

doi: 10.11799/ce201901012

微波辐射下硬岩损伤规律研究

戴俊, 王羽亮

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了探究微波辐射对硬岩损伤的影响规律, 减轻破岩难度, 以湖北花岗岩作为研究对象, 岩石孔隙率、超声波波速和岩石抗拉强度作为损伤变量指标, 通过试验法测得岩石在微波辐射下的损伤规律。结果表明: 在一定微波辐射功率范围内, 花岗岩受微波辐射影响不大, 而当辐射功率与辐射时间达到某一值时, 随着辐射功率增大、辐射时间增长, 岩石会出现明显的损伤, 表现为孔隙率上升、抗拉强度降低、超声波波速下降; 在等耗能情况下, 高辐射功率、短辐射时间较低辐射功率、长辐射时间更能引起岩石的损伤; 水是引起岩石损伤的重要因素, 饱和岩石试件相对于干燥岩石试件在微波辐射后损伤变量指标变化更加显著; 低功率、短时间微波辐射能使岩石强度增强。

关键词: 微波辐射; 岩石损伤; 孔隙率变化; 抗拉强度; 超声波波速

中图分类号: TD231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2019)01-0051-04

Experimental Study on Hard Rock Damage by Microwave Irradiation

DAI Jun, WANG Yu-liang

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to explore the effect of microwave radiation on hard rock damage and reduce the difficulty of rock breakage, the granite rock was used as the research object. Rock porosity, ultrasonic wave velocity and rock tensile strength were used as indicators of damage. Rock damage under microwave irradiation was measured by the experimental method. The results show that the granite is not affected by microwave radiation within a certain range of microwave radiation power, and when the radiation power and radiation time reach a certain value, as the radiation power increases and the radiation time increases, the rock will be significantly degraded, manifesting as increased porosity, reduced tensile strength, and decreased ultrasonic wave velocity; in the case of equal energy consumption, compared with low radiation power, long radiation time, high radiation power, short radiation time can cause more damage of the rock; water is an important factor causing rock damage, compared with the dry rock specimen, the change of the damage index of the saturated rock after microwave irradiation is more significant; the low-power, short-time microwave radiation energy makes the rock strength increase.

Keywords: microwave irradiation; damage of rock; porosity change; tensile strength; ultrasonic wave velocity

在隧道掘进的过程中, 岩石破碎问题已经成为当前需要解决的主要难题之一。目前, 钻爆法与机械破岩法在所有的破岩方法中占据了90%以上的使用率^[1]。但是, 钻爆法会对围岩产生较大的扰动并且可能会造成围岩支护困难的问题。机械破岩法在岩石强度较高的情况下对机械的磨损较大, 机械维修量大, 花费较高。因此, 为了更好地解决以上问题, 微波辅助机械破岩的技术应运而生^[2]。

许多国内外的学者对微波辅助破岩技术进行了

研究, 确认了该理论的可行性^[2,3]。戴俊等^[4-8]通过研究微波辐射后岩石强度变化条件, 得到岩石的强度受诸如微波辐射强度、辐射时间、岩石粒径大小、块体大小、冷却方式、矿物组成等多方面影响; 徐忠印等^[9-11]对岩石试件破坏规律与温度的关系进行了研究, 得出了岩石快速受热至高温更能降低岩石强度的结论。研究微波辐射下岩石的损伤规律能够很好的为微波辅助破岩技术提供理论依据, 因此, 本文以花岗岩作为研究对象, 以孔隙率、岩石抗拉

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174159)

作者简介: 戴俊(1964—), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要研究方向为岩石破碎、爆破工程, E-mail: 466215549@qq.com。

引用格式: 戴俊, 王羽亮. 微波辐射下硬岩损伤规律研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(1): 51-54.

