



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404778

引用格式:卢智勇,卢高明,李研,等.微波照射对缩尺滚刀旋转破岩试验的影响规律[J].科学技术与工程,2025,25(22):9471-9480.

Lu Zhiyong, Lu Gaoming, Li Yan, et al. Influence law of microwave irradiation on the rotational rock breaking test of scale cutter[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9471-9480.

建筑科学

## 微波照射对缩尺滚刀旋转破岩试验的影响规律

卢智勇<sup>1,2</sup>, 卢高明<sup>1,2</sup>, 李研<sup>3</sup>, 刘超尹<sup>1,2</sup>, 范文超<sup>1,2</sup>

(1. 隧道掘进机及智能运维全国重点实验室, 郑州 450001; 2. 中铁隧道局集团有限公司, 广州 511458;  
3. 中铁七局集团第三工程有限公司, 西安 710032)

**摘要** 微波辅助滚刀破岩具有较强的应用前景,为深入分析微波照射对滚刀破岩的辅助效果,进行了微波照射后的TBM缩尺滚刀破岩试验。通过使用不同参数的微波照射岩石,研究了不同微波参数对岩石表面温度的影响规律。在岩石恢复室温后,以微波照射的岩石为基础,开展TBM缩尺滚刀旋转破岩实验,研究微波照射时间和功率对滚刀推力、刀盘扭矩、岩碴重量、滚刀磨损量以及破岩比能的影响规律。结果表明:随着微波照射时间和照射功率的增加,岩石表面温度增加,岩石升温速率增加,岩石表面最高温度为172.6℃;滚刀推力在破岩中呈波动变化,滚刀下方岩石被碾压为粉末,滚刀侧方产生块状岩碴;随着微波照射时间和微波功率的增加,滚刀推力下降、刀盘扭矩下降、岩碴重量增加、滚刀磨损量下降、破岩比能下降。对于试验所使用赤峰玄武岩最佳微波照射时间应大于40s,微波功率应大于7kW。为微波辅助滚刀破岩提供了一定的试验依据。

**关键词** 隧道掘进机; 滚刀; 微波-滚刀耦合; 高功率微波; 滚刀磨损

中图法分类号 U459.3; 文献标志码 A

## Influence Law of Microwave Irradiation on the Rotational Rock Breaking Test of Scale Cutter

LU Zhi-yong<sup>1,2</sup>, LU Gao-ming<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, LIU Chao-yin<sup>1,2</sup>, FAN Wen-chao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operations, Zhengzhou 450001, China;  
2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, China;  
3. The Third Engineering Co., Ltd., of China Railway Seventh Group, Xi'an 710032, China)

**[Abstract]** Microwave assisted cutter breaking has a strong application prospect, in order to deeply analyse the auxiliary effect of microwave irradiation on cutter breaking, the TBM scale cutter breaking test after microwave irradiation was carried out. Firstly, the rock was irradiated by microwave using different parameters, and the influence law of different microwave parameters on the surface temperature of the rock was studied. After the rock is back to room temperature, the damaged rock was taken as the basis to carry out the TBM scale cutter rotary rock breaking experiment, to study the influence of microwave irradiation time and power on the cutter thrust, cutter torque, rock ballast weight, cutter wear and the specific energy of rock breaking. The results show that: with the increase of microwave irradiation time and irradiation power, the rock surface temperature increases, the rock heating rate increases, the highest temperature of the rock surface is 172.6℃. The cutter thrust is fluctuating in the breaking rock, the rock below the cutter is crushed to powder, the cutter side produces block ballast. With the increase of microwave irradiation time and microwave power, the cutter thrust decreases, the disc torque decreases, the weight of the rock ballast increases, the amount of cutter abrasion decreases, and the specific energy of rock breaking decreases. The best microwave irradiation time should be more than 40 s and the microwave power should be more than 7 kW for the test of Chifeng basalt, which provides a certain experimental basis for the microwave-assisted cutter rock-breaking.

**[Keywords]** tunnel boring machine; cutter; microwave-cutter coupling; high power microwave; cutter wear

收稿日期: 2024-06-26; 修订日期: 2025-04-27

基金项目: 河南省自然科学基金重点项目(252300421256); 郑州市优秀青年科技人才项目; 中国中铁股份有限公司科技开发计划(cz02-专项-03); 中铁隧道局集团科技创新计划(隧研合2023-04)

第一作者: 卢智勇(1996—),男,汉族,河南三门峡人,硕士,工程师。研究方向:新型破岩机理。E-mail:luzhiyong1014@163.com。

\*通信作者: 卢高明(1987—),男,汉族,河南郑州人,博士,高级工程师。研究方向:隧道建设及硬岩微波致裂。E-mail:gaoming\_lu@foxmail.com。

全断面隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)掘进硬岩时,滚刀与岩石接触后依靠滚刀的挤压作用将岩石压溃剥落,掘进效率低、速度慢,导致滚刀严重磨损崩坏<sup>[1-2]</sup>。使用大功率微波对岩石进行照射,在岩石内部形成裂纹损伤,促进滚刀侧向裂纹相互贯通进而使岩碴更易剥落,来减少滚刀推力,降低滚刀的磨损,微波辅助是未来机械开挖隧道的一个重要研究方向<sup>[3-4]</sup>。

将微波照射对岩石细观影响归纳如下:Wang等<sup>[5]</sup>利用晶粒模型和连续体的微波电磁分析方法,研究微波诱导产生的裂缝网络。Bai等<sup>[6]</sup>研究微波加热状态下花岗岩断裂韧性和断裂失效时间。李帅远等<sup>[7]</sup>研究微波照射下不同岩石的介电特性,结果表明玄武岩>砂岩>花岗岩。陈登红等<sup>[8]</sup>使用1.4 kW功率微波照射玄武岩和石灰岩,总结了微波照射岩石裂纹的断裂形式和扩展机理。将微波照射仿真归纳如下:王宇轩<sup>[9]</sup>利用comsol建立不同应力状态下的微波破岩模型,从电磁场、温度场、应力场、塑性区等多方面分析微波照射对岩石的破坏效果。郑彦龙等<sup>[10]</sup>开展微波致裂模拟节理岩体试验,研究表明微波预处理可以有效降低岩石的等效岩石质量指标,降低滚刀磨损,提高闪长岩破岩效率170%~280%。胡梦玲等<sup>[11]</sup>对硬质花岗岩进行微波照射和单轴压缩试验,得出了适合仿真的本构模型。戴俊等<sup>[12]</sup>推导出考虑微孔隙闭合的花岗岩损伤本构模型,并采用微波循环照射花岗岩试验和单轴压缩试验对模型进行验证。陈方方等<sup>[13]</sup>通过comsol研究岩石矿物粒径对微波照射过程中岩石内部电磁场、温度场、应力场以及塑性区分布特征和演变规律。将微波照射对岩石宏观影响归纳如下:Ge等<sup>[14]</sup>研究辉长岩在单轴载荷作用下不同类型裂纹的演化规律,研究表明岩石声发射现象(acoustic emission, AE)分为3个典型时期:高峰期、沉默期和活跃期,与岩石变形过程密切相关。Ning等<sup>[15]</sup>研究微波辅助全尺寸滚刀破岩,发现微波处理过程会存在一个阈值,超过阈值后,破岩比能不会显著降低。Ge等<sup>[16]</sup>研究微波照射对花岗岩的影响,结果表明花岗岩的断裂性能和断裂能随温度升高降低约40%,当岩石表面温度大于300℃时,裂纹弯曲程度增大,明显偏离直线。Gao等<sup>[17]</sup>对花岗岩进行微波照射试验和数值模拟研究,研究表明在循环微波照射下,需要达到最小时间阈值才能对岩石造成不可逆的伤害。陈方方等<sup>[18]</sup>从能量输入大小和快慢两个角度研究微波功率和照射时间对伟晶岩的破坏效果,研究表明采用先低后高的照射方式可以产生更大的塑性面积,破岩效果较好。卢高明等<sup>[19]</sup>研究

