

微波辐射下花岗岩的断裂韧性劣化规律研究

邵珠山, 郭 轩, 袁 媛, 王维涛

(西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 微波辐射下, 岩石中矿物成分微波敏感性的差异会造成岩石内温度场的不均匀, 诱发热应力, 导致岩石的力学性能劣化, 提高破岩效率并减少能源消耗。以常见的硬岩——花岗岩为研究对象, 以矿物结构显微图像为基础, 建立二维数值模型, 探讨了微波辐射下, 矿物间温度场和应力场演化规律。实验分析了微波辐射对岩石断裂韧性的影响规律。结果表明: 微波辐射下, 矿物非均匀温度场诱发的热应力可使岩石的断裂韧性下降 28%。岩石内部应力分布状态受到矿物分布和矿物体含量的影响, 石英边界处的应力远大于长石—黑云母边界处的应力。随着加热时间的持续, 热应力可引发裂纹萌生及扩展, 造成岩石的断裂韧性随辐射时间持续下降。

关键词: 微波; 花岗岩; 矿物组成; 断裂韧性; 热应力

中图分类号: TU521

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0317-07

Deterioration law of fracture toughness of granite under microwave irradiation

SHAO Zhushan, GUO Xuan, YUAN Yuan, WANG Weitao

(School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Under microwave radiation, differences in microwave sensitivity of different minerals in rocks may cause inhomogeneous temperature field in rocks, induce thermal stress, and lead to the deterioration of rock mechanical properties, which can assist mechanical rock breaking, improve rock breaking efficiency and reduce energy consumption. In this paper, taking the common hard rock—granite as the research object, based on the microscopic image of mineral structure, established a two-dimensional model, and analyzed the evolution law of temperature field and stress field between minerals under microwave radiation. The influence of microwave on fracture toughness of rock was analyzed by experimental. The results show that the thermal stress induced by non-uniform temperature field can reduce the fracture toughness of rock by 28% under microwave radiation. The stress distribution in rock is affected by mineral distribution and mineral volume content. The stress at quartz boundary is much greater than that at feldspar-biotite boundary. With the duration of heating time, the thermal stress can cause crack initiation and expansion, resulting in the fracture toughness of the rock to continue to decline with the radiation time.

Key words: microwave irradiation; granite; mineral composition; fracture toughness; thermal stress

硬岩破碎是建筑行业及地下工程开挖等项目中的重要环节, 机械磨削是硬岩破碎过程中采用的主要技术, 但机械磨削对机械结构损耗较大, 不经济且耗时较长。因此劣化岩石性能, 提高破岩效率, 减小破岩过程中时间及能源的消耗成为硬岩破碎面临的热点问题^[1-2]。

岩石为典型的多项矿物材料, 同时含有微波敏感矿物和非敏感矿物^[3]。在微波照射下, 矿物微波敏感性的差异会使岩石内部产生不均匀温度场, 诱发热应力, 引起岩石内部裂纹的萌生及扩展^[4], 进

而导致岩石性能的劣化。因此, 微波辅助机械破岩技术成为近年来国内外广泛关注的新型破岩方法。

微波辅助破岩的热效率远远高于传统加热破岩的热效率。在微波辐射下, 岩石的力学性能可显著降低。国内外的学者针对微波辐射下岩石物理及力学性能进行了大量的实验研究, 包括微波照射下岩石强度^[5]、断裂韧性^[6,7]的变化规律, 岩石的开裂行为^[8]等等, 也探究了岩石的含水量^[9]在微波辐射下升温的差异, 以及岩石对不同微波辐射频率响应的差异^[10]等等。这些研究表明微波辐

收稿日期: 2022-01-15

修回日期: 2023-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(H872287); 中国博士后科学基金(2022M712495); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0451)

第一作者: 邵珠山(1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事微波辅助固体材料破碎方面研究。E-mail: shaozhushan@xauat.edu.cn

