DOI：10.11779/CJGE202006016

多模谐振腔对赤峰玄武岩微波致裂效果研究

卢高明，冯夏庭，李元辉，李世平，苏香馨
（东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：岩石微波致裂技术被认为是一种非常有潜力的辅助机械破岩技术和深部岩体应力释放技术，对地下工程施工效率和深部工程施工安全具有重要意义。较短时间（几十秒或几分钟）的微波照射就可以使岩石发生致裂，甚至熔融。采用频率2.45 GHz多模谐振腔对两种规格的圆柱形玄武岩试样进行了不同功率下的微波照射处理，通过红外热成像仪测量不同时间时试样表面的温度分布，获得微波照射过程中试样的升温特性。通过强度和波速评价岩石的微波致裂效果，通过介电特性和微观特征阐述了微波致裂岩石的机理，并研究了微波照射对岩石普氏坚固性和凿岩比功的影响。结果表明：微波照射过程中，试样表面温度呈区域性不均匀分布状态，试样上某一点的温度与照射时间近似成线性增加关系。强度和波速与微波照射时间近似成线性降低关系。辉石（强微波吸收性矿物）吸收微波后产生大量的热量，橄榄石（强热膨胀性矿物）在高温的作用下产生较强的热膨胀作用，导致该玄武岩具有良好的微波致裂效果。微波照射后，岩石的普氏坚固性和凿岩比功发生了一定程度的降低，且微波功率越高，照射时间越长，普氏坚固性和凿岩比功降低的程度越大。

关键词：微波致裂；温度分布；强度折减；介电特性；普氏坚固性；凿岩比功
中图分类号：TU231 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2020)06－1115－10

作者简介：卢高明(1987—)，男，博士后，主要从事微波辅助破岩和岩石力学等方面的研究。E-mail: gaoming_lu@foxmail.com。

Effect of microwave-induced fracturing of Chifeng basalt by a multi-mode cavity

LU Gao-ming, FENG Xia-ting, LI Yuan-hui, LI Shi-ping, SU Xiang-xin
(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The microwave-induced fracturing of rock as a promising microwave-assisted mechanical rock breakage technology and can release the stress on a rock mass in deep underground projects. It is of significance to the construction efficiency and safety of underground projects. In a relatively short period of time (tens of seconds or minutes), microwave irradiation can cause rocks to be fractured or even melted. Two cylindrical basalt samples are irradiated by microwave at different powers using a frequency 2.45 GHz multi-mode resonator. The temperature distribution on the surface of the samples at different time is measured by an infrared thermal imager to obtain their heating characteristics during microwave irradiation. The microwave-induced fracturing effect of rock samples is evaluated by rock strength and wave velocity, the mechanism of microwave fracturing rock is expounded by dielectric properties and microscopic characteristics, and the influence of microwave irradiation on the Protodyakonov coefficient and rock crushing work ratio of rock is studied. The results show that the surface temperature of the samples is distributed in a regional non-uniform way, and the temperature at a certain point on the sample increases linearly with the irradiation time. The rock strength and wave velocity decrease linearly with the microwave irradiation time. Pyroxene (a mineral with strong microwave absorption) produces a large amount of heat after absorbing microwave, and olivine (a mineral with strong thermal expansion) produces a strong thermal expansion under the action of high temperature, resulting in great microwave fracturing effect of Chifeng basalt. After microwave irradiation, the Protodyakonov coefficient and rock crushing work ratio decrease to a certain extent. The higher the microwave power and the longer the irradiation time, the greater the degree of reduction of the Protodyakonov coefficient and the crushing work ratio of the rock.

Key words: microwave-induced fracturing; temperature distribution; strength reduction; dielectric property; Protodyakonov coefficient; rock crushing work ratio

0 引 言

岩石微波致裂技术被认为是一种非常有潜力的辅

基金项目：国家自然科学基金项目（41827806）；中国博士后科学基金项目（2018M642958）
收稿日期：2019－03－16

助机械破岩技术和深部岩体应力释放技术，对地下工程施工效率和深部工程施工安全具有重要意义[1-2]。硬岩表面微波致裂技术可辅助机械破岩刀具预裂坚硬岩石，提高刀具使用寿命和贯入度，降低换刀率和检修时间，从而降低施工成本，提高施工效率[3-4]。硬岩孔内微波致裂技术可对深部岩体进行应力释放[5]，解决由高应力集中引起的地质灾害，例如避免或降低岩爆风险，从而保证深部岩体工程的施工安全。

传统爆破法和机械破岩法依旧在破岩方法中占主导地位，这两类方法占 90%以上[4]。爆破法在大型岩石破碎工程具有无可比拟的优势，但该方法存在对原岩扰动性大、施工精度低和围岩支护困难等一系列缺点，使得机械破岩法得到了快速发展。在隧道施工中，TBM 和盾构机越来越成为广泛的隧道开挖方法。TBM 开挖硬岩隧道时，盘形滚刀磨损严重，换刀频繁，大大提高了维修成本，严重影响了施工进度[6-9]。据不完全统计，刀具消耗费用和维护更换时间分别占项目成本和工期的 30%~40%，甚至更多[10-13]。引汉济渭工程秦岭隧洞 TBM 施工，遇到坚硬类石英岩和花岗岩，在 TBM 累计掘进 2000 m 过程中，共计更换中心刀 38 把，单刀 1668 把，消耗单刀刀圈 858 个，使得施工成本显著增加，严重影响了施工进度[14]。

在盾构隧道施工过程中，由于孤石的影响，盾构机将出现刀具磨损严重、刀座变形、更换困难[15-16]。广州地铁三号线在天华区间遇到花岗岩孤石群，正常情况下盾构机几百米才换一次刀具，而在这个区间每前进十几米就需更换刀具，有些地方巨大的孤石块迎面挡在隧道前方，使盾构机根本无法通过，该盾构区间曾一度停工，工程无法推进，被地铁界公认为“世界性难题”。微波照射可对岩石内部产生损伤，降低岩石强度（单轴压缩、巴西劈裂和点荷载强度）[17-18]，而岩石强度的降低可在一定程度上提高 TBM 盘形滚刀的寿命和贯入度。因此，采用微波致裂技术辅助 TBM 或盾构机刀盘预裂坚硬岩石或孤石，解决的机械破岩刀具的磨损问题，从而降低施工成本，提高施工效率。