微波加热对花岗岩的破坏规律,结果表明当岩样内产生的热应力超过岩石的强度极限时,试样就会崩开破坏。王修昌等<sup>[20]</sup>利用4.6 GHz高功率微波加热穿透岩石,发现高功率微波对硬岩有较好的烧灼效果。戴俊等<sup>[21]</sup>研究不同微波照射参数照射下玄武岩的损伤效应,在循环照射间歇采用冲水冷却方式可增强岩石受损程度。将滚刀破岩研究现状归纳如下:唐崇茂<sup>[22]</sup>使用水射流切缝辅助滚刀破岩,得出切缝深度与贯入度呈线性关系。孙振川等<sup>[23]</sup>进行多滚刀旋转破岩试验,研究得出临空面的产生和滚刀立体布置有利于滚刀破岩。冀国栋等<sup>[24]</sup>研究滚刀在不同贯入度下的破岩效果,研究表明:滚刀破岩过程是阶跃性的,岩碴主要产生在滚刀载荷跌落阶段。赵力等<sup>[25]</sup>通过滚刀破岩试验与施工参数分析,获得了滚刀破岩机理,揭示了掘进速度、设备利用率等TBM掘进性能指标的变化规律。李忠艳等<sup>[26]</sup>使用有限元方法建立滚刀破岩三维旋转切割模型,研究滚刀破岩受力规律,以指导实际工程的设计和施工。翟淑芳等<sup>[27]</sup>研究滚刀破岩后岩碴与贯入度的关系,提出一种基于粒径理论确定最优贯入度的方法,并通过粒径理论得出最优滚刀贯入度。韩伟峰<sup>[28]</sup>使用不同的机械滚刀间距及水射流辅助破岩方式,研究水射流对机械滚刀破岩的辅助效果。

上述研究从不同角度揭示了微波照射对岩石的破坏效果,具有重要意义。然而,这些研究大多从微波照射岩石出发,并没有微波照射对滚刀破岩的影响规律,无法有效得出微波对于滚刀破岩的具体辅助效果。因此,现进行微波辅助的滚刀破岩试验,具体研究微波功率和照射时间对滚刀推力、刀盘扭矩、岩碴重量、滚刀磨损量和破岩比能的影响规律。得到研究所用赤峰玄武岩的最佳的微波照射时间和微波照射功率,为微波辅助滚刀破岩提供一定的试验依据。

## 1 试验设计

### 1.1 实验设备

本次试验的试验设备和试验流程如图1所示。首先,使用高功率微波实验台对赤峰玄武岩进行不同功率和时间的微波照射试验,在微波试验过程中使用红外探测仪实时记录岩石表面温度变化;在岩石恢复室温后,使用滚刀复合磨蚀实验台,对微波照射后的岩石进行滚刀旋转破岩试验。

高功率微波实验台位于盾构及掘进技术国家重点实验室如图1(a)所示,在2.45 GHz频率下,可变频功率高达30 kW。该系统由微波电源、磁控管、环形器、水负载、耦合器、阻抗调谐器、矩形波导和施