射热诱导岩石的裂解,降低岩石力学性能的机制依赖于矿物对微波热响应的差异^[11]。

对多种矿物在微波辐射下热现象的研究^[12]表明:不同矿物对微波的响应存在差异,即矿物介电特性的差异导致岩石在微波辐射下不能实现均匀加热,进而造成岩石损伤^[13-14]。已有研究通过分析多种矿物在微波辐射下的升温速率,揭示了微波辐射下矿物的损伤机理^[15]。但目前多数研究是通过建立两相模型分析强微波响应矿物与弱微波响应矿物间的热应力^[16],进一步分析该热应力诱发裂纹的能力;或者根据各矿物的百分占比,生成随机矿物分布模型,对微波辐射下矿物的热响应进行分析^[17]。很少有文献根据岩石内部真实的矿物结构进行热应力场研究,并且针对热应力导致的裂纹扩展及性能劣化并未进一步分析。

本文以典型硬岩——花岗岩为研究对象,根据真实的矿物结构显微图像,建立多项矿物的二维模型,模拟微波辐射下的微波敏感矿物与非敏感矿物间的不均匀温度场及应力场,分析损伤演化规律,并结合裂纹扩展实验研究分析裂纹扩展行为。用断裂韧性描述花岗岩力学性能的劣化,解释断裂韧性劣化机理,并根据断裂韧性劣化规律的实验结果完善理论分析。

1 微波加热模型

使用 COMSOL 软件,通过电磁加热、固体传热及固体力学三个模块的耦合,研究微波加热过程中矿物间的温度场、应力场以及损伤演化。

1.1 基本原理

该模型对电磁-热-应力方程进行联合求解。麦克斯韦方程用于描述电磁传播,见式(1):

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E') - \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) E = 0 \quad (1)$$

式中: μ_r 为相对磁导率; E' 为电场强度; ϵ_r 为相对介电常数; j 为虚单位; σ 为导电性; ω 为角频率; ϵ_0 为自由空间介电常数; c 为真空中的光速。

微波加热产生的热量作为热源,如式(2):

$$P_d = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E'|^2 \quad (2)$$

式中: P_d 为矿物的体积能量吸收密度; f 是微波能量的频率; ϵ'' 是为矿物的介电损耗因子。其与矿物间的传热方程相耦合,不考虑传热过程中的流体对流项,传热的能量平衡方程,如式(3):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = P_d \quad (3)$$

式中: ρ 是样本密度; C_p 为比热容; T 为温度; Q 为热源; k 为导热系数。

矿物受热膨胀,诱发热应力,其热膨胀方程见式(4):

$$E_{th} = \alpha (T - T_{ref}) \quad (4)$$

式中: E_{th} 为弹性应变张量; α 为热膨胀系数; T_{ref} 为应变参考温度(零应变温度)。

破坏准则使用莫尔-库仑准则^[17],当作用在材料中任何单元上的剪应力和正应力满足该式(5),就发生破坏。

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - c' \cos \varphi = 0 \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_3 是矿物间第一和第三主应力; c' 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

1.2 模型建立

真实的矿物结构显微图像见图 1,由石英、长石及黑云母构成。以此为基础,建立石英-长石-黑云母的多项矿物二维模型。黑云母为微波敏感矿物,石英为微波非敏感矿物,长石的微波敏感性略强于石英。矿物结构模型的生成过程见图 1,具体流程如下:

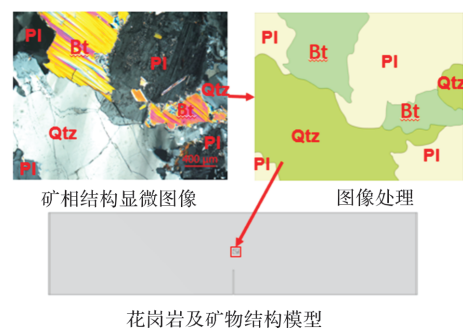


图 1 矿物结构模型 (PI: 长石, Bt: 黑云母, Qtz: 石英)

