

DOI: 10.11779/CJGE201608018

# 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展

卢高明<sup>1</sup>, 李元辉<sup>\*1</sup>, HASSANI Ferri<sup>2</sup>, 张希巍<sup>1</sup>

(1. 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 麦吉尔大学采矿与材料工程系, 魁北克 蒙特利尔 H3A2A7)

**摘 要:** 微波辅助机械破岩是微波加热技术和机械破岩技术相结合的一种混合型破岩方法。岩石内不同矿物成分对微波能具有不同的吸收特性, 各矿物不同的热膨胀产生的内应力使岩石内发生沿晶断裂和穿晶断裂, 使试样产生损伤和微裂纹, 这会引起岩石强度的降低。辐射功率和辐射时间是影响岩石力学特性的重要参数, 一定功率的微波辐射处理后, 试样的点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度发生显著降低, 微波功率越高, 辐射时间越长, 对试样强度的折减效果越明显。数值研究结果与试验研究结果基本一致, 增加功率的同时降低辐射时间对试样强度折减具有更好的效果。岩石点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度的降低能够显著提高机械破岩设备刀具的侵入率和刀具寿命, 解决机械刀具的磨损问题。微波辅助机械破岩对钻孔、TBM 掘进和实现金属矿岩连续开采都具有重要影响作用。

**关键词:** 微波辅助破岩; 岩石破碎; TBM; 强度折减; 连续采矿

中图分类号: TU231

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)08 - 1497 - 10

**作者简介:** 卢高明(1987 - ), 男, 博士研究生, 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。

## Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach

LU Gao-ming<sup>1</sup>, LI Yuan-hui<sup>1</sup>, HASSANI Ferri<sup>2</sup>, ZHANG Xi-wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Shenyang 110819, China; 2. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal H3A2A7, Canada)

**Abstract:** The microwave-assisted mechanical rock breaking system is a rock fragmentation method which uses the combination of microwave heating technology and the mechanical excavating technology. Different minerals have different degrees of absorption to microwave energy, so intergranular and transgranular fractures occur within the specimen after microwave radiation treatment, and the specimen is weakened and micro cracks are generated due to the internal stress caused by thermal expansion of different minerals within the rocks. This causes the rock strength to be reduced. Microwave power and exposure time are the important parameters to influence the mechanical properties of rocks. The point load strength, tensile strength and compressive strength decrease significantly with a certain power level of microwave radiation. The higher the microwave power and the longer the exposure time, the more the strength reduction. The numerical results are compared with the experimental ones and show that the strength reduction is much quicker by increasing the power level of microwave in shorter time of exposure. The life and penetration rate of cutters of the rock mechanical equipment can be increased by the strength reduction of rocks, which can contribute to resolving the disc cutter wear problem. Microwave-assisted mechanical rock breaking has significant influence on drilling, TBM tunnelling and realizing the continuous mining of metal mine.

**Key words:** microwave-assisted rock breakage; rock breakage; tunnel boring machine; strength reduction; continuous mining

## 0 引 言

破碎岩石和防止岩石破碎是采矿和深部岩体工程中的主要矛盾, 其核心问题是岩石在空间和时间上的布局 and 安排。例如采矿、隧道掘进和大型地下硐室等的开挖过程是把岩石从岩体中破碎出来, 对于被开挖形成的空间又要加以维护, 以防止周围岩石进一步破碎<sup>[1-3]</sup>。在科学技术突飞猛进的今天, 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<sup>[4]</sup>。爆破法在大型岩石破碎工程具有无

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274055); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB02B01); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130042110010); 中央高校基本科研业务专项基金(N150104007)

收稿日期: 2016 - 01 - 25

\*通讯作者 (E-mail: liyuanhui@mail.neu.edu.cn)

可比拟的优势,在当前和今后相当长的时间内仍将大量存在,但是该方法对原岩扰动性大,容易造成周边岩石破坏,存在施工精度低、围岩支护困难等一系列缺点<sup>[4-5]</sup>。为了克服爆破法的这些缺点,机械破岩法得到了快速发展,基于机械破岩的有切削、冲凿、碾压、研磨等不同方式的破岩方法和技术<sup>[6]</sup>,然而机械破岩也具有其局限性,在破碎抗压强度较高的硬岩时,机械切削破碎极为困难,刀具磨损、维修量大以及侵入率低是机械破岩的主要问题<sup>[2, 4]</sup>。近年来,一些新技术逐渐被引入到机械破岩系统中,其中微波辅助机械破岩具有广泛的应用前景<sup>[4, 7-8]</sup>。

1945年美国的一位雷达工程师偶然发现了微波的热效应,1947年北美的Raytheon公司研制成世界上第一台微波炉,在50年代微波炉大多用于工业,60年代才服务于民用<sup>[9]</sup>。在矿冶领域,Chen等<sup>[10]</sup>和Walkiewicz等<sup>[11-12]</sup>发现微波对大部分天然矿物都具有一定影响作用,其研究成果为微波在矿物加工方面的应用奠定了一定基础。随后,Kingman等<sup>[13-17]</sup>、Vorster等<sup>[18]</sup>、Whittles等<sup>[19]</sup>、Jones等<sup>[20-21]</sup>、John等<sup>[22]</sup>和Monti等<sup>[23]</sup>对微波辅助选矿、磨碎和提纯以及微波对岩石的反应机理进行了大量的试验和数值研究。微波辐射处理明显降低矿石的邦德功指数,这能够降低矿石破碎所需要的能量<sup>[15, 18]</sup>。微波功率越高、辐射时间越长,点荷载强度降低程度越明显<sup>[13, 16]</sup>。Hassani等<sup>[24-29]</sup>、Satish等<sup>[30]</sup>和Nekoovaght等<sup>[31-33]</sup>正在致力于微波辅助机械破岩的研究。研究了不同功率下不同种类岩石的单轴抗压强度和抗拉强度<sup>[25]</sup>,微波辐射对岩石表面温度和穿透深度的影响<sup>[29, 31]</sup>,并讨论了微波辅助破岩技术对未来太空采矿的促进作用<sup>[30, 32]</sup>。奥地利雷奥本矿业大学的Hartlieb等<sup>[34-35]</sup>、Peinsitt等<sup>[36]</sup>、Meisels等<sup>[37]</sup>和Toifl等<sup>[38]</sup>研究了玄武岩、花岗岩和砂岩的热物理特性及水分对3种岩石微波辐射效果的影响,并通过试验研究和数值研究相结合的手段分析了微波在非均质硬岩中的传播特性及其热力学特性。