在采矿工程和岩土工程领域，Hassani 等[2,19-20]采用多模腔微波装置对不同微波功率下不同种类岩石的单轴压缩强度和抗拉强度进行了研究，通过试验和数值研究对比的方法研究了微波照射距离对硬岩表面温度的影响。Hartlieb 等[21-22]采用频率 2450 MHz、功率 3.2 kW 的工业微波装置研究了不同种类岩石的热物理特性及破裂损伤机制。Peinsitt 等[23]采用功率 3 kW、频率 2450 MHz 的多模谐振腔研究了干燥和饱水玄武岩、花岗岩和砂岩 3 种岩石的单轴压缩强度、波速和升温特性的影响。Hong 等[24]、Li 等[25]采用功率 6 kW、频率为 2450 MHz 的多模谐振腔对微波照射后煤的吸附解析等物理特性进行了研究。Zheng 等[26]采用功率 2 kW、频率 2450 MHz 的单模谐振腔研究了功率和微波照射时间对黑色辉长岩温度和波速的影响。Lu 等[27]采用功率 6 kW、频率 2450 MHz 多模谐振腔研究了常见主要造岩矿物的微波吸收能力，将矿物的微波吸收能力分为强微波吸收、中等微波吸收和弱微波吸收 3 类，可根据岩石的矿物成分判断岩石的微波敏感性。为了实现硬岩微波致裂技术的工程应用，卢高明[5]正在致力于研发新型微波致裂装置，针对微波辅助机械破岩和深部岩体应力释放两种工程应用，研发了敞开式微波致裂试验装置，可实现硬岩表面致裂和硬岩孔内致裂两种致裂方式。

多模谐振腔具有对材料加热更为均为的特点，可对小尺寸岩石试样进行微波加热，用于研究岩石的微波敏感性及加热效果。本文采用 2.45 GHz 的多模谐振腔，设备不同的微波功率和不同的微波照射时间，对微波照射过程试样表面的温度分布及微波照射后岩石的强度和波速特征进行了系统的研究。并通过计算得到岩石的普氏坚固性和凿岩比功，研究了微波功率和照射时间对岩石普氏坚固性和凿岩比功的影响作用。

1 试验方法

1.1 试验试样

玄武岩属基性火山岩，是地球洋壳和月球月海的最主要组成物质，也是地球陆壳和月球月陆的重要组成物质。玄武岩结构致密者压缩强度很大，存在玻璃质及气孔时则强度有所降低。本文试验采用的玄武岩取自内蒙赤峰，Xrd 分析结果表明，该玄武岩主要成分为斜长石（65%）、辉石（23.9%）和橄榄石（10.9%）（Xrd 标准衍射图谱见图 1）。

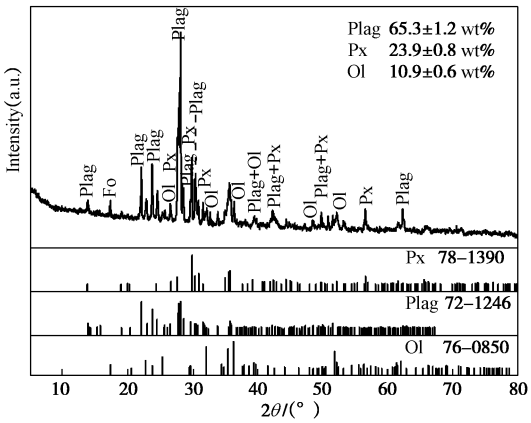
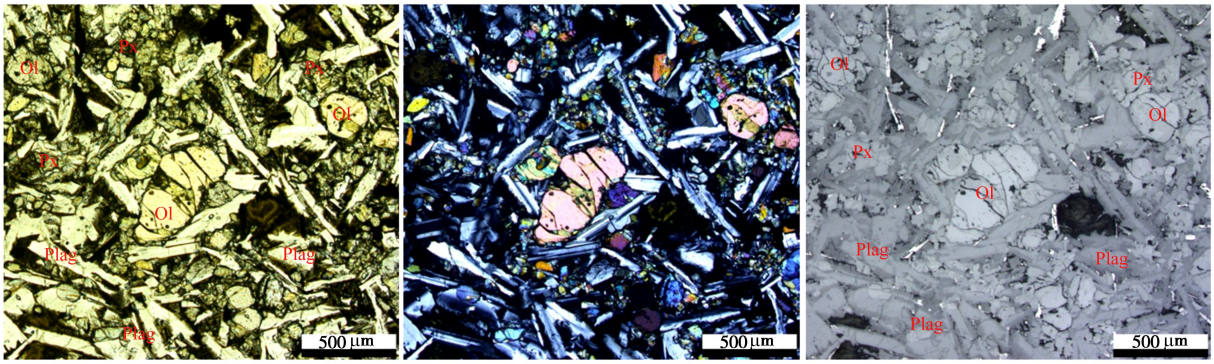


图 1 赤峰玄武岩 XRD 标准衍射图谱

Fig. 1 X-ray standard diffraction pattern of Chifeng basalt

通过显微镜图像（图 2）观察该玄武岩的矿物分布结构，该玄武岩块状构造，间粒（填隙的辉石）结构，辉石呈细小颗粒分布于橄榄石周围。由于辉石为



（a）单偏光 （b）正交偏光 （c）反射光

图 2 赤峰玄武岩显微镜图像（放大倍数 50）

Fig. 2 Microscope images of Chifeng basalt (Magnification of 50 times, columns at left side, middle and right sides are obtained using plane-polarised light, cross-polarised light and reflected light)

强微波吸收类矿物[27-28]，导致玄武岩具有较强的微波吸收能力。

制备 ϕ 50 mm×100 mm 和 ϕ 50 mm×50 mm 两种规格的圆柱形试样，对试样上下端面进行打磨处理，两端面平整度偏差在 0.05 mm 以内，轴向垂直度不超过 0.001 rad。对制备好的试样在电烘干箱里以 110℃烘干 48 h，冷却至室温后进行波速和密度测量。所有试样均从同一岩块上取得，以降低试验结果的离散性，保证试验结果的可对比性。

