

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.013

微波照射路径对辅助破岩效果的影响研究

陈方方¹, 王超¹, 张志强²

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 从能量输入大小和快慢的角度来看,微波照射功率对微波辅助破岩效果有着显著影响。本文采用功率“先低后高”和“先高后低”两种微波照射方式,基于微波照射功率和时长,设计不同的微波照射路径,以 COMSOL 多物理场耦合软件为分析平台,选择伟晶岩试样为研究对象,研究在一定能量输入条件下,不同微波照射路径对微波辅助破岩效果的影响。研究表明:微波照射伟晶岩试样产生的塑性区面积最大的矿物是绿泥石,其次是斜长石和正长石;在伟晶岩试样中,采用“先低后高”的照射方式比“先高后低”的照射方式能产生更高的温度、应力以及更大的塑性区面积,破岩效果更好。

关键词: 微波辅助破岩; 照射路径; 温度场; 应力场; 塑性区

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)02-0245-08

Study of the effect of microwave irradiation path on the effectiveness of assisting rock breaking

CHEN Fangfang¹, WANG Chao¹, ZHANG Zhiqiang²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: From the perspective of the size and speed of energy input, the microwave irradiation power has a significant effect on the effect of microwave assisted rock breaking. This paper proposes two types of microwave irradiation methods: "low first, then high" and "high first, then low" and designs different microwave irradiation paths based on microwave irradiation power and duration. Applying COMSOL multi-physics field coupling software as the analysis platform, pegmatite was selected as the research object by which to study the influence of different microwave irradiation paths on the microwave assisted rock breaking effect under certain energy input conditions. Research shows that: the mineral of pegmatite specimens to produce the largest plastic zone area under microwave irradiation is chlorite, followed by plagioclase and orthoclase; using the "low first, then high" irradiation method can produce higher temperature, stress and larger plastic zone area than that by the "high first, then low" irradiation method in pegmatite specimens, with the irradiation effect on pegmatite being more significant.

Key words: microwave assisted rock breaking; irradiation path; temperature field; stress field; plastic zone

收稿日期: 2021-09-09; **网络出版日期:** 2022-03-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220306.1055.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11872301);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JM-453);陕西省教育厅科研计划资助项目(17JS091);西安市城建专项资金支持项目(SJW2017-14)

通信作者: 陈方方,女,硕士,副教授,研究方向为岩石力学理论与计算方法、地下工程反分析理论与实践等。E-mail: chenff@xust.edu.cn

微波辅助破岩^[1-2]是一种新型辅助破岩技术,即采用微波照射岩石,对其进行预先弱化,再通过机械钻进手段达到破碎岩石的目的,该技术,对解决坚硬岩石难以破碎问题有显著效果。国内外一些学者通过物理实验和数值模拟等方法,对微波弱化岩石的机理^[3-5]和影响因素进行了相关研究,并取得了一定成果,如岩石含水率^[6]、冷却方式^[7]、矿物粒径^[8]、矿物种类^[9]、矿物形状^[9-10]、矿物含量^[11-12]等。

微波照射岩石时,采用不同照射参数对岩石有不同的弱化效果。恒定功率照射是目前微波辅助破岩研究采用的主要照射方式,目前已有部分学者对微波功率、照射时长开展了一定的研究。Lu 等^[13]在不同功率水平下,于多模态腔(微波腔)中对玄武岩试样进行微波加热,通过单轴压缩、巴西劈裂和点载荷强度试验,得到岩石的强度随微波照射时间的增加而降低,其强度降低速率与微波功率水平呈正相关。文献^{[14]~[16]}对微波加热花岗岩的断裂特性进行了室内试验研究,研究表明,花岗岩试样表面温度随加热时间的增加呈线性增加;微波功率的增加有助于升温速率的提高。戴俊等^[4]同样对花岗岩进行了微波照射试验,结果表明,不同照射时间下,微波照射功率对花岗岩试件的弹性模量影响显著。Hong 等^[17]以及 Ali 和 Bradshaw^[18]通过数值模拟得到了不同微波条件下岩石内部的应力和裂隙发育情况,研究发现,功率和时间的增加都将提高不同敏感性矿物间的温度梯度,产生更大的热应力,进而造成更多的裂纹和破坏;然而对于一定微波功率,当照射时间过长时,矿物间的热传导较为充分,矿物间的温度梯度和热应力随着时间的增长而下降,从而使强度下降的幅度显著降低。文献^{[19]~[21]}对微波照射前后的岩石进行了冲击破碎试验,结果显示,高功率照射能在短时间内对岩石造成更大的损伤。卢高明等^[22]对玄武岩试样进行了 3 种加热路径下(低功率连续加热、高功率连续加热、高功率间断加热)的微波辐射试验,结果表明,当试样内产生的热应力超过岩石的强度极限时,试样会崩开破坏;当试样温度先达到岩石熔点时,试样以熔化为

