

微波照射下砂浆-骨料多场耦合的数值研究

邵珠山^{1,2,3}, 江岩松^{2,3}, 魏玮^{1,3}, 肖毅豪^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学理学院, 710055 西安; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 710055 西安;
3. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 710055 西安)

摘 要: 新建筑的建造和旧建筑的拆除产生了大量废弃混凝土, 从废弃混凝土中提取再生骨料已成为一种缓解资源危机、实现骨料循环利用的方案。微波加热因其选择性加热、高效、绿色的特点被逐渐应用于再生骨料的回收中。为了探究微波照射下砂浆-骨料沿界面分离与多场耦合之间的关系, 利用 COMSOL Multphysics 软件建立了三维砂浆-骨料二相模型, 分析了电磁场、温度场、应力场的分布情况。通过与微波加热试验对比, 验证了数值分析的可靠性。数值模拟结果表明: 电场强度和温度梯度在砂浆-骨料界面处达到最大值; 骨料的外侧受拉, 内侧受压。加热条件为 3 kW, 200 s 时, 在砂浆-骨料界面处, 第一主应力超过砂浆的极限抗拉强度, 界面处出现裂纹, 随着时间的延续, 裂纹逐渐从界面处向试件边缘扩展并相互连接, 最终砂浆与骨料在界面处发生分离。

关键词: 微波; 骨料; 多场耦合; 温度; 热应力

中图分类号: O34; TU528

文献标志码: A

DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.011

文章编号: 1000-4939(2026)01-0123-11

CSTR: 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.011

Numerical analysis of multi-field coupling between mortar-aggregate under microwave radiation

SHAO Zhushan^{1,2,3}, JIANG Yansong^{2,3}, WEI Wei^{1,3}, XIAO Yihao^{1,3}

(1. College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China;
2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China;
3. Shaanxi Key Laboratory for Geotechnical and Underground Space Engineering,
Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: The construction of new buildings and the demolition of old buildings have led to significant amounts of waste concrete. Therefore, extracting recycled aggregates from this waste concrete has emerged as a solution to mitigating resource crisis and achieving aggregate recycling. Microwave heating has been gradually applied to the recovery of recycled aggregates due to its characteristics of selective heating, high efficiency, and environmental friendliness. In order to investigate the relationship between mortar-aggregate interface separation and multi-field coupling under microwave irradiation, a three-dimensional mortar-aggregate biphasic model was established using COMSOL Multphysics software, the distribution of the in-

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No. 12202333); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2021MD703868)

通信作者: 邵珠山, 教授. E-mail: shaozhushan@xauat.edu.cn

引用格式: 邵珠山, 江岩松, 魏玮, 等. 微波照射下砂浆-骨料多场耦合的数值研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 123-133.

SHAO Zhushan, JIANG Yansong, WEI Wei, et al. Numerical analysis of multi-field coupling between mortar-aggregate under microwave radiation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 123-133.

ternal electromagnetic field, temperature field, stress field was analyzed, and the reliability of numerical analysis was verified through microwave heating experiments. The numerical simulation results indicate that the electric field intensity and temperature gradient reach their maximum values at the mortar-aggregate interface. The outer side of the aggregate is subjected to tension, while the inner side is subjected to compression. Under heating condition of 3 kW, 200 s, the first principal stress exceeds the ultimate tensile strength of the mortar at the mortar-aggregate interface, and cracks appear at the interface. With the passage of time, the cracks gradually propagate from the interface to the edge of the specimen and connect with each other, eventually leading to the separation of the mortar and aggregate at the interface.

Key words: microwave; aggregate; multi-field coupling; temperature; thermal stress

近年来,全球处于大量建设的时期,一方面,新建建筑需要大量的砂石;另一方面,旧建筑物拆除产生数量惊人的建筑废物^[1]。为了我国基建的快速、可持续发展,学者们提出了从建筑废物中提取再生骨料,制作再生混凝土的办法。这一举措不仅在一定程度上解决了建筑垃圾资源利用率低的问题,同时也缓解了建筑材料开采带来的局部地区资源枯竭、河道破坏、水土流失等环境问题。

废弃混凝土主要是由硬化水泥浆、细骨料以及粗骨料等成分组成的复杂集合体,其中硬化水泥浆将粗、细骨料牢固地粘结在一起。为了将砂浆和骨料分离,从建筑废物中分离出优质骨料,学者们开展了大量的工作,提出了很多回收骨料的方法。现有的回收方法主要有物理机械研磨法^[2]、化学酸泡法^[3]以及生物沉降法^[4]。但这些方法存在噪音大、污染环境、成本高等问题。

微波加热技术因其高效、即时、均匀的特点在食品和工业领域普遍使用^[5-6]。高经纬等^[7]采用微波加热和传统加热2种方式对花岗岩进行不同温度加热处理,结果表明,微波加热时间更短,一般仅为传统加热时间的1/7,微波加热在降低花岗岩性能方面效率更高。研究表明^[8-13],微波加热技术对废弃混凝土中包裹粗骨料的砂浆体有一定程度的损伤作用,能够加速砂浆与粗骨料的分离。EVERAERT等^[14]通过试验发现,相比于单独使用机械回收骨料,预先进行微波预处理(3 kW, 60 s),再进行机械回收,得到的再生骨料占比更高,前者再生骨料质量占比为20%,后者则达到了33%。LIPPIATT等^[15]的研究表明,在单模微波试验台(2 kW, 2.45 GHz)下照射混凝土试件50 s后,可实现约60%的再生骨料回收,而未经预处理的仅为3.5%。相较于现有的回收方法,微波辅助混凝土破碎及骨料回收已被证明具有高效率和低能耗的特点,且对待回收骨料损

伤轻、污染小,是一项潜力巨大的骨料剔选技术^[16-17]。

为了探究微波照射下砂浆-骨料分离的机理,可以使用温度或力学传感器实时监测微波加热过程中试件表面的热力变化^[18],然而,在现有的试验条件下,很难准确检测到混凝土内部的电磁场分布、温度分布、应力和变形。这些力学特性对深入研究砂浆-骨料分离的机理更为重要。数值模拟可以高度准确地分析混凝土在微波场中的热、力响应,是解决这一问题的有效手段。

此前,混凝土模型的数值研究大多为热力耦合模型,没有考虑到电磁场的影响,具有一定局限性^[19]。本研究采用多场耦合软件COMSOL Multiphysics建立砂浆-骨料数值模型,耦合电磁场、力场和温度场,从微波传播、吸收、加热、热膨胀和应力等方面对微波照射下砂浆和骨料的分离机理进行了较为详细的数值分析,可为微波作用下砂浆-骨料分离提供一定的参考。

