

# 微波辐射辅助岩石破碎研究与应用进展

陈超<sup>1,2</sup>, 谢佳龙<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

<sup>2</sup>河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月14日

## 摘要

微波辅助岩石破碎技术凭借其选择性加热、能耗低、效率高等优势, 在深部资源开采、隧道掘进及硬岩破碎等领域展现出重要的工程应用价值。岩石内部矿物介电特性的差异是微波诱导热应力的根本原因, 非均匀温度场导致热应力集中于矿物界面, 驱动微裂纹沿晶萌生、穿晶扩展并最终形成贯通裂隙网络, 从而显著降低岩石强度、提升后续机械破岩效率。数值模拟方面, 多场耦合技术也已发展为关键手段。目前, 针对岩石的研究较为宽泛, 微波损伤机制尚不明确, 微观热应力演化与宏观力学性能劣化的定量关联仍有待深入。本文系统梳理微波辅助岩石破碎的研究进展与应用现状, 旨在为相关领域的理论深化与工程应用提供系统参考。

## 关键词

微波辐射, 岩石破碎, 微观损伤, 仿真模拟

# Research and Application Progress of Rock Fragmentation Assisted by Microwave Radiation

Chao Chen<sup>1,2</sup>, Jialong Xie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

<sup>2</sup>Hebei Provincial Technology Innovation Center for Green and Intelligent Mining of Mines, Tangshan Hebei

Received: March 31, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 14, 2026

## Abstract

Microwave-assisted rock breaking technology offers significant engineering application value in deep resource extraction, tunnel excavation, and hard rock fragmentation due to its advantages of selective heating, low energy consumption, and high efficiency. The variation in dielectric properties

\*通讯作者。

文章引用: 陈超, 谢佳龙. 微波辐射辅助岩石破碎研究与应用进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 589-597.

DOI: 10.12677/me.2026.143060

among constituent minerals is the fundamental cause of microwave-induced thermal stress. The resulting non-uniform temperature field concentrates thermal stress at mineral interfaces, driving microcrack intergranular initiation, transgranular propagation, and the eventual formation of connected fracture networks. This process significantly reduces rock strength and enhances the efficiency of subsequent mechanical breaking. In terms of numerical simulation, multi-field coupling technology has also become a key approach. Current research on rocks remains relatively broad, and the microwave-induced damage mechanisms are not yet fully understood. In particular, the quantitative correlation between micro-scale thermal stress evolution and macro-scale mechanical property deterioration requires further investigation. This paper systematically reviews the research progress and application status of microwave-assisted rock breaking, aiming to provide a systematic reference for theoretical advancement and engineering application in related fields.

## Keywords

Microwave Radiation, Rock Fragmentation, Micro-Damage, Simulation

Copyright © 2026 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

矿产资源是工业的粮食, 是经济发展的重要物质基础。中国是世界上铁矿石资源总量相对丰富的国家, 但可供开发利用的资源短缺。铁矿石是钢铁工业最重要的原材料, 每年开采和加工处理量以亿吨计, 需要耗费大量的材料和能源, 随着隧道工程、矿产资源采选等工程的开展以及开采深度的增加[1], 矿石的开采、加工总能耗和成本都大幅增加, 岩石破碎作为其中不可避免的一道工序在其中占据了重要地位。传统破岩法按照技术工具可分为钻孔爆破法及机械破岩法, 其工艺优劣直接影响着工程进度及效益[2]。传统破岩法在大型破岩工程中效率很高, 仍占主导地位。但在科技进步发展迅速的今天, 缺点却显而易见。对原岩以及原岩应力场有一定的影响, 容易造成周边岩石破坏, 施工精度低且施工条件差, 有一定的安全风险, 后期围岩支护困难等问题有待解决。

在此背景下, 微波辐射辅助岩石破碎技术应运而生, 并逐渐成为岩石力学与采矿工程领域的前沿研究方向。该技术通过利用微波电磁能选择性加热岩石内部的矿物成分, 诱发不均匀的热应力, 从而在岩石内部产生并扩展微裂纹, 最终实现岩石的弱化与预处理。近年来, 国内外学者围绕微波辐射岩石的热应力损伤、裂隙拓展规律以及数值模拟方法开展了大量研究[3], 形成了从宏观现象到微观机理、从单一物理场到多场耦合的系统性认识。

