

岩样	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	P 波波速 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	抗压强度/ MPa
石英砂岩	2.65	19.34	0.20	4 464	90.66

1.2 试验方案

本文采用南京策木微波科技有限公司制造的 CM-03S 型大功率微波破岩设备进行微波辐射试验。该设备配备功率连续可调的工业微波源,频率为 2.45 GHz,采用水冷方式,输出功率可在 0~3.0 kW 之间无级调节,并配备微波辐射腔体及波导天线(如图 3)。试验选取符合试验标准的 4 组试样,分别在 1.5、2.0、2.5 和 3.0 kW 功率下进行微波辐射处理。在进行微波辐射前,所有岩样先经 105 °C 的干燥箱干燥处理 24 h,以排除水分对试验结果的影响。



图 3 CM-03S 大功率微波破岩设备
注: ①微波辐射腔体; ②波导天线; ③待辐射试样; ④莫来石板

图 3 The CM-03S high power microwave rock breaking equipment

在施加功率为 1.5、2.0、2.5 和 3.0 kW 微波时,石英砂岩试样分别在 200 s、130 s、80 s 和 50 s 后发生破碎和破坏,微波最大辐射时间需要小于上述破坏时间,具体的微波辐射方案如表 2 所示:

1.5 kW 功率时,分别设定微波辐射时间为 0 s、80 s、100 s、120 s;2.0 kW 功率时为 0 s、40 s、60 s、80 s;2.5 kW 功率时为 0 s、20 s、30 s、40 s;3.0 kW 功率时为 0 s、10 s、20 s、30 s。为确保每个试样的微波辐射效果均一,所有试样均放置在莫来石板的同一位置。未进行微波辐射处理的试样作为烘干状态的对照组。

表 2 微波辐射石英砂岩试验方案
Table 2 Schemes for microwave heating on quartz sandstone

试样编号	微波功率/kW	辐射时间/s
0-0	0	0
1-1	1.5	80
1-2	1.5	100
1-3	1.5	120
2-1	2.0	40
2-2	2.0	60
2-3	2.0	80
3-1	2.5	20
3-2	2.5	30
3-3	2.5	40
4-1	3.0	10
4-2	3.0	20
4-3	3.0	30

完成微波辐射后,将试样冷却至室温,使用非金属超声检测仪测量试样的波速。随后,利用 YAM-2000 微机伺服压力试验机(如图 4)对微波辐射处理后的石英砂岩试样进行单轴压缩试验,采用位移加载方式直至试样破坏,并同时安装横向和纵向位移传感器监测加载过程中的变形。



图 4 试验设备
(a) YAM-2000微机伺服压力试验机 (b) 位移传感器

图 4 Test equipment
Fig. 4 Test equipment

2 物理力学试验结果及分析

2.1 单轴抗压强度和峰值应变

图 5 展示了石英砂岩在未经微波辐射和经过不同功率、时间微波辐射后的应力-应变曲线。从石英砂岩的应力-应变曲线可以观察到,静态单轴压缩过程可分为孔隙压密、弹性变形、裂纹扩展和最终破裂阶段。当微波功率较小且辐射时间较短

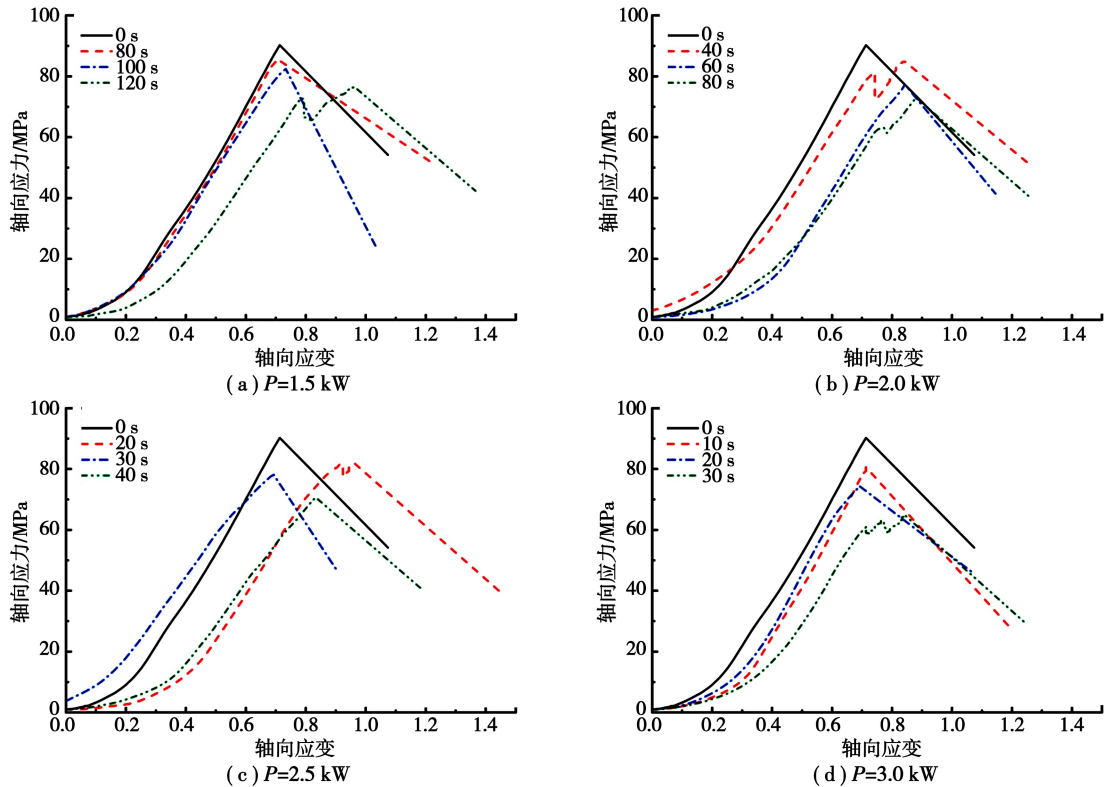


图 5 微波辐射前后石英砂岩应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of quartz sandstone before and after microwave radiation

