XXXX

微波加热储热装置电热特性模拟及性能优化研究

王一诺，徐桂芝，胡 晓，常 亮，郭志远，张宏杰，邓佳瑶，陈盼盼，吴晓康
（中国电力科学研究院有限公司，北京 100191）

摘 要：微波加热储热技术与传统电阻加热储热技术相比具有响应速度快、传热损失少等诸多优点，可快速支撑电网调节，是更加适配未来能源发展需求的新型电加热储热技术。然而，目前该技术仍处于发展初期，其装置设计时存在各项参数对储热材料的加热效果影响规律不清、加热效率及加热均匀性有待提升等突出问题。为优化微波加热储热装置性能，本文耦合电磁场与传热场构建频域-瞬态双向耦合的微波加热储热装置电热转换仿真模型，系统研究磁控管数量与布置位置、储热砖排布方式、保温材料及相变潜热等因素对储热材料温度分布、升温速率、加热均匀性及能量转换效率的影响，并且依托仿真结果，研制出6 kW级微波加热储热装置样机。仿真结果表明：在总输入能量一致条件下，增加磁控管数量可显著提升升温速率与加热均匀性，四磁控管工况升温速率可达78.88 K/min，最大温差为418.95 K；磁控管两侧布置的加热效率与温升速率优于下端+右端布置形式，但下端+右端布置加热均匀性更优,最大温差下降至372.62 K；储热砖侧放排布与叠放排布相比可优化温度均匀性，最大温差降低了36.10 K；增设保温材料会分流微波能量，加热速率降低一半以上，但可改善温度均匀性；储热材料采用具有相变潜热的相变材料时加热曲线出现温度平台，能量转换效率有效提升，达到90.68 %。本研究可为微波加热储热装置的结构设计及性能优化提升提供理论依据与实物支撑，促进微波加热储热技术在新型电力系统中的推广应用。

关键词：微波加热；储热装置；多物理场仿真；温度均匀性；能量转换效率
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0760
中图分类号：TK 114　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-13

Electrothermal Characteristic Simulation and Performance Optimization of Microwave Heating Thermal Storage Device

WANG Yinuo, XU Guizhi, HU Xiao, CHANG Liang, GUO Zhiyuan, ZHANG Hongjie, DENG Jiayao, CHEN Panpan, WU Xiaokang
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100191, Beijing, China)

Abstract: Compared with traditional resistance heating thermal storage technology, microwave heating thermal storage technology has the advantages of fast response and low heat loss, which can rapidly support power grid regulation and serves as a novel electric heating thermal storage method suitable for future energy development. Nevertheless, this technology is still in the initial development stage, and there are prominent problems in device design, such as unclear influence laws of structural and operational parameters on the heating performance of thermal storage materials, as well as insufficient heating efficiency and temperature uniformity. To optimize the comprehensive performance of microwave

收稿日期：2026-09-01；修改稿日期：2026-10-23。
基金项目：国家电网有限公司总部管理科技技术项目（5500-202455375A-3-2-HW）资助。
第一作者：王一诺（1997—），女，硕士研究生，助理工程师，从事储热技术相关研究，E-mail：18810579972@163.com
引用本文：王一诺, 徐桂芝, 胡晓, 等. 微波加热储热装置电热特性模拟及性能优化研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation：WANG Yinuo, XU Guizhi, HU Xiao, et al. Electrothermal Characteristic Simulation and Performance Optimization of Microwave Heating Thermal Storage Device[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

heating thermal storage devices, a frequency-domain-transient bidirectional coupled electrothermal conversion simulation model is established by coupling electromagnetic and heat transfer fields. The effects of the number and layout of magnetrons, thermal storage brick arrangement, thermal insulation materials, and phase change latent heat on the temperature distribution, heating rate, heating uniformity, and energy conversion efficiency of thermal storage materials are systematically investigated. Based on the simulation results, a 6 kW microwave heating thermal storage device prototype is developed. The simulation results show that increasing the number of magnetrons can significantly improve the heating rate and temperature uniformity under the condition of consistent total input energy. For the four-magnetron case, the heating rate reaches 78.88 K/min with a maximum temperature difference of 418.95 K. The bilateral layout of magnetrons presents higher heating efficiency and faster temperature rise than the bottom-right layout, while the latter achieves better temperature uniformity with the maximum temperature difference reduced to 372.62 K. The side placement of thermal storage bricks can optimize temperature uniformity compared with the stacked arrangement, cutting the maximum temperature difference by 36.10 K. The addition of thermal insulation materials shunts microwave energy and reduces heating efficiency by more than half, but effectively improves the uniformity of temperature distribution. A distinct temperature plateau appears on the heating curve when phase change materials with latent heat are adopted, which effectively improves the system energy conversion efficiency to 90.68 %. This study provides reliable theoretical basis and physical support for the structural design and performance optimization of microwave heating thermal storage devices, and promotes the popularization and application of microwave heating thermal storage technology in new power systems.

Keywords: microwave heating; thermal storage device; multi-physics simulation; temperature uniformity; energy conversion efficiency

在全球“双碳”目标深入推进的背景下，风电、光伏等新能源大规模并网已成为能源转型的核心趋势，而新能源发电固有的随机性、波动性与间歇性，导致电网供需平衡难度持续加大，电价波动愈发频繁且幅度显著提升，亟需灵活高效的储能技术平抑新能源出力波动、稳定电网运行。电加热储热技术可将富余电能转化为热能储存，在用电高峰按需释热，是适配新型电力系统调峰需求、消纳新能源的核心技术之一。然而，常规电阻加热储热技术因响应速度慢、调节灵活性不足，难以平抑短时、高频的电价尖峰与低谷，亟需研发高效、快响应的新型电加热储热技术[1, 2]，弥补传统储热装置的技术短板，破解这一适配难题。

微波加热储热技术通过微波能量使物体内部极性分子振荡摩擦实现由内而外加热[3, 4]，被广泛应用于食品[5, 6]、化工[7]、冶金[8, 9]等领域。区别于传统电阻式加热，其核心优势可精准适配新能源占比提升、电价波动加快的现状。与传统电加热相比，它响应快[10]、效率高，无需预热，能快速捕捉电价波动，低谷时吸收新能源富余电力储热，高峰时释热平抑价差；且传热损失少、加热更均匀，还可选择性调节加热参数，提升调节精准度。这些优势使其能快速响应电网需求、适配强波动的现货市场，成为应对新能源波动与电价变化的新型电制热储热技术，为电网稳定运行提供可靠支撑。

然而，目前微波加热储热技术仍处于发展初期，研究多集中于储热材料吸波性能的优化[11-18]，对于微波加热储热装置的设计缺乏系统性研究。微波加热过程涉及电磁场、温度场的双向动态耦合[19]，同时受设备结构、布置形式、材料物性等多重因素影响[20-25]，物理机制复杂，有必要建立能够直接解析储热材料温度分布的电磁热耦合模型，系

