

微波加热多层橡胶复合材料的温度场分布及界面特性研究

朱善良, 李 涛, 顾雨晨, 李成成, 陈海龙, 王东旭, 李庆领*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 针对不同波源下微波加热多层橡胶复合材料, 建立基于Maxwell方程的一维非稳态有源加热偏微分方程(PDE)模型, 以丁苯橡胶材料和丁腈橡胶材料复合为例, 采用时域有限差分法进行模拟仿真, 研究多层(两层)橡胶复合材料在单/双波源下材料厚度和微波功率对加热温度场和界面特性的影响。结果表明: 微波功率变化会影响多层橡胶复合材料加热温度分布; 在叠加橡胶材料的界面处, 微波振幅会有微小变化; 将介电损耗小的橡胶材料直接暴露于微波源, 有利于微波穿过介电损耗小的橡胶材料向深处传播, 且各层橡胶材料厚度宜控制在临界穿透深度以下; 相对于单波源加热, 多波源加热能改善多层橡胶复合材料加热的均匀性。与传统有限元模型的分析结果进行比较, 验证了本研究模型的有效性。

关键词: 多层橡胶复合材料; 时域有限差分法; 微波加热; 温度场分布; 界面特性

中图分类号: TM924.76; TQ333.1/.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)06-0415-08

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.06.0415



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

微波技术已应用于日常生活和工业生产过程, 如加热、烹饪、杀菌、干燥、食品保鲜以及聚合物等合成和交联^[1]。近年来, 微波加热在橡胶工业中的应用也越来越广泛, P. Rattanadecho等^[2-3]发现微波加热干燥天然橡胶(NR)时, 可以提高NR的产品质量和改善耐老化性能。李涛等^[4]运用Ansys有限元分析软件对橡胶微波加热硫化过程进行了仿真模拟, 利用同轴波导模式加热胶料, 可使胶料内的温度分布更均匀。H. L. Chen等^[5]研究了微波加热中微波频率、微波端口功率和材料尺寸对块状橡胶温度分布的影响。

但是, 微波加热仍存在两方面的问题, 一方面, 由于微波加热耗散功率分布的不均匀性, 导致加热效果不理想; 另一方面, 微波加热过程中会出现热点, 可能会发生热失控现象^[6], 这些问题已在微波加热橡胶领域引起广泛关注。当前, 主要利用试验和模拟仿真对微波加热单层橡胶材料的温度场进行研究^[7-10], 而对微波加热多层橡胶复合材

料的温度场分布及界面特性的研究还不多见; 另外, 试验和模拟仿真在机理方面对于温度分布和功率的定量描述有所欠缺, 且缺少显式的温度分布机理模型, 因此很难运用现代控制理论解决微波加热中的热不均和热失控问题^[11]。

本研究基于电磁波和热力学理论, 以丁苯橡胶(SBR)材料和丁腈橡胶(NBR)材料复合为例, 针对不同波源下微波加热多层橡胶复合材料, 建立基于Maxwell方程的一维非稳态有源加热偏微分方程(PDE)模型, 采用时域有限差分法进行数值模拟, 研究多层橡胶复合材料在单/双波源下材料厚度和微波功率对加热温度场和界面特性的影响。同时, 与传统有限元模型的分析结果进行比较, 验证本研究模型的有效性。

1 介电特性表征

本研究采用Novocontrol Concept 72宽频介电和阻抗光谱仪(见图1)测定橡胶材料的相对介电常数(κ')和相对介电损耗因子(κ'')。NBR和SBR材料的配方为: NBR或SBR 100, 炭黑 30, 氧化锌 5, 硬脂酸 2, 硫黄 2, 促进剂CBS 1.5。

考虑到微波温度(T)对橡胶材料介电性能的影响, 本研究在303.15~423.15 K的温度范围内

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE030); 2019年国家级大学生创新训练计划项目(X201910426216)

作者简介: 朱善良(1977—), 男, 山东菏泽人, 青岛科技大学副教授, 博士, 主要从事数值计算和数学模型研究。

*通信联系人(liqingling@qust.edu.cn)



图1 Novocontrol Concept 72宽频介电和阻抗光谱仪测量 κ' 和 κ'' ,并利用最小二乘法,在2 450 Hz频率下获得其拟合曲线方程:

$$\kappa' = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 \quad (1)$$

$$\kappa'' = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4 \quad (2)$$

κ' 和 κ'' 拟合曲线方程参数如表1和2所示。

表1 κ' 拟合曲线方程参数

材料	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
NBR	-8 889.8	95.05	-0.378	6.6×10^{-4}	-4.28×10^{-7}
SBR	-15 301.0	174.44	-0.735	1.4×10^{-3}	-9.39×10^{-7}

