

DOI: 10.11779/CJGE202004007

不同微波照射方式下岩石试样的内外升温特征试验

高 峰^{1, 2}, 邵 炎¹, 熊 信¹, 周科平^{1, 2}, 曹善鹏¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学小行星矿物资源研究中心, 湖南 长沙 410083)

摘要: 微波辅助机械破岩是实现硬岩非爆破连续开采的重要手段, 开展微波照射方式对研究岩石的温度响应以及破坏机制具有重要的理论和实际意义。对花岗岩试样进行不同功率和时间的微波单次与循环加热、单侧与双侧加热试验, 并开展试样加热前后的P波波速测试。结果表明, 试样反向功率整体上随时间降低, 且降低程度随功率增大而增大。试样内部温度高于表面温度, 其变化具有明显的阶段特征, 且在升温阶段存在“拐点”, 表面温度从中心以辐射状向边缘逐渐降低。微波加热使试样内部产生热应力并导致裂纹产生和扩展, 降低P波波速。采用单次、单侧、高功率和短时间的微波照射方式对试样进行加热, 可以使试样温度升高更为显著。

关键词: 微波; 岩石破碎; 照射方式; 温度; 功率

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)04-0650-08

作者简介: 高 峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事金属矿开采、岩石力学及矿山工程灾害防治研究。E-mail: csugaofeng@csu.edu.cn。

Rising characteristics of internal and external temperatures of rock specimens under different microwave irradiation modes

GAO Feng^{1, 2}, SHAO Yan¹, XIONG Xin¹, ZHOU Ke-ping^{1, 2}, CAO Shan-peng¹

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Central South University Asteroid Mineral Resources Research Center, Changsha 410083, China)

Abstract: Microwave-assisted mechanical rock breaking is an important means to achieve non-blasting continuous mining of hard rock. The microwave irradiation is of important theoretical and practical significances for studying the temperature response and failure mechanism of rock. For the granite samples subjected to microwave heating, the unilateral and double-sided heating tests with different power and time as well as the P-wave velocity tests before and after heating of the samples are carried out. The results show that the reverse power of the samples decreases with time as a whole, and the degree of decrease increases with the increase of power. The internal temperature of the samples is higher than the surface temperature, and the change has obvious phase characteristics, and there is an "inflection point" in the temperature rising phase, and the surface temperature gradually decreases from the center to the edge in the radial direction. Microwave heating causes thermal stress inside the samples and generation and propagation of cracks, reducing the P-wave velocity. Heating the samples with a single, single-sided, high-power and short-time microwave irradiation method can increase the temperature of the samples more significantly.

Key words: microwave; rock breakage; irradiation method; temperature; power

0 引言

微波是频率为300 MHz~300 GHz的电磁波, 其中用于微波加热的民用频率为915 MHz和2450 MHz^[1]。微波加热材料的原理是材料中的偶极子在交变电场作用下不断极化产生类似摩擦效应使材料温度升高, 微波加热具有选择性加热、快速加热、整体加热等特点^[2]。近年来, 微波加热技术在采矿工程方面的应用被提上日程, 主要技术思路为采用微波加热岩石使其产生裂纹而受到损伤, 降低强度, 然后再利用

机械设备将岩石切削下来达到岩石破碎的目的, 降低刀具磨损问题^[3]。

国内外对微波加热下材料的温度特性进行了大量的试验和理论研究。戴俊等^[4-5]、李元辉等^[6]、田军等^[7]、Hassani等^[3]采用红外温度传感器研究了不同微波加热条件下玄武岩试样表面温度的升温特性, 研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474252, 51774323); 中南大学研究生自主探索创新项目(2019zzts664)

收稿日期: 2019-07-10

表明表面温度升温曲线接近幂指函数, 先快后慢。Kingman 等^[8]、黄孟阳等^[9]、Yang 等^[10]、胡国忠等^[11]、欧阳红勇等^[12]、He 等^[13]、Wang 等^[14]、Keangin 等^[15]采用热电偶测量材料在微波作用下的温度特性。此外, 数值模拟^[16-19]表明微波加热下试样内部温度高于表面温度。但鲜有学者同时采用红外温度传感器和热电偶从试验的角度同时研究微波加热方式、加热次数对岩石试样的内部温度和表面温度的影响。

本文结合特制的微波破岩试验设备, 测量不同照射条件下岩石试样的内部温度和表面温度的变化特征。试验以坚硬立方体花岗岩试样为研究对象, 设置单侧加热、双侧加热、单次加热和循环加热来研究微波加热对试样内部温度、表面温度、裂纹扩展以及 P 波波速影响, 研究成果对微波辅助机械破岩的应用具有指导意义。