强度和岩石超声波波速作为损伤变量指标,对岩石试件进行微波辐射试验研究^[12-15]。

1 试验

1.1 试验设备

1) 本试验所采用的工业大功率微波炉,为南京澳润微波设备厂所生产,其可调输出功率0~10kW,额定工作电压220V。

2) 双面打磨机、切割机、自动取芯机。

3) 岩石干燥箱、玻璃干燥器、测温枪、电子秤、RFP-09型智能测力仪、超声波测速仪。

1.2 试验试样与试验过程

所需花岗岩依据规范《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.10—2010),通过钻取芯、切割、打磨,制成尺寸为 $\Phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$ 的劈裂法测抗拉强度试验标准试件共51个,以3个为1组,共17组。试件加工尺寸误差为:直径 $\pm 2\text{mm}$,磨平度 $\pm 0.05\text{mm}$ 。花岗岩试件如图1所示。

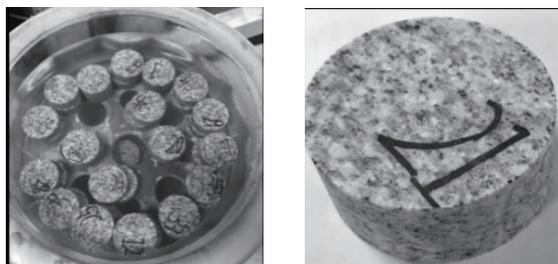


图1 标准花岗岩试件

1) 步骤一:随机选取一组试件作为对照组,另外16组按试验所需的含水率条件平均分为完全干燥类I与饱和类II。对所有试件量取厚度、直径(不同方向各量取三次,取平均值,保证准确率)得到每一个试件的体积。对所有试件进行饱和处理48h,称得试件饱和重量,通过超声波测速仪测得饱和组试件超声波波速。之后将试件放置于烘箱中24h,保证岩石试件处于完全干燥状态,并用电子秤测出干重。由所得试件中水的体积除以试件体积测得试件孔隙率。通过超声波测速仪测得完全干燥组试件超声波波速。

2) 步骤二:将试饱和组件进行饱和处理,取对照组试件不进行微波辐射,剩下饱和试件、干燥试件分别按微波辐射功率0.5kW、2kW、3kW、4kW,辐射时间120s、240s进行微波辐射。辐射完成后自然冷却,测量所有试件孔隙率、超声波波速,测量

方法同上。之后采用巴西劈裂试验法测得所有花岗岩试件的抗拉强度。巴西劈裂法试验后试件情况如图2所示。



图2 巴西劈裂法试验后标准试件破坏情况

3) 步骤三:整理和分析不同微波辐射参数条件下试件孔隙率、超声波波速与试件抗拉强度数据,分析微波照射前后岩石损伤变量指标变化规律。

2 实验结果分析

2.1 微波辐射前后花岗岩孔隙率差值变化规律

湖北花岗岩试件在不同微波辐射参数下,孔隙率的变化规律如图3所示。

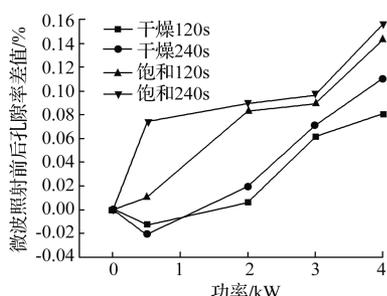


图3 微波辐射前后花岗岩孔隙率差值变化规律图

由图3可知,在辐射功率为0.5kW,辐射时间为120s时,饱和花岗岩试件的孔隙率几乎没有变化。在一定的辐射功率范围内,随着辐射功率的增大,饱和花岗岩孔隙率基本呈线性趋势增加。在一定辐射功率范围内,干燥花岗岩试件的孔隙率呈先下降,后上升的趋势。辐射功率0.5kW,辐射时间为240s时,试件的孔隙率达到最低值,岩石致密情况最好。之后随着辐射功率的增大,辐射时间的增强,试件孔隙率逐渐增大。

分析不同含水率花岗岩试件出现差异的原因为:饱和试件内部自然裂隙被水所填充,由于微波辐射,试件内部矿物质受热膨胀填补裂隙的同时,水分也受热膨胀挤压裂隙,两者耦合导致饱和试件的孔隙率并不会像干燥试件一样在微波辐射下内部矿物质产生热膨胀,填补了部分自然存在的微裂隙而出现