微波辅助机械破岩是通过微波加热技术和机械破岩技术相结合的一种混合型破岩方法。通过微波快速加热岩石,显著降低其点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度等力学特性,解决机械破岩刀具易磨损的问题,充分发挥机械破岩的优势,从而实现提高岩石破碎的效率和降低岩石破碎的成本。将微波加热技术引入到钻孔和凿岩设备中,使钻头在钻进时能够发出微波能,提高钻头的性能和工作效率。岩石点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度是影响TBM盘形滚刀寿命和侵入岩石深度的重要参数,把微波加热技术和TBM掘进技术相结合,将会显著提高其掘进性能。在

金属矿开采中,如果能够像煤炭开采一样实现矿岩的连续开采,将对革新金属矿开采技术起到突破性的进展。然而对于坚硬岩类的金属矿山,主要限制因素是机械切削刀具的磨损或切入深度不够,以及维修量大而不能实现足够的生产能力。把微波加热技术和采矿技术相结合,实现一种基于微波辅助的金属矿薄矿脉开采方法,及适用于金属矿矿岩连续开采的采矿机。

## 1 微波加热岩石原理

微波是一种波长为0.01~1 m,频率为0.3~300 GHz的超高频电磁波,具有波长短、频率高的特点,常用的微波加热频率为0.915, 2.45 GHz<sup>[39]</sup>。由于岩石作为介质材料不同程度地吸收微波能,岩石介质材料与微波电磁场相互耦合,形成各种功率耗散从而使微波能在岩石内部转化成热能。微波加热岩石是通过岩石内部偶极分子的高频往复运动产生“内摩擦热”而使岩石温度升高,不须任何热传导过程就能使岩石内外部同时加热和升温<sup>[40]</sup>。岩石材料在微波场中所产生的热量大小与岩石种类及其介电特性有关,因此说微波对岩石也具有选择性加热的特点<sup>[10-12]</sup>。微波加热岩石取决于岩石材料内各矿物吸收微波的电场强度、微波频率及其介电损耗,单位体积的介电材料损耗的微波功率 $P$ 为<sup>[29, 41]</sup>

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2, \quad (1)$$

式中, $f$ 为微波频率, $\varepsilon_0$ 为真空介电常数( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m), $\varepsilon''$ 为岩石材料介电损耗因子, $E$ 为电场强度。

根据能量守恒和转化定律,介质吸收的微波能会转化为热能,对于某一介质而言,介质损耗是基本固定的, $P$ 与电场强度 $E$ 的平方和频率 $f$ 成正比,因此,电场强度越大,频率越高,介质吸收的微波功率就越大,介质产生的热量和温升就越大。

微波穿透深度是指电磁波穿透到介质内部的能力,当电磁波从岩石表面进入到岩石内部时,能量不断地被吸收并转化为热能,场强和功率就不断衰减,穿透越深,损耗于材料的能量就越多,穿透深度用符号 $D$ 表示:

$$D = \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''}, \quad (2)$$

式中, $D$ 为微波穿透深度, $\varepsilon'$ 为岩石材料介电常数, $\lambda$ 为微波波长。

由式(2)<sup>[9, 29]</sup>可知,一般介质的穿透深度与波长是同一数量级,对2.45 GHz( $\lambda \approx 12.2$  cm)的微波加热频率而言,穿透深度大致为几厘米到几十厘米,能够做到对介质材料里外同时加热。

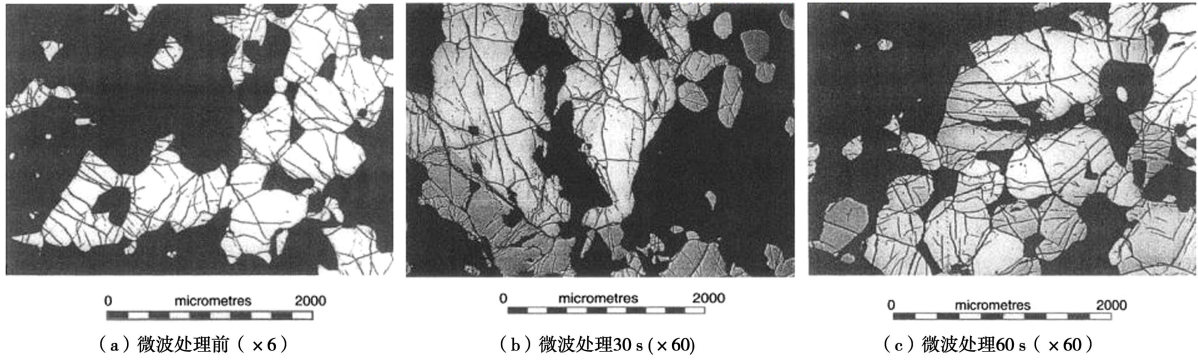


图 1 微波处理前后的钛铁矿矿石<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Untreated and treated ilmenite ores

## 2 试验研究

### 2.1 微观机制

Kingman 等<sup>[17]</sup>为研究微波辐射对挪威钛铁矿矿物成分和磁选处理的影响, 把从现场钻孔取回的挪威钛铁矿样品在功率为 2.6 kW、频率为 2.45 GHz 的工业微波炉里进行微波辐射处理。圆盘试样直径 19 mm、厚度约为 3.5 mm, 试样分为 3 组, 其中两组分别在功率为 1.3 kW 和 2.6 kW 的微波下辐射 30 s 和 60 s, 经过微波处理后在常温下进行淬火处理, 第三组试样作为对比试验, 不进行微波辐射处理, 在电子显微镜下的观测结果如图 1 所示。

微波辐射处理对钛铁矿矿石矿物成分具有重要影响, 与未进行微波处理的矿石(图 1(a))相比, 处理时间为 30 s 时, 钛铁矿和硅酸盐矿物的裂纹明显增加, 沿晶断裂和穿晶断裂也变得更加明显(图 1(b))。处理时间为 60 s 时, 裂纹数量进一步增加, 尤其是钛铁矿和硅酸盐矿物, 除了裂纹数量的增加, 一些裂隙变得更宽更明显(图 1(c))。当显微镜放大倍数为 250 倍时, 可以看到试样局部区域发生熔化, 主要发生在两个钛铁矿晶粒之间, 这说明矿石内达到了相当高的温度(1100℃)。由于不同的矿物具有不同的加热速率<sup>[42]</sup>, 使得一部分矿物加热快, 一部分矿物加热慢, 这样就会产生一定的温度梯度, 加之各矿物膨胀率不同<sup>[43]</sup>, 在矿物晶粒边界产生不同的体积膨胀, 从而在矿石内产生热应力, 导致沿晶断裂和穿晶断裂的形成, 削弱岩石的力学性能。

