

# Research on Mechanical Properties of Basalt under Microwave Treatment

Ni Yang

Chongqing Urban Investment Infrastructure Construction Co., Ltd., Chongqing, 400015, China

## Abstract

With the continuous improvement and development of technology, microwave heating rock breaking technology is mainly applied in underground engineering and mining industries. It is more efficient and environmentally friendly than traditional mechanical rock breaking, and has broad application prospects in China. In this paper, WeboX standard experimental converter, uniaxial and rock micro-pore structure imaging analyzer are used to test the basalt specimen under different power. The change mechanism of Brazilian splitting tensile strength of basalt under microwave heating of 1.8kW, 3kW, 4.2kW and untreated conditions is discussed. The pore changes of the specimen's internal structure are also obtained through the analysis of NMR  $T_2$  spectrum. The experimental results show that the higher the microwave heating power is, the lower the tensile strength of basalt is, and the greater the damage strength is at the stage of 3~4.2kW. Moreover, the internal structure of basalt is changed and the pores are increasing.

## Keywords

basalt; microwave heating; Brazilian split; nuclear magnetic  $T_2$  spectrum

## 微波处理下玄武岩的力学特性研究

杨妮

重庆城投基础设施建设有限公司, 中国 · 重庆 400015

## 摘要

随着技术的不断改进和发展,微波加热破岩技术主要应用在地下工程和采矿行业中,它比传统的机械破岩更高效、更环保,在中国应用前景也很广阔。论文采用WeboX标准实验转炉、单轴及岩石微观孔隙结构成像分析仪对玄武岩试件在不同功率下的实验。探讨了玄武岩在微波加热1.8kW、3kW、4.2kW以及未处理下的巴西劈裂抗拉强度变化机理,还通过核磁 $T_2$ 谱的分析得出试件内部结构的孔隙变化。实验结果表明,微波加热功率越大,玄武岩的抗拉强度越低,在3~4.2kW阶段时损伤强度更大;并且玄武岩内部结构发生改变,孔隙不断增多。

## 关键词

玄武岩;微波加热破岩;巴西劈裂;核磁 $T_2$ 谱

## 1 引言

传统的矿石加工方式需要大量的能源,包括电力和化石燃料;消耗机械使用期限、造成成本增加、工期延误等。微波在工业领域已被广泛应用<sup>[1-4]</sup>,而岩石中的部分矿物对微波具有吸收率高,兼容性好等特点<sup>[5-7]</sup>。微波加热是一种体积加热,是一种较好的替代增产方法<sup>[8,9]</sup>。与常规加热相比,微波加热具有许多优点:①体积大、加热岩石速度快,材料选择性加热,非接触加热;②穿透力强;③易于控制;④安全性高;⑤无污染操作<sup>[10]</sup>。总的来说,微波加热岩石可以帮助许多行业提高效率、降低成本,同时也可以应用于地质勘探等领域,具有广阔的应用前景。

微波加热岩石的技术原理是利用微波能量的温度效应,

将能量传递到岩石中,使岩石温度升高,从而改变岩石的物理和化学特性,如岩石中的孔隙度和渗透性等。这种技术可以提高岩石的渗透性和改善油气流动性,从而促进油气的产生和采集。

材料的微波加热效果取决于材料损耗因子,损耗因子是材料的介电损耗因子  $\epsilon''$  介电常数  $\epsilon'$  之比。介电常数和介电损耗因子决定了材料在微波作用下的热响应,其关系如下:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$$

其中,  $\epsilon^*$  为复相对介电常数(复介电常数);  $\epsilon'$  为相对介电常数;  $\epsilon''$  为介电损耗因子,  $i = \sqrt{-1}$ 。

微波加热是电磁能转换为热能的过程,材料在电磁场中吸收的体积能量可按下式计算<sup>[11]</sup>:

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E_0^2$$

其中,  $P$  ( $W/m^3$ ) 为材料的体积能量吸收密度;  $f$  (Hz) 为微波的频率;  $\epsilon_0$  为真空介电常数  $8.85 \times 10^{-12}$  (F/m);  $E_0$  (V/m)

【作者简介】杨妮(1980-),女,中国重庆人,硕士,高级工程师,从事工程管理研究。

为微波能量中电场强度的大小。

微波穿透深度  $D$  是电磁波功率密度降至指初始值的  $1/e$  ( $e$  为自然常数) 时从材料表面开始的深度。对于混凝土和岩石等介电材料, 其损耗因子远小于介电常数, 微波穿透深度可按下式计算<sup>[12]</sup>:

$$D = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon''}}{2\pi \epsilon''}$$

其中,  $D/m$  为穿透深度;  $\lambda/m$  为相应微波频率下的波长。可知, 微波穿透深度与材料的介电常数和损耗因子有关, 对于  $2.45\text{GHz}$  ( $\lambda=12.2\text{cm}$ ) 的微波频率而言, 混凝土的穿透深度和波长处于同一数量级, 能够做到对试件内外的快速同时加热。

