

微波照射下岩石损伤影响因素的研究现状

杨志彬, 陈 超

华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山
Email: 1490337408@qq.com

收稿日期: 2020年12月16日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月26日

摘 要

微波加热预处理岩石可使岩石内部产生热损伤, 使岩石强度降低, 提高破岩效率。本文主要对微波照射下岩石损伤影响因素研究现状进行概述, 以便后续科研工作者结合岩石损伤影响因素, 选择最佳微波照射组合方式, 提高微波辅助机械破岩的效率。

关键词

微波照射, 岩石损伤, 影响因素, 研究现状

Research Status of Influence Factors on Rock Damage under Microwave Irradiation

Zhibin Yang, Chao Chen

College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei
Email: 1490337408@qq.com

Received: Dec. 16th, 2020; accepted: Jan. 19th, 2021; published: Jan. 26th, 2021

Abstract

Microwave heating pretreatment of rock can cause thermal damage inside the rock, reduce the strength of the rock, and improve the efficiency of rock breaking. This article mainly summarizes the research status of rock damage influencing factors under microwave irradiation, so that follow-up researchers can choose the best combination of microwave irradiation and improve the efficiency of microwave-assisted mechanical rock breaking in combination with rock damage influencing factors.

Keywords

Microwave Irradiation, Rock Damage, Influencing Factors, Research Status

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微波作为一种高频电磁波,多应用于雷达、通信等方面,随着研究的不断深入,微波在干燥果蔬制品、辅助药物合成、农产品杀菌等领域得到广泛应用[1]。近年来,科研工作者开始研究微波在辅助岩石破碎方面的前景,微波辅助机械破岩法是当前研究较为集中的一种新型破岩法[2],是指在岩石破碎前首先应用微波对岩石进行加热预处理,从而使岩石内部产生微裂纹进而促进内部损伤,之后在对其进行机械破碎,旨在解决传统破岩法原岩扰动大、能量利用率低、刀具磨损严重的破岩现状。

微波照射下岩石内部损伤影响因素的研究对微波辅助机械破岩的工业化实践及提高破岩效率具有重要意义,本文主要从外在及内在因素角度出发,对微波照射下影响岩石损伤效果的主要影响因素研究进展情况进行概述。

2. 外在影响因素对微波照射下岩石损伤效果的研究进展

外在影响因素指微波照射过程中,人为可控的一些变量,包括微波照射参数(微波功率和照射时间)、以及微波照射后对岩石选取何种冷却方式等,内在影响因素指岩石试件本身附存的性质,包括内部矿物组分、含水率、矿物颗粒大小和形状等。

2.1. 微波照射参数对岩石损伤效果的影响

为使微波辅助破岩尽快应用于工程实践,国内外学者开展了大量物理试验及仿真模拟研究。在试验方面,美国学者在率先开展研究,S. A. Barringer [3]等以硬岩玄武岩为试验对象,在机械破碎前首先进行微波处理后再进行破碎,破碎结果得出:经微波照射后,玄武岩强度显著降低,设备磨损度得到有效改善,并发现微波照射参数施加的值对破碎效果影响较大。

S. W. Kingman [4]等利用微波加热的方式,设置经微波照射与不经微波照射对照组,开展微波作用下铅锌矿石强度弱化试验,发现当使用 15 kW 微波功率时,岩石试件强度可在 0.5 s 内显著降低。试验过程依次增大微波功率,最终试验结果表明,在微波作用时间一定时所施加功率密度越大,矿石破碎效果越明显。

李元辉[5]等通过控制微波输出功率及照射时间,对玄武岩试件在不同微波作用路径下破坏特性进行研究,研究发现,采用低功率持续加热和高功率间断加热时,不同吸波矿物之间热传递进行较为充分,内部所产生热应力较小,试件以表皮脱落或局部崩开为主,当采用高功率持续加热时,试件易产生宏观裂纹或直接破裂,所施加的微波功率越大,试件产生宏观破裂的时间越短。

戴俊,王羽亮[6]等以花岗岩为研究对象,孔隙率、纵波波速和抗拉强度为内部损伤定量指标,对不同微波参数下花岗岩内部损伤规律开展研究,研究表明:伴随微波功率及照射时间的增大,花岗岩内部损伤状况表现为孔隙率增大,纵波波速及抗拉强度减小,在同等能量输入下,高功率短时间所造成的损伤效果较为显著。

戴俊[7]等以较硬玄武岩为研究对象, 从能量利用及耗散角度出发, 研究微波照射参数对玄武岩损伤演化过程中能量耗散影响规律, 得到了微波功率越大, 玄武岩强度损伤越显著, 经微波作用后可使其强度显著降低, 在开采过程中进行微波辅助破岩提前使岩石强度弱化, 可减少岩爆发生的概率及提高能量利用率。