主。现有的微波辅助破岩研究多采用恒定功率照射,而微波照射功率和时长的变化会对岩石内部热应力、温度梯度以及裂纹扩展产生显著影响。考虑微波辅助破岩技术应用于实际工程时的情形,当采用恒定功率照射时,如果微波照射功率偏低,随照射时间的增加,岩石内部热传导逐渐充分,温度梯度和岩石内部热应力产生速率逐渐减缓,从而导致微波对岩石的弱化效果降低。如果微波照射功率偏高,

岩石可能先到达其熔点而发生熔化现象。而采用不同的微波照射路径可以控制照射前后岩石内部的升温速率,从而更好地控制微波对岩石的弱化程度,但关于不同照射路径下,微波照射对岩石弱化效果的研究鲜见报道。因此,本文针对微波照射路径研究的不足,提出由不同微波功率和时长组合形成“先低后高”和“先高后低”两种微波照射方式,再通过设计不同的微波照射路径方案,并基于 COMSOL 多物理场分析平台,分析不同微波照射路径下伟晶岩试样的电磁场、温度场、应力场以及塑性区的变化,研究“先低后高”和“先高后低”两种微波照射方式下,不同微波照射路径对岩石弱化效果的影响规律,通过对其弱化过程和机理进行分析,发现对伟晶岩试样采用功率“先低后高”的照射方式能产生更为显著的照射效果,可为后期的工程应用提供科学依据。

1 电磁-热-力分析模型

1.1 基本原理

运用麦克斯韦方程模拟电磁波的传播:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_0 \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

式中: $\nabla \times$ 为旋度算子; μ_r 为磁导率; \mathbf{E} 为电磁场, V/m; k_0 为在真空中的波数, rad/m; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为介质的相对介电常数; ω 为角频率, rad/s; σ 为电导率, S/m。其中 k_0 为:

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} \quad (2)$$

式中: c_0 为真空中的光速,取 3.0×10^8 m/s。

按照傅里叶能量平衡方程,电磁场与传热场耦合的过程可表示为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中: ρ 为介质的密度, kg/m³; C_p 为介质的比热容, J/(kg · K); T 为瞬时温度; t 为时间, s; \mathbf{u} 为速度矢量,本模型中未考虑空气的流动及模型的运动,故 $\mathbf{u} = 0$; k 为介质的热导率, W/(m · K); Q 是电磁场热源。

岩石边界与空气发生对流换热,热对流方程为:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h \cdot (T_1 - T) \quad (4)$$

式中: $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿法向边界的热梯度; h 为试样与空气的传热系数,取 10 W/(m² · K); T_1 为模拟时的初始温度,取 20°C 。

文中各矿物假设为各向同性材料,采用弹塑性本构关系,塑性准则为莫尔库伦准则,则有:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left(c \cdot \text{ctg}\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \sin\varphi \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为矿物内部的第一、第三主应力; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角。

1.2 数值分析模型

微波波导采用国际标准 WR340 型号, 端口宽度 86.36 mm, 腔体尺寸为 500 mm × 350 mm, 如图 1 所示。岩石试样采用文献[23]所得的岩石细观结构, 其轮廓特征如图 2(a) 所示。该试样由石英、正长石、斜长石和绿泥石四种矿物组成, 如图 2(b) 所示。各种矿物的电磁、热学及力学参数如表 1 所示。不考虑相关参数在升温过程中的变化。

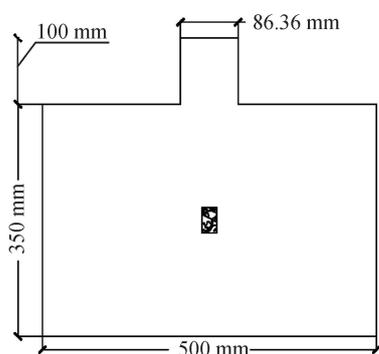


图 1 微波加热矿物模型

Fig. 1 Microwave heating mineral model

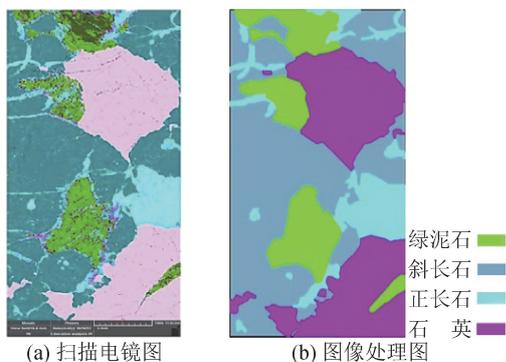


图 2 试样扫描电镜及图像处理图

Fig. 2 SEM image and image processing of specimens

对矿物薄片进行处理, 提取薄片中心矿物形状几何部分, 如图 3 所示。然后将提取出的矿物形状几何图导入 COMSOL 进行建模。矿物的几何尺寸与矿物电镜扫描薄片相同, 矩形截面尺寸为 8.64 mm × 11.94 mm。