1 设备、试样及试验方法

1.1 微波及实验设备

试验设备如图 1 所示, 微波加热试验采用自主设计的 WLKJ-D9 型专业工业微波炉, 该微波系统采用频率为 2450 MHz 的多模谐振腔, 其结构主要包括微波发生器、微波加热腔体、微波功率测试系统、监控系统、控制与数据采集系统、抽热系统等。微波发生器是由 3 个磁控管组成, 每个磁控管可以实现单独控制, 磁控管产生的微波由矩形波导、喇叭口传输到微波加热腔体内并照射至试样表面。相关试验设备还包括 FLIR SC7000 型, 4 通道 K 型热电偶温度显示器(可实现每秒记录一次数据, 保证数据完整), ZK-115B 型热电偶温度传感器, 该传感器由金属外壳包裹对微波具有反射作用, 直径 6 mm、长度 60 mm, 线长 5 m, 测温范围 0℃~1100℃, 满足试验要求。P 波波速测试仪采用 HS-Y54A 型岩石声波参数测试仪。

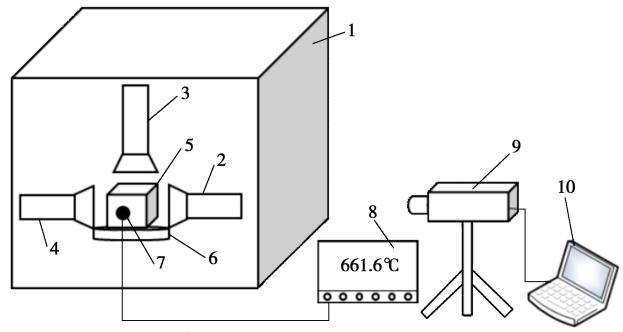
1.2 试验试样

试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体花岗岩试样, 主要由石英、斜长石和黑云母等矿物成分组成^[20], 其中石英为弱吸波矿物, 黑云母为中等吸波矿物^[7]。试样取自同一岩块上, 一致性好, 没有肉眼可见的宏观裂纹, 并对试样进行 P 波波速测试, 剔除离散型大的试样。在试样一侧表面中心位置钻取直径为 6 mm、深度为 60 mm 的圆柱形孔, 用于放置热电偶温度传感器, 并使热电偶和孔内岩石表面耦合。

1.3 试验方法

本试验设置单侧微波加热和双侧微波加热两种方式, 并对部分试样(1-1、1-2 和 2-1)进行“加热 8 min—自然冷却至室温—加热 16 min—自然冷却至室温—加热 32 min—自然冷却至室温”的循环加热, 具体见

图 2, 图 3 和表 1。(以 1-1-32(单侧-2 kW-32 min)试样为例, 1-1 表示为试样编号, 32 表示为加热时间 32 min, 即第三次加热; 单侧表示单侧加热方式, 2 kW 为磁控管电源功率)。



1-专业工业微波炉; 2-#1磁控管和喇叭口; 3-#2磁控管和喇叭口; 4-#3磁控管和喇叭口; 5-花岗岩试样; 6-石英托盘; 7-K型热电偶温度传感器; 8-4通道K型热电偶温度显示器; 9-FLIR SC7000型红外热成像仪; 10-笔记本电脑

图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment

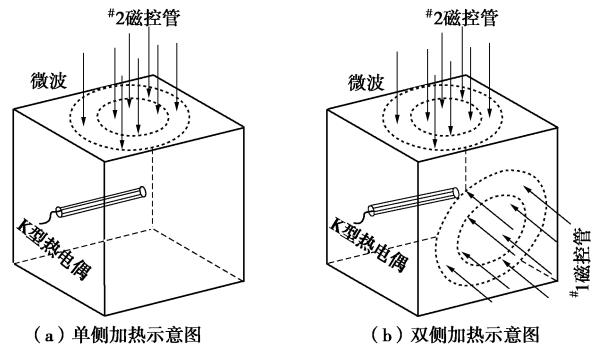


图 2 单侧与双侧微波加热示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single-sided and double-sided microwave heating

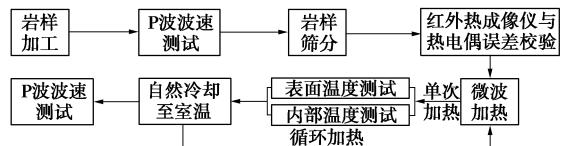


图 3 试验流程图

Fig. 3 Flow chart of tests

由于水对微波敏感且具有良好的导热性, 采用热电偶温度传感器(对热电偶温度传感器采取接地处理以减小微波对其干扰^[11])测量加热中水的内部实时温度^[8, 13], 采用红外热成像仪测量加热结束后水的表面温度, 对比二者结果检验仪器的误差, 结果表明误差在±1℃。

张敏超^[20]把加热结束后的试样取出进行红外热成像测试, 此方法测出的温度值比实际值偏小。为减小试验误差, 本试验采取对加热结束后试样立刻在加热腔中进行红外热成像测试(不取出试样), 采用热电

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

加热方式	编号	照射方式	功率/kW		时间/min		
			#1 磁控管	#2 磁控管	第一次加热	第二次加热	第三次加热
循环加热	水	单侧	0	2	2	自然	0
	1-1	单侧	0	2	8	冷	16
	1-2	双侧	2	2	8	却	16
	2-1	单侧	0	4	8	至	0
单次加热	2-2	双侧	4	4	8	室	0
	3-1	单侧	0	4	16	温	0
	3-2	双侧	4	4	16	温	0

