

# 石英砂微波加热模型及仿真研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.06.006

侯清麟 赵维奕

侯熠徽 贺湘强

湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

**摘要:** 鉴于高档石英材料需求的攀升及水晶资源的日益枯竭,探索出利用含杂质稍多的脉石英硅矿石通过精制工艺制备高纯石英砂的新途径。构建微波加热石英砂的数学模型,理论分析微波辐射作用下石英砂的升温规律,明确微波加热技术剔除气液包裹体时温度与微波功率、时间等关键因素之间的相互关系。结果显示,石英砂的升温速率与微波功率及介电损耗角正切呈正相关关系,而与保温桶的导热系数呈负相关。同时,料层高度及坩埚内径的变化也会引发微波热源分布的偏差,进而导致温度变化的无规律性。

**关键词:** 石英砂;微波加热;模拟仿真;介电常数

**中图分类号:** TM924.76; TD985

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2024)06-0041-11

**引文格式:** 侯清麟,赵维奕,侯熠徽,等. 石英砂微波加热模型及仿真研究[J]. 包装学报, 2024, 16(6): 41-51.

## 1 研究背景

高纯石英砂作为一种重要的硅质原料,被广泛应用在高新技术领域,对高科技硅产业的发展有着重要作用<sup>[1]</sup>。高纯石英砂也可作为中性无机填料,其不含结晶水,不参与被填充物的化学反应,是一种非常稳定的矿物填料,既可增加产品的新功能,也可节约大量原料<sup>[2]</sup>。高纯石英砂还可用来制作石英玻壳。石英玻壳作为一种高性能材料,在包装行业中表现出特有的优势,其高纯度、高透光率、优良的热性能和力学性能,使其成为高科技产品、精密仪器和医疗设备等领域的理想包装材料。在半导体领域,石英玻壳被用于封装和保护晶圆和其他敏感器件,防止器件在制造和运输过程中受到污染或机械损伤。石英玻壳具有高温耐受能力,可承受 1200 °C 及以上的高温,可用于制作高温反应器和炉管,同时石英玻壳又具有良好的低温性能,能确保反应器等在各种极端温度变化下保持稳定可靠的工作状态。

石英玻壳等高性能材料对石英砂的纯度质量要求严格,通常需要高纯和超纯石英砂<sup>[3-4]</sup>。近年来,高档石英材料需求量以每年 20% 的速度增长,而制备高档石英材料的水晶资源面临着全球性枯竭的现状<sup>[5]</sup>。有研究发现, $\alpha$  晶型脉石英硅矿石经过处理后可替代高纯石英砂用来制作高档石英材料。然而,脉石英中含有多种杂质,如矿物包裹体、气液包裹体和晶体杂质<sup>[6-7]</sup>,无法满足高纯石英砂产品的纯度要求(99.9% (3N)~99.999% (5N)),必须将这些杂质进行剔除<sup>[8]</sup>。传统加热方式难以剔除石英砂中所包含的气液包裹体,微波加热的效果则较为显著<sup>[9]</sup>。微波能够穿透被加热物体,使其各部分同时产生热量,实现物料内外同时加热,避免传统加热方式中物料表面过热而内部温度上升缓慢的问题<sup>[10]</sup>。同时,相比于传统马弗炉煅烧,微波加热升温效率更快,纯化所需温度要求更低,节能效果更佳。但是,微波在加热样品过程中会引起热梯度,很难用单一的测温方式描述样品的温度,极大地限制微波加热的工

收稿日期: 2024-09-02

作者简介: 侯清麟(1956-),男,湖南安仁人,湖南工业大学教授,博士,主要从事高端水晶及化工包装材料研究,  
E-mail: qinglinhou@aliyun.com



业应用<sup>[11]</sup>。在微波加热领域，材料的介电常数决定微波电场的分布以及其对微波的吸收能力<sup>[12]</sup>，即不同介质吸收的微波能量不同，从而导致微波对不同介质加热能效不同，加热介质中的电场分布不均匀<sup>[13]</sup>。此外，在微波环境中引入金属测温探头会干扰电磁场，使电场环境发生变形，或使测温设备自身被加热，从而不能有效测量微波场中被加热试样的温度<sup>[14]</sup>。

数值模拟与仿真技术可替代部分实验工作，不仅降低实验成本，提高研究精度，还可优化工艺过程，减少环境污染。微波加热腔体中的微波磁场分布及物料内部和边界的热分布，不但会影响去除石英砂中气液包裹体的效果，而且直接影响能耗。因此，本研究以微波试验炉中物料的温度场为中心，将实验数据与数值模拟相结合，展开相关研究，进一步完善微波加热剔除气液包裹体的相关理论基础。

## 2 微波加热模型

对物质进行微波辐射时，物质中的各种分子在电磁场中被电离而产生极化，形成的极性分子由于存在正负极而定向排列，且因为高频电磁场的存在，这些极性分子会频繁交替、相互摩擦与碰撞从而使物质产生热量，即微波加热意味着将微波的电磁能转变为热能<sup>[15]</sup>。物质的微波加热效率与其吸波性能有关，而吸波性能主要跟物质的复介电常数有关。物质的虚部介电常数表示物质自身的电学损耗能力，反映了物质的吸波能力，即介电损耗角正切越大，吸波能力往往越强。因此，根据材料对微波的吸收程度，可将材料划分为微波透明体（非极性物质，如石英等）、微波绝缘体（如金属）以及微波吸收体（极性物质，如H<sub>2</sub>O）三类物质，这三类物质与微波关系的示意图如图1<sup>[16]</sup>所示。

石英矿中水的存在形式，除气液包裹体中的水分子外，还有以OH<sup>-</sup>形式参与晶格的结构水<sup>[17]</sup>。而石英晶体中的结构水是形成石英玻璃气泡、杂质缺陷的主要因素，也是实现提纯石英矿石代替水晶制备高端石英玻璃原料的关键与难点<sup>[18]</sup>。微波辐射石英砂时，由于石英为微波透明体，微波能轻易穿透石英基质，但遇到石英砂内的气液包裹体时，因气液包裹体内含有大量的极性分子，这些极性分子易随微波交换取向转动，发生摩擦、碰撞形成大量热量，再将这些热量吸收并以传导和对流等方式向石英基质传播。