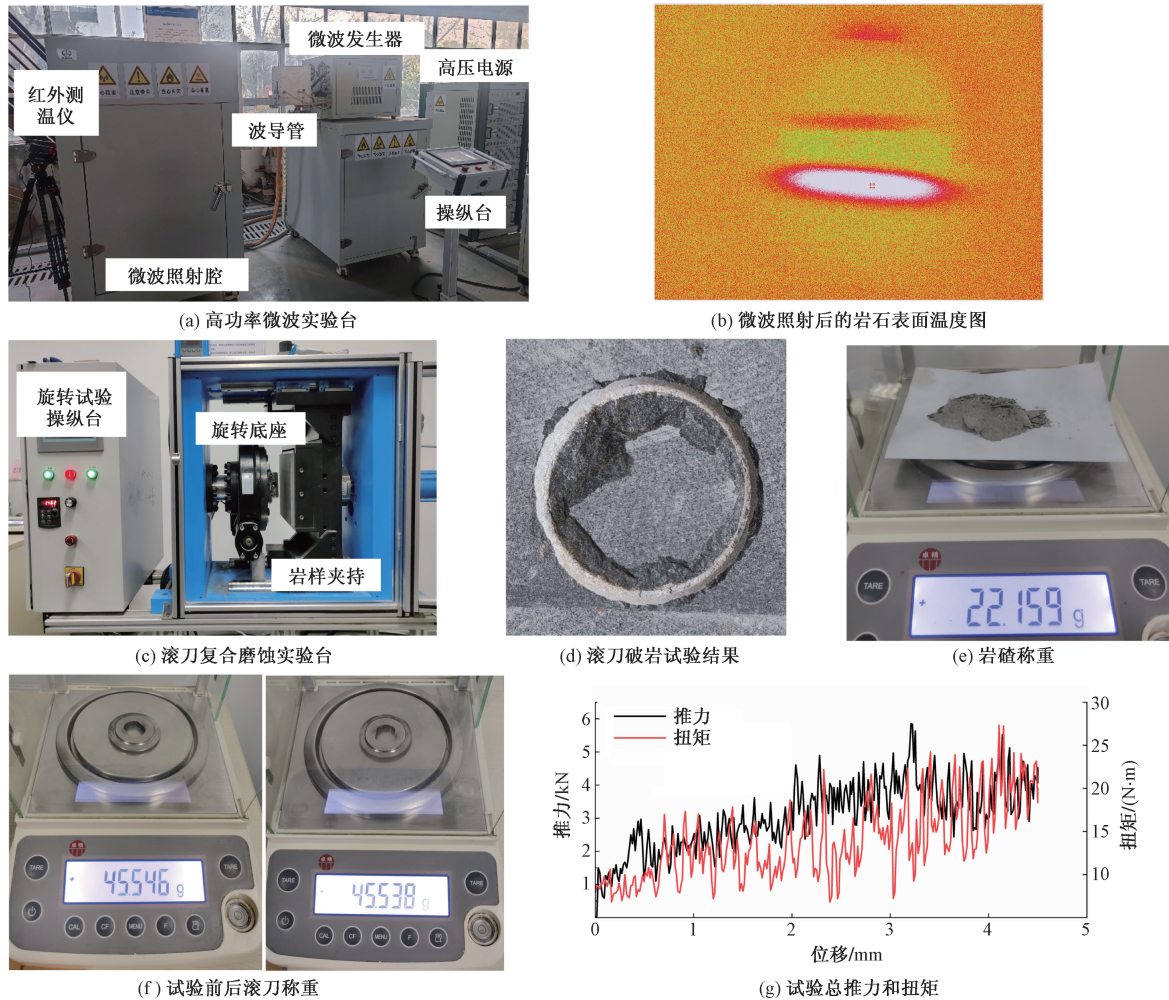


图1 试验设备和试验流程

Fig. 1 Test equipment and test procedure

加器组成。高频率微波装置具有体积小穿透深度大的优势,可对机械破岩刀具进行有效辅助。赤峰玄武岩放置在岩石底座上,岩石上表面距离微波照射口约 50 mm。微波照射后的岩石表面温度如图 1(b)所示,越靠近岩石中心位置,岩石的温度就越高。

滚刀复合磨蚀实验台同样位于盾构及掘进技术国家重点实验室如图 1(c)所示,实验台由框架结构系统、控制驱动系统、旋转破岩系统、岩样加载系统和传感检测系统等组成。可容纳岩石的最大尺寸为 250 mm × 250 mm × 70 mm。用于测量试验过程中刀盘扭矩的传感器位于旋转刀盘之后。滚刀推力传感器位于滚刀之后,最大推力为 50 kN,测量精度为 1 N,最大扭矩为 3 500 N·m,刀盘旋转速度最大为 10 r/min,刀盘最大切削直径为 210 mm。

滚刀尺寸为正常滚刀(19 in, 1 in = 2.54 cm)的 1/10,滚刀直径为 48.3 mm,刃宽 2 mm。拍照记录滚刀破岩试验结果,在试验结束后对岩碴和试验前

后滚刀进行称重,记录并整理试验过程中滚刀推力和刀盘扭矩如图 1(d) ~ 图 1(g)所示。

## 1.2 试验试样

本次试验所用试样均为赤峰玄武岩,试样的长 × 宽 × 高为 250 mm × 250 mm × 70 mm,将赤峰玄武岩进行标号如图 2 所示,准备进行微波辐射试验和滚刀破岩试验。赤峰玄武岩的宏观参数如下:弹性模量 97.63 GPa,泊松比 0.29,单轴抗压强度 281.67 MPa,抗拉强度 16.25 MPa,岩石密度为 2 923 kg/m<sup>3</sup>。

## 1.3 试验方案

首先开展微波照射试验,试验采用高功率微波设备。微波发射口位于岩石中央,距离岩石上表面 50 mm,进行微波照射功率分别为 3、5、7 kW,微波照射时间分别为 20、30、40、50、60 s 相互交叉的 15 组微波照射试验,试验过程中控制其他变量不变。微波照射岩石过程中距离谐振腔 0.5 m 的位置布置有微波泄漏检测设备,微波泄漏检测仪检测到

的微波泄漏量仅为  $10\ \mu\text{m}$ , 远远低于微波侵害人体的阈值  $80\ \mu\text{m}$ 。

考虑到不同微波照射功率和照射时间对岩石的加热情况不同, 使用红外探测仪记录岩石表面温度, 获取岩石表面温度随微波功率和照射时间的变化特征。

当微波照射后的岩石恢复室温后, 以 15 组微波照射试验为基础进行 15 组滚刀破岩试验, 外加一组空白对照试验, 共进行 16 组试验。由于微波照射位置位于岩石中心, 为保证试验结果的准确性, 仅对微波照射中心位置进行滚刀破岩试验, 设置滚刀贯入深度为  $4.5\ \text{mm}$ , 滚刀旋转直径为  $65\ \text{mm}$ , 滚刀推进速度为  $0.3\ \text{mm}/\text{min}$ , 刀盘转速为  $6\ \text{r}/\text{min}$ , 每次试验共转 90 圈, 行程为  $18.369\ \text{m}$ 。每次试验完成之后, 称重岩碴重量, 试验前后滚刀重量, 绘制整理滚刀推力和刀盘扭矩曲线图。



图2 赤峰玄武岩试样

Fig. 2 Chifeng basalt specimen

## 2 试验结果分析

### 2.1 微波照射对岩石表面温度的影响规律

由于微波功率和照射时间不足, 除  $7\ \text{kW}-60\ \text{s}$  的岩石被微波照射一分为二, 其他岩石表面未发现肉眼可见的裂纹分布, 说明微波对岩石的破坏存在一个阈值, 超过这个阈值岩石就会急剧破坏。微波照射后岩石表面温度如图 3 所示, 岩石表面的升温范围并不是一个标准圆而是一个狭长的椭圆形, 微波照射中心点岩石的温度最高, 越往边缘延伸, 岩石温度越低。随着微波照射时间的增加, 微波照射中心点岩石温度升高, 岩石高温区域逐渐增大。当微波功率为  $3\ \text{kW}$  时, 岩石表面的最高温度为  $74.8\ ^\circ\text{C}$ , 最低温度为  $38.9\ ^\circ\text{C}$ ; 微波功率为  $5\ \text{kW}$  时, 岩石表面的最高温度为  $130.7\ ^\circ\text{C}$ , 最低温度为  $55.1\ ^\circ\text{C}$ ; 微波功率为  $7\ \text{kW}$  时, 岩石表面的最高温度为  $172.6\ ^\circ\text{C}$ , 最低温度为  $63.9\ ^\circ\text{C}$ 。另一方面, 随着微波照射时间的增加, 微波照射中心点岩石温度升高, 岩石中心的高温区域逐渐由蓝色变为绿色, 黄色、红色乃至白色, 且高温范围也在不断扩大。