1.2 试验装置与方法

谐振腔是微波的一个运作空间，微波在谐振腔体内的反射，使得谐振腔内形成多种工作模式。谐振腔内的工作模式越多，电磁场的分布结构就越多，谐振腔内的微波能分布也就越均匀，对材料的加热也就更均匀。微波加热试验采用频率 2.45 GHz 的连续波多模谐振腔[18, 27]，功率 0～6 kW 可调。该装置主要由多源微波发生器（由 6 个 1 kW 的磁控管组成）、矩形传输波导（WR430，尺寸为 109.2 mm×54.6 mm）和矩形谐振腔（490 mm×490 mm×490 mm）组成。该装置的工作原理为：微波发生器产生的连续波微波能量由矩形波导传输到微波谐振腔，被岩石材料吸收后，微波能转化为热能。

设置 3 种不同的功率（1，3，5 kW）对试样进行微波加热，由于不同功率下试样崩开破碎的时间不同（对于同一规格的试样，微波功率越高，试样崩开需要的时间越短），为了能够进行强度测试，设置微波加热时间小于试样崩开破碎的时间（表 1）。微波加热、波速和强度测试均进行 3 次重复试验，试验结果为 3 次重复试验的平均值。

采用日本 NEC Avio 公司的 R500EX-Pro（测温量程为-40-2000℃，帧频 30 Hz）红外热像仪对试样表面的温度分布进行测量。通过微波腔体内置的红外测温传感器可得到微波加热过程试样上表面近似中心位置的实时温度。微波加热和温度分布测试方法：每次试验将一个试样放置于微波腔体内的莫来石（弱微波吸收材料）垫块上，按照设置的功率和照射时间对试样进行加热，微波加热后立即打开微波腔体的炉门进行红外热成像仪温度分布测试。从而获得不同照射时间时试样表面的温度分布，通过后处理，可得到试样表面的最高温度、最低温度和平均温度等。

表 1 玄武岩微波加热及单轴压缩强度测试试验方案

Table 1 Test scheme of microwave heating and uniaxial compression strength of basalt

微波功率/kW	照射时间/s
1	0, 30, 60, 90, 180, 210, 300
3	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
5	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30

对未进行微波处理和微波处理后的试样分别进行 P 波波速和强度测试(单轴压缩强度测试方案见表 1)。规格 ϕ 50 mm×100 mm 的圆柱形试样用于进行单轴压缩强度测试，规格 ϕ 50 mm×50 mm 的圆柱形试样用于进行巴西劈裂和点荷载强度测试，测试方法按照国际岩石力学学会（ISRM）建议的试验方法[29-31]。对微波照射后的试样，在常温常压下冷却至室温后进行波速和强度测试。该玄武岩试样在未进行微波处理时的基本力学参数如表 2[17]所示（平均 P 波波速和平均密度是由 56 个样品测试获得的，单轴压缩强度、巴西劈裂强度和点荷载强度是由 5 次重复试验获得的）。

表 2 玄武岩试样基本力学参数[17]

Table 2 Basic mechanical parameters of basalt samples

P 波波速 /(m·s^{-1})	平均密度 /(g·cm^{-3})	单轴压缩强度/MPa	巴西劈裂强度/MPa	点荷载强度/MPa
5900	2.91	282.50	15.60	11.61

1.3 介电特性

通常采用材料的介电特性（介电常数、损耗因子和损耗正切）来反映介质材料的微波特性，即材料吸收微波后将微波能转化为热量的能力。由于有些矿物存在制样困难的问题，不能采用合适的方法来测量它们的介电特性，可通过矿物的升温特性直接反映其微波吸收能力[27-28]。

相对介电常数 ε 用来表征介质材料的介电性质，复数介电常数表示为

$$\varepsilon = \varepsilon' - \mathrm{i}\varepsilon'' \quad 。 \tag{1}$$

式中 ε' 为复数介电常数的实部，即通常所说的介电常数，用来表征电介质极化和储存能量的能力；ε'' 为复数介电常数的虚部，又称损耗因子，用来表征电介质将储存的能量转化为热能能力。

损耗正切 $\tan\delta$ 为复介电常数虚部(ε'')与实部(ε')的比值，用来表征电介质储存能量并将其转化为热量的能力：

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad 。 \tag{2}$$

微波照射岩石后，岩石吸收微波能量转换为岩石的热能，导致岩石温度升高。岩石升温后，岩石内矿物成分发生体积膨胀，导致岩石内部产生损伤和破裂。由于不同矿物成分介电特性的不同，导致不同矿物成分具有不同的微波敏感性；由于不同矿物成分热膨胀系数不同，导致不同岩石产生不同的热膨胀。因此，岩石的升温特性取决于岩石内各矿物成分的综合介电特性，致裂效果取决于岩石内各矿物的升温特性和热膨胀性。

本文采用型号为 Keysight E5063A 的矢量网络分析仪（频率范围为 100 kHz～18 GHz）测试玄武岩试样的介电特性。采用测试方法为同轴传输线法，将试样制成外径 7 mm、内径 3 mm、厚度 10 mm 的圆环状试样（非石蜡与岩石粉末的混合试样）。分别对未照射微波和不同照射时间后（功率 5 kW，照射时间分别为 10，20，30 s）的试样进行测试。

1.4 普氏坚固性与凿岩比功

岩石坚固性是评判岩石破碎难易程度的指标，是岩石在各种破坏条件下抵抗各种外力的能力，也是采矿工程最基本的概念之一[32]。岩石越坚固，抵抗外力的能力越强。1972 年，普洛托奇雅可诺夫把岩石普氏坚固性定义为[33]

$$f_{\bar{\sigma}} = \frac{R+10\sigma'}{600} + \sqrt{\frac{R+10\sigma'}{120}} \quad , \tag{3}$$