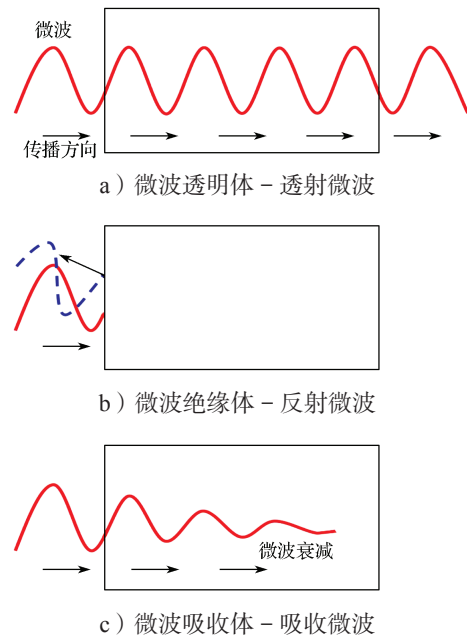


图1 微波场中物质的分类

Fig. 1 Classification of substances in microwave fields

非磁性电介质吸收及转化微波的能量主要取决于其介电常数 $\varepsilon$ 。电磁分析中常用的是相对介电常数 $\varepsilon_r$ ，通常以复数形式表达（见式1）。

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon' + j\varepsilon''), \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_0$ 为真空介电常数，取值 $8.85 \times 10^{-12}$  F/m；

$\varepsilon'$ 为电容率，表示石英砂颗粒在极化过程中储存电磁能的能力；

$\varepsilon''$ 为耗损因子，表示材料将电磁能转化为热能的能力。

微波作用于吸收体会以热量的形式发生耗损。用耗损角正切表示某物质将电磁能转化为热能的效率，耗损角正切可表示为

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2)$$

微波在穿透不透明石英砂过程中会产生衰减，其中一部分电磁能被电介质接收并转化为热量<sup>[19]</sup>。这种能量转化取决于耗损功率 $P_v$  (W/m<sup>3</sup>)。耗损功率可表示为

$$P_v = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2}{2}, \quad (3)$$

式中： $\omega$ 为角频率，rad/s；

$E$ 为电场强度，V/m。

### 2.1 几何模型

基于加热石英砂的微波炉的真实尺寸，建立如图

2 所示的三维几何重构模型, 力求最大程度还原微波加热石英砂的整个过程。

微波炉内谐振腔尺寸为  $400\text{ mm} \times 480\text{ mm} \times 394\text{ mm}$ ; 矩形波导尺寸为  $86.4\text{ mm} \times 43.2\text{ mm} \times 95\text{ mm}$ 。保温桶、底部圆盘、坩埚均置于微波炉内正中心。底部圆盘尺寸为  $\Phi 150\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ; 保温桶尺寸为  $\Phi 105\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ , 内径为  $75\text{ mm}$ ; 坩埚料层高度为  $50\text{ mm}$ , 坩埚内径为  $25\text{ mm}$ 。

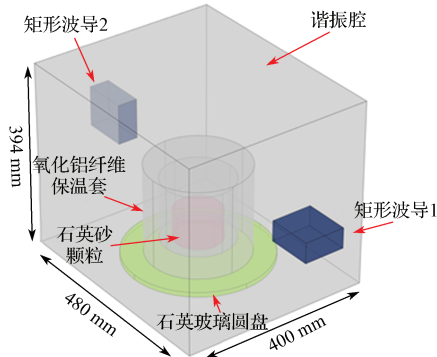


图2 石英砂微波加热系统几何重构模型

Fig. 2 Geometric reconstruction model of microwave heating system for quartz sand

## 2.2 微波加热理论模型

微波加热过程涉及多个物理场的交互耦合, 包括电磁场、传热场、压力场及应力场, 期间伴随着能量转化、物质传递、动量转移、相变及化学反应。因此, 石英砂的微波加热去除气液包裹体的过程是一个高维非线性、多相多场耦合、多尺度交叉的复杂问题。其中, 微波热效应是其他伴生效应的基础<sup>[20]</sup>。微波电磁场方程为

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2 \varepsilon_r E = 0, \quad (4)$$

式中:  $\nabla$  为哈密顿算子;

$\mu_r$  为相对磁导率;

$k_0$  为自由空间的波数。

在微波加热石英砂过程中, 不透明石英砂介电性质对微波场的响应, 可表示为

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 \varepsilon' (1 - j \tan \delta), \quad (5)$$

式中  $\varepsilon^*$  为不透明石英砂的介电常数。

微波炉内两侧的磁控管通过波导将电磁场分布在微波炉谐振腔内。石英砂微波加热所用微波炉, 其波导为矩形波导, 实验室所用微波炉的波导型号为 BJ-26。不是任意波长和任意波形的电磁波都能传输, 即电磁波波长必须小于波导的临界波长。

实验选用石英砂为 100~200 目的颗粒, 其堆积料层并非致密固体, 而是松散堆积的孔隙结构, 空气完全填充颗粒间缝隙, 孔隙率达 50%。为此, 本模型引入多孔介质传热模型<sup>[21]</sup>, 采用式 (6) 进行描述。

$$\rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) = Q + Q_e + Q_r, \quad (6)$$

$$k_{\text{eff}} = \theta_p k_p + (1 - \theta_p) k + k_{\text{disp}}, \quad (7)$$

$$Q_e = JE. \quad (8)$$

式 (6)~(8) 中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$C_p$  为比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$u$  为频率,  $\text{Hz}$ ;

$T$  为温度,  $\text{K}$ ;

$k_{\text{eff}}$  为有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$Q$  为发热值,  $\text{W/m}^3$ ;

$Q_e$  为微波耗损热源,  $\text{W/m}^3$ ;

$Q_r$  为辐射热源,  $\text{W/m}^3$ ;

$\theta_p$  为孔隙率;

$k_p$  为空气导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$k$  为石英砂导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$k_{\text{disp}}$  为附加传热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$J$  为谐振腔内电流密度,  $\text{A/m}^2$ 。

为保证微波炉的稳定运行, 炉壁通过壁面的冷却水进行冷却, 因此可将炉壁视为恒定温度。模型中选用定温边界条件, 即  $T = T_0$ 。由于石英砂相对介电常数较低, 在微波炉内加热时如不采取适当的保温策略, 热量将通过热辐射等形式散失, 致使石英砂无法持续升温。为此, 实验过程中采用氧化铝纤维保温桶进行保温。