从图 6 可以看出,在石英砂岩经过 1.5 kW 辐射 80 s、100 s、120 s;2.0 kW 辐射 40 s、60 s、80 s;2.5 kW 辐射 20 s、30 s、40 s;3.0 kW 辐射 10 s、20 s、30 s 后单轴抗压强度分别降低了 6.03%、9.06%、15.72% 和 6.51%、14.73%、19.74% 和 9.82%、13.03%、18.95% 和 11.06%、18.05%、28.49%。在同一功率微波辐射情况下,随辐射时间的增大,石英砂岩单轴抗压强度呈下降趋势。微波辐射功率越高,辐射时间越长,岩石裂隙越发育,岩石强度降低越多。

这表明,经过微波辐射处理后,石英砂岩的裂隙发育随微波辐射功率和时间增加而单调增加。经过微波辐射后石英砂岩峰值应变先增大后降低再增大,总体趋势随辐射时间的增加而逐渐增大。这表明经过微波辐射处理后,石英砂岩开始由脆性特性逐渐向延性特性转变。还可见,当微波辐射功

率较低时,试样的强度随时间的降低幅度较小,即辐射时间对石英砂岩试样强度弱化作用小;当使用 2.5 kW 和 3.0 kW 功率微波辐射 20、30 s 时,随微波辐射功率的增大,相同的辐射时间下单轴抗压强度降低的幅度变大,石英砂岩试样的损伤程度逐渐加大,微波辐射时间对试样单轴抗压强度的弱化作用也逐渐增强。因此,与微波辐射时间相比,微波辐射功率的变化对石英砂岩试样内部结构损伤影响更大。

时,微波辐射前后石英砂岩的孔隙压密阶段基本没有变化,当微波功率达到 3.0 kW 时,石英砂岩孔隙压密阶段的持续时间有逐渐增加的趋势。破裂阶段,石英砂岩应力-应变曲线迅速下降,展现出典型的脆性破坏特征,并未观察到残余强度。根据石英砂岩应力-应变曲线数据,进行了统计分析,得到了微波辐射前后的单轴抗压强度、峰值应变、弹性模量和泊松比等相关参数。

2.2 弹性模量和泊松比

弹性模量和泊松比是控制岩石变形的两个重要力学参数。选取此次单轴压缩试验石英砂岩应力应变曲线的弹性变形阶段曲线,对数据进行线性拟合,计算弹性模量和泊松比。

结果如图 7 所示。烘干状态下,石英砂岩单轴压缩弹性模量为 19.34 GPa。经过微波辐射处理

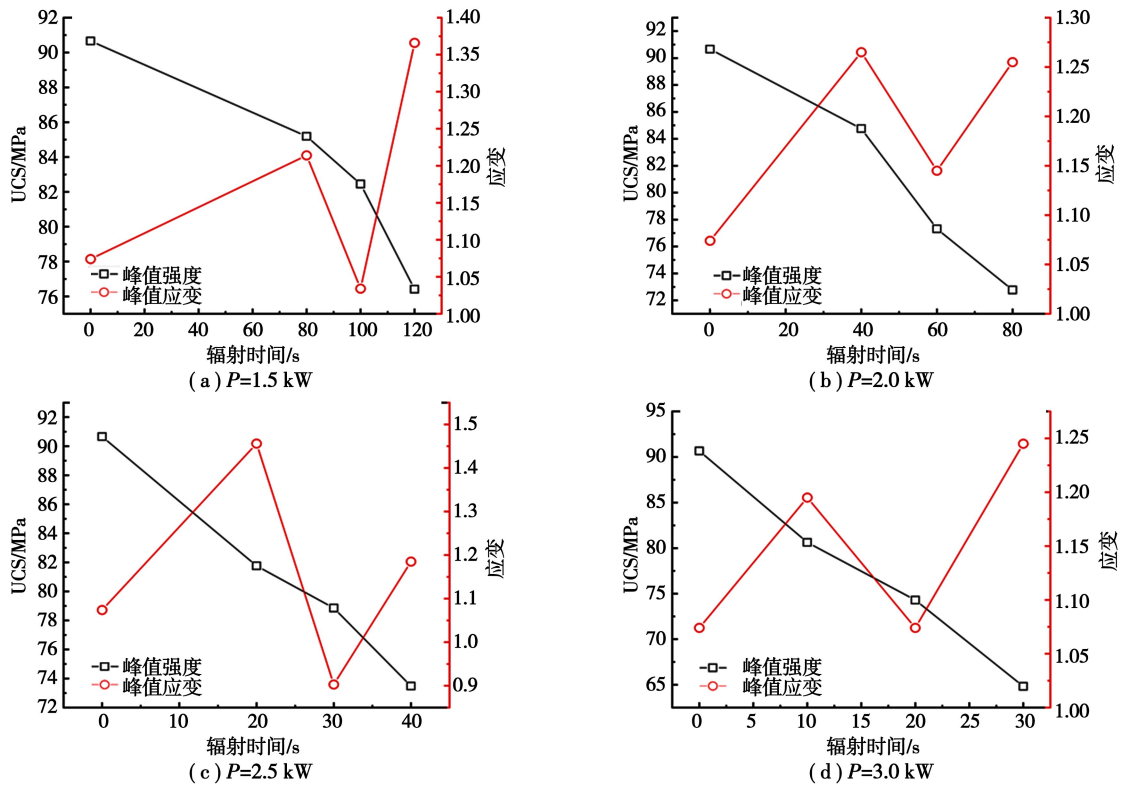


图 6 单轴抗压强度及峰值应变变化规律

Fig. 6 Variation of uniaxial compressive strength and peak strain after microwave radiation