偶温度传感器记录开始加热至结束后 5 min 的内部温度。每次加热结束后，将试样取出，在实验室自然状态下冷却至室温再进行下一次加热试验。所有试样加热结束后在实验室冷却至室温，然后对试样进行 P 波波速测试。

2 试验结果

2.1 正向、反向功率

传统微波设备只能测量入射功率一个参数，不能记录试样未吸收的功率。本试验通过设备上特有的微波功率测试系统记录循环加热中最后一次加热的正向功率（微波入射功率）和反向功率（试样反射收功率）大小，并计算正向功率与反向功率差值（试样吸收功率）大小。由图 4 所示，正向功率随时间增加而减小，不同试样的反向功率变化不相同，正反差值曲线近似成轴对称。由于磁控管电压随时间发生衰减导致正向功率逐渐减小。1-1-32（单侧-2 kW-32 min）试样在开始加热时反向功率最大，然后随时间增加逐渐减小最后趋于稳定；1-2-32（双侧-2 kW-32 min）试样在开始加热时反向功率最大，然后随时间增加先逐渐减小再逐渐增加；2-1-32（单侧-4 kW-32 min）试样在开始加热时反向功率最大，然后随时间增加先逐渐减小再增加最后再逐渐减小，值得注意的是在“拐点”处反向

功率急剧减小，这是因为微波加热一段时间后试样内部矿物发生熔融，熔融矿物填补了颗粒间的空隙，使得材料的密度提高，相对介电常数也随之提高^[21]。反向功率的变化导致图 5 中试样内部温度的改变，反向功率在加热过程中先减小后增加，试样吸收的微波能先增加后减少导致试样内部温度先快速上升后缓慢上升。

2.2 试样内部温度

试样内部温度随时间的变化如图 5 所示，呈现随时间增加而逐渐升高的特征。试样内部温度变化分为 3 个阶段，第一阶段（0~60 s）是试样内部温度快速升高阶段，与时间近似成直线关系，因为试样中含有水分，水是强吸收微波物质，提高试样的相对介电常数；第二阶段（60 s—加热结束）是试样内部温度缓慢升高阶段，由于加热时间增加，水分逐渐蒸发，试样相对介电常数低于第一阶段，值得注意的是 2-1-32（单侧-4 kW-32 min）和 3-2-16（双侧-4 kW-16 min）试样在第二阶段存在“拐点”，在“拐点”之前试样内部温度平均升温速率较低，“拐点”之后试样内部温度平均升温速率急剧上升，因为试样内部温度达到一定值时部分矿物成分成熔融状态或发生化学变化改变其相对介电常数；第三阶段（加热结束后 480 s 内）是试样内部温度下降阶段，不同试样在不同加热条件下的降温曲线近似平行，停止加热时试样内部温度立刻下降，由于试样内部温度高于表面温度，试样中存在热传导使内部温度快速下降，当试样内部温度与表面温度趋于一致时内部温度下降趋缓。

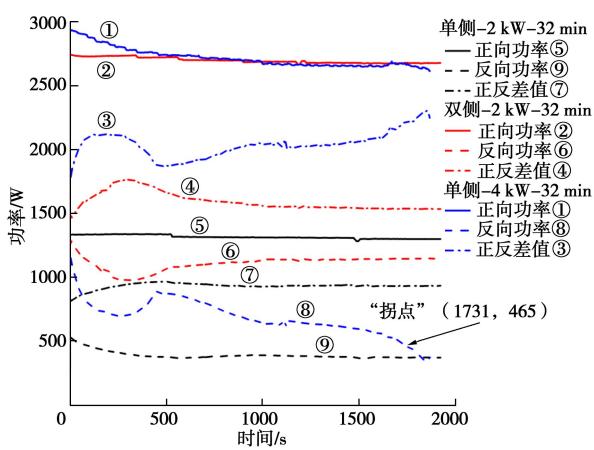
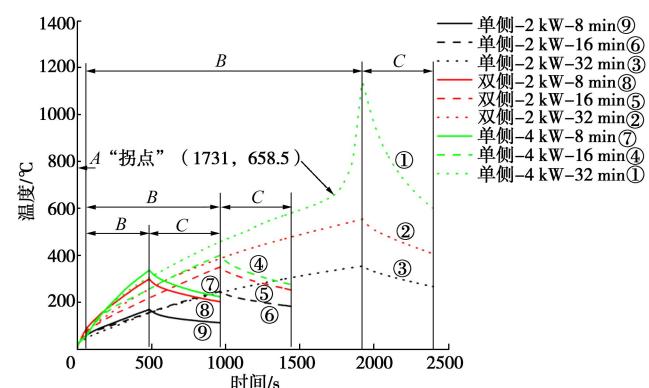


