doi: 10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023404

用于强吸波材料均匀性加热的微波加热结构

王 权, 张纪芳, 杨欣辉, 黄 宁, 薛满康, 陈 华, 方 青
(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

摘要: 针对微波加热均匀性问题, 基于缝隙阵列天线理论设计一种新型的曲面缝隙波导加热结构. 结果表明: 该设计通过多缝隙辐射的电场随机叠加方式改善了加热腔内的电场均匀性, 曲面结构设计使其更易与圆柱形加热腔体进行共形, 同时减小整个微波加热器的体积; 在对厚度为 5 mm 的橡胶加热 20 s 后, 温度差异系数(COV)达到 0.56, 相比于相同功率密度的传统箱式微波加热装置, 温度差异系数提高了 60%, 均匀性得到较好改善.

关键词: 曲面波导; 缝隙阵列; Taylor 分布; 微波加热
中图分类号: TM924.76 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-5489(2024)06-1471-08

Microwave Heating Structures for Uniform Heating of Strong Absorbent Materials

WANG Quan, ZHANG Jifang, YANG Xinhui, HUANG Ning,
XUE Mankang, CHEN Hua, FANG Qing
(*Faculty of Science, Kunming University of Technology, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of microwave heating uniformity, we designed a new curved slot waveguide heating structure based on the theory of slot array antenna. The results show that the design improves the electric field uniformity inside the heating cavity through random superposition of the electric fields radiated by multiple slots. The curved surface structure design makes it easier to conformally align with the cylindrical heating cavity, while reducing the volume of the entire microwave heater. After heating the rubber with a thickness of 5 mm for 20 s, the temperature difference coefficient (COV) reaches 0.56, which is 60% higher than the traditional box type microwave heating device with the same power density, and the uniformity is better improved.

Keywords: curved waveguide; slot array; Taylor distribution; microwave heating

微波加热是一种利用物料吸收微波能, 使物料自身实现内外部同时升温的加热方式[1]. 相较于传统加热方式, 微波加热具有节能性、易控性、选择性加热、加热速度快且高效等优势[2]. 但在工业生产中, 将大功率微波源用于微波加热, 容易产生热点问题和加热不均匀现象, 从而降低了微波加热的安全性和有效性[3].

收稿日期: 2023-09-25.

第一作者简介: 王 权(2000—), 男, 汉族, 硕士研究生, 从事微波加热设备和波导槽阵天线的研究, E-mail: 602714828@qq.com. **通信作者简介**: 陈 华(1981—), 女, 汉族, 博士, 副教授, 从事计算电磁学、天线、电磁散射与传播及微波集成电路电磁建模的研究, E-mail: cherrychen40600@163.com.

基金项目: 云南省科技厅面上项目(批准号: 202201AT070202)和云南省基础研究计划项目(批准号: 202201AU070144; 202301BE070001-005).

目前有效改善物料加热均匀性的方法主要包括：谐振腔内增加凹凸槽实现微波在腔内的多反射[4-5]、旋转微波源或被加热物体[6]、在谐振腔内增加搅拌器[7]、增加馈源的数量[8]、优化馈口的位置[9-10]、使用变频微波源加热[10-12]和混入易吸波材料[13]等.