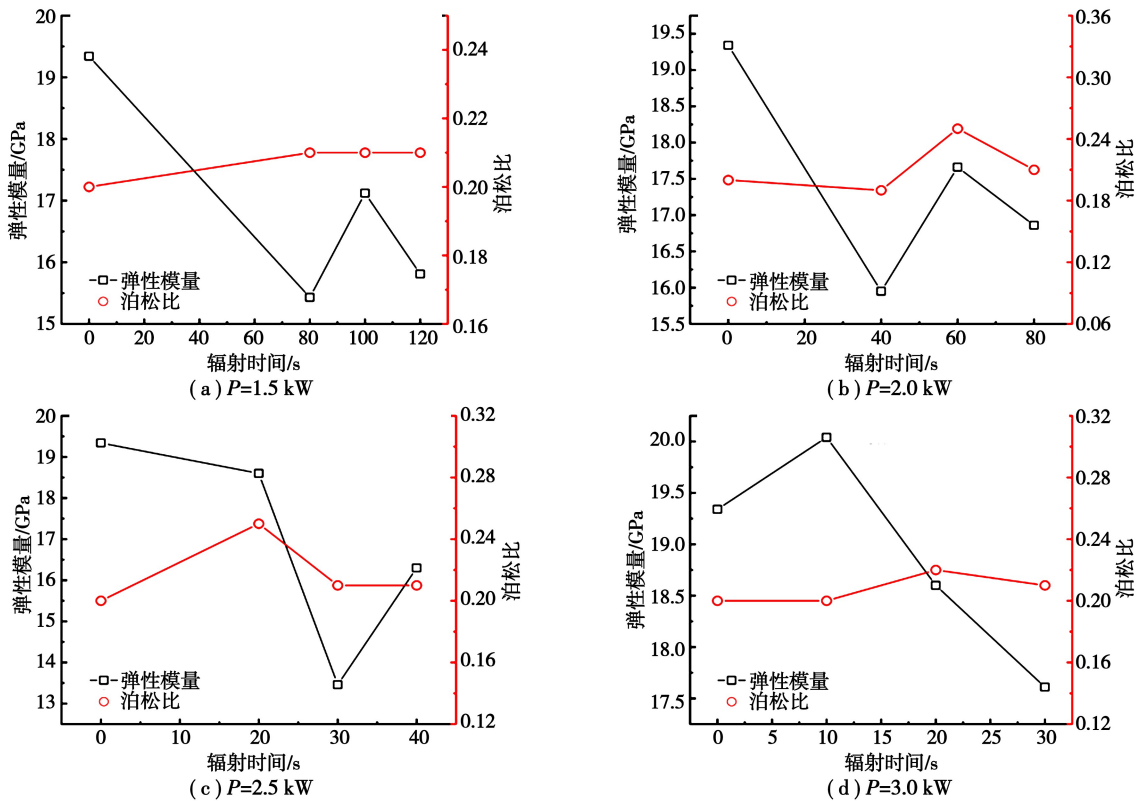


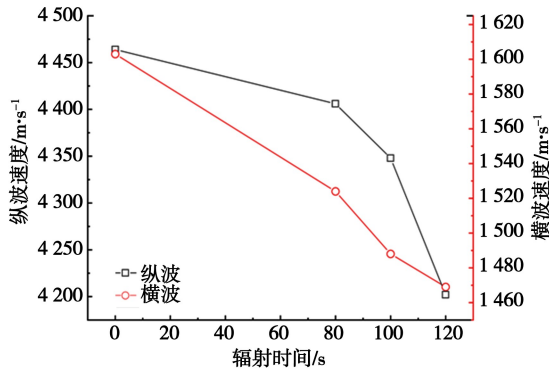
图 7 弹性模量及泊松比变化规律

Fig. 7 Variation of elastic modulus and Poisson's ratio

后,石英砂岩在 1.5、2.0、2.5 和 3.0 kW 时单轴压缩弹性模量均有不同程度的减小,而泊松比均在 0.20~0.25 范围内,无明显变化。当石英砂岩经过 1.5 kW 辐射 120 s;2.0 kW 辐射 80 s;2.5 kW 辐射 40 s;3.0 kW 辐射 30 s 后,弹性模量分别下降了 17.5%、12.8%、15.7% 和 8.9%,泊松比下降幅度较小,弹性模量与微波辐射时间关系总体呈下降趋势。