在微波炉内的高温加热过程中, 随着温度的上升, 石英砂料层的热量损失由对流-扩散传热为主逐渐转变为辐射传热为主。为此, 引入辐射传热模型, 用式 (9) 描述加热过程中石英砂料层向保温套炉壁、环境的散热损失。

$$Q_r = \kappa(G - 4\pi I_b), \quad (9)$$

式中:  $\kappa$  为吸收系数,  $\text{m}^{-1}$ ;

$G$  为入射辐射量,  $\text{W/m}^2$ ;

$I_b$  为黑体辐射强度。

$$I_b(T) = \frac{n_r^2 \sigma T^4}{\pi}, \quad (10)$$

式中:  $n_r$  为折射率;

$\sigma$  为玻尔兹曼常数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

入射辐射量  $G$  通常采用式 (11) 进行计算,

$$G = \int_{4\pi} I(\Omega) d\Omega, \quad (11)$$

式中  $I(\Omega)$  为介质沿  $\Omega$  方向的给定位置的辐射亮度,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

本模型中, 辐射离散化方法采用 P1 近似法。P1 近似法不使用离散的坐标, 而是基于球面调和函数来离散角度空间。P1 近似法仅使用了线性项, 该条件下的辐射模型可用式 (12) 表示。

$$\nabla \cdot (-D_{\text{p1}} \nabla G) = -\kappa(G - 4\pi I_b), \quad (12)$$

式中  $D_{\text{p1}}$  为 P1 扩散系数。

石英砂装填入石英坩埚后, 置于保温桶正中心。微波加热石英砂过程中使用保温桶, 故采用不透明边界条件

$$\mathbf{n} \cdot (-D_{\text{p1}} \nabla G) = q_r, \quad (13)$$

$$q_r = \frac{\varepsilon_1}{2(2 - \varepsilon_1)} (4\pi I_b - G). \quad (14)$$

式 (13) ~ (14) 中:  $\mathbf{n}$  为单位法向量;

$q_r$  为热流量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$\varepsilon_1$  为壁面发射率。

### 2.3 模型参数设置

在 COMSOL 软件中, 采用电磁波 - 频域方程、多孔介质传热方程、辐射方程及动网格, 描述石英砂在微波炉内的升温过程, 具体模型耦合示意图如图 3 所示。

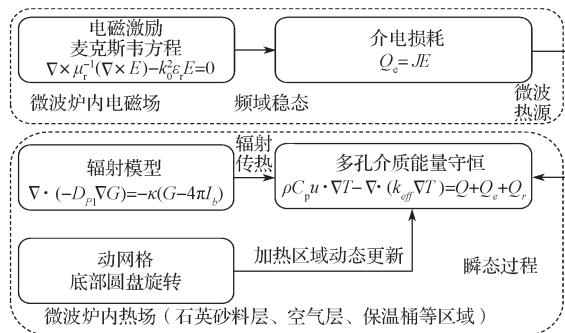


图3 石英砂微波加热过程电磁 - 热耦合模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of electromagnetic thermal coupling model for microwave heating process of quartz sand

对建立的方程采用有限元法进行离散化, 随后对离散后的方程使用多重网格 GMRES 直接求解器进行频域稳态过程求解, 再使用 PARDISO 直接求解器进行温度场瞬态过程求解。

模型计算的硬件平台: DELL 服务器, CPU 为 2 块 E5-2696V3 处理器,  $4 \times 16\text{G}$  REG ECC DDR4-2400 MHz 服务器内存, 512G NVME 固态硬盘。微

波加热石英砂所用参数如表 1 所示。

表 1 微波加热石英砂过程数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters of microwave heating process for quartz sand

参数类型及单位	数值
微波频率 /GHz	2.45
微波功率 /kW	2.0
石英砂相对介电常数 (实部)	3.5
石英玻璃介电常数 (实部)	3.7
石英砂损耗角正切	0.001
石英玻璃损耗角正切	0.0003
石英砂密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2650
石英砂比热 / ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	800
石英砂导热系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	0.5
石英砂相对磁导率	1
石英玻璃密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2650
石英玻璃比热 / ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	800
石英玻璃导热系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	1.5
石英玻璃相对磁导率	1
石英砂料层孔隙率	0.5
空气介电常数 (实部)	1
空气密度	理想气体状态方程
空气损耗角正切	0
金属壁面电导率 / ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	5.998e7
金属壁面相对介电常数	1
金属壁面相对磁导率	1
氧化铝纤维保温桶密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	267
氧化铝纤维保温桶比热 / ( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	900
氧化铝纤维保温桶导热系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	0.05
氧化铝纤维保温桶相对磁导率	1
氧化铝纤维保温桶介电常数 (实部)	1.6
氧化铝纤维保温桶损耗角正切	0.0001

### 2.4 网格无关性验证

偏微分方程的数值求解采用有限元方法, 所得的结果为数值解, 其误差除受迭代计算精度影响外, 还跟模型所用网格精度有关。故本模型采用四面体非结构化网格划分方式, 选定 3 种网格划分方案, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 3 种网格划分方式的中心温度变化曲线基本一致, 除在初值阶段 (0~5 min) 的误差超过 10% 以外, 其他时间的计算相对误差均小于 5%。因此, 根据模型计算耗时及精度, 综合考虑后选用 13.7 W 网格的划分方案进行后续研究。



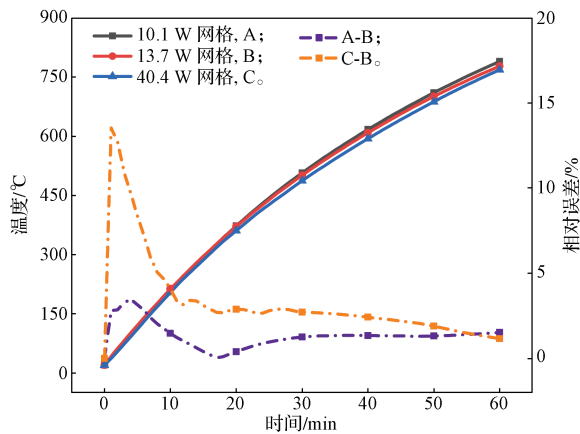


图4 不同网格数条件下石英砂料层中心温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curve of quartz sand layer center under different grid numbers