随后, Kingman 等<sup>[15]</sup>对 4 种矿石样品进行了微波预处理后的磨矿试验。在功率为 2.6 kW 时, 挪威钛铁矿、巴布亚新几内亚难处理金矿、葡萄牙硫化物矿和南非碳酸盐岩 4 种矿石的邦德功指数与微波辐射时间的关系如图 2 所示<sup>[15]</sup>。除了难处理金矿石以外, 其它 3 种矿石的邦德功指数都有显著降低, 功指数的下降是由于矿石内各矿物不同的热膨胀在晶粒内产生的热

应力诱导晶粒边缘产生裂隙引起的。

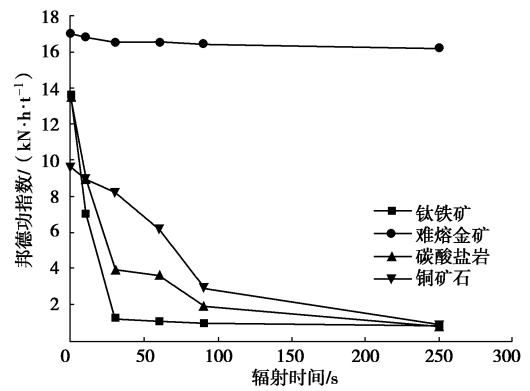
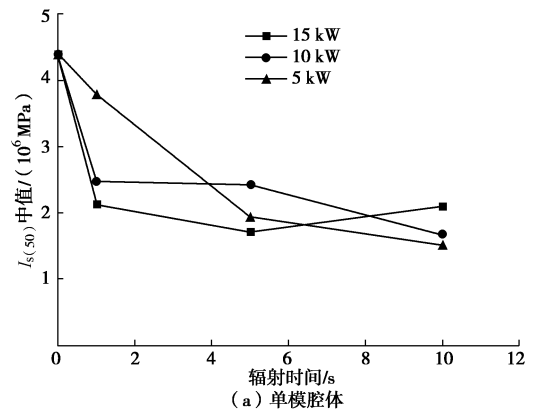


图 2 微波辐射对不同矿石邦德功指数的影响<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Effect of microwave radiation on Bond work index for different ores

### 2.2 点荷载强度

Kingman 等<sup>[13]</sup>对瑞典铅锌矿石试样分别在单模和多模微波腔体中进行了不同功率的微波辐射处理, 微波频率均为 2.45 GHz。多模腔体中设置微波功率分别为 5, 10, 15 kW, 辐射时间分别为 1, 5, 10 s; 单模腔体中设置微波功率分别为 5, 7.5, 10 kW, 辐射时间分别为 0.1, 0.5, 1 s, 对微波处理后的试样进行点荷载强度试验。点荷载强度指数中间值与辐射时间的关系曲线如图 3 所示。



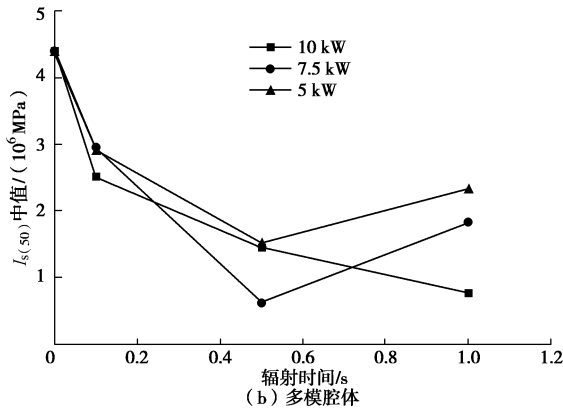


图3 单模腔体点荷载强度指数试验结果<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Point load test results for single-mode cavity

多模腔体和单模腔体微波预处理对试样点荷载强度指数都有显著的影响, 在较短时间的微波辐射处理时点荷载强度指数就有明显降低, 随着辐射时间的增加, 点荷载强度指数进一步降低。微波功率越高, 试样点荷载强度指数的降低效果越明显。在多模腔体中, 微波功率为 15 kW、辐射时间仅 1 s 时, 点荷载强度指数就降低了 55%, 而在功率为 5 kW 时, 需要更长的加热时间点荷载强度指数才有明显降低。在单模腔体中辐射时间小于 0.5 s 时, 3 种功率下试样的点荷载强度指数明显降低, 试样在功率为 15 kW 时发生了熔化, 其原始结构已完全不存在<sup>[13]</sup>。

### 2.3 水分对加热速率和 P 波波速的影响

Peinsitt 等<sup>[36]</sup>研究了水分对微波辐射下玄武岩、花岗岩和砂岩的升温速率和 P 波波速的影响。试验在 2.45 GHz 的多模腔体中进行, 功率为 3 kW, 采用直径和高均为 50 mm 的圆柱形试样, 在不同辐射时间后分别对干燥和饱和试样进行表面温度和 P 波波速测试。

测得的试样表面温度与时间关系如图 4 所示<sup>[36]</sup>, 干燥玄武岩和饱和玄武岩加热速率基本一致, 在 60 s 后表面温度分别达到 330°C 和 325°C。但水分对花岗岩和砂岩的表面温度升高和微波辐射效果却有明显影响, 干燥花岗岩和饱和花岗岩在 300 s 后表面温度分别为 220°C 和 295°C, 值得注意的是, 干燥砂岩在 300 s 后表面温度达到 255°C, 而饱和砂岩试样在辐射 10 s 时就产生了裂纹, 在辐射 30 s 表面温度刚超过 100°C 时, 试样就崩开并破坏<sup>[36]</sup>。

玄武岩试样的 P 波波速随辐射时间的增加而降低, 干燥试样和饱和试样几乎具有一致的发展趋势<sup>[36]</sup>, 波速的降低是由于随着辐射时间的增加, 试样内部产生的裂纹引起了试样内部结构的改变。和干燥花岗岩试样相比, 饱和花岗岩试样波速降低的更明显, 说明微波辐射对饱和花岗岩试样引起的损伤更大, 这与花岗岩试样的升温速率结果也具有一致性。干燥砂岩试

