

微波辅助双压头冲击岩石类材料的细观-宏观分析

王 鹏, 岳中文, 徐胜男, 高 丹, 任 猛, 李阿康, 刘伟俊

(中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要: 由于炸药使用受限以及响应国家“双碳”目标, 微波+机械冲击破碎岩石类材料的新方法, 因其环保、破碎能力强而在硬岩巷道掘进、混凝土结构拆除等工程中拥有广阔前景, 但其内在机理还不够明确。以灌浆料混凝土为研究对象, 依托建立的双压头同步冲击试验系统 (DHPB) 和电镜扫描 (SEM) 设备, 通过理论推导和试验验证的手段, 探究双压头冲击下混凝土试件宏观比能耗和细观损伤随不同微波辐射时间的变化规律, 尝试建立以临界应变能密度为媒介的宏观比能耗衰减度-细观损伤的定量函数关系。结果表明: 微波辐射劣化混凝土力学性能具有阈值特性, 当混凝土吸收的应变能密度小于初始裂纹扩展所需的应变能密度时, 混凝土试件内部基本无损伤, 而当混凝土吸收的应变能密度较大时, 试件损伤随应变能密度近似线性累积; 混凝土试件内部的细观裂纹扩展具有瞬时特性, 随着微波辐射时间增加先静态扩展后转为动态扩展, 扩展过程中由于大量能量在较短时间内释放会引起整个试件瞬间破碎; 微波辐射能够显著影响混凝土试件在双压头冲击下的破坏形态, 无微波辐射时混凝土试件的最终断裂路径与双压头连线方向基本一致, 有微波辐射时的最终断裂路径则与双压头连线方向夹角较大, 且会出现多条宏观裂纹; 微波辐射下混凝土试件受双压头冲击的宏观比能耗最大值为 0.69, 相应的细观损伤为 0.68, 两者基本一致, 意味着细观裂纹长度和数量的增加能够定量降低宏观比能耗, 揭示微波辐射削弱岩石类材料抵抗冲击破坏能力的内在机理。研究结果为微波+机械冲击在工程中的应用提供了参考。

关键词: 微波辅助; 冲击破碎; 比能耗衰减度; 损伤; 临界应变能密度

中图分类号: TU45; P634.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2108-15

Meso-macro analysis of microwave-assisted double-indenter impact on rock-like materials

WANG Peng, YUE Zhongwen, XU Shengnan, GAO Dan, REN Meng, LI Akang, LIU Weijun

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Given the constraints on explosives and in response to the national “dual carbon” strategic goals, a new method of microwave-assisted impact fragmentation of rock-like materials has broad prospects in hard-rock tunneling, concrete structure demolition, and other projects due to its environmental friendliness and strong rock-breaking capability. However, its internal mechanism remains unclear. This study takes grouted concrete as the research object and relies on the established macroscopic dual-indenter synchronous impact experimental system (DHPB) and mesoscopic scanning electron microscopy (SEM). Through theoretical derivation and experimental verification, it explores the variation laws of

收稿日期: 2024-03-12 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0256

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC2902103)

作者简介: 王 鹏 (1991—), 男, 河南柘城人, 博士。E-mail: 1558564754@qq.com

通讯作者: 岳中文 (1975—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zwyue75@cumtb.edu.cn

引用格式: 王鹏, 岳中文, 徐胜男, 等. 微波辅助双压头冲击岩石类材料的细观-宏观分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2108-2122.

WANG Peng, YUE Zhongwen, XU Shengnan, et al. Meso-macro analysis of microwave-assisted double-indenter impact on rock-like materials[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2108-2122.



移动阅读

macro-specific energy consumption and meso-damage of concrete specimens under dual-indenter synchronous impact with different microwave radiation times, establishing a quantitative functional relationship between macroscopic specific energy consumption attenuation degree and mesoscopic damage mediated by critical strain energy density. The results show that microwave radiation-induced degradation of concrete mechanical properties exhibits threshold characteristics. When the strain energy density absorbed by the concrete is less than the strain energy density required for the initiation of crack propagation, there is essentially no damage within the concrete specimen. However, as the absorbed strain energy density increases, the damage to the specimen accumulates nearly linearly with the strain energy density. The mesoscopic crack propagation within the concrete specimen has instantaneous characteristics. With the increase of microwave radiation time, it first expands statically and then transitions to dynamic expansion. During the dynamic expansion process, the instantaneous release of a large amount of energy can cause the entire specimen to instantaneously break into small pieces. Microwave radiation can significantly affect the failure mode of concrete specimens under dual-indenter synchronous impact. Without microwave radiation, the final fracture path of the concrete specimen is basically consistent with the direction of the line connecting the dual indenters. With microwave radiation, the final fracture path forms a larger angle with the direction of the line connecting the dual indenters, and multiple macroscopic cracks may occur. The maximum value of macroscopic specific energy consumption of concrete specimens under microwave radiation is 0.69, and the corresponding mesoscopic damage is 0.68, both of which are basically consistent. This means that the increase in mesoscopic crack length and quantity can quantitatively reduce macroscopic specific energy consumption, revealing the internal mechanism by which microwave radiation weakens the impact resistance of rock-like materials. The research results provide a scientific basis for the application of microwave-assisted mechanical impact in engineering.

Key words: microwave assisted; impact grinding; attenuation of specific energy consumption; damage; critical strain energy density

0 引 言

由于炸药使用受限以及响应国家“双碳”目标^[1-4],地下岩体掘进(尤其是山西地区煤矿^[5])和地表废弃混凝土结构拆除越来越多地采用机械冲击的作业方式,并取得了较好的经济和环境效益^[6]。但是当面对坚硬而致密的岩体类材料时,机械冲击作业存在效率低、开口困难、钎杆磨损严重、维修成本高等问题。由于混凝土等岩石类材料抵抗冲击破坏的能力与其强度、耐磨性密切相关,如果在机械破碎之前改变岩石类材料的力学性能使其强度降低,则可以大幅提高机械破碎效率并降低维护成本。相关的技术包括水射流^[7-8]、激光^[9]以及微波辐射^[10]等。其中,水射流技术包括纯水射流^[11]、脉冲射流^[12]、磨料射流^[13]以及空化射流^[14],其作为一种高效、灵活、绿色的手段,在煤矿煤层切缝卸压等领域已经大量使用^[15],但存在耗水量大、脉冲装置技术不成熟、磨料无法回收、空泡产生困难等问题。激光辅助机械破岩具有能量集中,破岩效果好的优点^[16],但存在制造成本高、能量利用率低、使用难度大等问题。而已有研究表明微波辐射能够有效劣化混凝土和石灰岩等多种岩石类材料,进而使机械截割效率提升20%以上^[17]。因此,可将微波辐射引入冲击破岩,改善破岩条件^[18-20]。

目前,微波辐射岩石类材料的研究涉及到微观、细观和宏观3个维度。微观维度的研究主要集中于岩石类材料内部各矿物成分的介电性能。岩石类材料微波吸收性能取决于介电性能,包括介电常数和损耗因子^[21-22]。介电常数和损耗因子测试方法有:网络参数法^[23]、谐振腔微扰法^[24]等。根据对微波的敏感程度不同,岩石内各种矿物可以分为3类:强微波吸收介质,如顽辉石、含铁矿物等;中等微波吸收介质,如黑云母等;弱微波吸收介质,如钾长石、石英、方解石等^[25]。细观维度的研究主要集中于岩石类材料内微裂纹的长度和密度变化,以及对应的损伤累积。岩石类材料都是多晶聚合物,包含许多初始裂纹和孔隙结构,经历高温作用后,由于热膨胀各向异性和不同矿物间的热膨胀失配,在岩石类内部产生的热应力驱动初始裂纹扩展及新裂纹产生,从而改变材料的热弹性模量^[26]、断裂韧性^[27]等性质。多数学者基于能量平衡准则和格里菲斯断裂理论,采用各种近似方法将岩石类材料的细观结构演化与实验室条件下的宏观力学响应联系起来,进而建立细观力学损伤模型^[28]。依据建立的损伤模型定量分析裂纹密度^[29]、长度^[30]、宽度^[31]、裂纹扩展路径^[32]等随不同微波辐射条件的变化规律,并通过SEM电镜扫描进行验证^[33]。宏观维度的研究主要集中于材料的宏观断裂、微波加热方法以及力学

性能等。由于岩石类材料中包含多种矿物组分,各组分热力学性能具有很大差异,当进行微波照射时,在加热和冷却过程中,岩石晶格中均会产生不同量级的热应力。热应力会导致矿物晶体间或晶体内的局部断裂,使岩石类材料性能劣化^[34]。微波加热方式可以高频+短时间,也可以低频+长时间,两者对岩石类材料破碎产生的影响有明显区别^[35]。微波加热分为2种:开放式和封闭式,过量的微波泄漏会严重威胁操作人员的生命安全,因此大多数微波加热改变岩石类材料性能的试验研究使用的设备都为封闭式^[36]。研究的性能主要包括:单轴抗压强度^[37]、抗拉强度^[38]、断裂韧度^[39]、比热容^[40]等。

综上所述,已有研究分析了岩石类材料内部各种矿物成分的微波吸收性能,解释了微波辐射致使岩石类材料内部裂纹扩展及损伤累积的机理,并根据微波前后试验结果得到与岩石类材料力学性质相关的经验关系。但没有结合细观裂纹演化和宏观动力学表现给出微波辐射下细观损伤-宏观动力学性能劣化的定量关系,不利于揭示微波辐射劣化岩石类材料动力学性能的内在机理。

因此,笔者以微波+机械冲击破碎岩石类材料为工程背景,以C50灌浆料混凝土为研究对象,首先基于热力学和能量守恒理论,分别推导细观损伤和宏观比能耗衰减度的理论表达式,进而建立细观损伤-临界应变能密度-宏观比能耗衰减度的函数关系;然后,根据双液压破碎锤的工作原理,建立等效DHPB实验系统,研究不同微波辐射时间、不同试件厚度的混凝土试件在双压头冲击下的破碎特征、比能耗衰减度和劈裂次数变化规律;再结合SEM观测结果和Matlab图像处理方法计算得到不同微波辐射时间下混凝土

土内部损伤值。最后,结合理论和试验结果,分析微波辐射劣化混凝土效果特征、验证混凝土试件比能耗衰减度和损伤值的定量函数关系,以期揭示微波照射削弱混凝土试件抵抗冲击破坏能力的本质,为微波+机械冲击在工程中的应用提供科学依据。