微波加热时，物料的介电特性、位置、形状和微波谐振腔均会对加热均匀性产生影响，其中一个重要影响因素是加热谐振腔内的电磁场分布[14-15]. 近年来，研究人员针对腔体设计以改善加热腔体内电场的均匀性，进而达到改善加热效果的目的. 如采用多馈源的方式，通过谐振腔内多个交变电场的随机叠加，改善电场的均匀性达到均匀加热的目的. 文献[8]研究了圆柱形谐振腔从1个馈源增加至10个波导馈源过程中腔内加热均匀性的变化情况，结果表明，在增加1～4个馈源时，均匀性得到较大提升，当增加5～10个馈源时，加热均匀性并未明显提升，且加热效率降低；文献[12]利用915 MHz和2 450 MHz两个馈源端口进行加热，通过缝隙结构和两个馈源正交放置减少了微波之间的相互耦合，并提高了加热的均匀性；文献[16]提出一种双馈源且馈源以一定速度旋转的微波加热器，结果表明，两个馈源不同步旋转时可提高腔内加热的均匀性；文献[17]研究了多物理场下微波加热沥青的传热特性，结果表明，利用双波导作为馈源比单波导作为馈源的加热结构的温度差异系数降低了16%；文献[18]利用U型宽边波导缝隙阵列作为馈源的一种微波加热器，通过波导缝隙阵列设计，将辐射源馈进矩形谐振腔，改善了矩形谐振腔内的电场均匀分布问题；文献[19]利用矩形波导裂缝作为微波馈源，通过优化缝隙的重要参数以及谐振腔内加入金属小球的方式，提高了微波加热的均匀性；文献[20]提出一种具有多个水平和垂直开槽波导组合的功率控制微波干燥器，并对输入功率进行优化和控制，最终得到的微波加热器比传统干燥器的加热均匀性提高了约67%；文献[21]提出一种应用于微波加热的可切换频率选择表面，通过调节PIN二极管的开关状态改变电场分布，将不同状态下的频率选择表面在时间上进行联合并加热，可明显提高加热均匀性和效率；文献[22]针对微波消融适形问题，设计了消融区域可重构的微波加热天线对电场分布调控，从而实现了温度场分布调控，最后达到能量辐射调控；文献[23]研究了5种不同保温炉衬厚度下腔体内电磁场、负载加热效率和均匀性等参数的变化规律，对微波冶金反应器中保温炉衬的设计、安装及工艺参数进行优化，提高了微波能的利用率.

通过对矩形缝隙波导缝隙馈的设计以改善加热腔体均匀性的文献报道较多，但针对曲面型波导缝隙馈源以及波导缝隙阵列缝隙位置的设计较少. 基于此，本文基于谐振腔理论和波导缝隙阵列的相关理论，利用Taylor分布综合法[24]设计一种曲面波导缝隙加热器，将波导缝隙阵列作为谐振腔馈源以改善谐振腔内的均匀性.

1 波导缝隙阵列等效电路

波导宽边纵缝和波导窄边斜缝阵列常用于微波加热. 波导缝隙阵列在设计时可分为谐振缝隙阵列(驻波阵)和非谐振缝隙阵列(行波阵)，其中非谐振缝隙波导阵列的频带相对较宽，但辐射效率较低[24]. 综合考虑微波加热节能高效的要求，本文采用谐振缝隙波导阵列设计一种曲面波导宽边缝隙阵列加热器.

矩形波导宽边缝隙阵列如图1所示，其中a为矩形波导的宽边长度，b为矩形波导的窄边长度，d为缝隙中线之间的距离，偏置x为缝隙中线偏离波导宽边中线的距离.

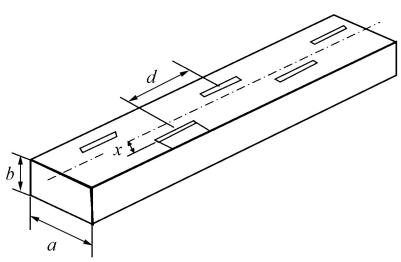


图1 矩形波导宽边缝隙阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slot array on wide side of rectangular waveguide

根据Elliott设计波导缝隙阵列的相关理论[25]，矩形波导宽边纵缝阵列可等效为图2所示的传输线模型. 宽边纵缝单缝的归一化等效电导为

$$g = g_1' \sin^2(\pi x/a), \tag{1}$$

$$g_1' = 2.09a\lambda_g \frac{\cos^2(\pi\lambda/2\lambda_g)}{\lambda b}, \tag{2}$$

其中 a 为波导的宽边长度，b 为波导的窄边长度，λ 为自由空间内的波长，λ_g 为波导波长，偏置 x 为缝隙中线到波导宽边中线的距离.