研究发现, 微波腔体中心处电场强度最大, 故将试样放置于微波腔体中心进行研究, 如图 1 所示。为了模拟照射过程中试样的自由膨胀, 采用如图 3 所示的边界条件, 以便与微波照射物理实验保持一致。

表 1 矿物成分及性能参数表^[23]

Tab. 1 Mineral composition and properties^[23]

性能参数	绿泥石	石英	斜长石	正长石
相对介电常数(实部)	8.63	4.72	5.65	2.55
介质损耗角/rad	4.46×10^{-4}	1.88×10^{-4}	3×10^{-3}	4.7×10^{-5}
恒压热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	600	730	650	628
热膨胀系数/ (10^{-6})	11.1	12.1	3.7	3.6
热导率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	5.25	6.5	2	2.31
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 000	2 650	2 630	2 560
杨氏模量/GPa	38.9	95	70	85
泊松比	0.2	0.07	0.35	0.31
粘聚力/MPa	25	55	30	35
内摩擦角/rad	0.52	0.82	0.66	0.61



图 3 岩石试样计算模型

Fig. 3 Calculation model for rock specimen

1.3 试验方案

本试验中, 微波照射功率按照“先高后低”和“先低后高”两种方式进行设置, 在这两种方式下, 将不同微波功率和照射时长进行组合, 形成 6 种照射路径, 具体组合方式如图 4 所示, 各路径总能量保持相同。照射路径 1 为恒定功率照射, 采用 2 kW 照射 180 s; 照射路径 2~7 为不同功率组合的微波照射路径。

图 4 中, 路径 2、4、6 为“先低后高”的照射方式, 路径 3、5、7 为“先高后低”的照射方式。6 种微波照射路径的区别在于微波功率的组合数和组合顺序不同。

2 试验结果与讨论

2.1 电磁场分析

为保证分析结果的可比性, 试样应处于较为均匀的电场中。图 5 为采用照射路径 4 时, 试样处于微波腔体中心时的电场分布云图。其中图 5(a) 为微波腔体内部电场分布云图, 图 5(b) 为试样电场分布放大云图。

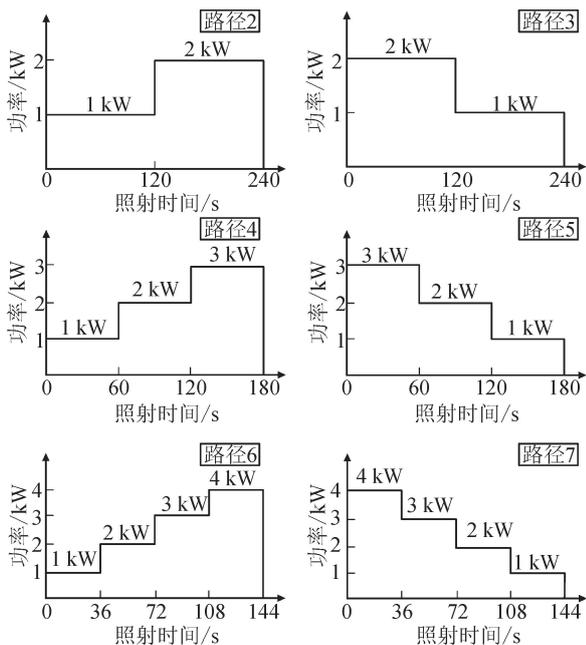


图 4 微波照射路径方案图
Fig. 4 Microwave irradiation path scheme diagram

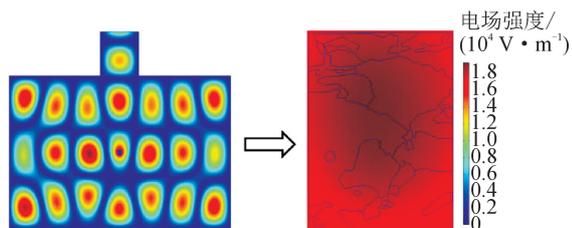


图 5 微波照射路径 4 下微波腔体内部电场分布云图
Fig. 5 Electric field distribution inside the microwave cavity under microwave irradiation path 4