## 2.5 单因素分析计算工况条件

本模型数值模拟是以基准工况参数(见表1)为基础,进行单因素讨论时仅改变其中一个变量,具体如表2所示。

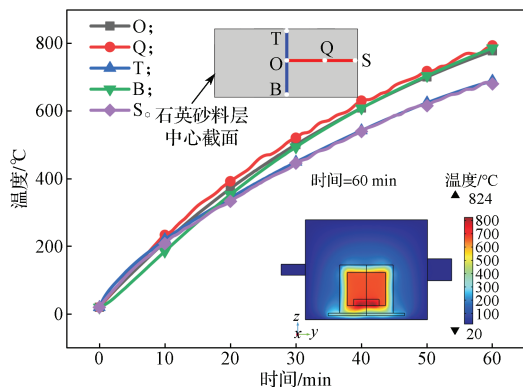
表2 单因素分析数值模拟实验算例

Table 2 Numerical simulation experiment example of single factor analysis

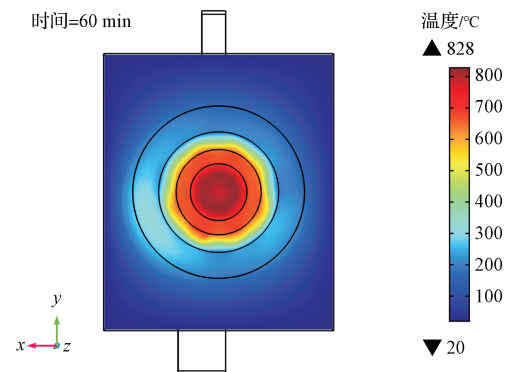
因素	数值区间	工况名称
石英砂料层高度/mm	25~75	H1~H6
石英砂料层直径/mm	30~55	R1~R6
微波功率/W	500~3000	P1~P6
介电损耗角正切	0.0005~0.0030	D1~D6
保温桶导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.05~0.30	K1~K6

## 2.6 石英砂微波加热场温度分析

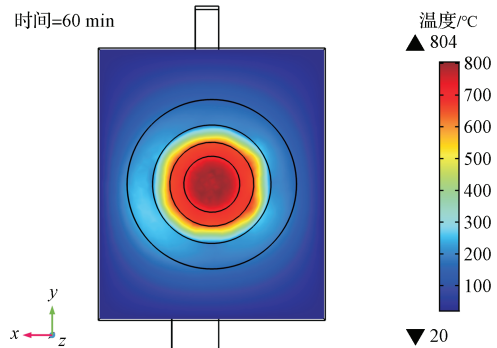
针对石英砂微波加热过程,建立微波-热耦合数学模型,石英砂在微波炉内的温度分布如图5所示。



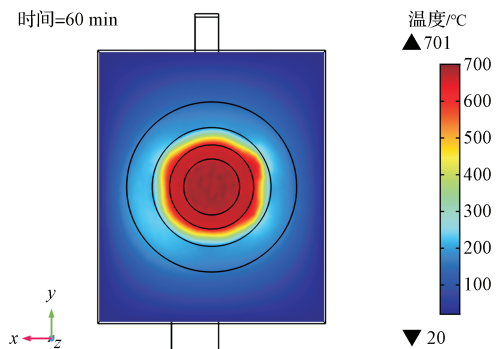
a) 石英砂料层各点温度变化



b) 石英砂料层截面  $xy=0$



c) 石英砂料层截面  $xy=0.5H$



d) 石英砂料层截面  $xy=H$

图5 石英砂在微波炉内的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of quartz sand in microwave oven

图5a中温度曲线存在轻微波动,这主要是由于底部转盘带动样品旋转,温度点(Q、S)空间坐标固定,但实际测试值出现波动是由圆周运动的石英砂颗粒的非均匀分布导致。随着微波加热的不断进行,石英砂料层温度逐渐上升,形成一定的温度梯度,料层表面和底部的温差大于100℃。由图5b~d石英砂料层不同高度的截面温度云图可知,石英砂料层底部温度最高,中心次之,顶部最低,这主要是由于随着温度的上升(高于300℃后),石英砂料层的热量

散失方式由对流传热变为辐射传热，且料层表面与保温桶内壁存在热辐射交换，进而导致石英砂料层的顶部温度最低。

图 6 为石英砂加热过程中微波炉中心截面的温度云图。由图可知，随着微波加热时间的增加，石英砂料层温度逐渐上升，温度最高集中在坩埚底部；微波炉内高温区域主要集中在石英砂料层和保温桶内部空气填充区域。当石英砂料层温度达到 800 ℃ 时，炉腔内温度仅为 100~200 ℃，这是由于保温桶采用具有极低导热系数的氧化铝纤维制成，热量被有效地集中在保温桶中心区域，以保障石英砂升温过程的稳定进行。

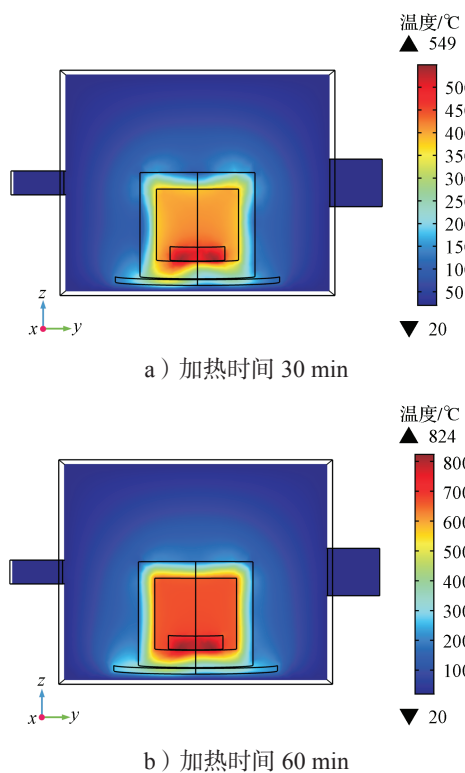


图 6 不同加热时间下微波炉内中心截面 ( $yz=0$ ) 的温度云图

Fig. 6 Temperature cloud map of the central section ( $yz=0$ ) inside the microwave oven at different times

### 3 结果与分析

#### 3.1 料层高度对石英砂升温过程影响分析

为探讨微波加热石英砂过程中，石英砂填充量与电磁-热耦合过程的内在联系，本研究将料层高度作为影响因素进行讨论。图 7 为不同料层高度对微波加热石英砂的影响关系曲线。

