北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

微波加热中木材内部温度场的电磁热耦合模拟

王志闯 王婷欢 杨晨 何正斌 王振宇 伊松林

Electromagnetic-thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating

Wang Zhichuang, Wang Tinghuan, Yang Chen, He Zhengbin, Wang Zhenyu, Yi Songlin

引用本文:
王志闯, 王婷欢, 杨晨, 何正斌, 王振宇, 伊松林. 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(9):162–170. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250101
Wang Zhichuang, Wang Tinghuan, Yang Chen, He Zhengbin, Wang Zhenyu, Yi Songlin. Electromagnetic–thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):162–170. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250101

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250101

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

格库铁路桥路过渡段风沙流场数值模拟
Numerical simulation on wind–sand flow field at the bridge and roadbed transition section of Golmud–Korla Railway in northwestern China
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 75–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210213

古建筑墙体木柱缺陷对其安全性影响数值模拟研究
Numerical simulation on the influence of wall wood column defects on the safety of ancient building
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 132–145. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210341

三温模型和基于阻抗蒸散发模型的整合与模拟分析
Integration and simulation analysis of temperature gradient based 3T and resistance–based evapotranspiration model
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 115–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230198

油用牡丹茎秆切割本构方程及其参数测定
Cutting constitutive equation and its parameter measurement of oil tree peony stem
北京林业大学学报, 2020, 42(11): 138–144. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200229

树干横力弯曲中性轴的数值模拟
Numerical simulation of neutral axis in transverse bending of tree trunk
北京林业大学学报, 2024, 46(8): 1–14. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240073

填缝型微波膨化木基金属复合材料制备及其性能表征
Preparation and property characterization of crack–filled type microwave puffed wood based metal composites
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 118–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210209

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250101

微波加热中木材内部温度场的电磁−热耦合模拟

王志闯　王婷欢　杨　晨　何正斌　王振宇　伊松林
（林木资源高效生产全国重点实验室，木材科学与工程北京市重点实验室，木质材料科学与应用教育部重点实验室，
北京林业大学材料科学与技术学院，北京 100083）

摘要:【目的】微波加热在木材加工中已显现高效优势，但微波场强分布如何影响木材内部温度变化尚不清晰。本研究拟采用数值模拟，探究微波场分布对木材内部温度场的作用规律。**【方法】**基于电磁场和传热场耦合理论构建三维有限元模型，模拟不同微波功率（3.6、4.5、5.4 kW）作用下腔体电场分布特征及木材内部温度场演化规律。通过试验验证模型准确性，并采用均方根误差（RMSE）量化评估仿真精度。**【结果】**微波加热 30 s 内木材次外层与中心层温度的仿真结果和试验结果一致，两者的 RMSE 值随微波功率的增大而增大，次外层和中心层的 RMSE 值最大分别为 8.1 和 8.8 ℃，表明该仿真模型准确性较高。在木材微波加热过程中，不同波导输入的微波因干涉叠加形成高、低能区域，腔壁的反射波进一步干涉强化或削弱电场，最终形成驻波效应，导致电场强度呈现空间非均匀分布。高、低能区域电磁能−热能转化效率的差异，导致木材升温速率呈现差别，表明微波场强分布模式能直接调控木材内部温度变化规律。当微波功率增大时，电场分布模式保持不变，但最大电场强度显著增强（$p = 0.011$），木材的升温速率随之加快，表面与内部温差增大。**【结论】**建立的三维有限元模型可以对微波腔体中电场的强度和分布特征，以及木材的温度变化进行准确预测。本研究阐明的微波加热木材过程中电磁−热耦合机制，能够为优化木材微波加热工艺提供理论依据。

关键词：木材干燥；微波加热；数值模拟；电磁方程；传热方程；微波场强分布；温度预测
中图分类号：S781.71；TQ021.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)09−0162−09
引文格式：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(9)：162−170. Wang Zhichuang, Wang Tinghuan, Yang Chen, et al. Electromagnetic-thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 162−170.

Electromagnetic-thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating

Wang Zhichuang　Wang Tinghuan　Yang Chen　He Zhengbin　Wang Zhenyu　Yi Songlin
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, Key Laboratory of Wooden Material Science and Application of Ministry of Education, School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］Microwave heating technology has shown great potential in wood processing due to its high efficiency. However, the relationship between distribution of microwave electric field and evolution of temperature within wood remains unclear. To address this issue, this study investigated the influence of microwave field distribution on internal temperature field in wood using numerical simulation.［**Method**］A three-dimensional finite element model was established based on coupled electromagnetic and heat transfer theory. The model was used to simulate the electric field distribution within the microwave cavity and the