1 多场耦合模型

1.1 试件模型建立

在COMSOL Multiphysics中对微波照射下砂浆-骨料模型进行数值求解,同时,砂浆-骨料试件的微波加热试验在微波加热设备(CY-MU1000C-L,湖南长仪微波科技有限公司)中进行。该设备主要由微波发生系统、微波加热腔、外置冷却系统构成(图1a)。该设备的加热腔连接了4个WR340波导,该波导以TE₁₀模式在2.45 GHz下工作。根据微波加热设备建立三维几何模型(图1b),砂浆-玄武岩试件模型设置在加热腔中心,模型尺寸如表1所示。

表 1 数值模型尺寸

Tab. 1 Numerical model size (单位:mm)

种类	尺寸
加热腔	410×320×414
波导	86.36×43.18
砂浆	$R \in 12.5 \sim 25, L = 100$
玄武岩	$R = 12.5, L = 100$

材料的介电常数决定了其被电场极化能力的强弱,介电损耗体现了其将电能转化为热能的能力,因此材料的介电特性是表征材料对微波能响应程度的关键指标。为了得到这一关键参数,使数值模型更加贴近现实,采用介电特性自动测量系统测试了材料的介电特性。如图 2(a)所示,该测量系统主要由矢量网络分析仪(PNA37020)、同轴探头与支架构成,测量的方法是单端开路法。利用该测试系统测

试了玄武岩和砂浆 25 ℃ 时在频率范围为 2.2 ~ 2.6 GHz 下介电实部 ϵ' 、虚部 ϵ'' 的变化情况,测试结果如图 2(b)所示,取频率 2.45 GHz 时砂浆、玄武岩的介电常数与损耗因子作为模拟参数。试件模型中的其他参数来自于相关文献,如表 2 所示。

表 2 砂浆和玄武岩的数值模拟参数

Tab. 2 Numerical simulation parameters of mortar and basalt

参数名称	玄武岩	砂浆
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 865 ^[20]	2 100 ^[20]
热膨胀系数/ K^{-1}	8×10^{-6} ^[21]	19×10^{-6} ^[21]
比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	816 ^[22]	1 600 ^[23]
导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	2.34 ^[24]	1.08 ^[24]
相对介电常数	7.17-1.02j	5.17-0.65j
泊松比	0.35 ^[25]	0.20 ^[26]

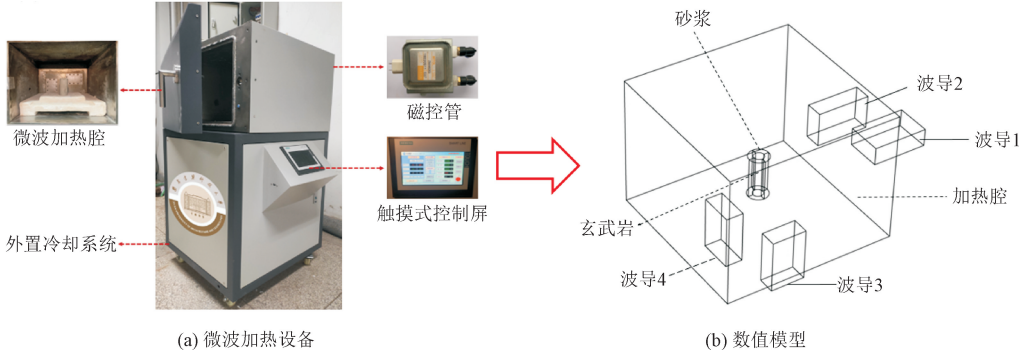


图 1 模型建立

Fig. 1 Establishment of model

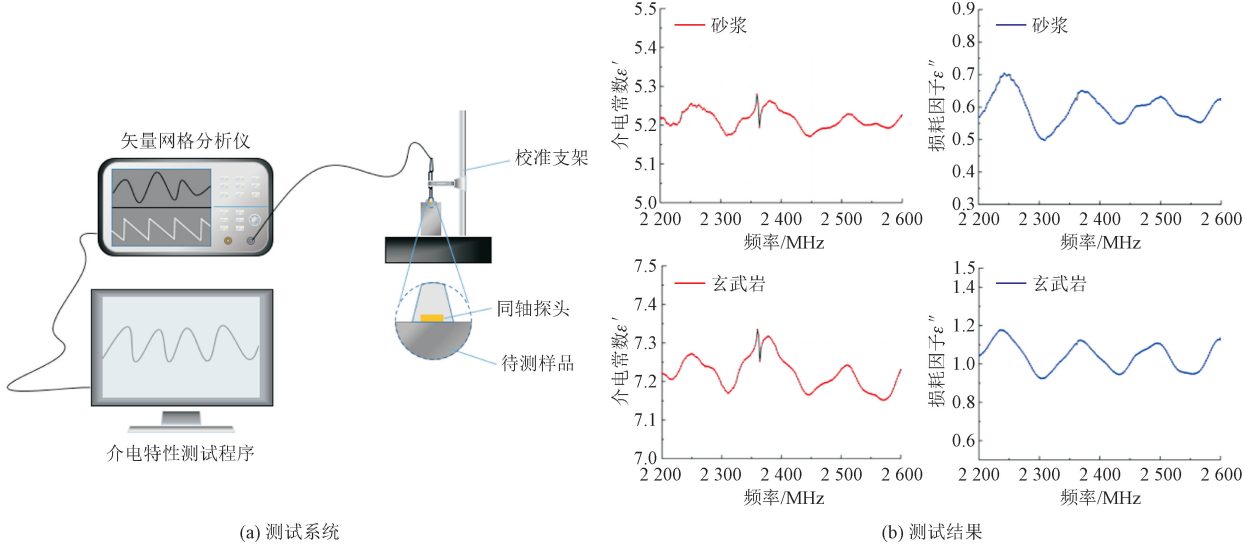


图 2 介电特性测试

Fig. 2 Dielectric property test

1.2 模型基本假定

为了使数值模型更好地符合现实情况,同时为

了简化计算,采取了如下假定:试件向外界的热辐射量很低,因此在温度场中假定模型的边界为热绝缘;砂浆和玄武岩模型均密实,内部无孔隙;砂浆和玄武

岩模型均干燥,不考虑水蒸气产生的压力;在力学场中假定模型的边界条件为定向约束;求解传热方程时,介电参数与热导率为定值,与温度无关;所有材料都是非磁性材料,即忽略磁场的相互耦合。