图 4 功率随时间的变化

Fig. 4 Change of power with time



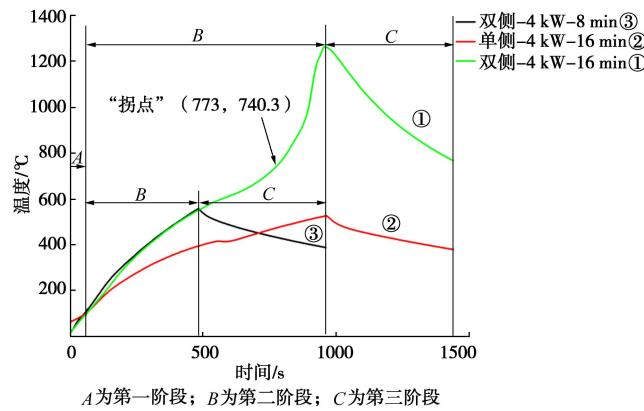


图 5 内部温度随时间的变化

Fig. 5 Change of internal temperature with time

由于循环加热中的每次加热对试样内部结构和矿物成分均造成一定影响, 1-1 (单侧-2 kW-8、16、32 min)、1-2 (双侧-2 kW-8、16、32 min) 和 2-1 (单侧-4 kW-8、16、32 min) 试样循环加热的内部温度曲线不完全重合, 试样在第一次加热 8 min 内的内部温度值高于第二次和第三次加热, 且高功率加热增加了内部温度曲线的不重合度。

2.3 试样表面温度

试样表面温度的大小和分布如图 6 所示, 其表面温度近似成圆环型分布, 温度最高值位于试样表面中心, 并以辐射状向边缘逐渐降低。由 2-1-32 和 3-2-16 试样温度曲线可得, 从试样顶部到底部表面温度先升高后降低, 在表面中心区域达到最大值, 且当试样产生较大的宏观裂纹且内部矿物发生熔融时, 熔融矿物温度值远高于表面温度值。由 1-2-32 和 2-2-8 试样^{#1}、^{#2}磁控管对应的表面温度图可得, 在微波加热功率、时间相同时, 同一试样不同磁控管对应面的表面温度不相同, 体现了微波的选择性加热和花岗岩试样矿物成分分布的非均匀性。综上所述, 试样表面温度随功

率和时间的增加而升高, 高功率加热时试样在短时间内达到较高的温度 (^{#1} 表示^{#1} 磁控管对应的试样表面)。

2.4 P 波波速

在固体材料中, P 波波速的传播速率依赖于材料的弹性特性和组织结构, 波速值的大小反映了岩石内部结构损伤程度。试样在微波加热前后的 P 波波速变化情况如表 2 所示, 由于 2-1-32 和 3-2-16 试样在加热结束后产生较大的宏观裂纹无法测量试样的 P 波波速。以 1-1-32 和 1-2-32 试样为例, 加热时间相同时 (32 min), 双侧-2 kW 的波速降低程度是单侧-2 kW 的 1.285 倍, 表明加热时间相同时功率越高试样 P 波波速下降比例越大, 内部损伤程度越大; 以 2-2-8 和 3-1-16 试样为例, 双侧-4 kW、加热 8 min 的波速降低程度是单侧-4 kW、加热 16 min 的 1.303 倍, 表明增加功率对试样内部的损伤程度大于增加时间, 高功率短时间加热具有节约时间、降低能量消耗和对试样造成损伤大的特征。

表 2 微波加热前后 P 波波速变化

Table 2 Change of P-wave velocities before and after microwave heating

编号	加热前波速/(m·s ⁻¹)	加热后波速/(m·s ⁻¹)	降幅/%
1-1-32	4065	2915	28
1-2-32	4123	2624	36
2-1-32	4073	—	—
2-2-8	4081	2290	43
3-1-16	4098	2713	33
3-2-16	4166	—	—