统研究不同因素对加热效果的影响规律，优化装置加热效率及温度均匀性，为微波加热储热装置的设计奠定理论基础。

本研究依托COMSOL仿真平台，搭建微波加热储热装置电磁场-温度场双向耦合电热转换仿真模型，系统探究磁控管参数、材料排布、保温结构及相变潜热对微波加热储热效果的影响规律，明确各因素的作用规律与最优设计，研制出6 kW级微波加热储热装置样机，为微波储热装置的结构优化与工程应用提供仿真模拟与实物支撑。

1 仿真模型的构建

微波加热储热材料的传热过程是典型的电磁场-温度场双向强耦合、三维非稳态多物理场演化过程，其核心物理机制为：交变微波电磁场在储热介质内部激发电磁损耗，将电磁能不可逆转化为热能形成内热源，驱动材料瞬态升温；同时，储热材料的介电特性、导热特性等物性参数随温度动态变化，反向调控腔体电磁场空间分布，形成两场实时耦合迭代效应。本文依托COMSOL Multiphysics有限元仿真平台，基于麦克斯韦电磁方程组与傅里叶热传导方程组联立求解，采用频域电磁场+瞬态温度场的分离耦合求解策略，精准匹配两场跨尺度时间差异特征，构建高精度电磁-热全耦合仿真模型。

1.1 模型基本假设

为在保证仿真精度的前提下简化复杂非线性计算，结合微波加热腔体工作特性与储热砖材料属性，对仿真模型进行合理简化假设：（1）储热砖为均质各向同性介质，几何结构对称，忽略材料内部微观孔隙不均带来的物性差异；（2）本次仿真重点探究宏观传热与场分布规律，忽略加热过程中材料微量传质、化学反应与结构形变；（3）储热材料表面与腔体空气发生自然对流换热，换热系数恒定；（4）微波腔体金属壁与波导为理想反射边界，无微波泄露与能量吸收，微波损耗仅存在于储热介质与保温材料内部；（5）初始状态下储热砖、保温材料与腔体空气温度均匀一致，全域初始温度统一为293.15 K；（6）忽略温度小幅变化对材料基础物性参数的微弱影响，核心物性参数在单步迭代计算中保持稳定。

1.2 电磁场控制方程

微波在腔体与介质中的传播、干涉、叠加及损耗特性由麦克斯韦方程组精准描述，涵盖电场、磁场的激发、传导与耦合规律，其微分形式为微波电磁场数值求解的核心控制方程[26]：

$$\nabla \cdot D = \rho_f \tag{1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{4}$$

式中：D为电位移矢量，C/m²；B为磁感应强度，Wb/m²；E为电场强度，V/m；H为磁场强度，A/m；J_f为传导电流密度，A/m²；ρ_f为自由电荷密度，C/m³；t为时间，s。

结合2450 MHz高频微波工作特性与储热材料无磁性特征，对电磁场方程进行简化推导，得到频域求解下的波动方程：

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2\left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)E = 0 \tag{5}$$

$$k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = \frac{\omega}{c} \tag{6}$$

式中：μ_r为相对磁导率；k_0为自由空间波数；ε_r为相对介电常数；σ为介质电导率，S/m；ω为微波角频率，rad/s；ε_0为真空介电常数，F/m；μ_0为真空磁导率，H/m；c为真空中光速，取值3.0×10^8 m/s。

储热材料的介电性能采用相对介电常数表征，是决定微波吸收与能量转化效率的核心参数：

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{7}$$

式中：ε'为介电常数，表征介质储存电磁能的能力；ε''为损耗因子，表征介质消耗电磁能、转化为热能的能力；j为虚数单位。

微波加热的本质是介质电磁损耗生热，总热源由电阻损耗与磁损耗组成，由于储热砖、保温材料均为非磁性介质，磁损耗可忽略不计，总生热功率仅由介电损耗主导，热源计算公式为：

$$Q = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon''E^2 \tag{8}$$

式中：Q为电磁损耗体积热源密度，W/m³；f为微波工作频率，Hz。该公式直观表明，介质生热速率与电场强度平方、损耗因子呈正相关，解释了腔体电场分布不均导致材料局部温差的核心机理。

1.3 瞬态传热控制方程

微波作用下储热材料的升温过程为三维非稳态导热过程，以电磁损耗热源为内热源，结合傅里叶热传导定律，建立瞬态传热控制方程：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{9}$$

式中：ρ为储热材料密度，kg/m³；C_p为恒压比热容，J/(kg·K)；T为材料瞬时温度，K；t为加热时间，s；k为材料导热系数，W/(m·K)；Q为电磁损耗内热源密度，W/m³，实现电磁场与温度场的参数耦合。

1.4 跨尺度耦合求解机制

本次仿真微波频率为2450 MHz，电磁场振荡周期仅约1 ns；而固体传热、储热升温过程时间尺度为秒级，两场存在多个数量级的时间尺度差异。为兼顾计算精度与仿真效率，本文采用频域电磁场−瞬态温度场双向耦合求解策略：对高频振荡的电磁场进行频域稳态求解，获取瞬时稳定的电场分布与损耗热源；将热源结果导入瞬态传热模块，求解秒级温度演化；同时根据温度迭代结果实时更新材料介电、导热物性参数，反向修正电磁场分布，实现两场动态双向耦合迭代计算，精准还原真实微波加热物理过程。

该跨尺度耦合求解方式有效解决了高频电磁场与慢速传热过程的计算适配难题，相较于单一稳态或瞬态求解方式，可大幅提升非均匀电场下储热材料温度演化的仿真精度，为后续多参数加热效果对比、温度均匀性及能量效率分析提供可靠的理论模型支撑。

1.5 几何模型与参数设置

在comsol有限元仿真软件中建立全域三维几何模型，以1个磁控管加热1块储热砖的基础模型为例，如图1(a)所示，模型主要包含微波谐振腔体、磁控管波导及馈入口、储热砖，可刻画现微波馈入、场干涉叠加、介质生热与固体传热的全过程物理特征，为多物理场耦合计算提供精准几何载体。磁控管波导及馈入口、储热砖、保温材料可根据仿真的实际需要进行不同建模。模型参数如表1所示，模型构建中用到的材料热电性能参数如表2所示。