表2 κ'' 拟合曲线方程参数

材料	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
NBR	1 880.04	-23.66	0.109	-2.2×10^{-4}	1.66×10^{-7}
SBR	-57 855.00	646.07	-2.687	4.9×10^{-3}	-3.37×10^{-6}

2 电磁场理论

2.1 微波功率计算

设微波为均匀平面电磁波,电场和磁场位于 x - y 平面,它们沿着传播方向 z 轴变化。电场强度(E_x)由Maxwell方程确定^[12]。

$$\nabla^2 E_x + \gamma^2 E_x = 0 \quad (3)$$

式中, γ 为电磁波的传播常数,其表达式为

$$\gamma = \frac{\omega}{c} \sqrt{\kappa' + j\kappa''} \quad (4)$$

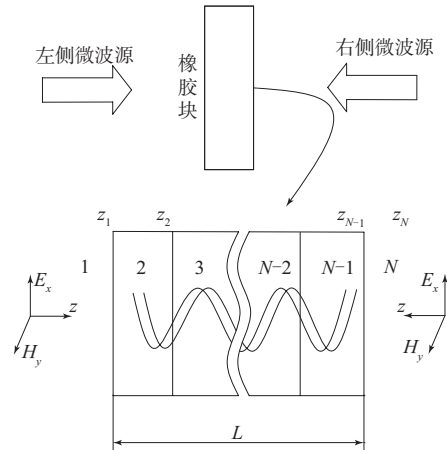
式中, $\omega = 2\pi f$, f 为电磁场频率, c 为光速。

相应的橡胶材料穿透深度(D_p)为

$$D_p = \frac{c}{\sqrt{2} \pi f \{ \kappa' [\sqrt{1 + (\frac{\kappa''}{\kappa'})^2} - 1] \}^{1/2}} \quad (5)$$

对于多层均匀的各向同性的橡胶复合材料,双波源下微波加热物理模型如图2所示。

对于均匀平面波来说,式(3)可变为



H_y 为磁场强度, $N-1$ 为材料层数, L 为材料总厚度。

图2 多层橡胶复合材料微波加热物理模型

$$\frac{d^2 E_l}{dz^2} + \gamma_l^2 E_l = 0 \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

本研究采用SBR和NBR材料组成的两层橡胶复合材料,二者被空气包围,单/双波源、不同叠加方式的试验物理模型如图3所示。

假设橡胶材料层间无缝隙,每一层都有相同



(a) 单波源(上NBR材料下SBR材料)



(b) 单波源(上SBR材料下NBR材料)



(c) 双波源(上NBR材料下SBR材料)

图3 试验物理模型

的介电特性,则式(6)的解具有线性表达形式:

$$\begin{cases} E_l = E_{t,l} e^{j\gamma_l z} + E_{r,l} e^{-j\gamma_l z} & z \leq z_l \\ E_l = E_{t,l} e^{j\gamma_l z} + E_{r,l} e^{-j\gamma_l z} & z_{l-1} < z < z_l \quad l = 2, 3 \\ E_N = E_{t,N} e^{j\gamma_N z} + E_{r,N} e^{-j\gamma_N z} & z \geq z_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $E_{t,l}$ 和 $E_{r,l}$ 分别为电磁波的透射系数和反射系数。

设橡胶材料不同层间的电场和磁场连续变化,即

$$\begin{cases} E_l = E_{l-1} \\ \frac{dE_{l-1}}{dz} = \frac{dE_l}{dz} \quad l = 2, 3, 4; z = z_1, z_2, z_3 \end{cases} \quad (8)$$

结合式(7)和(8), $E_{t,l}$ 和 $E_{r,l}$ 可由如下代数方程组求解:

$$\begin{cases} E_{t,l} e^{j\gamma_l z_l} + E_{r,l} e^{-j\gamma_l z_l} = E_{t,l+1} e^{j\gamma_{l+1} z_l} + E_{r,l+1} e^{-j\gamma_{l+1} z_l} \\ \gamma_l E_{t,l} e^{j\gamma_l z_l} - \gamma_l E_{r,l} e^{-j\gamma_l z_l} = \gamma_{l+1} E_{t,l+1} e^{j\gamma_{l+1} z_l} - \gamma_{l+1} E_{r,l+1} e^{-j\gamma_{l+1} z_l} \\ l = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (9)$$

第 l 层橡胶材料的透射波电场强度 (E_l^t) 和反射波电场强度 (E_l^r)^[13] 为

$$\begin{cases} E_l^t = E_{t,l} e^{j\gamma_l z} = A_l^t e^{j\theta_l^t} \\ E_l^r = E_{r,l} e^{-j\gamma_l z} = A_l^r e^{j\theta_l^r} \end{cases} \quad (10)$$