微波照射后岩石表面温度变化如图 4 所示, 选取微波照射中心区  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$  作为测温区域如图 4(a) 所示, 间隔时间为  $1\ \text{s}$ , 获取测温区域内最高温度, 得出岩石的温度变化曲线。微波功率  $7\ \text{kW}$ , 照射时间  $60\ \text{s}$ , 测温曲线如图 4(b) 所示, 随着照射时间的增大, 岩石的表面温度呈线性增加, 说明岩石仍没有达到升温极限, 继续增加微波照射时间, 仍可大幅度提高岩石表面温度。岩石的温度变化柱状图如图 4(c) 所示, 随着微波照射时间和微波照射功率的增加, 岩石表面的最高温度均在增加。

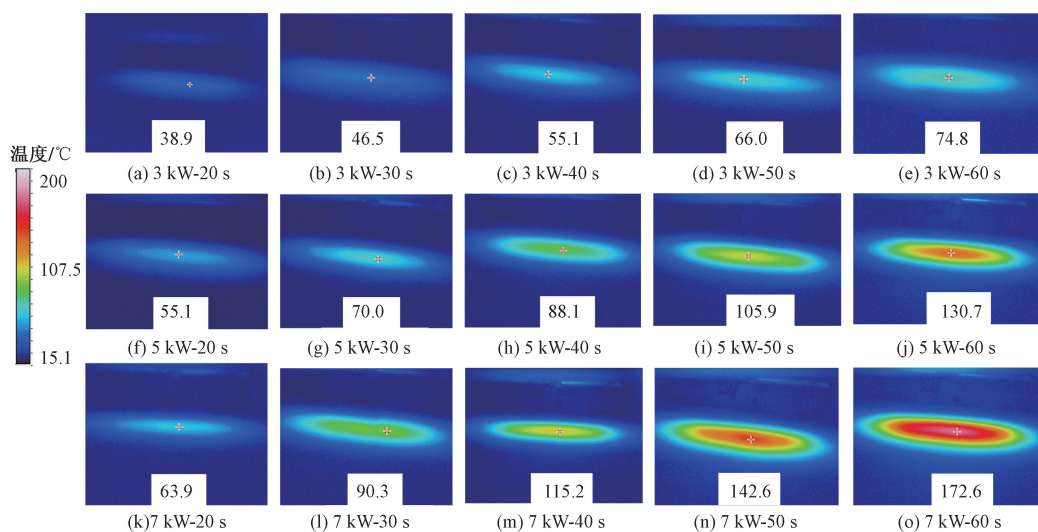


图3 微波照射后岩石表面温度

Fig. 3 Temperature of rock surface after microwave irradiation

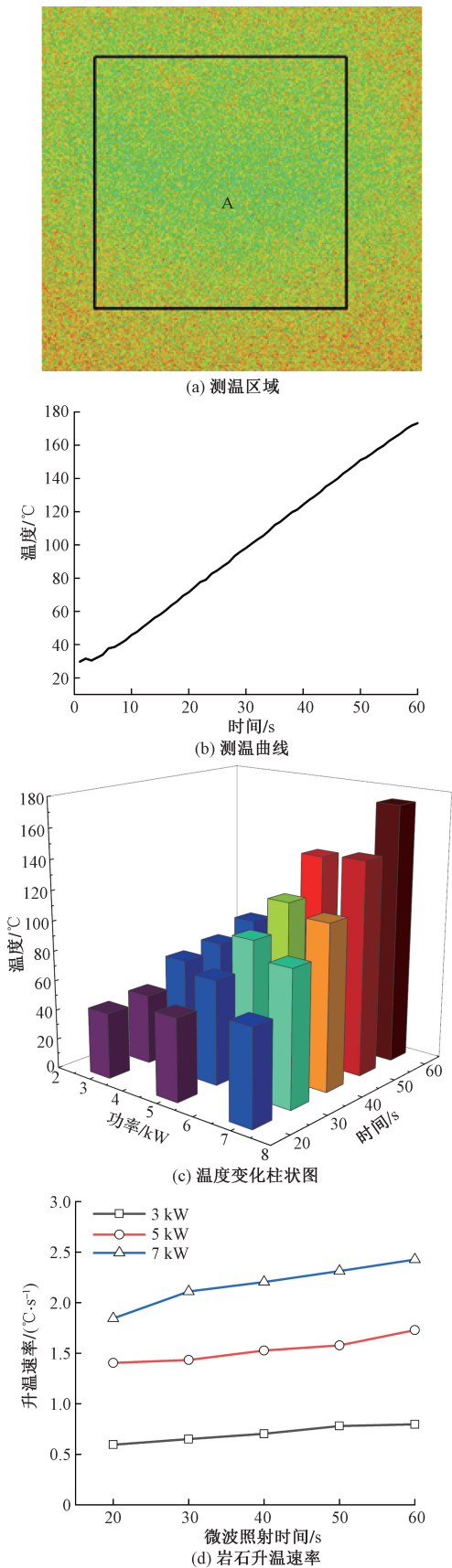


图4 微波照射后岩石表面温度变化  
Fig. 4 Temperature change of rock surface after microwave irradiation

试样在常温下的表面温度为  $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温速率的计算公式为

$$P = \frac{T_1 - T_0}{t} \tag{1}$$

式(1)中:  $P$  为升温速率,  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;  $T_1$  为试样照射后的上表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为照射时间,  $\text{s}$ ;  $T_0$  为初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

岩石的升温速率如图 4(d) 所示, 当微波功率 3 kW 时, 岩石升温速率从  $0.595\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $0.797\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 升温速率差值为  $0.202\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ; 当微波功率 5 kW 时, 岩石升温速率从  $1.405\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $1.728\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 升温速率差值为  $0.323\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ; 当微波功率 7 kW 时, 岩石升温速率从  $1.845\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $2.463\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 升温速率差值为  $0.618\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ; 随着微波照射功率的增加, 岩石升温速率差值也在增加。且 5 kW-20 s 岩石的升温速率大于 3 kW-60 s 岩石的升温速率, 7 kW-20 s 岩石的升温速率大于 5 kW-60 s 岩石的升温速率。随着微波照射时间和微波功率的增加, 岩石的升温速率也在增加。微波功率的增加对岩石升温速率的影响更加剧烈。