Fig. 1 Mineral structure model

(1) 使用 Image J 开源软件结合真实的花岗岩矿物结构显微图像,获取矿物的不规则边界。

(2) 使用 MATLAB 对上述矿物边界进行二值化处理,忽略矿物内部的细小裂纹,得到清晰的矿物轮廓,并将其置于 AutoCAD 中进行坐标重构。

(3) 根据实验采用的花岗岩试件的真实尺寸,建立花岗岩二维模型,将 AutoCAD 重构后的矿物轮廓导入上述花岗岩试件的中,得到多项矿物二维模型。

使用矩形波导施加微波能量,建立微波加热的二维模型。矿物的热力学等参数见表 1,其中 E_m 为杨氏模量, ν 为泊松比,其余参数表示量同 1.1 小节。

表 1 数值模型的热力学参数^[18]

Table 1 Thermodynamic parameters of the numerical model^[18]

	E_m /GPa	ν	c'	φ	$\alpha/1 \cdot K^{-1}$	$C_p /$ $J \cdot (kg \cdot K^{-1})$	$\rho /$ $kg \cdot m^{-3}$	$k /$ $W \cdot (m \cdot K^{-1})$	σ	μ_r	ϵ_r	ϵ''
花岗岩	60.0	0.25	24.2	0.52	7.0×10^{-6}	850	2 638	2.9	0	1	5.45	0.030
石英	83.1	0.07	24.2	0.52	12.1×10^{-6}	730	2 650	6.5	0	1	4.72	0.014
长石	56.4	0.32	24.2	0.52	3.7×10^{-6}	650	2 630	2.0	0	1	5.62	0.039
黑云母	17.2	0.36	24.2	0.52	8.3×10^{-6}	760	2 800	3.0	0	1	7.48	0.456

2 实验

实验采用图 2(d)所示尺寸的花岗岩试件, 与数值模拟采用的花岗岩试件尺寸一致, 均为单直边裂纹三点弯曲梁试样. 单直边裂纹深度为 12 mm. 试件分为 6 组每组 3 个, 共 18 个. 采用频率为 2.45 GHz 的工业微波炉进行微波辐射实验. 选用 5 kW 的照射功率, 照射时间分别设置为 0、6、12、18、24 和 30 min, 记录微波辐射过程中试件表面的升温, 并对微波辐射后的试件进行三点弯曲实验. 实验试件及设备见图 2.

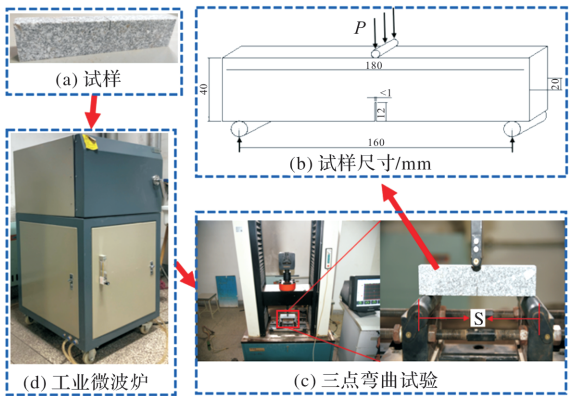


图 2 实验试件及设备

Fig. 2 Experimental sample and equipment

3 结果分析与讨论

3.1 矿物内部及边界处温度场演化

微波辐射下, 矿物温度梯度的演化过程见图 3. 在微波加热初期, 各矿物间无明显的温度梯度, 随着加热时间的延长, 不同矿物间的温度梯度逐渐增大.

温度梯度的分布与矿物的种类及体积含量有关, 温度梯度较大值点均位于矿物边界处, 这是不同矿物的介电特性以及传热系数的差异造成的. 在加热时间达到 30 s 时, 温度梯度的最大值点出现在石英和狭窄长石接触的边界上. 持续加热, 黑云母周边的温度梯度开始变大, 最大值点出现在黑云母的边界上. 这是由于长石的介电损耗因子比石英高一个数量级, 短暂加热后, 长石在电

场的影响下升温虽低于黑云母, 但高于石英, 而长石的传热系数小于黑云母, 所以短时间内温度在小面积的长石内部积累, 还没通过热传导传递给石英. 故加热初期, 石英和小面积长石接触的边界上温度梯度较高. 随着加热时间的延长, 矿物间的传导热通量稳定时, 黑云母依靠较大的介电损耗因子, 获得最大的温度, 与石英和长石形成温差, 进而黑云母周边的温度梯度开始变大.