1.3 热力耦合原理

微波作用下试件的热响应是电磁场、热场和力场多物理场相互作用的耦合行为。拟定建模方法的数学公式包括3个部分:麦克斯韦理论(电磁场)、传热理论(温度场)和固体力学理论(应力场)。各物理场之间的联系如图3所示。

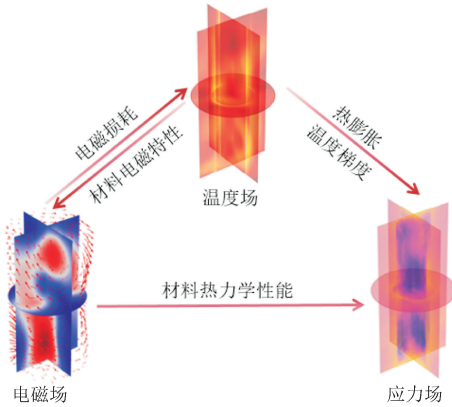


图3 多物理场之间的耦合关系

Fig. 3 Coupling relationships between multiphysics fields

1) 电磁场(麦克斯韦理论)

麦克斯韦方程是一组微分或积分形式的偏微分方程,它说明了基本电磁量之间的关系。该模型的电磁场将麦克斯韦方程简化为亥姆霍兹矢量方程进行计算,其控制方程为^[27-30]

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma_e}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

式中: μ_r (N/A²)是相对磁导率,假设模型 $\mu_r = 1$ N/A²; ω (rad/s)是角频率; $\mathbf{E}$ (V/m)表示电场强度; σ_e (S/m)是电导率; k_0 (rad/m)是自由空间的波数; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m,表示真空中的介电常数; ϵ_r 表示相对介电常数。设置好输入频率和微波功率,通过求解式(1),可以获得加热腔和试件的电磁场分布。

2) 温度场(传热理论)

当激发的微波作用于物体时,部分电磁能转化为热能,导致试件内部温度发生变化。需要将微波加热产生的热量耦合到试件的传热方程中,样品中的热传递可由式(2)中的热平衡关系表示^[28-30]为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q_{\text{ted}} \quad (2)$$

式中: T (℃)为温度; ρ (kg/m³)为密度;

C_p (J·kg⁻¹·℃⁻¹)为恒压下的比热容; Q_{ted} (W/m³)为微波产生的热源; q (W/m²)为热通量,表达式为

$$q = -k \nabla T \quad (3)$$

式中, k (W·m⁻²·K⁻¹)为固体导热系数。通过结合式(1)~式(3),耦合了微波-试件的电磁场与温度场,进而得出试件的温度分布。

3) 应力场(固体力学理论)

试件内的温度变化会导致热膨胀并产生热应力,通过热变形将力场与温度场耦合,温度与应变之间的关系可以表示为^[9]

$$\epsilon^T = \alpha(T - T_f) \quad (4)$$

式中: ϵ^T 表示温度引起的线应变; α (K⁻¹)表示热膨胀系数; T_f (K)表示应变参考温度(零应变温度)。

总应变可以表示为弹性应变和线应变之和

$$\epsilon = \epsilon^\sigma + \epsilon^T \quad (5)$$

式中, ϵ^σ 表示弹性应力引起的应变。

应力可以表示为

$$\sigma = D\epsilon \quad (6)$$

式中: σ 代表应力张量; D 代表物理本构张量; ϵ 代表应变张量。通过式(4)~式(6),可在域中求解试件的应力与应变。

1.4 边界条件

1) 电磁场

理想电导体边界条件用于定义波导和腔体内壁,将4个矩形波导的入口定义为端口边界,加热腔内壁与波导定义为阻抗边界。

端口边界条件为

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} \quad (7)$$

式中: β 是传播常数; f (Hz)是微波频率; f_c (Hz)是截止频率。电磁波在由频率和尺寸控制的波导中以特定的模式传播,截止频率表示为

$$(f_c)_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (8)$$

式中: m 和 n 为电磁波模数(对于TE₁₀模式, $m=1$, $n=0$); c (m/s)为光速; a (m)和 b (m)为波导截面尺寸。

阻抗边界条件可以表示为

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/w}} n \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (n\mathbf{E})n = (n\mathbf{E}_s) - \mathbf{E}_s \quad (9)$$

式中: $\mathbf{E}_s$ (V/m)是电场输入源; $\mathbf{H}$ (A/m)是磁场强度; μ_0 (N/A²)是自由空间磁导率。

2) 温度场

试件表面与空气之间的对流热交换会随着温度的升高使样品产生明显的热损失,对流热通量可表示为

$$-k \nabla T = h \cdot (T - T_f) \quad (10)$$

式中: $h=20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 是试件表面的对流传热系数; $T_f=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 是加热腔中空气的温度。

试件底面与加热腔直接接触,与空气之间没有热交换,将边界条件设置为热绝缘,可表示为

$$-n \cdot q = 0 \quad (11)$$

3) 应力场

对于固体力学场,在试件底面设置定向约束,以限制热膨胀引起的试件底面的上下移动,对于试件的其他边界设置为无约束,且没有表面力的施加,其边界条件可表示为

$$w \cdot n_z = 0 \quad (12)$$

式中: $w(\text{mm})$ 表示 z 方向上的位移; n_z 表示 z 方向的方向向量。

1.5 网格质量评估

对模型划分网格并对网格进行质量评估,微波仿真中,模型最大单元网格尺寸要小于波长的 $1/5$,即 24 mm ,腔体最大单元网格尺寸 15 mm ,试件模型最大单元网格尺寸 5 mm 。如图 4(a) 所示,腔体模型划分了 324 666 个单元,平均单元质量为 0.664 1,试件模型单元网格数量为 23 463,平均单元质量为 0.665,划分得到的网格 95% 以上满足质量大于 0.6 的要求。单元网格质量评估(图 4b)结果良好,能够在后续计算和数值分析过程中得到较为准确的模拟结果。