## 2.2 微波照射对破岩效果的影响规律

不同微波照射时间对破岩效果的影响规律如图 5 所示, 无微波辅助滚刀破岩时, 可以观察到沿滚刀外侧轨迹圆没有大块岩碴的产生, 在内侧轨迹圆的左下方和右下方产生了两块较大的片状岩碴, 滚刀下方产生了大量粉末状岩碴, 岩碴总重量为  $12.5\text{ g}$ , 破岩后滚刀切痕内侧剩余岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的 72%。滚刀推力呈现波动变化状态, 随着滚刀贯入深度的持续增加, 滚刀推力先缓慢上升后在一定范围内波动变化; 刀盘扭矩随着贯入深度的增加有着相似的变化趋势。滚刀推力和扭矩呈现波动变化且变化幅度越来越大, 是因为在滚刀破岩的过程中, 岩碴呈块状脱落, 岩碴脱落前滚刀推力与扭矩上升, 岩碴脱落后, 滚刀前方一定空间内没有岩石的存在, 滚刀的推力和扭矩下降。为保证数据可靠性, 取贯入深度  $1\sim 4.5\text{ mm}$  的数据求得平均值, 滚刀平均推力和刀盘平均扭矩分别是  $5.2\text{ kN}$  和  $30.15\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

当微波功率为 5 kW, 照射时间为 20 s 时, 岩石表面的最高温度为  $55.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 可以观察到岩石在滚刀切痕内侧左下方存在一块较厚的岩碴剥落, 岩碴总重量为  $14.1\text{ g}$ , 破岩后滚刀切痕内侧剩余的岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的 61%。岩碴重量增加并不多, 是由于在微波照射 20 s 时, 无法在岩石内部形成有效的裂纹损伤, 而滚刀破岩试验又在微波试验结束后的一段时间进行, 试样温度与室温几乎一致所导致的。滚刀的推力与扭矩呈现相似的变

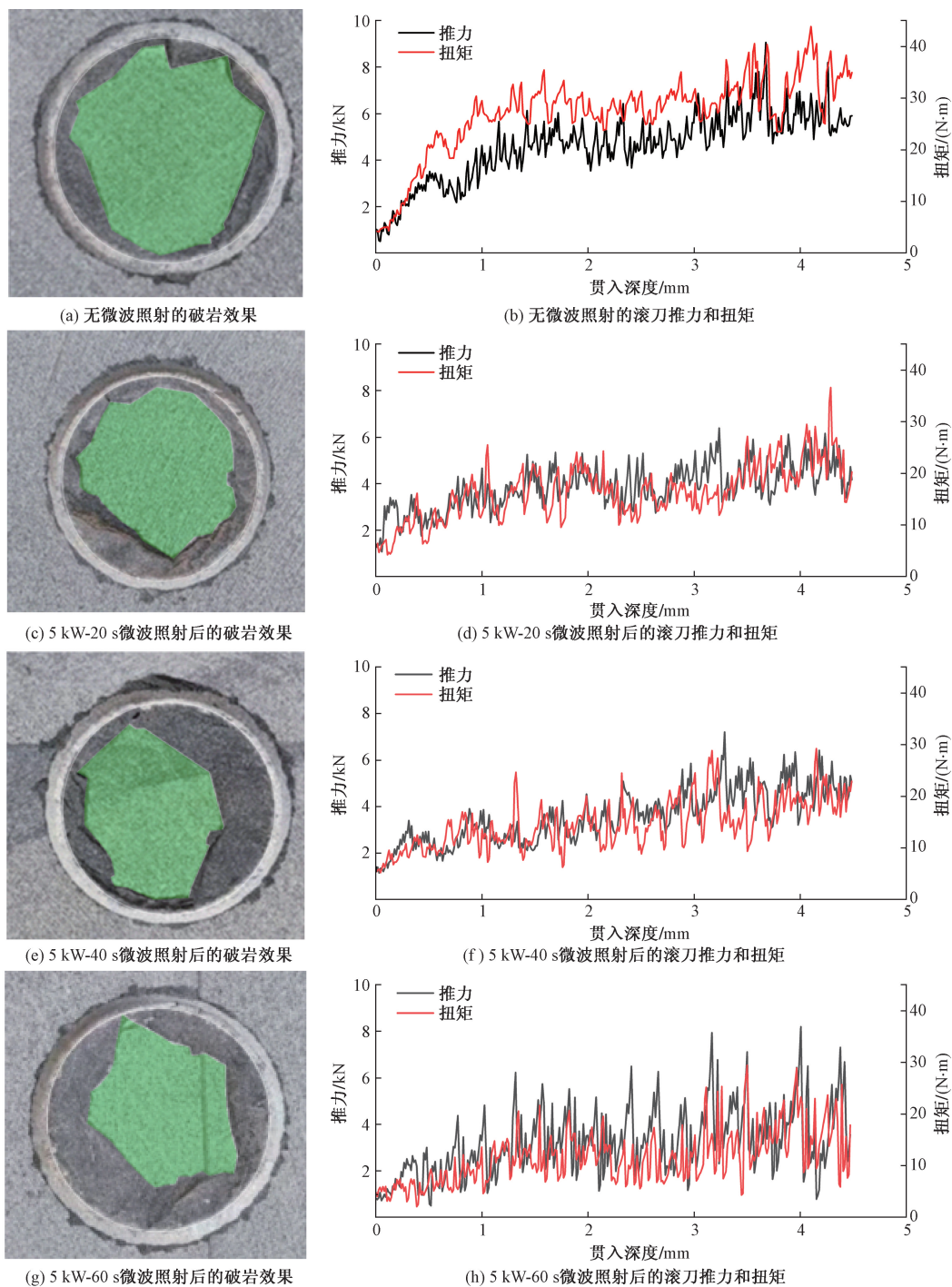


图5 不同微波照射时间对滚刀破岩效果的影响规律

Fig. 5 Influence law of different microwave irradiation time on the effect of rock breaking cutter

化趋势,在波动中缓慢增加后在一定范围内波动变化。为保证数据可靠性,取贯入深度1~4.5 mm的数据求得平均值,滚刀平均推力和刀盘平均扭矩分别是4.15 kN和17.95 N·m。

当微波功率为5 kW,照射时间为40 s,岩石表面的最高温度为88.1℃,可以观察到沿滚刀内侧被剥落的岩石面积明显增大,大块岩碴数量增加。是由于微波照射在岩石内部产生一定数量的裂纹,滚

刀下方的侧向裂纹提前贯通所导致的,岩碴重量为16.0 g,破岩后滚刀切痕内侧剩余岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的49%。刀盘扭矩变化与滚刀推力的变化趋势与前文一致。为保证数据可靠性,取贯入深度1~4.5 mm的数据求得平均值,滚刀平均推力和刀盘平均扭矩分别是3.91 kN和15.80 N·m。

当微波功率为5 kW,照射时间为60 s时,岩石表面最高温度为130.7℃,微波照射可以在岩石内

部形成有效破坏,滚刀轨迹内侧产生岩碴体积较大,最大宽度为无微波照射条件下岩碴宽度的2倍左右,岩碴重量为23.5 g,破岩后滚刀切痕内侧剩余岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的43%。滚刀推力在贯入深度小于1.5 mm时缓慢上升,之后呈现波动变化。刀盘扭矩曲线的变化趋势与其一致。为保证数据可靠性,取贯入深度1~4.5 mm的数据求得平均值,滚刀平均推力和刀盘平均扭矩分别是3.60 kN和13.13 N·m。