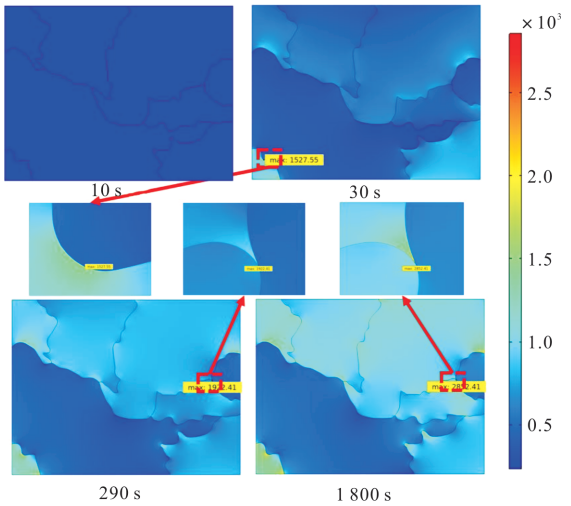


图 3 微波辐射下矿物间的温度梯度

Fig. 3 Temperature gradients between minerals under microwave irradiation

为量化微波场下各矿物及其边界处的热响应, 在矿物模型上选取一条同时涵盖长石-石英、石英-黑云母和黑云母-长石边界的测线(图 4(a)), 在测线上各矿物内部选取一个矿物点(图 4(b)), 绘制测线及矿物点的温度梯度随时间的变化曲线.

从图 4(a)可以看出, 微波辐射下, 矿物各点的温度梯度不同且矿物边界处存在较大的温度梯度值. 在 721 s 后, 各点的温度梯度值基本稳定. 这是因为随着微波辐射时间的延长, 各矿物间的热传导更加充分, 矿物间的温度梯度不再受微波辐射时间的影响. 微波辐射下, 矿物点的温梯度的先急速上升后趋于稳定(图 4(b)), 且长石和黑云母的温度梯度值相近, 约为石英矿物的两倍. 这是由于石英矿物对微波的敏感性最差, 在微波

辐射下响应较差。

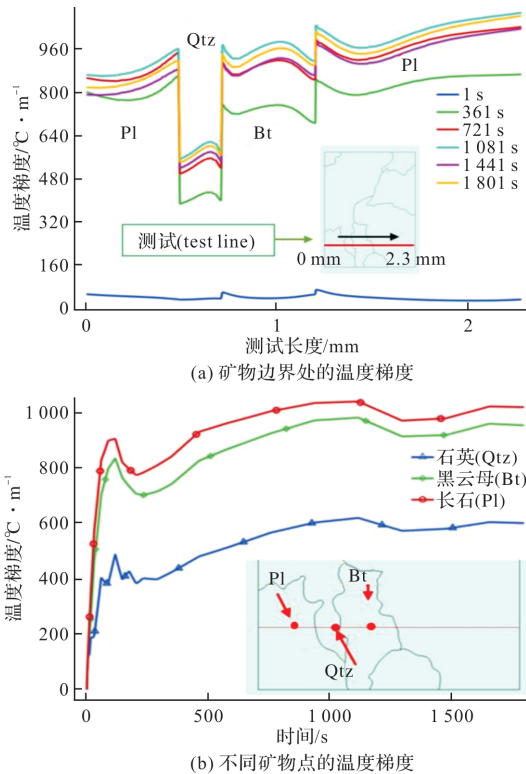


图4 矿物及边界处温度梯度的阶跃变化

Fig. 4 Step change of temperature gradient at mineral interface

3.2 矿物内部及边界处应力场演化

图5为微波辐射20 s后的冯米塞斯应力图。可以发现,石英边界周边的等效应力较大。狭长分布的石英晶体边界处的等效应力最大值达到了11.43 MPa,而此时黑云母和长石边界附近的等效应力仅在3 MPa以下,约为石英边界处等效应力最大值的1/4。可见不同矿物边界处等效应力存在显著差异。此外,在大量石英分布区域处,应力极小,可见损伤的发生不仅与矿物的性质有关,还与矿物分布的面积密切相关。同种矿物,狭窄面积处更易发生损伤。