## 2. 微波与岩石的相互作用

### 2.1. 微波的概念及加热原理

#### 2.1.1. 微波的基本概念

微波是指频率在 300 MHz~300 GHz 之间的电磁波, 具有易于集聚成束、高度定向性以及直线传播的特性可用在无阻挡的视线自由空间传输高频信号。对应的波长为 1 mm~1 m, 在电磁波谱中, 频率处于太赫兹波与无线电波之间, 波长则包含毫米波、厘米波、分米波三个数量级。最常用的两个频率是 915 MHz 和 2450 MHz, 一般 915 MHz 用于工业, 2450 MHz 主要应用于家用。

### 2.1.2. 微波的加热原理

微波加热的主要原理是基于高频交变电场与材料内部微观结构的相互作用[4]。对于大多数电介质材料,微波加热主要依靠极性分子在交变电场作用下发生取向极化与弛豫运动,分子间不断摩擦碰撞从而将电磁能转化为热能,如下图1所示。这种体积加热效应能够使材料从内部快速、均匀升温。在不同频率下,不同的物质对微波的吸收能力不同,因此在相同的微波照射下,不同物质温度变化可能会有很大差异。

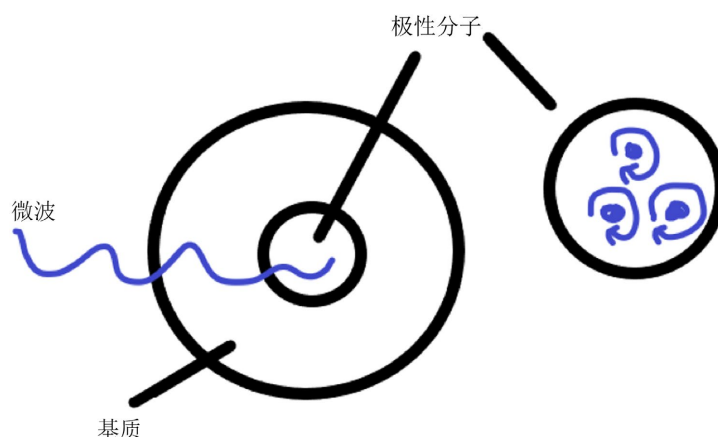
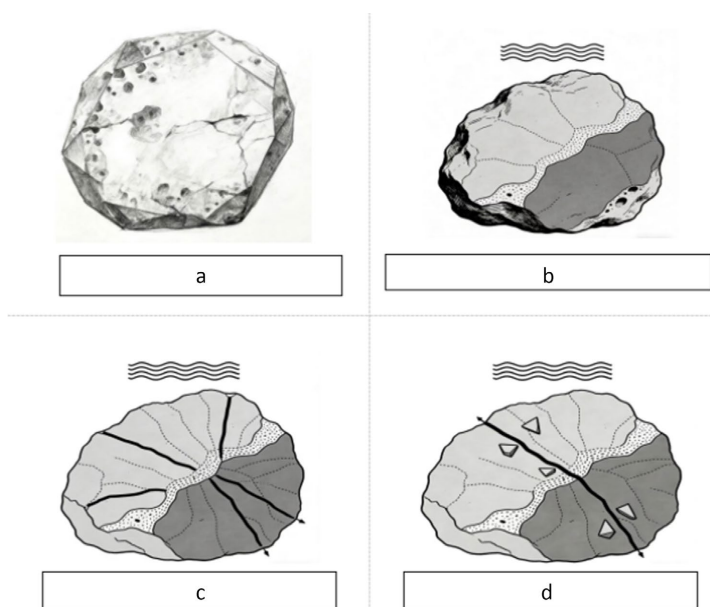