采用破岩比能(specific energy,  $S_E$ )表征破岩效率,表示切削单位体积岩石所需要的能量,计算公式为

$$S_E = \frac{FH + T2\pi r}{V} \quad (2)$$

式(2)中: $S_E$ 为破岩比能, MJ/m<sup>3</sup>;  $F$ 为滚刀推力, kN;  $H$ 为滚刀的贯入深度, mm;  $T$ 为刀盘扭矩, N·m;  $r$ 为滚刀转动圈数;  $V$ 为破岩试验过程中产生岩碴的体积,即岩碴重量与岩石密度的比值, m<sup>3</sup>。

上述结果说明,在同一微波照射功率下,滚刀平均推力和刀盘平均扭矩随着微波照射时间的增大而减小。无微波照射破岩比能为2 396 MJ/m<sup>3</sup>, 5 kW-60 s微波照射的破岩比能为923 MJ/m<sup>3</sup>,下降1 473 MJ/m<sup>3</sup>,充分证明了微波辅助对于滚刀破岩的巨大提升。

微波照射下滚刀破岩结果如图6所示,随着微波照射时间和微波照射功率的增加滚刀切痕内侧被剥落的岩石体积逐渐增大,且滚刀下方粉末状岩

碴增多;被剥落的岩碴更加趋向于沿滚刀切痕内侧均匀破坏,只有少量岩石沿滚刀切痕内侧的一个方向破坏。当微波功率为3 kW时,照射时间为60 s时,破岩后滚刀切痕内侧剩余岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的56%,当微波功率为5 kW,照射时间为60 s时,破岩后滚刀切痕内侧剩余岩石面积占滚刀切痕轨迹圆面积的43%;当微波功率为7 kW,照射时间为60 s时,岩石在微波的照射下从中间裂开被一分为二,裂口较为平整,没有多余岩碴产生。随着微波照射功率的增大,破岩后剥落的岩碴体积也在逐渐增大,当微波照射功率和照射时间到达一定程度后,可以直接破裂岩石,对岩石产生明显的宏观破坏。

计算得到微波照射下滚刀破岩数据如图7所示,滚刀推力和刀盘扭矩均为贯入深度1~4.5 mm的平均值。在相同的微波照射功率下,滚刀的平均推力和刀盘扭矩随着微波照射时间的增加而逐渐下降。当微波照射功率为3 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,滚刀的平均推力从4.27 kN下降至3.96 kN,下降0.31 kN,刀盘的平均扭力从20.24 N·m下降至16.98 N·m,下降3.26 N·m;当微波照射功率为5 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,滚刀的平均推力从4.15 kN下降至3.60 kN,下降0.55 kN,刀盘的平均扭力从17.95 N·m下降至13.13 N·m,下降4.81 N·m;当微波照射功率为7 kW,微波照射时间从20 s到50 s时,滚刀的平均推力从3.74 kN下降至3.08 kN,下降0.66 kN,刀盘的平均扭力从15.06 N·m