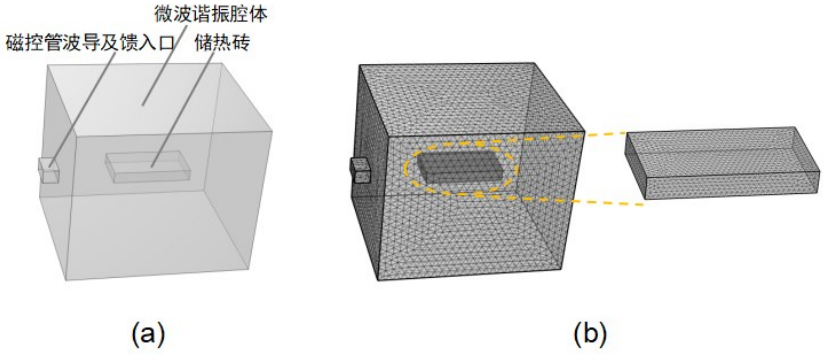


图1 微波加热储热装置：(a) 仿真模型 (b) 网格划分（以1个磁控管加热1块储热砖的基础模型为例）

Fig. 1 Microwave-heated thermal energy storage device: (a) simulation model (b) mesh generation (taking the basic model of one magnetron heating one thermal storage brick as an example)

表1 几何模型全局参数

Tab.1 Overall parameters of geometric model

参数名称	取值	参数名称	取值
微波谐振腔长度	600 mm	储热砖宽度	130 mm
微波谐振腔宽度	500 mm	储热砖高度	35 mm
微波谐振腔高度	500 mm	保温材料厚度（如有）	150 mm
波导长度	50 mm	微波频率	2450 MHz
波导宽度	86 mm	单台磁控管功率	1.2 kW
波导高度	43 mm	环境初始温度	293.15 K (20℃)
储热砖长度	250 mm		

1.6 网格划分

网格划分是有限元仿真数值计算的核心环节，网格质量与尺寸直接决定仿真精度与计算收敛性。针对2.45 GHz高频微波电磁场仿真特性，本文采用电磁场适配网格划分准则，依据自由空间波长与介质介电特性精准计算储热介质最优网格尺寸，有效规避网格过粗导致的场分布失真、网格过密造成的算力冗余问题，储热介质网格尺寸计算公式如下：

$$d = \frac{\lambda}{5\sqrt{\varepsilon'}} \tag{10}$$

式中：d为储热介质区域最大网格尺寸，mm；λ为2.45 GHz微波对应的自由空间波长，mm；ε'为储热材料等效介电常数实部。该公式可适配高频

表2 材料热电性能参数

Tab.2 Thermoelectric property parameters of materials

参数名称	取值	参数名称	取值
储热砖相对介电常数	10−j	相变储热砖相变潜热	120 kJ/kg
储热砖相对磁导率	1	保温材料相对介电常数	1.5−0.003j
储热砖电导率	0 S/m	保温材料相对磁导率	1
储热砖导热系数	2 W/(m·K)	保温材料电导率	0 S/m
储热砖密度	1670 kg/m³	保温材料导热系数	0.07 W/(m·K)
储热砖恒压热容	1600 J/(kg·K)	保温材料密度	830 kg/m³
相变储热砖相变温度	400 K	保温材料恒压热容	1000 J/(kg·K)

电磁场仿真需求，保证每个电磁波周期内包含充足计算单元，精准捕捉微波干涉、驻波效应与局部电场集中现象。

为兼顾计算精度与仿真效率，本文采用分区差异化网格加密策略，如图1(b)：（1）储热砖为核心加热区域，电磁场与温度场梯度变化剧烈，对其进行精细化网格加密，最小网格尺寸遵循上述电磁波适配公式；（2）微波腔体空气域结构场变化平缓，采用稀疏网格划分，大幅降低整体计算量。（3）如增加保温结构，保温材料区域采用中等密度网格。

本研究所采用的网格划分方案经过了网格独立性验证，继续加密网格对计算结果的影响极小，数值结果已基本脱离网格尺度的制约。

1.7 仿真变量设计及性能评价指标

为优化微波加热储热装置设计参数，系统探究各关键因素对微波加热储热效果的影响，设置多组对照进行仿真，具体变量包括：磁控管数量、磁控管布置位置、储热砖排布方式、保温结构、相变潜热，通过多组工况对比，分析各变量对升温速率、温度均匀性、能量转换效率的影响规律。

能量转换效率是评价微波加热效果的重要指标。微波−热能转换效率η是微波源输入的电磁功率转化为热能的比例，微波−储热砖热能转换效率η_1是微波源输入的电磁功率转化为储热砖中热能的比例。在不含保温材料的模型中，仅有储热砖吸收电磁波并转化为热能存储，因此微波−热能转换效率η与微波−储热砖热能转换效率η_1相等。

$$\eta = \eta_1 = \frac{Q_1}{P \cdot \mathrm{t}} = \frac{\mathrm{c}_1 \cdot m_1 \cdot \Delta T_1 + m_1 \cdot \Delta H_1}{P \cdot t} \tag{11}$$

式中：Q_1为储热砖吸收的热量，J；P为微波输入功率，W；t为加热时间，s；c_1为储热砖比热容，J/(kg·K)；m_1为储热砖质量，kg；$\triangle T_1$为储热砖温升，K；$\triangle H_1$为储热砖相变潜热，kJ/kg，若储热砖为显热储热材料则$\triangle H_1$为0。

在增加保温材料的模型中，微波-热能转换效率η为微波源输入电磁功率转化为储热砖中和保温材料中的热能的比例之和（η_1+η_2）。

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{P \cdot \mathrm{t}} = \frac{(\mathrm{c}_1 \cdot m_1 \cdot \Delta T_1 + m_1 \cdot \Delta H_1) + \mathrm{c}_2 \cdot m_2 \cdot \Delta T_2}{P \cdot t} \tag{12}$$

式中：η_2为微波−保温材料热能转换效率；Q_2为保温材料吸收的热量，J；c_2为保温材料比热容，J/(kg·K)；m_2为保温材料质量，kg；$\triangle T_2$为保温材料温升，K。

2 仿真结果与分析

2.1 磁控管参数对加热性能的影响

磁控管作为微波发生核心部件，其数量与布置位置直接决定加热腔内部电场分布，是影响储热材料加热效果的核心因素。

2.1.1 磁控管数量的影响

为了研究磁控管数量的影响，分别开展1个、2个、4个磁控管（每个磁控管对应1个波导及1个微波馈入口）工况仿真。固定单台磁控管输入功率为1.2 kW，为了使仿真总输入微波能量一致，1个、2个、4个磁控管加热时间分别设置为600 s、300 s、150 s。不同磁控管数量的仿真结果表明，磁控管数量对升温速率、温度均匀性及能量利用率影响显著，对应仿真结果总结在表3中。单磁控管工况（1.2 kW、600 s）下，储热砖升温速率最慢，最大温差达537.15 K，温度分布极不均匀，靠近馈入口一侧局部电场集中、局部过热严重，能量转换效率仅73.97 %，加热效果最差[图2(a)~(c)]。双磁控管工况（2.4 kW、300 s）下，升温速率变快，腔体电场均匀性大幅改善，最大温差降至449.50