2.3 波速

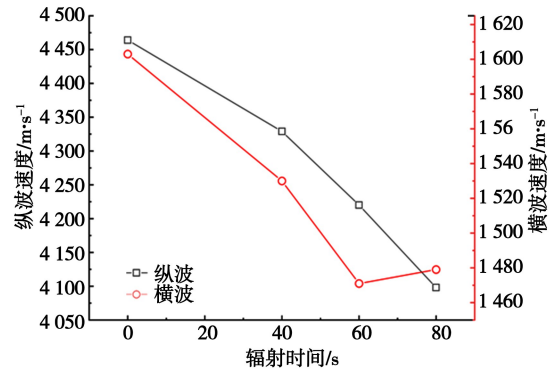
岩石的波速可以较好的反应岩石的综合物理



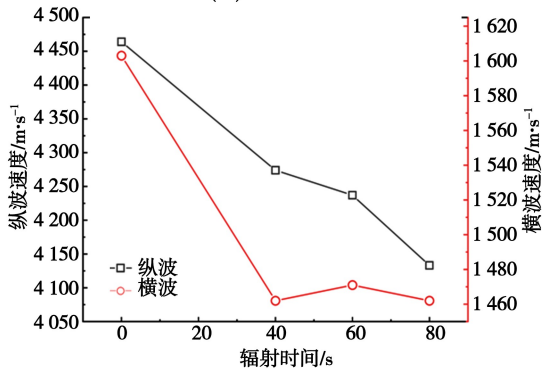
(a) $P=1.5$ kW

性质,通常被用来评价衡量岩石内部裂隙发育和损伤程度。

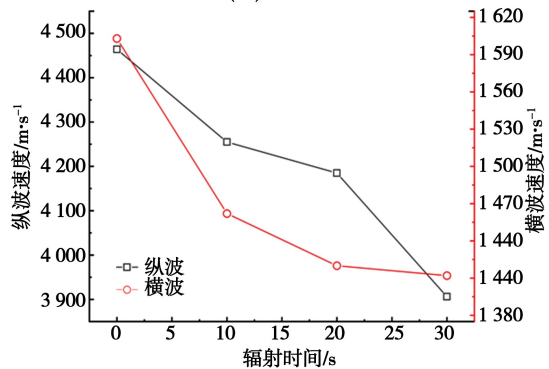
图 8 为微波辐射前后横波和纵波的变化规律,从图中可以看出在石英砂岩经过 1.5 kW 辐射 80 s、100 s、120 s;2.0 kW 辐射 40 s、60 s、80 s;2.5 kW 辐射 20 s、30 s、40 s;3.0 kW 辐射 10 s、20 s、30 s 后纵波波速分别降低了 1.3%、2.6%、5.9% 和 3%、5.5%、8.2% 和 4.3%、5.1%、7.4% 和 4.7%、6.3%、12.5%。



(b) $P=2.0$ kW



(c) $P=2.5$ kW



(d) $P=3.0$ kW

图 8 试样波速变化规律

Fig. 8 Variation of specimens' wave speed

当使用 1.5 kW 微波照射 80 s 时,纵波波速仅下降了 1.3%,可以推断此时试样损伤不大,照射 120 s 后纵波波速开始迅速衰减,可以推断试样内部出现较大损伤。横波波速经微波辐射后也呈整体下降趋势。综合分析结果表明,在同一功率微波辐射情况下,随辐射时间的增大,石英砂岩纵波波速呈近似线性下降趋势,并且辐射时间越长,波速下降速度越快,且微波辐射功率越大,波速下降越多。微波辐射导致石英砂岩产生了不同程度的结构变化,如试样内结合水蒸发形成孔隙、产生新的微观裂缝等。这也再次证明了微波辐射对石英砂岩产生了损伤弱化作用。当使用 2.5 和 3.0 kW 功率微波辐射 20、30 s 时,随微波辐射功率的增大,相同的辐射时间下纵波波速降低的幅度变大,石英砂岩试样的损伤程度逐渐加大,微波辐射时间

对试样纵波波速的弱化作用也逐渐增强。因此,与微波辐射时间相比,微波辐射功率的变化对石英砂岩试样内部结构损伤影响更大。该结论与单轴抗压强度变化分析结果一致。

2.4 动弹性模量和动泊松比

动弹性模量和动泊松比是描述材料在动态加载条件下弹性行为的重要参数,它们分别反映了材料在动态加载下的应力-应变关系和横向变形与纵向变形之间的关系。可以通过试样 P 波和 S 波进行计算。根据岩样测得的纵波波速和横波波速,按照下式可计算岩样的动弹性参数^[25]:

$$\mu_d = \frac{\left(\frac{v_{pm}}{v_{sm}}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{v_{pm}}{v_{sm}}\right)^2 - 1\right]} \quad (1)$$

$$E_d = \rho v_{pm}^2 \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: v_{pm} 为纵波波速, m/s; v_{sm} 为横波波速, m/s; μ_d 为动泊松比; E_d 为动弹性模量, MPa; ρ 为岩样密度, $g \cdot cm^{-3}$ 。