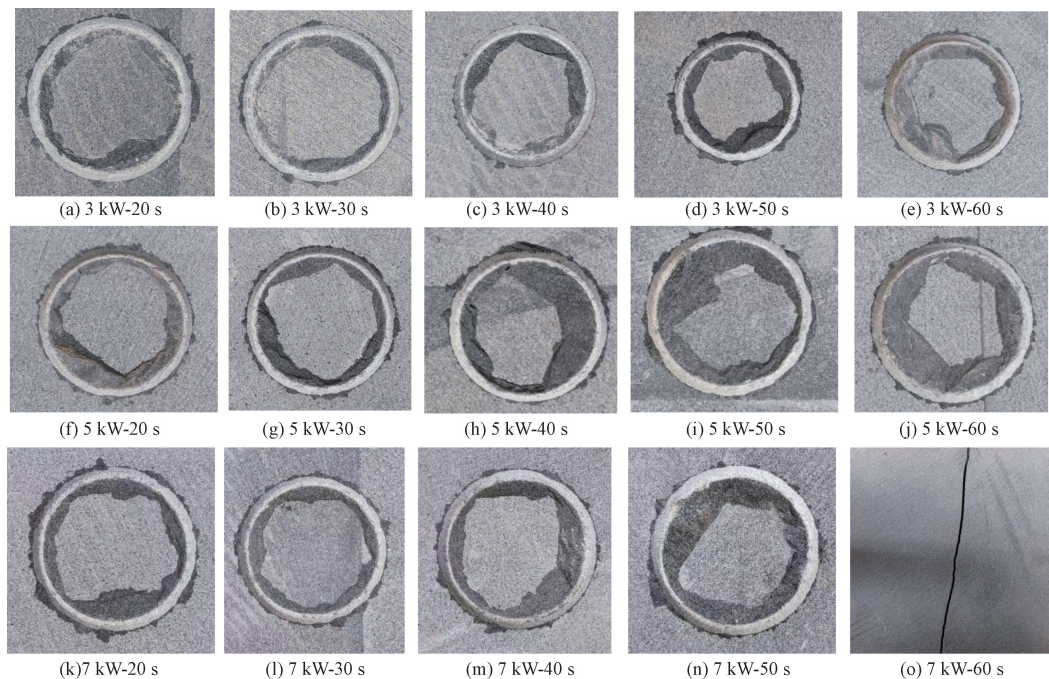


图6 微波照射下滚刀破岩结果

Fig. 6 Results of rock breaking by cutter under microwave irradiation

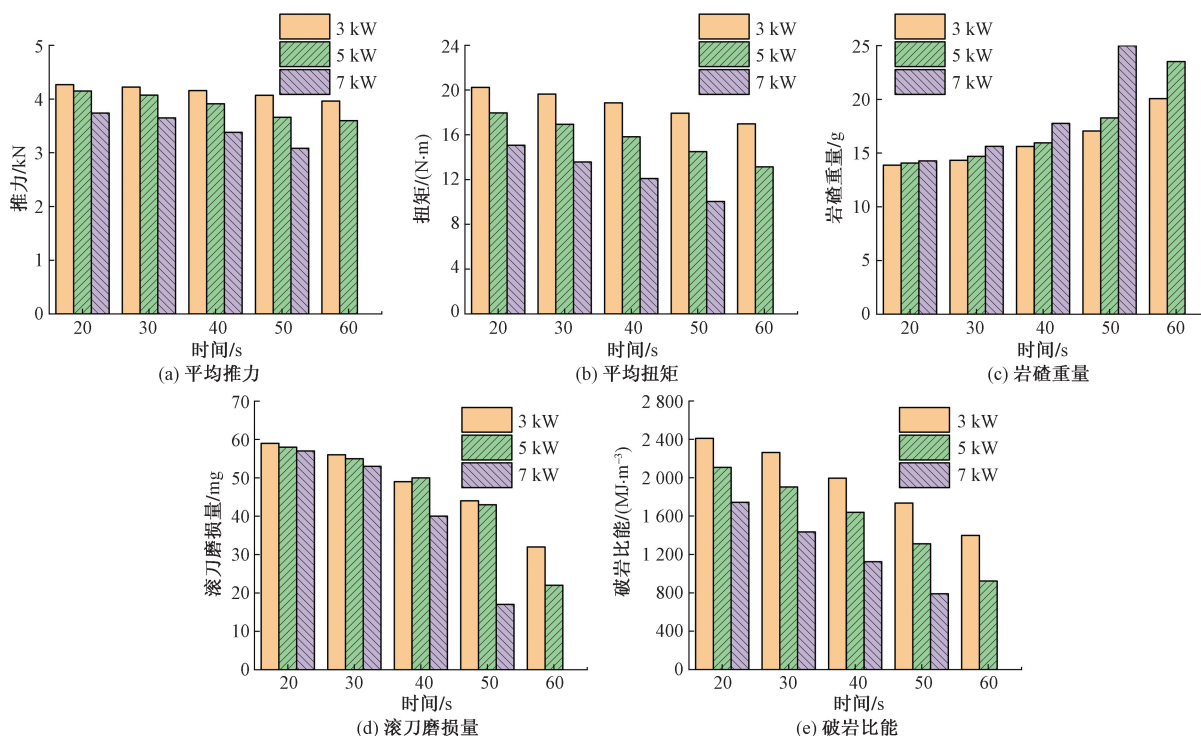


图7 微波照射下滚刀破岩数据

Fig. 7 Cutter breaking data under microwave irradiation

下降至10.05 N·m,下降5.01 N·m。随着微波功率增大,滚刀平均推力和刀盘平均扭矩下降幅度明显增大,微波功率为7 kW时,辅助效果最佳。另一方面,当微波辐射时间大于20 s、小于40 s时,3、5和7 kW的滚刀推力和扭矩分别下降0.11 kN和1.38 N·m、0.24 kN和2.12 N·m、0.36 kN和2.97 N·m。当微波辐射时间大于40 s、小于60 s时,3 kW和5 kW滚刀推力和扭矩分别下降0.19 kN和1.87 N·m、0.31 kN和2.68 N·m。由于7 kW-60 s的岩石被微波辐射破裂,微波辐射时间从40 s到50 s滚刀推力和刀盘扭矩分别下降0.30 kN和2.24 N·m。因此当微波辐射时间大于40 s时,滚刀推力和刀盘扭矩下降幅度明显增大,岩石破坏加剧。

当微波照射功率为3 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,岩碴重量从13.87 g增加至20.07 g,增加6.20 g,滚刀磨损量从59 mg下降至32 mg,下降27 mg;当微波照射功率为5 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,岩碴重量从14.07 g增加至23.52 g,增加9.44 g,滚刀磨损量从58 mg下降至22 mg,下降36 mg;当微波照射功率为7 kW,微波照射时间从20 s到50 s时,岩碴重量从14.28 g增加至25.01 g,增加10.74 g,滚刀磨损量从57 mg下降至17 mg,下降40 mg。微波功率和照射时间的增加可以有效降低了岩石的强度,使得较小的滚刀磨损量产生了更多的岩碴,有效减轻了滚刀的磨损同时提高了破岩

效率。

破岩比能如图7(e)所示,在相同微波照射功率下,随着微波照射时间的增加,滚刀的破岩比能减少。当微波照射功率为3 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,滚刀的破岩比能从2410 MJ/m<sup>3</sup>下降至1398 MJ/m<sup>3</sup>,下降1012 MJ/m<sup>3</sup>;当微波照射功率为5 kW,微波照射时间从20 s到60 s时,滚刀破岩比能从2107 MJ/m<sup>3</sup>下降至923 MJ/m<sup>3</sup>,下降1184 MJ/m<sup>3</sup>;当微波照射功率为7 kW,微波照射时间从20 s到50 s时,滚刀的破岩比能从1742 MJ/m<sup>3</sup>下降至790 MJ/m<sup>3</sup>,下降951 MJ/m<sup>3</sup>。微波辐射功率为7 kW时,滚刀破岩比能下降最为迅速;微波辐射时间大于40 s后,滚刀破岩比能下降速度也明显增大。另一方面,在相同微波照射时间下,随着微波功率的增加,滚刀的破岩比能逐渐减少。

结合滚刀的平均推力、平均扭矩和破岩比能综合考虑当微波照射时间大于40 s、微波功率大于7 kW可以对赤峰玄武岩形成有效破坏,提高破岩效率。

### 3 结论

微波功率和照射时间对岩石表面温度和内部损伤直接相关,鉴于微波与TBM滚刀耦合破岩研究不足,因此,针对微波与滚刀耦合切削赤峰玄武岩,开展微波照射试验与滚刀破岩试验,得出如下结论。

(1)岩石表面最高温度和升温速率随着微波照射功率和微波照射时间的增加而增加,岩石表面最高温度为172.6℃,最高升温速率为2.4627℃/s。

(2)当微波照射功率为7kW,微波照射时间为60s时,岩石表面温度仍然呈直线上升阶段,仍然没有达到岩石吸热的转折点,但由于岩样较薄被一分为二,继续增加微波功率或微波照射时间,仍可对较厚的岩样形成有效破坏。

(3)滚刀推力在破岩中呈波动变化,且岩碴主要在滚刀推力涨跌中产生,滚刀下方岩石被碾压为粉末,滚刀侧方产生块状岩碴;随着微波功率和微波照射时间的增加,岩碴重量增加,滚刀推力、刀盘扭矩、滚刀磨损量和破岩比能够均减少。对于试验所使用的赤峰玄武岩最佳的微波照射时间大于40s、微波功率大于7kW。