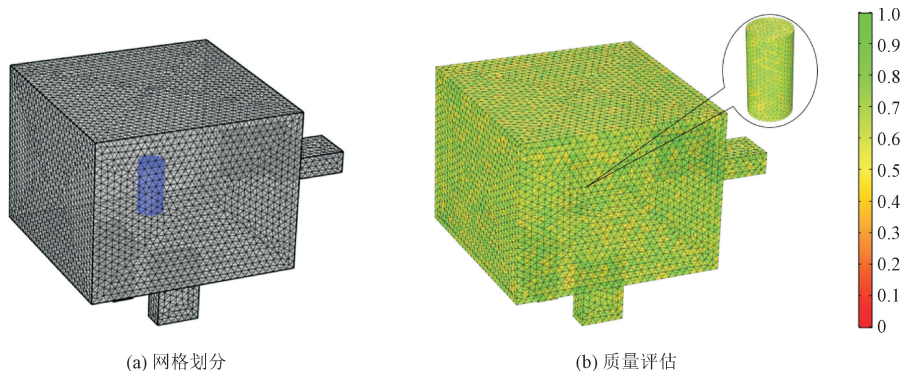


图4 模型网格

Fig. 4 Grid of model

2 结果与讨论

2.1 模型验证

数值分析之前,需要验证模型的准确性。设置 2 kW , 600 s ; 3 kW , 300 s 两个加热路径对试件进行微

波热处理,利用热电偶测量试件表面温度,每种工况进行 3 次试验,试验结果及数值模拟结果对比如图 5 所示。由图 5 可以看出,试验结果与模拟结果规律一致,模拟得到的试件表面温度通常大于微波试验得到的温度,这是由于数值分析进行了复杂条件的理想化假设,减少了微波加热过程中的各种热损失。

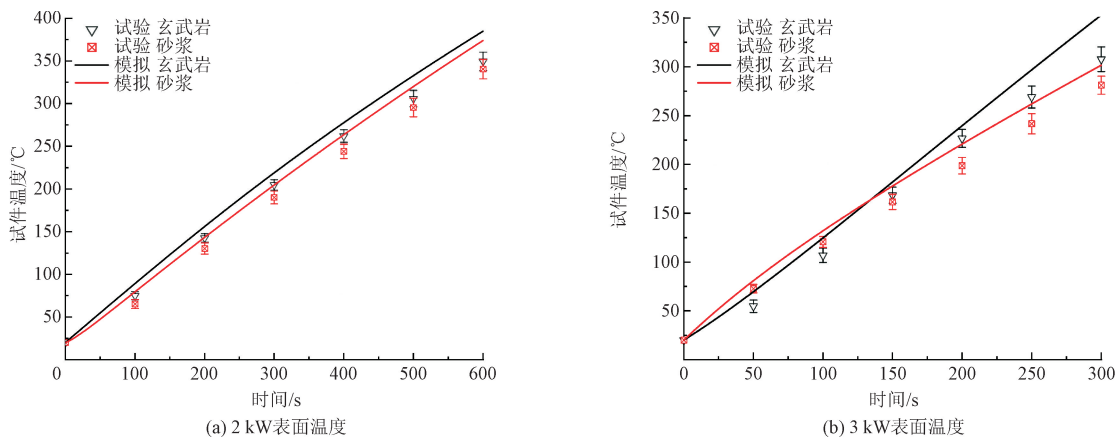


图5 试验与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated results

为了准确验证数值模型,由式(13)计算试验数据与模拟数据之间的均方根误差^[31]。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{si} - T_{mi})^2} \quad (13)$$

式中: T_{si} (℃)代表模拟温度; T_{mi} (℃)代表试验温度。2 kW 功率下砂浆、玄武岩的均方根误差分别为 16.7、20.7℃;3 kW 功率下砂浆、玄武岩的均方根误差分别为 13.1、19.7℃。所有的 R_{MSE} 值均低于参考值 25.2℃^[32],认为仿真模型具有较高的可靠性。

2.2 电场分布

微波加热过程中,电场分布和电场强度的大小都会对加热效果产生很大影响。以 3 kW 功率为例,电磁波在加热腔内不断反射与折射,导致空腔内强电场和弱电场并存(图 6a)。一般情况下,空腔尺寸、金属壁的干涉和波导管的位置都会影响腔内电场的分布和场强大小。当试件放入加热腔时,腔内的电场重新分布,强电场和弱电场位置发生变化,电场强度明显变小(图 6b)。这主要是因为加热腔中试件的存在导致了微波能量的损失,试件自身的介电特性将一部分微波能转化为热能,从而使得加热腔内的电场重新分布。

通过在试件模型内部设置监测线,可以观测到试件内部电场的分布(图 6c),可知电场强度在玄武岩中心以及玄武岩-砂浆界面处出现峰值。由于试件的尺寸较小,电磁波可以穿透试件并在试件内部汇集,导致玄武岩内部电场强度较大,且随着输入功率的增大,电场强度也在增大。试件由二相材料构成,两材料的介电性能存在差异,对于微波能量的吸收能力不同。因此,在同一区域内,电场在不同材料之间发生了明显的衰减现象,两材料的界面处出现较大的电场强度差。普遍认为,试件的升温速率很大程度上取决于电场强度的大小。砂浆-玄武岩界面处及玄武岩中心区域电场强度较大,可能会导致较大的升温速率。

在微波加热系统工作的过程中,磁控管产生的微波频率总是在 (2.45 ± 0.05) GHz 的范围内波动^[33],而微波频率的波动会对电场的分布以及试件的微波吸收效率产生影响。为了研究这一影响,对模型进行频率为 2.40 ~ 2.50 GHz (间隔为 0.02 GHz),功率为 3 kW 的数值计算。