1 微波+机械冲击破碎岩石类材料的宏观-细观理论分析

微波辐射岩石类材料能够带来宏观和细观2方面的变化:宏观上,微波后的岩石类材料更容易受压头冲击破碎;细观上,微波辐射导致材料内部微裂纹长度和数量增加。可以推测,岩石类材料宏观抵抗冲击的能力与细观裂纹变化定然存在某种联系。因此,本章分别从宏观和细观2个角度分析微波辐射对岩石类材料的影响,并尝试建立两者之间的函数关系。

1.1 微波辐射下宏观比能耗衰减度分析

1.1.1 宏观分析模型

以山西天巨重工集团为代表的煤机企业设计生产了双臂式冲击掘进机^[41],其工作机构装配了2个韩国水山集团生产的液压破碎锤。该设备已在中低硬度的煤岩巷以及混凝土结构拆除工程中得到广泛应用,但其在坚硬的岩石类材料工程中表现不佳。为了解决这个问题,笔者设计了微波辅助机械冲击装置(包括微波发生器、波导管及金属屏蔽罩)^[42],能够一边冲击破碎上一个循环微波辐射后的区域;一边微波辐射下一个循环需要破碎的区域,即实现微波辐射和机械冲击破碎同步,如图1所示。

双臂式冲击掘进机所用液压破碎锤为活塞冲击式破碎锤,由活塞、缸体和凿杆组成。在工作过程中,液压油驱动活塞在缸体内做往复运动,使得液压能转

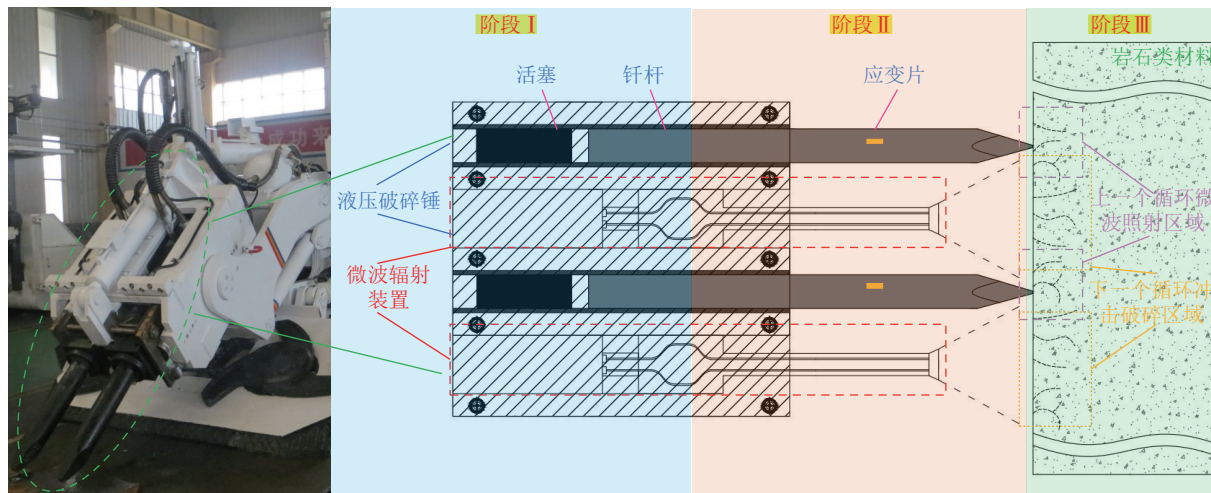


图1 双液压破碎锤及微波辅助机械冲击破碎岩石类材料示意

Fig.1 A dual-hydraulic hammers and schematic diagram of microwave-assisted mechanical impact demolition of concrete structures

化为活塞的冲击动能;活塞撞击钎杆,将能量传递给钎杆;而钎杆直接作用于岩石类材料,将能量用于材料的冲击破碎。因此该双液压破碎锤同步冲击破碎岩石类材料的工作原理可以简化为“活塞-钎杆-岩石类材料”系统^[43],即分成3个阶段,阶段 I: 活塞撞击钎杆;阶段 II: 钎杆凿入混凝土;阶段 III: 混凝土破碎。另外,由于实际中活塞和钎杆长度均远大于其直径,则前2个阶段可以认为是一维的。

假设活塞和钎杆的弹性模量、纵波波速和截面面积相等,分别为 E_0 、 C_0 和 A_0 ,且 ε_i 和 ε_r 为图中应变片所测得的入射波和反射波应变值。则基于一维应力波理论,可以得到双液压破碎锤冲击过程中直接作用于岩石类材料的输出功 E_{out} ^[5]:

$$E_{out} = A_0 E_0 C_0 \int_0^t (\varepsilon_i^2 - \varepsilon_r^2) dt \quad (1)$$

1.1.2 比能耗衰减度-应变能密度分析

比能耗 a^* 指的是传递给岩石类材料的能量与破碎体积之比,反映的是破碎单位体积岩石类材料所消耗功的大小,即:

$$a^* = E_{out}/V \quad (2)$$

其中, V 为破碎体体积, m^3 。由于多次冲击直至试件劈裂破坏,且试件内部累积了大量的微裂纹,因此可将试件体积视为破碎体体积。

实际工程中,冲击破岩的主要目的是使破碎体从岩石类材料中剥离而对破碎体的块度没有过多要求,反而破碎体的破碎度越高,所需要的能量越大,能量有效利用率越低。因此比能耗 a^* 能够很好地表征液压破碎锤的冲击破碎效果。

微波加热后的岩石类材料,由于大量新裂纹产生及旧裂纹扩展,导致其抵抗冲击破坏的能力降低,进而相应的比能耗也随之降低,则可以定义:微波前后比能耗的差值与微波前比能耗之比的1/2次幂,称为比能耗衰减度 ζ 。比能耗衰减度 ζ 能够用来衡量微波辐射对机械冲击岩石类材料破碎效果的影响程度。可以表示为

$$\zeta = \sqrt{(a_0^* - a^*)/a_0^*} \quad (3)$$

式中: a_0^* 为微波辐射前的比能耗, kJ/m^3 。

岩石类材料吸收微波能量,宏观表现为岩石类试件抵抗冲击破坏的能力降低^[44]。从能量的角度分析,微波辐射时材料吸收的应变能就是冲击破坏时所需的输出功减少的能量。微波辐射时岩石类材料升温吸收的应变能密度 v_e 可以表示为

$$v_e = \alpha_2 C \rho \Delta T = \alpha_2 C m \Delta T / V \quad (4)$$

式中: α_2 为矿物基质的热胀系数; C 为岩石类材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ 为岩石类材料的密度, kg/m^3 ; ΔT 为试件整体升温, $^\circ C$; m 为试件质量, kg 。

对应的比能耗可表示为

$$a^* = (E_{out,0} - E_e) / V \quad (5)$$

式中: $E_{out,0}$ 为无微波辐射时冲击破坏所需要的输出功, J ; E_e 为混凝土吸收的微波能量转换的弹性应变能, J ; 即: $E_e = v_e V = \alpha_2 C m \Delta T$ 。

则将式(2)和式(3)依次代入式(5),可建立比能耗衰减度 ζ 和应变能密度 v_e 之间的关系: $v_e = E_{out,0} \zeta^2 / V$ 。又因为微波加热初期,岩石类材料吸收的能量较小($v_e \leq v_{eC}$)不足以使试件细观裂纹长度和数量增加,即宏观比能耗衰减度为零。因此有:

$$v_e = \frac{E_{out,0}}{V} \zeta^2 + v_{eC} \quad (6)$$

式中: v_{eC} 为岩石类材料升温吸收的能够使内部裂纹开始扩展的最小应变能密度,称作特征应变能密度, J/m^3 。

1.2 微波辐射下细观损伤分析

1.2.1 细观分析模型

岩石类材料中的矿物根据其升温规律可以分为热源矿物(强微波吸收介质)和基质矿物(弱微波吸收介质)。微波照射过程中,热源矿物吸收损耗微波能转化为热能,并将热量向基质矿物传递。据此,建立了热源-基质矿物球体模型^[44],如图2所示, r_1 为热源矿物半径; r_2 为基质矿物半径; σ_r 为基质的径向应力, σ_t 为切向应力。

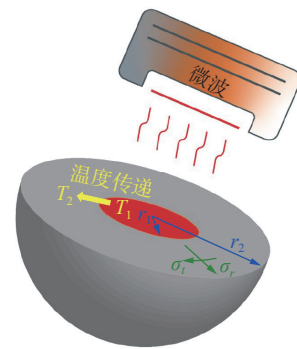


图2 热源-基质矿物球体模型

Fig.2 Thermal source-matrix mineral sphere model

热源-基质矿物球体模型认为岩石类材料内部矿物颗粒均匀分布,微波照射下材料内部矿物颗粒可以被整体均匀加热,热传导作用下,温度只沿模型半径发生变化。由于热源矿物在微波照射下产生的内部应力分量均为压应力,相比于受到切向拉应力的热源-基质界面和邻近基质内部,其损伤可以忽略不计,因此只分析基质内的应力场演化规律。

微波辐射时, 基质内部会产生新的裂纹, 裂纹的存在会导致岩石类材料的弹性模量降低。则含有裂纹的混凝土的弹性模量^[45]可以表示为

$$E_{\text{eff}} = E / \{1 + 16(1 - \mu^2)N_V l^3 / [9(1 - 2\mu)]\} \quad (7)$$

式中: E 为岩石类材料无裂纹时的弹性模量, GPa;

$$\begin{cases} \sigma_r = 2E_{\text{eff}} \left[-\frac{\alpha_2}{r^3} \Lambda_2(r, t) + \frac{\alpha_1}{r_2^3} \Lambda_1(t) + \frac{\alpha_2}{r_2^3} \Lambda_2(t) - \frac{\alpha_1}{r^3} \Lambda_1(t) \right] \\ \sigma_t = E_{\text{eff}} \left[\frac{\alpha_2}{r^3} \Lambda_2(r, t) + \frac{2\alpha_1}{r_2^3} \Lambda_1(t) + \frac{2\alpha_2}{r_2^3} \Lambda_2(t) + \frac{\alpha_1}{r^3} \Lambda_1(t) - \frac{\alpha_2 T_2}{1 - \mu} \right] \\ \varepsilon_r = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \alpha_2 T_2 + \frac{2(1 - 2\mu)}{r_2^3} [\alpha_1 \Lambda_1(t) + \alpha_2 \Lambda_2(t)] - \frac{2(1 + \mu)}{r^3} [\alpha_1 \Lambda_1(t) + \alpha_2 \Lambda_2(r, t)] \\ \varepsilon_t = \frac{2(1 - 2\mu)}{r_2^3} [\alpha_1 \Lambda_1(t) + \alpha_2 \Lambda_2(t)] + \frac{1 + \mu}{r^3} [\alpha_1 \Lambda_1(t) + \alpha_2 \Lambda_2(r, t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Lambda_1(t) = \frac{1}{1 - \mu} \int_0^{r_1} T_1 r^2 dr$, $\Lambda_2(t) = \frac{1}{1 - \mu} \int_{r_1}^{r_2} T_2 r^2 dr$,