K，能量转换效率提升至90.67%[图2(d)~(f)]。四磁控管工况（4.8 kW、150 s）升温速率最快，达到78.88 K/min；电场分布也最为均匀，最大温差为418.95 K，但转换效率回落至83.26%[图2(g)~(i)]。整体规律表明，总输入能量一致时，磁控管数量越多，升温速率越快、温度场均匀性越好。

表3 不同磁控管数量加热效果对比表

Tab. 3 Comparison of heating performance under different magnetron quantities

工况	最高温度(K)	最低温度(K)	最大温差(K)	平均温度(K)	升温速率(K/min)	微波-热能转换效率(%)
1个磁控管（1.2 kW，600 s）	887.00	349.85	537.15	468.33	17.52	73.97
2个磁控管（2.4 kW，300 s）	831.93	382.43	449.50	507.92	42.95	90.67
4个磁控管（4.8 kW，150 s）	767.10	348.15	418.95	490.35	78.88	83.26

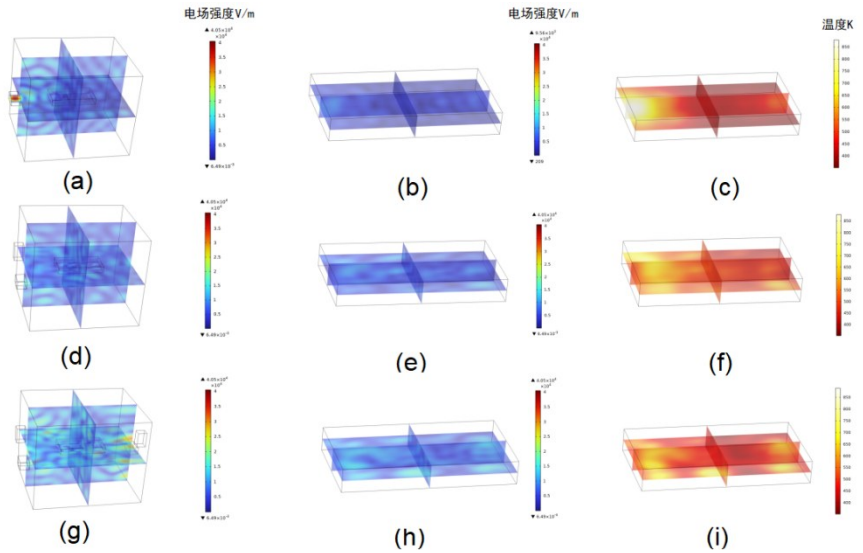


图2 磁控管数量的影响：(a)~(c)1个磁控管，1.2kW，加热600s后电场分布及储热砖温度分布 (d)~(f)2个磁控管，2.4kW，加热300s后电场分布及储热砖温度分布 (g)~(i)4个磁控管，4.8kW，加热150s后电场分布及储热砖温度分布

Fig. 2 Effects of magnetron quantity: (a)~(c) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 600 s heating with one magnetron at 1.2 kW (d)~(f) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 300 s heating with two magnetrons at 2.4 kW (g)~(i) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 150 s heating with four magnetrons at 4.8 kW

2.1.1 磁控管布置位置的影响

为了研究磁控管位置的影响，基于4个磁控管、4.8 kW、加热150 s统一工况，对比4个磁控管位于两侧、4个磁控管位于下端和右端两种布置形式的加热效果，其中两侧磁控管布置采用非对称的“L型”布置，这种布置方式的优点在于磁控管间不会互相干扰，对应仿真结果总结在表4中。结果显示，磁控管两侧布置形式下，储热砖升温速率达78.88 K/min，能量转换效率83.26%，整体温升效果优异[图3(a)~(c)]；下端+右端布置形式，整体升温速率和能量转换效率有所下降，但从最大温差来看，下端+右端布置工况虽然会导致腔体左上方电场强度偏弱，但整体最大温差更小，温度均匀性小幅优于两侧布置[图3(d)~(f)],最大温差下降至372.62 K。究其原因，磁控管布置位置可直接重构腔体电场分布，不同布置方式的电场分布及均匀性存在差异。

2.2 储热砖排布方式对加热性能的影响

储热砖的空间排布方式可以改变微波传播路径、腔体驻波分布与材料间热耦合作用，影响微波加热温度均匀性。不同排布形式会使储热材料所处的电场环境、热堆积程度产生差异，进而改变局部

表4 不同磁控管位置加热效果对比表

Tab.4 Comparison of heating performance under different magnetron positions

工况	最高温度(K)	最低温度(K)	最大温差(K)	平均温度(K)	升温速率(K/min)	微波-热能转换效率(%)
4个磁控管（两侧布置，4.8 kW，150 s）	767.10	348.15	418.95	490.35	78.88	83.26
4个磁控管（下端+右端布置，4.8 kW，150 s）	722.42	349.80	372.62	464.12	68.39	72.19

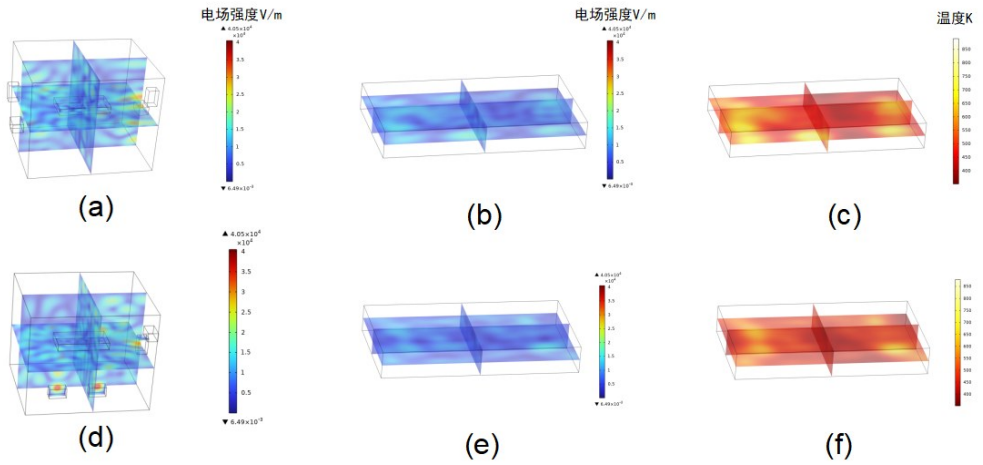


图3 磁控管位置的影响：(a)~(c)4个磁控管位于两侧，4.8kW，加热150s后电场分布及储热砖温度分布 (d)~(f)4个磁控管位于下端和右端，4.8kW，加热150s后电场分布及储热砖温度分布