为了使模拟结果更加准确,需要将试样电场的驻波比控制在 1.1 以内。图 5(b)中驻波比为 1.06,表明模型内电磁场为均匀场,满足驻波比要求。

2.2 温度场分析

照射结束后,考虑到各路径试样温度场的分布规律基本相同,仅在大小上有所区别,故仅以照射路径 4 为例,给出温度场分布云图,如图 6 所示。

在均匀电场中,微波照射在试样中产生的温度取决于试样内部矿物对微波的吸收能力。从图 6 中温度场的分布可以清楚地看出,较高温度区域主要位于绿泥石所在部位,这是由于绿泥石的吸波能力强于石英、正长石和斜长石的缘故。从温度场云图上还可以看出,温度由较高温度区域(绿泥石部分)向四周较低温度区域(矿物)扩散,这反映了试样内部矿物的热能传递过程。

图 7 为不同微波照射路径下,试样温度随照射时间的变化图。从图中可以看出,采用照射路径 2、4 和 6 时,试样温度随照射时间呈现先缓慢增长、后快速

增长的趋势,而采用照射路径 3、5 和 7 时,试样温度随照射时间呈现先快速增长、后缓慢增长的趋势。

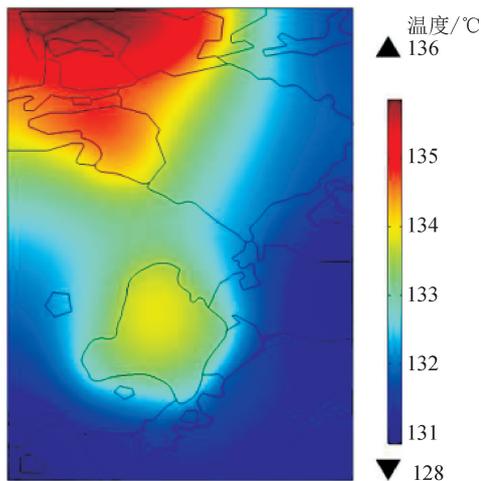


图 6 微波照射路径 4 下试样温度场分布云图
Fig. 6 Temperature field distribution of specimen under microwave irradiation path 4

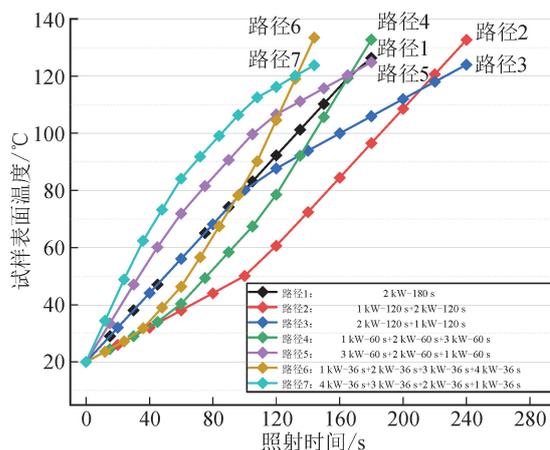


图 7 不同微波照射路径下试样温度随照射时间的变化曲线
Fig. 7 Variation of temperature of specimen with irradiation time under different microwave irradiation paths

试样温度随照射时间出现此种变化,主要是受微波功率的影响,微波照射岩石的功率越大,试样的升温速率就越高。而在微波照射伟晶岩试样时,各路径最终时刻的温度表现为路径 2、4、6 高于路径 3、5、7,即采用“先低后高”的照射方式产生的温度更高。

2.3 应力场分析

图 8 为采用照射路径 4 时,微波照射伟晶岩试样的应力场分布云图。需要注意的是,图中显示的是试样内部矿物的应力分布,正值表示试样内部矿物受压,负值表示试样内部矿物受拉。

从图 8 中可以看出,在矿物与矿物的交界处产生了拉应力集中现象,而在石英内部产生了较大的压应力。在试样内部升温以及热量传递的过程中,

由于绿泥石矿物吸波能力最强,吸收的热量也最多,从而产生膨胀,在膨胀过程中相邻不规则形状的矿物因约束绿泥石的膨胀而在边界处产生拉应力;矿物由于吸收微波能受热膨胀从而相互挤压,因此相邻矿物除了边界附近受到拉应力外,试样内部也会受到压应力。在采用照射路径4时,试样内部受到较大压应力的矿物主要是石英,压应力最大值可达116 MPa,其次是绿泥石,受到的压应力在30MPa左右。试样拉应力区位于绿泥石和石英矿物周围,主要分布于石英、正长石和斜长石边界处,矿物受到的拉应力可达40 MPa。

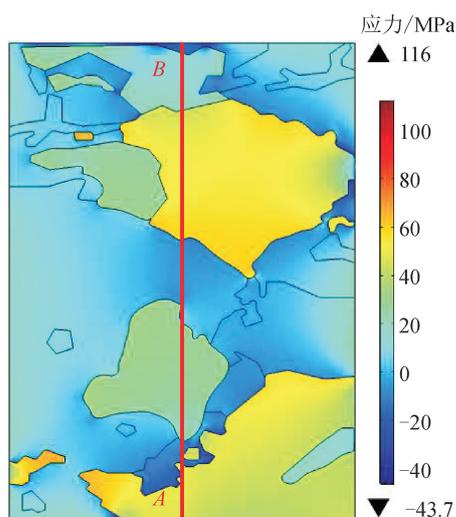


图8 微波照射路径4下试样应力分布云图
Fig.8 Cloud image of stress distribution on the sample under microwave irradiation path 4