收稿日期: 2025−03−21　**修回日期:** 2025−08−25
基金项目: 国家重点研发计划（2023YFD2201402）。
第一作者: 王志闯。主要研究方向：木材热加工。Email: Wangzhichuang0112@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料学院。
责任作者: 何正斌，教授，博士生导师。主要研究方向：木材热加工。Email: hzbcailiao@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

temperature evolution inside wood under different microwave power levels (3.6, 4.5, and 5.4 kW). The accuracy of model was validated experimentally, with the simulation precision quantitatively evaluated using root mean square error (RMSE). [**Result**] During the 30 second microwave heating process, the simulated temperature changes in the sub-surface and core layers of the wood agreed well with experimental measurements. The RMSE between simulation and experimental results increased with higher microwave power, reaching maximum values of 8.1 and 8.8 ℃ for the sub-surface and core layers, respectively, indicating high model accuracy. Microwave energy from different waveguides interfered and superimposed within the cavity, forming high- and low-energy zones. Reflections from the cavity walls further enhanced or weakened the electric field through interference, ultimately resulting in a standing wave effect and a spatially non-uniform electric field distribution. The difference in electromagnetic-to-thermal energy conversion efficiency between high- and low-energy zones led to varying heating rates within the wood. It demonstrates that the microwave field distribution directly governs the internal temperature evolution. Although the electric field distribution pattern remained consistent across power levels, higher microwave power significantly increased the maximum electric field intensity (p = 0.011). This accelerates the heating rate and enlarging the temperature difference between the surface and interior of the wood. [**Conclusion**] This three-dimensional finite element model accurately predicts the electric field distribution and thermal response in wood under microwave heating. This study clarifies the electromagnetic-thermal coupling mechanism, providing a theoretical basis for optimizing wood microwave heating.

Key words: wood drying; microwave heating; numerical simulation; electromagnetic equation; heat transfer equation; microwave field intensity distribution; temperature prediction

木材是一种天然多孔可再生材料[1]，因羟基丰富而吸湿性强、尺寸稳定性差[2]。在 160 ~ 230 ℃ 的低氧环境[3]中进行高温热处理，可封闭羟基、重组半纤维素[4]，从而显著提升生物耐久性[5]与尺寸稳定性[6]。然而，传统对流加热以热空气为介质，热阻大、升温慢，能量散失严重[7]，已成为制约高温热处理规模化应用的主要瓶颈。微波加热利用交变电磁场驱动木材内部极性分子（主要为吸着水和极性基团）[8]高速取向与摩擦生热[9]，具有体加热、升温快、能耗低、易控氧等显著优势[7]，被视为突破传统热处理效率瓶颈的潜在途径。但由于木材介电常数随含水率、温度、密度呈现显著非线性变化[10]，微波场分布与热量传递呈强耦合关系，造成内部温度梯度复杂，热点难以预测，直接影响热处理均匀性与产品质量[11]。因此，阐明木材微波加热过程中的热量传递规律，是实现微波技术在木材热处理领域安全、高效、可控应用的关键前提。

木材微波加热过程中的传热规律由“材性”和“场性”共同决定：前者指含水率、介电常数等木材自身属性，后者指电场强度及其空间分布。已有研究多聚焦于材性影响：李贤军[12]发现在微波加热过程中，木材内部温度梯度方向始终与含水率梯度相反；贺霞[13]指出介电特性差异是决定温度分布的主要因素，但对场性作用关注不足。目前，场强分布仍依赖“水负载法”间接推算[14]：在腔体内不同位置放置等质量水，通过温度的变化反算微波场强。该方法忽略了木材介电常数与水的显著差异，所得场强并非木材内部的实际场分布，导致“木材–微波场”耦合机制缺乏定量描述。因此，有必要建立能够直接解析木材内部场强分布的电磁–热耦合模型，以厘清场性因素对木材温度演化的真实影响，为精准调控微波干燥/改性工艺奠定理论基础。

因此，为阐明微波场分布模式对木材内部传热的影响机理，本研究拟以绝干材为研究对象，构建电磁–热耦合模型。通过求解麦克斯韦方程组获得微波场分布，耦合傅里叶定律描述木材内部瞬态传热，系统分析不同加热参数下的温度演化规律，并以实测数据验证模型精度，以期为木材微波加热的精准控温提供理论支撑。

1　微波加热木材三维有限元仿真模型的构建

为研究木材微波加热过程中热量的传递过程，本研究通过有限元软件仿真，主要内容包括条件假设、电磁场分布的计算、热传导的计算、边界条件的设定、仿真模型的构建及网格划分。

1.1　条件假设

仿真模拟时木材的微波加热过程为三维非稳态过程，实际加热情况与数值模拟之间存在一定差异，特别是在微波加热过程中，电磁场的变化会导致木

材的参数发生难以量化的改变。因此，在模型建立过程中需要通过假设，对数值模型进行合理简化[15]。对目前的模拟计算做出以下假设：木材在弦向、径向和纵向上对称；在恒定的热电性质和介电性质下求解传热方程，忽略温度影响[16]；木材与空气的初始温度相同；木材处理过程中的相变、传质和化学反应忽略不计；波导及发射天线均为铜制，能够完全反射微波，无法泄露和吸收微波，在边界处没有微波损耗[17]。

1.2 电磁场分布的计算

麦克斯韦方程组通过 4 个偏微分方程精确描述了电磁场分布与能量传播，其中高斯定理阐明电荷如何产生，高斯磁定律为磁单极子不存在性提供理论依据，法拉第磁感应定律揭示时变磁场如何激发电场，麦克斯韦−安培定律阐明电流与时变电场共同产生磁场的规律。可以联合麦克斯韦方程与热传导方程对微波加热过程中热量的传递过程进行求解计算[18]，木材通过电磁损耗产生热源，热源导致木材内部温度分布不均匀，因此木材的热量会从温度高的区域向温度低的区域不断传递，整个过程能量守恒。本文中的电磁场由麦克斯韦方程组计算，其微分形式[19]如下。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho_{\mathrm{f}} \tag{1}$$