3 分析与讨论

3.1 试样温度增幅特性

试样在双侧加热结束时^{#1}和^{#2}磁控管对应的试样

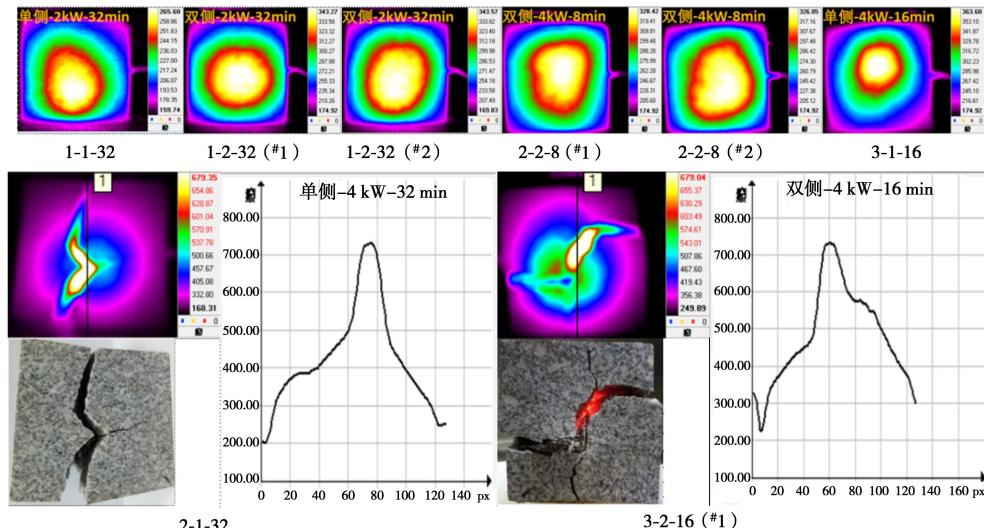


图 6 表面温度变化

Fig. 6 Change of surface temperature

表面温度接近, 因此本试验取#1 磁控管对应的试样表面温度为试样在双侧加热中的表面温度。

(1) 试样温度增幅差值特性

试样温度增幅差值(内部温度增幅减去表面温度增幅)如表 3 所示, 可见内部温度增幅高于表面温度增幅, 2-1 试样在 8, 16 min 循环加热过程中内部与表面温度增幅差值接近, 在 32 min 循环加热中内部与表面温度增幅差值显著增大, 同时 1-2 试样也存在这种现象。在总功率相同时, 单侧加热(2-1)试样在 8, 16 和 32 min 循环加热过程中内部与表面温度增幅差值大于双侧加热(1-2)试样在相同时间循环加热过程中内部与表面温度增幅差值。当试样矿物成分发生熔融时内部与表面温度增幅差值达到最大, 最高为 584 °C(3-2-16 试样)。可见, 增加功率和时间可以提高试样内部与表面温度增幅差值, 高功率有利于快速增大试样内外温度增幅差值, 且当总功率和时间相同时, 单侧加热的内部与表面温度差值高于双侧加热。

表 3 内部与表面的温度增幅差值的变化

Table 3 Differences between internal and surface temperature increases

加热方式	编号	温度增幅差值/°C		
		8 min	16 min	32 min
循环加热	1-1	47.3	68.9	89.9
	1-2	106.8	110.1	212.0
单次加热	2-1	133.5	124.8	455.6
	2-2-8	228.8	—	—
	3-1-16	—	162.8	—
	3-2-16	—	584.0	—

(2) 功率对试样温度增幅的影响

试样在单次加热下, 功率对温度增幅影响如表 4 所示(取 1-2 和 2-1 试样加热 8 min 作为单次加热)。以 1-2、2-1 和 2-2 试样为例, 加热时间相同时(8 min), 双侧-4 kW 的内、表温度增幅分别是双侧-2 kW 的 1.917 倍和 1.778 倍, 是单侧-4 kW 的 1.705 倍和 1.697 倍。以 3-1 和 3-2 试样为例, 加热时间相同时(16 min), 双侧-4 kW 的内、表温度增幅分别是单侧-4 kW 的 2.694 倍和 2.206 倍。显然, 在时间一定时, 微波加热功率越高, 试样内部和表面温度增幅越高, 因为试样在高功率微波加热下短时间内吸收较多的微波能, 产生较高的温度增幅, 同时颗粒间的热应力随之增大, 试样破裂严重。

试样在循环加热下, 功率对温度增幅影响如图 7 所示。以 1-1、1-2 和 2-1 为例, 加热时间相同时(分别为 8, 16 和 32 min), 单侧-4 kW 的内、表温度增幅分别是双侧-2 kW 的 1.125, 1.149, 2.081 倍和 1.047,

1.156, 2.036 倍, 是单侧-2 kW 的 2.115, 1.690, 3.321 倍和 1.785, 1.625, 2.681 倍; 同理, 双侧-2 kW 的内、表温度增幅分别是单侧-2 kW 的 1.880, 1.471, 1.596 和 1.704, 1.405, 1.316 倍。显然, 加热功率相同时, 单侧加热比双侧加热更有利提高温度增幅, 因为当加热功率相同时, 双侧加热在每个加热方向的功率为单侧加热的一半, 且双侧加热时试样在两个方向吸收微波能, 试样温度分布均匀, 内部温度梯度较小, 单侧加热时, 试样只在一个方向吸收微波能, 试样温度分布不均匀, 温度梯度大。同时, 也有可能与矿物在试样中的随机分布有关, 即在单侧加热时, 吸波能力强的矿物主要分布在试样表面和热电偶测温点附近, 导致温度增幅显著提高。因此微波辅助机械破岩应当采取单侧照射岩体。

表 4 单次加热时温度增幅随功率的变化

Table 4 Increase of temperature with change of power during single heating

编号	表面温度增幅/°C	内部温度增幅/°C
1-2	173.3	280.1
2-1	181.6	315.1
2-2	308.3	537.1
3-1	298.0	460.8
3-2	657.5	1241.5

