

基于动网格的微波加热温度均匀性数值计算方法

杨 彪^{1,2†}, 王世礼¹, 郭林嘉¹, 彭金辉²

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500;

2. 昆明理工大学 非常规冶金教育部重点实验室, 昆明 650500)

摘 要: 微波加热过程中物料内部温度的均匀性一直是研究的热点问题. 针对“热失控”现象产生的机理, 从微波传输线出发, 根据广义传输线理论, 利用传输线上电压和电流的分布关系推导出微波谐振腔内电磁场幅值与相位间的关系, 在此基础上, 提出一种微波加热运动状态物料的数值计算模型. 该模型采用动网格技术跟踪求解域边界的变化量, 分别针对求解域内部及其边界处网格移动变形给出控制函数, 不仅可解决微波加热数值计算过程中由于求解域网格的移动导致的网格交叉缠绕问题, 还可在满足计算精度的前提下, 有效地减少网格节点移动的计算. 数值计算结果表明, 微波加热处于运动状态下物料的温度均匀性优于微波加热静止状态下物料的温度均匀性, 且所提出的微波加热运动状态物料计算模型具有可行性和有效性. 微波应用器装置加热活性炭球团的实验结果也表明, 所提出的方法能有效抑制微波加热温度的突变.

关键词: 微波加热; 热失控; 广义传输线; 动网格技术; 控制函数; 数值计算

中图分类号: TN801

文献标志码: A

Numerical calculation of temperature uniformity in microwave heating based on moving mesh

YANG Biao^{1,2†}, WANG Shi-li¹, GUO Lin-jia¹, PENG Jin-hui²

(1. College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; b. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy of Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The temperature uniformity of materials in the process of microwave heating is a hot issue. A numerical calculation of the motion state of the microwave heating material model is proposed for the mechanism for “thermal runaway” phenomenon, based on the facts that the relationship between the resonant cavity of microwave electromagnetic field amplitude and phase are derived from the microwave transmission line and the generalized transmission line theory, and the relationship between the distribution of transmission line voltage and current. The change of dynamic mesh boundary tracking solution is used in this model, the control function for internal domain and boundary grid movement and deformation is proposed, which not only can solve the problem of the grid cross winding solving domain in mobile grid resulted from numerical calculation of heating process, but also can reduce effectively calculation of the mesh mobile node under meeting the calculation accuracy. The numerical results show that the temperature uniform of the motion state of the material is better than that of the static state of the material using microwave heating, and that verify the feasibility and effectiveness of the proposed numerical calculation model. The experimental results show that the proposed method can inhibit the mutations of the microwave heating temperature.

Keywords: microwave heating; thermal runaway; generalized transmission line; moving mesh technique; control function; numerical calculation

0 引 言

“热失控”是微波加热过程中出现的一种非稳定的热物理现象, 是微波与物料相互作用形成正反

馈的结果, 微波输入功率的微小改变会引起被加热对象温度迅速发生很大变化^[1]. 这种在物料中产生的局部热斑, 虽然体积很小, 却会使谐振腔有效品质

收稿日期: 2017-07-22; 修回日期: 2017-11-09.

基金项目: 云南省高校人才启动基金项目(KKSYS201503006).

责任编委: 段志生.

作者简介: 杨彪(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事多物理场耦合分析及数值计算、微波加热系统的效能评估、过程控制与预测控制及其应用等研究; 王世礼(1991—), 男, 硕士生, 从事多物理场仿真与数值计算的研究.

†通讯作者. E-mail: ybiaocn@163.com.