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

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

$$\nabla \times H = J_{\mathrm{f}} + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量，C/m^2；B 为磁感应强度，Wb/m^2；E 为电场强度，V/m；H 为磁场强度，A/m；J_{f} 为电流密度，A/m^2；ρ_{f} 为电荷密度，C/m^3；t 为时间，s。

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

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

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 为电导率，S/m；ω 为角频率，rad/s；ε_0 为真空介电常数，F/m；j 为虚数单位；μ_0 为真空磁导率，H/m；c 为光速，取值 3.0×10^8 m/s。

相对介电系数可以表示为

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

式中：ε' 为介电常数，F/m；ε'' 为损耗因子。

当电磁波与电介质材料相互作用时，电场和磁场产生的电磁损耗转化为热量。

$$Q = Q_{\mathrm{e}} + Q_{\mathrm{m}} \tag{8}$$

式中：Q 为电磁损耗产生的总热量，W/m^3；Q_{e} 为电阻损耗产生的热量，W/m^3；Q_{m} 为磁损耗产生的热量，W/m^3。

由于木材是非磁性材料，方程可简化为

$$Q = Q_{\mathrm{e}} \tag{9}$$

$$Q = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon'' E^2 \tag{10}$$

式中：f 为频率，Hz。

1.3 热传导的计算

在对木材进行微波加热过程中，木材内部的热量会随时间不断积累，此时木材温度高于环境温度，木材中的热量会以热传导的方式从内向外传递，再通过热对流的方式扩散到空气中。热传导过程是一个三维非稳态过程，根据傅里叶热传导模型建立传热控制方程[16]。

$$\rho C_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathrm{k}\nabla T) + Q \tag{11}$$

式中：ρ 为木材密度，kg/m^3；C_{p} 为比热容，J/(kg·K)；T 为温度，K。

1.4 边界条件的设定

波导壁和反应腔体壁被设定为阻抗边界条件，并在频域内进行求解[17]，如下式所示。

$$\sqrt{\frac{\mu_0\mu_{\mathrm{r}}}{\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}} - j\sigma/\omega}}\boldsymbol{n}\times H + E - (\boldsymbol{n}\cdot E)\boldsymbol{n} = (\boldsymbol{n}\cdot E_{\mathrm{s}})\boldsymbol{n} - E_{\mathrm{s}} \tag{12}$$

式中：μ_0 为自由空间的磁导率，取值 $4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2；μ_{r} 为相对磁导率，E_{s} 为源电场，V/m；$\boldsymbol{n}$ 为法向量。

微波通过波导传播，波导内的边界被激发以形成一个横电模式（即没有电场分量沿着传播方向），微波在介质中的传播能力可由传播常数 β 来表示[18]。

$$\beta = \frac{2\pi}{c}\sqrt{v + v_{\mathrm{c}}^2} \tag{13}$$

式中：v 是微波频率，Hz；v_{c} 为截止频率，Hz；c 为光速，取值 3.0×10^8 m/s。

v_{c} 截止频率可以表示为

$$v_{\mathrm{c}} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{u}{b}\right)^2} \tag{14}$$

式中：m 和 u 是模式数，a 和 b 分别是波导横截面的长度和宽度。本研究中使用的是 TE10 模式，其中 $m = 1$，$u = 0$，频率为 2.45 GHz。

木材的初始温度及环境温度均为 20 ℃，木材内部点 x 的初始条件[19]可以表示为

$$T(x, 0) = 20 \tag{15}$$

在传热问题中有 3 种常见的边界条件类型，本研究采用第三类边界条件，其方程如下所示。

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}=0 \tag{16}$$

$$h[T(x,t)-T_{\mathrm{f}}]=-\lambda\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=\frac{1}{2}\delta} \tag{17}$$

式中：h为对流换热系数，W/(m^2·K)；t为时间，s；λ为导热系数，W/(m·K)；T_{f}为环境温度，℃；δ为样品径向尺寸，m。

1.5　仿真模型的构建

在有限元软件中 1∶1 构建与试验设备相同的几何模型(图 1)，参数如表 1 所示，模型构建中用到的材料参数如表 2 所示。

1.6　网格划分

在有限元软件分析中，网格尺寸的选择对仿真计算的精度和计算时间有显著影响[23]。木材是微波设备中的主要加热对象，其内部的电磁场和温度场变化较为剧烈，为能够保证模型的准确性，需要采用较小的网格尺寸。材料最佳的有限元网格尺寸与自由空间波长和相对介电常数密切相关[24]，为实现 2.45 GHz 频率下精确的评估，使用式(18)计算有限元网格的尺寸[25]，该模型的网格划分如图 2 所示。

$$d=\frac{\lambda}{6\sqrt{\varepsilon'}} \tag{18}$$

式中：d 为网格尺寸，mm；λ 为自由空间波长，mm。

2　验证试验

2.1　材　料

9 块泡桐(*Paulownia tomentosa*)分为 3 组，均为弦切材，产地为河南许昌，规格为 100 mm(弦向)×50 mm(径向)×80 mm(纵向)，绝干材，初始平均密