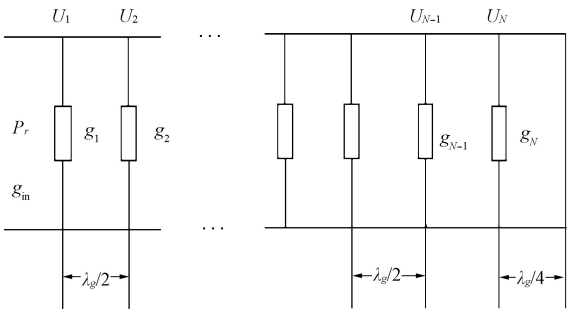


图 2　宽边纵向缝隙等效电导

Fig. 2　Equivalent conductivity of wide side longitudinal slot

在设计宽边纵缝时，假设 U_m 为第 m 个缝隙的辐射激励幅度，g_m 为第 m 个缝隙的等效电导. 通过电路理论可得

$$\frac{P_m}{P_T} = \frac{U_m^2}{\sum_{m=1}^{N} U_m^2} = \frac{g_m}{\sum_{m=1}^{N} g_m^2} = \frac{g_m}{g_{in}}, \tag{3}$$

其中 $g_{in} = \sum_{m=1}^{N} g_m$ 为总输入电导，P_m 为第 m 个缝隙的辐射功率，P_T 为总的辐射功率. 通过推导可得

$$g_m = g_{in} \frac{U_m^2}{\sum_{m=1}^{N} U_m^2}. \tag{4}$$

阵列若为一端馈电一端短路的纵缝阵，则 $g_{in}=1$；阵列若为中心馈电的纵缝阵，则 $g_{in}=2$[25]. 由于本文设计的是一端馈电一端短路的宽边缝隙纵缝阵列，因此 $g_{in}=1$.

2　曲面缝隙波导加热器的结构设计

曲面缝隙波导加热器的结构如图 3 所示. 弯曲矩形波导贴合在圆柱形谐振腔表面，在公共面上开缝隙阵列作为馈源，对圆柱谐振腔进行微波加热. 在一定的曲率下，曲面波导结构电场分布可近似于矩形波导结构. 此外，曲面结构也更易于和微波加热的圆柱形谐振腔共形，从而减小整个微波加热器的体积，使其更适用于实际应用.

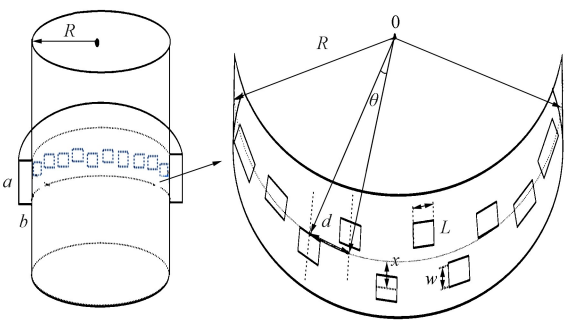


图 3　曲面缝隙波导加热器的结构

Fig. 3　Structure of curved slot waveguide heater

利用仿真软件 HFSS 建立模型结构. 圆柱形谐振腔的半径 $R=320$ mm，高度 $H=264.4$ mm，曲面波导的内截面尺寸为 86.4 mm×30.5 mm.

在工业生产中，谐振腔的外壁可设置为 1～4 mm，参考实验室中设备的厚度[19]，将曲面波导和圆柱形谐振腔的外壁厚度均设为 1.27 mm. 曲面波导的宽边面与圆柱形谐振腔共用，并在宽边面上开矩形缝隙. 为实现电场的最大辐射，将缝隙开在波导表面电流较大处. 因此第一个缝隙中心线距离负载端面的距离为 $\lambda_g/4=43.2$ mm，最后一个缝隙中线到馈源端的距离为 $\lambda_g/2=86.4$ mm，缝隙的间距 $d=\lambda_g/2=86.4$ mm，同侧两个缝隙间距为 λ_g 以确保同相激励. 为减少缝隙之间的耦合，相邻两个缝隙相互上下错开.

对于缝隙长度和宽度，在设计过程中可假设[25]：各缝隙的宽度和长度相等以确保缝隙辐射的电导相等；理论上缝隙长度为自由空间内的半波长，即 $L\approx 0.5\lambda = 61$ mm，但在工业生产中常采用 $L\approx 0.48\lambda = 58.6$ mm[19]；缝隙宽度 w 与缝隙长度 L 的比值远小于 1，将缝隙宽度设为 10 mm. 若曲面波导缝隙阵列的总长度超过圆柱谐振腔的半圆周长度，则位置相差约 180°的两个缝隙耦合的电磁场会产生抵消作用. 由于曲面波导的总长度应小于谐振腔的半圆周长度，因此将缝隙数目 N 设为 10，曲面波导长度为 923.32 mm.