$\Lambda_1(r, t) = \frac{1}{1 - \mu} \int_0^r T_1 r^2 dr$, $\Lambda_2(r, t) = \frac{1}{1 - \mu} \int_{r_1}^r T_2 r^2 dr$

式中: T_1 为热源温度场, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为基质温度场, $^{\circ}\text{C}$; r_1 为热源半径, m; r_2 为基质外半径, m; α_1 为热源矿物热膨胀系数; α_2 为基质热膨胀系数。

1.2.2 损伤-应变能密度-比能耗衰减度分析

由于不考虑热源矿物的影响, 含有裂纹的岩石类材料总能量密度 $v_T(r, t)$ 包括吸收微波能量带来的基质应变能密度 $v_e(r_2, t)$ 和基质内部裂纹所具有的表面能密度 v_s , 即:

$$v_T(r, t) = v_e(r_2, t) + v_s \quad (9)$$

式中: $v_e(r, t) = (\sigma_r \varepsilon_r) / 2 + \sigma_t \varepsilon_t$; $v_s = 2\pi N_V \gamma l^2$, γ 为裂纹表面能参数, J/m^2 ; l 为币形裂纹长度, m; N_V 为裂纹密度, m^{-3} 。

另外, 基于假设所有裂纹沿径向扩展, 则裂纹开始扩展的条件为^[48]: $dv_T(r, t)/dl = 0$ 。则可得裂纹开始发生扩展时所需的应变能密度 v_e :

$$v_e = \frac{3\pi\gamma(1 - 2\mu)}{4(1 - \mu^2)l} \left[1 + \frac{16(1 - \mu^2)N_V l^3}{9(1 - 2\mu)} \right] \quad (10)$$

裂纹扩展导致的损伤 D ^[30]可以表达为: $D = 4\pi N_V \gamma l^3 / 3$, 则可得到矿物基质基于应变能密度的损伤演化规律:

$$v_e = \frac{\gamma(1 - 2\mu)}{(1 - \mu^2)} \left(\frac{9\pi^4 N_V}{16\Delta D} \right)^{1/3} \left[1 + \frac{4(1 - \mu^2)\Delta D}{3\pi(1 - 2\mu)} \right] \quad (11)$$

式中: $\Delta D = D - D_0$; D_0 为微波辐射前岩石类材料内部因初始裂纹而具有的损伤值; D 为微波辐射后岩石的损伤值。

由式 (6) 和式 (11) 可知, 细观损伤和宏观比能耗衰减度都与临界应变能密度有定量函数关系, 因此可

l 为币形裂纹长度, m; N_V 为裂纹密度, m^{-3} 。

由于热源-基质矿物球体模型为中心对称, 则根据相应的平衡方程、几何方程及边界条件可以得到矿物基质有裂纹时的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t , 及相应的径向应变 ε_r 和切向应变 ε_t ^[46-47]:

建立细观损伤 D 和宏观比能耗衰减度 ζ 的函数关系, 即:

$$\frac{E_{\text{out},0}}{V} \zeta^2 + v_{eC} = \frac{\gamma(1 - 2\mu)}{1 - \mu^2} \left(\frac{9\pi^4 N_V}{16\Delta D} \right)^{1/3} \left[1 + \frac{4(1 - \mu^2)\Delta D}{3\pi(1 - 2\mu)} \right]^2 \quad (12)$$

2 DHPB 实验和 SEM 测试

为了验证上述细观损伤 D 和宏观比能耗衰减度 ζ 函数关系的正确性, 以不同微波辐射时间的 C50 混凝土试件作为试验对象, 采用双压头同步冲击实验系统 (DHPB) 进行宏观比能耗衰减度测试^[43], 采用电镜扫描 (SEM) 进行细观损伤测定。

2.1 试件准备和微波辐射

C50 灌浆料混凝土的骨料直径较小, 具有致密且强度高的特点, 因此本文采用其作为主要实验材料。制备的混凝土试件截面尺寸均为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 厚度分别为 42、52、62、72 mm, 合计 32 块试件。混凝土的基本参数见表 1。由于实际液压破碎锤冲击破碎岩石类材料的单个循环凿深在 $300 \sim 500 \text{ mm}$, 理想情况下为了达到最佳微波辅助破岩效果, 微波辐射穿透混凝土深度应与单循环凿岩深度保持一致, 意味着实际工程中冲击破碎的岩石类材料全都是微波辐射后的。因此为了实现室内试验中的整个试件全部被辐射的目标, 本文采用输出功率为 2000 W 、频率为 2.45 GHz 的工业级微波炉对混凝土试件进行整体微波加热处理 (此频率下的微波穿透岩石类材料的深度可达 100 nm , 超过了试件厚度), 通过设置不同微波时长, 来达到不同的微波辐射效果。

微波辐射时长需要选取在合理的范围内, 即细观上试件内部产生了新的裂纹, 宏观上试件保持整体完好。因此, 对混凝土试件进行微波加热处理, 每隔 25 s 取出并采用红外热仪测定试件上表面温度, 结

表 1 混凝土的相关力学参数

| Table 1 Basic mechanical parameters of materials used in tests | | | | | | | |
|--|----------|------------|----------------------------|---|------------------------|----------------|-----------------------|
| 材料 | 弹性模量/GPa | 单轴抗拉强度/MPa | 密度/(kg · m ⁻³) | 比热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹) | 初始裂纹密度/m ⁻³ | D ₀ | α ₂ |
| Concrete | 21.76 | 5.38 | 2 860 | 970 | 1 011 | 0.05 | 1.19×10 ⁻⁵ |

果如图 3 所示。

从图 3 中曲线和实物可以发现:随着微波照射时间增加,混凝土试件上表面温度逐渐升高,升温速率先增大后减小;当微波辐射时间为 400 s 时,混凝土试件出现破碎现象,因此选择的最长微波辐射时间为 300 s。另外,通过后文细观分析,混凝土微波辐射时间小于 M_C (175 s) 时,混凝土内部裂纹不发育。因此,最终选取的微波辐射时间分别为 0 s(M_0)、150 s(M_1)、

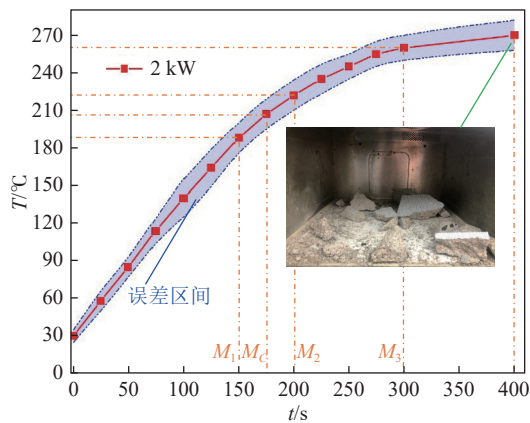


图 3 混凝土试件上表面平均温度与微波辐射时间的关系
Fig.3 Relationship between average surface temperature of concrete specimens microwave radiation time

200 s(M_2) 和 300 s(M_3)。

2.2 DHPB 实验

由于图 1 中液压破碎锤的活塞长度远小于钎杆的长度,而两者的截面长度也远小于其长度,则如果在霍普金森压杆系统 (HPB) 的入射杆和混凝土试件接触的一侧加上可拆卸式双压头装置,则可建立与双液压破碎锤同步冲击破碎岩石类材料等效的双压头同步冲击实验系统 (DHPB),如图 4a 所示。

DHPB 系统包含冲击控制设备、冲击子弹、入射杆、双压头装置 (压头底座、卡箍、压头)、固定承压装置和应力波记录仪。所有的杆、冲击子弹、压头底座和压头都是由 45 号钢制成,其中杆的直径为 50 mm,弹性模量为 210 GPa,纵波速度为 5 180 m/s;卡箍由铝制成,具有足够的变形能力以实现紧密固定。45 号钢具有比普通钢更高的强度和抗变形能力,其抗拉强度和屈服强度分别超过 600 MPa 和 355 MPa。试验前,将 2 个应变片分别贴在入射杆和透射杆中间附近位置,并与应力仪相连。压头底座通过卡箍固定在入射杆邻近试件侧的端部,在两者的端部涂上少许耦合剂,以保证 2 个等直径的杠杆无缝隙连接。试验时,通过气压控制冲击速度在一个适当的范围;每次试验后,需要重新固定压头;如果压头磨损严重,需要及时