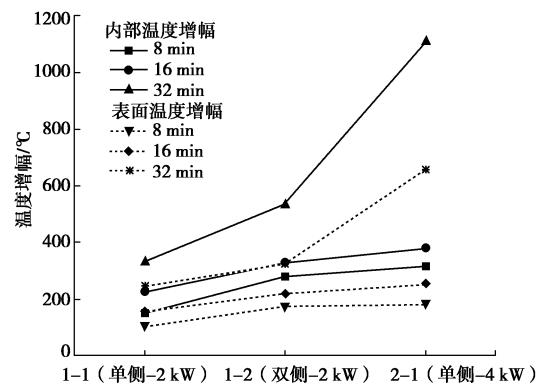


图 7 循环加热时温度增幅随功率的变化

Fig. 7 Increase of temperature with change of power during cyclic heating

(3) 时间对试样温度增幅的影响

试样在单次加热下时间对温度增幅影响如图 5 所示。以试样 3-1 和 2-1-8 为例, 相同功率下(单侧-4 kW), 试样加热 16 min 的内、表温度增幅分别是 8 min 的 1.462 倍和 1.640 倍; 以试样 3-2-16 和 2-2-8 为例, 相同功率下(双侧-4 kW), 加热 16 min 的内、表温度增幅分别是 8 min 的 2.311 倍和 2.132 倍。显而易见, 在功率一定时, 微波加热时间越长, 试样内部和表面

温度增幅越高, 因为加热时间越长, 试样吸收的微波能越多, 温度增幅也就越大。

试样在循环加热下, 时间对温度增幅影响如图 8 所示, 同时结合图 5。在低功率加热时(如单侧-2 kW), 试样温度增幅随时间增加变化不明显; 在高功率加热时, 试样温度增幅从 8 min 至 16 min 变化不明显, 从 16 min 至 32 min 温度增幅明显增加。循环加热试样在单侧功率为 4 kW, 加热 16 min 时的内部温度增幅是在加热 8 min 时的 1.203 倍, 表面温度增幅为 1.400 倍, 低于相同加热条件下单次加热时内部温度增幅的 1.462 倍和表面温度增幅的 1.640 倍。比较发现, 单次加热比循环加热更有利于提高温度增幅。因为试样在第一次微波加热下其吸波矿物发生物理、化学变化, 如在 600°C~1000°C 后石英从 α -石英转化为 β -石英, 尽管冷却后仍然变回 α -石英, 但是相转变的过程对矿物颗粒联结的也可能产生影响^[22], 导致其性质发生改变。在第二次和第三次微波加热下, 矿物吸收的微波能小于第一次加热, 导致试样温度增幅在第一次加热时最高。

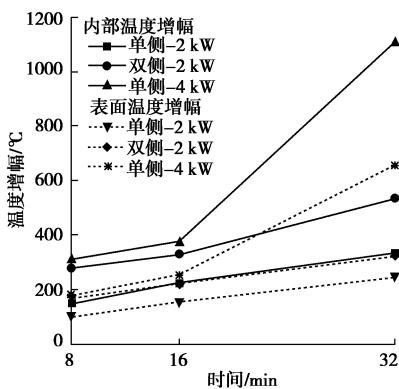


图 8 温度增幅随时间的变化

Fig. 8 Increase of temperature with time

3.2 试样裂纹扩展特性

微波加热下试样裂纹扩展特性如图 9 所示。微波加热时, 由于各矿物成分的不均匀热膨胀在试样内部产生热应力, 导致试样表面产生新裂纹和原有裂纹继续扩展。裂纹先从热应力较高的一面产生, 随后向临近面扩展, 产生的主裂纹近似平行于立方体试样棱边, 最后在 4 个面上形成贯通裂纹并在主裂纹的分支上向剩余面不断扩展。当试样内部矿物发生熔融时, 熔融矿物在热膨胀力的作用下沿着裂隙流动, 在流动过程中增大了原有裂纹的尺寸, 并在试样表面产生近似“S”形状的宏观裂纹(见图 6 和图 8 中 2-1-32 和 3-2-16 试样)。3-2-16 试样的裂纹数量和长度大于 2-2-8 试样, 表明裂纹数量和长度与加热时间成正比例关系。加热

循环次数、加热功率和时间相同条件下, 2-1-32 试样在单侧加热产生的裂纹数量和长度大于 1-2-32 试样在双侧加热所产生的, 表明在相同加热条件下, 单侧加热比双侧加热更有利于使试样产生裂纹。同时结合图 7 可知, 温度越高试样中矿物产生的不均匀热应力越大, 试样破裂的就越严重。