通过波速计算得到的动弹性模量和动泊松比

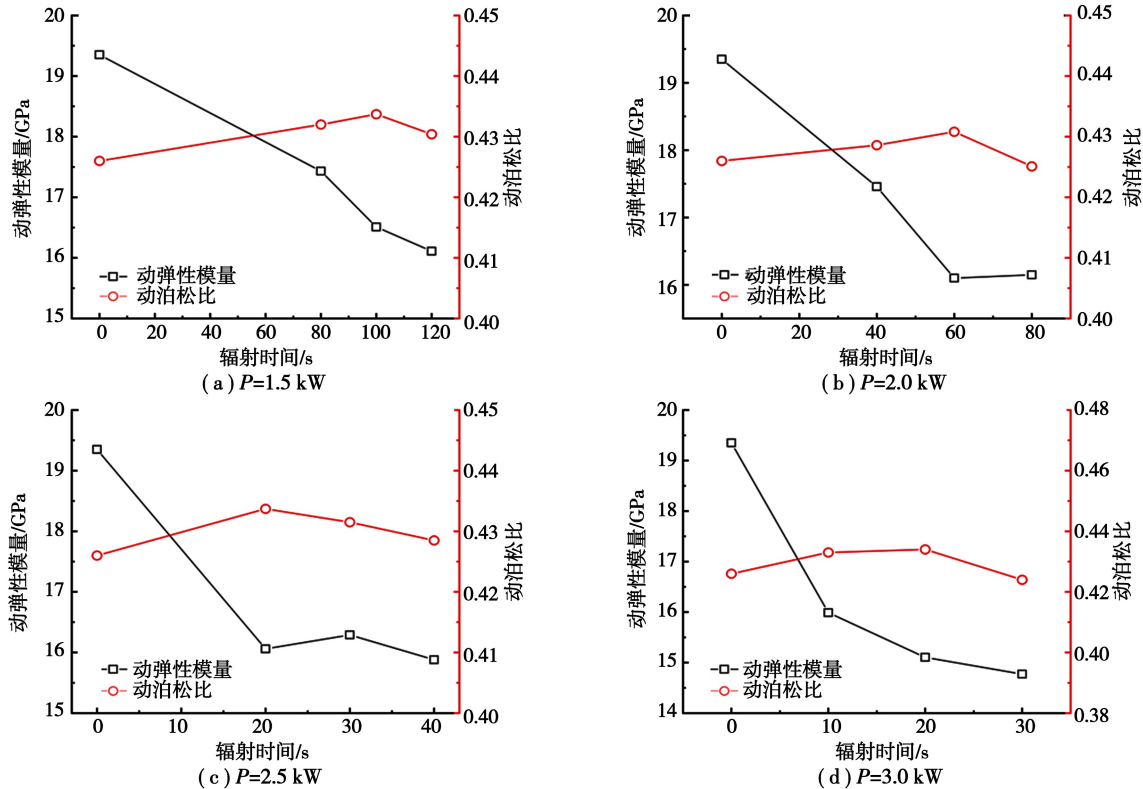


图 9 动弹性模量及动泊松比变化规律

Fig. 9 Variation regularities of dynamic elastic modulus and Poisson's ratio

2.5 损伤因子

损伤因子是用来量化岩石在微波辐射过程中所经历的损伤程度的重要参数,它不仅影响岩石的力学性能,还可以通过对岩石损伤因子进行分析,评估其力学和变形特征。可以通过岩石微波辐射前后的纵波速度来计算损伤因子 D_w , 表达式^[26]为:

$$D_w = 1 - \left(\frac{V_{PT}}{V_p} \right)^2 \quad (4)$$

式中: D_w 为基于微波辐射试验的岩石损伤因子; V_{PT} 为岩样微波辐射后的纵波速度, m/s; V_p 为原试样的纵波速度。

通过公式(4)计算得到的损伤因子 D_w 如图 10 所示。在同一功率微波辐射情况下,随辐射时间的增加,石英砂岩的损伤因子呈上升趋势,并且辐射时间越长,损伤因子上升的幅度越大;当辐射功率为 3.0 kW 时,可以看到石英砂岩的损伤因子在辐射时间为 30 s 时成倍增长,此时岩石受到的

如图 9 所示,动弹性模量随微波辐射时间增加逐渐减小,整体呈下降趋势;动泊松比变化幅度较小,基本无变化。通过波速计算得到的动弹性模量、动泊松比变化趋势和通过应力-应变曲线计算得到的弹性模量、泊松比变化趋势基本一致,这更加可以说明微波辐射对石英砂岩产生了损伤弱化作用。

损伤最大,这说明,微波辐射试验中,提高微波辐射的功率比增加微波辐射时间效果更好。

2.6 破坏模式

因此,随微波辐射功率和辐射时间的增大,经过单轴压缩后石英砂岩试样的破碎程度逐渐加剧,碎块尺寸逐渐变小,数目逐渐增加,甚至有碎屑粉末产出。破坏形式由单一的剪切破坏变为沿脆弱面进行的剪切破坏和劈裂破坏如图 11 所示。且微波辐射功率对试样破碎形态的影响占据主导作用,功率越大,试样的破碎效果越好,当微波辐射增加到一定功率后,辐射时间的影响越来越显著。这与单轴抗压强度和波速的分析结果一致。

3 细观损伤特征

为分析微波辐射后石英砂岩试样细观损伤特征,对微波辐射后的试样进行了 SEM 检测分析。通过 SEM 试验,可以从细观尺度上全方位观察微裂纹的发育程度及其形貌特征,以研究微裂纹形成

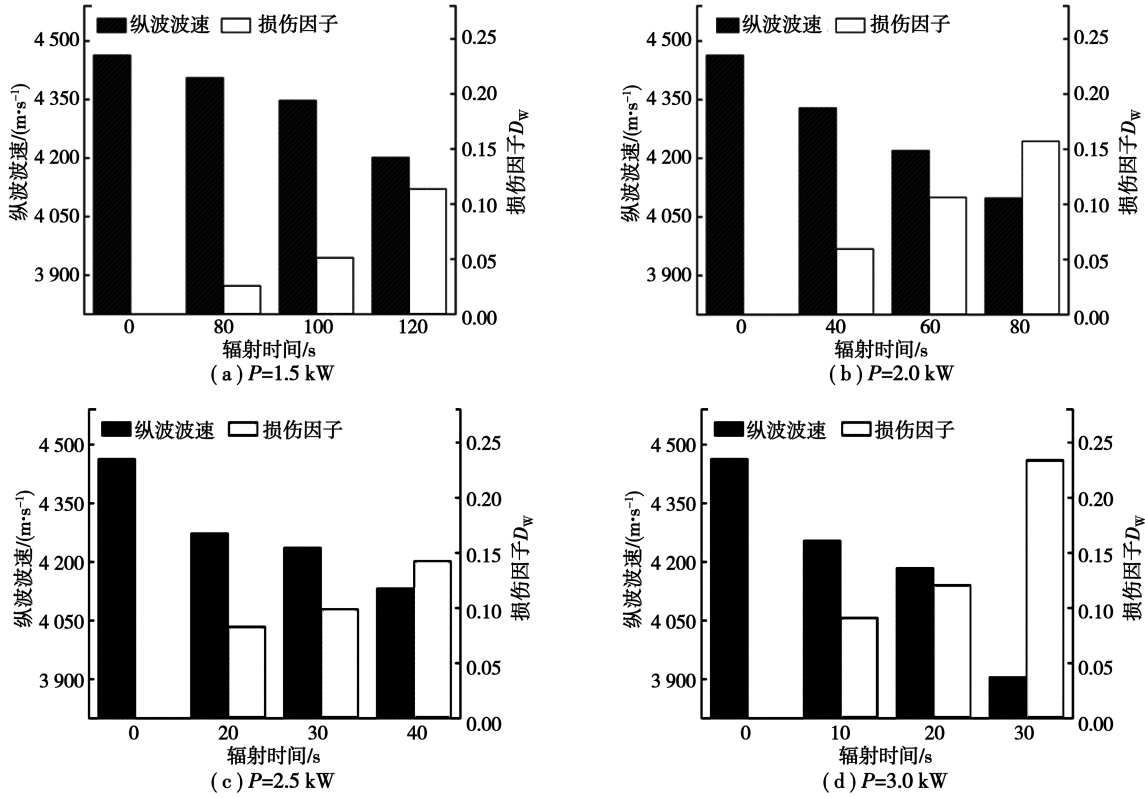


图 10 微波辐射前后纵波速度和损伤因子比较

Fig. 10 Comparison of longitudinal wave velocity and damage factor before and after microwave radiation