式中, A_l^t , A_l^r , θ_l^t , θ_l^r 分别为透射波和反射波的振幅和相位角,它们的表达式分别为

$$\begin{cases} A_l^t = \sqrt{E_l^t E_l^{t*}} \\ A_l^r = \sqrt{E_l^r E_l^{r*}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \theta_l^t = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(E_l^t)}{\text{Re}(E_l^t)} \\ \theta_l^r = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(E_l^r)}{\text{Re}(E_l^r)} \end{cases} \quad (12)$$

式中, * 表示共轭复数。

第 l 层橡胶材料内部的电磁驻波振幅 (A_l) 为

$$A_l = \sqrt{E_l^t E_l^{r*}} \quad (13)$$

由式(10)和Poynting定理^[12]求得单位体积橡胶材料的第 l 层微波功率 (P_l):

$$P_l = 2\pi f \varepsilon_0 k_l'' \left[\frac{|E_{t,l}|^2}{2} e^{-2\beta_l z_l} + \frac{|E_{r,l}|^2}{2} e^{-2\beta_l z_l} \right] + |E_{t,l}| |E_{r,l}| \cos(\theta_l^t - \theta_l^r + 2\varphi_l z_l) \quad (14)$$

式中, ε_0 为真空介电常数, β_l 和 φ_l 分别为第 l 层橡胶材料衰减常数和相位常数,第 l 层橡胶材料的电磁波

$$\begin{cases} T_l(t + \Delta t) = T_l(t) + \frac{T_0 - T_l}{\rho C_p \Delta d} h \Delta t + k(t) \frac{T_2 - T_l}{\rho C_p \Delta d^2} \Delta t + \frac{P_l}{\rho C_p} \Delta t \\ T_l(t + \Delta t) = T_l(t) + k(t) \frac{T_{l+1} - 2T_l + T_{l-1}}{\rho C_p \Delta d^2} \Delta t + \frac{P_l}{\rho C_p} \Delta t \\ T_N(t + \Delta t) = T_N(t) + \frac{T_0 - T_N}{\rho C_p \Delta d} h \Delta t + k(t) \frac{T_{N-1} - T_N}{\rho C_p \Delta d^2} \Delta t + \frac{P_N}{\rho C_p} \Delta t \end{cases} \quad l = 2, 3, \dots, N-1 \quad (19)$$

式中, Δd 为空间步长。

传播常数 $\gamma_l = \varphi_l + j\beta_l$ 。

2.2 温度场模型建立

为简化模型,做如下假设:(1)微波加热过程中,橡胶材料内部无物质传递现象;(2)加热初始时刻,橡胶材料内部温度均相等;(3)橡胶材料交界面温度和热通量满足连续性条件。

描述多层橡胶材料的一维非稳态热传输方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{P_l}{\rho_l C_{p,l}} \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

式中: t 为时间; $\alpha_l = k_l / \rho_l C_{p,l}$, 为橡胶材料的热扩散系数, k_l 为橡胶材料的热导率; ρ_l 为橡胶材料的密度; $C_{p,l}$ 为橡胶材料的比热容。基于本研究NBR和SBR材料配方测算的部分物理参数^[14]如表3所示。

表3 橡胶材料的部分物理参数

项 目	NBR	SBR
$C_p / [J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	1 671.8	1 671.8
$\rho / (kg \cdot m^{-3})$	1 309.1	1 348.3
$k / [W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	0.25	0.19

由假设(2)设初始条件为

$$T(z, t = 0) = T_0(z) \quad (16)$$

式中, T_0 为环境温度。由于橡胶材料外表面与外界存在对流传热,因此其满足第3类边界条件:

$$\begin{cases} k \frac{\partial T(t)}{\partial z} = h[T(t) - T_0] & z = 0 \\ -k \frac{\partial T(t)}{\partial z} = h[T(t) - T_0] & z = L \end{cases} \quad (17)$$

式中, h 为对流换热系数。

由假设(3)可知,橡胶材料之间满足界面温度和热通量连续性条件:

$$\begin{cases} T|_{z=z_l^-} = T|_{z=z_l^+} \\ k_l \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=z_l^-} = k_{l+1} \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=z_l^+} \end{cases} \quad (18)$$

式(15)~(18)构成具有电磁耦合的非线性抛物形PDE模型,此方程难以精确求解。本研究采用时域有限差分法来求解温度分布,通过求解如下差分方程组可得近似温度分布。