样的波速具有微弱的降低趋势, 由于饱和砂岩试样在辐射 30 s 后就发生了破坏, 只测到了两组饱和试样的波速结果, 在破坏前测到的波速显著降低, 这说明试样内部结构在破坏前就发生了严重变化。

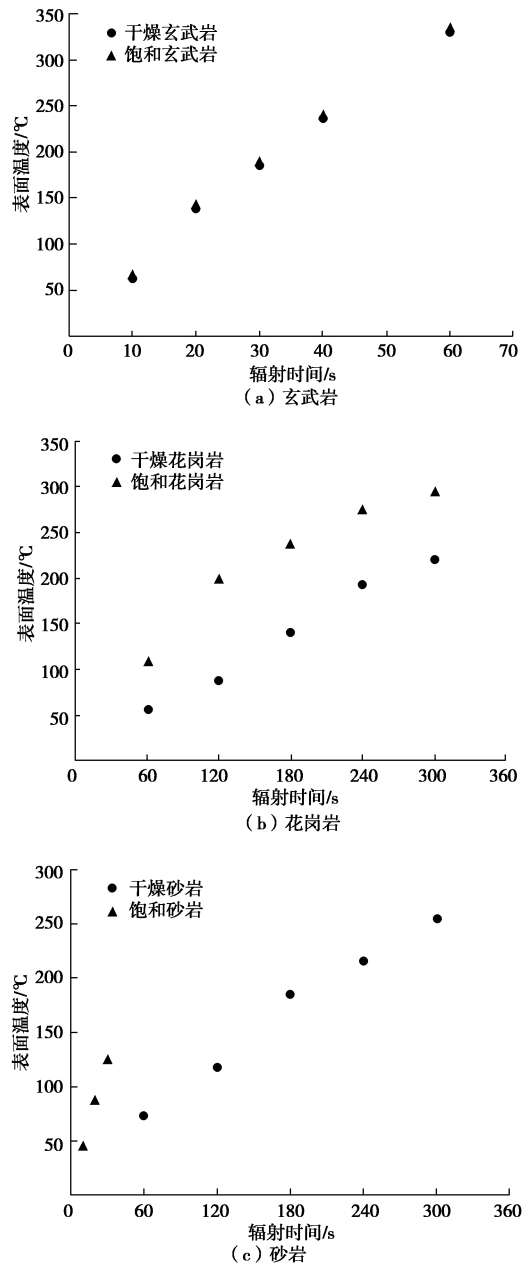


图4 玄武岩、花岗岩和砂岩试样表面温度升高与时间关系<sup>[36]</sup>

Fig. 4 Dependence of the surface temperature on irradiation time

### 2.4 抗压强度和抗拉强度

Hassani 等<sup>[24-25, 29]</sup>研究了不同微波功率对不同类型岩石单轴抗压强度和抗拉强度的影响。岩石试样分别为取自加拿大萨德伯里盆地的苏长岩、美国佛蒙特州的花岗岩、美国加利福尼亚的玄武岩和中国的玄武岩, 其中苏长岩和玄武岩为爆破开挖取得, 试样表面具有大量节理和裂隙。为了更好的进行对比研究, 随机选取试样进行试验。微波辐射处理在多模腔体中进行, 采用微波频率为 2.45 GHz, 设置 1.2, 3, 5 kW 三

种功率水平, 辐射时间为 0~120 s。微波辐射后立刻用手持红外测温仪测量试样的表面温度, 强度测试在试样冷却到室温后进行。

对于加利福尼亚玄武岩, 随着微波功率水平的增加, 不同功率下试样的表面温度随时间呈线性增加趋势。圆盘形试样在功率 1.2 kW、辐射时间 120 s 时, 抗拉强度降低了 20%~30%; 在功率 3 kW、辐射时间 120 s 和功率 5 kW、辐射时间 35 s 时, 试样发生了熔化。单轴抗压强度试验结果见图 5, 较低的微波功率对试样抗压强度影响较小, 然而在功率 5 kW、辐射时间 65 s 时, 单轴抗压强度降低了约 30%, 加热到 120 s 时试样发生了熔化。试样的抗压强度和抗拉强度随输入微波能量的增加而降低, 输入微波能量越高, 对试样力学特性(强度折减)的影响越大<sup>[24, 29]</sup>。

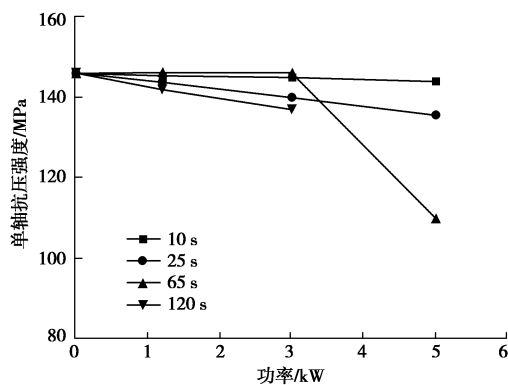


图 5 加利福尼亚玄武岩试样单轴抗压强度试验结果<sup>[24,29]</sup>

Fig. 5 Uniaxial compressive strength of basalt from California

对于佛蒙特州花岗岩, 随着功率水平和辐射时间的增加, 试样的表面温度呈近似线性增加趋势。相对于圆柱形试样, 圆盘形试样的温度增加的更快, 这是由于较大的体积需要更长的时间来耗散微波能。当功率水平为 1.2 kW 和 3 kW 时, 微波能对试样抗拉强度几乎没有影响, 但 5 kW 的功率水平对试样抗拉强度产生显著影响, 在辐射时间为 120 s 时, 试样抗拉强度降低了 20%以上。由于花岗岩含有的大量矿物成分是透射微波的, 所以花岗岩对微波的吸收能力相对较弱<sup>[24, 29]</sup>。

由于萨德伯里苏长岩含有大量硫化物和铁镁质矿物成分, 这些矿物成分具有较好的能量损耗特性, 所以该苏长岩能够很好地吸收微波能。在功率为 3 kW 时, 一个试样在辐射时间不到 120 s 时就发生了熔化, 另外一个试样在功率为 5 kW、辐射时间不到 30 s 就开始从内到外发生熔化, 这说明功率水平越高, 试样越容易达到其熔点。随着功率和辐射时间的增加, 抗拉强度发生了显著下降, 其结果见图 6。在功率为 3 kW、辐射时间为 120 s 和功率为 5 kW、辐射时间为