式中，$f_{\bar{\sigma}}$ 为普氏坚固性系数，R 为试样的抗压强度（MPa），σ' 为岩块的抗压裂强度（MPa）[33]，

$$\sigma' = P\left(\frac{\gamma}{q}\right)^{0.67} \quad , \tag{4}$$

其中，γ 为岩石的重度（g/cm^3），q 为岩块重量（g），P 为压裂荷载（kN），这里采用巴西劈裂荷载。

在冲击理论中，凿岩比功是指在冲击凿入作用下破碎单位体积岩石所需要的能量，是采用凿岩爆破法破岩中的基本概念之一，既可衡量工具的凿岩效果，又可反映岩石对某种工具的抗凿碎能力。凿岩比功和点荷载强度的经验关系为[32]

$$\alpha = a I_{\mathrm{SA}} \quad , \tag{5}$$

式中，α 为凿岩比功（MPa），a 为修正系数，经验值为 3.5～4.5，这里取 4，I_{SA} 为点荷载强度[32]，

$$I_{\mathrm{SA}} = \frac{P'}{A} \quad , \tag{6}$$

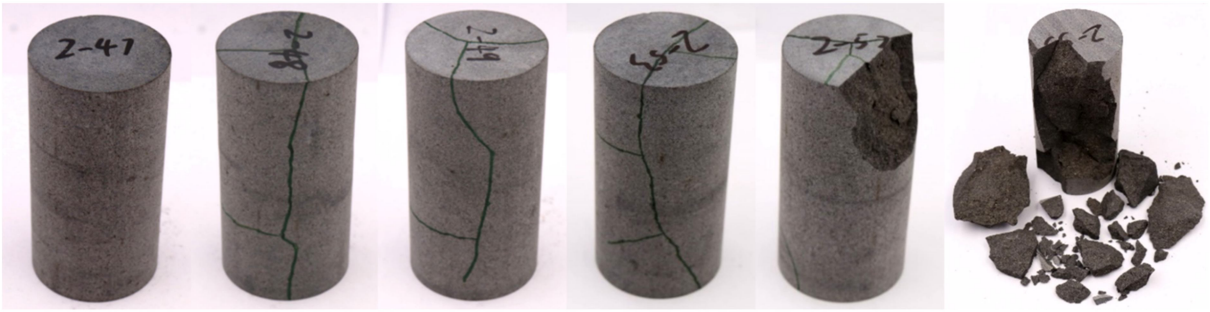
式中，P'为试样断裂时的临界荷载（kN），A 为两压头间试样的横截面积（m^2）。

2 试验结果

2.1 致裂效果

玄武岩的主要成分为斜长石、辉石和橄榄石，其中辉石为强微波吸收类矿物[27]，橄榄石为强热膨胀性矿物[17]。辉石吸收微波能后，将微波能转化为热能，导致岩石温度升高，橄榄石升温后产生较强的热膨胀作用，使岩石内部产生微裂纹，甚至使岩石崩开破碎。微波照射后，玄武岩试样表面能观察到明显的裂纹扩展，随着微波照射时间的增加，试样发生崩开破碎，试验过程中能够听到试样崩开的碎块弹射到微波腔体壁上撞击的声音。微波功率越高，试样崩开所需要的时间越短。以高 100 mm 的圆柱形试样为例，功率 1 kW 时，试样崩开时间约为 320 s；功率 3 kW 时，试样崩开时间约为 100 s；功率 5 kW 时，试样崩开时间约为 50 s。由于高度 100 mm 圆柱形试样的体积大于高度 50 mm 的圆柱形试样，导致高 100 mm 的圆柱形试样崩开破碎的时间大于高 50 mm 的圆柱形试样。这是由于功率一定时，试样体积越大，单位体积试样内获得的功率密度越小。

微波功率一定时，照射时间越长，试样表面产生的裂纹越发育，试样崩开后碎块的块度越均匀。功率 5 kW 条件下两种规格圆柱形试样的微波致裂效果如图 3 所示，微波照射 10 s 时，高 100 mm 的圆柱形试样表面没有观察到明显的裂纹。照射时间为 20，30，40 s 时，试样表面的裂纹扩展基本贯穿了整个试样。试样两端面的裂纹扩展以近似圆心位置呈放射状，裂纹从试样端面延伸到圆柱面，圆柱面上的主裂纹近似平行于圆柱母线，主裂纹上有分支裂纹，主裂纹和分



5 kW，10 s　5 kW，20 s　5 kW，30 s　5 kW，40 s　5 kW，50 s　5 kW，60 s

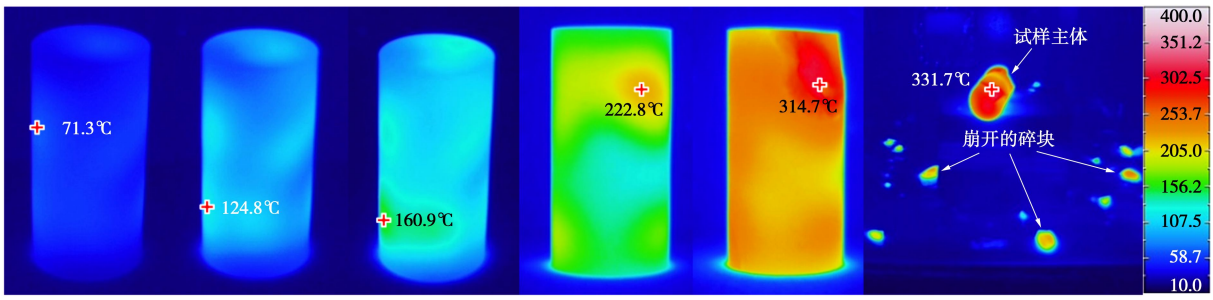
（a）高100 mm圆柱形试样[18]