基于Matlab 2018a软件,通过设计算法求解上

述方程组,计算流程如图4所示。

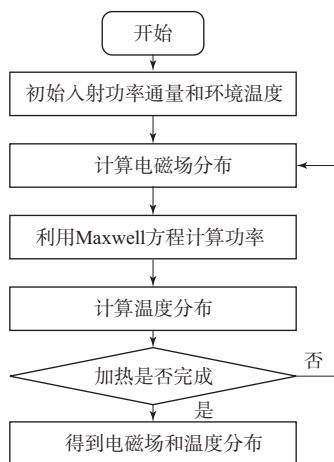


图4 电磁场和温度分布计算流程

3 单波源下多层橡胶复合材料的温度场及界面特性分析

以单波源的物理模型,分析两层橡胶复合材料中各层的微波功率(P)、温度(θ)和微波振幅(A)及界面特性,设各层橡胶材料的长度和宽度均为80 mm,加热时间分别为60,240,480和720 s,微波加热频率为2 450 MHz,加热过程中最高温度不超过160 °C,炉腔尺寸按理想加热环境设计,微波端口的功率为20 W。

3.1 橡胶材料叠加方式对微波功率和温度的影响

3.1.1 上NBR材料下SBR材料叠加方式

首先确定橡胶材料的厚度,根据式(5)计算NBR和SBR材料的临界穿透深度,分别为1.1和1.3 cm。首先考虑两种橡胶材料厚度都为1 cm的情况,此值小于临界穿透深度。

为了分析两种橡胶材料在相同环境下的微波加热温度场分布,首先对图3(a)所示的上NBR材料下SBR材料叠加方式的两层橡胶复合材料进行微波功率和温度的计算及模拟,结果如图5和6所示。

从图5和6可以看出:两种橡胶材料叠加方式为上NBR材料下SBR材料时,在微波加热过程中两种橡胶材料的微波功率和温度的变化趋势大致相同;在 z 为1.0 cm处,也就是NBR材料与SBR材料的交界面处微波功率存在明显的突变,而温度变化较小,但功率突变造成的温度变化随着加热时

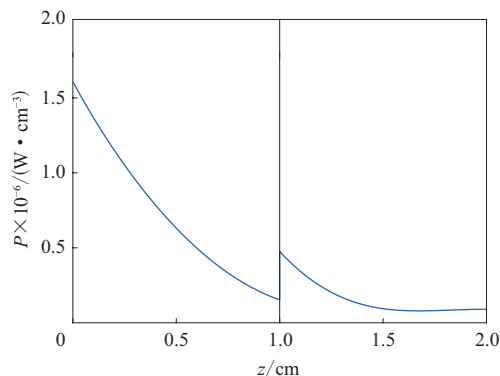
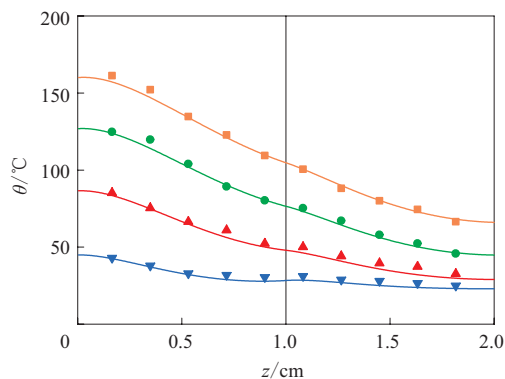


图5 单波源下两层橡胶复合材料的功率分布曲线
(上NBR材料下SBR材料)



有限元分析加热时间/s: ▽—60; ▲—240; ●—480; ■—720。

有限差分分析加热时间/s: —60; —240; —480; —720。

图6 单波源下两层橡胶复合材料的温度分布曲线
(上NBR材料下SBR材料)

间延长逐渐变得不显著。

从图5还可以看出,当介电常数和介电损耗因子均较小的NBR材料位于上层时,下层SBR材料的功率会向大突变,突变的原因是对于多层不同介电特性的橡胶材料,介电损耗大的材料吸收更多的功率,且当介电损耗小的材料位于介电损耗大的材料之上时,会有利于介电损耗大的材料对功率的吸收。

图6还展示了本研究模型与传统有限元模型4个加热时间段橡胶材料温度分布。比较两模型的分析结果可知,本研究模型能够有效地模拟多层橡胶复合材料的温度场分布,且温度曲线的界面特性与图5所示的微波功率变化是对应的。由此可知,多层橡胶复合材料微波功率影响温度分布,小介电损耗材料在上层会在一定程度上促进下层大介电损耗材料的温度升高,温度模拟仿真结果