Figure 1. The microwave thermal effect of polar molecules  
图 1. 极性分子的微波热效应

### 2.2. 岩石破碎的机理

岩石热裂过程是岩石在微波作用下由微观变化(裂隙产生发育)逐渐扩展的宏观变化(裂隙贯通整体破裂)的一个渐变过程[5]。过程示意图如下图2所示。



a. 初始岩石结构; b. 矿物界面产生热应力集中与微裂纹萌生; c. 裂纹沿晶或穿晶扩展; d. 裂纹网络形成与贯通。

Figure 2. Diagram of the thermal cracking process of rocks  
图 2. 岩石热裂过程示意图

当微波作用于岩石材料上时, 不同矿物介电性能的差异直接影响着其所能吸收微波能量的多少, 再加上不同组分之间热膨胀系数存在差异, 吸收能量后矿物颗粒会出现不同程度体积膨胀, 并且膨胀过程中必会受到来自颗粒周围矿物颗粒或集合体对其的约束及限制, 导致矿物颗粒自身膨胀变形不能够自由的完全进行, 因此便可能会使岩石中有大量的热应力产生。

随着外界温度的升高, 当热应力大于岩石本身强度极值时, 就可能会在各种矿物性质的颗粒之间或颗粒与颗粒集合体之间的交界面处产生微观裂纹, 微波继续作用会使其温度持续升高, 造成不同矿物组分之间热应力进一步加大, 使得产生的微观裂隙得到进一步的发育及扩展最终产生宏观上的大裂纹, 从而使岩石整体的结构性发生巨大变化甚至诱使岩石碎裂。此外岩石本身是由各种矿物在不同地质作用下生成的, 其内部本就存在原有弱结构面(节理或裂隙)及孔隙, 微波作用可使岩石内部原有裂隙得到进一步的发育及扩展; 对于弱结构面, 微波引起岩石内部的热应力往往会预先达到其所承受能力最大值, 导致其结构构造上的破坏以致影响岩石整体的强度[6]。

### 3. 微波致裂机理与损伤演化

#### 3.1 微观损伤萌生机理

微波辐射诱导的热应力是岩石损伤与裂解的核心物理机制。热应力的根源在于岩石矿物的介电特性差异。大量研究表明, 岩石并非均质体, 其内部不同矿物成分对微波能量的吸收能力存在显著差异。邵珠山对此进行了系统性研究, 以花岗岩为对象, 基于真实矿物结构建立二维数值模型, 揭示了微波辐射下矿物间非均匀温度场的演化规律, 并明确指出由此诱发的热应力可使岩石断裂韧性下降高达 28%。在模拟中发现, 石英矿物边界处的热应力集中程度远高于长石-黑云母边界, 这直接关联于不同矿物的微波敏感性排序[7]。这一发现与陈方方等[8]的研究相互印证。张启通过 COMSOL 与 PFC3D 耦合模拟, 精细刻画了花岗岩和玄武岩中强吸波矿物与弱吸波矿物交界处的巨大温度梯度与热应力集中, 明确指出不同矿物交界处是微裂纹萌生的首要位置[9]。于洪雯的研究从典型结构金属矿石的角度进一步深化了这一认识。通过实验发现, 吸波矿物(硫化物、金属氧化物)富集区在微波照射下形成高温核心, 被低吸波矿物包裹, 这种结构性的介电差异导致了特征性的径向裂纹起裂与层间破裂, 并建立了考虑几何参数和热膨胀耦合系数的力学模型来预测热应力分布与裂纹起裂位置[10]。祁培培等的模型研究则量化了矿物聚集形态的影响, 证明在总吸波面积相同时, 强吸波矿物颗粒扩散度越低, 产生的温度梯度和第一主应力越大, 损伤效果越显著[11]。这些研究共同构建了“矿物介电差异-非均匀温升-热应力集中-初始损伤”的基础理论链条。

#### 3.2. 裂隙扩展与贯通模式

在热应力驱动下, 岩石内部的损伤从微观裂隙开始萌生, 最终表现为宏观裂隙的萌生、扩展、贯通乃至形成复杂网络。这一从微观损伤到宏观破坏的跨尺度演化过程, 是微波照射下岩石破裂的核心动态过程。