3　利用 Taylor 分布理论设计缝隙阵列

在波导缝隙阵列的设计理论中，缝隙阵列的辐射特性与阵列的单元数目、间距、激励幅度和相位

紧密相关. 通过调节这4个参数可改变阵列的辐射特性，即改变阵列的阵因子. 常用的阵因子设计方法有均匀分布和Taylor分布综合法等. 本文采用Taylor分布综合法设计波导缝隙阵列，实现过程如下.

根据副瓣比对阵元进行Taylor分布综合设计，计算各缝隙的激励电流分布幅度；根据电流分布幅度计算求得每个缝隙对应的等效电导值，因缝隙电导值与每个缝隙的偏置有直接关系，进而得到每个缝隙对应的偏置值. 利用Taylor分布综合法设计在副瓣比为−30 dB的情况下，设计并优化得到一组缝隙偏置，结果列于表1.

表1 缝隙偏置 x_i

Table 1 Slot bias x_i

偏置 x_i	数值/mm	偏置 x_i	数值/mm
x_1	3.5	x_6	−8.9
x_2	−4.7	x_7	7.8
x_3	5.5	x_8	−5.5
x_4	−7.8	x_9	4.7
x_5	8.9	x_{10}	−3.5

通过软件仿真优化缝隙长度和缝隙间的间距，缝隙长度和缝隙间距对回波损耗的影响如图4所示. 由图4可见，当缝隙长度 $L=59$ mm，缝隙间距 $d=88$ mm时，回波损耗的效果最好，与理论分析结果基本吻合，因此在设计中采用缝隙长度 $L=59$ mm，缝隙间距 $d=88$ mm.

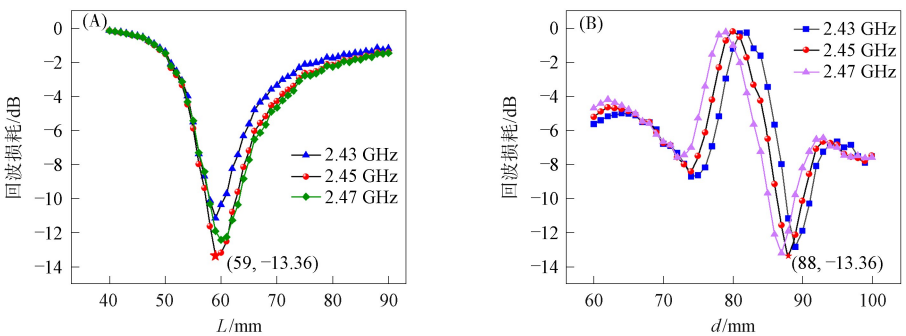


图4 缝隙长度(A)和缝隙间距(B)对回波损耗的影响

Fig. 4 Effect of slot length (A) and slot spacing (B) on return loss

4 结果与分析

为验证本文微波加热器对物料加热均匀性的改善情况，对半径 $R_2=180$ mm，厚度 $h_2=5$ mm的橡胶(介电常数为4.23−0.386j)进行加热[26]，并设置传统箱体微波加热结构作为对比模型，结构如图5所示，其中传统箱体腔体尺寸为426.566 mm×426.566 mm×426.566 mm. 微波加热结构的工作频率为2.45 GHz，功率为2 kW.

4.1 电场的均匀性分析

利用电磁仿真软件HFSS(high frequency structure simulator)对设计的微波加热器进行仿真，圆柱形谐振腔内的电场分布如图6所示，其中红色表示电场强度较高的区域，蓝色表示电场强度较低的区域. 由图6可见，曲面波导中的电场呈驻波形式，谐振腔内电场强度较弱的区域主要集中在圆柱谐振腔中心，模式较多且分布明显. 由图6(C)可见，谐振腔内没有明显电场强度较高的区域.