在软件仿真方面, A. Y Ali 和 Bradshaw [8] [9]等利用有限差值法模拟出方铅矿和方解石组成的二相矿物模型内应力分布及晶界损伤状况, 模拟结果表明, 采用高功率密度进行微波照射可显著提高能量利用率, 并且微波功率密度或照射时间越大, 矿物颗粒周围拉应力及晶界损伤越大, 此外, 还存在最低微波功率密度水平, 当施加的微波功率密度低于此水平时即使增大微波照射时间也无法有效增加晶界损伤。

王浩[10]等利用颗粒流 PFC2D 模拟软件, 建立由方解石、方铅矿组成的二相矿物模型, 研究微波功率、照射时间、重复频率对方铅矿微裂纹发育影响。结果证明: 适当增大微波照射重复频率和脉宽有助于内部裂纹快速发育, 在微波重复频率和脉宽不变时, 高功率短时间的微波照射参数使得裂纹发育更为显著, 破碎所需能量较少。

孟振[11]利用 ANSYS 有限元模拟软件, 建立等比例微波炉腔体加热模型, 对圆柱形岩石试件进行微波加热模拟研究, 研究表明: 微波照射下矿物颗粒对周围原岩存在一定作用力, 微波输出功率越大或照射时间越长, 应力集中现象越明显, 并通过不同种类岩石微波照射及力学试验, 对不同微波照射参数下岩石损伤影响规律予以验证。

2.2. 冷却方式对岩石损伤效果的影响

微波照射之后对岩石采取冷却方式的不同亦会影响岩石强度损伤效果, 潘艳宾[12]选取成都砂岩为研究对象, 在微波照射后对砂岩试件进行常温冷却和喷水冷却, 之后进行点荷载试验, 试验结果得出, 在微波功率为 5 kW, 照射时间分别为 2 min、4 min、6 min 时, 采用常温冷却砂岩强度分别降低 22%、25% 和 35%, 而采用喷水冷却后砂岩强度降低值分别为 35%、56% 和 65%, 同比降低 13%、31% 和 30%, 可见, 微波照射后采用何种冷却方式对岩石强度损伤效果影响较为显著。

王思琦等[13]进一步细化冷却方式种类, 设置自然、洒水、水流冲击三种冷却方式, 选用花岗岩为研究对象, 对微波照射后采取不同冷却方式的花岗岩试件进行单轴压缩试验, 试验结果得出: 保持微波加载功率、照射时间等参数不变, 仅更改冷却方式, 花岗岩强度弱化呈现出明显差异, 其中, 采用洒水冷却和水流冲击冷却比自然冷却强度多降低值分别为 32% 和 58%, 可见采用水流冲击冷却时造成岩石内部损伤最为显著。

郝家旺[14]在由冷却方式不同而引起的微波辅助破碎能耗差异方面开展了一定研究, 选用磁铁石英岩为研究对象, 在开展落锤冲击破碎试验前对微波照射后试件进行喷水冷却和自然冷却, 研究表明, 经喷水冷却后磁铁石英岩动态强度显著降低, 峰值强度仅为常温冷却的 0.21 倍, 经喷水冷却后对试件进行破碎比自然冷却后再进行破碎能量利用率可提高 7%~12%, 这些研究成果对微波辅助破岩的成功运用具有积极推动意义。

3. 内在影响因素对微波照射下岩石损伤效果的研究进展

3.1. 矿物组分对岩石损伤效果的影响

英国 S. W. Kingma [15]等选用不同种类岩石进行微波辅助破碎研究, 研究表明: 不同种类岩石在微波照射下升温特性存在较大差异, 并且得到任何一种岩石在应用中都存在符合其本身特性的微波参数, 之后开展了不同微波参数下铅锌矿石照射试验, 研究得出当微波功率较大时, 仅需较短时间便可使矿石受到严重损伤。

P. Hartlieb [16]选用玄武岩、砂岩和花岗岩为研究对象,开展高功率下微波照射试验,研究得出,不同种类岩石在微波照射下热物理性能存在差异,呈现出不同微波照射效果,得到只有在了解不同矿物组分在微波照射下物理及化学变化状况后,微波加热才能成功应用于各种粉碎,分离或采矿工艺。

莫秋红[17]针对不同矿物组分物料在微波下吸波能力开展分析研究,研究表明:不同组分骨料混合一起并不会影响其自身吸波能力,不吸波物质的存在不会干扰吸波组分吸收微波,强吸波物料所占质量百分比越大,混合物料整体所能吸收的能量越多。