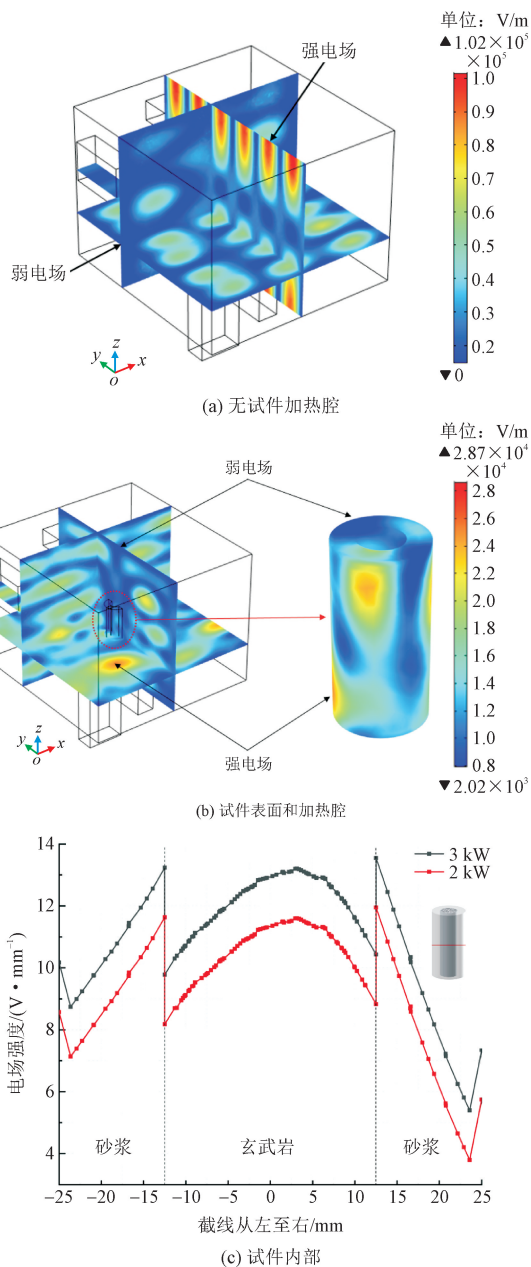


图 6 电场分布

Fig. 6 Electric field distribution

如图 7(a) 所示,试件对微波的吸收率在 2.40 ~ 2.50 GHz 的频率范围内变化显著。能量吸收率在 2.46 GHz 时达到最大值,为 77.96%;在 2.43 GHz 时达到最小值,仅为 30.86%。这主要是因为频率的变化影响了波长,波长又会影响微波能量与穿透深度,导致不同频率下试件内部能量分布各不相同,试件内砂浆与玄武岩的吸波能力又存在区别,最终导致不同频率下试件的能量吸收率存在差别。为了进一步说明频率变化对试件的影响,计算了试件的平均电场强度,以反映试件在微波场中吸收能量的多少。

其规律性与吸收率类似,频率为 2.46 GHz 时,平均电场强度出现最大值,为 15.09 kV/m;2.43 GHz 时,平均电场强度出现最小值 5.44 kV/m。试件的微波吸收率与平均电场强度都说明了微波频率对加热效率的显著影响。

不同频率下试件内部的电场分布如图 7(b) 所示。结果表明,频率为 2.40 GHz 时,强电场区出现在试件中心,随着微波频率的增加,试件中心强电场区出现向外部“迁移”的趋势。当频率达到 2.50 GHz 时,试件内部几乎不存在强电场区,强电

场区主要分布在试件表面。随着强电场区从试件内部向外部的“迁移”,试件表面强电场区在不同频率下的位置和形状呈现多样的分布,如 2.48 GHz 时,强电场区出现在试件表面 X 轴方向的下半区域;2.50 GHz 时,强电场区出现在 Y 轴方向的中间区域。这主要是因为频率的增加导致电磁波的穿透深度变小,电场更多地汇集在试件表面。不同频率下试件电场分布的改变也会导致加热腔内电场强度和分布发生变化。总体而言,频率波动对试件内部电场分布及对微波的吸收效率都有明显的影响。

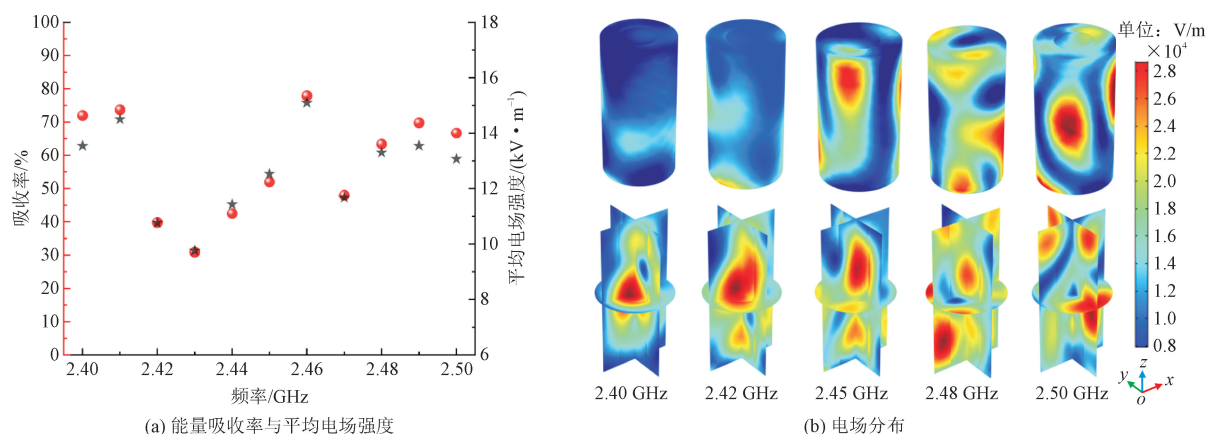


图7 不同频率下试件的电场变化

Fig. 7 The electric field changes of specimens at different frequencies

2.3 温度分布与温度梯度

图 8(a) 为 3 kW 微波功率下不同时间段试件内温度场分布图,图中出现了“冷点”区域和“热点”区域^[31]。微波加热过程中,随着能量的转换,试件中逐渐出现“热点”区域。“热点”区域大多出现在试件内部,这可能与试件内电场强度较大有关。试件内不同区域温度差异很大,“热点”区域和“冷点”区域交界处,常产生较大的温度梯度(图 8b),温度梯度最大值出现在砂浆-玄武岩界面处。随着微波照射时间增大,试件内温度和温度梯度增大,高温区域和高温度梯度区域范围更广。

试件内部沿截线方向的温度分布如图 8(c) 所示,微波照射时间越长,模型内部温度越高,试件模型的中心区域温度达到最大值,该区域至外表面温度逐渐降低。玄武岩区比砂浆区温度高,这是由于玄武岩的介电性能强于砂浆,导致玄武岩的吸波能力比砂浆强,玄武岩吸收了更多的能量,温度高于砂浆。此外,砂浆-玄武岩界面处的温度也高于砂浆区

的温度,这是由于界面处的电场强度大于砂浆区(图 6c),导致界面处材料吸收的能量较大。材料的介电性能和试件内电场强度分布都会对温度分布产生影响。

图 8(d) 为 3 kW 微波功率下不同时间试件内部温度梯度分布图。如图所示,砂浆-玄武岩界面处温度梯度达到峰值。微波照射时长越长,砂浆区温度梯度变化较大,而玄武岩区温度梯度变化较小。微波内部加热特性以及玄武岩模型的均匀性,导致玄武岩在电磁场中吸收能量后温度整体升高,玄武岩内部温度梯度不大。砂浆-玄武岩界面区域的电场强度较大,由于砂浆和玄武岩对微波的敏感程度不同,导致界面处产生了较大的温度梯度。此外,玄武岩与砂浆间的界面过渡区具有更高的孔隙率和石灰比,该区域吸收的能量随含水量的增加而显著增加,水加热也会产生热源,因此,当试件暴露在微波下,界面过渡区相较于其他区域将会更快地加热,产生更大的温度梯度。温度梯度引起的热应力更有助于骨料和砂浆沿界面分离。