30 s 时, 试样沿圆柱面发生了明显裂纹(见图 7)<sup>[24, 29]</sup>。

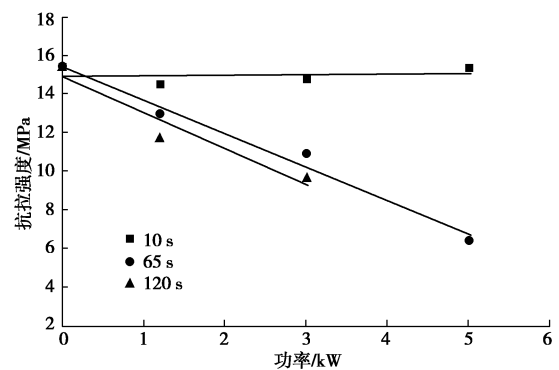


图 6 苏长岩抗拉强度与不同微波输入功率的关系<sup>[24,29]</sup>

Fig. 6 Power input of microwave vs. tensile strength of norite

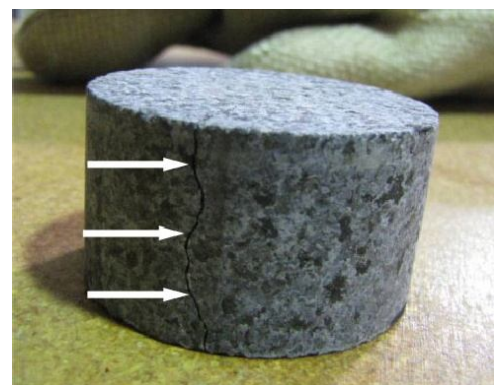


图 7 苏长岩试样在功率 5 kW、时间 30 s 时发生破裂<sup>[24,29]</sup>

Fig. 7 Norite specimen being cracked at 30 s in 5 kW

对于取自中国的玄武岩, 在功率 1.2 kW、辐射时间 90 s, 功率 3 kW、辐射时间 35 s 和功率为 5 kW、辐射时间为 20 s 时, 圆盘形试样从表面开始发生剥落, 最终发生了崩裂, 在 Wilkinson 等<sup>[44]</sup>的研究中也有同样的效果。在功率 5 kW 时, 为避免试样崩裂, 辐射时间不超过 20 s, 试样抗拉强度降低了 40%以上。对于单轴抗压强度, 在功率为 1.2 kW 时, 微波辐射对抗压强度影响较小, 在功率为 3 kW 时, 试样在 120 s 时发生崩裂。微波功率越高, 试样越早发生崩裂, 试样在崩裂前抗压强度变化较小。

## 2.5 微波穿透深度

Hassanif 等<sup>[29]</sup>, Nekoovaght 等<sup>[31]</sup>通过调整微波发射天线与岩石表面的距离研究了微波在干燥和含水板状试样中的穿透深度。把 12 块尺寸为 40 cm×40 cm×2 cm 的薄板状玄武岩试样叠加在一起, 每两层试样的间隙不超过 1 mm, 采用微波频率 3 kW, 辐射时间分别为 60 s 和 120 s。结果表明, 在最上面一层试样加热区域的直径约为 10 cm, 加热区域随试样深度的增加而减小。试样表面离微波发射天线的距离越近, 测到的试样表面温度越高, 距离一定时, 辐射 120 s 时的表面温度高于辐射 60 s 的温度。试样表面温度随

试样深度以指数形式降低,测到的干燥试样和含水试样的微波穿透深度约为 5 cm,这与通过式(2)计算得到的穿透深度(4.2 cm)能够很好的吻合。

## 2.6 加热路径的影响

为研究不同加热路径对岩石破碎的效果,本文试验采用 CM-06S 型工业微波炉对玄武岩试样进行微波辐射。该玄武岩取自内蒙赤峰,岩块一致性较好,没有肉眼可见的宏观裂纹,加工成边长为 5 cm 的立方体试样,进行微波辐射前在 110 °C 的常规烘干箱中干燥 48 h。采用 2 kW 和 4 kW 两种功率对试样进行微波辐射,微波辐射过程中通过内置红外测温仪测量试样表面温度,关闭微波辐射后使用手持红外测温枪辅助温度测量,两种功率下的微波辐射效果如图 8 所示。



(a) 2 kW, 10 min

(b) 4 kW, 50 s

图 8 不同加热路径下玄武岩试样表现出不同的加热效果

Fig. 8 Different heating effects of basalt samples performed in different heating paths

采用功率为 2 kW,加热到 10 min 时试样表面温度达到约 650 °C,试样上表面近似中心位置呈熔融状

表 1 不同加热时间得到的模拟温度和单轴抗压强度(功率 2.6 kW)<sup>[9]</sup>

Table 1 Simulated temperatures and unconfined compressive strengths for various microwave heating time (with a power of 2.6 kW)

加热时间/s	最低温度/°C	最高温度/°C	温度增量/°C	单轴抗压强度/MPa
0	300	300	0	126
1	300	350	50	126
5	320	460	140	123
15	400	700	300	97
30	600	900	300	79

表 2 不同加热时间得到的模拟温度和单轴抗压强度(功率密度为  $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$ )<sup>[9]</sup>

Table 2 Simulated temperatures and unconfined compressive strengths for various microwave heating time (with a power density of  $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$ )

加热时间/s	最低温度/°C	最高温度/°C	温度增量/°C	单轴抗压强度/MPa
0	300	300	0	126
0.05	300	1200	900	57
0.25	300	1700	1400	29
0.5	300	1900	1600	26
1	300	1900	1600	25

态(图 8 (a)),产生的几条宏观裂纹贯穿试样表面,局部裂隙有岩浆渗出,但试样并没有裂开,敲开冷却后的试样,试样近似中心位置呈黑色玻璃质。采用功率为 4 kW 时,辐射时间为 50 s、表面温度为 110 °C 时试样崩开,听到有试样碎块弹射到微波炉壁上的声音,试样崩开后通过手持红外测温枪测到的最高温度为 350 °C,试样崩开时的碎裂程度如图 8 (b) 所示,如果崩开后继续加热,大块试样继续崩开成小块。采用功率为 4 kW,在试样崩开前关闭微波辐射,几分钟后用同样的功率继续加热,将产生图 8 (a) 的效果。