5 kW，10 s　5 kW，20 s　5 kW，30 s　5 kW，40 s　5 kW，50 s　5 kW，60 s

（b）高50 mm圆柱形试样

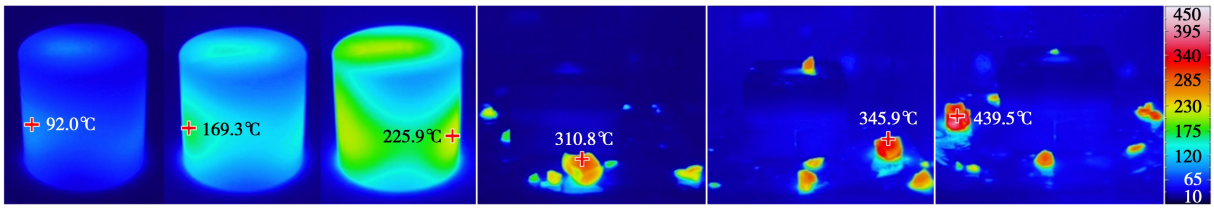
图 3　两种规格圆柱形玄武岩试样微波致裂效果

Fig. 3 Effects of microwave-induced fracturing of two types of cylindrical basalt samples



5 kW，10 s　5 kW，20 s　5 kW，30 s　5 kW，40 s　5 kW，50 s　5 kW，60 s

（a）高100 mm圆柱形试样[18]



5 kW，10 s　5 kW，20 s　5 kW，30 s　5 kW，40 s　5 kW，50 s　5 kW，60 s

（b）高50 mm圆柱形试样

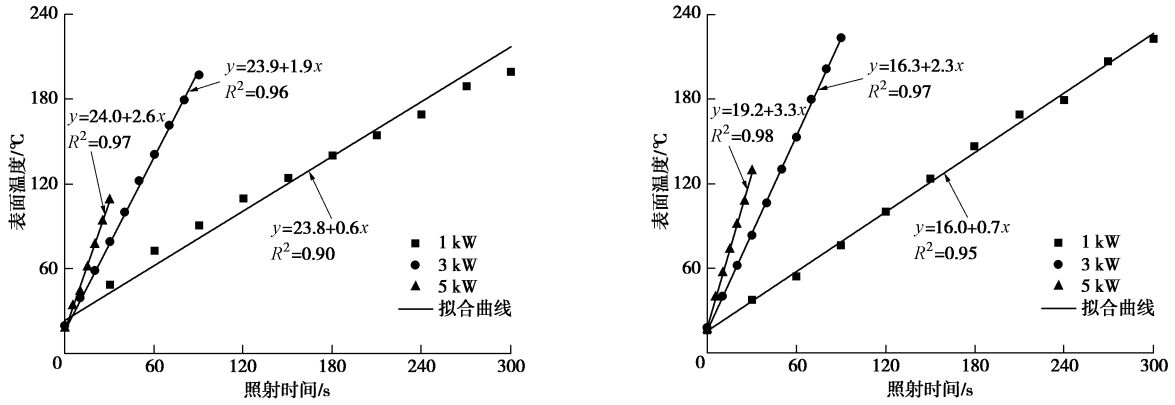
图 4　两种规格圆柱形玄武岩试样表面温度分布（室温 16℃，十字光标指最高温度所在位置）

Fig. 4 Surface temperature distribution of two types of cylindrical basalt samples (room temperature of 16℃, and cross cursor referring to location of maximum temperature)

支裂纹贯穿整个试样表面。照射时间 50 s 时，高 100 mm 圆柱形试样的上端部发生了一块破裂，随着照射时间继续增加（照射时间 60 s），试样的破裂程度更加严重。高 50 mm 的圆柱形试样在微波照射 40 s 时发生了崩开破碎，随着照射时间的增加（照射时间 50，60 s），试样崩开后碎块的数量越多，破碎的块度也越均匀（图 3（b））。

2.2　升温特性

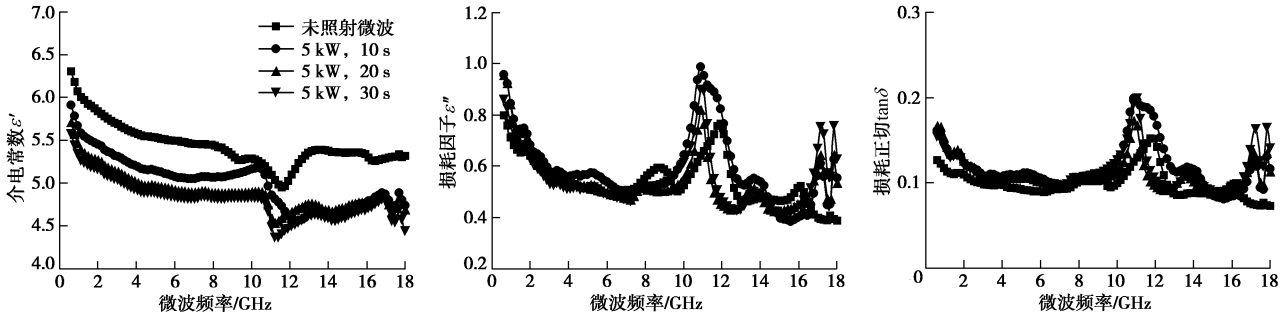
由红外热成像仪获得的两种规格圆柱形试样在不同照射时间试样表面温度分布如图 4 所示，试样表面温度呈区域性不均匀分布状态（图 4），而非均匀分布状态。微波照射时间越长，试样的表面温度越高。高 100 mm 的圆柱形试样在微波照射 50 s 时发生崩开，试样断口处的温度高于试样的表面温度（断口处的最



（a）高100 mm圆柱形试样 （b）高50 mm圆柱形试样

图 5 两种规格圆柱形玄武岩试样上表面近似中心位置表面温度与照射时间关系

Fig. 5 Relationship between surface temperature and exposure time at approximate center position of upper surface of cylindrical basalt samples with two specifications



（a）介电常数 （b）损耗因子 （c）损耗正切

图 6 不同照射时间下玄武岩试样的介电特性（介电常数、损耗 因子和损耗正切）

Fig. 6 Dielectric properties (dielectric constant, loss factor, and loss tangent) of Chifeng basalt after different exposure time (frequency range of 0.5 GHz to 18 GHz)