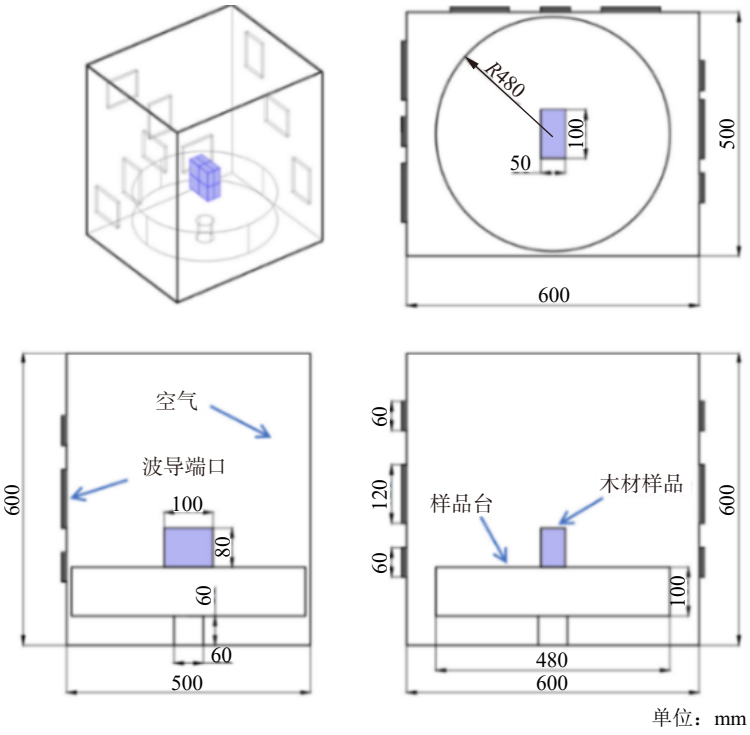


图 1　微波加热仿真模型

Fig. 1　Simulation model of microwave heating

表 1　几何模型的全局参数

Tab. 1　Overall parameters of geometric model

参数	取值	名称	参数	取值	名称
xov	600 mm	微波腔体宽度	xwo	50 mm	木材径向尺寸
yov	500 mm	微波腔体厚度	zwo	80 mm	木材纵向尺寸
zov	600 mm	微波腔体高度	rpl	480 mm	样品台直径
xwg	120 mm	波导宽度	hpl	60 mm	样品台高度
ywg	10 mm	波导厚度	T_0	20 ℃	初始温度
zwg	60 mm	波导高度	f_0	2.45 GHz	微波频率
ywo	100 mm	木材弦向尺寸	P	3.6、4.5、5.4 kW	微波功率

表 2 材料的热电性能

Tab. 2 Thermoelectric properties of materials

物料性质	单位	木材	空气	铜
相对介电常数	1	$1.765 \sim 0.122j$[20]	1	1
相对磁导率	1	1	1	1
电导率	S/m	0	0	5.998×10^7[17]
导热系数	W/(m·K)	0.28 ~ 0.56[21]	0.026	400
密度	kg/m^3	237		8 960
恒压热容	J/(kg·K)	1 600 ~ 2 300[22]		385

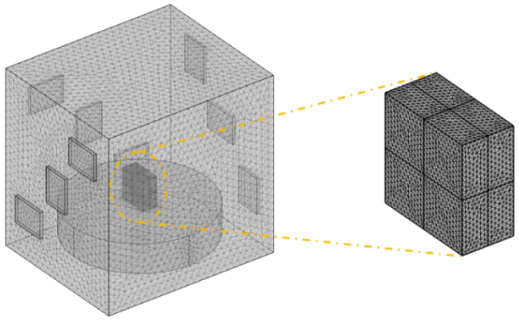


图 2 微波腔体及木材样品网格划分

Fig. 2 Microwave cavity and mesh generation for the wood sample

度为 237 kg/m^3。

2.2 木材内部温度测试试验

在微波设备中对木材进行加热，设备的各项参数如表 1 所示。首先将两个光纤传感器置于木材样品的#1 和#2 位置，分别用于测量木材的中心层温度和次外层温度，其中 X、Y、Z 这 3 个方向分别对应木材的径向、弦向和纵向(图 3)。然后，将木材样品放入微波设备中，微波功率分别设定为 3.6、4.5、5.4 kW，将其加热 30 s，通过连接数据采集系统的光纤传感器采集木材样品的温度数据，并每秒记录一次数据。最后，试验结束后将木材样品冷却至室温后取出。

2.3 仿真与测试结果的比较

为验证仿真模型准确性，将仿真得出的次外层、中心层瞬态特征点温度分布与试验结果进行比较，并采用均方根误差[18]进行计算。

$$R_{\mathrm{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{v}(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{E}})^2} \tag{19}$$

式中：R_{MSE} 为均方根误差；T_{S} 为仿真温度，℃；T_{E} 为试验测量温度，℃；N 为加热过程中记录的时间步长总数。

3 结果与分析

3.1 微波腔体电场强度分布的仿真结果

不同微波功率条件下微波腔体的电场强度的大小有所差异，电场强度对木材传热性能的影响主要体现在电场分布的均匀性。因此，为研究在微波作用下的传热性能，首先需要明确不同微波功率条件下，微波腔体中电场的分布情况。本研究通过有限元软件仿真得到了微波功率 3.6 kW、加热时间 30 s 条件下微波腔体及木材内部的电场分布情况，并耦合热传导方程模拟木材温度变化情况。此外，通过调整微波腔体的输入功率，探究了不同功率对于微波腔体中电场分布及强度的影响(图 4)。