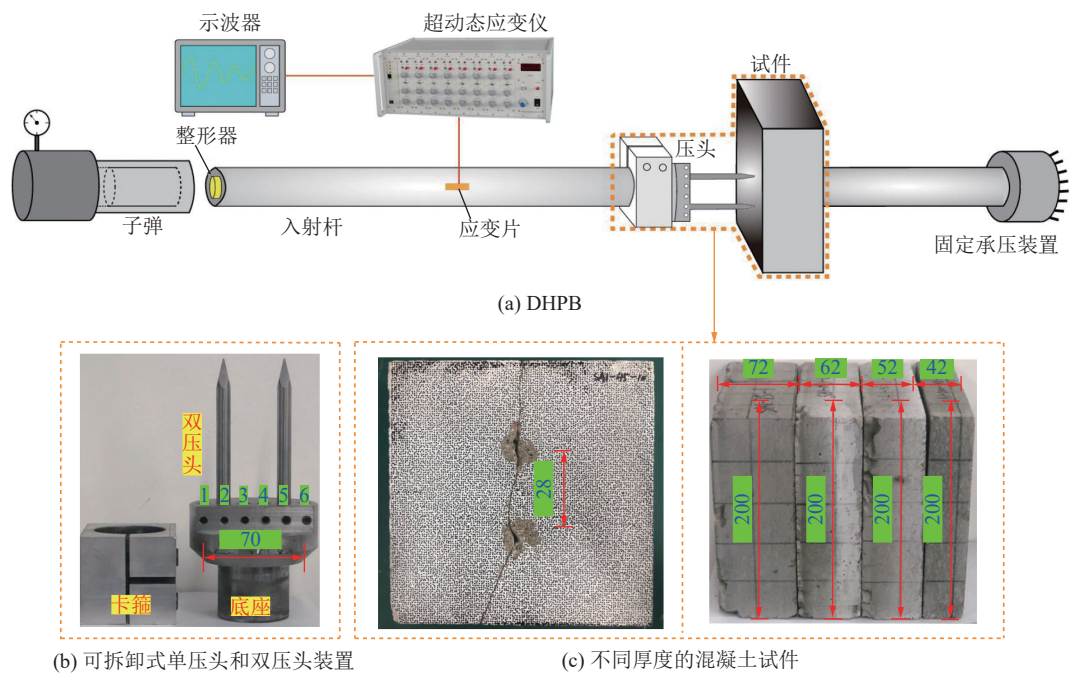


图 4 双压头同步冲击试验系统 (DHPB) 及试件

Fig.4 Concrete -breaking experimental system under double-indenter synchronous impact (DHPB) and the specimens

更换。

可拆卸式双压头装置包括 2 个刃角为 25°的四角锥形压头、压头底座、卡箍,如图 4b 所示。压头的直径为 10 mm,长度为 100 mm;压头底座上设计了 6 个间距为 14mm 的圆柱体卡槽,能够实现双压头间距在 14~70 mm 内变化;压头底座和压头都有 45 号钢制作,并经过淬火处理,以保证足够的硬度和韧性;卡箍由铝材质制作,保有足够的变形能力,以实现紧密的固定。试验时,利用卡箍将压头底座固定在入射杆靠近试件的一端,并通过顶针的方式将 2 个压头固定在合适的卡槽内。

试验中,采用 DHPB 系统对不同微波辐射试件的混凝土试件进行循环冲击,直至试件断裂为止,如

图 4c 所示。根据文献[43]可知,采用 DHPB 系统冲击混凝土试件的最佳间距为 28 mm,因此试验时将 2 个压头分布固定在图 4b 中的第 2 和第 5 个卡槽。另外,由于微波辐射是对试件整体进行加热,发育的新裂纹在混凝土内部也是均匀分布的,因此 DHPB 试验中的破碎体积 V 指的是整个试件的体积。则结合式 (1) 和电测数据可得对应的比能耗 a^* ,结果见表 2。表 2 中试件编号表示微波辐射时长、试件厚度、同等厚度试件的编号和冲击次数。以 M_2 -62-1-2 为例: M_2 为微波时长为 200 s; 62 为试件厚度为 62 mm; 1 为第 1 块 62 mm 厚的试件, 2 为第 2 次冲击。

2.3 SEM 测试

选取微波辐射不同时间 0 s(M_0)、150 s(M_1)、200 s

表 2 石灰岩试件在 DHPB 试验系统下的试验结果

Table 2 Results and effects of concrete specimens by experimental system under double-indenter synchronous impact (DHPB)

| 试件编号 | 冲击类型 | 压头间距 <i>S</i> /mm | 冲击速度 <i>v</i> /(m·s ⁻¹) | 输出功 <i>E</i> _{out} /(N·m) | 比能耗 <i>a</i> [*] /(kJ·m ⁻³) |
|-------------------------------|--------|-------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>M</i> ₀ -42-1-1 | First | 28 | 9.25 | 88.53 | 49.18 |
| <i>M</i> ₀ -42-2-1 | First | 42 | 7.59 | 96.09 | |
| <i>M</i> ₀ -42-2-2 | Cyclic | 42 | 9.12 | 105.43 | 111.96 |
| <i>M</i> ₀ -42-3-1 | First | 42 | 10.29 | 116.63 | 64.79 |
| <i>M</i> ₀ -42-4-1 | First | 42 | 9.53 | 97.71 | 54.28 |
| <i>M</i> ₀ -42-5-1 | First | 28 | 9.89 | 101.58 | 56.43 |
| <i>M</i> ₀ -42-6-1 | First | 42 | 7.50 | 89.08 | |
| <i>M</i> ₀ -42-6-2 | Cyclic | 42 | 7.87 | 99.17 | 104.58 |
| <i>M</i> ₀ -42-7-1 | First | 28 | 7.32 | 95.12 | |
| <i>M</i> ₀ -42-7-2 | Cyclic | 28 | 7.56 | 98.66 | 107.66 |
| <i>M</i> ₁ -42-1-1 | First | 28 | 9.33 | 98.53 | 54.78 |
| <i>M</i> ₁ -42-2-1 | First | 28 | 8.70 | 89.66 | |
| <i>M</i> ₁ -42-2-2 | Cyclic | 28 | 8.29 | 93.48 | 101.74 |
| <i>M</i> ₂ -42-1-1 | First | 28 | 9.07 | 90.27 | 50.85 |
| <i>M</i> ₂ -42-2-1 | First | 42 | 7.53 | 88.43 | |
| <i>M</i> ₂ -42-2-2 | Cyclic | 42 | 7.22 | 78.28 | 99.23 |
| <i>M</i> ₃ -42-1-1 | First | 42 | 8.78 | 83.43 | |
| <i>M</i> ₃ -42-1-2 | Cyclic | 42 | 8.86 | 85.88 | 100.78 |
| <i>M</i> ₃ -42-2-1 | First | 28 | 8.92 | 70.43 | 41.92 |
| <i>M</i> ₀ -52-1-1 | First | 28 | 8.74 | 89.39 | |
| <i>M</i> ₀ -52-1-2 | Cyclic | 28 | 8.82 | 96.16 | 89.21 |
| <i>M</i> ₀ -52-2-1 | First | 28 | 7.31 | 102.87 | |
| <i>M</i> ₀ -52-2-2 | Cyclic | 28 | 7.25 | 98.73 | 96.92 |
| <i>M</i> ₀ -52-3-1 | First | 42 | 7.36 | 90.95 | |
| <i>M</i> ₀ -52-3-2 | Cyclic | 42 | 7.53 | 95.13 | 89.46 |
| <i>M</i> ₁ -52-1-1 | First | 28 | 7.66 | 102.41 | |

续表

| 试件编号 | 冲击类型 | 压头间距 S/mm | 冲击速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 输出功 $E_{\text{out}}/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 比能耗 $a^*/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|---------------|--------|--------------------|---|--|---|
| M_1 -52-1-2 | Cyclic | 28 | 7.87 | 88.33 | 91.70 |
| M_2 -52-1-1 | First | 28 | 7.41 | 87.41 | |
| M_2 -52-1-2 | Cyclic | 28 | 7.28 | 85.50 | 83.13 |
| M_3 -52-1-1 | First | 28 | 9.02 | 97.77 | |
| M_3 -52-1-2 | Cyclic | 28 | 9.58 | 104.11 | 97.06 |
| M_3 -52-2-1 | First | 28 | 9.96 | 88.94 | 42.76 |
| M_0 -62-1-1 | First | 28 | 7.48 | 92.58 | |
| M_0 -62-1-2 | First | 28 | 7.56 | 101.01 | |
| M_0 -62-1-3 | First | 28 | 7.50 | 93.58 | 115.79 |
| M_1 -62-1-1 | First | 28 | 8.11 | 89.22 | |
| M_1 -62-1-2 | Cyclic | 28 | 8.23 | 104.28 | |
| M_1 -62-1-3 | Cyclic | 28 | 8.17 | 92.87 | 115.47 |
| M_2 -62-1-1 | First | 28 | 10.21 | 116.56 | |
| M_2 -62-1-2 | Cyclic | 28 | 10.41 | 104.28 | |
| M_2 -62-1-3 | Cyclic | 28 | 10.15 | 112.74 | 134.50 |
| M_2 -62-2-1 | First | 28 | 9.00 | 108.53 | |
| M_2 -62-2-2 | Cyclic | 28 | 9.07 | 98.97 | 83.67 |
| M_2 -62-3-1 | First | 28 | 8.65 | 104.95 | |
| M_2 -62-3-2 | Cyclic | 28 | 8.66 | 95.91 | 80.99 |
| M_3 -62-1-1 | First | 42 | 8.69 | 94.57 | |
| M_3 -62-1-2 | Cyclic | 42 | 8.60 | 88.60 | 73.86 |
| M_3 -62-2-1 | First | 42 | 8.85 | 88.53 | |
| M_3 -62-2-2 | Cyclic | 28 | 10.01 | 81.13 | 68.41 |
| M_3 -62-3-1 | First | 42 | 8.08 | 90.25 | |
| M_3 -62-3-2 | Cyclic | 42 | 8.90 | 95.79 | 75.02 |
| M_0 -72-1-1 | First | 28 | 9.50 | 95.55 | |
| M_0 -72-1-2 | Cyclic | 28 | 8.42 | 105.36 | |
| M_0 -72-1-3 | Cyclic | 28 | 8.86 | 111.62 | |
| M_0 -72-1-4 | Cyclic | 28 | 8.68 | 95.25 | 141.59 |
| M_1 -72-1-1 | First | 28 | 8.73 | 110.30 | |
| M_1 -72-1-2 | Cyclic | 28 | 8.22 | 108.92 | |
| M_1 -72-1-3 | Cyclic | 28 | 8.46 | 102.85 | |
| M_1 -72-1-4 | Cyclic | 28 | 8.38 | 84.04 | 141.01 |
| M_2 -72-1-1 | First | 28 | 8.75 | 120.36 | |
| M_2 -72-1-2 | Cyclic | 28 | 8.51 | 112.85 | |
| M_2 -72-1-3 | Cyclic | 28 | 8.62 | 102.63 | 116.61 |
| M_3 -72-1-1 | First | 28 | 8.75 | 113.68 | |
| M_3 -72-1-2 | Cyclic | 28 | 8.62 | 99.96 | 74.18 |