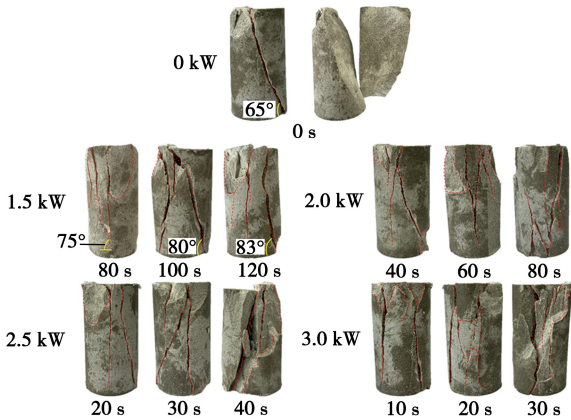


图 11 微波辐射前后石英砂岩单轴压缩破坏形态

Fig. 11 Uniaxial compression failure modes of quartz sandstone before and after microwave radiation

的类型和原因。限于篇幅,仅列举了 3.0 kW 微波辐射 10 s、20 s、30 s、40 s 后石英砂岩的 SEM 图像,并对微裂纹类型进行了标注,如图 12 所示。

由图 12(a)可知,3.0 kW 微波辐射 10 s 后,石英砂岩试样内部就出现了微裂纹,但主要裂隙仅为一条明显的沿晶裂纹;随辐射时间的增加,当辐射时间为 20 s 时,对比图 12(a)和图 12(b)可知,试样内部不论是沿晶裂纹的数量,还是裂纹的长度、宽度和深度,都有所增加,且产生了细微的晶间断裂;当辐射时间为 30s 时,如图 12(c),试样内部产

生了沿晶裂纹、晶间裂纹和穿晶断裂,且穿晶裂纹延伸扩张与沿晶裂纹连接,形成大裂纹;当辐射时间为 40 s 时,此时试样外部发生断裂,无法再进行力学试验,如图 12(d)所示,与图 12(c)对比,沿晶裂纹和穿晶裂纹的长度明显增加,宽度和深度也明显增大,且沿晶裂纹、穿晶裂纹和晶间裂纹相连接贯通,形成一个更长更深的大裂纹。

因此,在同一微波辐射功率下,辐射时间较短时,试样内部仅产生沿晶断裂或者晶间断裂;随微波辐射时间的增加,试样内部不论是裂纹的数量,还是裂纹的长度、宽度和深度,都有所增加,晶间裂纹会扩展发育为穿晶裂纹,穿晶裂纹会继续扩张延伸与其他裂纹连接贯通,形成大裂纹,最终会形成叠加裂纹,如图 13 所示;这意味着石英砂岩损伤程度随微波辐射时间的增加而逐渐增大。

为定量分析微波辐射时间对石英砂岩细观结构的影响,量化细观结构的演化特征,利用盒维数法计算表征 SEM 图像的分形维数,计算分形维数的表达式^[27]为:

$$D_B = -\lim_{\epsilon_k \rightarrow 0} \frac{\log N(k)}{\log(\epsilon_k)} \quad (5)$$

式中: D_B 为分形维数; $N(k)$ 为覆盖 k 所需盒子数; ϵ_k 为盒子边长。对已有 SEM 图像进行灰度等处理,选取合适的阈值获得二值化图像。根据

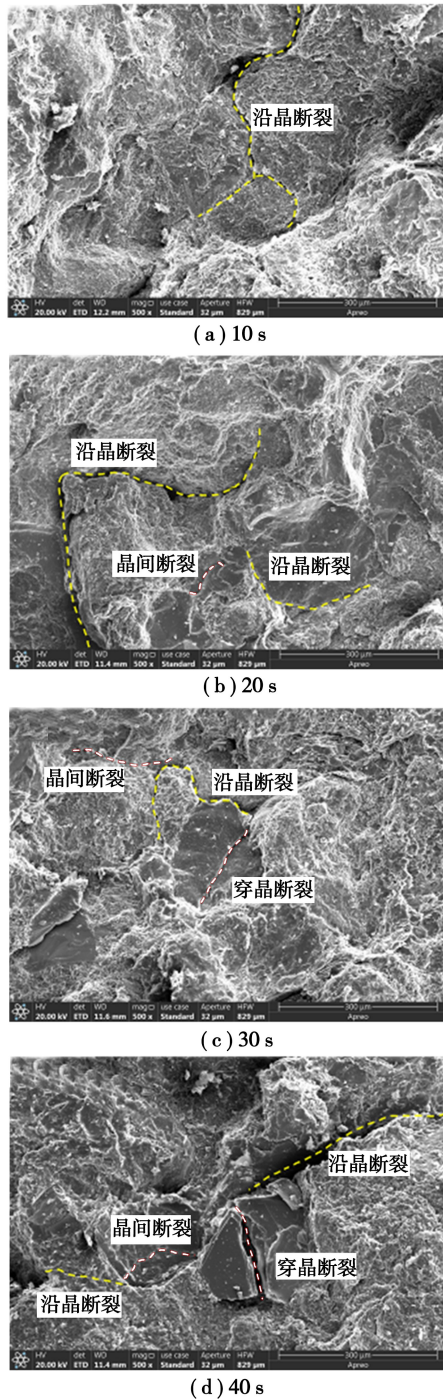


图 12 微波功率 3.0 kW 辐射不同时间后石英砂岩 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of quartz sandstone after different durations of 3.0 kW microwave radiation

式(5),得到 SEM 图像的分形维数 D 值, D 值越大说明试样微裂纹和微孔隙越发育,越小则说明试样微裂纹和微孔隙发育较少。计算得到的 3.0 kW 微波辐射 10 s、20 s、30 s、40 s 后的石英砂岩 SEM 分形维数 D 值如图 14 所示。