如图7所示。

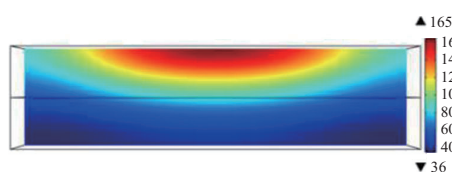


图7 单波源下两层橡胶复合材料的温度模拟仿真结果
(720 s, 上NBR材料下SBR材料)

3.1.2 上SBR材料下NBR材料叠加方式

在相同的微波加热环境下,对上SBR材料下NBR材料叠加方式的两层橡胶复合材料进行功率和温度的计算及模拟,结果如图8和9所示。

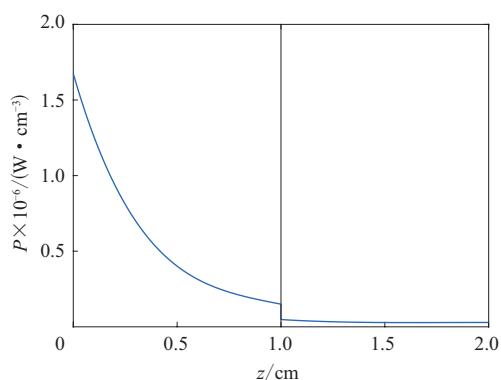
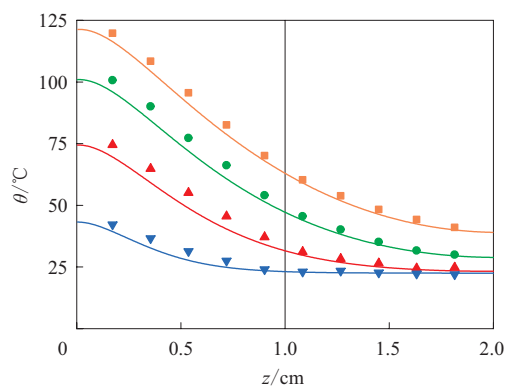


图8 单波源下两层橡胶复合材料的功率分布曲线
(上SBR材料下NBR材料)



注同图6。

图9 单波源下两层橡胶复合材料的温度分布曲线
(上SBR材料下NBR材料)

从图8和9可以看出:两种橡胶材料的微波功率和温度的变化趋势是一致的;微波功率在界面处有微量的向小突变,这是由于介电损耗大的SBR材料位于上层能吸收更多的功率,造成下层介电损耗小的NBR材料吸收功率不足,但微波功率突

变趋势不明显。由此可见,单波源加热对下层介电损耗小的NBR材料略有不利,在界面处出现微波功率减小现象,但其温度受微波功率突变的影响较小,复合材料的温度曲线均较为平滑,温度模拟仿真结果如图10所示。

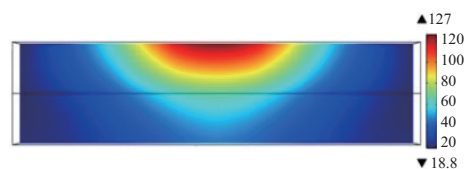


图10 单波源下两层橡胶复合材料的温度模拟仿真结果
(720 s, 上SBR材料下NBR材料)

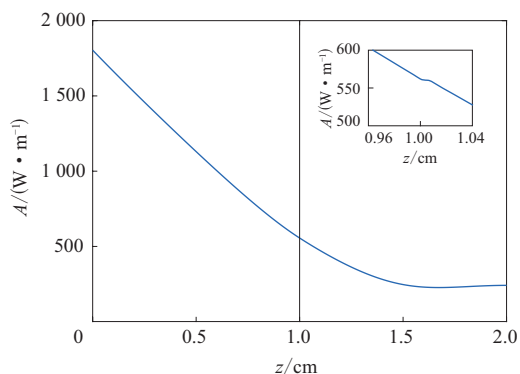
综合两种橡胶材料叠加方式的分析结果可知,不同介电特性的多层橡胶复合材料在不同叠加方式下会有不同的加热效果,介电损耗大的橡胶材料位于上层时,复合材料的功率和温度仅随着微波的穿透深度逐渐减小,微波的透射和反射在不同材料的交界面处存在极其微小的变化;当介电损耗小的材料位于上方时,微波的透射和反射在两种材料的交界面处会发生突变,导致交界面处微波功率和温度的变化;两种叠加方式下不同加热时间的温度分布规律表明,加热时间越长,复合材料的温升越高,但是温度分布的不均匀性也越大。造成这种现象的原因是多方面的,随着温度的升高,橡胶材料的热物理和电物理特性可能发生变化,橡胶材料的形状和位置等也可能影响功率吸收,从而导致时间越长,复合材料的温度分布越不均匀。同时,本研究所建立的热量传输模型与传统的有限元模型有一致的分析结果,表明本研究所建模型是有效的。