高温度为 314.7℃，其它位置的表面温度最高约为 250℃），说明试样内部温度高于试样的表面温度，这和之前的研究结果一致[17]。照射时间为 60 s 时，崩开的端口处最高温度为 331.7℃，初始状态为竖直放置的试样由于崩开碎块的相互作用力而倒置在微波腔体的垫块上，崩开的碎块散落在微波腔体内（图 4（a））。高 50 mm 的圆柱形试样，在微波照射时间超过 40 s 后发生崩开破碎，照射时间为 40，50，60 s 时，断口处的最高温度分别为 310.8℃，345.9℃，439.5℃。由于试样崩开的块度较为均匀，导致试样主体从莫来石垫块上崩落（图 4（b））。

3 种功率下测到试样表面温度与时间的关系如图 5 所示。高 100 mm 圆柱形试样，在功率 1 kW 时前 5 min 试样表面温度与时间成近似直线关系，之后升温速率逐渐降低，然后趋于稳定，功率 3 kW 和 5 kW 时，试样分别在加热至 100 s 左右和 50 s 左右时发生崩开破坏，崩开时伴随响声，能听到崩开的试样碎块弹射到微波炉壁上的声音。总的来说，试样表面温度与照射时间成线性增加关系；微波功率越高，升温速率越大；大尺寸试样的升温速率低于小尺寸试样的升温速率。

两种规格试样在 3 种微波功率下起裂和崩裂的临界时间和临界温度（临界时间和临界温度均为 3 个试样的平均值，临界温度为试样表面的平均温度）如表 3 所示。微波功率越大，试样起裂和崩裂的临界时间越短，起裂和崩裂的临界温度越低。这是由于微波功率越大，单位体积的岩石在单位时间内吸收的微波能量越多，岩石内产生的热膨胀应力在较短时间内就达到了试样起裂和崩裂的临界应力。起裂和崩裂的临界温度低，是由于在较短时间内试样内部的高温还没有传递到试样表面。

表 3 不同规格试样在不同功率条件下起裂和崩裂的临界时间和临界温度

Table 3 Critical time and temperature of cracking and bursting of samples with different specifications under different microwave powers

试样规格/mm	功率/kW	起裂		崩裂	
		临界时间/s	临界温度/℃	临界时间/s	临界温度/℃
ϕ 50×100	1	31	48.7	320	230.4
	3	19	58.7	100	210.5
	5	11	44.3	50	160.3
ϕ 50×50	1	26	36.4	306	220.5
	3	14	51.5	93	205.6
	5	6	39.6	38	151.2

采用同轴传输线法测得的不同照射时间后玄武岩的介电特性（介电常数 ε'、损耗因子 ε'' 和损耗正切 $\tan\delta$）如图 6 所示。在 100 kHz～18 GHz 频率范围内，玄武岩试样的介电特性随频率具有一定的频散现象。在频率 2.45 GHz 时，在功率 5 kW 条件下，玄武岩的介电常数随微波照射时间增加发生了一定程度的降低，损耗因子先升高后降低。在未照射微波时的介电常数 ε'、损耗因子 ε'' 和损耗正切 $\tan\delta$ 分别为 5.8，0.6 和 0.10（昆明砂岩和北山花岗岩分别为 4.3，0.18，0.04 与 4.0，0.06，0.02），这个数值是偏高的，说明该玄武岩材料具有较强的储存能量和将微波能转化为热量的能力。具有较强的介电特性是该玄武岩具有较高升温特性的本质原因。

2.3　强度折减

在相当长的时间里，材料力学中把强度极限作为岩石破碎的判据。3 种微波功率下，玄武岩的强度(单轴压缩强度、巴西劈裂强度和点荷载强度)都随照射时间的增加而有不同程度的降低，与照射时间近似成线性降低关系，且微波功率越高，强度降低的越快（通过 3 条曲线的斜率判断）。例如在功率 1 kW 和 3 kW，照射时间 60 s 时，单轴压缩强度分别降低了 8%和 18%（图 7），巴西劈裂强度分别降低了 4%和 31%，点荷载强度分别降低了 27%和 51%[17]。两种规格玄武岩试样的 P 波波速均发生了一定程度的降低。微波照射时间越长，波速降低的程度越大；微波功率越高，波速降低的越快。微波照射后试样波速的降低，说明微波照射使试样内部产生了微裂隙。微波功率越大，照射时间越长，试样内的裂隙发育程度越严重。

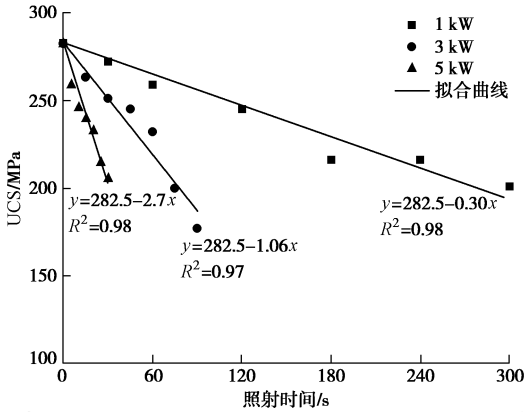
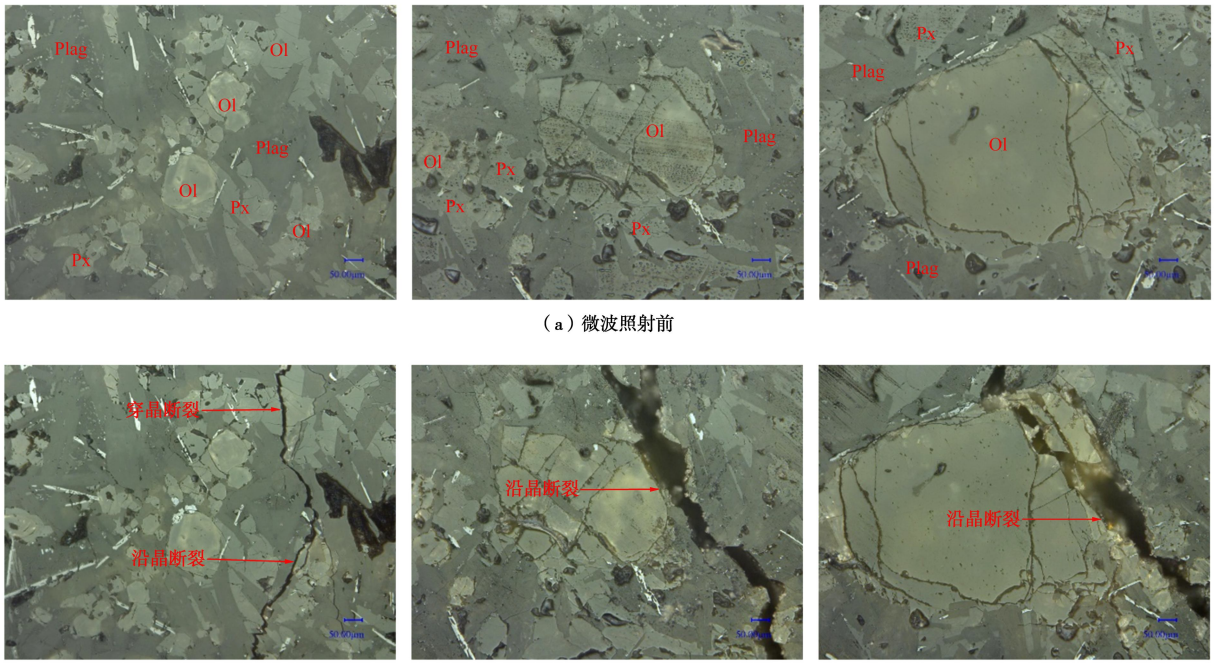