由于多个波导口同时向微波腔体内输入微波，并且微波会被金属壁不断反射，形成具有高、低能量区域的非均匀分布的电场(图 4a)。当多个波导口同时向微波腔体内输入微波时，来自不同波导口的微波会相互干涉发生叠加，这种叠加现象会导致某些区域的电场强度增强形成高能量区域，而另一些区域电场强度减弱，形成低能量区域[26]。此外，当微波与金属壁相遇会发生反射[27]，反射波与原始波相遇后会相互干涉，部分区域因反射波的叠加而强化，另外一些位置会因为相位相反的反射波相互抵消而减弱，形成电场强度分布不均匀的特点。木材内部的电场强度也呈现非均匀分布(图 4b)，导致木材内部区域升温速率有差异。如式(10)所示，电磁功率损

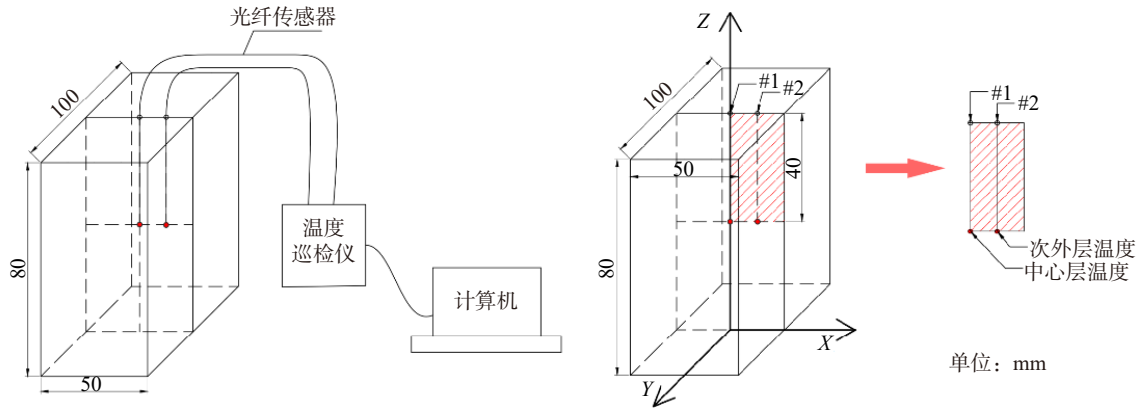
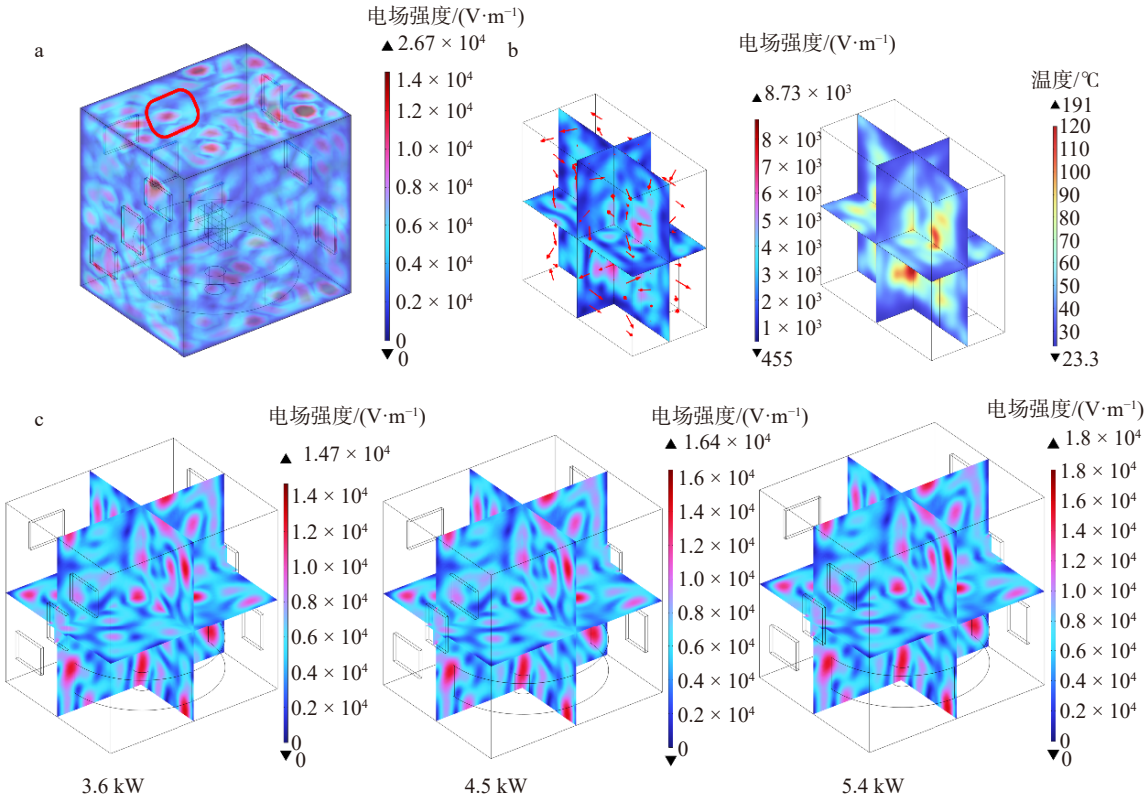


图 3 木材内部温度采集位置

Fig. 3 Internal temperature collection location of wood



a. 微波腔体的电场分布示意图(功率 3.6 kW)；b. 木材内部温度与电场分布示意图(功率 3.6 kW，处理时间 30 s)；c. 不同功率条件下电场分布示意图

图 4　微波腔体及木材内部电场分布示意图

Fig. 4　Schematic diagram of electric field distribution in the microwave cavity and inside the wood