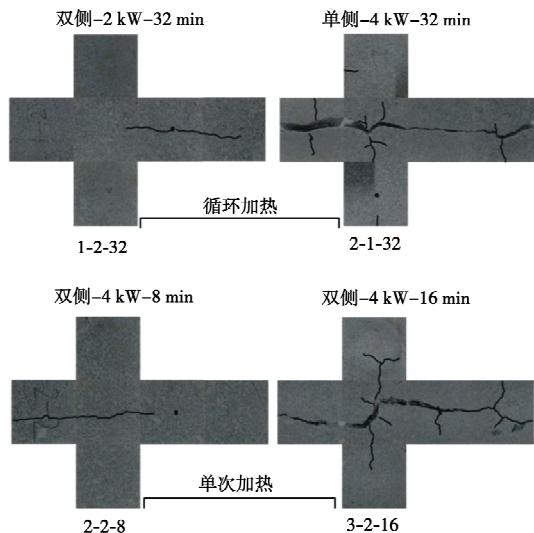


图 9 试样裂纹变化

Fig. 9 Change of crack in samples

4 结 论

(1) 微波加热下, 试样反向功率随时间整体呈现逐渐降低的趋势, 功率越大其下降的程度越大。试样内部温度高于表面温度, 内部温度变化分为 3 个阶段; 表面温度近似成圆环型分布, 并集中在试样表面中心, 并以辐射状向边缘逐渐降低; 循环加热中的 3 次加热的内部温度曲线不完全重合, 高功率增加了内部温度曲线的不重合度。

(2) 增大功率和延长时间有利于提高试样内部温度、表面温度的增幅和降低 P 波波速, 高功率加热在短时间内使试样的内部矿物发生熔融和产生贯通裂纹。微波加热总功率相同时单侧加热比双侧加热更有利试样产生较高的内部温度和表面温度。

(3) 微波加热的次数、馈波方式、功率以及时间是影响岩石试样温度变化和裂纹扩展的重要因素, 对岩石试样进行单次、单侧、高功率和短时间的微波加热, 能显著提高岩石温度, 有效解决机械破岩刀具易受损的问题、提高机械掘进效率和缩短施工时间, 充分发挥机械破岩的优势, 从而降低岩石破碎的成本。

参考文献:

- [1] TOIFL M, MEISELS R, HARTLIEB P, et al. 3D numerical

- study on microwave induced stresses in inhomogeneous hard rocks[J]. Minerals Engineering, 2016, **90**: 29 - 42.
- [2] 崔礼生, 韩跃新. 微波技术在矿业中的应用[J]. 有色矿冶, 2005(增刊 1): 54 - 55. (CUI Li-sheng, HAN Yue-xin. Application of microwave technology in mining[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2005(S1): 54 - 55. (in Chinese))
- [3] HASSANI F, NEKOOGHAT P M, GHARIB N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwaveassisted underground excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, **8**(1): 1 - 15.
- [4] 戴俊, 李栋硕, 宋四达. 微波照射方式对玄武岩损伤特性影响研究[J]. 煤炭技术, 2018, **37**(8): 311 - 314. (DAI Jun, LI Dong-shuo, SONG Si-da. Study on basalt damage characteristics due to microwave irradiation method[J]. Coal Technology, 2018, **37**(8): 311 - 314. (in Chinese))
- [5] 戴俊, 徐水林, 宋四达. 微波照射玄武岩引起强度劣化试验研究[J]. 煤炭技术, 2019, **38**(1): 23 - 26. (DAI Jun, XU Shui-lin, SONG Si-da. Experimental study on strength degradation of basalt with microwave irradiation[J]. Coal Technology, 2019, **38**(1): 23 - 26. (in Chinese))
- [6] 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 Yuan-hui, LU Gao-ming, FENG Xia-ting, 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. (in Chinese))
- [7] 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): 1 - 9. (TIAN Jun, LU Gao-ming, FENG Xia-ting, et al. Experimental study on the microwave sensitivity of main rock-forming minerals[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40** (6): 1 - 9. (in Chinese))
- [8] KINGMAN S W, VORSTER W, ROWSON N A. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals Engineering, 2000, **13**(3): 313 - 327.
- [9] 黄孟阳, 彭金辉, 雷鹰, 等. 微波场中钛精矿的温升行为及吸波特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, **39**(2): 111 - 115. (HUANG Meng-yang, PENG Jin-hui, LEI Ying, et al. The temperature rise behavior and microwave-absorbing characteristics of ilmenite concentrate in microwave field[J]. Journal of Sichuan University
- (Engineering Science Edition), 2007, **39**(2): 111 - 115. (in Chinese))
- [10] YANG W, PICKLES C A, FORSTER J. Microwave fragmentation of a synthetic alundum-pyrite ore[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2018: 1 - 16.
- [11] 胡国忠, 朱怡然, 许家林, 等. 可控源微波场强化煤体瓦斯解吸扩散的机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, **46**(3): 480 - 484. (HU Guo-zhong, ZHU Yiran, XU Jia-lin, et al. Mechanism of the controlled microwave field enhancing gas desorption and diffusion in coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, **46**(3): 480 - 484. (in Chinese))
- [12] 欧阳红勇, 杨智, 熊雪良, 等. 微波场中钛铁矿的升温曲线及流态化浸出行为研究[J]. 矿冶工程, 2010, **30**(2): 73 - 75. (OUYANG Hong-yong, YANG Zhi, XIONG Xue-liang, et al. Study on elevated temperature curve and fluidization leaching behaviour of ilmenite in microwave field[J]. Mining And Metallurgical Engineering, 2010, **30**(2): 73 - 75. (in Chinese))
- [13] HE C L, MA S J, SU X J, et al. Comparison of the microwave absorption characteristics of hematite, magnetite and pyrite[J]. Journal of Microwave Power, 2015, **49**(3): 131 - 146.
- [14] WANG J P, JIANG T, LIU Y J, et al. Influence of microwave treatment on grinding and dissociation characteristics of vanadium titano-magnetite[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2019, **26**(2): 160 - 167.
- [15] KEANGIN P, NARUMITBOWONKUL U, RATTANADECHO P. Analysis of temperature profile and electric field in natural rubber glove due to microwave heating: effects of waveguide position[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, **297**: 12037.
- [16] 李勇, 屈钧利, 闫鹏飞. 微波照射对玄武岩强度的影响分析[J]. 煤炭技术, 2016, **35**(7): 33 - 34. (LI Yong, QU Jun-li, YAN Peng-fei. Influential analysis of basalt strength under microwave irradiation[J]. Coal Technology, 2016, **35**(7): 33 - 34. (in Chinese))
- [17] 李勇, 屈钧利, 秦立科. 微波照射下岩石颗粒温度分布及影响因素分析[J]. 煤炭技术, 2016, **35**(10): 103 - 106. (LI Yong, QU Jun-li, QIN Li-ke. Analysis of temperature distribution and influential factors of rock particle under microwave irradiation[J]. Coal Technology, 2016, **35**(10): 103 - 106. (in Chinese))