由此可见,采用的微波加热路径不同,对岩石产生的辐射效果也不尽相同。采用低功率微波辐射岩石时,试样温度不断升高,直至达到其熔点,试样发生熔化,而对于岩石破碎来说,这样的结果并不是有利的,因为耗费了大量的能量也没有达到预期的效果。而采用相对较高功率对岩石连续加热时,试样在较短时间和较低温度时就发生崩裂,崩开的碎块以一定的初速度弹射出去,这是由于岩石内矿物的不均匀热膨胀产生了高热应力,达到或超过了岩石的抗压或抗剪强度极限。而采用低功率时,产生的热量有足够的时间向周围矿物扩散,由热膨胀产生的热应力不足以使岩石裂开,采用高功率断续加热时也是同样的道理。因此,采用高功率微波连续辐射岩石,借助于其产生的热应力使岩石崩开的特点,可显著降低岩石破碎时的能量消耗,这也对前文的微裂纹发展机制和下文的数值研究结果进行了验证。

### 3 数值研究

#### 3.1 功率密度的影响

为了研究微波电场强度对矿石强度折减的影响作用, Whittles 等<sup>[19]</sup>采用 FLAC V3.3 2D 有限差分数值模拟技术对含低微波吸收能力矿物的矿石的进行了数值分析。建立模型为 15 mm×30 mm 的方解石试样矿体, 其中含有 10% 体积尺寸为 1 mm×1 mm 的黄铁矿矿物颗粒, 黄铁矿颗粒随机分布在模型区域, 建立一个矿物成分相对分散的矿体。模型采用功率水平为 2.6 kW, 频率为 2.45 GHz 的多模腔体, 试样初始温度为 300 K。模拟得到各个时间间隔的温度分布和单轴抗压强度结果如表 1, 2 所示<sup>[19]</sup>。

在功率水平较低时 (2.6 kW), 模拟得到的试样温度和单轴抗压强度变化情况见表 1。最高温度和最高温度梯度发生在黄铁矿颗粒聚集的地方, 热量从黄铁矿颗粒向周围的方解石矿体传递。加热时间为 1 s 和 5 s 时, 对材料抗压强度影响较小, 这是由于此时的加热速率引起的局部热膨胀产生的热应力较小。加热时间为 15 s 和 30 s 时, 模拟得到的单轴抗压强度值有明显降低, 这是由于黄铁矿和方解石材料不同的体积膨胀产生的热应力超过了试样的强度值<sup>[19]</sup>。采用较高功率密度时 ( $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$ ), 在黄铁矿颗粒内部产生了高温, 由于较短的辐射时间降低了热传导的程度, 从而降低了方解石得到的热量, 使方解石矿体处于低温状态, 这样就在试样内产生了很高的温度梯度 (见表 2)<sup>[19]</sup>, 产生的高热应力使试样发生了很大程度的强度折减, 主要强度折减发生在极短的时间内 (0.05 s)。

#### 3.2 微波传递方式

Jones 等<sup>[21]</sup>采用 FLAC V4.0 2D 有限差分系统准静态热力学模型, 研究了不同功率条件下连续波和脉冲波两种微波传递方式对简化的黄铁矿和方解石矿石试样单轴抗压强度的影响。建立的模型为 74 mm×37 mm 的典型单轴压缩试样, 试样由 99% 的方解石和 1% 的 0.5 mm 的黄铁矿颗粒组成, 黄铁矿颗粒在试样内随机分布, 用来模拟标准圆柱形试样。采用连续波和脉冲波两种微波传递方式, 连续波功率密度范围为  $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10} \text{ W/m}^3$ , 辐射时间范围为 0.1~10 s; 脉冲波功率密度范围为  $1 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ W/m}^3$ , 脉冲持续时间为 0.1~10  $\mu\text{s}$ 。

通过数值模拟得到了微波加热后试样内温度分布规律, 最高温度分布在黄铁矿颗粒聚集的地方, 热量从黄铁矿颗粒向周围的方解石矿体传递。图 9 给出了不同功率密度和不同辐射时间时连续波辐射后的单轴抗压强度结果<sup>[21]</sup>。随着微波辐射时间的增加, 试样

内部发生了严重的损伤, 如果功率密度增加, 在较短的辐射时间时就能达到一定的强度折减。事实上, 当给定微波能量一定时, 增加微波功率密度的同时降低辐射时间, 可以在试样内部产生更大的损伤。这是由于黄铁矿颗粒吸收的热量传递给周围的方解石矿体需要一定的时间, 如果功率密度越高, 升温就会更快, 在较短的时间内更高的温度梯度就会产生更大的热应力, 从而对试样产生的热损伤也就更大。

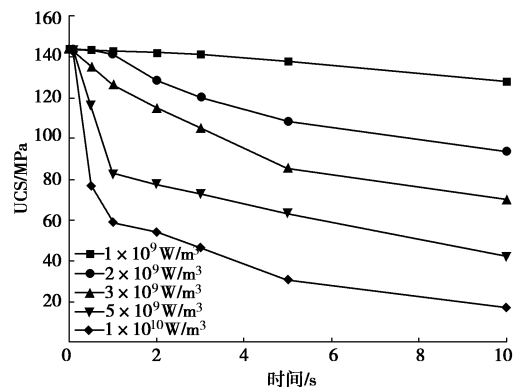


图 9 采用连续波时单轴抗压强度折减与时间的关系<sup>[21]</sup>

Fig. 9 Continuous wave simulation—UCS reduction with exposure time

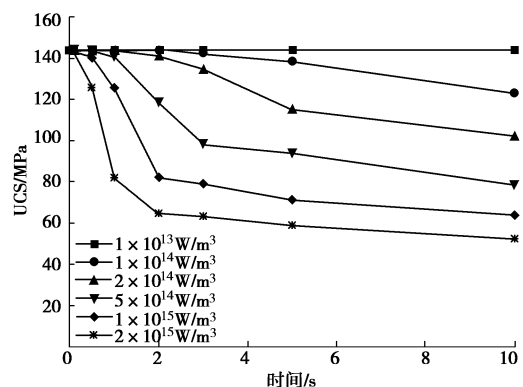


图 10 采用脉冲波时单轴抗压强度折减与时间的关系<sup>[21]</sup>

Fig. 10 Pulsed simulation—UCS reduction with exposure time

采用脉冲波时, 与连续波相比, 功率密度的大小和范围增大了 (连续波功率密度范围为  $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10} \text{ W/m}^3$ ; 脉冲波功率密度范围为  $1 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ W/m}^3$ ), 但试样单轴抗压强度随功率密度增加引起的折减却有所降低 (见图 10)。连续波和脉冲波的模拟结果都能够说明功率密度对单轴抗压强度的折减具有重要影响, 随着功率密度的增加, 试样内产生的热应力增加, 从而对试样产生更大损伤, 导致单轴抗压强度降低。