从矿物界面到微裂纹萌生, 损伤的起始高度依赖于矿物界面处的热应力集中。郭轩的微观数值模拟生动展示了这一过程: 在石英-黑云母-长石三相模型中, 微波照射下不同矿物边界处应力演化各异, 石英与黑云母的边界处应力最大, 且在狭长边界易出现应力集中, 最终因弹性模量差异, 长石和石英会先于黑云母发生损伤[12]。张启的 CT 扫描和模拟研究则系统描述了损伤的早期形态: 微波照射后, 新萌生的微孔隙会优先出现在低密度矿物周边及矿物颗粒胶结处, 导致孔隙率增加和分形维数增大, 表明了孔隙结构的复杂性。裂纹萌生始于强、弱吸波矿物交界处, 初始阶段以沿晶裂纹为主, 旨在释放界面的热失配应力。随着照射进行, 部分沿晶裂纹会转换为穿晶裂纹, 且任意时刻张拉微裂纹数量均高于剪切

微裂纹[9]。戴俊等通过 SEM 观测花岗岩断口, 直观证实了微波照射后断口存在沿晶断裂、穿晶断裂及其混合模式[13]。

当微波照射产生的微裂纹或热量激活的原生裂纹达到一定密度时, 它们之间的相互作用将成为主导。张启的 PFC3D 模拟揭示了这一复杂过程: 微裂纹倾向于以最短路径连接, 部分甚至形成多边环状结构包围强吸波矿物颗粒, 并穿透其他矿物, 最终形成贯通性裂隙网络[9]。研究表明裂纹互连路径上的扩展行为会致裂沿途其他矿物, 产生大量穿晶裂纹。对于含随机裂隙的岩体, 张迪指出微波照射会同时促进次生裂纹和原生裂纹的扩展与贯通, 尽管扩展路径看似无序, 但裂纹倾向于沿有利于贯通的路径发展, 最终微波产生的热裂纹与后续单轴压缩产生的力学裂纹相互连通, 加速了整体破坏[14]。侯宇杰的模拟研究也观察到了围绕强吸波矿物形成贯通裂隙网络的现象。这种从孤立裂纹到连通网络的形成, 是岩石从损伤累积到宏观破坏的关键[15]。

天然岩体富含节理裂隙, 研究其在微波作用下的行为极具工程意义。张迪对此开展了系统研究。通过对含不同倾角预制裂隙的玄武岩进行试验, 他发现裂隙的存在会扰动微波能量吸收, 使高温区集中于裂隙下部(尤其是尖端), 从而极大促进了热应力在裂隙尖端的集中, 加速了翼裂纹的萌生与扩展。裂隙倾角显著影响破坏模式: 小倾角时易产生轴向裂纹, 偏向剪切或拉-剪破坏; 大倾角时则主要表现为裂隙尖端的张拉性翼裂纹扩展[14]。张明远对裂隙砂岩的室内试验也得出了类似规律, 并观察到裂隙排布方式对最终破裂形态的复杂影响[16]。尹彦钧研究了层理和裂隙共存的砂岩, 发现微波照射削弱层理面强度后, 岩石更易沿层理面破坏, 且含水状态极大增强了这一效应[17]。这些研究共同表明, 原生裂隙不仅是损伤的薄弱环节, 更是后续裂纹扩展的起点。

### 3.3. 主要影响因素分析

#### 3.3.1. 材料因素(矿物组成、品位、颗粒形貌)

微波辐射岩石热应力损伤的根源在于矿物介电特性差异。秦立科、郭斌等采用 COMSOL 与 PFC 耦合方法, 系统模拟了黄铁矿含量从 3%到 15%的变化对微波致裂效果的影响, 发现黄铁矿含量并非越高越好, 当含量为 8%~10%时裂纹发育效果最佳, 含量过高达到 15%反而会放缓整体升温速率[18]。祁培培的研究则深入到了矿物颗粒的形状效应, 使用 COMSOL 建立了具有不同扁平度、圆度和尖锐度的矿物颗粒模型, 定量分析了形状参数对微波加热下温度梯度、第一主应力和塑性区发展的影响, 结果明确显示形状越扁平、越尖锐的颗粒引起的温度梯度越大, 热应力越集中[19]。