3.2 微波振幅的变化规律

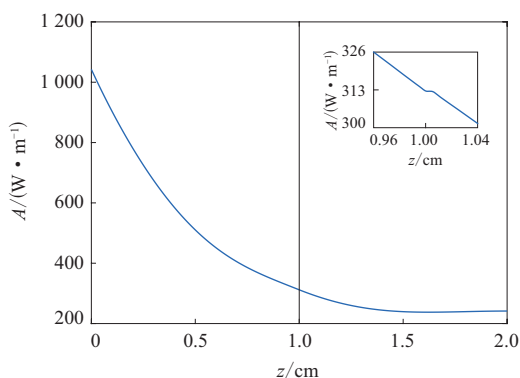
进一步研究微波振幅在多层橡胶复合材料中的分布规律。对于不同的叠加方式,分别分析两种橡胶材料中微波振幅的变化,结果如图11所示。

从图11可以看出,随着橡胶材料厚度的增大,两种不同叠加方式的橡胶复合材料的微波振幅曲线大致都呈指数衰减趋势,衰减程度与橡胶材料的电场有关,橡胶材料的介电特性几乎不会对其微波振幅的衰减趋势造成影响。

另外,两种叠加方式的橡胶复合材料的微波振幅在交界面处皆有短暂的平稳状态,说明微波



(a) 上NBR材料下SBR材料



(b) 上SBR材料下NBR材料

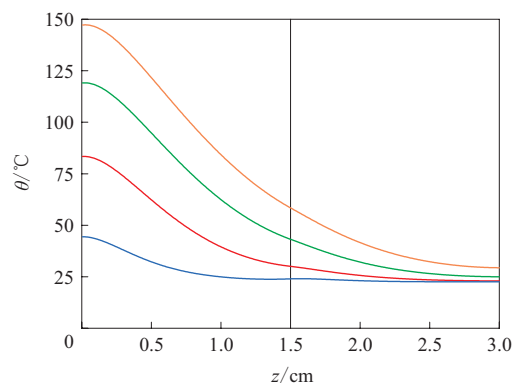
图11 单波源下两层橡胶复合材料的微波振幅曲线

振幅在多层橡胶复合材料中的突变仅在交界面处有微小体现。

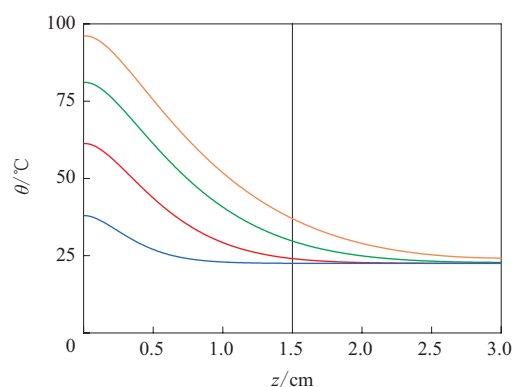
3.3 橡胶材料厚度对温度场的影响

分析两种橡胶材料的厚度大于微波临界穿透深度时,两层橡胶复合材料温度分布随厚度的变化规律。选择两种橡胶材料的厚度均为1.5 cm,研究不同叠加方式下橡胶材料厚度对温度场的影响,结果如图12所示。

将图12与图6和9进行比较发现,当两种橡胶材料的厚度都大于微波临界穿透深度时,两层橡胶复合材料内部的温差更大,例如当加热时间为720 s,对于上NBR材料下SBR材料叠加方式,两种橡胶材料的厚度都为1 cm时,该时间内复合材料最大温差为70~80℃,而两种橡胶材料的厚度都为1.5 cm时,在该时间内复合材料的最大温差达到约100℃。由此可见,橡胶材料厚度对复合材料温度场的影响很大,当加热的橡胶材料达到一定厚度时,由于微波能无法传递到最深处,复合材料最深处的温度可能几乎不受微波加热的影响。因此在使用微波加热橡胶材料时,应首先确定材