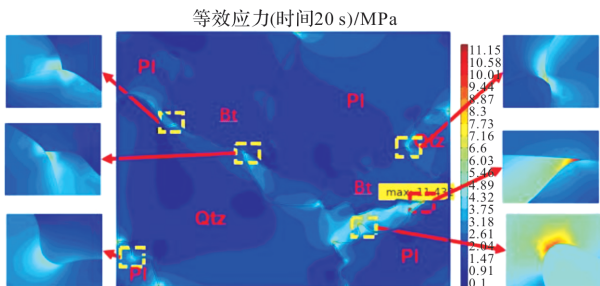


图5 微波辐射下矿物间的应力场

Fig. 5 Stress field between minerals under microwave irradiation

从图5中高应力处的放大图可以看出,高应力区主要分布在石英和长石内部。黑云母内部的应

力值较低,这是由于黑云母的弹性模量比石英和长石小很多,在相同的应变下,弹性模量越小,产生的应力越小。因此,即使黑云母的温度较高,产生的热膨胀略大,但内部的应力却比长石和石英小。可见矿物间的应力的发生不仅取决于温度梯度,也与矿物的弹性模量也有关。

为量化微波场下各矿物及边界处的应力变化,在矿物模型上选取一条测线及三个测点,见图6。可见微波加热时间越长,热应力越大,对岩石造成的损伤也就越大。从图6(a)可以看出,随着加热时间的延长,矿物边界处的应力差值会增大,将更有利于矿物的分离。石英与黑云母边界处的应力增长最快,石英与长石的边界处的应力增长次之。这与矿物的吸波性能及膨胀系数有关。从图6(b)可以看出,石英矿物中应力的生长速度远高于长石和黑云母,根据第四强度理论,当某一矿物的冯米塞斯应力大于其屈服应力时,认为该矿物进入塑性状态,有裂纹的萌生和扩展。由此可以判断石英矿物优先进入塑性阶段,石英与长石边界处优先发生损伤。

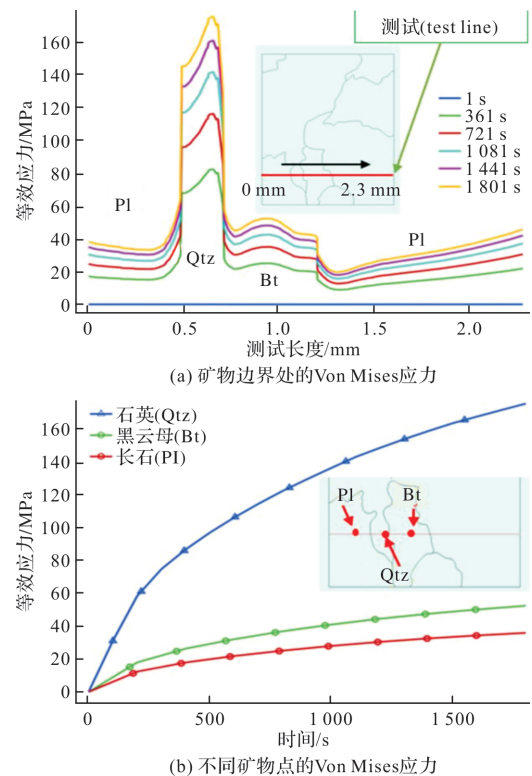


图6 矿物交界面处 von Mises 应力的阶跃变化

Fig. 6 Step change of von Mises stress at mineral interface

3.3 矿物内部及边界处损伤演化

使用摩尔库伦准则判断矿物的损伤破坏,当作用在矿物中任何位置处的剪应力和正应力满足式(5),就认为其发生破坏。在此准则下绘制了图7所示微波辐射下矿物模型的损伤演变规律图,其

中红色代表已经损伤区域. 可见矿物破坏优先发生在矿物的边界处. 在微波加热 90 s 时, 石英的边界附近优先发生损伤, 随后损伤开始在石英矿物的狭长区域及边界处发育. 随着微波加热时间的不断延长, 矿物的损伤面积逐渐扩大.