耗密度与电场强度的平方成正比，因此电场强度越高，电磁功率损耗密度越高，电磁–热量转换效率就越高[28]。木材内部的电场分布不均匀，在高能区域微波转化为热能的能力更强，因此形成热点，相反在低能区域微波转化为热能的能力更弱，木材升温速率有所差别。从各波导口向微波腔体输入不同功率的微波，微波腔体中的电场分布情况一致，但最大电场强度有所不同。微波总发射功率分别为 3.6、4.5、5.4 kW 时，相对应的微波腔体中电场强度最大值可达 1.47×10^4、1.64×10^4、1.8×10^4 V/m，微波功率增加，微波腔体中的最大电场强度增加(图 4c)。

3.2　木材内部电场与温度分布的仿真结果

在微波作用下，木材内部的极性分子在高频磁场中的作用下发生重排，极性分子之间的摩擦会导致材料的整体加热，电磁能转化为热能。在不同微波功率(3.6、4.5、5.4 kW)及不同时间(0、10、20、30 s)作用下，模拟木材内部的电场和温度分布情况(图 5)。

木材内部的电场强度随功率增加而增加，当微波功率分别为 3.6、4.5、5.4 kW 时，对应的电场强度最大值分别 8.73×10^3、9.76×10^3、1.07×10^4 V/m (图 5)。这表明微波功率越大，单位时间内传递的能量越多，能量以电磁场的形式作用于木材，导致电场强度增强，木材中的极性分子在更强的电场作用下，受到更大的作用力，从而加速分子振动和能量转换过程，进而产生更多热量。因此，随着微波功率增大和加热时间延长，木材内部的最高温度逐渐提高。当加热时间为 30 s 时，在微波功率 3.6、4.5、5.4 kW 条件下，木材内部最高温度分别达到 191、233、315 ℃，最低温度分别为 23.3、24.2、26.3 ℃。在相同微波功率条件下，随着加热时间的延长，木材内部的温度不断上升。当微波功率为 5.4 kW，加热时间为 5、10、20、30 s 时，木材内部最高温度分别达到 97.4、157、248、315 ℃，最低温度分别为 20.6、21.6、24.2、26.3 ℃。

从图 5 中木材内部温度分布情况可知，木材中心区域的温度要高于木材边缘区域的温度。当微波加热时间 30 s 时，木材表面与内部温度差值与微波功率成正相关(图 6)。在相同加热时间内，微波输入功率越高，木材内部分子振动越剧烈，所产生的热量越多。在微波加热过程中，微波腔体为有限空间，冷热空气由于密度不同而在腔内自然升降，在冷热气体交汇处形成环流[29]，腔内的气体在腔内自由运动换热，木材表面与空气不断进行自然对流换热，导致木材表面的热量不断向空气中散失。木材表面温度

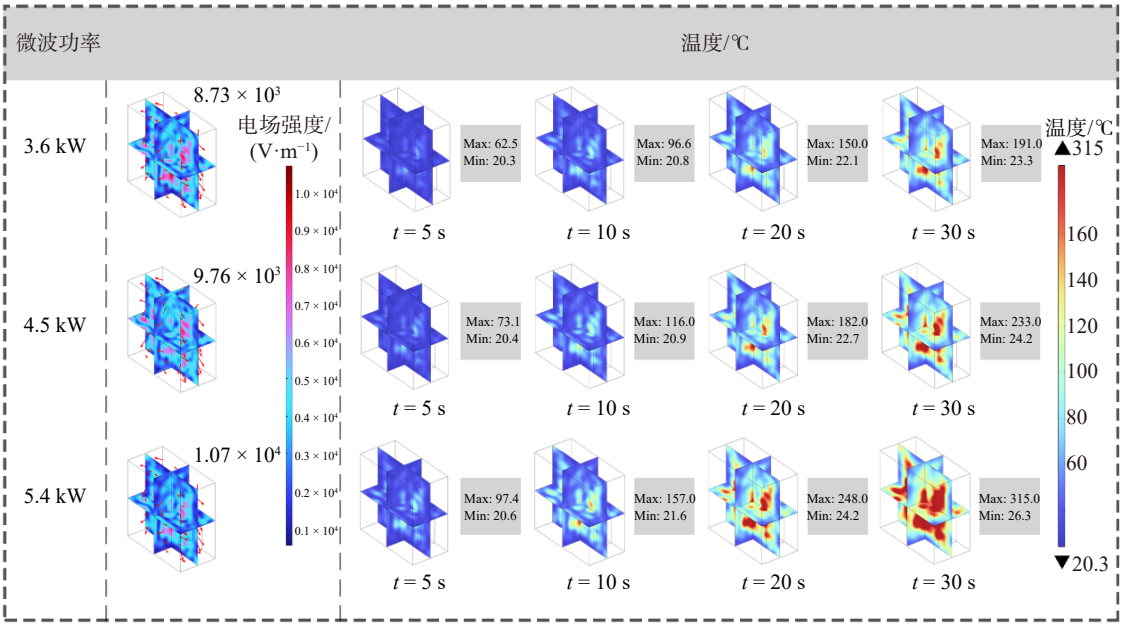


图 5 不同处理条件下木材的电场和温度分布的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of electric field and temperature distribution of wood under different processing conditions