为对比试样在不同微波照射路径下的应力状态,对各路径下试样的最大拉应力和最大压应力进行分析,如图9所示。

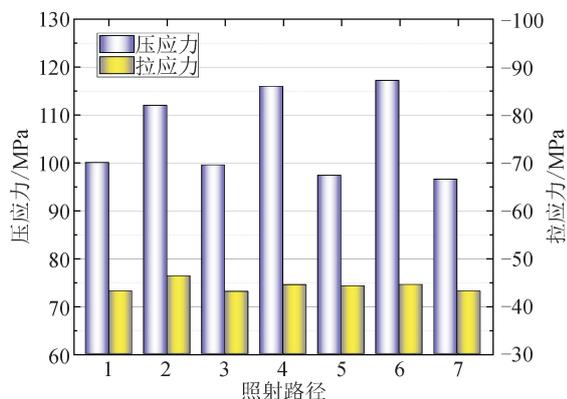


图9 各照射路径下试样的应力极值柱状图
Fig.9 Histogram of stress extremes in the specimen for each irradiation path

在不同的微波照射路径下,试样所受的拉应力及压应力大小不同。从压应力柱状图可以看出,照

射路径2、4、6产生的压应力较大,其余路径产生的压应力值相对较小。对比图8可以看出,不同微波照射路径下,试样的压应力大小与试样的温度相关,试样温度随照射时间的变化规律会影响微波照射试样的应力状态。从拉应力柱状图可以看出,不同的微波照射路径下,试样所受拉应力变化较小,其中,路径2、4、6产生的拉应力稍高。

对比不同微波照射路径下试样的应力状态发现,采用功率“先低后高”和“先高后低”两种不同的照射方式在试样中产生的应力大小明显不同。因此,以微波照射路径4(先低后高)和路径5(先高后低)为例,通过设置一条通过试样内部所有矿物的应力分析特征线AB,分析两种照射方式下,试样内部矿物在不同时刻的应力大小及应力随照射时间的变化规律,如图10所示。

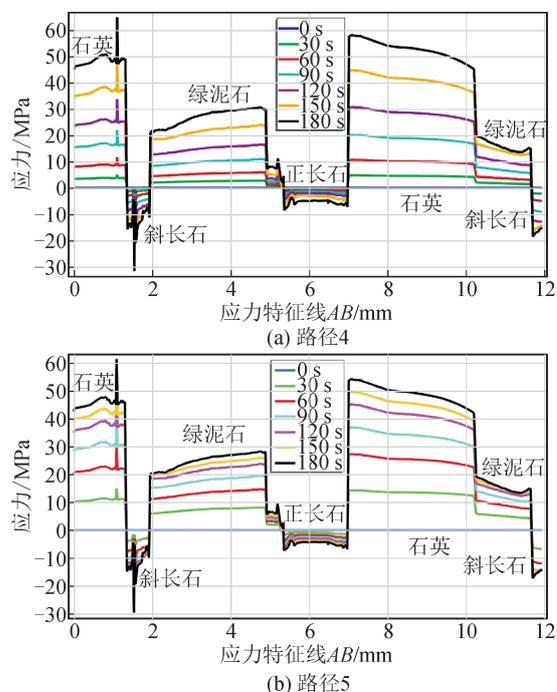


图10 应力特征线AB上应力随照射时间的变化图
Fig.10 Plot of stress on stress characteristic line AB with irradiation time

从图10可以看出,应力特征线上受压的矿物主要是石英和绿泥石,而受拉矿物主要是斜长石和正长石,这与图8的试样应力分布呈现出很好的一致性。对比图10(a)、(b)可以看出,在照射路径4和5下,相同时刻应力特征线上的矿物所受的应力并不相同;且在相同的时间间隔内,应力特征线上的矿物所受的应力变化大小也不相同。当采用照射路径4时,在相同时间间隔下,试样应力的增长速率呈现先缓慢增长,后快速增长的规律;而采用与其相反的照射方式(路径5)时,应力的增长速率则呈现先快

速增长,后缓慢增长的规律。试样内部应力的变化规律和试样的温度相关,对比图 8 可以看出,采用这两种不同的照射方式可以改变试样内部矿物所受应力随照射时间的变化规律,且采用“先低后高”的照射路径在伟晶岩试样内部产生的应力更大。