### 参 考 文 献

- [1] 周建, 尚肖楠, 刘福深, 等. 倾斜临空面下隧道掘进机滚刀贯入破岩研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 705-714.  
Zhou Jian, Shang Xiaonan, Liu Fushen, et al. Incline free-surface rock fragmentation caused by disc cutters of tunnel boring machine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 705-714.
- [2] 王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883-3912.  
Wang Shaofeng, Sun Licheng, Zhou Zilong, et al. Development and prospect of non explosive rock theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883-3912.
- [3] 高亚楠, 王云龙. 矿山建设中现代破岩方法综述[J]. 晋控科学技术, 2023(2): 1-8, 61.  
Gao Yanan, Wang Yunlong. Overview of modern rockbreaking methods in mining construction[J]. Jinneng Holding Science and Technology, 2023(2): 1-8, 61.
- [4] 高亚楠, 王云龙, 张垚, 等. 基于连续-离散方法的微波照射下花岗岩力学行为与破裂特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 693-713.  
Gao Yanan, Wang Yunlong, Zhang Yao, et al. Mechanical behavior and fracture characteristics of granite under microwave treatment based on continuous-discrete method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 693-713.
- [5] Wang Y L, Gao Y N, Yu L Y, et al. Microwave assistance effect for rock breaking of TBM disc cutter using the coupled method of continuum and grain-based model[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2024, 159: 466-484.
- [6] Bai G G, Su Q, Jia H L, et al. Variations in fracture toughness of SCB granite influenced by microwave heating [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2021.108048.
- [7] 李帅远, 卢高明, 洪开荣, 等. 岩石介电特性及微波加热升温规律分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1489-1496.  
Li Shuaiyuan, Lu Gaoming, Hong Kairong, et al. Analysis on rock dielectric properties and heating properties after microwave heating [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1489-1496.
- [8] 陈登红, 袁永强, 汤允迎. 微波技术辐射岩石实验探讨与成孔应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9447-9455.  
Chen Denghong, Yuan Yongqiang, Tang Yunying. Research progress on experimental discussion and pore-forming application of microwave radiation rock [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9447-9455.
- [9] 王宇轩. 应力环境对微波破岩效果影响机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.  
Wang Yuxuan. Study on the mechanism of stress environment on microwave rock breaking effect rock samples under microwave irradiation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [10] 郑彦龙, 马中骏, 李建春, 等. 开放式微波致裂模拟节理岩体试验及辅助破岩评估[J]. 隧道建设, 2023, 43(8): 1338-1347.  
Zheng Yanlong, Ma Zhongjun, Li Jianchun, et al. Fracturing of an artificial rock mass by open-ended microwave and potential benefits to assisted mechanical excavation[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(8): 1338-1347.
- [11] 胡梦玲, 叶家桐, 戴俊, 等. 微波-力作用下硬岩损伤规律及本构研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 40-49.  
Hu Mengling, Ye Jiatong, Dai Jun, et al. Study on the pattern of hard rock damage and constitutive relation with the microwave-force action [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 40-49.
- [12] 戴俊, 杨清清, 张敏, 等. 微波照射下花岗岩单轴压缩损伤本构模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8350-8357.  
Dai Jun, Yang Qingqing, Zhang Min, et al. A constitutive model of granite uniaxial compression damage under microwave irradiation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8350-8357.
- [13] 陈方方, 薛博天, 张志强, 等. 矿物粒径比引起的岩石微波照射效果差异[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12535-12541.  
Chen Fangfang, Xue Botian, Zhang Zhiqiang, et al. Difference of rock microwave irradiation effect caused by minerals particle size ratio [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12535-12541.
- [14] Ge Z L, Sun Q. Acoustic emission characteristics of gabbro after microwave heating [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104616.
- [15] Ning B, Liu F Z, Liu H, et al. Experimental study on rock breaking using a microwave-assisted tunnel boring machine cutter [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83. DOI: 10.1007/s10064-024-03632-x.
- [16] Ge Z L, Sun Q, Xue L, et al. The influence of microwave treatment on the model I fracture toughness of granite [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 249. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2021.107768.
- [17] Gao M Z, Yang B G, Xie J, et al. The mechanism of microwave rock breaking and its potential application to rock-breaking technology in drilling [J]. Petroleum Science, 2022, 19: 1110-1124.
- [18] 陈方方, 王超, 张志强. 微波照射路径对辅助破岩效果的影响研究[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(2): 245-252.

- Chen Fangfang, Wang Chao, Zhang Zhiqiang. Study of the effect of microwave irradiation path on the effect of assisting rock breaking[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(2): 245-252.
- [19] 卢高明, 冯夏庭, 李元辉, 等. 多模谐振腔对赤峰玄武岩微波致裂效果研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1115-1124.  
Lu Gaoming, Feng Xiating, Li Yuanhui, et al. Effect of microwave-induced fracturing of chifengbasalt by a multi-mode cavity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1115-1124.
- [20] 王修昌, 赵连敏, 吴大俊, 等. 4.6 GHz 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.
- [21] 戴俊, 负菲菲, 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.
- [22] 唐崇茂. 切缝辅助滚刀破岩临界间距试验及预测模型研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1131-1137.  
Tang Chongmao. Experimental and prediction model study on threshold spacing of slit-assisted cutterrock breaking[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1131-1137.
- [23] 孙振川, 陈雪峰, 杨延栋. 滚刀载荷监测及刀盘载荷分布规律实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11383-11388.  
Sun Zhenchuan, Chen Xuefeng, Yang Yandong. Experimental research on disc cutter load monitoring and load distribution law[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11383-11388.
- [24] 冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4755-4768.  
Ji Guodong, Fu Baiyi, Zhang Huijian, et al. Study on the influence law of TBM disc cutter penetration on the rock-breaking efficiency[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(12): 4755-4768.
- [25] 赵力, 苏岩, 王博, 等. 秦岭隧洞花岗岩段掘进机滚刀破岩规律及掘进特征[J]. 人民长江, 2023, 54(4): 170-176.  
Zhao Li, Su Yan, Wang Bo, et al. Rock breaking law and excavation characteristics of the rolling cutter of the granite section of the Qinling tunnel boring machine[J]. Yangtze River, 2023, 54(4): 170-176.
- [26] 李忠艳, 刘杨, 张雯超, 等. TBM 常截面盘形滚刀破岩过程受力研究[J]. 人民长江, 2024, 6(21): 1-9.  
Li Zhongyan, Liu Yang, Zhang Wenchao, et al. Research on force of disc cutter in TBM rock breaking process[J]. Yangtze River, 2024, 6(21): 1-9.
- [27] 翟淑芳, 杜红坤, 岳奇超, 等. 基于特征粒径的盘形滚刀破岩最优贯入度分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 147-152, 162.  
Zhai Shufang, Du Hongkun, Yue Qichao, et al. Analysis of the optimal penetration of disc cutter in rock breaking based on characteristic particle size[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(4): 147-152, 162.
- [28] 韩伟锋. 水射流-机械滚刀复合破岩影响因素[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 11858-11863.  
Han Weifeng. Study on influencing factors of water jet mechanical hob composite rockbreaking[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 11858-11863.