### 4 工业应用研究

机械凿岩是基本的也是传统的破岩方法, 这种方

法可以对钻杆施加一个恒定的冲击力,当冲击力大于岩石强度时,旋转的钻头就会侵入岩石,钻头旋转产生的剪力可以辅助破碎岩石,提高凿岩的侵入率<sup>[45]</sup>。加拿大麦吉尔大学已经研制了微波辅助钻孔设备,并设计了钻头的可能形式<sup>[26]</sup>。把微波发生器安装在钻机设备上,通过波导在钻头旋转和钻进时对岩石表面发出微波,这样在钻头旋转时,微波辐射就能覆盖钻孔的整个区域,在钻进过程中快速加热岩石,基于各矿物成分不同的热膨胀率,在岩石表面产生宏观和微观裂纹,进而提高钻头的性能和钻进效率,促进岩石的破碎过程。

全断面隧道掘进机(TBM)通常使用盘形滚刀破碎岩石,通过施加一个垂直于岩石表面的推力向前推进,刀具的侵入量取决于设备的各种参数和岩体的力学特性<sup>[46-48]</sup>。刀具的寿命和刀具每旋转一周的侵入量通过下式计算<sup>[29, 49]</sup>:

$$L = \sum dw^2 \frac{\cos(\theta)}{F_n \sqrt{\sigma_{UCS} \sigma_{PTL} (CAI)^2}}, \quad (3)$$

$$P_{Rev} = 624 \frac{F_n}{\sigma_{Bt}}, \quad (4)$$

$$P_{Rev} = 3940 \frac{F_n}{\sigma_{UCS}}, \quad (5)$$

式中,  $L$  为刀具磨损寿命指数 (hour),  $P_{Rev}$  为刀具每旋转一周的侵入量,  $d$  刀具直径 (m),  $w$  为刀具边缘宽度 (m),  $\theta$  为盘形滚刀顶锥角的一半 ( $^\circ$ ),  $F_n$  为作用在盘形滚刀上的推力 (N),  $\sigma_{UCS}$  为岩石的单轴抗压强度 (MPa),  $\sigma_{PTL}$  为点荷载强度指数,  $CAI$  为岩石表面 Cerchar 耐磨指数,  $\sigma_{Bt}$  巴西劈裂抗拉强度 (MPa)。

通过微波预处理岩石,可以削弱岩石的力学特性,降低了 TBM 盘形滚刀破碎岩石需要的推力,反而,推力一定时可以增加 TBM 刀具的侵入率。根据式 (3) ~ (5) 可知,点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度是影响 TBM 盘形滚刀寿命和岩石侵入量的重要参数,而试验研究和数值研究都表明微波辐射对岩石的强度折减有显著影响,因此,把微波技术和 TBM 相结合,在其盘形滚刀切割岩石之前先对岩石表面进行微波辐射,根据岩石强度降低与辐射时间的关系,合理地设计刀盘转速,将明显提高 TBM 的掘进性能。

寻求新的破岩方法实现矿岩连续开采一直是矿业努力实现的目标,在煤矿中各类采煤机的应用成功实现了这个目标,然而对于坚硬岩类的金属矿山,基于机械切削的采煤设备则因刀具磨损而缺乏经济上的竞争力,或由于切入深度线和维修量增加而不能实现足够的生产能力,即便采用冲击水压破岩,也同样

存在破岩极限。而基于微波加热对矿岩力学特性的影响作用,研发一种基于微波辅助破岩的金属矿薄矿脉开采方法,及适用于金属矿岩连续开采的采矿机,这对于金属矿开采技术方面具有重要意义。

## 5 结 论

(1)不同的矿物成分对微波能具有不同的吸收特性,在岩石内形成一定的温度梯度,加之各矿物的热膨胀不同,吸收微波能量后产生不同的体积膨胀,这样就会在岩石内产生热应力,使原有的微裂纹扩展并形成更多的微裂纹,从而降低岩石的强度。

(2)岩石试样的温度随微波辐射时间或功率水平的增加而不断增加,一定程度的微波辐射后,试样点荷载强度、单轴抗压强度和抗拉强度发生了显著降低,岩石种类不同,产生的辐射效果也不相同,功率水平和辐射时间是影响岩石强度折减的重要参数。

(3)不同的加热路径对岩石破碎具有不同的效果,采用高功率连续加热时,各矿物的不均匀热膨胀在岩石内产生了高热应力,使岩石在较短时间和较低温度时就发生崩裂,可显著降低岩石破碎时的能量消耗。

(4)数值研究进一步解释了微波加热岩石的原理及微波能量在岩石内的传递机制,数值研究的结果与试验研究的结果基本一致,增加电场强度(或功率密度)的同时降低辐射时间对试样强度折减具有更好的效果,并且可以降低能量损耗。

(5)微波辐射处理在较短时间内显著影响岩石的点荷载强度、抗压强度和抗拉强度等力学特性,把微波加热技术和机械破岩技术相结合,能够解决机械破岩设备的刀具磨损问题,这对钻孔、TBM 掘进和实现金属矿岩连续开采都具有重要影响作用。

## 参考文献:

- [1] 徐小荷. 试论采矿工程的新学科——岩石破碎学[J]. 有色金属(矿山部分), 1980(6): 39 - 42. (XU Xiao-he. On the new subject of mining engineering—rock fragmentation[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 1980(6): 39 - 42. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 周子龙, 李夕兵, 刘希灵. 深部岩石破碎方法[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(3): 63 - 65. (ZHOU Zi-long, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Rock fragmentation method in deep level[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(3): 63 -