(M_2) 和 300 s(M_3) 的混凝土试件的中心且没有明显裂纹的位置取心各制作 2 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的长方体试样。对切割好的试样进行清洗, 干燥及镀金

(增强其导电性)。最后, 将试样放入电子显微镜进行扫描观测 (SEM), 结合实际观测效果, 对混凝土试件采用 100 倍放大倍数进行观测, 如图 5 所示。

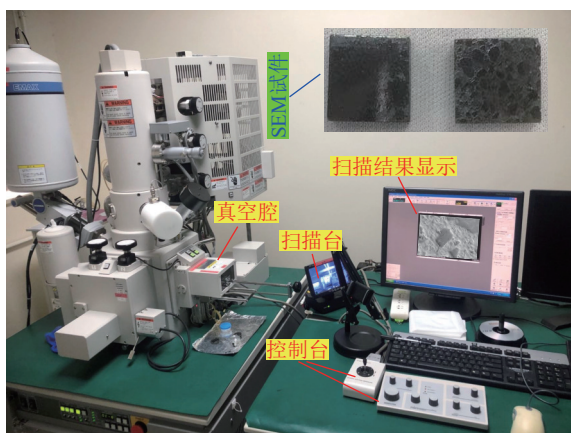


图5 电镜扫描系统 (SEM)

Fig.5 Scanning electron microscope system (SEM)

3 试验结果分析

根据 DHPB 试验结果, 得到不同微波辐射时间的混凝土试件在双压头冲击下的比能耗衰减度变化规律; 根据 SEM 测试结果, 得到不同微波辐射时长的混凝土细观损伤的变化规律; 将宏观比能耗衰减度和细

观损伤进行对比, 分析其内在联系。

3.1 DHPB 试验结果分析

3.1.1 试件破碎现象

图 6 为混凝土试件分别在无微波辐射 (M_0) 和有微波辐射 (M_3) 下, 受双压头同步冲击后的横截面。通过对比图 6a 和图 6b 可以发现, 有无微波辐射混凝土试件的破碎现象有明显区别: 无微波辐射 (M_0) 的混凝土试件最终断裂路径 (图中红色实线所示) 与双压头连线 (图中红色虚线所示) 方向基本一致, 破坏后形成的破碎坑类似圆形^[43]; 而有微波辐射 (M_3) 的混凝土试件最终断裂路径不仅与双压头连线方向夹角较大, 而且出现多条宏观裂纹, 冲击后形成的破碎坑不再规则, 且破碎坑体积明显减小。可以解释为: 微波辐射使混凝土内部形成温度梯度, 在热应力的作用下混凝土内部细观裂纹长度和数量迅速增加, 使混凝土试件处于易破坏状态。此时只需要较小的冲击力, 混凝土试件就会受拉破坏, 因此很难积累足够大的应力使混凝土试件沿着最大剪切力方向断裂, 形成的破碎坑也不再是圆形^[5]。

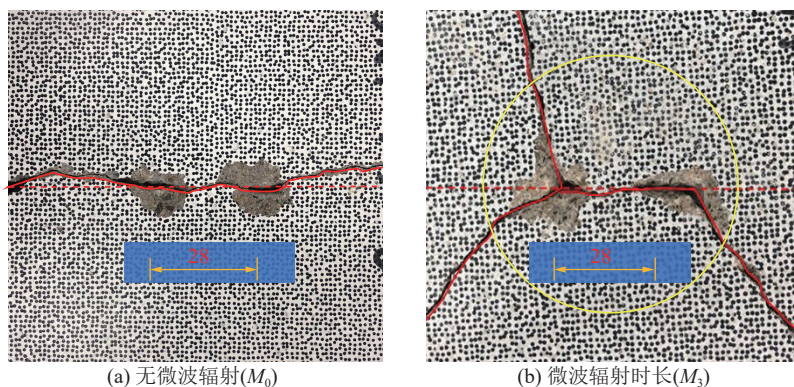


图6 不同微波辐射时间下混凝土试件受双压头冲击后的横截面

Fig.6 Cross-section characteristics of concrete specimen without microwave irradiation (M_0) or with microwave irradiation (M_3) after being impacted by double indenters

3.1.2 比能耗衰减度

根据表 2, 可以得到不同微波辐射时间的混凝土试件在双压头同步冲击下的平均比能耗和比能耗衰减度, 结果如图 7a 和图 7b。

从图中可以发现: 42 mm 厚的混凝土试件在无微波辐射、 M_1 微波辐射、 M_2 微波辐射和 M_3 微波辐射后的平均比能耗依次为 78.41、78.26、75.04、71.35 kJ/m^3 , 与前者相比, 后三者比能耗的衰减程度 $\zeta = \sqrt{(a_0^* - a^*)/a_0^*}$ 分别为 0.03、0.21 和 0.30, 表明此时采用微波辐射方式并不能有效降低比能耗, 这是因为无微波条件下 42 mm 厚的混凝土试件的比能耗已经处于较低水平; 52 mm 厚的混凝土试件在无微波辐射、 M_1 微波辐射、 M_2 微

波辐射和 M_3 微波辐射时的平均比能耗依次为 91.86、91.70、83.13、69.91 kJ/m^3 , 与前者相比, 后三者比能耗的衰减程度 ζ 分别为 0.04、0.31 和 0.49; 62 mm 厚的混凝土试件在无微波辐射、 M_1 微波辐射、 M_2 微波辐射和 M_3 微波辐射时的平均比能耗依次为 115.79、115.47、99.72、72.43 kJ/m^3 , 与前者相比, 后三者比能耗的衰减程度 ζ 分别为 0.05、0.37 和 0.63; 72 mm 厚的混凝土试件在无微波辐射、 M_1 微波辐射、 M_2 微波辐射和 M_3 微波辐射时的平均比能耗依次为 141.59、141.01、116.61、74.18 kJ/m^3 , 与前者相比, 后三者比能耗的衰减程度 ζ 分别为 0.06、0.41 和 0.69。

表明: ① 整体来看, 相同厚度的混凝土试件的平

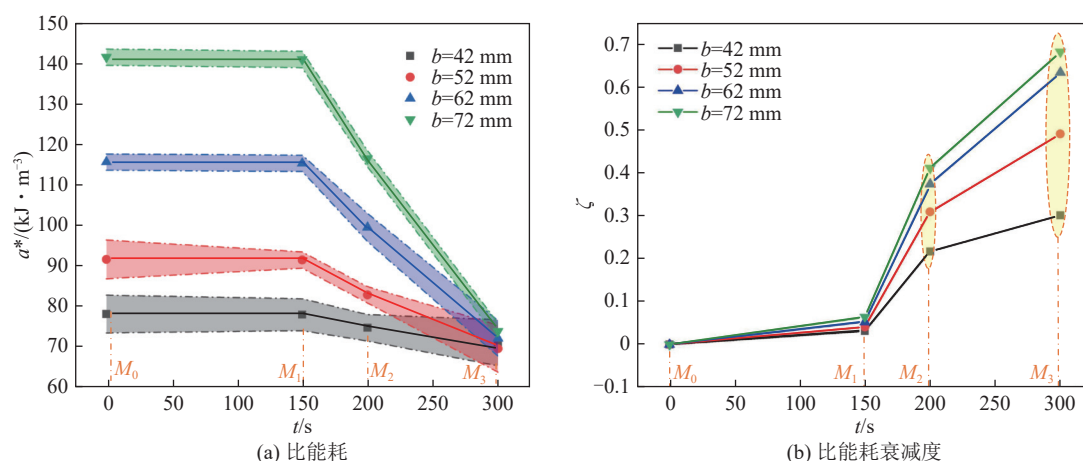


图7 混凝土试件的平均比能耗及比能耗衰减程度随微波辐射时间变化

Fig.7 Variations in average specific energy consumption and its attenuation in concrete specimens with microwave irradiation time

均比能耗随微波辐射时间的增加而减小,即比能耗衰减度逐渐增大,表明微波辐射时间越长对破岩效果的影响越显著。②微波时长为150 s (M_1) 时,混凝土试件比能耗几乎没有衰减,表明此时试件内部几乎没有产生新裂纹或者出现旧裂纹扩展现象。③在混凝土试件厚度42~72 mm 范围内,相同微波辐射时长,试件厚度越大,其比能耗衰减度越大,如图7b中黄色椭圆区域所示。这是因为试件厚度较小时,无微波条件下就能较为轻松破碎混凝土,微波辐射的作用体现不明显;而厚度较大时,无微波条件下破碎混凝土试件困难,此时微波辐射降低混凝土强度的作用就得以体现。另外,微波辐射时间一定时,其降低混凝土强度的能力是有限的,当厚度增加到足够大(72 mm) 时,其对应的比能耗衰减度的增长趋势就会减缓。

3.2 SEM 测试结果分析

混凝土(颗粒尺寸为1~2.5 mm) 可以简化为磁铁矿(Fe_2O_3)—钙镁橄榄石(CaMgSiO_4) 模型,矿物基质钙镁橄榄石(CaMgSiO_4) 的裂纹表面能参数 γ 为 2.332 J/m^2 [49]。混凝土的泊松比为0.25,其他相关参数见表1。微波照射前后的混凝土试件电镜扫描(SEM) 结果如图8a所示。从图中可以发现:随着微波辐射时间的增加,裂纹长度变长且裂纹密度增加;另外,当微波辐射时间较短时(M_1 和 M_2) 裂纹主要出现在基质内部,及矿物颗粒和基质交界面(晶间破坏),如图中红色椭圆区域所示;而当微波辐射时间较长(M_3) 时,热源矿物内部开始出现贯穿裂纹(晶内破坏),如图中黄色椭圆区域所示。

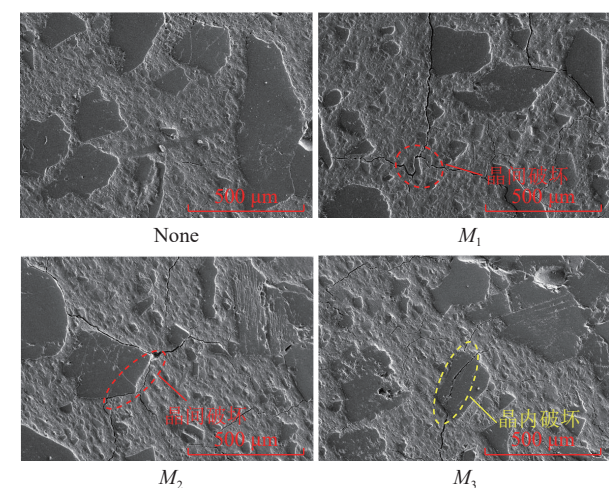
为了进一步获取具体的裂纹长度和密度,需要借助MATLAB的开源插件FracPaQ [33]。首先将原始SEM图像导入Adobe Illustrator 软件,借助钢笔工具,得到只包含裂纹信息的二值图像;然后将之导入插件