何春林[18]通过对常见冶金矿物辅料吸收微波特性开展研究,研究表明:微波照射加热下物料会在分子级别产生相互作用,升温速率受单位体积吸收功率、功率密度及物料比热容影响,其中单位体积物料吸收微波功率主要由微波作用方式及物料自身损耗微波能力决定。

刘德林[19]采用 COMSOL 模拟软件模拟微波照射下不同种类岩石在电磁场、温度场、应力场耦合作用下的破坏试验,得到了热膨胀系数、比热容、介电常数等岩石自身特性均影响微波照射效果,不同矿物组分具有不同的热力学特性,受微波照射后便会产生不同程度内部损伤,其中介电常数越大的矿物组分在相同微波参数下升温速率也最快,热膨胀系数越大受微波照射后所产生的拉压应力也越大。

3.2. 含水率对岩石损伤效果的影响

岩石本身含水率的多少也是影响岩石强度损伤的重要参数。Peinsitt [20]等为研究岩石内部含水率对微波照射后岩石损伤效果影响,选用经干燥和饱水处理的岩石进行微波照射,研究表明:相同微波参数照射下,玄武岩升温特性受含水率影响较小,砂岩及花岗岩波速及升温特性受含水率影响较大。

S. Kim [21]等选用饱水处理的花岗岩为研究对象,微波照射之后开展巴西劈裂力学试验,研究热-水力耦合模型下花岗岩内部损伤状况,研究表明:经饱水处理的花岗岩试件在微波照射后内部微裂纹的数量比未经饱水处理的要大得多,抗拉强度也显著降低,这是由于水的理论热增长率远大于花岗岩中任何其他晶粒的热增长率,水的体积热膨胀在诱发内部裂纹中起关键作用造成的。

戴俊[22]等通过对不同含水率下玄武岩试件的微波照射试验、剪切试验、CT 扫描试验,开展微波照射下由含水率差异引起的内部损伤差异及裂纹拓展特征试验研究,研究表明:在微波照射下玄武岩抗剪切强度与含水率呈负相关,内部含水率越高,经微波处理后损伤破坏效果越显著,随着含水率的增大,内部损伤离散性逐渐变大,并呈现出局部化特征。

王羽亮[6]等通过制备大量干燥及饱水处理的花岗岩试件,进一步研究含水率对微波照射下岩石损伤效果的影响,研究表明:岩石内部水含量的高低是影响岩石损伤效果的重要影响因素,饱水处理的花岗岩试件在相同微波参数下内部损伤程度远高于干燥的花岗岩试件。

3.3. 矿物颗粒大小和形状对岩石损伤效果的影响

Wang [23]等通过开展不同矿物微波辅助研磨试验,发现原始矿物颗粒粒径尺寸不同,受微波照射后研磨破碎程度及所需能量存在较大差异。

R. Meisels [24]等通过有限差分法模拟分析了不同颗粒尺寸二相矿石模型中微波传递及被吸收规律,通过控制介电常数数值反映矿石内部电场强度的变化,并得到了微波作用效果除与材料非均质性相关外,矿石颗粒尺寸以及微波穿透深度均对损伤程度有所影响。

D. A. Jones [25]等通过有限差分法构建了由黄铁矿和方解石组成的二相矿物准静态热力学模型,对不同矿物颗粒大小和形状的矿物模型开展微波照射模拟研究,研究表明:相同微波参数下,所构建的吸波矿物颗粒尺寸越大,经微波照射后矿物模型温度上升的越高,随着加热颗粒的尺寸减小,需要更多的能量来充分提高温度,从而产生足以破坏岩石的热应力,同时由构建的球形和偏离球形矿物颗粒受微波后不同的破裂模式可总结出,矿物颗粒形状对微波照射后岩石损伤效果亦有所影响。

潘艳宾[12]利用颗粒流 PFC2D 模拟软件, 建立由不同颗粒大小的圆形以及方形矿物颗粒组成的黄铁矿和方解石二相矿物模型, 模拟微波照射后岩石模型内部裂纹发育损伤状况, 研究表明: 矿物颗粒越小, 岩石内部产生热损失所需微波能量越多, 矿物颗粒形状越不规则, 表面曲率变化越大, 越易在矿物尖端处形成应力集中出现微裂纹, 进而造成内部热损伤。可见, 矿物颗粒的大小和形状均对微波照射后岩石内部的损伤状况存在一定影响。

4. 总结与展望

结合上述概述可总结出, 微波照射下影响岩石损伤效果的主要因素包括: 微波照射参数(微波功率和照射时间)、冷却方式、岩石内部矿物组分、含水率、矿物晶体颗粒和大小等。