因数值大大降低,导致更多模式的出现,并提供热斑良好的功率耦合,从而加速“热失控”效应^[2-3].因此,如何改善温度分布的均匀性是解决“热失控”现象的关键. Ayappa^[4]应用1D平面波模型,研究了介电特性的变化对微波辐射深度的改变,探讨了不均匀的温度(“热点”和“冷点”)和“热失控”导致的破坏性后果; Chatterjee等^[5]对多孔介质的加热进行了仿真,将其温度依赖性解释为孔径的变化缘于电磁场分布的变化所致,并且指出温度依赖性是一个材料特性和微波能传输方程耦合的数学问题. 温度场和电磁场一般通过物质介电常数的温度依赖性耦合在一起. Kriegsmann^[6]最早开展了微波加热“热失控”物理机理研究,此后该物理现象受到了广泛关注. 同时,消除“热失控”也具有工业应用价值,文献[7]在微波深度干燥富硒渣的应用中采用自适应预测控制消除“热点”,进而减少了过热硒的挥发量,提高了硒的获得率.

本文采用动网格技术,研究微波加热温度的均匀性. 所谓动态网格是指随时间演化的网格. 动态网格自适应是实现网格随时间运动、变形与重剖分的一种自动化的方法,是带有边界面演化问题的数值模拟中一项不可回避的难点与技术瓶颈. 动态网格自适应是工程科学与计算科学交叉的一个重要研究领域^[8]. 目前,科学与工程计算研究的重点是大规模、非线性、多尺度以及多场耦合问题,因此对高性能算法的研究提出了更高的要求. 流固耦合是一个典型的大规模多场耦合问题^[9]. 在自然界与工程领域中大量地存在流固耦合过程^[10],桥断面风振^[11]、机翼颤振边界预测^[12]、导弹发射^[13]等均属于这一范畴.

国内外学者在网格移动算法的研究方面做了大量的工作^[14]. 在求解考虑包含物体或边界相对运动的非结构网格场问题时,需要考虑如何确定场中各点的网格速度. 对于一个给定的边界移动速度,如何找到一个速度的合理的空间分布使得单元的扭曲度最小. 如果网格速度的分布不光滑,则会很快出现扭曲较厉害的网格. 文献[15]提出了用拉普拉斯光顺方法获得网格的速度场.

为改善微波加热温度均匀性,根据广义传输线理论推导出电磁场驻波节点和腹点的分布方程^[16],提出一种运动加热模型;为满足仿真计算的要求,采用动网格算法,对求解域及其边界处的网格移动变形构建相应的控制函数. 从计算量及计算精度角度考虑,构建微波加热几何模型,分别指定求解域及其边界处网格的控制函数,从而有效避免网格的交叉缠绕,完成采用动网格技术来实现求解域的运动.

1 微波加热系统数学模型

1.1 建立微波加热数学模型

微波加热数学模型描述的是典型的多物理场耦合现象,涉及电磁场和热传导方程的耦合,对于电磁场方程,有如下Maxwell方程组:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0. \quad (4)$$

其中: H 、 D 、 E 、 B 、 J 和 ρ 均为空间位置和时间的时变函数, H 为磁场强度(A/m), D 为电位移(C/m^2), E 为电场强度(V/m), B 为磁通量密度(Wb/m^2), J 为电流密度(A/m), ρ 为电荷密度(C/m^3). 在微波加热过程中,介质的介电损耗和磁滞损耗把微波能转换成热能. 热源由该过程提供,并通过此方式与电磁场进行耦合,即

$$Q(x, y, z, t) = \omega[\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}}''(T)|E|^2 + \mu_0 \mu_{\text{eff}}''(T)|H|^2]. \quad (5)$$

其中: Q 为源项,即热流密度,表示被加热物料所吸收的热量; T 为温度; $\varepsilon_{\text{eff}}''$ 为介电系数虚部; μ_{eff}'' 为磁导率虚部. 物料热源项取决于电场、磁场(E 、 H)、角频率 ω 和物料介电特性. 如果物料对磁场没有明显的磁化,则物料的磁损耗(式(5)右端第2项)可忽略. 此外,一般微波加热应用器的微波源在加热时是时谐的,电场 E 的正弦周期变化非常快,约 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ s,所以,一般用电场强度的均方根值(E_{rms})对物料内的功率密度进行计算^[17],即

$$Q(x, y, z, t) = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}}''(T) E_{\text{erm}}^2. \quad (6)$$

由于被加热物料为固体,根据如下固体传热方程进行微波加热物料过程的计算:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}. \quad (7)$$

其中: α 为热扩散系数, ρ 为密度, C_p 为比热容.