(a) 上NBR材料下SBR材料



(b) 上SBR材料下NBR材料

有限差分分析加热时间/s: —60; —240; —480; —720。

图12 单波源下两层橡胶复合材料(厚度均为1.5 cm)的温度分布曲线

料的临界穿透深度,否则将无法到预期的效果。

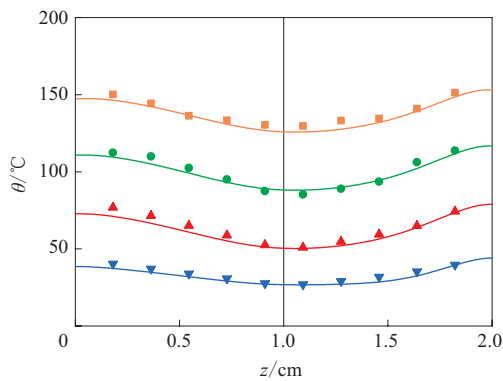
4 双波源下多层橡胶复合材料的温度场分析

在单波源微波加热模型的基础上建立双波源微波加热模型,同样,采用传统有限元模型来验证双波源下所建模型的有效性。加热时间分别为60,240,480和720 s。

4.1 温度的变化规律

为了便于观察双波源的均匀性,设橡胶材料的长度和宽度均为20 mm,微波频率为2 450 MHz,微波端口的功率为15 W,NBR和SBR材料的厚度均为1 cm,叠加方式为上NBR材料下SBR材料,见图3(c),本研究模型和传统有限元模型分析的温度分布曲线如图13所示。

从图13可以看出,在双波源条件下,本研究建立的双波源微波加热模型依然与传统有限元模型的分析结果一致。对这两层橡胶复合材料的温度



注同图6。

图13 双波源下两层橡胶复合材料的温度分布曲线场进行分析,当加热时间为60 s时,复合材料的最大温差仅在10 °C以内;当加热时间为240 s时,复合材料的最大温差约为15 °C;当加热时间为480 s时,复合材料的最大温差约为20 °C;当加热时间为720 s时,复合材料的最大温差也约为20 °C。由此可见,在相同加热环境条件下与图6所示单波源下复合材料的温度分布相比,双波源下复合材料的加热均匀性有了很大改善,温度模拟仿真结果如图14所示。

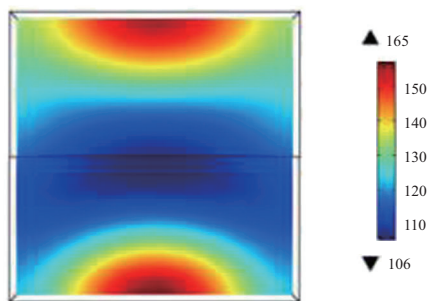


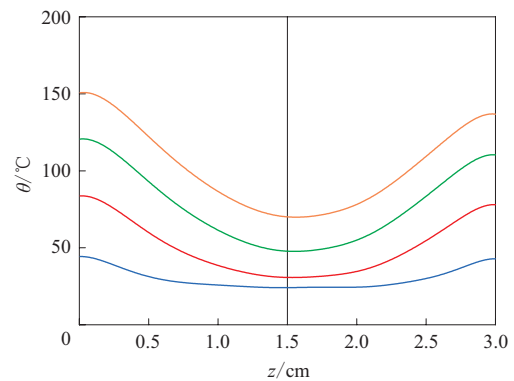
图14 双波源下两层橡胶复合材料的温度模拟仿真结果(720 s)

从图14也可以看出,整体上这两层橡胶材料受热较均匀。

4.2 橡胶材料厚度对温度场的影响

类似于单波源情况,以上NBR材料下SBR材料的叠加方式为例,研究两种橡胶材料的厚度均大于微波临界穿透深度时,两层橡胶复合材料温度分布随厚度的变化规律。取两种橡胶材料的厚度均为1.5 cm,复合材料的温度分布曲线如图15所示。

将图15与图13进行对比可知,当橡胶材料厚度均为1.5 cm时,双波源下复合材料的最大温差约为70 °C,相对于图13所示的最大温差20 °C来



注同图12。

图15 双波源下两层橡胶复合材料(厚度均为1.5 cm)的温度分布曲线

说,双波源下温差增大较多。这表明双波源下橡胶材料的厚度对复合材料加热温度的影响比较大,在两层的交界面处接受到的微波能较少,导致交界面处的温度低于两端的温度,这也与单波源下得到的结论一致。但总体上双波源微波加热的复合材料温度均匀性比单波源加热好。

5 结论

基于电磁波和热力学理论,针对不同波源下微波加热多层橡胶复合材料的温度分布规律及界面特性进行研究。以微波功率作为内热源项,建立了微波加热多层橡胶复合材料的一维非稳态PDE模型。与传统有限元模型的分析结果比较表明,该模型能够有效获得加热橡胶复合材料的温度分布,为运用现代控制理论解决微波加热过程中的热不均和热失控问题奠定理论基础。

以SBR材料和NBR材料复合为例,基于所建的PDE模型分别在单/双波源下利用时域有限差分法,研究不同叠加方式下多层(两层)橡胶复合材料的温度场分布及界面特性,得到如下结论。