图 7 3 种微波功率下玄武岩单轴压缩强度与微波照射时间关系

Fig. 7 Relationship between uniaxial compression strength and exposure time of basalt samples for three power levels

功率 5 kW 条件下，由超景深显微镜观察到的玄武岩试样内部微观裂纹扩展情况如图 8 所示。微波照射后，试样内部发生了沿晶断裂和穿晶断裂。该玄武岩的主要矿物成分为斜长石、辉石和橄榄石，辉石呈细小颗粒分布于橄榄石颗粒周围。值得注意的是，穿晶断裂主要发生在橄榄石颗粒内部，沿晶断裂主要发生在橄榄石和其它矿物之间，这些穿晶断裂和沿晶断裂沿着橄榄石拓展与连通，形成宏观裂纹。这是由于辉石为强微波吸收性矿物[27]，橄榄石为强热膨胀性矿物[34]。照射微波后，辉石吸收微波产生大量的热量，热量传递给橄榄石，产生较强的热膨胀。因此，由于



（a）微波照射前

（b）微波照射后

图 8 微波照射前后玄武岩试样内部微观裂纹扩展情况(放大 300 倍)

Fig. 8 Microscopic crack growth in basalt samples before and after microwave irradiation (magnification of 300times)

该玄武岩含有强微波吸收性矿物（辉石）和强热膨胀性矿物（橄榄石），导致其具有较强的微波致裂效果。强微波吸收性矿物提供热量，强热膨胀性矿物提供热膨胀作用。这也是不同种类岩石具有不同致裂效果的原因，如果只含有强微波吸收性矿物，不含强热膨胀性矿物，那么微波照射后岩石发生熔融，例如 Austral 黑色辉长岩[26]。

2.4 普氏坚固性与凿岩比功

由式（3），（4）计算得到的不同微波功率和照射时间下玄武岩的普氏坚固性系数如图 9 所示，3 种微波功率下，玄武岩普氏坚固性系数都随照射时间增加而有不同程度的降低，与照射时间成近似线性降低关系。照射时间越长，普氏坚固性系数下降的程度越大；微波功率越高，普氏坚固性系数下降的越快。3 种功率下普氏坚固性系数都降低了一个级别，由最坚固降低为很坚固。这说明微波照射能够降低岩石的坚固性，即降低岩石抵抗外力的能力，如抗钻性、抗爆性等。

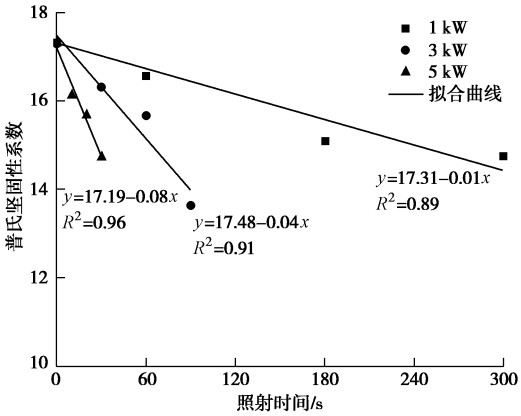


图 9 3 种功率条件下玄武岩普氏坚固性系数与照射时间关系

Fig. 9 Protodyakonov coefficient of basalt vs. exposure time under three power levels

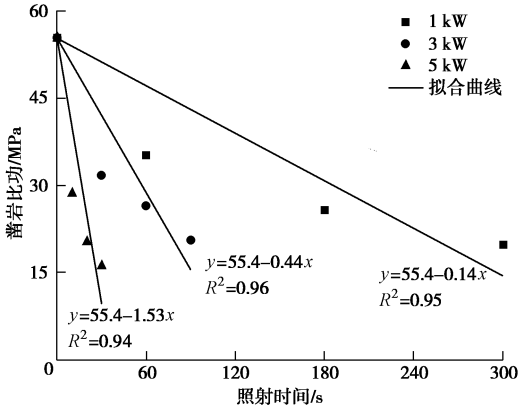


图 10 3 种功率条件下玄武岩凿岩比功与照射时间关系

Fig. 10 Rock crushing work ratio of basalt vs. exposure time under three power levels

由式（3），（4）计算得到的不同微波功率和照射时间下的玄武岩的凿岩比功计算结果如图 10 所示。凿岩比功的计算结果与点荷载强度具有相似的发展规律，凿岩比功随微波照射时间近似成线性降低关系。3 种微波功率下，凿岩比功都发生了显著的降低，照射时间越长，凿岩比功下降的成都越大；微波功率越高，凿岩比功下降的越快。这说明采用微波照射能够显著降低岩石对凿岩工具的抗凿碎能力，即显著降低岩石破碎时所需要的能量。