由图 7a 可知，随着微波加热的进行，石英砂温

度不断升高；但随着料层高度增加，石英砂中心温度并未呈现相应升高或降低，而是呈现无规律变化，在坩埚料层高度为 25 mm 时，其微波加热温度最高，而料层高度为 35 mm 时，微波加热温度最低。结合图 7a~b 可知，随着料层高度增加，石英砂料层中心温度变化呈现降低-升高-降低-升高的无规律性波动趋势，这是由于料层高度的改变，相应地改变了电磁场在谐振腔内的时空分布，引起微波热源分布偏差，进而导致温度发生变化。

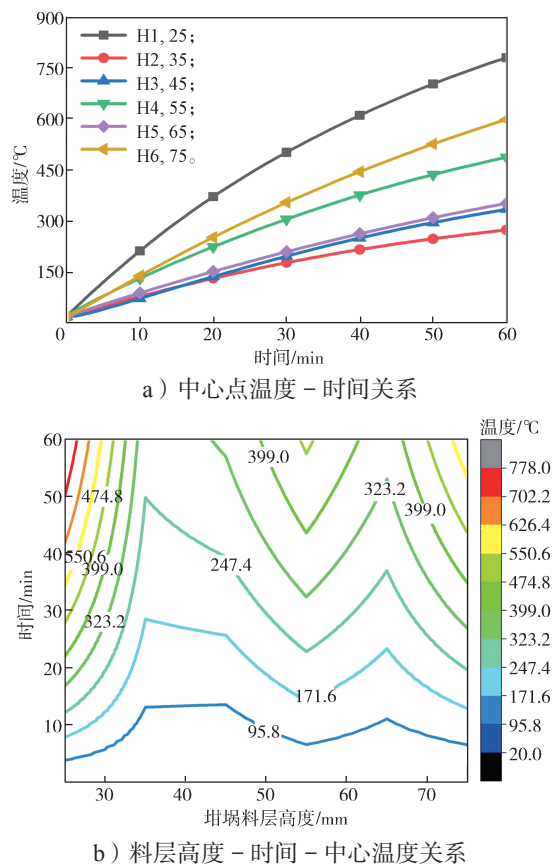


图 7 不同料层高度对微波加热石英砂的影响

Fig. 7 The influence of different layer heights on microwave heating of quartz sand

图 8 为不同料层高度下 (25, 75 mm) 微波加热 60 min 后中心切面电场模分布图。由图 8 可以看出，料层高度 25 mm 的电场模分布强度明显高于 75 mm 的电场模分布强度。根据式 (3) 可知，电场模越大，微波热源就越大，温度也就越高。料层高度的改变，促使电磁场分布发生改变，进而导致温度呈现无规律变化。

#### 3.2 坩埚内径对石英砂升温过程影响分析

图 9 为不同坩埚内径对微波加热石英砂的影响关系曲线。

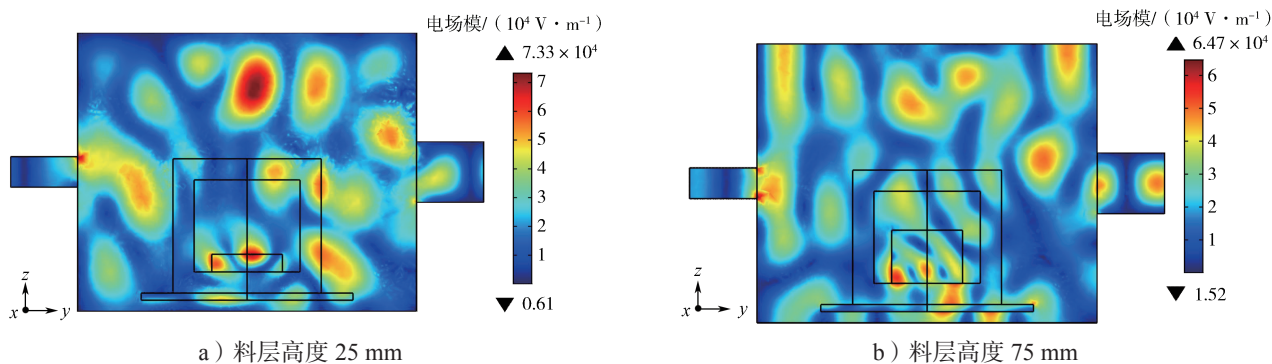


图 8 不同料层高度下微波加热 60 min 的电场模分布

Fig. 8 Electric field mode distribution of microwave heating for 60 minutes at different material layer heights

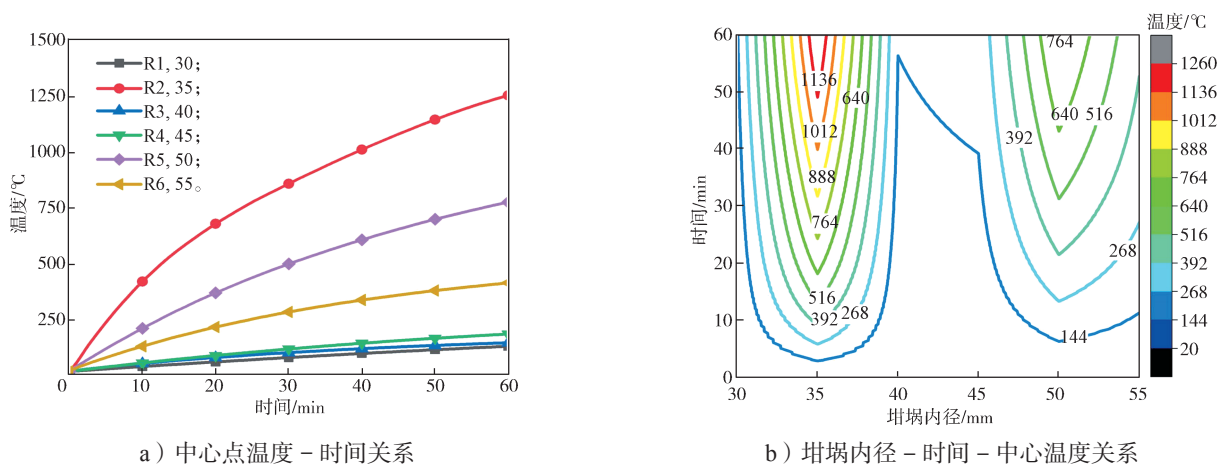


图 9 不同坩埚内径对微波加热石英砂的影响

Fig. 9 The influence of different crucible inner diameters on microwave heating of quartz sand