然而, 以上研究多从岩石静力学特性及数值模拟角度对微波照射下岩石损伤影响因素开展研究, 对经微波照射后不同因素影响下岩石破碎效果、能耗规律及损伤机理研究较少, 在此基础上开展微波照射后岩石动态力学性能及破碎能耗研究可为微波辅助机械破岩法早日应用提供一定理论指导, 此外, 今后可进一步从矿物分布状态、层理结构面及原生裂隙等对微波照射下岩石损伤影响规律及机理开展研究, 以便进一步丰富岩石损伤影响因素理论研究。在未来微波辅助机械破岩实际工程应用中, 针对不同种类岩石的损伤影响因素选择最佳微波照射组合方式有助于提高能量利用率和破岩效率。

基金项目

河北省自然科学基金项目(编号: E2019209413)。

参考文献

- [1] 牟群英, 李贤军. 微波加热技术的应用与研究进展[J]. 物理, 2004(6): 438-442.
- [2] 卢高明, 李元辉, 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] Barringer, S.A., Davis, E.A., Davis, H.T., *et al.* (1995) Microwave-Heating Temperature Profiles for Thin Slabs Compared to Max Well and Lambert Law Predictions. *Journal of Food Science*, **60**, 1137-1142. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb06309.x>
- [4] Kingman, S.W., Jackson, K., Bradshaw, S.M., *et al.* (2004) An Investigation into the Influence of Microwave Treatment on Mineral Ore Comminution. *Powder Technology*, **146**, 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.08.006>
- [5] 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.
- [6] 戴俊, 徐水林, 宋四达. 微波照射玄武岩引起强度劣化试验研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(1): 23-26.
- [7] 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.
- [8] Bradshaw, A. and Marchand, B. (2011) Performance Quantification of Applicators for Microwave Treatment of Crushed Mineral Ore. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **45**, 30-35. <https://doi.org/10.1080/08327823.2011.11689796>
- [9] Ali, A.Y. and Bradshaw, S.M. (2009) Quantifying Damage around Grain Boundaries in Microwave Treated Ores. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, **48**, 1566-1573. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.09.001>
- [10] 王浩, 胡南, 李广悦, 等. 微波辐射对方铅矿微裂纹发育影响的模拟研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(4): 416-421.
- [11] 孟振. 微波照射下岩石损伤演化的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [12] 潘艳宾. 微波照射下岩石中裂纹形成的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [13] 戴俊, 王思琦, 王辰晨. 不同冷却方式对微波照射后花岗岩强度影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 170-174.
- [14] 郝家旺. 冲击载荷下磁铁矿石耗能规律与破坏机理实验研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2019.
- [15] Kingman, S.W., Jackson, K., Cumbane, A., *et al.* (2003) Recent Developments in Microwave-Assisted Comminution. *International Journal of Mineral Processing*, **74**, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2003.09.006>

-
- [16] Hartlieb, P., Toifl, M., Kuchar, F., *et al.* (2015) Thermo-Physical Properties of Selected Hard Rocks and Their Relation to Microwave-Assisted Comminution. *Minerals Engineering*, **91**, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.008>
- [17] 莫秋红. 微波场中锰矿物微结构及物料组成与其吸波性能的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [18] 何春林. 典型冶金原辅料的微波吸收特性及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [19] 刘德林. 微波照射岩石效果影响因素及其影响规律数值试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [20] Peinsitt, T., Kuchar, F., Hartlieb, P., *et al.* (2010) Microwave Heating of Dry and Water Saturated Basalt, Granite and Sandstone. *International Journal of Mining & Mineral Engineering*, **2**, 18-29. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2010.031810>
- [21] Kim, S. and Carlos Santamarina, J. (2016) Rock Crushing Using Microwave Pre-Treatment. *Geo-Chicago*, Chicago, 14-18 August 2016. <https://doi.org/10.1061/9780784480151.071>
- [22] 戴俊, 李传净, 杨凡, 等. 微波照射下含水率对岩石强度弱化的影响[J]. 水力发电, 2018, 44(1): 31-34.
- [23] Wang, Y.M. and Forssberg, E. (2005) Dry Comminution and Liberation with Microwave Assistance. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, **34**, 57-63. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0692.2005.00718.x>
- [24] Meisels, R., Toifl, M., Hartlieb, P., *et al.* (2015) Microwave Heterogeneous Propagation and Absorption and Its Thermo-Mechanical Consequences in Rocks. *International Journal of Mineral Processing*, **135**, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.01.003>
- [25] Jones, D.A., Kingman, S.W., Whittles, D.N. and Lowndes, I.S. (2004) Understanding Microwave Assisted Breakage. *Minerals Engineering*, **18**, 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.011>