由图 14 可知,随微波辐射时间的增加,分形维数 D 值逐渐增大,两者呈线性相关,这说明随微波辐

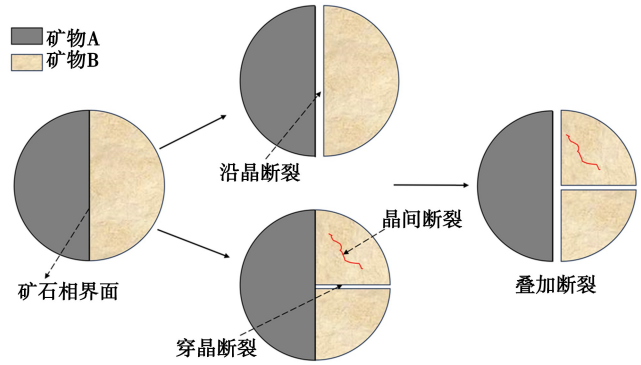


图 13 微波辐射后矿物断裂示意图

Fig. 13 Schematic diagram of mineral fracture after microwave radiation

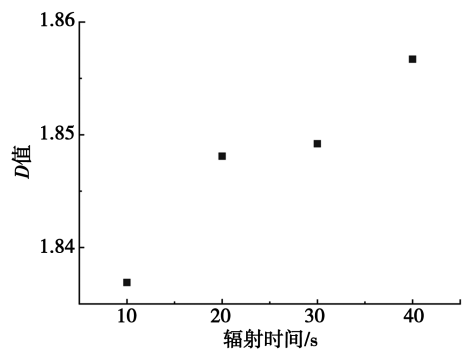


图 14 3.0 kW 微波辐射不同时间后石英砂岩 SEM 分形维数

Fig. 14 SEM fractal dimension values of quartz sandstone after different times of 3.0 kW microwave radiation

射时间的增加,由微波辐射作用产生的微裂纹逐渐增多;当辐射时间为 40 s 时, D 值增加幅度最大,此时试样已完全损坏,损伤最大,与分析结果一致。

4 结论

(1) 随微波辐射功率和辐射时间的增大,石英砂岩的单轴抗压强度和弹性模量整体呈下降趋势,同时峰值应变逐渐增加。在同一功率微波辐射情况下,随辐射时间的增大,石英砂岩单轴抗压强度呈下降趋势。微波辐射功率越高,辐射时间越长,岩石裂隙越发育,岩石强度降低越多。

(2) 随微波辐射功率和辐射时间的增大,石英砂岩的横波波速和纵波波速整体呈下降趋势,其中纵波波速呈线性相关,损伤因子呈上升趋势,并且辐射时间越长,损伤因子上升的幅度越大,与单轴抗压强度的分析结果一致。动弹性模量和动泊松比的变化趋势与静态情况下的弹性模量和泊松比一致,进一步表明微波辐射对石英砂岩产生了损伤弱化作用。

(3) 随微波辐射功率和辐射时间的增大,石英砂岩试样的破碎程度显著增加,碎块尺寸逐渐减小,数量逐渐增加,甚至会产生碎屑粉末。破坏形式从

单一的剪切破坏转变为沿脆弱面的剪切破坏和劈裂破坏。微波辐射功率对试样破碎形态的影响起主导作用,功率越大,破碎效果越显著,当微波辐射功率增加到一定程度后,辐射时间的影响变得更加显著。这与单轴抗压强度和波速的分析结果一致。

(4)SEM 图像和分形维数 D 值结果表明,随微波辐射时间的增加,试样内部裂纹的数量、长度、宽度和深度均呈增加趋势,从初始的单一裂纹逐渐演变为叠加裂纹。微波辐射能有效地通过宏观和微观裂纹对岩石产生损伤。

参考文献 (References)

- [1] 孔祥松,刘响钟,周纪军,等. 岩石工程爆破破碎的机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 118-121. (Kong Xiangsong, Liu Xiangzhong, Zhou Jijun, et al. Study on fragmentation mechanism for rock blasting engineering [J]. Mining Research and Development, 2013, 33(4): 118-121. (in Chinese))
- [2] 李夕兵,周子龙,王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望[A]//中国岩石力学与工程学会. 2009—2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告[C]. 中国科学技术出版社, 2010, 152-159. (Li Xibing, Zhou Zilong, Wang Weihua. Development status and prospect of rock crushing engineering[A]// Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. 2009-2010 Rock Mechanics and Rock Engineering Discipline Development Report [C]. China Science and Technology Press, 2010: 152-159. (in Chinese))
- [3] 刘柏禄,潘建忠,谢世勇. 岩石破碎方法的研究现状及展望[J]. 中国钨业, 2011, 26(1): 15-19. (Liu Bailu, Pan Jianzhong, Xie Shiyong. On the research development of rock fragmentation and its prospect[J]. China Tungsten Industry, 2011, 26(1): 15-19. (in Chinese))
- [4] 谢和平,高峰,周宏伟,等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程报, 2003(4): 1-9. (Xie Heping, Gao Feng, Zhou Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003(4): 1-9. (in Chinese))
- [5] 卢高明,李元辉, HASSANI Ferri, 等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1497-1506. (Lu Gaoming, Li Yuanhui, HASSANI Ferri, et al. Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1497-1506. (in Chinese))
- [6] 吴立,张时忠,林峰. 现代破岩方法综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2000(2): 49-51. (Wu Li, Zhang Shizhong, Lin Feng. Synthesizing comment on modern rock fragmentation methods [J]. Drilling Engineering, 2000(02): 49-51. (in Chinese))
- [7] Whittles D N, Kingman S W, Reddish D J. Application of numerical modelling for prediction of the influence of power density on microwave-assisted breakage [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 68(1): 71-91.
- [8] Lu G M, Li Y H, Hassani F, et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1523-1532.
- [9] 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(6): 2066-2074. (Tian Jun, Lu Gaoming, Feng Xiating, et al. Experimental study of the microwave sensitivity of main rock-forming minerals [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019(6): 2066-2074. (in Chinese))
- [10] Zheng Y, Ma Z, Zhao X, et al. Experimental Investigation on the Thermal, Mechanical and Cracking Behaviours of Three Igneous Rocks Under Microwave Treatment [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(8).
- [11] Lu G M, Feng X T, Li Y H, et al. Influence of microwave treatment on mechanical behaviour of compact basalts under different confining pressures [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 12(2): 213-222.
- [12] Zhang J, Feng X, Yang C, et al. The characteristics and mechanism of microwave-induced borehole fracturing of hard rock under true triaxial stress [J]. Engineering Geology, 2022, 306: 106768.
- [13] 刘志义,甘德清,甘泽. 微波照射后磁铁矿石动力学性能及破碎特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 126-136. (Liu Zhiyi, Gan Deqing, Gan Ze. Experimental research on the dynamic mechanical properties and breakage behaviors of magnetite caused by microwave irradiation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 126-136. (in Chinese))
- [14] Zhao Q H, Zhao X B, Zheng Y L, et al. Microwave fracturing of water-bearing sandstones: Heating characteristics and bursting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 136(3): 104495.
- [15] 戴俊,王羽亮,黄斌斌,等. 水对微波辐射下硬岩劣化效果的影响试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 691-696. (Dai Jun, Wang Yuliang, Huang Binbin, et al. Experimental Study on the Effect of Water on the Degradation of Hard Rock under Microwave Irradiation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 691-696. (in Chinese))
- [16] Feng X T, Li S P, Yang C X. The Influence of the Rotary Speed of a Microwave Applicator on Hard-Rock Fracturing Effect [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022.
- [17] Ma Z, Zheng Y, Gao M, et al. Assessing the Size