- [18] 朱要亮, 俞 缙, 蔡燕燕, 等. 不同环境与加热路径下的微波加热岩石的数值研究[J]. 微波学报, 2018, **34**(5): 84 - 89. (ZHU Yao-liang, YU Jin, CAI Yan-yan, et al. Numerical study on microwave heating of rock under different environment and heating path[J]. Journal of Microwaves, 2018, **34**(5): 84 - 89. (in Chinese))
- [19] CHEN H L, LI T, LI K L, et al. Experimental and numerical modeling research of rubber material during microwave heating process[J]. Heat & Mass Transfer, 2018, **54**(5): 1289 - 1300.
- [20] 张敏超. 微波照射下影响花岗岩损伤因素敏感性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017. (ZHANG Min-chao. Study on the Sensitivity of Mineral Components to the Damage of Granite Under Microwave Irradiation[D]. Xian: Xi'an University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [21] 陈 艳, 吴孟强, 张树人, 等. 低介熔融石英陶瓷制备及其介电性能研究[J]. 电子元件与材料, 2010, **29**(11): 12 - 14. (CHEN Yan, WU Meng-qiang, ZHANG Shu-ren, et al. Preparation and dielectric properties of low permittivity fused silica ceramics[J]. Electronic Components and Materials, 2010, **29**(11): 12 - 14. (in Chinese))
- [22] 吴 刚, 邢爱国, 张 磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **36**(10): 2110 - 2116. (WU Gang, XING Ai-guo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **36**(10): 2110 - 2116. (in Chinese))

标准摘录：标点符号用法（GB/T 15834—2011）逗号的定义与用法（一）

1 定义

句内点号的一种，表示句子或语段内部的一般性停顿。

2 基本用法

2.1 复句内各分句之间的停顿，除了有时用分号（见 4.6.3.1），一般都用逗号。

示例 1：不是人们的意识决定人们的存在，而是人们的社会存在决定人们的意识。

示例 2：学历史使人更明智，学文学使人更聪慧，学数学使人更精细，学考古使人更深沉。

示例 3：要是不相信我们的理论能反映现实，要是不相信我们的世界有内在和谐，那就不可能有科学。

2.2 用于下列各种语法位置：

a) 较长的主语之后。

示例 1：苏州园林建筑各种门窗的精美设计和雕镂功夫，都令人叹为观止。

b) 句首的状语之后。

示例 2：在苍茫的大海上，狂风卷集着乌云。

c) 较长的宾语之前。

示例 3：有的考古工作者认为，南方古猿生存于上新世至更新世的初期和中期。

d) 带句内语气词的主语（或其他成分）之后，或带句内语气词的并列成分之间。

示例 4：他呢，倒是很乐意地、全神贯注地干起来了。

示例 5：（那是那个没有月亮的夜晚。）可是整个村子——白房顶啦，白树木啦，雪堆啦，全看得见。

e) 较长的主语中间、谓语中间或宾语中间。

示例 6：母亲沉痛的诉说，以及亲眼见到的事实，都启发了我幼年时期追求真理的思想。

示例 7：那姑娘头戴一顶草帽，身穿一条绿色的裙子，腰间还系着一根橙色的腰带。

示例 8：必须懂得，对于文化传统，既不能不分青红皂白统统抛弃，也不能不管精华糟粕全盘继承。

f) 前置的谓语之后或后置的状语、定语之前。

示例 9：真美啊，这条蜿蜒的林间小路。

示例 10：她吃力地站了起来，慢慢地。

示例 11：我只是一个，弧弧单单的。