根据微波加热理论,微波加热谐振腔可等效为终端短路的传输线,加热物料视为有耗传输线,加热的过程即是微波在谐振腔中的物料内传输而与物料相互作用耗散为热能的过程. 下面将从传输线理论出发,研究利用传输线上电压与电流的分布关系,推导出微波谐振腔内电磁场幅值与相位间的关系.

1.2 传输线理论

传输线理论在微波系统的分析中有着至关重要的地位,它将电场和磁场的分析转化为电压和电流的分析,从而可以将电路理论和网络分析的方法运用到

微波系统中. 当负载终端短接时, 传输线系统可简化成图1^[16].



图1 简化的传输线系统

沿线电压、电流的瞬时表达式为

$$u(z, t) = 2|u_{i2}|^2 \sin \beta z \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2 \right), \quad (8)$$

$$i(z, t) = 2 \frac{|u_{i2}|^2}{Z_0} \cos \beta z \sin (\omega t + \varphi_2). \quad (9)$$

其中: $|u_{i2}|$ 为终端入射电压, φ_2 为其相位, β 为波的相移常数. 电流、电压的相位关系如图2所示.

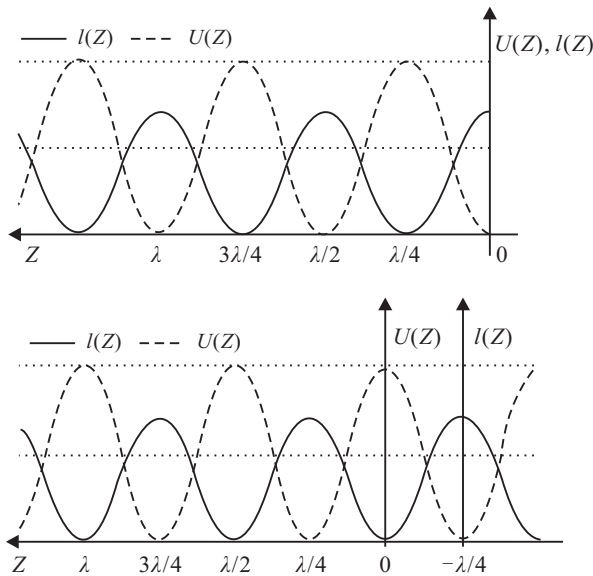


图2 沿线电流、电压的相位关系

由广义传输线理论可知, 当负载终端短路时, 整个传输线系统处于全反射状态. 并且随着时间的推移, 沿线的波腹点处电压的模恒为最大值, 而波节点处电压的模恒为零, 即线上获得 $|u|_{\max}$, $|u|_{\min}$ 的位置固定不变^[16]. 线上电流的分布规律也是如此. 线上电压(电流)的驻波腹点(节点)与相邻的驻波节点(腹点)时空相位相差为 $\pi/2$, 距离相差 $\lambda/4$. 因此可以通过移动负载终端来改变线上电压、电流节点和腹点的分布. 这一方法也可以应用到微波谐振腔中去, 使得驻波腹点和节点的位置发生改变, 即使得腔内微波能均匀分布, 避免局部温度过高或过低, 最终使“热失控”现象得到有效控制.