2.4 塑性区分析

2.4.1 塑性区发展形态分析

图 11 为微波照射路径 1、2 下,伟晶岩内部塑性区的演化发展过程,其中黑色部分为试样内部产生的塑性区。从图中可以清晰地看到,塑性区的萌生位置主要位于矿物边界处,这体现了试样内部矿物在受到微波照射发生热膨胀后,矿物之间互相挤压而达到塑性状态的特征。随着照射时间的增加,试样内部的热应力逐渐增大,强度较小的矿物率先达到塑性状态从而破坏,在云图上显示为塑性区由矿物边界处逐渐扩展到绿泥石矿物内部,且正长石也有少部分出现塑性区。

通过软件内置的积分算子计算可得,微波照射路径 1、2 下,试样最终产生的塑性区面积分别为 10.4mm^2 和 13.5mm^2 ,从产生塑性区面积的大小来看,采用不同的微波照射路径会产生不同的塑性区面积,因此,有必要对各微波照射路径下,试样塑性区的发展程度进行分析。

2.4.2 塑性区发展程度分析

对不同微波照射路径下伟晶岩试样塑性区的分布特征进行分析,如图 12 所示。

图 12 为采用照射路径 2~7 时,照射结束试样的塑性区云图。由图可知,塑性区主要产生于具有较强微波吸收能力的矿物绿泥石处,在矿物相邻的边界处也产生了一定的塑性区,这与温度场和应力场的结论相一致。为进一步分析不同微波照射路径下试样塑性区的发展规律以及试样中各矿物对试样整体塑性区的贡献率,对照射路径 1~7 下伟晶岩试样塑性区随照射时间的发展规律以及试样内部各矿物塑性区面积占比(指各矿物塑性区面积与试样总面积的比值)进行分析,如图 13、14 所示。

从图 13 可以看出,随着照射时间的增长,试样内部的塑性区面积迅速增加,采用路径 2、4、6 产生的塑性区面积要大于采用路径 3、5、7 产生的塑性区面积,即采用功率“先低后高”的照射方式比采用“先高后低”的照射方式能产生更大的塑性区。对比不同微波照射路径下,试样应力场随照射时间的变化规律可知,采用“先低后高”的照射方式能在伟晶岩试样内部产生能更大的应力,因此能产生更大的塑性区。

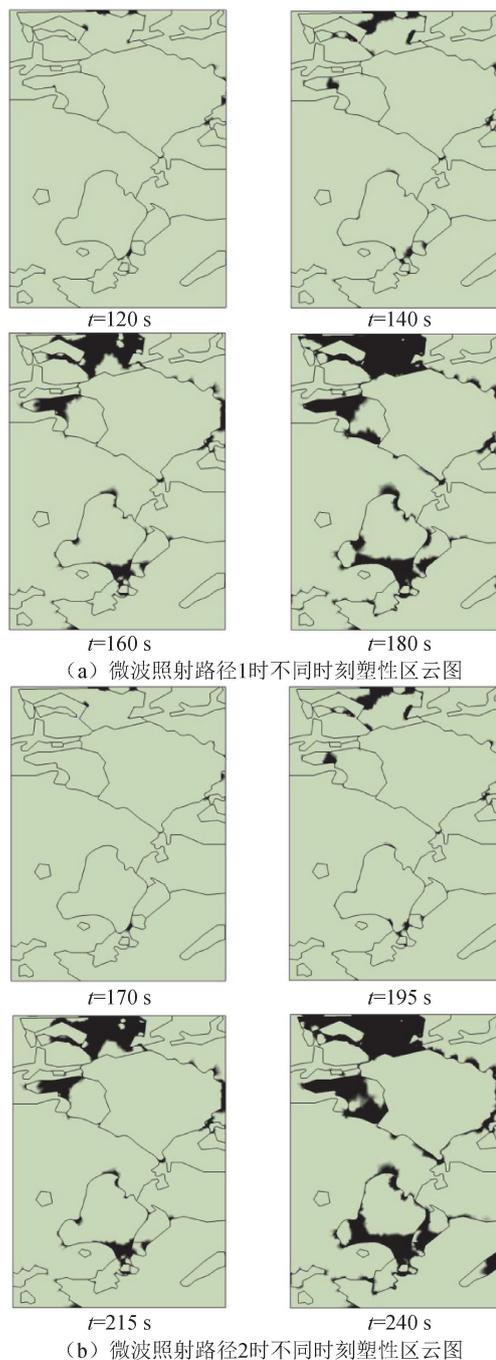


图 11 微波照射路径 1、2 下塑性区发展形态图
Fig. 11 Developmental morphology of the plastic zone under microwave irradiation intensity paths 1 and 2