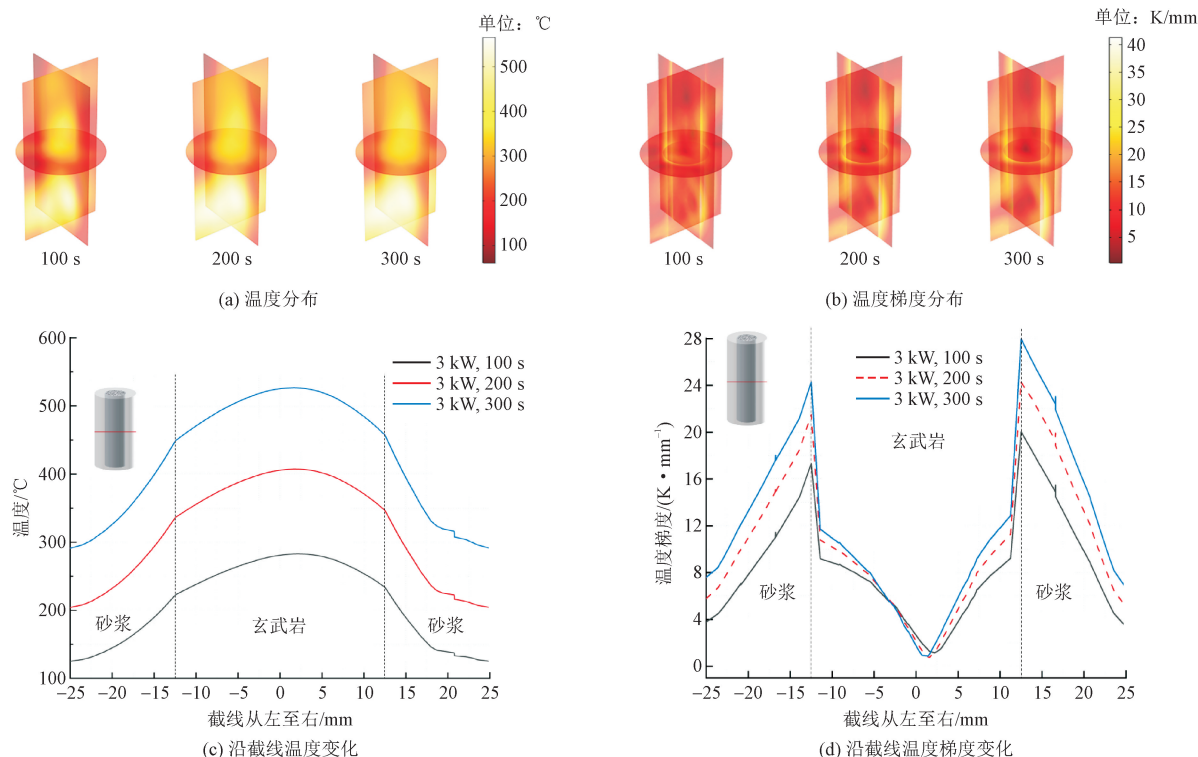


图8 微波照射下试件的热响应

Fig. 8 The thermal response of the specimen under microwave irradiation

2.4 应力与应变分布

温度梯度导致了不均匀的热膨胀,在试件内部产生了热应力,促使试件内部的不同材料之间产生裂缝。试件模型切面第一主应力随时间的演化如图9(a)所示,拉应力出现在砂浆与玄武岩界面区域以及玄武岩的外部区域,而压应力则出现在玄武岩内部区域。随着照射时间的增加,受拉区从界面处开始,逐渐延伸到砂浆区的全部区域,受压区域没有明显的增长。

为了进一步分析试件内部的应力分布,在试件模型中设置三维截线,沿截线应力变化如图9(b)所示,砂浆-玄武岩界面存在拉应力最大值,压应力最大值出现在玄武岩内部。

微波加热过程中,玄武岩、砂浆的热膨胀系数不同导致两者以不同的速率膨胀,砂浆的热膨胀系数高于玄武岩,温度相同时,砂浆产生更大的线应变,界面处出现拉应力。随着加热时间的增大,界面处的拉应力越来越大,当拉应力超过界面强度极限时,玄武岩与砂浆发生分离。此外,玄武岩内部出现了压应力,结合图8(c),出现压应力的区域与高温区域一致,这是因为玄武岩内部温度高,由此产生的线应变更大,砂浆及玄武岩边缘较小的热变形限制了

玄武岩内部的热膨胀,玄武岩内部($r=\pm 6.25$ mm)出现压应力,由于砂浆和玄武岩边缘温度较低,拉应力将在这些位置发挥主导作用。这与XIAO等^[34]利用混凝土随机骨料模型得到的骨料应力分布规律相同。

通过试验测得玄武岩和砂浆的抗拉强度分别为7.4、4.65 MPa,将7.4、4.65 MPa分别作为玄武岩和砂浆的极限抗拉强度,标注在图9(b)中。当 $P=3$ kW, $t=100$ s的工况下,微波照射产生的拉应力低于砂浆的极限抗拉强度,砂浆体不会发生受拉破坏。随着微波照射时长的增大,砂浆内部有越来越多的区域超过砂浆的极限抗拉强度,界面处最先达到砂浆的极限抗拉强度,该位置最先发生破坏,破坏范围从界面处开始向试件外表面不断延伸。宏观表现为裂纹从内部向外部不断发展。随着照射时间的增加,玄武岩受到的拉应力也逐渐增大,当拉应力达到其极限抗拉强度时,玄武岩发生受拉破坏。因此,对于微波破碎混凝土回收骨料,需要选择合适的照射时间,照射时间过短可能起不到分离的效果,而照射时间过长可能会导致骨料损伤。大量的研究也表明,微波辅助回收再生骨料存在能量阈值,超过该阈值只会增加破碎后混凝土碎片的数量,对于再生骨料的回收没有影响^[35]。