2 动网格技术

在实际工程应用中, 经常会遇到带有移动边界的复杂的非稳态流动问题, 例如流固耦合、空气弹性变形问题、多体分离问题等^[18]. 计算流体动力学中的一个关键问题就是如何处理移动的边界^[19]. 在气动弹性数值模拟中, 研究对象通常会发生刚性的或弹性的

变形, 在这种情况下, 需要运用动网格技术实现求解域的运动^[20]. 计算区域随时间改变, 计算区域的网格也应做出相应的调整^[21]. 网格的调整方法包括网格的移动与重剖分. 网格移动方法只改变节点的位置, 节点之间的拓扑连接关系不变. 网格的重剖分是对求解区域重新划分网格. 网格的重剖分需要重新生成一次网格, 并且需要将原网格上的信息映射到新的网格上, 这两步的计算量较大, 并且容易产生插值误差, 对后续的计算不利. 因此, 首选采用网格的自适应移动方法.

2.1 求解域网格控制

为了满足各种复杂、不规则几何形状的被加热物料的计算, 并且从减小计算量角度考虑, 在满足精度的前提下, 构建微波加热几何模型, 如图3所示.

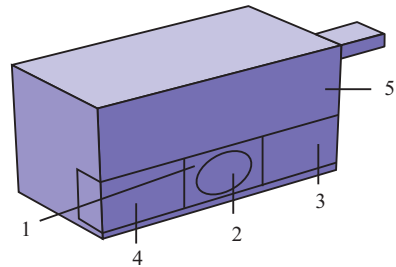


图3 微波加热几何模型

图3中: 域1为被加热物料的优化区域, 其包含了域2, 域2为被加热物体, 域3和域4为网格自由移动变形域, 域5为网格固定区域.

2.2 求解域内网格移动变形控制

移动网格技术作为自适应网格的一种, 最初是由Guojun等^[22]提出的, 后来被一些学者广泛应用于偏微分方程领域, 并取得了一定的成果^[23-24]. 基于Laplace方程映射的动网格移动方法, 就是把整个流体求解区域看作弹性固体, 所有点的位移可以通过求解Laplace方程得出. 新的网格点位置通过上一个时间步的节点位置与节点的位移求出. 即当边界移动时, 让网格内部结点的位移满足Laplace方程, 求出随着边界移动内部节点相应产生的协调的位移, 从而获得新的网格. 这是一种基于有限元法的网格移动方法. 三维情形下, 求解域内网格控制方法, 单元选择4节点的四面体单元, 如图4所示.

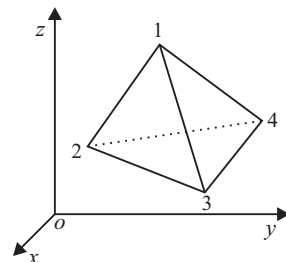


图4 4节点四面体单元

$$\begin{cases} \nabla^2 u = 0, \\ \nabla^2 v = 0, \\ \nabla^2 w = 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中: ∇^2 为Laplacian算子; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的位移. 对于 x 方向而言,有

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad (11)$$

$$u = u_{\text{边界条件}}. \quad (12)$$

由式(11)和(12)可得等效的方程组表示形式,即

$$\int_V -\delta u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) dv = 0. \quad (13)$$

其中: V 为体积,即体积分. 对式(13)进行分部积分,可得目标函数

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} \int_V -\delta u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) dv. \quad (14)$$

有限元计算方法中的节点位移以矩阵形式表示为

$$u = Na^e. \quad (15)$$

其中: N 为插值函数, a^e 为节点位移向量. 由此可得

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right)^T = \left(\frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_i}{\partial y}, \frac{\partial N_i}{\partial z} \right)^T a^e. \quad (16)$$

图4显示的四面体单元以4个角点1,2,3,4为节点,每个节点有3个位移分量,即

$$a_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}, \quad i = (1, 2, 3, 4). \quad (17)$$

每个单元的12个节点分量可表示为

$$a^e = [a_1, a_2, a_3, a_4]. \quad (18)$$

单元的位移模式选为

$$\begin{cases} u = \lambda_1 + \lambda_2 x + \lambda_3 y + \lambda_4 z, \\ v = \lambda_5 + \lambda_6 x + \lambda_7 y + \lambda_8 z, \\ w = \lambda_9 + \lambda_{10} x + \lambda_{11} y + \lambda_{12} z. \end{cases} \quad (19)$$