- Effect on Microwave Fracturing of Diorite Using a Dielectric-Loaded Converging Waveguide Antenna[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(8): 5677-5691.
- [18] Ma Z, Zheng Y, Li J, et al. Enhancing rock breakage efficiency by microwave fracturing: A study on antenna selection[J]. *Energy*, 2024, 288: 129876.
- [19] Hassani F, Nekoovaght P, Gharib N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1):1-15.
- [20] Ali A Y, Bradshaw S M. Bonded-particle modelling of microwave-induced damage in ore particles [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23: 780-790.
- [21] 张志强, 李铎辰, 陈方方, 等. 强吸波矿物对微波辅助破岩效果影响规律及机制研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(8): 1308-1315. (Zhang Zhiqiang, Li Huachen, Chen Fangfang, et al. Influence Law and Mechanism of Stong Wave-Assisted Rock-Breaking Effect[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(8): 1308-1315. (in Chinese))
- [22] Liang C, Guo Z, et al. Microwave-assisted breakage of basalt: A viewpoint on analyzing the thermal and mechanical behavior of rock[J]. *Energy*, 2023.
- [23] Xu T, Yuan Y, Heap M J. Microwave-assisted damage and fracturing of hard rocks and its implications for effective mineral resources recovery [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 160(1): 106663.
- [24] Yang C, Hassani F, Zhou K, et al. SPH-FEM simulations of microwave-treated basalt strength [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(6): 2003-2018.
- [25] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021. (Wu Shunchuan. *Rock mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021. (in Chinese))
- [26] Hu X, Song X, Liu Y, et al. Experiment investigation of granite damage under the high-temperature and high-pressure supercritical water condition [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 180: 289-297.
- [27] 王石, 魏美亮, 陶铁军, 等. 含 APAM 的高浓度全尾砂砂浆内部结构演化特征[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(11): 3553-3566. (Wang Shi, Wei Meiliang, Tao Tiejun, et al. Internal structure evolution characteristics of high concentration unclassified tailings mortar containing APAM[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(11): 3553-3566. (in Chinese))

(上接第 516 页)

- [17] 邓华锋, 陈天楠, 李建林, 等. 峰前卸荷损伤灰岩的再加载力学性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(6): 1301-1311. (Deng Huafeng, Chen Tiannan, Li Jianlin, et al. Reloading experimental research on the mechanical properties of limestone considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1301-1311. (in Chinese))
- [18] 魏明星, 朱永建, 任恒, 等. 三轴卸荷损伤砂岩单轴再承载力学特性及其破坏机制 [J]. *岩土力学*, 2024(10): 1-11. (Wei Mingxing, Zhu Yongjian, Ren Heng, et al. Uniaxial load-bearing mechanical characteristics and failure mechanism of triaxial unloading-damaged sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024(10): 1-11. (in Chinese))
- [19] 朱子涵, 蔚立元, 孟庆彬, 等. 峰前卸荷损伤大理岩的动静力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 747-756. (Zhu Zihan, Yu Liyuan, Meng Qingbin, et al. Experimental study on dynamic and static characteristics of marble considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 747-756. (in Chinese))
- [20] 李景龙, 朱子涵, 蔚立元, 等. 大理岩峰前卸荷损伤表征及再承载破坏耗能特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2429-2438. (Li Jinglong, Zhu Zihan, Yu Liyuan, et al. Dissipative characteristics investigation of marble during reloading process considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2429-2438. (in Chinese))
- [21] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002(6): 778-781. (You Mingqing, Hua Anzeng. Energy analysis on failure process of rock specimens [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002(6): 778-781. (in Chinese))
- [22] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(9): 1729-1740. (Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(9): 1729-1740. (in Chinese))
- [23] Mandelbrot B B, Aizenman M. Fractals: form, chance, and dimension [J]. *Physics Today*, 1979, 32(5): 65-66.
- [24] 李杰林, 刘汉文, 周科平, 等. 冻融作用下岩石微观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(2): 266-272. (Li Wenlin, Liu Hanwen, Zhou Keping, et al. An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 266-272. (in Chinese))