Fig.3 Effects of magnetron position: (a)~(c) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 150 s heating with four magnetrons arranged on both sides at 4.8 kW (d)~(f) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 150 s heating with four magnetrons arranged at the bottom and right side at 4.8 kW

电磁热转化效率与热量传导规律。

为了研究相变砖排布方式对加热效果的影响，基于4个磁控管、4.8 kW、加热300 s统一工况，对比三块储热砖叠放与侧放两种排布方式的加热性能，对应仿真结果总结在表5中，加热后电场分布及储热砖温度分布如图4所示。仿真结果表明，两种排布方式的储热砖平均温度、升温速率、能量转换效率基本持平，升温速率分别为29.11 K/min、29.08 K/min，能量效率分别为92.18%、92.09%，排布形式对整体加热效率影响较小。但在温度均匀性方面，二者存在明显差异，叠放工况最大温差达564.80 K，侧放工况最大温差为528.70 K，最大温差降低了36.10 K。侧放排布可有效减小层间热堆积，弱化局部过热效应，提升储热材料温度分布均匀性。总体而言，工程应用中可优先采用侧放排布方式，在不损失加热效率的前提下优化加热均匀性。

表5 不同储热砖排布方式加热效果对比表

Tab.5 Comparison of heating performance under different arrangement modes of thermal-storage bricks

工况	最高温度(K)	最低温度(K)	最大温差(K)	平均温度(K)	升温速率(K/min)	微波-热能转换效率(%)
储热砖叠放（4.8 kW，300 s）	909.79	344.99	564.80	438.72	29.11	92.18
储热砖侧放（4.8 kW，300 s）	874.41	345.71	528.70	438.54	29.08	92.09

2.3 保温材料对加热性能的影响

保温材料作为微波加热腔体的辅助结构，具有保温隔热的作用，会同时干预腔体电磁场分布与系统热量耗散过程。一方面，保温介质具备一定介电

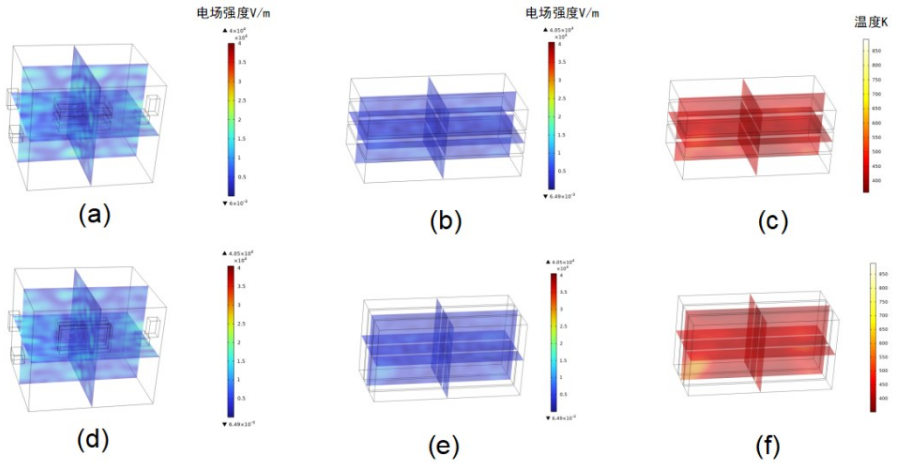


图4 储热砖排布方式的影响：(a)~(c)三块储热砖叠放，4.8kW，加热300s后电场分布及储热砖温度分布 (d)~(f)三块储热砖侧放，4.8kW，加热300s后电场分布及储热砖温度分布

Fig.4 Effects of thermal-storage-brick arrangement: (a)~(c) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 300 s heating with three stacked thermal-storage bricks at 4.8 kW; (d)~(f) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 300 s heating with three side-placed thermal-storage bricks at 4.8 kW

损耗特性，会参与吸收、分流微波能量，改变腔体原有电场能量分配；另一方面，保温层可阻隔储热材料表面对流散热，抑制腔体热量耗散。

基于4个磁控管、总功率4.8 kW工况，通过在微波谐振腔内部最外层增设15 cm厚保温材料，对比探究保温材料对微波加热性能的影响，对应仿真结果总结在表6中。结果表明，保温材料的存在会显著改变系统加热特性：无保温层时[图5(a)~(c)]，加热150 s储热砖平均温度490.35 K，能量转换效率达83.26%，升温速率快、能量利用率高；增设保温层后，保温材料会分流部分微波能量，导致储热砖升温速率降低一半以上，加热150 s后平均温度仅380.64K[图5(d)~(f)]，加热300s后平均温度仅468.13K[图5(g)~(i)]，升温速率仅35 K/min，微波-储热砖能量转换效率也仅36.94%。保温材料平均温升7.44 K，定量计算保温材料的吸收的热量为585.9 kJ，占微波总能量的40.69%。但是，保温结构可削弱腔体局部热集中效应，300 s加热工况下储热砖最大温差为368.7 K，与无保温材料相比有所降低，温度均匀性得到改善。由此可见，保温材料具有保温及均匀温度场的双重作用，但其质量太大，虽然温升不高但消耗的微波能量不可忽视。

表6 是否有保温材料加热效果对比表

Tab. 6 Comparison of heating performance with and without thermal insulation material

工况	储热砖最高温度(K)	储热砖最低温度(K)	储热砖最大温差(K)	储热砖平均温度(K)	储热砖升温速率(K/min)	微波-储热砖热转换效率(%)	保温材料平均温度(K)
无保温材料（4.8 kW，150 s）	767.10	348.15	418.95	490.35	78.88	83.26	-
15cm 保温材料（4.8 kW，150 s）	549.93	311.48	238.45	380.64	35.00	36.94	296.87
15cm 保温材料（4.8 kW，300 s）	714.92	346.20	368.72	468.13	35.00	36.94	300.59

2.4 相变潜热对加热性能的影响

对比显热储热材料，相变储热材料可利用相变潜热进行热能存储与释放，具有储热密度高、储热温度恒定等优点[27]。材料在相变温度区间通过固液相变吸收或释放大量热能，对温度演化过程形成显著调控作用。微波加热过程中，电磁生热的瞬时高能特性易造成材料局部过热，而相变潜热可缓冲温升速率、均衡区域温差，同时改变系统整体能量利用形式。