FracPaQ 中,对所有得到的细观裂纹图像进行定量分析,通过统计得到裂纹密度和长度随微波辐射时间的变化规律,结果如图8b及图8c所示。从图中可以发现:微波时间为0、150、300 s 对应的裂纹段数依次为619、703、1 043、1 542,则对应的密度 N_V 依次为 1×10^{11} 、 1.14×10^{11} 、 1.69×10^{11} 、 $2.49 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$;当微波辐射时间为0、150、200、300 s 时,裂纹扩展所能达到的最大长度 l 为 6.14×10^{-5} 、 6.31×10^{-5} 、 8.60×10^{-5} 、 $8.93 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。将得到的裂纹密度和长度代入公式 $D = 4\pi N_V \gamma l^3 / 3$,得到混凝土试样对应的损伤 ΔD 为0、0.03、0.40、0.68。

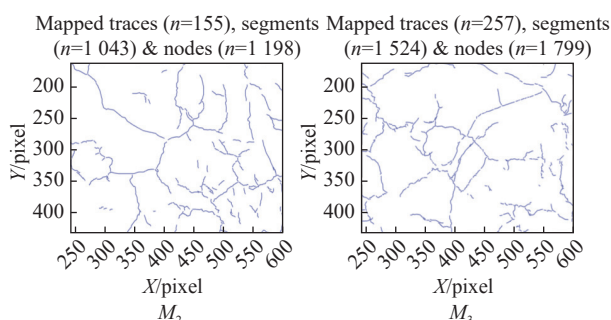
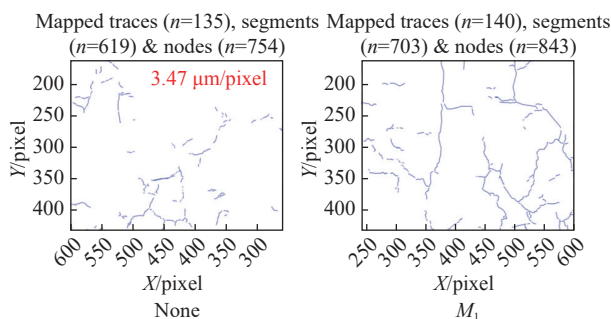
3.3 DHPB 和 SEM 实验结果对比分析

由3.1节和3.2节可知,不同微波辐射时间下(0、150、200、300 s),不同厚度(42、52、62、72 mm) 的混凝土试件的宏观比能耗衰减度 ζ 与细观损伤 D 的关系如图9所示。

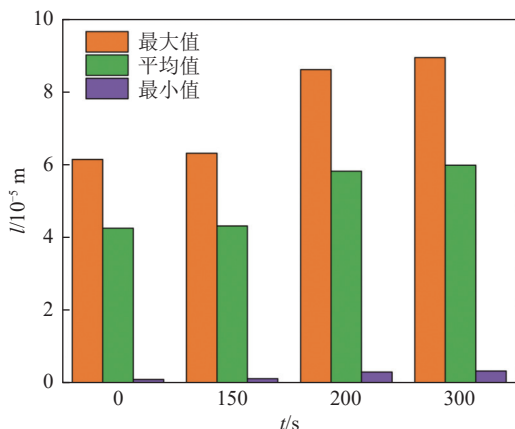
从图中可以发现:①微波辐射具有阈值特性。当微波辐射时间为 M_1 (150 s) 时,混凝土的宏观比能耗衰减度和损伤基本没有变化,意味着此时微波辐射对混凝土几乎没有影响;而当微波辐射时间为 M_2 (200 s) 和为 M_3 (300 s) 时,混凝土的宏观比能耗衰减度和损伤上升明显,意味着此时微波辐射明显降低了混凝土抵抗冲击的能力。②当混凝土试件厚度较小(42、52 mm) 时,宏观比能耗衰减度明显小于细观损伤;而当混凝土试件厚度较大(72 mm) 时,宏观比能耗衰减度最大值为0.69,细观损伤最大值为0.68,两者基本一致。这是因为:混凝土试件厚度较小时,其自身抵抗冲击破坏的能力就很小,无微波辐射就能够较为容易的破碎试件;而随着试件厚度增加,其本身抵抗冲击破坏的能力也随之增大,则此时微波辐射能够充分发挥其降低混凝土试件抵抗冲击破坏的能力。



(a) SEM 电镜扫描图像



(b) 包含细观裂纹的二值化图像



(c) 细观裂纹长度随微波辐射时间的变化

图8 混凝土试样 SEM 扫描分析结果

Fig.8 SEM scanning analysis results of concrete samples

4 讨论

为了解释图3中混凝土试件加热时间较长时出

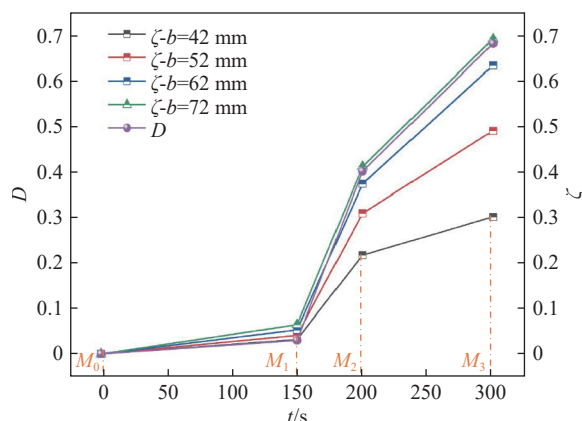


图9 DHPB 和 SEM 试验结果对比分析

Fig.9 Comparative analysis of DHPB and SEM experimental results

现破碎的现象,验证第2节建立的宏观比能耗和细观损伤的定量函数关系,先将细观损伤理论分析和 SEM 测试结果结合起来,进一步揭示微波辐射下混凝土细观裂纹扩展规律和损伤演化特征;再将混凝土 DHPB 实验和 SEM 测试结果作为算例,对比理论和实验结果。

4.1 细观损伤演化分析

4.1.1 应变能释放下的裂纹扩展规律

假设混凝土裂纹密度 N_V 分别为 1×10^{10} 、 1×10^{11} 、 $1 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$,并将之依次代入式(10)可得裂纹扩展所需应变能密度随裂纹长度的变化规律,如图10a所示。从图10a可以发现混凝土在应变能密度释放下的裂纹扩展具有以下规律:① 裂纹扩展有阈值特性:只有当应变能密度大于初始裂纹扩展所需应变能密度时,裂纹才开始扩展。② 随着裂纹长度的增加,裂纹扩展所需的应变能密度先减小后增加,即裂纹长度存在一个特征值 l_c 。当裂纹长度等于该特征值时,裂纹发生扩展所需的应变能密度最小,即为特征应变能密度 v_{lc} 。裂纹长度特征值与裂纹密度有关。混凝土的3种裂纹密度下对应的特征长度值分别为 1.82×10^{-4} 、 8.42×10^{-5} 、 $3.81 \times 10^{-5} \text{ m}$,表明裂纹长度特征值随着裂纹密度的增加而减小。

另外,若混凝土的初始裂纹长度 l_0 在其特征值 l_c 的右侧,裂纹扩展所需的应变能密度随裂纹长度的增长而持续增加,其不会产生动能,为准静态扩展。而若混凝土的初始裂纹长度 l_0 在其特征值 l_c 的左侧,其裂纹扩展分为2个阶段:在混凝土的裂纹长度达到其特征值 l_c 之前,裂纹扩展所需的应变能密度随裂纹长度的增长而减小。这是因为在此过程中裂纹扩展释放的应变能大于形成新裂纹表面所需的表面能,多余的能量转换为裂纹扩展的动能^[50-51]。在混凝土的裂

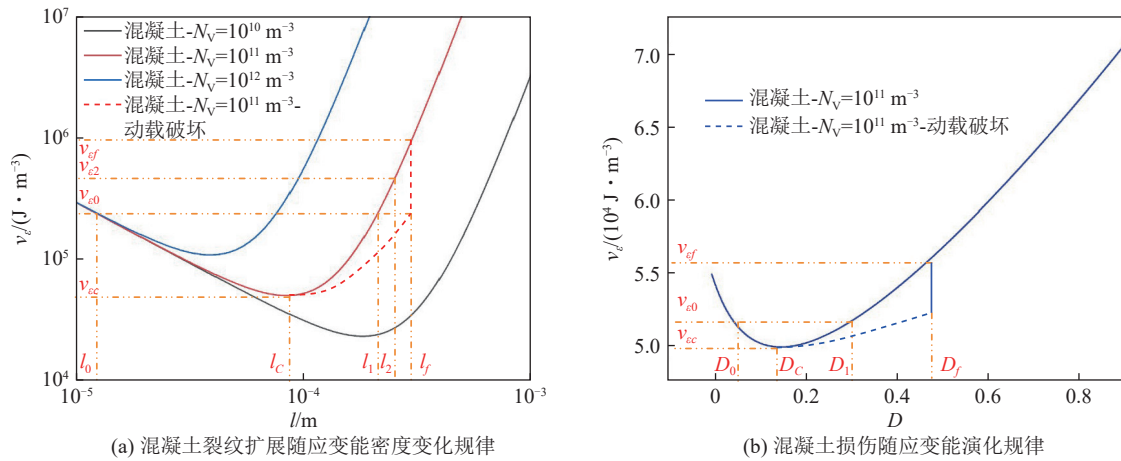


图 10 混凝土裂纹扩展和损伤随应变能密度变化规律

Fig.10 Variation of concrete crack propagation and damage with strain energy density