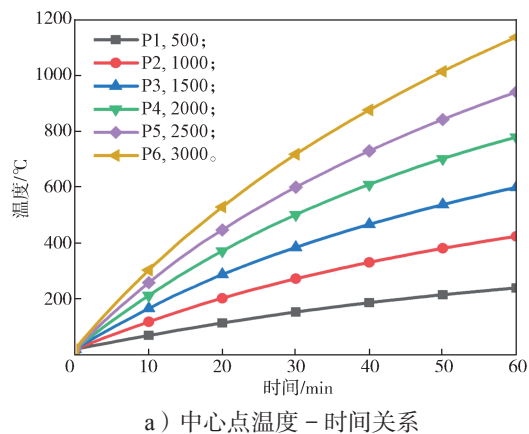
由图 9a 中心点温度 - 时间关系曲线可知, 随着微波加热的进行, 石英砂温度不断升高; 然而, 随着坩埚内径增加, 石英砂中心温度并未呈现相应的增加或减小, 而是呈现无规律变化。结合图 9a~b 可知, 随着坩埚内径增加, 石英砂料层中心温度变化呈现升高 - 降低 - 升高 - 降低的波动趋势。微波加热 60 min 条件下, 当坩埚内径为 35 mm 时, 微波加热温度最高, 而坩埚内径为 30 mm 时, 微波加热温度最低。这与 3.1 节结论相似, 坩埚内径的改变使得电磁场在谐振腔内的时空分布发生改变, 从而导致温度也呈现无规律变化。

### 3.3 微波功率对石英砂升温过程影响分析

微波炉内, 磁控管产生的电磁波经波导进入谐振腔, 形成稳定分布的电磁场, 其电场模与微波功率紧密相关。图 10 为不同微波功率对微波加热石英砂的影响关系曲线。

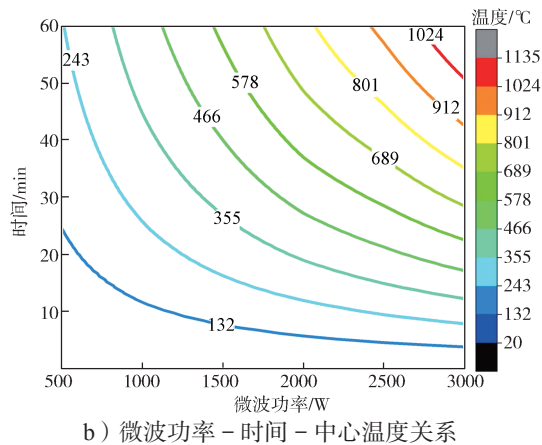
由图 10a 可知, 随着微波功率的增加, 石英砂料

层中心点温度随之升高; 不同微波功率引起的中心点温差随着微波加热过程的进行逐渐增大, 且在微波加热时间为 60 min 时达到最大值, 最大温差超过 150 °C。由图 10b 可知, 石英砂料层中心温度随着微波功率和时间的增加而增加。



a) 中心点温度 - 时间关系





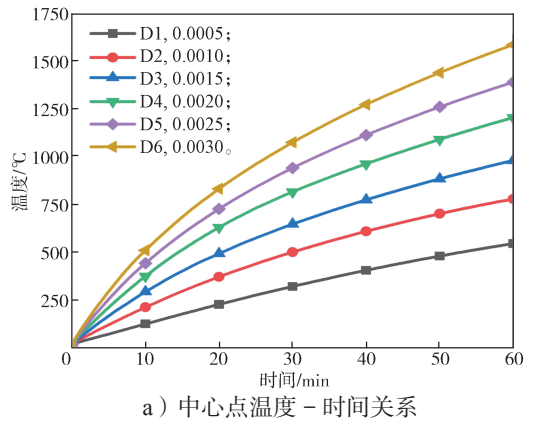
b) 微波功率-时间-中心温度关系

图 10 不同微波功率对微波加热石英砂的影响

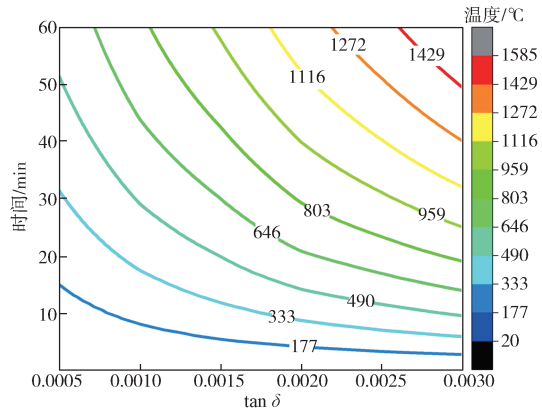
Fig. 10 The influence of different microwave powers on microwave heating of quartz sand

### 3.4 介电损耗角正切对石英砂升温过程影响分析

由于矿种来源及选冶工艺差异,不同来源的石英砂矿物具有不同的相对介电常数,在微波加热过程中,原矿差异直接影响石英砂颗粒的升温速率。图 11 为不同介电损耗角正切对微波加热石英砂的影响关系曲线。



a) 中心点温度-时间关系



b) 介电损耗角正切-时间-中心温度关系

图 11 不同介电损耗角正切对微波加热石英砂的影响

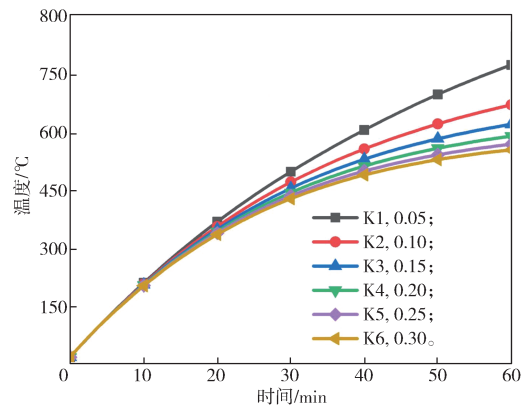
Fig. 11 The influence of different dielectric loss tangent on microwave heating of quartz sand

由图 11a 可知,随着介电损耗角正切值的增加,微波加热石英砂料层的中心温度随之升高,且介电损耗角正切值越大,中心温度越高。由图 11b 可知,石英砂料层中心温度随着介电损耗角正切值和时间的增加而增加。