(1)微波功率变化会影响多层橡胶复合材料温度分布。

(2)在叠加材料的交界面处,微波振幅会有微小变化,但不会发生突变。

(3)对多层橡胶复合材料进行微波加热时,宜将介电损耗小的橡胶材料直接暴露于微波源,这样将有更多的微波穿过介电损耗小的橡胶材料以向深处传播,使介电损耗大的橡胶材料吸收更多微波功率,升温更充分,并且在交界面处微波功率

突变会引起界面温度变化。

(4) 为使微波加热的多层橡胶复合材料获得较均匀的温度分布,宜将各层橡胶材料的厚度控制在微波临界穿透深度以下。

(5) 相对于单波源微波加热,多波源微波加热能改善多层橡胶复合材料加热的均匀性。

参考文献:

- [1] Vadivambal R, Jayas D S. Non-uniform Temperature Distribution during Microwave Heating of Food Materials—A review[J]. Food Bioprocess Technology, 2010, 3 (2): 161–171.
- [2] Rattanadecho P, Suwannapum N, Watanasungsit A, et al. Drying of Dielectric Materials Using a Continuous Microwave Belt Drier[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129 (1): 157–163.
- [3] 张福全, 陈美, 王永周, 等. 微波干燥对天然橡胶硫化胶热氧老化性能的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32 (9): 1760–1764.
- [4] 李涛, 杨广志, 陈海龙, 等. 橡胶微波加热硫化的有限元分析[J]. 橡胶工业, 2013, 60 (1): 42–46.
- [5] Chen H L, Li T, Li K, et al. Experimental and Numerical Modeling Research of Rubber Material during Microwave Heating Process[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54: 1289–1300.
- [6] Vriezinger C A, Sánchez-Pedre O S, Grasman J. Thermal Runaway in Microwave Heating: A Mathematical Analysis[J]. Applied Mathematical Modeling, 2002, 26 (11): 1029–1038.
- [7] Chen H L, Li T, Liang Y, et al. Experimental Study of Temperature Distribution in Rubber Material during Microwave Heating and Vulcanization Process[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53 (3): 1051–1060.
- [8] Chen H L, Li T, Xing K, et al. Experimental Investigation of Technological Conditions and Temperature Distribution in Rubber Material during Microwave Vulcanization Process[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2017, 130: 2079–2091.
- [9] Sousa F D B, Scuracchio C H, Hu G H, et al. Devulcanization of Waste Tire Rubber by Microwaves[J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 138: 169–181.
- [10] Keangin P, Narumitbowonkul U, Rattanadecho P. Analysis of Temperature Profile and Electric Field in Natural Rubber Glove due to Microwave Heating: Effects of Waveguide Position[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. U. K. : IOP Publishing, 2018: 1–12.
- [11] Goodwin G C, Middleton R H, Seron M M, et al. Application of Nonlinear Model Predictive Control to an Industrial Induction Heating Furnace[J]. Annual Reviews in Control, 2013, 37 (2): 271–277.
- [12] Ayappa K G, Davis H T, Crapiste G, et al. Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations[J]. Chemical Engineering Science, 1991, 46 (4): 1005–1016.
- [13] Basak T. Analysis of Microwave Propagation for Multilayered Material Processing: Lambert's Law versus Exact Solution[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43 (23): 7671–7675.
- [14] 陈耀庭. 橡胶的热物理性质[J]. 特种橡胶制品, 1980, 2 (2): 67–87.

收稿日期: 2020-01-09

Thermal Field Distribution and Interface Characteristics of Multilayer Rubber Composite during Microwave Heating

ZHU Shanliang, LI Tao, GU Yuchen, LI Chengcheng, CHEN Hailong, WANG Dongxu, LI Qingling

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: One-dimensional unsteady finite element heating PDE model based on Maxwell equation was established for microwave heating of multilayer rubber composites under different wave sources. Taking SBR material and NBR material complexing as examples, the effects of material thickness and microwave power on the temperature field and interface characteristics of multilayer (two-layer) rubber under single/double wave sources were simulated by the finite-difference time-domain method. The results showed that the change of microwave power would affect the temperature distribution of multilayer rubber composite. The microwave amplitude would change slightly at the interface of multilayered rubber materials. The rubber materials with small dielectric loss should be directly exposed to the microwave source, which was conducive to the penetration of microwave. The thickness of each rubber layer should be controlled below the critical penetration depth. Compared with single source microwave heating, use of multi-source microwave heating could improve the heating uniformity. The model validity of this study was verified by comparison with the results of the traditional finite element model.

Key words: multilayer rubber composite; finite-difference time-domain method; microwave heating; thermal field distribution; interface characteristics