## 2 试验部分

### 2.1 试验材料

研究中选用市售的玄武岩, 主要由黑色的斜长石和较小的橄榄石、辉石等矿物质组成, 平均密度为  $2.98\text{g/cm}^3$ 。玄武岩具有密度高、硬度高、坚硬耐磨、不易风化等特点。该玄武岩采用圆柱体试样, 尺寸为  $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$  (直径  $\times$  高度)。

### 2.2 试验步骤

为保证试验的准确性, 将试件分为 A1、A2、A3、A4 四组, 且每组大小均为  $\Phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$  (直径  $\times$  高度)。试验前为了除去试件中水分, 将试件以  $120^\circ\text{C}$  放入烘干箱中烘干  $2\text{h}$ , 随后进行微波辐射试验, A1 组为未处理组, A2、A3、A4 组分别以功率为  $1.8\text{kW}$ 、 $3\text{kW}$ 、 $4.2\text{kW}$  进行辐射  $1\text{min}$ 。再用单轴加载仪器对试样进行抗拉强度试验, 最后通过核磁设备测出岩石内部孔隙分布情况进行分析。

### 2.3 试验设备

烘干箱, 如图 1 所示, 采用上海精宏实验设备有限公司生产的电热恒温鼓风干燥箱 (型号: DHG-9036A) 对试件进行烘干。工作温度为  $10^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ , 温度波动在  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。



图 1 电热恒温鼓风干燥箱 (烘干箱)

微波转炉, 如图 2 所示, 采用株洲市微朗科技有限公司生产的 WeboX 标准实验转炉 (型号: WLKJ-D63) 对试件进行微波辐射。设备微波频率为  $2450\text{MHz} \pm 50\text{Hz}$ , 微波输出总功率  $6\text{kW}$ , 微波输出功率从  $0 \sim 6\text{kW}$  无极可调。



图 2 WeboX 标准实验转炉

单轴加载仪器, 如图 3 所示, 采用四川德翔科创仪器有限公司生产的应力应变控制式三轴剪切渗透测试仪 (型号 MTS 岩石测试系统轴向加载装置) 对试件进行巴西劈裂。该装置的最大加载力为  $600\text{kN}$ 。



图 3 应力应变控制式三轴剪切渗透测试仪

核磁设备, 如图 4 所示, 采用由苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的岩石微观孔隙结构成像分析仪 (型号为 MacroMR12-150H-I) 对试件进行微观孔隙分析。磁场强度为  $0.3 \pm 0.05\text{T}$ , 仪器主频率为  $12.8\text{MHz}$ 。

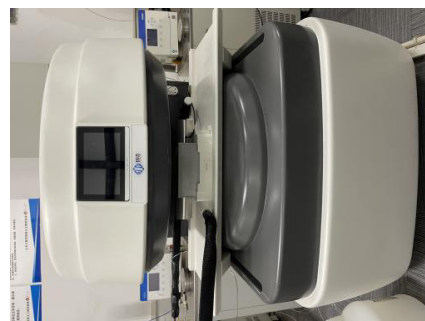


图 4 岩石微观孔隙结构成像分析仪

## 3 结果与讨论

### 3.1 微波辐射对玄武岩抗拉强度的影响

微波辐射可以导致玄武岩内部分子和离子的运动, 从而使岩石加热, 提高温度, 温度的升高可以促进岩石内部结构的变化, 改变岩石的抗拉强度; 还可以激活岩石中的水分子和化学物质; 也可能破坏玄武岩的表面, 导致岩石出现裂纹和破损, 降低岩石的抗拉强度。微波辐射可以对玄武岩的抗拉强度产生影响。国内外部分学者进行了大量的理论计算和数值模拟研究, 得到了微波辐射改变岩石内部结构的机

理。李勇等<sup>[13]</sup>运用 ANSYS 有限元软件对微波辐射下玄武岩的内部温度和热应力进行了仿真模拟；Hartlieb<sup>[14]</sup>在微波辐射下对玄武岩试样影响，与数值模拟的结果进行比较，并观察到拉伸应力超过拉伸强度然后导致裂纹等。从图 5 中可以看出在不同功率下玄武岩的抗拉强度，未处理过的玄武岩抗拉强度最大；当功率不断增加时，玄武岩的抗拉强度也随之减小；从 3kW 到 4.2kW 的连线的斜率最大，可知在 3kW 到 4.2kW 时导致玄武岩的抗拉强度损伤最大。