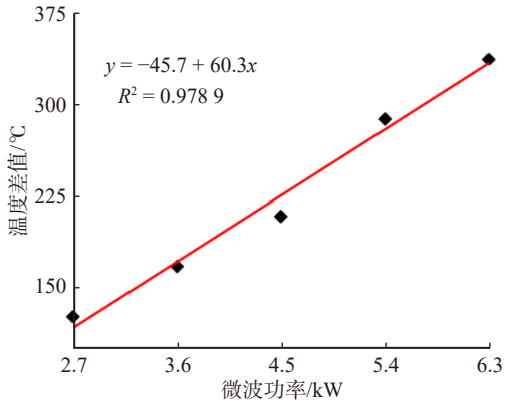


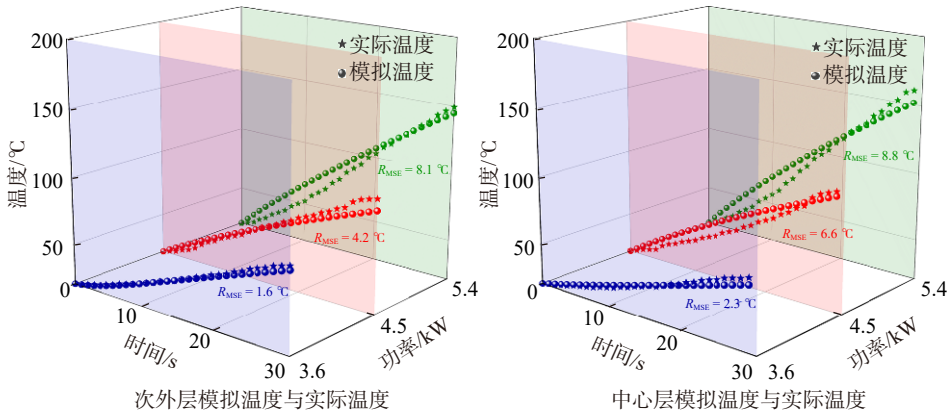
图 6 木材表面和内部温度差值与微波功率的关系(加热时间 30 s)

Fig. 6 Relationship between wood surface-interior temperature difference and microwave power (30 second heating time)

低于内部温度，木材内部的热量通过热传导实现转移，木材的热传导主要通过固体分子的振动传递；木材内部温度高于表面时，内部的热能会激发相邻分子振动，逐步将热量传递至表面，随时间的延长，木材表层和内部的温度趋于均匀。

3.3 仿真模型的验证

为了验证模型的准确性，将测试值与理论值进行对比(图 7)。根据式(19)的计算，在功率为 5.4 kW 的条件下，次外层和中心层的均方根误差均为最大，分别为 8.1 和 8.8 ℃；在功率为 3.6 kW 时，次外层和中心层的均方根误差最小，分别为 1.6 和2.3 ℃。不同微波功率条件下，木材中心层和次外层温度均随时间的延长而逐步递增，仿真模型预测曲线与试验测试曲线的变化趋势相符。另外，随着微波功率的增加，均方根误差亦随之上升。但本研究的均方根误差值明显低于先前研究的结果[22, 30–31]，这说明本研究的模拟效果较好。



R_{MSE} 为均方根误差。

图 7 木材的模拟温度与实际温度

Fig. 7 Simulated and actual temperature of wood

4 结　　论

本研究通过耦合电磁场和温度场，建立了微波加热木材三维有限元仿真模型，并对模型进行了试验验证。基于此，探究了微波加热过程中不同微波功率和加热时间对微波场强分布和木材的温度分布的影响。主要研究结论有以下 3 点。

（1）微波加热 30 s 过程中，木材样品的次外层和中心层的仿真模拟温度与实际温度在数值和趋势上均趋于一致，仿真模型的均方根误差值会随微波功率的增大而增大，次外层和中心层的均方根误差值最大分别为 8.1、8.8 ℃，验证了该仿真模型的准确性。

（2）多波导口向微波腔体中同时输入微波时，不同波导的微波因干涉叠加形成高、低能量区域；当微波与金属壁的反射波进一步干涉强化或削弱电场，导致电场强度空间分布不均。此外，当微波功率从 3.6 kW 增加至 5.4 kW 时，电场分布模式保持不变，但最大电场强度从 1.47×10^4 V/m 增加至 1.80×10^4 V/m，增幅为 22.4%，最大电场强度随微波功率增大显著增强（$p = 0.011$）。

（3）木材样品的温度云图分布呈现中心区域温度高，边缘区域温度低的现象。当加热时间为 30 s 时，在微波功率为 3.6、4.5、5.4 kW 条件下，木材表面和内部温度差分别达到 167.7、208.8、288.7 ℃。微波功率越大，木材样品的升温速率越快，平均温度越高，表面和内部温差越明显。这表明木材加热效果由微波功率和加热时间共同决定，同时受表面散热与内部热传导的物理机制调控，在实际生产过程中需要优化功率和时间参数，以改善加热均匀性与效率。

本研究揭示了微波加热过程中微波场强与木材内部温度的分布规律，阐明了木材微波加热过程中的热量传递机制。研究结果不仅为优化微波加热工艺提供理论依据，还为推动绿色、高效热处理工艺的创新发展提供了新的研究方向。后续将进一步研究木材中水分分布差异对木材微波加热均匀性影响，以及加热过程的方向性对木材热量传递的影响。

参　考　文　献

[1] 张少军, 仲翔, 马尔妮, 等. 碱木质素与超支化聚丙烯酸酯乳液复配改性速生青杨的尺寸稳定性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(11): 118−127.
Zhang S J, Zhong X, Ma E N, et al. Dimensional stability of fast-growing *Populus cathayana* modified with the compound of alkali lignin and hyperbranched polyacrylate emulsion[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(11): 118−127.