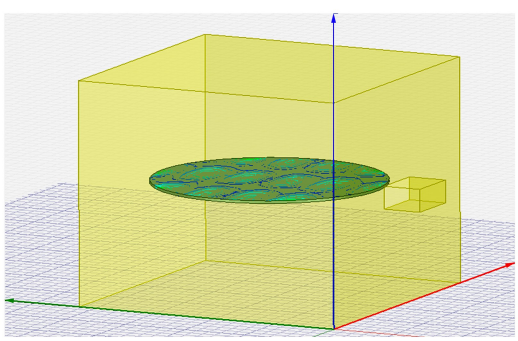
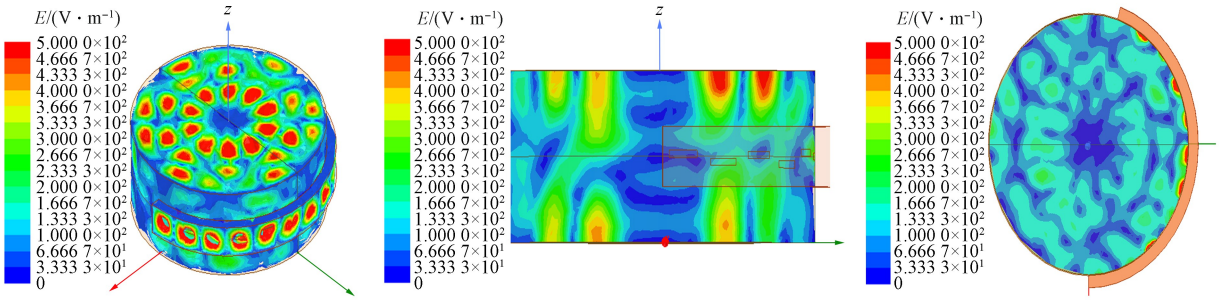


图5 传统箱体微波加热结构

Fig. 5 Traditional box microwave heating structure

箱体谐振腔内的电场分布如图7所示. 由图7

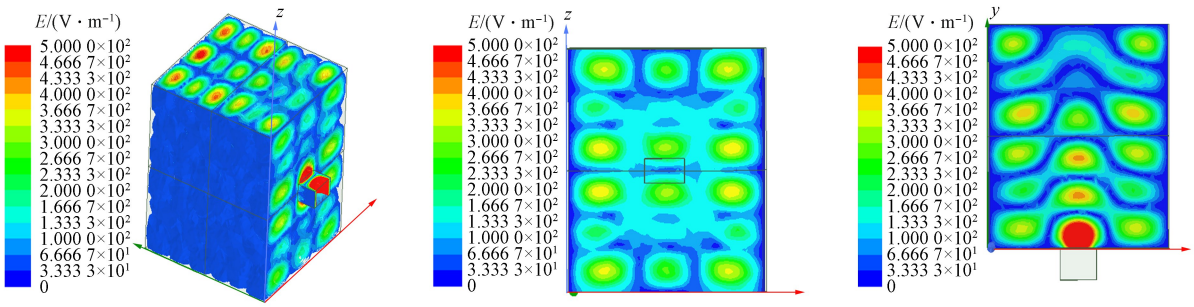
可见，箱体谐振腔内部电场分布规则，模式明显.



(A) 谐振腔整体电场　　(B) 谐振腔纵截面电场　　(C) 谐振腔横截面电场

图 6　圆柱形谐振腔内的电场分布

Fig. 6　Electric field distribution inside cylindrical resonant cavity



(A) 箱体谐振腔整体电场　　(B) 箱体谐振腔纵截面电场　　(C) 箱体谐振腔横截面电场

图 7　箱体谐振腔内的电场分布

Fig. 7　Electric field distribution inside box resonant cavity

通过电场分布取样的标准偏差

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(E_i-\bar{E})^2}{k-1}} \tag{5}$$

可衡量电场的均匀性，其中 E_i 为电场在 i 点的电场值，k 为电场取样点的总数，$\bar{E}$ 为所有取样点 E_i 的平均值. σ 越小，表明电场分布的均匀性越好.