为揭示相变潜热对微波加热储热体系温度演化与能量转换效率的影响，基于单磁控管1.2 kW、

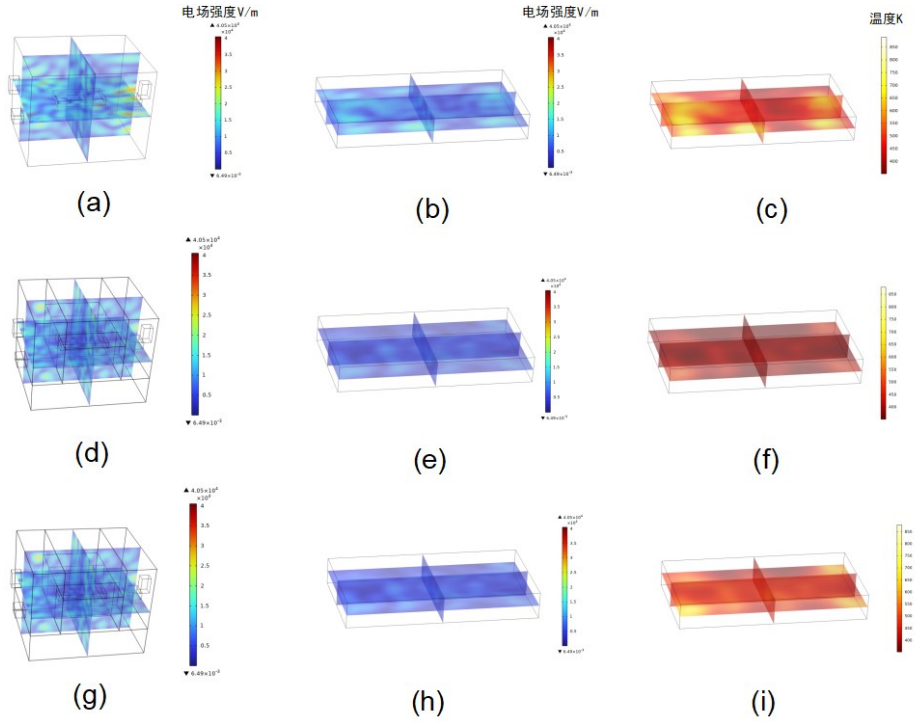


图5　保温材料的影响：(a)~(c)4个磁控管，4.8kW，无保温材料，加热150s后电场分布及储热砖温度分布 (d)~(f)4个磁控管，4.8kW，有保温材料，加热150s后电场分布及储热砖温度分布 (g)~(i)4个磁控管，4.8kW，有保温材料，加热300s后电场分布及储热砖温度分布

Fig. 5　Effects of thermal-insulation material: (a)~(c) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 150　s heating by four magnetrons at 4.8　kW without thermal-insulation material (d)~(f) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 150　s heating by four magnetrons at 4.8　kW with thermal-insulation material (g)~(i) electric-field distribution and thermal-storage-brick temperature distribution after 300　s heating by four magnetrons at 4.8　kW with thermal-insulation material

600 s工况，系统对比有无相变潜热两类条件下储热砖的升温特性，对应仿真结果总结在表7中。有相变潜热的一组设置相变温度为400 K，相变潜热为120 kJ/kg，通过比热容等效模拟的方法进行仿真[图5(a)~(c)]。比热容等效模拟相变潜热的具体处理方式为，将相变潜热折算为相变温度区间内的附加比热容。在相变起始与终止温度温区内，材料总等效比热容由显热比热容与相变潜热共同确定；在相变区间以外，等效比热容取材料真实显热比热容。等效比热容c(T)具体计算公式为：

$$c(T)=\begin{cases} c_0, T<T_s \\ c_0+\dfrac{\Delta H_1}{T_l-T_s}, T_s\leqslant T\leqslant T_l \\ c_0, T>T_l \end{cases} \tag{13}$$

式中：c_0为材料真实显热比热容，J/(kg·K)；ΔH_1为储热砖相变潜热，kJ/kg；T_s为相变起始温度，K；T_l为相变终止温度，K。通过该方式，将相变过程的潜热吸收效应转化为随温度变化的等效热容，无需单独追踪相变过程，降低多物理场耦合求解难度。

结果显示，引入相变潜热后，平均升温速率由17.52 K/min降至13.97 K/min，升温过程减慢，从升温曲线来看，储热材料在400 K相变温度附近出现明显温度平台[图6(d)]。在温度均匀性方面，相变潜热的引入可弱化局部温差，储热砖最大温差由537.15 K降至474.98 K，降低了62.17 K，温度均匀性有所提升。同时能量转换效率由73.97%提升至90.68%，储热系统能量利用率得到优化。结果表明，相变储热材料与显热储热材料相比不仅储热密度更高，并且微波加热效率更高、温度均匀性更好，是更适用于微波加热的储热材料。

3　微波加热储热装置样机研发

前文通过多物理场耦合仿真完成了微波加热储热系统的多参数优化分析，明确了磁控管配置、材

表7 是否考虑相变潜热加热效果对比表

Tab. 7 Comparison of heating performance with and without consideration of phase-change latent heat

工况	最高温度(K)	最低温度(K)	最大温差(K)	平均温度(K)	升温速率(K/min)	微波-热能转换效率(%)
不考虑相变潜热（1.2 kW，600 s）	887.00	349.85	537.15	468.33	17.52	73.97
考虑相变潜热（1.2 kW，600 s，相变温度400 K，相变潜热120 kJ/kg）	823.81	348.83	474.98	432.91	13.97	90.68

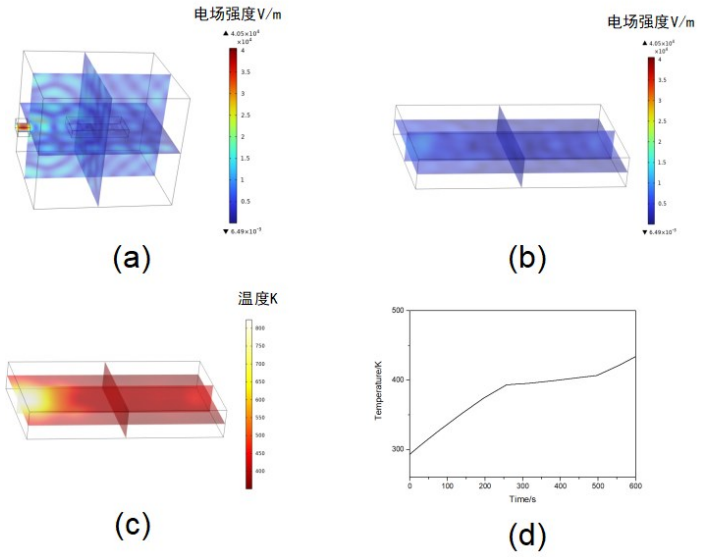


图6 相变潜热的影响：(a)~(c)1个磁控管，1.2kW，引入相变潜热，加热600s后电场分布及储热砖温度分布 (d)相变储热砖某一特征点的升温曲线

Fig. 6 Effects of phase-change latent heat: (a)~(c) Electric field distribution and thermal storage brick temperature distribution after heating for 600 s with one magnetron of 1.2 kW considering phase-change latent heat (d) Temperature curve at a characteristic point of the phase-change thermal storage brick