降低现象。

2.2 微波辐射前后花岗岩超声波波速的变化规律

测得花岗岩试件在不同辐射参数下的超声波波速变化如图4所示。

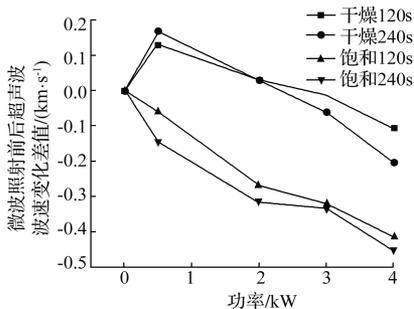


图4 微波辐射前后花岗岩超声波波速差值变化规律图

由图4可知，在0.5kW的辐射功率下，干燥花岗岩试件的波速出现略微上升，而饱和花岗岩试件的则呈下降趋势。当辐射功率大于0.5kW时，饱和与干燥试件的波速发展趋势近乎一致。超声波波速随微波的辐射时间增大、辐射强度增强而降低。超声波波速的降低是因为随着辐射时间增大，辐射功率增强，岩石内部裂隙不断发育引起试件内部结构发生变化。和饱和试件相比，干燥花岗岩试件波速降低并不明显。这说明微波辐射对饱和试件的超声波波速影响更加明显。

2.3 微波辐射前后花岗岩抗拉强度的变化规律

测得花岗岩试件的抗拉强度变化规律如图5—7所示。据图5，干燥花岗岩试件在0.5kW的辐射功率下，岩石的抗拉强度出现增强现象。在辐射功率为0.5kW，辐射时间为240s时，花岗岩试件抗拉强度达到峰值，较对照组试件上升了8%。在辐射功率为2kW，辐射功率3kW、辐射时间120s时，岩石试件的抗拉强度几乎没有变化。之后当辐射功率达到4kW，在辐射时间为240s时，试件抗拉强度显著降低，其值为15.3%。

饱和花岗岩试件抗拉强度的变化规律较干燥花岗岩试件略有不同，其结果如图6所示。饱和花岗

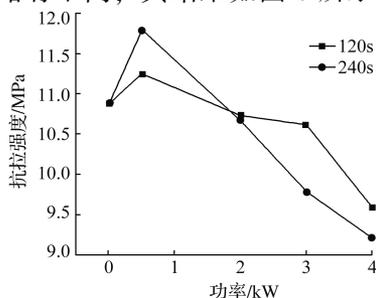


图5 干燥花岗岩抗拉强度与不同微波辐射功率的关系

岩试件并未出现抗拉强度增强的现象，反而在辐射功率为2kW、3kW范围内，抗拉强度的降低维持一个稳定的趋势，大致为10%左右，之后在辐射功率达到4kW，辐射时间为240s时，试件抗拉强度才有一个明显的降低，大致为19.6%。

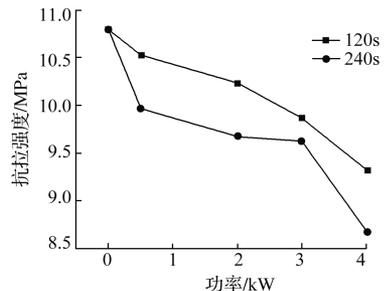


图6 饱和花岗岩抗拉强度与不同微波辐射功率的关系

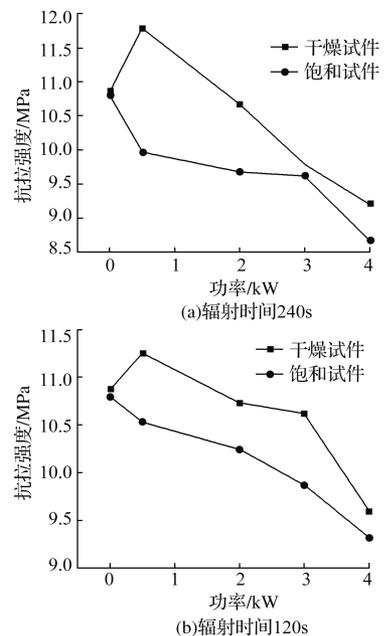


图7 不同辐射时间下花岗岩抗拉强度与不同微波输入功率的关系

从能量方面分析，饱和试件在辐射功率4kW，辐射时间120s时较辐射功率2kW，辐射时间240s时抗拉强度降低3.3%；干燥试件同等情况下抗拉强度降低9.3%。说明在消耗相同能量的情况下，高辐射功率、短辐射时间对岩石(损伤)的影响要显著高于低辐射功率、长辐射时间。分析原因为：采用高功率辐射试件时，试件内部吸波物质升温较快，与透波物质间产生温度梯度，导致岩石内部的矿物质因不均匀热膨胀而产生了较高热应力，致使试件内部裂隙发育较快。而采用低功率辐射时，所产生的热量有充足的时间向周围矿物质传递，致使由于热膨胀所产生的热应力不足，微裂隙发育缓慢。