两种设备空腔电场的比较列于表 2. 由表 2 可见，曲面波导缝隙阵列加热结构与传统箱体加热结构相比，谐振腔内电场均值仅相差 0.26 V/m，在相同抽样数目下，圆柱形谐振腔电场的标准差较低为 131.69，矩形谐振腔内的电场标准差为 144.91；曲面波导缝隙阵列加热结构有 80.76%的电场集中在 35～300 V/m；传统箱体加热结构有 77.30%的电场集中在 35～300 V/m，扩大数值范围后，有 80.31%的电场集中在 35～320 V/m. 在相同电场范围的条件下(35～300 V/m)，传统箱体加热设备谐振腔内没有更集中的电场区域. 因此，对于橡胶的电场分布均匀性，本文设计的曲面波导缝隙阵列微波加热结构优于箱体微波加热结构.

表 2　两种设备空腔电场的比较

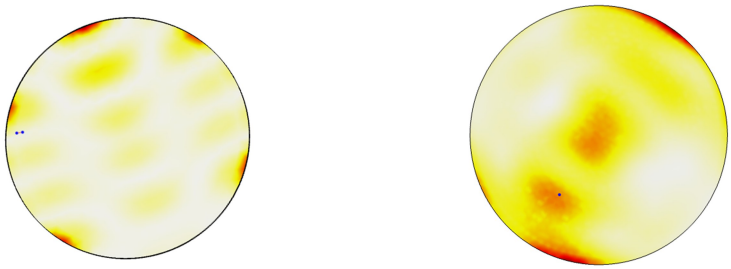
Table 2　Comparison of cavity electric fields of two devices

设备类型	电场最大值/(V·m⁻¹)	电场均值/(V·m⁻¹)	σ	电场强度集中情况
曲面波导缝隙阵列微波加热器	2 058.9	183.70	131.69	80.76%的电场集中在 35～300 V/m
传统箱体微波加热器	1 513.6	184.04	144.91	77.30%的电场集中在 35～300 V/m；80.31%的电场集中在 35～320 V/m

4.2　加热均匀性分析

为进一步研究该曲面缝隙波导加热结构的加热均匀性，利用软件 COMSOL 仿真分析橡胶的加热

过程. 在两种不同结构中物料加热 20 s 后的温度分布如图 8 所示，其中红色表示温度较高的区域，白色表示温度较低的区域. 图 8(A)为物料在传统箱体微波结构下加热后的温度分布，其中温度较高的区域为模式明显区域. 由图 8(A)可见，该结构加热后没有明显的热点问题，但在温度较低的白色区域分布较多. 图 8(B)为物料在曲面波导缝隙阵列微波结构下加热后的温度分布. 由图 8(B)可见，温度较高部分主要集中在物料的中心区域，并向两边延伸，但白色低温区域分布较少.



(A) 传统箱体微波结构　　(B) 曲面波导缝隙阵列微波结构

图 8　物料加热 20 s 后的表面温度

Fig. 8　Surface temperature of material after heating for 20 s

为衡量加热的均匀性，可定义温度差异系数(COV)[8,17]为

$$\mathrm{COV}=\frac{\sqrt{n^{-1}\sum_{i=1}^{n}(T_i-T_{\mathrm{avg}})^2}}{(T_{\mathrm{avg}}-T_0)},\tag{6}$$

其中 n 为总采样点数，T_i 为第 i 个采样点的温度，T_{avg} 为所有采样点的温度平均值，T_0 为初始温度. 温度差异系数越小表示温度场的均匀性越好.

两种设备加热温度的比较列于表 3. 由表 3 可见：物料在传统谐振腔加热 20 s 后，温度最大值为 373.15 ℃，已超过天然橡胶的碳化温度(小于 160 ℃)，且最大温差为 353 ℃；物料在曲面波导缝隙阵列微波结构下加热 20 s 后的温度最大值为 28.05 ℃，最大温差为 7.78 ℃，且温度差异系数为 0.56，远小于传统箱体微波加热器内的物料温度差异系数.