从图 13 还可以看出,采用“先高后低”的照射方式照射伟晶岩试样,其塑性区的萌生时间更早,这是由于先采用较高功率微波照射时,在试样内部能产生更大的温度梯度,导致强吸波矿物绿泥石升温更快,而弱吸波矿物石英、正长石和斜长石由于升温不及绿泥石,使得试样内部温度分布不均匀而产生了更大的热应力,在热应力的作用下,强度较低的矿物率先产生塑性区。

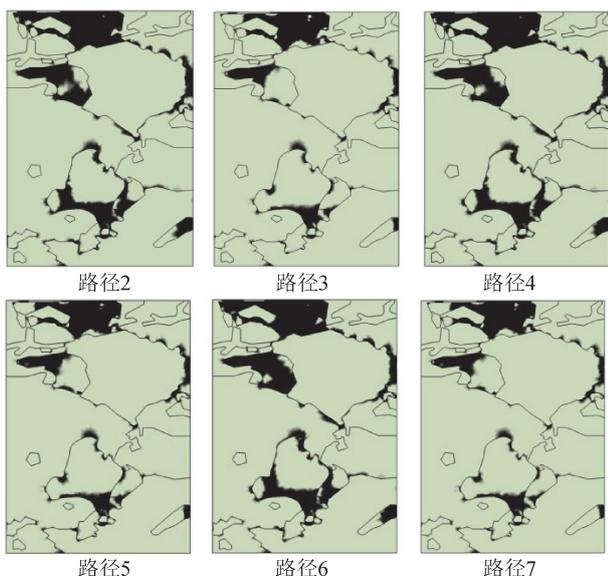


图 12 不同微波照射路径下试样塑性区云图

Fig. 12 Cloud map of the plastic zone of the specimen under different microwave irradiation paths

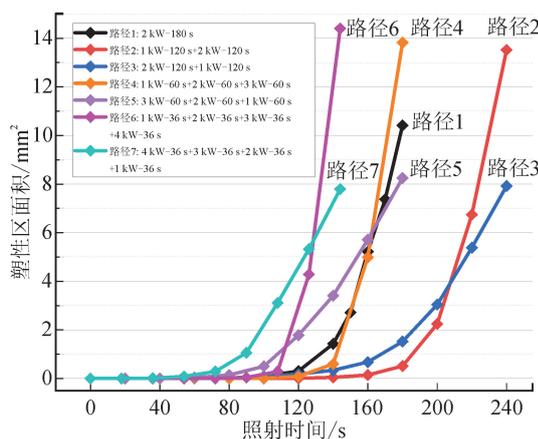


图 13 不同照射路径下试样塑性区面积随照射时间的发展规律图

Fig. 13 Development of plastic zone area of specimens with irradiation time under different irradiation paths

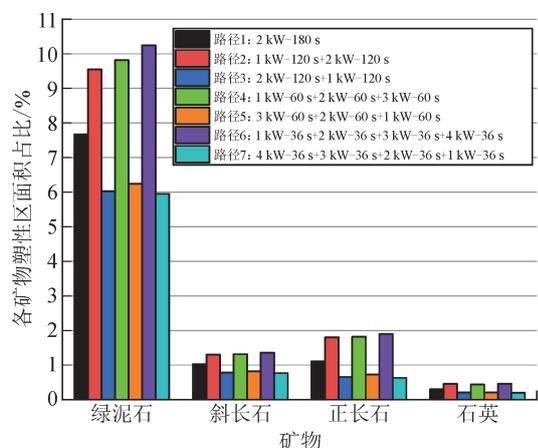


图 14 各路径下各矿物塑性区面积占比图

Fig. 14 Percentage of each mineral plasticity zone under each pathway

从图 14 可以看出,无论在何种照射路径下,破坏程度最大的矿物均为绿泥石,其占试样总面积的比值为 5.9%~10.3%;其次为斜长石和正长石,占比为 0.6%~1.9%;破坏程度最小的矿物为石英,占比为 0.5%以下。岩石内部矿物在微波照射下的损伤程度与矿物自身的强度和吸波能力直接相关,由于绿泥石自身的强度较低且吸波能力最强,故在微波照射下产生的塑性区面积最大。对比各个照射路径对四种矿物的破坏程度不难看出,采用功率“先低后高”的照射方式照射伟晶岩试样,对其所含矿物的破坏程度更大。

3 结 论

本文以伟晶岩为研究对象,通过分析不同微波照射路径下试样的电磁场、温度场、应力场以及塑性区的分布规律和演化过程,得出以下结论:

- 1) 微波照射伟晶岩试样产生的塑性区面积和矿物吸波能力相关,对塑性区的产生贡献最大的矿物是绿泥石,其次是斜长石和正长石;
- 2) 微波照射路径不同,伟晶岩试样温度随照射时间的变化规律不同,采用功率“先低后高”的照射方式能在试样中产生更高的温度;
- 3) 伟晶岩试样的内部应力随照射时间的变化规律与微波照射路径相关;采用功率“先低后高”的照射方式时,伟晶岩试样内部应力的增长速率呈现先缓慢增长,后快速增长的规律;反之,则呈现先快速增长,后缓慢增长的规律,其中照射路径 2、4、6 产生的应力较大;
- 4) 伟晶岩试样在不同照射路径下产生了大小不一的塑性区,其中照射路径 2、4、6 产生的塑性区面积最大,路径 1 次之,路径 3、5、7 最小;

综上,对于伟晶岩试样,当微波输入能量相同时,采用功率“先低后高”的照射方式,破岩效果更好。

参考文献:

[1] 李夕兵,周子龙,王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望[R]. 北京:中国岩石力学与工程学会,2010.

[2] TROMANS D. Mineral comminution: energy efficiency considerations[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(8): 613-620.

[3] GE Zhenlong, SUN Qiang. Acoustic emission characteristics of gabbro after microwave heating[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104616.

[4] 戴俊,袁菲菲,徐水林,等. 微波照射后玄武岩损伤机理试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2614-2618.

- DAI Jun, YUN Feifei, XU Shuilin, et al. Experimental study on damage mechanism of basalt by microwave irradiation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(7): 2614-2618.
- [5] 郝志远. 微波照射岩石致裂机制及强度劣化规律研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
- HAO Zhiyuan. Research on microwave irradiation rock fracture mechanism and strength deterioration law[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [6] 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: 104495.
- [7] 戴俊, 王思琦, 王辰晨. 不同冷却方式对微波照射后花岗岩强度影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(8): 170-174.
- DAI Jun, WANG Siqi, WANG Chenchen. Experimental study on the effect of different cooling methods on the strength of granite after microwave irradiation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(8): 170-174.
- [8] 秦立科, 戴俊. 微波照射下矿物颗粒温度分布及影响因素分析[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(3): 96-98, 102.
- QIN Like, DAI Jun. Temperature distribution and influential factors for ore particles under microwave irradiation [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(3): 96-98, 102.
- [9] 邹冠祺. 微波照射对常见矿物部分物理力学性质影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- ZOU Guanqi. Study on the influence of microwave irradiation on some physical and mechanical properties of common minerals[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [10] 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.
- [11] ALI A Y, BRADSHAW S M. Bonded-particle modeling of microwave-induced damage in ore particles[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(10): 780-790.
- [12] 刘德林. 微波照射岩石效果影响因素及其影响规律数值试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- LIU Delin. Numerical experimental study on influencing factors and influence law of microwave irradiation rock effect[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [13] LU Gaoming, FENG Xiating, LI Yuanhui, et al. Experimental investigation on the effects of microwave treatment on basalt heating, mechanical strength, and fragmentation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2535-2549.
- [14] LI Qiang, LI Xibing, YIN Tubing. Effect of microwave heating on fracture behavior of granite: an experimental investigation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 250: 107758.
- [15] YIN Tubing, WU You, LI Qiang, et al. Determination of double-K fracture toughness parameters of thermally treated granite using notched semi-circular bending specimen[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 226: 106865.
- [16] ZENG J, HU Q, CHEN Y, et al. Experimental investigation on structural evolution of granite at high temperature induced by microwave irradiation [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, 113(6): 745-754.
- [17] HONG Yidu, LIN Baiquan, LI He, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1145-1154.
- [18] ALI A Y, BRADSHAW S M. Quantifying damage around grain boundaries in microwave treated ores[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2009, 48(11-12): 1566-1573.
- [19] 胡毕伟, 尹士兵, 李夕兵. 微波辐射辅助机械冲击破碎岩石动力学试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2020, 28(4): 521-530.
- HU Biwei, YIN Tubing, LI Xibing. Experimental study on mechanical impact breaking rock with microwave radiation [J]. *Gold Science and Technology*, 2020, 28(4): 521-530.
- [20] 卢高明, 周建军, 张兵, 等. 循环荷载下微波照射玄武岩的损伤变形与能量特征[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(11): 1578-1585.
- LU Gaoming, ZHOU Jianjun, ZHANG Bing, et al. Damage, deformation and energy characteristics of basalt after microwave irradiation subjected to cyclic loading [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(11): 1578-1585.
- [21] LU Gaoming, FENG Xiating, LI Yuanhui, et al. Influence of microwave treatment on mechanical behaviour of compact basalts under different confining pressures[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(2): 213-222.
- [22] 李元辉, 卢高明, 冯夏庭, 等. 微波加热路径对硬岩破碎效果影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1460-1468.
- LI Yuanhui, LU Gaoming, FENG Xiating, et al. The influence of heating path on the effect of hard rock fragmentation using microwave assisted method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1460-1468.
- [23] LI J L, 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.

(责任编辑 周 蓓)