#### 3.3.2. 环境因素(含水/冻结状态、围压)

含水、冻结等特殊状态会显著改变热应力机制。张婧针对含水煤样的研究发现, 水分作为强吸波介质, 优先吸收微波能量, 显著提升煤样整体升温速率, 其产生的热应力与水分汽化压力共同作用, 加剧了煤体的热冲击损伤和裂隙网络形成[20]。韩力对冻结石英砂岩的研究揭示了更为独特的热-力-相变耦合机制, 发现微波照射下饱和冻结砂岩经历快速融化、孔隙水汽化和试样干燥三个阶段, 其强度软化主要由“汽胀效应”和“热胀效应”共同引起[21]。围压环境对热应力损伤具有显著的抑制与约束作用。任一平通过物理试验和 PFC 数值模拟系统研究了围压下玄武岩的微波损伤, 发现围压会显著抑制微波照射引起的裂纹产生和扩展, 40 MPa 围压下裂纹数量明显减少, 强度劣化效果减半[22]。温森等的双波导模拟也得出类似结论[23]。

#### 3.3.3. 加载因素(功率、时间、能量路径)

热应力的瞬态冲击效应与能量加载路径密切相关。翟惠慧通过对比“高功率短时间”与“低功率长时间”两种能量恒定路径对花岗岩的损伤效果, 发现前者造成的损伤劣化幅度更高, 原因是高功率能在

短时间内与矿物界面产生巨大的瞬时温差和热冲击应力[24]。温森通过双波导辐射下玄武岩裂纹扩展的PFC2D模拟也支持这一观点,指出辐射时间需超过起裂阈值0.04秒后才能产生有效的辅助破岩裂纹[23]。李元辉等在早期的试验研究中展示了不同加热路径的极端结果:当热应力先超过岩石强度极限时,试样发生崩开破坏;当温度先达到矿物熔点时,则以熔化为主。他强调了高功率连续加热能借助热应力使岩石在较低温度下崩碎,能耗更低[25]。朱杰琦对页岩的研究进一步揭示了能量施加顺序的微妙影响,他发现当总能量小于120 kJ时,功率由小到大的顺序更有利于微结构发育;超过180 kJ后顺序的影响变得不敏感[26]。

### 3.4. 现有研究的争议与科学问题

上述不同研究中看似矛盾的结论恰好反映了微波致裂机理的复杂性。例如,翟惠慧[24]研究发现高功率短时间路径对花岗岩的损伤效果更显著,而朱杰琦[26]对页岩的研究则表明低功率长时间更有利于微结构发育。矛盾根源在于岩石类型与矿物分布差异:前者针对花岗岩(强吸波矿物分散分布),后者针对页岩(层理发育,热传导各向异性)。这揭示了微波致裂效果不仅取决于功率-时间组合,更受岩石矿物空间分布与热物理性质的耦合控制。因此,研究更需要建立基于矿物纹理特征参数优选理论,而非寻求普适的“最优参数”。

## 4. 实验研究进展

为了定量描述损伤程度并预测其演化,学者们发展了多种基于宏观力学参数或细观结构信息的损伤变量与模型。最常用的方法是以弹性模量、波速等物理力学参数的相对变化来定义损伤变量。戴俊及任一平等[27]的研究是这一方向的代表。他们以Weibull分布描述微元强度,结合Lemaitre应变等效原理,建立了微波照射后花岗岩的单轴压缩损伤本构模型,并通过试验验证了模型的有效性,能够较好反映峰前应力-应变行为[28]。张敏则进一步考虑了微波循环照射和冷却方式的影响,建立了多因素耦合的花岗岩损伤本构模型[29]。李想从能量角度出发,通过核磁共振和力学测试研究大理岩,发现随着微波照射的进行,耗散能占比不断增加而弹性能占比减少,为从能量耗散角度定义损伤变量提供了依据[30]。张婧针对含水煤样,基于弹性模量和耗能系数建立了不同微波能量下的损伤本构模型[20]。