表 3　两种设备加热温度的比较

Table 3　Comparison of heating temperature of two devices

设备类型	温度最大值/℃	温度最小值/℃	平均温度/℃	温度差异系数 COV
曲面波导缝隙阵列微波加热器	28.05	20.27	22.39	0.56
传统箱体微波加热器	373.15	20.15	50.63	1.40

综上，本文基于缝隙阵列天线的相关理论，利用 Taylor 分布综合法设计了一种新型的曲面缝隙波导微波加热结构. 微波馈源工作在 2.45 GHz，曲面波导的设计使其更易与圆柱形加热腔体共形，微波通过波导缝隙驻波阵列辐射进圆柱形谐振腔内，控制了加热速度，针对强吸波材料快速升温的特性，能有效控制物料的升温过程，减少出现强吸波材料加热过程中的热点问题. 通过改变缝隙的位置和其他参数，控制微波辐射进谐振腔内的电场分布模式，从而改善了谐振腔内物料加热的均匀性. 该微波加热器在空腔加热时，腔内 80.76%的电场强度集中在 35～300 V/m. 在对厚度为 5 mm 的橡胶加热 20 s 后，温度差异系数可达 0.56，相比于相同容量和输入功率的箱式微波加热装置，温度差异系数提高了 60%，均匀性得到了较好改善.

参　考　文　献

[1] 白旭斌. 工业微波加热设备控制系统的设计 [D]. 成都：电子科技大学，2015.(BAI X B. Design of Control System for Industrial Microwave Heating Equipment [D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2015.)

[2] 崔凯辉. 微波加热德拜媒质热-电磁耦合特性研究 [D]. 昆明：昆明理工大学，2020.(CUI K H. Study on Thermal Electromagnetic Coupling Characteristics of Debye Medium Heated by Microwave [D]. Kunming：

Kunming University of Science and Technology，2020.）

[3] 滕宇萍. 基于矩形波导的微波加热均匀性及温控研究 [D]. 南充：西华师范大学，2021.（TENG Y P. Research on Microwave Heating Uniformity and Temperature Control Based on Rectangular Waveguide [D]. Nanchong：West China Normal University，2021.）

[4] 曹湘琪，姚斌，郑勤红，等. 圆柱形微波加热器加热效率及均匀性仿真分析 [J]. 包装与食品机械，2014，32(6)：29-31.（CAO X Q，YAO B，ZHENG Q H，et al. Simulation Analysis on Heating Efficiency and Uniformity of Cylindrical Microwave Heater [J]. Packaging and Food Machinery，2014，32(6)：29-31.）

[5] 王均委，李琳，姚斌，等. 凹凸槽结构对圆柱形微波反应器加热效率及均匀性影响研究 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版)，2021，41(3)：44-49.（WANG J W，LI L，YAO B，et al. Study on the Influence of Concave Convex Groove Structure on the Heating Efficiency and Uniformity of Cylindrical Microwave Reactor [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition)，2021，41(3)：44-49.）

[6] 曾惠. 旋转型微波加热器的仿真与实验研究 [D]. 南充：西华师范大学，2021.（ZENG H. Simulation and Experimental Research on Rotating Microwave Heater [D]. Nanchong：West China Normal University，2021.）

[7] WANG Y，YANG X Q，QIU Y F. Double Pendulum Mode Stirrer for Improved Multimode Microwave Heating Performance [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering，2021，31(11)：22866-1-22866-12.

[8] 周明长. 多馈口微波加热数值仿真及温度控制研究 [D]. 绵阳：西南科技大学，2020.（ZHOU M C. Research on Numerical Simulation and Temperature Control of Multi Feeder Microwave Heating [D]. Mianyang：Southwest University of Science and Technology，2020.）

[9] 王维，孙以泽，徐洋，等. 纤维改性设备中微波加热器波导分布对电场的影响 [J]. 现代制造工程，2013(6)：132-136.（WANG W，SUN Y Z，XU Y，et al. Influence of Waveguide Distribution of Microwave Heater on Electric Field in Fiber Modification Equipment [J]. Modern Manufacturing Engineering，2013(6)：132-136.）

[10] 黄亮. 可调腔体微波加热器的加热效率及均匀性研究 [D]. 昆明：云南师范大学，2020.（HUANG L. Study on Heating Efficiency and Uniformity of Adjustable Cavity Microwave Heater [D]. Kunming：Yunnan Normal University，2020.）

[11] 赵虹. 多源多频微波炉的关键技术研究 [D]. 成都：电子科技大学，2019.（ZHAO H. Research on Key Technologies of Multi-source and Multi Frequency Microwave Oven [D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2019.）