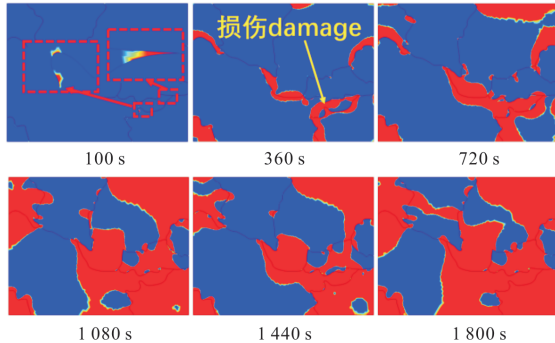


图7 矿物模型的损伤演变

Fig. 7 Damage evolution of mineral model

对照图 8 中不同微波辐射时间(0, 6, 12, 18, 24, 30 min)下岩石的 SEM 图像, 可以发现, 随着微波辐射时间的延长, 矿物的损伤破碎程度在不断增加, 与图 7 中的矿物随时间的演化规律一致.

对比图 8 中的图片, 可以看出矿物裂纹的密度和宽度都会随着加热时长的延长而增多.

图 8(b) 中的裂纹相对图 8(a) 有一定的闭合. 短时间加热后, 试件的强度可能有小幅上升. 短期荷载可使得微观结构(裂缝和孔隙)改变.

图 8(a) 中没有大面积的条纹花样(图中单向箭头所指区域), 随着微波辐射时间的延长, 条纹花样的面积明显扩大, 试件发生塑性形变, 也表明矿物发生损伤. 微波辐射时间为 30 min 时, 条纹花样面积减少是由于试件内部微裂纹增多, 导致条

纹花样不再清晰.

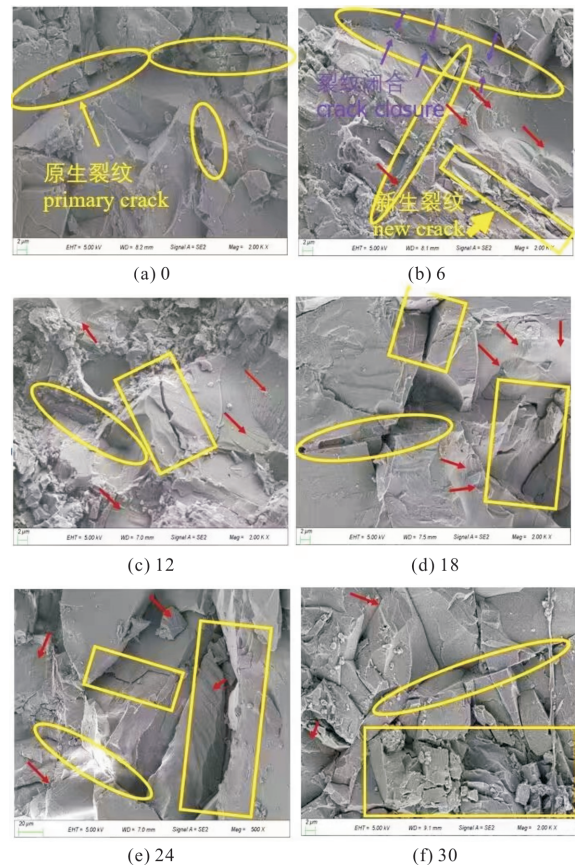


图8 试件断裂处的微观形貌(微波辐射时间(min))

Fig. 8 The microscopic morphology of the specimen fracture (time of microwave irradiation(min))

3.4 岩石断裂韧性劣化规律

断裂行为对脆性材料性能劣化评价具有重要意义^[19-20], 反映了材料容纳应力场的能力. 采用公式(6)计算微波辐射后花岗岩的断裂韧度^[20]:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}}{BW^{\frac{3}{2}} \left[2.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - 4.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + 21.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - 37.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + 38.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \right]} \quad (6)$$

式中: P_{\max} 为试件峰值载荷, W 、 B 分别为试件的宽度和厚度, a 为预制切口长度. 图 9 为试件断裂韧度的折线图.