纹长度达到其特征值 l_c 之后, 先前积累的动能转化为新裂纹的表面能, 其裂纹扩展过程是动态的。

值得注意的是, 混凝土 (根据图 3 中的混凝土试件在 400 s 时发生破碎现象, 可以判断混凝土的初始裂纹长度在其特征值的左侧) 的动态扩展路径和最终裂纹长度是能够确定的。初始裂纹 l_0 起裂时的应变能密度 v_{e0} 对应着另一个大于特征值 l_c 的裂纹长度 l_1 , 则根据能量守恒定律, 初始裂纹起裂后即使没有应变能密度增加, 裂纹也能扩展至长度 l_1 。因此含有动能的裂纹会继续扩展直至动能全部转换为裂纹的表面能, 即裂纹最终扩展到 l_f 。此时由于裂纹扩展的能量是自身的动能, 不需要额外的应变能密度, 即对应的应变能密度仍然是 v_{e0} 。因此根据能量守恒定律 (初始裂纹 l_0 起裂时的能量密度 (应变能密度和裂纹表面能密度) 和裂纹动态扩展达到 l_f 时的总能量密度相等), 及式 (9)、式 (10) 可得:

$$\begin{aligned} v_e(r, t) / \left[1 + \frac{16(1-\mu^2)N_v l_0^3}{9(1-2\mu)} \right] + 2\pi N_v \gamma l_0^2 = \\ v_e(r, t) / \left[1 + \frac{16(1-\mu^2)N_v l_f^3}{9(1-2\mu)} \right] + 2\pi N_v \gamma l_f^2 \end{aligned} \quad (13)$$

由式 (13) 可求得对应的 l_f 及相应的动态扩展路径, 即图 10a 中红色虚线。另外, 当裂纹从 l_c 继续发生扩展时, 由于此时初始裂纹长度大于特征长度, 则裂纹将沿原曲线发生准静态扩展。

4.1.2 裂纹扩展作用下的损伤演化规律

将混凝土的初始裂纹密度 $N_v (1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3})$ 代入式 (9) 可得混凝土相应的损伤随应变能演化规律, 结果如图 10b 所示。从中可得混凝土发生损伤演化所需的应变能密度特征值 $v_{ec} = 5.00 \times 10^4 \text{ J/m}^3$, 对应的损伤特征值为 $D_c = 0.14$ 。通过 $D = 4\pi N_v \gamma l^3 / 3$ 得到混凝土的初始损伤值为 0.05, 将之代入式 (11) 可得混凝土继续

发生损伤演化所需的应变能密度 v_{e0} 为 $5.15 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 。

由于混凝土的初始裂纹长度小于其特征长度, 混凝土裂纹起裂后先发生静态扩展后转为动态扩展, 损伤先是沿着图 10b 中蓝色实线逐渐累积而后沿着蓝色虚线快速累积, 直至试件四分五裂, 与图 3 中混凝土试件破坏形式一致。将相应的 l_0 、 v_{e0} 代入式 (13) 可得 $l_f = 1.10 \times 10^{-4} \text{ m}$, 然后代入式 (11) 可得 $D_f = 0.46$, 意味着混凝土的初始应变能密度一旦达到 $5.15 \times 10^4 \text{ J/m}^3$, 则其内部损伤从 0.05 迅速累积到 0.46。

结合图 10a 和图 10b, 可以发现微波辐射对混凝土材料细观损伤演化的影响具有以下特征: ① 损伤累积具有瞬时特性。由于混凝土的初始裂纹长度小于其特征值时, 裂纹先发生静态扩展后转为动态扩展, 对应的损伤也会瞬间迅速累积, 由于较多的能量瞬间释放, 很可能引起混凝土灾难性的断裂失效, 表现为整块混凝土试件瞬间断裂成不同的小块。② 损伤累积具有阈值特性: 只有当混凝土吸收的微波辐射转化来的应变能密度大于初始裂纹扩展所需应变能密度时, 损伤才会累积。这也解释了 SEM 测试结果中微波辐射时长为 150 s (M_1) 时损伤基本不增加的原因, 即: 将混凝土损伤开始累积时所需的最小应变能密度 $5.15 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 代入 $v_e = \alpha_2 C \rho \Delta T$, 得到损伤开始累积时理论上所需的最短微波辐射时间为 $M_c = 175 \text{ s}$ 。而由图 3 可知, 当混凝土试件微波辐射时间分别为 150 s (M_1)、200 s (M_2)、300 s (M_3) 时, 对应的升温 ΔT 分别为 158、192、230 $^{\circ}\text{C}$ 。因此微波辐射时长为 150 s (M_1) 时, 损伤累积很小。

4.2 细观损伤-宏观比能耗衰减度分析

将 DHPB 试验中混凝土的输出功 E_{out} (平均为 $150 \text{ N} \cdot \text{m}$)、破碎体积 V (试件厚度为 72 mm, 此时微波辐射效果最显著, 对应的破碎体积为 $2.88 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)

代入式 (2), 并将 SEM 测试得到的 γ , N_V 和 ΔD_0 代入式 (11), 则可得到混凝土宏观比能耗衰减度和细观损伤随应变能密度变化规律, 结果如图 11 所示。

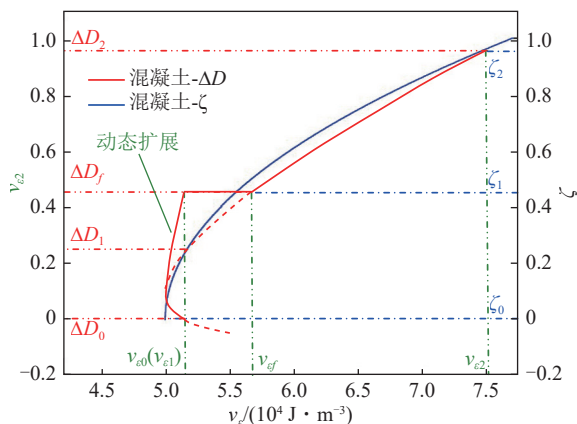


图 11 混凝土宏观比能耗衰减度和细观损伤在微波辐射下应变能密度变化规律

Fig.11 Macro- specific energy consumption attenuation and meso-damage variation of concrete with respect to strain energy density under microwave radiation

从图 11 中可以发现, 在一定范围内, 混凝土的宏观比能耗和细观损伤值近似相等: ① 当混凝土吸收的应变能密度没有达到裂纹扩展所需应变能密度 (v_{e0}) 时, 混凝土的宏观比能耗衰减度和损伤累积都为零; ② 当应变能密度在 $v_{e1} \sim v_{e2}$, 即对应的损伤值 (比能耗衰减度) 为 $\Delta D_1 \sim \Delta D_2$ ($\zeta_1 \sim \zeta_2$) 时, 宏观比能耗衰减度和细观损伤都与应变能密度近似线性相关, 两者变化趋势基本一致, 这与 3.3 节 DHPB 和 SEM 试验结果相吻合。

4.3 理论和试验结果对比分析

将不同厚度的混凝土试件 DHPB 试验结果 (E_{out} 和 V) 代入式 (2), 可得相应的比能耗衰减度随应变能密度变化的理论解。再结合 3.3 节的试验结果及 4.2 节的理论分析, 则可将理论和实验结果进行直观对比, 其结果如图 12 所示。

从图 12 中可以发现: ① SEM 测试得到的混凝土损伤值与其理论值一致, 即: 当 $v_e < v_{e0}$ (微波辐射时长小于 175 s) 时, 混凝土内部基本无新的损伤; 当 $v_e > v_{e0}$ 时, 混凝土内部损伤累积与应变能密度近似线性相关。② DHPB 试验测得的混凝土试件比能耗衰减度与其理论值的关系却较为复杂。当混凝土试件厚度较小 (42 mm) 时, 试验值明显小于理论值; 而随着试件厚度的增加 (42~62 mm 范围内), 实验和理论越发契合; 而当试件厚度达到 72 mm 时, 混凝土试件的试验值却又略小于理论值了。这是因为混凝土试件厚度较小时, 其抵抗冲击破坏的能力很小, 无微波

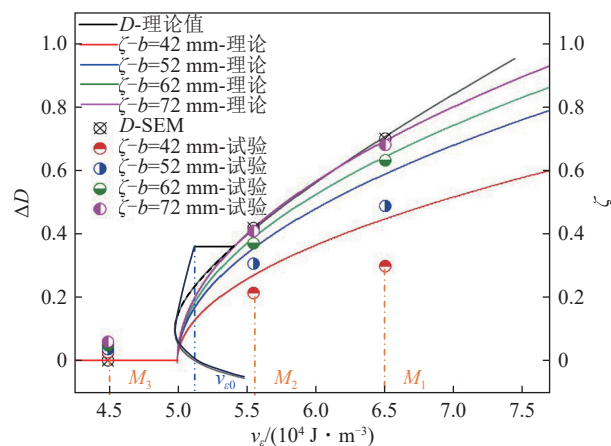


图 12 混凝土试件的比能耗衰减度及对应的岩石损伤的实验和理论值对比

Fig.12 Experimental and theoretical comparison of specific energy consumption attenuation and damage values for concrete specimens

辐射就能够较为容易的破碎试件; 而随着试件厚度增加, 其本身抵抗冲击破坏的能力也随之增大, 此时微波辐射劣化混凝土强度的作用显著; 而当试件厚度过厚时, 由于此频率和功率下微波辐射混凝土的能力有限, 混凝土内部形成新的微裂纹也增加缓慢。

因此, 综合宏观和细观分析, 微波辐射降低混凝土试件抵抗冲击破坏能力的本质可以描述为: 由于混凝土内部热源矿物和基质对微波辐射敏感程度及热胀系数不同, 微波辐射混凝土时穿透深度范围内的热源矿物迅速升温, 形成由热源矿物到基质的温度应变和应力; 当混凝土吸收的微波能量密度达到起裂所需的应变能密度 (应力克服热源矿物和基质交界面及基质内部的粘结力) 后, 混凝土内部形成新的裂纹 (损伤增加) 导致其强度降低, 即宏观表现为混凝土试件抵抗冲击的能力下降 (比能耗衰减)。

5 结 论

1) 建立了细观损伤-宏观比能耗衰减度的定量函数关系, 揭示了微波辐射降低混凝土抵抗冲击破坏能力的内在机理。双压头同步冲击实验 (DHPB) 和电镜扫描 (SEM) 结果表明微波辐射下混凝土试件的宏观比能耗最大值为 0.69, 而相应的细观损伤增加了 0.68, 两者基本一致。