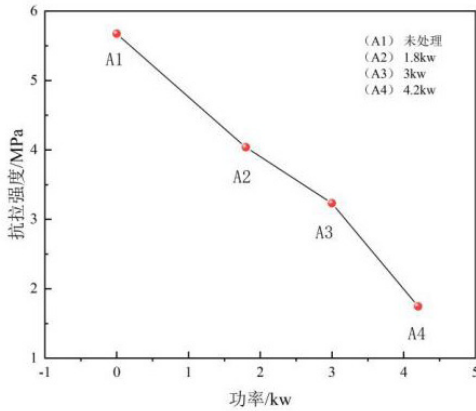


图 5 各功率下玄武岩的抗拉强度变化

### 3.2 核磁共振对岩石内部孔隙的分析

核磁共振 (NMR) 技术是一种非侵入性无损伤的测试方法，可以用于研究固体材料中的孔隙结构和水分分布。在研究玄武岩孔隙结构方面，可以探测玄武岩中不同孔径、形态、分布的孔隙结构，分析不同孔隙对岩石的影响；还可以分析玄武岩中孔隙的连通性，评估孔隙结构对岩石的渗透性、吸附性、稳定性等性质的影响；也可以测量玄武岩孔隙中水分的分布和含量，分析水分对岩石物理力学性质的影响。通过图 6 可以分析不同功率下玄武岩内部孔隙情况，在未处理的情况下，玄武岩内部小孔较少；在增大功率的情况下以 1.8kW、3kW、4.2kW 为三个界限可以看出，玄武岩内部小孔有明显的增加。说明微波辐射功率增大的条件下，玄武岩内部结构发生改变，孔隙不断增多，导致玄武岩的抗拉强度越来越小。

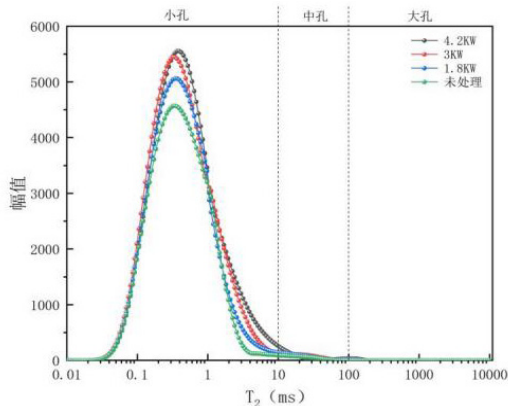


图 6 各功率下玄武岩孔径分布图

## 4 结语

通过巴西劈裂和核磁 T2 谱的研究下，分别对功率为 1.8kW、3kW、4kW 以及未处理下的玄武岩进行研究，得到了以下结论：

①分析功率与抗拉强度图，微波辐射的功率越大，玄武岩的抗拉强度越低；在 3~4kW 阶段时，玄武岩的抗拉强度损伤最大；

②通过分析 4 条 T2 谱线可知在微波辐射功率增大的情况下，玄武岩内部结构发生改变，孔隙不断增多。

综上所述，在微波辐射功率增大的情况下，玄武岩内部结构孔隙增多，导致玄武岩的抗拉强度越来越小。

## 参考文献

- [1] 喻清,丁德馨,张炬,等.微波辐照技术在矿业中的应用现状及发展趋势[J].黄金科学技术,2017,25(1):112-120.
- [2] 寇青军,方建军,张铃,等.微波技术在矿石粉碎中应用的研究进展[J].矿产保护与利用,2019,39(4):172-178.
- [3] 邵珠山,魏玮,陈文文,等.微波加热岩石与混凝土的研究进展与工程应用[J].工程力学,2020,37(5):140-155+165.
- [4] 卢高明,李元辉,Hassani F,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.
- [5] 王湘云,郭华东,王超,等.干燥岩石的相对介电常数研究[J].科学通报,1999(13):1384-1391.
- [6] 赵沁华,赵晓豹,郑彦龙,等.微波照射下矿物升温特性与岩石弱化效果研究[J].高校地质学报,2020,26(3):350-360.
- [7] 黄向东,李建保.陶瓷材料吸收微波的微观机制[J].福州大学学报(自然科学版),2004(2):169-172.
- [8] Li H, Tian L, Huang B, et al. Experimental study on coal damage subjected to microwave heating[J].Rock Mech Rock Eng,2020(53):5631-5640.
- [9] Hong Y, Lin B, Zhu C, et al. Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals[J].Appl Therm Eng,2016,102:1109-1125.
- [10] Li H, Shi S, Lin B, et al. A fully coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model for microwave heating of coal[J]. Fuel Process Technol,2019,189:49-61.
- [11] Saxena AK. Electromagnetic theory and applications[M]. Oxford,UK:Alpha Science International,2009.
- [12] Ferri Hassani, Pejman M. Nekoovaght, Nima Gharib. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2016.
- [13] 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.
- [14] Hartlieb P, Leindl M, Kuchar F, et al. Damage of basalt induced by microwave irradiation[J]. Minerals Engineering,2012,31(3):82-89.