[12] 范志鹏，杨阳，黄卡玛，等. 一种 915 MHz 和 2 450 MHz 双频微波加热分析 [J]. 真空电子技术，2020(2)：11-14.（FAN Z P，YANG Y，HUANG K M，et al. Analysis of a 915 MHz and 2 450 MHz Dual Frequency Microwave Heating [J]. Vacuum Electronics Technology，2020(2)：11-14.）

[13] WANG Z Y，HE Z Y，WANG Z，et al. Microwave Deicing of Functional Pavement Using Sintered Magnetically Separated Fly Ash as Microwave-Heating Aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2019，31(7)：04019127-1-04019127-12.

[14] 韩清华，李仪凡，赵东林，等. 多馈源箱式加热器的微波场均匀性仿真分析 [J]. 包装与食品机械，2012，30(6)：6-9.（HAN Q H，LI Y F，ZHAO D L，et al. Simulation Analysis of Microwave Field Uniformity of Multi Feed Box Heater [J]. Packaging and Food Machinery，2012，30(6)：6-9.）

[15] 陈莹莹. 2 450 MHz 柱形微波腔的加热性能研究 [D]. 上海：上海海洋大学，2020.（CHEN Y Y. Study on the Heating Performance of 2 450 MHz Cylindrical Microwave Cavity [D]. Shanghai：Shanghai Ocean University，2020.）

[16] 李伊帆，王凤霞，解田，等. 双端口旋转对微波加热均匀性和互耦的影响 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2020，18(2)：264-268.（LI Y F，WANG F X，XIE T，et al. The Effect of Dual Port Rotation on Microwave Heating Uniformity and Mutual Coupling [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information，2020，18(2)：264-268.）

[17] 刘小明，赵昱，魏子奇，等. 多物理场下微波加热沥青混凝土传热性能研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2021，52(7)：2321-2331.（LIU X M，ZHAO Y，WEI Z Q，et al. Heat Transfer Mechanism of Microwave Heating Asphalt Concrete Based on Multi-physical Field [J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2021，52(7)：2321-2331.）

[18] 赵地. 基于大功率微波的木材干燥关键技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2017.(ZHAO D. Research on Key Technologies of Wood Drying Based on High-Power Microwave[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2017.)

[19] 朱可棋. 微波加热设备的设计与实验[D]. 成都：电子科技大学，2018.(ZHU K Q. Design and Experiment of Microwave Heating Equipment[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2018.)

[20] AHN S H，JEONG C H，LIMAND D M，et al. Kilowatt-Level Power-Controlled Microwave Applicator with Multiple Slotted Waveguides for Improving Heating Uniformity[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，2020，68(7)：2867-2875.

[21] 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 X Y，XIAO W. Numerical Investigation Based on Switchable Frequency Selective Surface for Microwave Heating[J]. Journal of Microwaves，2024，40(3)：40-45.)

[22] 何治丽. 用于微波加热的能量辐射控制技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2024.(HE Z L. Research on Energy Radiation Control Technology for Microwave Heating[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2024.)

[23] 尚小标，李广超，白永珍，等. 微波冶金反应器加热效率与均匀性优化[J]. 微波学报，2023，39(3)：89-96.(SHANG X B，LI G C，BAI Y Z，et al. Optimization of Heating Efficiency and Uniformity of Microwave Metallurgical Reactor[J]. Journal of Microwaves，2023，39(3)：89-96.)

[24] 赵嘉伟. 波导缝隙阵列天线快速建模和低副瓣设计[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.(ZHAO J W. Waveguide Slot Array Antenna Modeling and Low Sidelobe Design[D]. Xi'an：Xidian University，2019.)

[25] 李彦文. 低副瓣波导裂缝阵列天线的设计与实现[D]. 南京：南京理工大学，2016.(LI Y W. Design and Implementation of Low Sidelobe Waveguide Slot Array Antenna[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2016.)

[26] 胡冰涛. 组分和频率对天然橡胶介电性能的影响[D]. 青岛：青岛科技大学，2018.(HU B T. Effects of Composition and Frequency on Dielectric Properties of Natural Rubber[D]. Qingdao：Qingdao University of Science and Technology，2018.)

(责任编辑：王 健)