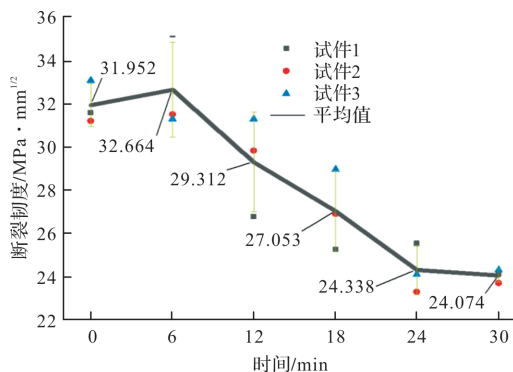


图9 微波辐射后试件断裂韧性的变化

Fig. 9 Fracture toughness of specimens after microwave irradiation

可见, 在微波辐射下, 试件的断裂韧性小幅度增加后持续下降. 这是由于经过 6 min 微波辐射后, 各矿物间热膨胀变形导致部分初始裂纹发生闭合, 由图 8(b) 也可以看出 6 min 时岩石结构相对初始状态更加致密. 当微波辐射时间达到 24 min 时, 试件断裂韧性趋于稳定. 在微波加热时间为 24 min 时, 试件断裂韧度最小为 23.31 MPa \times mm^{1/2}, 低于未经过微波辐射试件断裂韧度均值的 27.96%. 可见, 此时试件虽然未发生明显的宏观破坏, 但是试件内部已产生较大程度的损伤.

4 结论

基于岩石真实矿物结构建立数值模型,分析了在微波辐射下岩石内温度场和应力场的演化规律,并结合岩石断裂韧性劣化实验,分析了微波辐射时间对岩石断裂韧性的影响,得出以下结论:

(1) 微波辐射下,在花岗岩试件发生宏观破坏前,断裂韧性下降将近 28%。当照射时间较少时(≤ 6 min),矿物热膨胀会使部分初始裂纹闭合,导致岩石结构更加致密,使其断裂韧性小幅上升。随后持续增加照射时间,岩石断裂韧性则持续下降;

(2) 微波辐射下,同一矿物不同边界的应力有很大差别,在狭长边界上易出现应力集中。石英(微波非敏感矿物)的边界处的应力大于黑云母-长石(微波较敏感矿物)边界处的应力。受弹性模量的影响,黑云母内部的应力最小,长石和石英会优先发生损伤;