试件模型沿截线第一主应变如图9(c)所示,玄武岩区出现较大应变。由式(5)可知,应变主要与应力和温度有关,玄武岩内部出现的应变,主要是由

于玄武岩温度较高(图8a),高温引起了较大的应变;砂浆-玄武岩界面应变则是高应力和温度共同作用的结果。

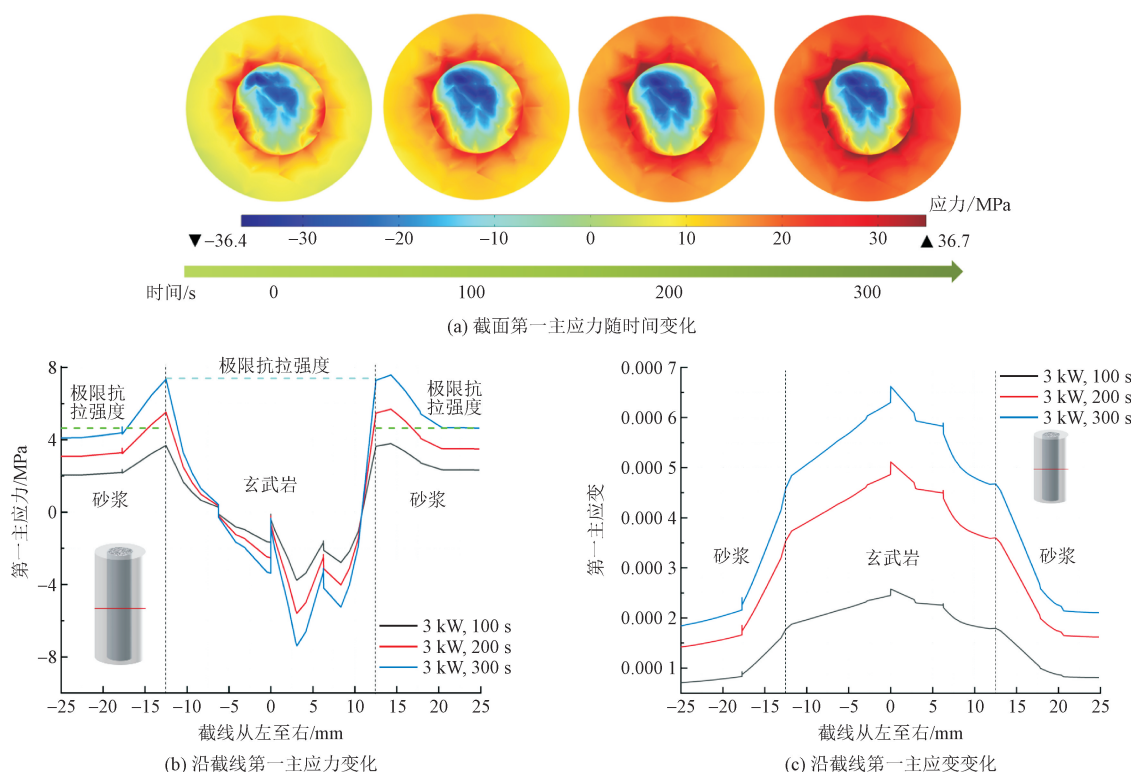


图9 微波照射下试件的力响应

Fig. 9 Force response of the specimen under microwave irradiation

2.5 多场耦合与分离机理的讨论

微波加热系统中不同位置的磁通管产生微波后,微波经波导传递到谐振腔内部,谐振腔内部是金属组成的密闭结构,微波会在谐振腔内反复反射形成电磁场。由于试件的尺寸小于电磁波的穿透深度,电磁波穿透试件并在试件内发生汇集,导致试件内电场强度较大。砂浆-玄武岩试件作为一种电解质,在电场中发生介电损耗,一部分微波能转换为热能,加热腔内电场重新分布,试件温度上升。由于砂浆和玄武岩的介电常数不同,导致两者对微波的吸收能力不同,吸波性能的差异导致砂浆-玄武岩界面处电场衰减显著,最终导致砂浆-玄武岩界面处的温度梯度出现最大值。

试件温度发生变化时,材料和温度的差异会产生线应变,线应变可以用式(4)表示,砂浆和玄武岩界面处,由于两者的热膨胀系数不同,砂浆的线应变比玄武岩大,界面产生拉应力。由于玄武岩内部温度相较于外部高,内部比外部出现更大的线应变,砂

浆及玄武岩边缘区域的小变形使得玄武岩内部区域受压。

根据试验与模拟结果,探究砂浆-骨料分离的机理。试验结果如图10所示,未经微波处理的试件表面未出现裂纹;在3 kW的功率下加热100 s,试件表面颜色略有变化,出现横向裂纹,表面最高温度为107 ℃;加热时间为200 s时,试件纵向出现明显裂纹,并与横向裂纹出现贯通的趋势,结合模拟结果,砂浆区开始进入极限抗拉强度,宏观表现为裂纹的延伸,试件表面颜色进一步加深,气孔增多;加热时间为300 s时,裂纹扩展至整个试件,结合模拟结果,试件最大主应力达到7.4 MPa,接近玄武岩的抗拉强度,该时间为砂浆-玄武岩分离的最佳照射时间,既可以去除砂浆,又可以保证内部的玄武岩不发生破坏;加热时间为400 s时,试件发生受拉破坏,黏附在玄武岩上的砂浆发生脱落,砂浆和玄武岩在界面处完全分离,由于加热的时间较长,玄武岩也发生了受拉破坏。此时,试件内砂浆和玄武岩的应力均达到极限,高应力导致了试件的破坏。



图 10 3 kW 功率下试件的力学性能演变

Fig. 10 Evolution of mechanical properties of specimens at 3 kW power

3 结 论

本研究依据多物理场耦合原理,建立了砂浆-骨料三维数值模型并用试验温度数据对模型进行了验证,研究了微波照射下砂浆-玄武岩试件电磁场、温度场与应力场分布,得到以下主要结论。

1) 空腔内高电场与低电场并存,试件的放入导致电场重新分布,加热腔内电场强度变小。试件内砂浆-玄武岩界面处和玄武岩内部电场强度较大。

2) 频率波动会对试件的微波吸收率产生影响,微波吸收率在 2.46 GHz 时出现最大值,2.43 GHz 时出现最小值。随着微波频率的增加,强电场区出现“迁移”趋势,不同频率的强电场区呈现多样分布。

3) 温度梯度出现在“热点”和“冷点”交界处,温度梯度最大值出现在砂浆-玄武岩界面处,玄武岩区温度高于砂浆区温度。照射时间增加,砂浆区温度梯度变化较大,玄武岩区温度梯度变化较小。

4) 砂浆区整体受拉,玄武岩区内部受压、外部受拉,界面处出现拉应力最大值。随着照射试件的增加,界面处最先达到砂浆的极限抗拉强度,破坏范围从界面处开始向试件外表面不断延伸。

5) 3 kW 功率下,300 s 为砂浆-骨料分离的最佳照射时间,既可以保证外部砂浆的去除,又可以保证内部的骨料不发生破坏。

参考文献:

- [1] 肖建庄, 马旭伟, 刘琼, 等. 全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2):1-15.
XIAO Jianzhuang, MA Xuwei, LIU Qiong, et al. Evolvement and research progress of concept for full recycled concrete[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38(2):1-15(in Chinese).
- [2] DIMITRIOU G, SAVVA P, PETROU M F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and building materials, 2018, 158:228-235.
- [3] KIM Y, HANIF A, USMAN M, et al. Slag waste incorporation in high early strength concrete as cement replacement; environmental impact and influence on hydration & durability attributes[J]. Journal of cleaner production, 2018, 172:3056-3065.
- [4] GRABIEC A M, KLAMA J, ZAWAL D, et al. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition[J]. Construction and building materials, 2012, 34:145-150.
- [5] LAW M C, LIEW E L, CHANG S L, et al. Modelling microwave heating of discrete samples of oil palm kernels[J]. Applied thermal engineering, 2016, 98:702-726.
- [6] LIU H L, E J Q, DENG Y W, et al. Experimental study on pyrolysis characteristics of the tobacco stem based on microwave heating method[J]. Applied thermal engineering, 2016, 106:473-479.
- [7] 高经纬, 程绍桐, 范立峰. 加热方式对花岗岩力学性能影响的试验研究[J]. 应用力学学报, 2024, 41(3):567-574.
GAO Jingwei, CHENG Shaotong, FAN Lifeng. Effects of heating methods on the mechanical properties of granite[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(3):567-574(in Chinese).
- [8] 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.
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(in Chinese).
- [9] TEIMOORI K, COOPER R. Multiphysics study of microwave irradiation effects on rock breakage system[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2021, 140:104586.
- [10] CHOI H, LIM M, CHOI H, et al. Using microwave heating to completely recycle concrete[J]. Journal of environmental protection, 2014, 5(7):583-596.
- [11] 魏玮, 张宏亮, 邵珠山, 等. 微波和传统加热下混凝土劈裂抗拉性能分析[J]. 工程力学, 2024, 41(5):134-145.
WEI Wei, ZHANG Hongliang, SHAO Zhushan, et al. Analysis of splitting tensile properties of concrete under microwave and conventional heating conditions[J]. Engineering mechanics, 2024, 41(5):134-145(in Chinese).
- [12] WEI W, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Workability and mechanical properties of microwave heating for recovering high quality aggregate from concrete[J]. Construction and building materials, 2021, 276:122237.
- [13] CHEN W W, SHAO Z S, WEI W. Experimental study of the heating potential of mortar-aggregate under microwave irradiation[J]. Journal of materials in civil engineering, 2021, 33(7):04021153.
- [14] EVERAERT M, STEIN R, MICHAUX S, et al. Microwave radiation as a pre-treatment for standard and innovative fragmentation techniques in concrete recycling[J]. Materials, 2019, 12(3):488.
- [15] LIPPIATT N, BOURGEOIS F. Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing[J]. Minerals engineering, 2012, 31:71-81.
- [16] HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes—

- a brief review[J]. International journal of mineral processing, 1999, 57(1):1-24.
- [17] 张鹏举. 微波照射下不同湿度混凝土热力响应研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.
- [18] LIANG C G, GUO Z S, YUE X, et al. Microwave-assisted breakage of basalt: a viewpoint on analyzing the thermal and mechanical behavior of rock[J]. Energy, 2023, 273:127225.
- [19] 周航, 邵珠山, 乔汝佳, 等. 工业微波照射下混凝土砂浆-骨料界面力学性能与多场效应数值分析[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(1):30-38.
- ZHOU Hang, SHAO Zhushan, QIAO Rujia, et al. Numerical analysis on mechanical properties and multi-field effects of concrete mortar-aggregate interface under industrial microwave irradiation[J]. Journal of materials science and engineering, 2023, 41(1):30-38(in Chinese).
- [20] 李勇. 微波场中混凝土劣化机理研究[D]. 西安:西安科技大学, 2017.
- [21] AKBARNEZHAD A, ONG K C G, ZHANG M H, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J]. Construction and building materials, 2011, 25(8):3469-3479.
- [22] PITTS M. Thermal properties of the Cobourg limestone[D]. Kingston:Queen's University, 2017.
- [23] MOUNANGA P, KHELIDJ A, BASTIAN G. Experimental study and modelling approaches for the thermal conductivity evolution of hydrating cement paste[J]. Advances in cement research, 2004, 16(3):95-103.
- [24] TANG B N, ZHU C Q, XU M, et al. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Energy exploration & exploitation, 2019, 37(2):691-720.
- [25] HASSANI F, NEKOOGAGHT 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.
- [26] ZEIML M, LACKNER R, PESAVENTO F, et al. Thermo-hydro-chemical couplings considered in safety assessment of shallow tunnels subjected to fire load[J]. Fire safety journal, 2008, 43(2):83-95.
- [27] ZHU J Y, YI L P, YANG Z Z, et al. Three-dimensional numerical simulation on the thermal response of oil shale subjected to microwave heating[J]. Chemical engineering journal, 2021, 407:127197.
- [28] FIA A Z, AMORIM J. Heating of biomass in microwave household oven— a numerical study[J]. Energy, 2021, 218:119472.
- [29] MOHD MOKHTA Z, ONG M Y, SALMAN B, et al. Simulation studies on microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production with special attention on waveguide number and location[J]. Energy, 2020, 190:116474.
- [30] HUANG J X, XU G, HU G Z, et al. A coupled electromagnetic irradiation, heat and mass transfer model for microwave heating and its numerical simulation on coal[J]. Fuel processing technology, 2018, 177:237-245.
- [31] HONG Y D, LIN B Q, LI H, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters[J]. Applied thermal engineering, 2016, 93:1145-1154.
- [32] CHEN F Y, WARNING A D, DATTA A K, et al. Susceptors in microwave cavity heating: modeling and experimentation with a frozen pie[J]. Journal of food engineering, 2017, 195:191-205.
- [33] PITCHAI K, CHEN J J, BIRLA S, et al. Modeling microwave heating of frozen mashed potato in a domestic oven incorporating electromagnetic frequency spectrum[J]. Journal of food engineering, 2016, 173:124-131.
- [34] XIAO Y H, SHAO Z S, WEI W, et al. Study on mechanism of strength weakening of concrete subjected to microwaves in microwave-assisted concrete recycling[J]. International journal of heat and mass transfer, 2023, 213:124353.
- [35] BRU K, TOUZÉ S, BOURGEOIS F, et al. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste[J]. International journal of mineral processing, 2014, 126:90-98.

(编辑 李坤璐)