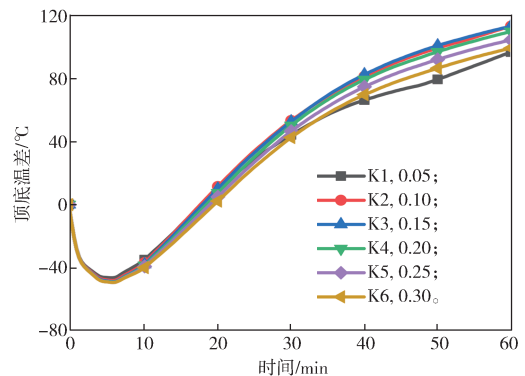
### 3.5 保温桶导热系数对石英砂升温过程影响

微波加热石英砂过程中,为保障石英砂料层的持续升温,采用氧化铝纤维保温桶进行保温处理。图 12 为不同导热系数的保温桶对微波加热石英砂影响关系曲线。

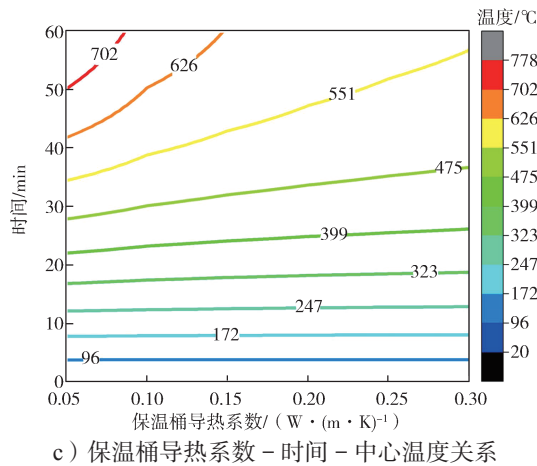
由图 12a 可知,随着导热系数的上升,石英砂料层中心温度随之下降,且加热时间越长,温度降低越明显。由图 12b 可知,微波加热过程中,不同导热系数引起的料层顶底温差随着加热过程的进行逐渐增大,且在加热时间为 60 min 时达到最大值,最大温差超过 100 °C。由图 12c 可知,当石英砂料层中心温度低于 300 °C 时,导热系数差异对料层中心温度影响不大;随着微波加热过程的进行,石英砂料层温度越高,导热系数差异对料层中心温度影响越大,这是因为石英砂料层温度逐渐升高,热损失由对流传热转变为辐射传热为主。



a) 中心点温度-时间关系



b) 顶底温差-时间关系



c) 保温桶导热系数 - 时间 - 中心温度关系  
**图 12 不同保温桶导热系数对微波加热石英砂的影响**  
**Fig. 12 The influence of different thermal conductivity coefficients of insulation buckets on microwave heating of quartz sand**

## 4 结论

基于麦克斯韦方程、多孔介质热传递模型、热辐射理论, 选用多物理场仿真软件 COMSOL, 建立考虑电磁、多孔热传递的石英砂料层微波加热数学模型, 并进行了网格无关性验证。结合建立的数学模型, 探究微波加热石英砂过程中的顶底温差, 底部温度最高, 中心次之, 顶部最低, 在微波加热温度高于 300 °C 后, 石英砂料层的热量散失方式由对流传热变为辐射传热, 料层表面与保温桶内壁存在热辐射交换, 致使料层顶部温度最低。

考察石英砂在谐振腔内的料层高度、坩埚内径、微波加热功率、介电损耗角正切、导热系数等因素对石英砂料层温度的影响规律。微波炉内电磁分布不均匀, 进而导致微波热源分布不均, 因此石英砂在炉内的空间排布影响石英砂升温过程; 微波功率越大、介电损耗角正切越大、保温桶导热系数越低, 微波加热石英砂升温速率越高。

### 参考文献:

[1] 张海啟, 马亚梦, 谭秀民, 等. 高纯石英中杂质特征及深度化学提纯技术研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 159-165.  
 ZHANG Haiqi, MA Yameng, TAN Xiumin, et al. Research Progress on Impurity Characteristics and Deep Chemical Purification Technology in High-Purity

Quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(4): 159-165.

- [2] 申保磊, 郑水林, 张殿潮. 高纯石英砂发展现状与趋势 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(5): 4-6.  
 SHEN Baolei, ZHENG Shuilin, ZHANG Dianchao. Development Status and Trend of Higher Purity Quartz Sand[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2012(5): 4-6.
- [3] 杨 彪, 杨 颖, 黄宏彬, 等. 微波加热性能优化研究现状 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2024, 49(4): 138-153.  
 YANG Biao, YANG Ying, HUANG Hongbin, et al. Research Status of Microwave Heating Performance Optimization[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 49(4): 138-153.
- [4] 高欣悦, 肖 玮. 基于可切换频率选择表面的微波加热数值研究 [J]. 微波学报, 2024, 40(3): 40-45.  
 GAO Xinyue, XIAO Wei. Numerical Investigation Based on Switchable Frequency Selective Surface for Microwave Heating[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(3): 40-45.
- [5] 胡成西, 刘江峰, 张志良. 青海东部地区石英矿 X 射线衍射分析 [J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1235-1240.  
 HU Chengxi, LIU Jiangfeng, ZHANG Zhiliang. XRD Analysis on Quartz Mineral in the Eastern of Qinghai Province[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(5): 1235-1240.
- [6] 林 敏, 徐顺秋, 刘子源, 等. 高纯石英 (SiO<sub>2</sub>) 评述 (一): 微量、微细粒铝硅酸盐矿物的活化与分离 [J]. 矿产综合利用, 2022(6): 17-20, 25.  
 LIN Min, XU Shunqiu, LIU Ziyuan, et al. Review for High-Purity Quartz(SiO<sub>2</sub>)(Part I): Activation and Separation of Trace, Fine-Grain Alumino Silicate Gangue[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 17-20, 25.
- [7] 林 敏, 贾 倩, 刘子源, 等. 高纯石英 (SiO<sub>2</sub>) 评述 (二): 晶格杂质的活化与分离技术 [J]. 矿产综合利用, 2022(6): 21-25.  
 LIN Min, JIA Qian, LIU Ziyuan, et al. Review for High-Purity Quartz(SiO<sub>2</sub>)(Part II): Activation and Separation of Lattice Impurities[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 21-25.
- [8] 杨大兵, 董方源, 韩 涛, 等. 低品位脉石英热压浸