(3) 微波辐射下,花岗岩的升温速率随着照射时间的增加而减小。各矿物间的温度梯度在照射初期随时间增大而增大,到达一定程度后则进入相对稳定状态。

参考文献 References

- [1] 邵珠山,魏玮,陈文文,等.微波加热岩石与混凝土的研究进展与工程应用[J].工程力学,2020,37(5):140-155,165.
SHAO Zhushan, WEI Wei, CHEN Wenwen, et al. Research progress and industrial applications of microwave heating processing on rock and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5): 140-155, 165.
- [2] 杨兆中,朱静怡,李小刚,等.微波辐射用于处理和开采岩石的研究进展[J].科学技术与工程,2019,19(5):1-7.
YANG Zhaozhong, ZHU Jingyi, LI Xiaogang, et al. Progress in Researches on Microwave Irradiation on Rocks for Treatment and Exploitation[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 1-7.
- [3] LI Xing, WANG Shuai, XU Ying, et al. Effect of microwave irradiation on dynamic mode-I fracture parameters of Barre granite[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 224: 106748.
- [4] FERRI Hassani, PEJMAN M. Nekoovaght, NIMA Gharib. 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.
- [5] LI Qiang, LI Xibing, YIN Tubing. Effect of microwave heating on fracture behavior of granite: An experimental investigation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021.
- [6] GE Zhenlong, SUN Qiang, XUE Lei, et al. The influence of microwave treatment on the mode I fracture toughness of granite[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 249(1-4): 107768.
- [7] 卢高明,李辉,刘粲,等.微波作用下水分对岩石波速和强度的影响[J].中国科技论文,2019,14(9):1015-1021.
LU Gaoming, LI Hui, LIU Can, et al. Influence of moisture on wave velocity and strength of rocks under microwave irradiation[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(9): 1015-1021.
- [8] ZHENG Yanlong, MA Zhongjun, ZHAO Xiaobao, 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): 3657-3671.
- [9] 周科平,薛轲,刘涛影.微波作用下砂岩孔隙结构演化及强度劣化的试验研究[J].矿冶工程,2020,40(2):6-11.
ZHOU Keping, XUE Ke LIU Taoying. Pore structure evolution and strength degradation of sandstone after microwave treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2): 6-11.
- [10] 王修昌,赵连敏,吴大俊,等.4.6GHz高功率微波岩石钻探技术[J].科学技术与工程,2021,21(22):9404-9410.
WANG Xiuchang, ZHAO Lianmin, WU Dajun, et al. 4.6 GHz high power microwave rock drilling technology[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9404-9410.
- [11] 陈方方,祁培培,张志强.三角形矿物尖锐程度对微波照射岩石效果的影响[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):390-397,438.
CHEN Fangfang, QI Peipei, ZHANG Zhiqiang. Influence of triangle mineral sharpness on microwave irradiation effect on rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 390-397, 438.
- [12] 赵沁华,赵晓豹,郑彦龙,等.微波照射下矿物升温特性与岩石弱化效果研究综述[J].高校地质学报,2020,26

- (3):350-360.
- ZHAO Qinhu, ZHAO Xiaobao, ZHENG Yanlong, et al. A review on mineral heating characteristics and rock weakening effect under microwave irradiation[J]. Geological Journal of China Universities, 2020, 26(3):350-360.
- [13] 袁媛, 邵珠山. 微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂过程研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2112-2119, 2327-2328.
- YUAN Yuan, SHAO Zhushan. Research on the criteria of crack propagation and the process of fracture in brittle rocks under microwave irradiation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 2112-2119, 2327-2328.
- [14] 朱清耀, 戴俊, 负菲菲, 等. 微波照射后花岗岩动力响应及破碎特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1):60-72.
- ZHU Qingyao, DAI Jun, YUN Feifei, et al. Dynamic response and fracture characteristics of granite under microwave irradiation[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2022, 4(1):60-72.
- [15] YUAN Yuan, SHAO Zhushan, QIAO Rujia Fracture behavior of concrete coarse aggregates under microwave irradiation influenced by mineral components[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286(2):122944.
- [16] WEI Wei, SHAO Zhushan, CHEN Wenwen, et al. Heating process and damage evolution of microwave absorption and transparency materials under microwave irradiation[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 7(3):1-17.
- [17] MICHAEL Toifl, PHILIPP Hartlieb, RONALD Meissels, et al. Numerical study of the influence of irradiation parameters on the microwave-induced stresses in granite[J]. Minerals Engineering, 2017, 103:103-104.
- [18] 张国军, 张勇. 基于摩尔-库伦准则的岩石材料加(卸)载分区破坏特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1049-1058.
- ZHANG Guojun, ZHANG Yong. Partition failure characteristics of rock material loading and unloading based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4):1049-1058.
- [19] ALY Abdelaziz, ZHAO Qi, GIOVANNI Grasselli. Grain based modelling of rocks using the combined finite-discrete element method [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103:73-81.
- [20] 卢浩, 冯夏庭, 杨成祥, 等. 不同预制裂缝方法及长度对岩石三点弯曲试验的影响[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1115-1125.
- LU Hao, FENG Xiating, YANG Chengxiang, et al. Effect of different notch prefabrication methods and notch lengths on rock three-point bending test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4):1115-1125.
- [21] 满轲, 刘晓丽, 宋志飞, 等. 岩石静态与动态断裂韧性的宏观试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8):799-808.
- MAN Ke, LIU Xiaoli, SONG Zhifei, et al. Macro-micro experimental study of rock static and dynamic fracture toughness [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8):799-808.

(编辑 吴海西 沈 波)