将节点位移代入式(19),求出系数 $\lambda_1 \sim \lambda_{12}$,可得

$$\begin{cases} u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4, \\ v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4, \\ w = N_1 w_1 + N_2 w_2 + N_3 w_3 + N_4 w_4. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} N_1 = (d_1 + e_1 x + f_1 y + g_1 z)/6V, \\ N_2 = -(d_2 + e_2 x + f_2 y + g_2 z)/6V, \\ N_3 = (d_3 + e_3 x + f_3 y + g_3 z)/6V, \\ N_4 = -(d_4 + e_4 x + f_4 y + g_4 z)/6V. \end{cases} \quad (21)$$

其中系数分别表示为

$$\begin{cases} d_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} e_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \\ f_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} g_1 = - \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}. \end{cases} \quad (22)$$

同理,系数 $d_2, d_3, d_4, e_2, e_3, e_4, f_2, f_3, f_4$ 也可求得. 式(21)中 V 为单元体积,即

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

将移动边界的位移加入到此方程组中,即可求出内部点为了与边界点移动保持协调而产生的 x 方向的位移. 同理,可求出节点 y, z 方向的位移.

2.3 求解域边界网格移动变形控制

如图3所示,域1网格在运动过程中会导致域3和域4内网格的移动变形,由于域5内网格固定不动,必须考虑域3和域4边界处网格的移动变形,以满足域3和域4边界处网格与域5边界处网格的连续性,二维情形如图5所示.

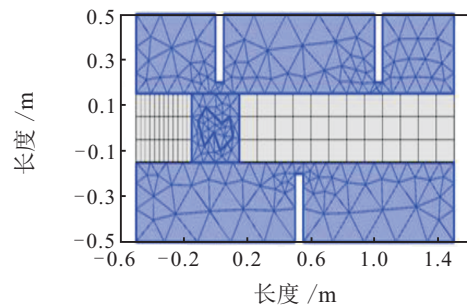


图5 二维平面中边界处网格划分

如图5所示,深色区域网格固定不动,浅色区域网格自由移动. 随着网格自由移动,网格固定区域和网格自由移动区域边界处会发生网格不连续问题.

针对上述问题,提出一种PDE控制函数,用来控制域3和域4边界处网格的移动变形,以满足边界处网格移动变形的连续性. 在科学技术各领域中,有很多如力学、热学、电学、光学等问题,可以归结为偏微分方程问题. 将偏微分方程与边界条件和初始条件构成的数学模型联合,可以得到其数值解.

系数型通用PDE方程组为

$$e^a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(-c \nabla u - \alpha u + \gamma) +$$