2) 微波辐射劣化混凝土效果具有阈值特性。当混凝土吸收的应变能密度小于初始裂纹扩展所需应变能密度时, 混凝土试件内部裂纹长度和数量不变, 基本无损伤; 而当混凝土吸收的应变能密度较大时, 试件损伤随应变能密度近似线性累积。

3) 微波辐射劣化混凝土效果具有瞬时特性。由

于混凝土的初始裂纹长度小于裂纹长度特征值,裂纹先静态扩展后转为动态扩展,扩展过程中由于大量能量瞬间释放,很可能引起混凝土的灾难性断裂失效,宏观表现为整块混凝土试件断裂成很多不同的小块。

4) 微波辐射能够影响混凝土试件在双压头冲击下的破坏形态。无微波辐射的混凝土试件的最终断裂路径与双压头连线方向基本一致,且形成的破碎坑为圆形;而有微波辐射的混凝土试件最终断裂路径不仅与双压头连线方向夹角较大,甚至会出现多条宏观裂纹,且形成体积明显减小的不规则破碎坑。

参考文献(References):

- [1] 康红普,李全生,张玉军,等.我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J].绿色矿山,2023,1(1):1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 1-24.
- [2] 许家林,鞠金峰,轩大洋,等.煤矿全生命周期绿色开采研究展望[J].绿色矿山,2023,1(1):79-90.
XU Jialin, JU Jinfeng, XUAN Dayang, et al. Prospects for green mining research of coal mine life cycle[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 79-90.
- [3] 赵鲁涛,李丰荣,李照源,等.中国绿色低碳经济政策:进展与展望[J].绿色矿山,2023,1(1):128-137.
ZHAO Lutao, LI Fengrong, LI Zhaoyuan, et al. China's green and low-carbon economic policies: Progress and prospects[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 128-137.
- [4] 武强,刘宏磊,曾一凡,等.我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J].绿色矿山,2023,1(1):25-32.
WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 25-32.
- [5] WANG P, YUE Z W, LI A K, et al. Experimental and analytical study on key factors of rock breaking under a single indenter[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(5): 1997-2016.
- [6] LONG R S, SUN S N, LIAN Z S, et al. A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(6): 1053-1058.
- [7] 刘送永,李洪盛,江红祥,等.矿山煤岩破碎方法研究进展及展望[J].煤炭学报,2023,48(2):1047-1069.
LIU Songyong, LI Hongsheng, JIANG Hongxiang, et al. Research progress and prospect of coal-rock breaking methods in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1047-1069.
- [8] 刘勇,陈长江,刘笑天.高压水射流破岩能量耗散与释放机制[J].煤炭学报,2017,42(10):2609-2615.
LIU Y, CHEN C, LIU X. Mechanism on energy dissipation and release of rock breakage with high pressure water jets[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2609-2615.
- [9] 郭辰光,孙瑜,岳海涛,等.激光辐照热裂破岩规律及力学性能[J].煤炭学报,2022,47(4):1734-1742.
GUO Chenguang, SUN Yu, YUE Haitao, et al. Law and mechanics of thermal cracking of rock by laser irradiation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1734-1742.
- [10] LU G, LI Y, HASSANI F, et al. Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1497-1506.
- [11] JIANG H X, LIU Z H, GAO K D. Numerical simulation on rock fragmentation by discontinuous water-jet using coupled SPH/FEA method[J]. Powder Technology, 2017, 312: 248-259.
- [12] DAI J, ZUO Q R. Numerical investigation on mixing enhancement of the cavity with pulsed jets under oblique shock wave interference[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 123: 107454.
- [13] 江红祥,赵慧贺,刘送永,等.磨料射流冲击裂缝岩石性能影响因素分析[J].振动测试与诊断,2022,42(3):564-571.
JIANG H, ZHAO H, LIU S, et al. Influencing factors analysis of rock slotting performance by abrasive waterjet impact[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 564-571.
- [14] 薛文浩,吴晓君,张飞飞,等.空化水射流在渐进成形与冲蚀领域的对比分析[J].精密成形工程,2024,16(2):28-37.
XUE W, WU X, ZHANG F, et al. Comparative analysis of cavitation waterjet in the field of incremental forming and erosion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(2): 28-37.
- [15] 刘勇,张志康,魏建平,等.柔性刀具冲击破煤能量演化及关键参数研究[J/OL].煤炭学报:1-10[2024-01-25]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR23.1207>.
LIU Y, ZHANG Z, WEI J, et al. Research on the energy evolution and key parameters of coal breaking by flexible cutting tools[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-10[2024-01-25]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR23.1207>.
- [16] 张魁,杨长,陈春雷,等.激光辅助TBM盘形滚刀压头侵岩缩尺试验研究[J].岩土力学,2022,43(1):87-96.
ZHANG Kui, YANG Chang, CHEN Chunlei, et al. Scale model test on laser-assisted rock indentation by TBM disc cutter indenter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 87-96.
- [17] HARTLIEB P, BOCK S. Theoretical investigations on the influence of artificially altered rock mass properties on mechanical excavation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 801-809.
- [18] 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.
SHAO Zhushan, WEI Wei, CHEN Wenwen, et al. Research progress and industrial applications of microwave heating processing on rock and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5): 140-155, 165.
- [19] LU G M, FENG X T, LI Y H, et al. Experimental investigation on the effects of microwave treatment on basalt heating, mechanical strength, and fragmentation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2535-2549.
- [20] JIANG H X, CAI Z Y, WANG O G, et al. Experimental and numerical investigation of hard rock breakage by indenter impact[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(1): 2747830.
- [21] MONTI T, TSELEV A, UDOUDO O, et al. High-resolution dielectric characterization of minerals: A step towards understanding the

- basic interactions between microwaves and rocks[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 151: 8–21.
- [22] ZHENG Y L, SUN T W. A method to derive the dielectric loss factor of minerals from microwave heating rate tests[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108788.
- [23] ZHENG Y L, ZHAO X B, ZHAO Q H, et al. Dielectric properties of hard rock minerals and implications for microwave-assisted rock fracturing[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(1): 22.
- [24] Ahmed I, Shang Y, Basharat M, et al. Influence of stress-induced fabric changes on the strength of granites: An insight from the Kohistan and Ladakh Himalayas, Northern Pakistan[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2024(9): 83.
- [25] LU G M, LI Y H, HASSANI F, et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1523–1532.
- [26] YIN T B, JIN F Y, LI Q, et al. Effects of microwave radiation on dynamic compressive properties of basalt[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2022, 32(10): 3388–3403.
- [27] MEREDITH P G, ATKINSON B K. Fracture toughness and subcritical crack growth during high-temperature tensile deformation of Westerly granite and Black gabbro[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1985, 39(1): 33–51.
- [28] 蒋浩鹏, 姜谔男, 杨秀荣. 基于 Weibull 分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1894–1902.
- JIANG Haopeng, JIANG Annan, YANG Xiurong. Statistical damage constitutive model of high temperature rock based on Weibull distribution and its verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1894–1902.
- [29] YUAN Y, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Crack damage evolution in concrete coarse aggregates under microwave-induced thermal stress[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(3): 108.
- [30] ASHBY M F, SAMMIS C G. The damage mechanics of brittle solids in compression[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1990, 133(3): 489–521.
- [31] HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced micro-cracking in granites: Characterization and analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(2): 125–134.
- [32] LU Y, HE Z Y, XU J N, et al. Tailored microwave thermal crack heating model and its application in cutting ceramics[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 102: 119–130.
- [33] HEALY D, RIZZO R E, CORNWELL D G, et al. FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 95: 1–16.
- [34] KINGMAN S W, ROWSON N A. Microwave treatment of minerals—a review[J]. *Minerals Engineering*, 1998, 11(11): 1081–1087.
- [35] LI Y, LU G, FENG X, et al. The influence of heating path on the effect of hard rock fragmentation using microwave assisted method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 36(6): 1460–1468.
- [36] LU G M, FENG X T, LI Y H, et al. The microwave-induced fracturing of hard rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(9): 3017–3032.
- [37] HASSANI F, NEKOOVAGHT P M, GHARIB N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1): 1–15.
- [38] BAI G G, SUN Q, JIA H L, et al. Mechanical responses of igneous rocks to microwave irradiation: A review[J]. *Acta Geophysica*, 2022, 70(3): 1183–1192.
- [39] SONG S X, CAMPOS-TORO E F, LÓPEZ-VALDIVIESO A. Formation of micro-fractures on an oolitic iron ore under microwave treatment and its effect on selective fragmentation[J]. *Powder Technology*, 2013, 243: 155–160.
- [40] HARTLIEB P, TOIFL M, KUCHAR F, et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 91: 34–41.
- [41] 王相元, 晋铭, 赵伟, 等. 一种悬臂式冲击掘进机: CN201520995688.1[P]. 2016–04–27.
- [42] 岳中文, 王鹏, 岳小磊, 等. 一种三头微波辅助破岩液压破碎锤: CN202120414129.2[P]. 2021–11–15.
- [43] YUE Z W, WANG P, LI A K, et al. Experimental and analytical study on optimal spacing for hard-rock breaking under double-indenter impact[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2023, 51(6): JTE20230098.
- [44] 袁媛, 邵珠山. 微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂过程研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(5): 2112–2119.
- YUAN Yuan, SHAO Zhushan. Research on the criteria of crack propagation and the process of fracture in brittle rocks under microwave irradiation[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(5): 2112–2119.
- [45] WALSH J B. The effect of cracks on the compressibility of rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(2): 381–389.
- [46] QIAO R J, SHAO Z S, WEI W, et al. Theoretical investigation into the thermo-mechanical behaviours of tunnel lining during RABT fire development[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(5): 4807–4818.
- [47] YUAN Y, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Fracture behavior of concrete coarse aggregates under microwave irradiation influenced by mineral components[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286: 122944.
- [48] HASSELMAN D P H. Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1969, 52(11): 600–604.
- [49] TROMANS D, MEECH J A. Fracture toughness and surface energies of minerals: Theoretical estimates for oxides, sulphides, silicates and halides[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(12): 1027–1041.
- [50] YUAN Y, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Thermal response and crack propagation of mineral components in olivine basalt under microwave irradiation[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(14): 589.
- [51] BERRY J P. Some kinetic considerations of the Griffith criterion for fracture: I Equations of motion at constant force[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(3): 194–206.