65. (in Chinese))
- [4] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望 [C]// 2009—2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告. 北京, 2010: 142 - 149. (LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, WANG Wei-hua. The status and prospect of development in rock fragmentation engineering [C]// Report on the Development of Rock Mechanics and Rock Engineering Discipline in 2009-2010. Beijing, 2010: 142 - 149. (in Chinese))
- [5] 潘井澜. 爆破破岩机理的探讨[J]. 爆破, 1994(4): 1 - 6. (PAN Jing-lan. The discussion of rock mechanism by blasting[J]. *Blasting*, 1994(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 余 静. 岩石机械破碎规律和破岩机理模型[J]. 煤炭学报, 1982, 7(3): 10 - 18. (YU Jing. Rules of rock fragmentation with mechanical methods and model of rock failure mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 1982, 7(3): 10 - 18. (in Chinese))
- [7] 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 Baidu-lu, PAN Jian-zhong, XIE Shi-yong. On the research development of rock fragmentation and its prospect[J]. *China Tungsten Industry*, 2011, 26(1): 15 - 19. (in Chinese))
- [8] 戴 俊, 孟 振, 吴丙权. 微波照射对岩石强度的影响研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2014(3): 54 - 57. (DAI Jun, MENG Zhen, WU Bing-quan. Study on impact of rock strength by microwave irradiation[J]. *Nonferrous Metals (Mining section)*, 2014(3): 54 - 57. (in Chinese))
- [9] OSEPCHEK J M. A history of microwave heating Applications[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1984, 32(9): 1200 - 1224.
- [10] CHEN T T, DUTRIZAC J E, HAQUE K E, et al. Relative transparency of minerals to microwave radiation[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, 23(3): 349 - 351.
- [11] WALKIEWICZ J W, KAZONICH G, MCGILL S L. Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds[J]. *Minerals and Metallurgical Processing*, 1988, 39(1): 39 - 42.
- [12] WALKIEWICZ J W, LINDROTH D P, MCGILL S L. Microwave assisted grinding[J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 1991, 27(2): 239 - 242.
- [13] KINGMAN S W, JACKSON K, BRADSHAW S M, et al. An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution[J]. *Powder Technology*, 2004, 146(3): 176 - 184.
- [14] KINGMAN S W, ROWSON N A. Microwave treatment of minerals—a review[J]. *Minerals Engineering*, 1998, 11(11): 1081 - 1087.
- [15] KINGMAN S W, VORSTER W, ROWSON N A. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(3): 313 - 327.
- [16] KINGMAN S W, JACKSON K, CUMBANE A, et al. Recent developments in microwave-assisted comminution[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, 74(1): 71 - 83.
- [17] KINGMAN S W, CORFIELD G M, ROWSON N A. Effects of microwave radiation upon the mineralogy and magnetic processing of a massive Norwegian ilmenite ore[J]. *Magnetic and Electrical Separation*, 1998, 9: 131 - 148.
- [18] VORSTER W, ROWSON N A, KINGMAN S W. The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2001, 63(1): 29 - 44.
- [19] 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.
- [20] JONES D A, KINGMAN S W, WHITTLES D N, et al. Understanding microwave assisted breakage[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(7): 659 - 669.
- [21] JONES D A, KINGMAN S W, WHITTLES D N, et al. The influence of microwave energy delivery method on strength reduction in ore samples[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2007, 46(4): 291 - 299.
- [22] JOHN R S, BATCHELOR A R, IVANOV D, et al. Understanding microwave induced sorting of porphyry copper ores[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 84: 77 - 87.
- [23] MONTI T, TSELEV A, UDOUDO O, et al. High-resolution dielectric characterization of minerals: A step towards understanding the basic interactions between microwaves and rocks[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 151: 8 - 21.
- [24] HASSANI F, NEKOOVAGHT P M, RADZISZEWSKI P, et al. Microwave assisted mechanical rock breaking[C]// Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. Beijing, 2011: 2075 - 2080.
- [25] HASSANI F, NEKOOVAGHT P M. The development of microwave assisted machineries to break hard rocks[C]// Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). Seoul, 2011: 678 - 684.
- [26] HASSANI F, OUELLET J, RADZISZEWSKI P, et al. Exploring microwave assisted drilling[C]// Planetary and

- Terrestrial Mining Sciences Symposium (PTMSS). Montreal, 2007.
- [27] HASSANI F, OUELLET J, RADZISZEWSKI P, et al. Microwave assisted drilling and its influence on rock breakage[C]// International symposium of rock mechanics, Proceedings of 5th Asian Rock Mechanics Symposium, ISRM-Sponsored International Symposium. 2008: 87 - 104.
- [28] HASSANI F, NEKOOVAGHT P M. The use of microwave to contribute to breakage of rocks[C]//2nd South American Symposium on Rock Excavations. San José, 2012.
- [29] HASSANIF, 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.
- [30] SATISH H, OUELLET J, RAGHAVAN V, et al. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications[J]. Mining Technology, 2006, **115**(1): 34-40.
- [31] NEKOOVAGHT P M, GHARIB N, HASSANI F. Numerical simulation and experimental investigation of the influence of 2.45 GHz microwave radiation on hard rock surface[C]//8th Asian Rock Mechanics Symposium. Sapporo, 2014.
- [32] NEKOOVAGHT P M, GHARIB N, HASSANI F. Microwave assistance positive influence on rock breakage in space mining applications[C]//65th International Astronautical Congress, International Astronautical Federation. Toronto, 2014: 1 - 7.
- [33] NEKOOVAGHT P M, HASSANI F. The influence of microwave radiation on hard rocks as in microwave assisted rock breakage applications[C]// The ISRM European rock mechanics Symposium. Vigo, 2014.
- [34] 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.
- [35] HARTLIEB P, LEINDL M, KUCHAR F, et al. Damage of basalt induced by microwave irradiation[J]. Minerals Engineering, 2012, **31**: 82 - 89.
- [36] 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.
- [37] MEISELS R, TOIFL M, HARTLIEB P, et al. Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, **135**: 40-51.
- [38] 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. (in press)
- [39] GWAREK W K, CELUCH-MARCYSIAK M. A review of microwave power applications in industry and research[C]// International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Warszawa, 2004: 843 - 848.
- [40] CLARK D E, SUTTON W H. Microwave processing of materials[J]. Annual Review of Materials Science, 1996, **26**(1): 299 - 331.
- [41] SAXENAA K. Electromagnetic theory and applications[M]. Oxford, UK: Alpha Science International, 2009.
- [42] HARRISON P C. Microwave processing of minerals and ores[D]. Birmingham: University of Birmingham, 1997.
- [43] CLARK S P. Handbook of physical constants[M]. Geological Society of America. Boulder, 1966.
- [44] WILKINSON M A, TESTER J W. Experimental measurement of surface temperatures during flame-jet induced thermal spallation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, **26**(1): 29 - 62.
- [45] LINDROTH D P, BERGLUND W R, MORRELL R. J., et al. Microwave-assisted drilling in hard rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, **44**(8): 1159 - 1163.
- [46] 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**: 450 - 459.
- [47] 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.
- [48] JAIN P, NAITHANIA 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.
- [49] WIJK G. A model of tunnel boring machine performance[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1992, **10**(1): 19 - 40.