对比干燥花岗岩试件与饱和花岗岩试件,可明显得出,在相同的辐射功率、辐射时间下,饱和试件的抗拉强度降低程度要显著高于干燥试件,试验结果如图7所示。说明岩石试件内部存在的水分是引起岩石劣化损伤的主要因素之一。

3 微波辐射造成岩石损伤的原因分析

由于微波的穿透性良好,微波辐射岩石后将产生大量的热量引起岩石内部矿物质发生不同程度的升温现象导致热应力的产生,进而出现矿物质的热胀冷缩现象致使岩石内部结构产生变化。因此,结合实验结果,微波辐射对岩石损伤的影响可总结如下:

1) 岩石由多种具有不同介电常数的矿物质组成,介电常数影响着矿物质对微波能量的吸收。因此,岩石在微波辐射下,内部不同材料的矿物质吸收不同的微波能,释放不同程度的热量,出现温度梯度,产生热应力。这导致了岩石内部裂隙的出现、发展、延伸,孔隙率发生变化。

2) 微波辐射会使花岗岩内部水分蒸发,由液态转化为气态,一方面体积增大,另一方面水蒸气压力会造成岩石内部出现微裂隙,同时,已存在的微裂隙也因此不断发育。

4 结论

1) 在一定的微波辐射参数范围内,微波辐射处理对花岗岩的影响不大,但当微波辐射功率与辐射时间达到一定值后,随着辐射功率增大、辐射时间增长,辐射处理会显著降低花岗岩的抗拉强度与超声波波速,并明显增大其孔隙率。

2) 在低功率,短时间微波辐射下,干燥岩石试件的孔隙率降低,超声波波速增大,抗拉强度增强。这是由于在微波辐射下岩石内部矿物质产生热膨胀,填补了部分岩石内部自然存在的微裂隙。

3) 岩石内部存在的水分是引起岩石损伤的因素之一,微波辐射下岩石的孔隙率变化受岩石内部水分受热蒸发体积膨胀这一物理效应影响显著,饱和岩石试件在相同微波辐射情况下孔隙率的增长与抗拉强度的降低比例要远高于干燥岩石试件。

4) 在消耗相同能量的情况下,高辐射功率、短

辐射时间对岩石损伤的影响程度要原高于低辐射功率、长辐射时间。这是由于采用低辐射功率处理花岗岩时,所产生的热量有充足的时间向周围矿物质传递,致使由于热膨胀所产生的热应力不足,微裂隙发育缓慢。

参考文献:

- [1] 李夕兵,周子龙,王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望 [A] //2009—2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告 [C]. 北京, 2010.
- [2] 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.
- [3] S·W·金曼,汪镜亮,李长根. 微波辅助破碎的新进展 [J]. 国外金属选矿, 2005(6): 14-20.
- [4] 戴俊,杜文平,屠冰冰,等. 微波照射下玄武岩中产生裂纹原因的研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(9): 9-11.
- [5] 潘艳宾. 微波照射下岩石中裂纹形成的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [6] 戴俊,潘艳宾,孟振. 微波照射下岩石强度弱化影响因素的试验研究 [J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(3): 364-368.
- [7] 戴俊,宋四达,屠冰冰,等. 不同微波照射参数对花岗岩强度的影响 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 188-192.
- [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.
- [9] 徐忠印,刘善军,吴立新. 岩石变形破裂红外与微波照射变化特征对比研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(12): 1738-1742.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 陈崇枫,徐涛, Michael Heap, 等. 孔径及孔隙率对火山岩强度特性影响的模拟 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 725-729.
- [13] 王宇,李晓,胡瑞林,等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287-300.
- [14] 郑志远,王思雯,金子梁. 岩石特性对超声波传播速度的影响 [J]. 物理实验, 2011, 31(9): 31-33.
- [15] 杨永明,鞠杨,刘红彬,等. 孔隙结构特征及其对岩石力学性能的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2031-2038.

(责任编辑 杨蛟洋)