[2] 王博, 何正斌, 王振宇, 等. 氯化锌浸渍处理对樟子松热处理材尺寸稳定性和处理能耗的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 123−131.
Wang B, He Z B, Wang Z Y, et al. Effects of zinc chloride impregnation treatment on dimensional stability and energy consumption of heat-treated Mongolian scots pine[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 123−131.

[3] 陆健, 丁涛, 施静波. 热处理升温速率对柞木微观结构和物理力学性能的影响 [J]. 林业工程学报, 2023, 8(6): 76−83.
Lu J, Ding T, Shi J B. Effect of heat treatment temperature increase rate on microstructure and physical and mechanical properties of *Quercus serrata* wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(6): 76−83.

[4] 王旭洁, 姚三川, 雒翠梅, 等. 路易斯酸预处理对木材热降解特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 133−140.
Wang X J, Yao S C, Luo C M, et al. Effects of Lewis acid pretreatment on thermal degradation characteristics of wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 133−140.

[5] 陈江. 抽提物对热处理木材颜色及耐腐性的影响 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2024.
Chen J. The effect of extractives on the color and decay resistance of heat-treated wood [D]. Xi'an: North West Agriculture and Forestry University, 2024.

[6] Hill C, Altgen M, Rautkari L. Thermal modification of wood: a review: chemical changes and hygroscopicity[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(11): 6581−6614.

[7] Li H, Zhao Z Y, Xiouras C, et al. Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 114: 109316.

[8] 朱小华. 电磁场下的热力学及其应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Zhu X H. Thermodynamics in the presence of electromagnetic fields and its applied research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[9] 徐恩光, 林兰英, 李善明, 等. 木材微波处理技术与应用进展 [J]. 木材工业, 2020, 34(1): 20−29.
Xu E G, Lin L Y, Li S M, et al. Wood microwave treatment technology and its applications[J]. Wood Industry, 2020, 34(1): 20−29.

[10] Saeed N, Malen J A, Chamanzar M, et al. Experimental correlation of thermal conductivity with dielectric properties of wood and wood-based materials: possibilities for rapid in-situ building energy evaluation[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104178.

[11] 熊令明. 木材微波处理电磁场和温度场仿真研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
Xiong L M. Simulation study on electromagnetic field and temperature field of microwave treatment wood[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.

[12] 李贤军. 木材微波—真空干燥特性的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
Li X J. Research on characteristics of wood microwave-vacuum drying[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.

[13] 贺霞. 杨木高强度微波预处理特性与机理研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
He X. The research on characteristics and mechanism of poplar wood during high-intensity microwave pretreatment[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.

[14] 刘志军. 木材微波干燥特性的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
Liu Z J. Research on characteristics of wood microwave drying[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

[15] Hong Y Q, 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.

[16] Namazi A B, Allen D G, Jia C Q. Probing microwave heating of lignocellulosic biomasses[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 112: 121−128.

[17] Simo-Tagne M, Rémond R, Rogaume Y, et al. Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 109: 299−308.

[18] Zhang Y H, Liu C H, Zheng X Z, et al. Analysis of microwave heating uniformity in berry puree: from electromagnetic-wave dissipation to heat and mass transfer[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 90: 103509.

[19] Lin B Q, Li H, Chen Z W, et al. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 949−962.

[20] 王佩, 黄思维, 张芮, 等. 杨木不同纹理方向介电特性初步探究 [J]. 林产加工与利用, 2015, 29(2): 99−101.
Wang P, Huang S W, Zhang R, et al. Preliminary study on dielectric properties of poplar in different grain directions[J]. Forest Products Processing and Utilization, 2015, 29(2): 99−101.

[21] 耿金光, 郭晋, 何露茜, 等. 桉木高温热处理传热过程的数值模拟与验证 [J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 48−54.
Geng J G, Guo J, He L X, et al. Numerical simulation and verification of heat transfer during high-temperature heat treatment of eucalyptus wood[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 48−54.

[22] Salema A A, Afzal M T. Numerical simulation of heating behaviour in biomass bed and pellets under multimode microwave system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 91: 12−24.

[23] Song C F, Wu T, Li Z F, et al. Analysis of the heat transfer characteristics of blackberries during microwave vacuum heating[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 70−78.

[24] Liu S X, Fukuoka M, Sakai N. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(1): 49−62.

[25] Bhagya R G V S, Dash K K. Heat transfer analysis of convective and microwave drying of dragon fruit[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(9): 13775.

[26] Campañone L A, Bava J A, Mascheroni R H. Modeling and process simulation of controlled microwave heating of foods by using of the resonance phenomenon[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 914−923.

[27] Singh T, Sehgal S. Computational modeling and simulation of the microwave hybrid heating process: a state of the art review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 31(2): 1153−1200.

[28] Zhang S, Qin S H, Wan W Q, et al. Investigation on electromagnetic and heat transfer coupling of heating susceptor for selective microwave hybrid soldering: 3D multi-physics simulation and experiment[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 124047.

[29] 吴昊. 高功率微波加热数值仿真及相关温控研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
Wu H. Numerical simulation of high-power microwave heating and related temperature control research [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.

[30] 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.

[31] Pitchai K, Chen J, Birla S, et al. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: development and validation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 60−71.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）