料排布等的最优工况。为将仿真优化结论落地应用，验证最优结构方案的实际工程可行性，本文基于仿真所得最优参数，开展微波加热储热装置样机整体设计、结构集成与实物研发，并通过样机实测试验，验证优化结构的可靠性与实用性。

3.1 样机整体优化设计

微波加热储热装置样机示意图及实物图如图7所示，总功率6 kW，总最大输出功率4.8 kW，微波谐振加热腔体几何尺寸约600 mm×500 mm×600 mm，微波工作频率固定2450 MHz，为工业通用标准微波频段。

样机整体结构主要包括微波谐振加热腔体、磁控管微波发生模块、储热模块、保温模块、释热模块、数据采集模块、计算机与控制终端等部分。（1）微波谐振腔体：采用金属一体式密封腔体，具备完全微波反射特性，无微波泄露及能量吸收。（2）磁控管微波发生模块：选用工业级磁控管，工作频率2450 MHz，单管额定功率1.5 kW，最大输出功率1.2 kW，功率输出稳定、频率误差小；四个磁控管采用下端+右端布置方案，可实现腔体电场较为均匀覆盖，同时方便左端布设换热风口。（3）储热模块：选用性能优异的自主研发储热砖，储热砖推荐采用侧放排布方式。更推荐采用相变储热转，可依托相变特性均衡温度场、提升系统储能效率。（4）保温模块：保温层选用硅酸铝保温板，整体厚度15 cm，耐高温、微波吸收少，可有效阻断储热腔体表面对流散热与辐射散热。（5）释热模块：搭载强制对流释热模块，选用低噪声耐高温轴流风机，可根据需求调节风速；样机左侧布置进风口，上端布置出风口。（6）数据采集模块：搭载高

精度热电偶测温系统，在微波谐振加热腔体内上部和下部安装两个热电偶，可实时采集储热砖上下端瞬态温度数据，优选铠装热电偶降低强磁场环境影响，延长使用寿命。（5）计算机与控制终端：计算机与控制终端可采集热电偶的温度数据，并精准控制微波输出功率与加热时长等加热条件。

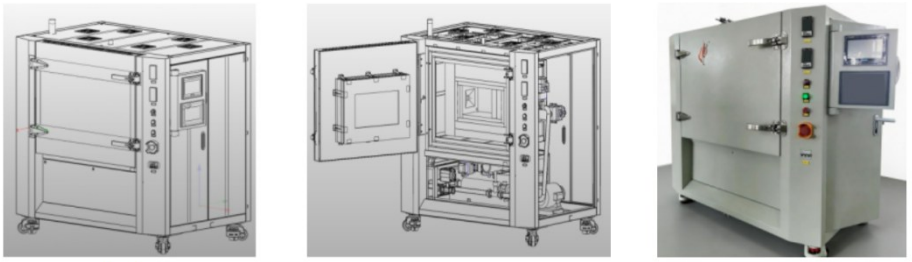


图7　6kW微波加热储热装置样机（a)外部示意图 （b)内部示意图 （c）实物图

Fig. 7　Prototype of 6　kW microwave-heated thermal energy storage device: (a) external schematic diagram (b) internal schematic diagram (c) physical photograph

3.2　样机试验与结果分析

实验步骤：（1）准备三块储热砖，将材料侧放置于加热腔中，使上下两个热电偶接触储热砖，能监测到储热砖上端和下端的温度。（2）测试储热砖的加热特性，升温程序采用定功率（4168 W）升温的方式，加热至目标温度650 K，记录实时上下端温度曲线。

结果表明，微波加热储热装置样机成功实现了微波热量转化与存储。如图8所示，在该加热条件下，储热砖上端平均升温速率6.15 K/min，下端平均升温速率7 K/min。非线性升温曲线代表储热砖的介电性能是随温度不断变化的。加热过程中上下端两测试点最大温差95 K，温度均匀性较好。由于试验所采用的自研储热砖其主要成分为吸波性能较差的氧化镁及碳酸盐，其升温速率还有较大提升空间。后续我们将在现有材料配方的基础上进行优化，例如通过掺杂碳化硅、四氧化三铁、碳材料等强微波吸收的材料，提升储热砖微波加热性能。

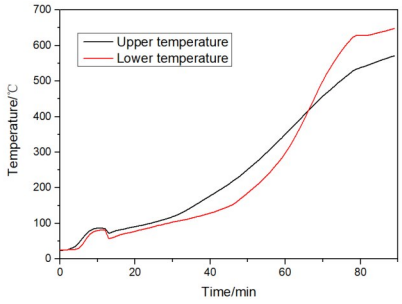


图8　样机测试升温曲线

Fig.8　Temperature curve of prototype test

3　结　论

本文基于COMSOL仿真软件构建微波加热储热装置的频域-瞬态双向全耦合电热特性仿真模型，系统探究多因素对储热材料微波加热性能的影响，对装置性能进行优化，主要结论如下：

（1）总输入能量一致时，增加磁控管数量可提升升温速率与温度均匀性，四磁控管工况温度均匀性最优，升温速率可达78.88 K/min，最大温差为418.95 K；磁控管两侧布置的加热效率优于下端+右端布置，但下端+右端布置加热均匀性更好，最大温差下降至372.62 K。

（2）储热砖排布方式对加热速率、效率影响较小，但侧放排布可降低局部温差，优化温度分布均匀性，最大温差降低了36.10 K。

（3）保温材料虽然微波吸收能力弱，但体积占比大，会显著分流微波能量、降低能量利用率，加热速率降低一半以上；但可弱化局部过热现象，提升温度均匀性。

（4）相变潜热可有效优化储热综合性能，提升能量转换效率与温度均匀性，相变储热材料是更适用于微波加热储热技术的材料；考虑相变潜热后能量转换效率达到90.68%，最大温差降低了62.17 K。

（5）基于仿真结果完成微波加热储热装置样机独立研发、结构集成与试验验证，实现了仿真优化到实物落地的有效转化。

（6）本研究揭示了磁控管布局、材料排布、保温结构及相变特性多因素对装置升温速率、温度均匀性及能量转换效率的影响规律，为微波加热储热装置的结构优化设计及工程化落地应用提供了系统的理论支撑与实物试验依据。后续将继续研究优化仿真模型精度，构建更大功率模型，提升加热均匀性，开展样机多工况试验，推动微波加热储热装置的标准化、规模化应用。

参 考 文 献

[1] 曾光,纪阳,符津铭,等. 热储能技术研究现状、热点趋势与应用进展[J], 中国电机工程学报, 2023, 43:127-142.
Zeng G, Ji Y, Fu J M, et al. Research status, hot-spot trends and application progress of thermal energy storage technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43: 127-142.