微波预处理的目的往往是辅助后续的机械破碎,因此研究微波损伤与外部载荷的耦合作用至关重要。众多单轴压缩试验表明,经微波照射的岩石,其应力-应变曲线通常会呈现更明显的压密阶段,即对应微波裂纹闭合,峰值强度和弹性模量显著降低,峰后曲线跌落更平缓,表现出塑性增强。张启[9]、张一帆的研究均证实了这一点。更深入的研究关注裂纹在载荷下的动态扩展[31]。张迪发现,单轴压缩过程会进一步促进微波预损伤产生的裂纹扩展,直至形成贯通的裂隙网络,导致破坏面积远大于未处理试样[14]。叶一亨通过PDC齿切削数值模拟,从破岩工具受力的角度证明了这一协同效应的工程价值:微波预处理能降低平均切削力和破岩比功,减小切削力波动,最佳照射参数可在相同能量下更大程度降低岩石强度,从而提高破岩效率并延长刀具寿命[32]。

## 5. 微波辐射岩石数值模拟研究现状

微波辐射下岩石的热应力损伤是一个复杂的多物理场耦合过程,涉及电磁场能量沉积、非均匀温度场形成、热应力累积及裂纹萌生扩展等系列现象。由于实验手段在观测内部动态过程和分离关键因素方面存在局限,数值模拟技术已成为揭示微波致裂细观机理、优化工艺参数的重要研究手段。国内外学者基于不同理论框架和数值方法,建立了从连续介质到离散颗粒、从单一场到多场耦合的一系列仿真模型,系统探究了微波参数、矿物特性等对岩石损伤演化的影响规律。不同数值模拟方法在研究中的对比见表1。

**Table 1.** Comparison of different numerical simulation methods in microwave fracturing research  
**表 1.** 不同数值模拟方法在微波致裂研究中的对比

方法	基本原理	适用范围	关键假设	优点	缺点
有限元法 (FEM)	连续介质力学, 求解温度场、应力场分布; 偏微分方程组	宏观损伤预测	材料连续、均质或非均质但无宏观离散	成熟稳定, 多物理场耦合强	难以模拟裂纹萌生与扩展路径
离散元法 (DEM)	颗粒集合体, 接触力学	裂纹萌生、扩展、贯通; 细观破裂过程	岩石为颗粒粘结体, 可发生断裂	自然模拟裂纹演化, 可视化强	参数标定困难, 计算量大
FEM-DEM 耦合	连续 - 离散混合, 应力传递	兼顾场分布与裂纹扩展	连续区与离散区交界处应力连续	兼具两者优势	实现复杂, 计算资源要求高

在模拟方法体系方面, 主要形成了以有限元法为基础连续介质场分析和以离散元法为代表的颗粒介质破裂模拟两大技术路径。有限元法擅长处理连续介质的场分布问题, 邵珠山、吴丹丹等采用 COMSOL 软件, 分别建立了玄武岩的均匀模型和包含斜长石与辉石的二相矿物模型, 揭示微波场中岩石内部的宏观温度场和应力场分布规律。模拟结果表明, 岩石表面升温速率呈现先增大后减小的趋势, 而内部热应力在强、弱吸波矿物的分界面处达到峰值[33]。张婧同样运用 COMSOL, 模拟了不同含水率条件下煤体内部的电磁 - 热耦合过程, 得出煤样单位体积吸收的微波功率与其介电常数正相关[20]。

与有限元法的连续场视角不同, 离散元法从细观颗粒相互作用的层面模拟岩石的破裂过程。杨志彬的研究针对磁铁石英岩, 利用 PFC2D 软件建立了考虑磁铁矿与石英颗粒分布的数值模型, 成功再现了裂纹首先在吸波性强的磁铁矿颗粒与石英基质交界处萌生, 继而沿矿物边界呈放射状扩展, 最终形成包裹磁铁矿的网状裂纹的过程[34]。林郁森则通过对 PFC2D 中平行黏结模型进行热力耦合二次开发, 模拟了花岗岩型铀矿石的微波致裂, 发现 200℃时微裂纹开始产生, 450℃时裂纹数量急剧增加, 至 700℃时已形成贯通裂隙[35]。