- 出工艺动力学研究[J]. 非金属矿, 2024, 47(增刊5): 69-72.
- YANG Dabing, DONG Fangyuan, HAN Tao, et al. Investigation of the Kinetics of Hot Press Leaching for Low-Grade Vein Quartz[J]. Non-Metallic Mines, 2024, 47(S5): 69-72.
- [9] 侯清麟, 王迎霞, 侯熠徽. 剔除硅石矿中气液包裹体方法的研究[J]. 包装学报, 2019, 11(6): 38-42.
- HOU Qinglin, WANG Yingxia, HOU Yihui. Study on Gas-Liquid Inclusion Methods for Removing Silica Ores[J]. Packaging Journal, 2019, 11(6): 38-42.
- [10] 陈艳, 左兰兰, 吉川昇, 等. 微波场中加热水的模拟计算[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2006, 23(4): 394-398.
- CHEN Yan, ZUO Lanlan, YOSHIKAWA Noboru, et al. Modeling Calculation of Heating Water in Microwave Field[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2006, 23(4): 394-398.
- [11] 王亚文, 张正平, 肖玮. 应用于微波加热的可重构周期金属阵列研究[J/OL]. 微波学报, 1-7[2024-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1493.TN.20240718.1331.006>.
- WANG Yawen, ZHANG Zhengping, XIAO Wei. A Study on Reconfigurable Periodic Metal Array for Microwave Heating[J/OL]. Journal of Microwaves, 1-7[2024-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1493.TN.20240718.1331.006>.
- [12] 申士富. 高纯石英砂研究与生产现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006(5): 13-16.
- SHEN Shifu. The Actuality of Study and Manufacture in Higher Purity Quartz[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2006(5): 13-16.
- [13] 温利刚, 贾木欣, 付强, 等. 基于扫描电子显微镜-X射线能谱的矿物自动分析系统(BPMA)测定高纯石英砂中杂质矿物[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(8): 845-850.
- WEN Ligang, JIA Muxin, FU Qiang, et al. Determination of Impurity Minerals in High-Purity Quartz by SEM-EDS-Based Automated Process Mineralogy Analyzing System (BPMA)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(8): 845-850.
- [14] 王伟, 王海磐, 林世寅. 电磁场中热电偶测温的热传导误差分析[J]. 中国医学物理学杂志, 1999, 16(1): 41-43.
- WANG Wei, WANG Haipan, LIN Shiyin. The Analysis for Thermal Conduction Errors of Thermocouple Measurement in Electromagnetic Field[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 1999, 16(1): 41-43.
- [15] 刘泰荣. 酸浸辅助微波场去除石英砂中气液包裹体的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- LIU Tairong. Research on Removal of Fluid Inclusions from Quartz Sand Through Acid Leaching-Aided Microwave Field[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [16] 李贺. 微波辐射下煤体热力响应及其流-固耦合机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- LI He. Study on Thermal Response and Fluid-Solid Coupling Mechanism of Coal Under Microwave Radiation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [17] 李静. 微波和酸蚀作用去除石英砂中气液包裹体及机理研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2013.
- LI Jing. Study on Removal of Gas-Liquid Inclusions in Quartz Sand by Microwave and Acid Etching and Its Mechanism[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2013.
- [18] 银锐明, 李静, 侯清麟, 等. 微波和酸蚀作用下石英砂中气液包裹体的去除机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 389-394.
- YIN Ruiming, LI Jing, HOU Qinglin, et al. Removal Mechanism of Gas-Liquid Inclusions in Quartz Sand Under Microwave and Acid Corrosion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(2): 389-394.
- [19] 李南南. 微波加热活性炭的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- LI Nannan. Numerical Simulation of Microwave Heating Activated Coke[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [20] 王维涛. 砂浆介电损耗对微波加热粗骨料强度折减影响规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- WANG Weitao. Study on the Influence of Mortar Dielectric Loss on Strength Reduction of Coarse Aggregate Under Microwave Heating[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [21] 吴峰, 王刚, 马晓迅. 间断等温边界下多孔介质方腔内非热平衡自然对流传热数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(4): 712-718.
- WU Feng, WANG Gang, MA Xiaoxun. Numerical



Simulation of Natural Convection in a Square Cavity of Porous Media with Partially Thermal Active Sidewalls[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese

Universities, 2014, 28(4): 712-718.

(责任编辑: 李玉华)

## Research on Microwave Heating Model and Simulation of Quartz Sand

HOU Qinglin, ZHAO Weiyi, HOU Yihui, HE Xiangqiang

( College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China )

**Abstract:** Given the increasing demand for high-end quartz materials and the depletion of crystal resources, a new approach has been explored to prepare high-purity quartz sand through refining processes using vein quartz silica ore with slightly higher impurities. A mathematical model for microwave heating of quartz sand is constructed, and the heating law of quartz sand under microwave radiation is theoretically analyzed. The interaction relationship between temperature, microwave power, time and other key factors when removing gas-liquid inclusions in microwave heating technology is clarified. The results show that the heating rate of quartz sand is positively correlated with microwave power and dielectric loss tangent, while negatively correlated with the thermal conductivity of the insulation bucket. Moreover, changes in the height of the quartz layer and the inner diameter of the crucible can also cause deviations in the distribution of microwave heat sources, leading to irregular temperature changes.

**Keywords:** quartz sand; microwave heating; simulation; dielectric constant

.....

( 上接第 16 页 )

## Preparation and Properties of Modified Halloysite Nanotubes/Poly(Lactic Acid) Nanocomposites

JING Chunhua

( Jiangsu Ruixiang Chemical Co., Ltd., Yizheng Jiangsu 211400, China )

**Abstract:** Poly(lactic acid) (PLA) is regarded as a promising biodegradable material with good application prospect. To further improve the comprehensive properties of PLA, 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) was used to modify the halloysite nanotubes (HNTs) to obtain the modified halloysite nanotubes (mHNTs), which was then used as nanofillers and melting blended with PLA matrix to prepare the PLA/mHNTs nanocomposites. The mechanical performance, thermal behavior, and the crystalline property of the nanocomposites were investigated. It was found that the mHNTs dispersed well in the PLA matrix, and compared to the pure PLA, the tensile strength of the prepared nanocomposites was improved by 33% and the crystalline degree was increased by 10.5%, respectively.

**Keywords:** poly(lactic acid); modified halloysite nanotube; nanocomposite; mechanical property