3 结 论

（1）试样表面温度分布呈不均匀分布状态，试样上某一点的温度与照射时间近似成线性增加关系。微波功率越高，试样升温越快，小尺寸试样的升温速率大于大尺寸试样。试样崩开后，测到的最高温度发生了急剧升高，说明试样内部温度高于试验表面温度。

（2）微波照射后，试样表面有裂纹产生，然后发生崩开破碎。由于功率一定时，小尺寸试样获得的功率密度大于大尺寸试样，导致小尺寸试样崩开破碎的时间小于大尺寸试样。微波功率越高，试样崩开时的时间越短；照射时间越长，试样崩开的块数越多，块度越均匀。

（3）具有较强的升温特性和热膨胀性导致岩石具有较好的微波致裂效果。强微波吸收性矿物吸收微波后产生热量，强热膨胀性矿物在热量的作用下产生热膨胀作用使岩石致裂。沿晶断裂和穿晶断裂以及宏观裂纹的产生，是岩石强度和波速降低的本质原因。

（4）微波照射后，岩石的普氏坚固性和凿岩比功均发生了一定程度的降低，且微波功率越高，照射时间越长，普氏坚固性和凿岩比功降低的程度越大。说明微波照射能够有效降低岩石的坚固性和岩石对凿岩工具的抗凿碎能力，降低岩石破碎时所需要的能量。

参考文献：

[1] LU G M, FENG X T, LI Y H, et al. The microwave-induced fracturing of hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(9): 3017－3032.

[2] HASSANI F, NEKOOVAGHT P M, 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.

[3] LINDROTH D P, MORRELL R J, BLAIR J R. Microwave Assisted Hard Rock Cutting: 5003144[P]. 1991.

[4] 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 Gao-ming, LI Yuan-hui, 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))

[5] 卢高明. 硬岩微波辐射致裂试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018. (LU Gao-ming. Experimental Study on the Microwave Fracturing of Hard Rock[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018. (in Chinese))

[6] ENTACHER M, LORENZ S, GALLER R. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **70**(9): 450－459.

[7] ROSTAMI J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **57**: 173－182.

[8] JAIN P, NAITHANI A K, SINGH T N. Performance characteristics of tunnel boring machine in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps–A case study[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, **6**(1): 36－47.

[9] XIA Y M, ZHANG K, LIU J S. Design optimization of TBM disc cutters for different geological conditions[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2015, **3**(4): 218－231.

[10] HASSANPOUR J, ROSTAMI J, ZHAO J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2011, **26**(5): 595.

[11] GONG Q M, ZHAO J. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(1): 8－18.

[12] DELIORMANLI A H. Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones[J]. Construction and Building Materials, 2012, **30**: 16－21.

[13] XIA Y M, OUYANG T, ZHANG X M, et al. Mechanical model of breaking rock and force characteristic of disc cutter[J]. Journal of Central South University, 2012, **19**(7): 1846－1858.

[14] 党建涛, 刘福生, 王红霞, 等. 引汉济渭工程秦岭隧洞 TBM 的刀具选型试验[J]. 水利水电技术, 2017, **48**(12): 63－69, 94. (DANG Jian-tao, LIU Fu-sheng, WANG Hong-xia, et al. Experiment on selection of TBM cutter for construction of Qinling Tunnel for Hanjiang-to-Weihe Rriver Valley Water Diversion Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, **48**(12): 63－69, 94. (in Chinese))

[15] LI X G, YUAN D J. Creating a working space for modifying and maintaining the cutterhead of a large-diameter slurry shield: a case study of Beijing railway tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **72**: 73－83.

[16] FILBÀ M, SALVANY J M, JUBANY J, et al. Tunnel boring machine collision with an ancient boulder beach during the excavation of the Barcelona city subway L10 line: a case of adverse geology and resulting engineering solutions[J]. Engineering Geology, 2016(200): 31－46.

[17] LU G M, FENG X T, LI Y H, 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.

[18] LU G M, FENG X T, LI Y H, et al. The influence of microwave treatment on mechanical behaviour of compact basalts under different confining pressures[J/DL]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020. https://doi.org/10.1016/ j.jrmge.2019.06.009

[19] HASSANI F, NEKOOVAGHT P. The development of microwave assisted machineries to break hard rocks[C]// Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (isarc), 2011, Seoul: 678－684.

[20] HASSANI F, NEKOOVAGHT PM, RADZISZEWSKI P, et al. Microwave assisted mechanical rock breaking[C]// Proceedings of the 12th Isrm International Congress on Rock Mechanics, 2011, Beijing: 2075－2080.

[21] HARTLIEB P, TOIFL M, KUCHAR F, et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution[J]. Minerals Engineering, 2016, **91**: 34－41.

[22] HARTLIEB P, KUCHAR F, MOSER P, et al. Reaction of different rock types to low-power (3.2 kW) microwave irradiation in a multimode cavity[J]. Minerals Engineering, 2018, **118**: 37－51.

[23] PEINSITT T, KUCHAR F, HARTLIEB P, et al. Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and

sandstone[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2010, **2**(1): 18－29.

[24] HONG Y D, LIN B Q, ZHU C J, et al. Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals[J]. Applied Thermal Engineering, 2016(6): 1109－1125.

[25] LI H, LIN B, 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.

[26] ZHENG Y L, ZHANG Q, ZHAO J. Effect of microwave treatment on thermal and ultrasonic properties of gabbro[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **127**: 359－369.

[27] 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, **11**2(2): 1523－1532.

[28] 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. (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): 2066－2074. (in Chinese))

[29] BIENIAWSKI Z T, BERNEDE M J. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1979, **16**(2): 138－140.

[30] Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1978(15): 99－103.

[31] FRANKLIN J A. Suggested method for determining point load strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985(2): 51－60.

[32] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiao-he, YU Jing. Rock Fragmentation[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984. (in Chinese))

[33] E.T.巴拉诺夫, 徐小荷. 岩石普氏坚固性系数的应用[J]. 国外金属矿采矿, 1985(1): 17－18. (BARANOV E T, XU Xiao-he. The application of rock Prussian firmness coefficient[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 1985(1): 17－18. (in Chinese))

[34] AHRENS T J. Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 1995.