在多物理场耦合模型的发展方面, 研究从早期的热 - 力耦合逐步演进至包含电磁、热、应力、流体甚至化学反应的更复杂耦合体系。王志军、龚静等建立了 915 MHz 和 2450 MHz 两种典型频率下的煤层“电磁 - 热 - 流 - 固”全耦合模型[36]。王晓娟更为系统地构建了微波辐射下整个煤储层的多物理场耦合仿真模型, 模型分析表明吸附态瓦斯解吸引起的煤基质收缩是孔隙率变化的主导因素[37]。

综上, 微波照射岩石的数值模拟研究已取得显著进展, 主要通过有限元法和离散元法两种模拟路径, 揭示了岩石在微波作用下的热应力损伤机制。多物理场耦合模型的逐步发展, 使研究不仅限于岩石破裂, 还扩展到矿物成分、裂隙结构等对微波致裂效果的影响。此外, 数值模拟结合物理实验验证, 增强了模型的可靠性。然而, 当前仍需进一步探讨更复杂的矿物特性、裂隙结构等因素对微波致裂的精细化影响。

## 6. 微波辅助破岩的工程应用挑战

尽管实验室研究已充分证明微波辐射可有效弱化岩石, 但将其转化为成熟的工业技术仍面临多重现实挑战。

### 6.1. 能量效率与成本经济性

目前微波预处理仍需较高的能量输入(千瓦级功率、分钟级时间), 单位能耗成本可能超过传统机械破碎的节能收益。研究表明, 经济可行性强烈依赖于矿石品位: 高品位矿石(强吸波矿物含量高)可在较低能量输入下达到有效损伤, 而低品位矿石则需要显著更高的能量消耗, 经济性较差。因此在工程应用前进行快速品位检测, 并开发“品位 - 参数”匹配数据库。

### 6.2. 围压与含水条件的影响

实际岩体处于地应力围压和含水环境中。已有研究表明围压会抑制微波裂纹扩展(任一平[22]), 而孔

隙水可能形成“热汇”降低损伤效率。因此,地面预处理(无围压、可脱水)比井下直接辐射更具工程可行性,建议优先应用于采矿破碎流程中的矿石预处理环节。

### 6.3. 矿石多样性导致的参数普适性不足

现有结论多针对特定岩石(花岗岩、玄武岩、磁铁石英岩),不同矿床的矿物嵌布特征、粒度、共生关系差异显著。缺乏一个基于矿物介电与热物理性质的通用损伤预测模型,目前仍需逐个矿区进行试验标定。

### 6.4. 环境与安全

微波辐射可能产生热辐射、电磁泄漏、粉尘热解气体等环境问题,需配套防护与监测系统。但相比传统爆破,微波技术无振动、无飞石、无有毒气体,在环保方面仍有显著优势。

## 7. 结论

微波辐射岩石热应力损伤与裂隙演化研究已形成系统理论:矿物介电差异是热应力根本成因,非均匀升温导致热应力集中于矿物界面,构成“介电差异-升温不均-应力集中-初始损伤”的理论链条;裂隙从沿晶萌生到穿晶扩展,最终形成贯通网络。数值模拟方面,有限元与离散元法相结合,已发展出电磁-热-力多场耦合模型,有效揭示了矿物组分与结构的影响机制。然而,针对岩石内部机理的研究尚不充分,微观热应力演化与宏观力学性能劣化的定量关联仍有待深入解决。