[2] 陈洪银,王松岑,芋耀贤,等. 新型电力系统下电热双向灵活转换技术研究进展及展望[J], 新型电力系统, 2025, 3(2):157-176.
Chen H Y, Wang S C, Yu Y X, et al. Research progress and prospect of bidirectional flexible electro-thermal conversion technology under new power system[J], New Power Systems, 2025, 3(2):157-176.

[3] Chia L H L, Boey F Y C, Jacob J. Thermal and non-thermal interaction of microwave radiation with materials[J], Journal of material science, 1995, 30:5321-5327.

[4] Mishra R R , Sharma A K. Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing[J], Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 81:78-97.

[5] 郑先哲,张雨涵,刘成海,等. 微波技术在食品和农产品加工中应用研究进展[J], 农业工程学报, 2024, 40(6):14-28.
Zheng X Z, Zhang Y H, Liu C H, et al. Research progress on application of microwave technology in food and agricultural product processing[J], Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (6): 14-28.

[6] Wang Y Q, Zhang M, Mujumdar A S. Microwave-Assisted Drying of Foods-Equipment, Process and Product Qualit[J], Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification, First Edition, 2014, 5:279-315.

[7] 高鑫,焦夏欣,李洪,等. 微波能化工应用领域研究述评与展望[J], 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(7):669-686.
Gao X, Jiao X X, Li H, et al. Review and prospect of research on chemical engineering applications of microwave energy[J], Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57 (7):669-686.

[8] 马爱元,郑雪梅,孙成余, 等. 微波技术在材料制备与矿物冶金中的应用[J], 稀有金属, 2020,44:1094-1107.
Ma A Y, Zheng X M, Sun C Y, et al. Application of microwave technology in material preparation and mineral metallurgy[J], Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44:1094-1107.

[9] Rosa R, Trombi L, Veronesi P, et al. Microwave energy application to combustion synthesis: A comprehensive review of recent advancements and most promising perspectives[J], International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2017, 26(4):221-233.

[10] Crist´obal V, Margarita-Manuela R, Esther R, et al. State of the art of the fundamental aspects in the concept of microwave-assisted heating systems[J], International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 156:107594.

[11] 吴秋萍,蔡昆廷,王元康,等. Co/C微波吸收性能及Co/C-聚氨酯相变复合材料的微波-热转换性能[J], 应用化学, 2021,38 (12): 1588-1598.
Wu Q P, Cai K T, Wang Y K, et al. Microwave absorption performance of Co/C and microwave-to-thermal conversion performance of Co/C-polyurethane phase-change composite materials[J], Chinese Journal of Applied Chemistry, 2021, 38 (12): 1588-1598.

[12] Chen J-P, Jia H, Liu Z, et al. Construction of C-Si heterojunction interface in SiC whisker/reduced graphene oxide aerogels for improving microwave absorption[J], Carbon, 2020, 164:59-68.

[13] Lun H, Zeng Y, Xiong X, et al. The Effect of SiC Content on Microstructure and Microwave Heating Rate of h-BN/SiC Ceramics Fabricated by Spark Plasma Sintering[J], Materials, 2019,12:1909.

[14] Su J, Lin J, Cao Y, et al. Experimental investigation and numerical simulation on microwave thermal conversion storage properties of multi-level conductive porous phase change materials and its multifunctional applications[J], Applied Thermal Engineering, 2024, 253:123774.

[15] Wang Z, Yu C, Huang H, et al. Carbon-enabled microwave chemistry: From interaction mechanisms to nanomaterial manufacturing[J], Nano Energy, 2021, 85:106027.

[16] Yang C, Yang H, Bai Y, et al. Microwave-Heated Graphene Realizes Ultrafast Energy Conversion and Thermal Storage[J], Energy & Fuels, 2020, 35:898-904.

[17] Yang C, Yin H, Lou Q, et al. Ultrafast microwave heated form-stable thermal package providing operating temperature for PEO all-solid-state batteries[J], Energy Storage Materials, 2023, 60: 102814.

[18] Bhattacharya M, Basak T. A review on the susceptor assisted microwave processing of materials[J], Energy, 2016, 97:306-338.

[19] Zhu J, Kuznetsov AV, Sandeep K P. Mathematical modeling of continuous flow microwave heating of liquids (effects of dielectric properties and design parameters) [J], International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46:328-341.

[20] 张乐道,虞启辉,丁小航. 果蔬物料变化对微波加热温度特性的影响[J], 食品与机械, 2024,40(9):29-35.
Zhang L D, Yu Q H, Ding X H. Influence of changes in fruit and vegetable materials on temperature characteristics under microwave heating[J], Food and Machinery, 2024, 40(9):29-35.

[21] 邢文龙,曹有福,张小燕,等. 用于微波干燥的矩形和圆柱形谐振腔仿真分析[J], 包装与食品机械, 2022, 40(4):50-54.
Xing W L, Cao Y F, Zhang X Y, et al. Simulation analysis of

rectangular and cylindrical resonant cavities for microwave drying [J], Packaging and Food Machinery, 2022, 40(4):50-54.

[22] 谈浩, 微波场均匀性设计及干燥过程数值模拟[D], 云南:昆明理工大学,2009.
Tan H. Design of microwave field uniformity and numerical simulation of drying process[D], Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.

[23] 周路人,秦瑶,蔡成欣, 工业微波加热腔的结构优化设计[J], 无线互联网科技, 2022,23:137-142.
Zhou L R, Qin Y, Cai C X. Structural optimization design of industrial microwave heating cavity[J], Wireless Internet Technology, 2022, 23:137-142.

[24] Xiong G, Zhu H, Huang K, et al. The impact of pins on dual-port microwave heating uniformity and efficiency with dual frequency [J], Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2020, 54(2):83-98.

[25] Topcam H, Karatas O, Erol B, et al. Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low-high viscosity liquids: A computational study with experimental validation[J], Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60:102306.

[26] 王志闯,王婷欢,杨晨,等. 微波加热中木材内部温度场的电磁-热耦合模拟[J], 北京林业大学学报, 2025,47 :162-170.
Wang Z C, Wang T H, Yang C, et al. Electromagnetic-thermal coupling simulation of internal temperature field of wood under microwave heating[J], Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47:162-170.

[27] 刘伟,李振明,刘铭扬,等. 高温相变储热材料制备与应用研究进展[J], 储能科学与技术, 2023,12 (2) :398-430.
Liu W, Li Z M, Liu M Y, et al. Research progress on preparation and application of high-temperature phase-change thermal storage materials[J], Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2):398-430.