## 参考文献

- [1] 甘海仁, 杨永顺, 李永星. 我国凿岩机械现状[J]. 凿岩机械气动工具, 2006(1): 16-28.
- [2] 吴立, 张时忠, 林峰. 现代破岩方法综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2000(2): 49-51.
- [3] 杨超. 浅谈微波加热在矿冶方面的应用[J]. 技术与市场, 2015, 22(10): 97.
- [4] Mohanty, A., Patel, D.K. and Panigrahi, S.K. (2024) A Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Model for Casket Designing for Efficient Microwave Heating: An Insight from Theoretical Analysis, Multiphysics Simulation, and Experimental Investigations. *Thermal Science and Engineering Progress*, **50**, Article 102509. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102509>
- [5] Wang, J., Liu, Y., Liu, Z., Hu, S. and Wang, F. (2025) Advances in Microwave Preconditioning for Accelerated Carbonation of Cement-Based Materials: A Comparative Study. *Construction and Building Materials*, **495**, Article 143694. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143694>
- [6] 胡龙, 陈海军, 王斯海. 微波加热在岩土工程中的应用[J]. 地质与勘探, 2016, 52(3): 570-575.
- [7] 邵珠山, 郭轩, 袁媛, 王维涛. 微波辐射下花岗岩的断裂韧性劣化规律研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(3): 317-323.
- [8] 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.
- [9] 张启. 微波照射岩石三维裂隙网络演化及损伤模型研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2025.
- [10] 于洪雯. 典型结构金属矿石微波辐射破裂机制研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- [11] 祁培培, 张国伟. 矿物扩散度对微波照射矿石内部损伤效果的影响[J]. 中国新技术新产品, 2023(21): 96-98.
- [12] 郭轩. 微波照射下花岗岩矿物损伤机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [13] 戴俊, 王羽亮, 李涛. 微波照射后花岗岩裂纹扩展规律试验研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 130-133.
- [14] 张迪. 微波照射岩石裂纹扩展机制及对多裂隙岩体力学性质影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [15] 侯宇杰. 岩石微波可照射性评价方法及评价系统研发[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [16] 张明远. 含预制裂隙岩样破裂特性试验与分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
- [17] 尹彦钧. 微波照射裂隙砂岩力学特性及破碎特征研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.

- [18] 秦立科, 郭斌, 徐国强, 陈国栋, 戴俊. 吸波矿物含量对微波照射矿石效果的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(4): 40-49.
- [19] 祁培培. 岩石矿物颗粒形状量化描述及其对微波照射效果评价应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [20] 张婧. 微波照射作用下含水煤样力学损伤及致裂减冲机制[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2025.
- [21] 韩力. 微波照射冻结多孔岩石热融软化规律及机制[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- [22] 任一平. 不同围压下玄武岩微波损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2023.
- [23] 温森, 杜林, 王倩, 张敏, 邓珂. 双波导辐射对岩石裂纹扩展机理的影响[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(2): 108-117.
- [24] 翟惠慧. 不同微波照射路径下花岗岩强度劣化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- [25] 李元辉, 卢高明, 冯夏庭, 张希巍. 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.
- [26] 朱杰琦. 微波辐射下页岩微结构的损伤特性与致裂效应[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [27] 戴俊, 杨清清, 张敏, 蒋昊轩, 王林涛, 任一平. 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.
- [28] 戴俊, 任一平, 杨凡. 微波照射下花岗岩损伤演化规律及本构模型研究[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(5): 442-453.
- [29] 张敏. 微波循环照射下花岗岩损伤特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- [30] 李想, 杨建国, 杨博, 李杰林, 周科平. 微波照射下大理岩孔隙结构变化特征及能量演化规律[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(3): 470-480.
- [31] 张一帆. 微波循环照射下花岗岩力学特性及声发射特征研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [32] 叶一亨. 微波照射下花岗岩损伤演化规律及 PDC 齿破岩机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2022.
- [33] 邵珠山, 吴丹丹, 袁媛, 费心爽, 郭轩. 多模微波场中玄武岩加热及内部损伤机理研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 129-136.
- [34] 杨志彬. 微波作用下磁铁矿石岩中裂隙产生与发育规律[D]: [硕士学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- [35] 林郁森. 微波照射花岗岩型铀矿石试样热裂响应与裂纹演化试验研究[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2023.
- [36] 王志军, 龚静, 陈庚, 梅向乾. 典型微波频率下煤层瓦斯运移规律对比分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(10): 15-17.
- [37] 王晓娟. 微波辐射下煤储层电磁-热-流-固耦合及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2020.