$$\beta \nabla u + au = f, \text{int } \Omega, \quad (24)$$

$$u = r, \text{on } \Omega. \quad (25)$$

式(24)方程等式左边第1项为质量,第2项为阻尼质量,第3项为守恒通量,第4项为对流项,第5项为吸收项;式(24)等号右边为源项。

为了控制微波加热模型中域3和域4边界处网格移动变形的连续性,通过指定式(24)方程中对应的系数可以得到满足本文要求的边界处网格移动变形控制函数。

2.4 边界条件载荷

被加热物料运动速度与时间关系的函数如图6所示。

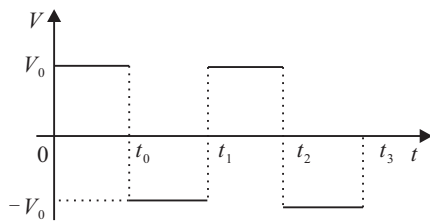


图6 被加热物料运动速度与时间关系

由图6可以看出,速度与时间关系为分段函数,具有非连续性特点. 为避免指定边界条件的复杂性,保证边界条件的连续性,对速度进行时间积分,得到其连续的位移边界条件,即

$$X = \int_l v dt. \quad (26)$$

其中: X 为边界位移量, v 为边界移动速度. 则位移 X 与时间的关系如图7所示。

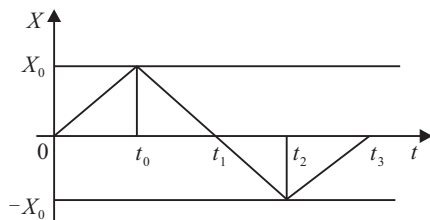


图7 被加热物料运动位移与时间关系

3 仿真实验与结果分析

仿真腔体尺寸为 $280 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$, 激励源位于模型的右侧 $x = 280 \text{ mm}$ 的平面上, 尺寸为 $50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 激励源频率为 2.45 GHz , 采用单微波源输入, 其馈入功率为 500 W , 被加热物料的半径 $r = 30 \text{ mm}$, 比热容 $C_p = 3.64 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热扩散系数 $\alpha = 0.55 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, 密度 $\rho = 1050 \text{ kg}/\text{m}^3$, 相对介电常数 $\epsilon_r = 65 - 20 \cdot j$, 加热过程物料的边界运动速度 $v = 0.04 \text{ m/s}$. 网格单元尺寸由 Nyquist 准则^[25]来校核, 准则为

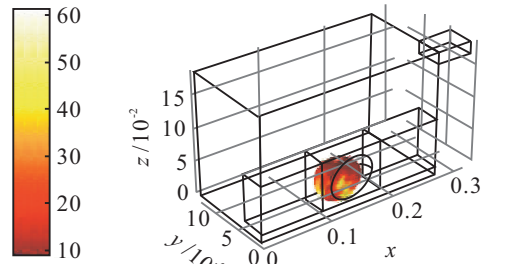
$$S_{\max} < \lambda/2 = c/(2f\sqrt{\epsilon_0\mu_r}). \quad (27)$$

其中: λ 为波长, 单位为 mm ; c 为真空光速, 单位为 m/s ; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 为真空的介电常数, 单位为 F/m ; $\mu_r = 1$ 为电介质材料的相对磁导率。

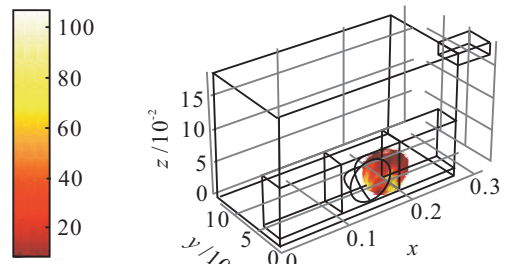
空气域网格单元尺寸小于等于 $0.2c/f$, 样品域网格单元尺寸不大于 $0.2c/(f\sqrt{\epsilon_0\mu_r})$ 。

3.1 移动加热结果

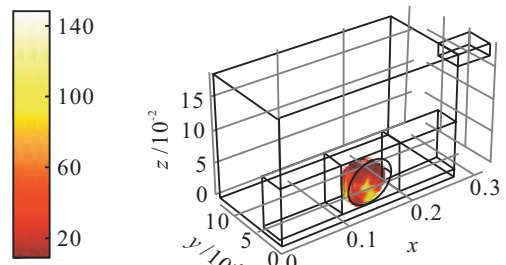
移动加热结果如图8所示。



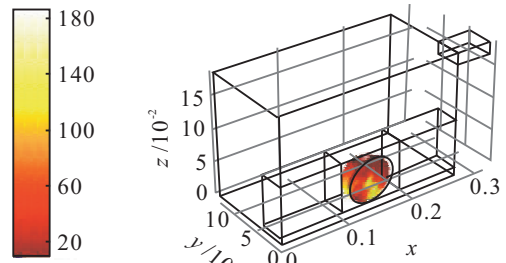
(a) 移动加热 5 s



(b) 移动加热 10 s



(c) 移动加热 15 s



(d) 移动加热 20 s

图8 移动加热

3.2 静止加热结果

静止加热结果如图9所示。

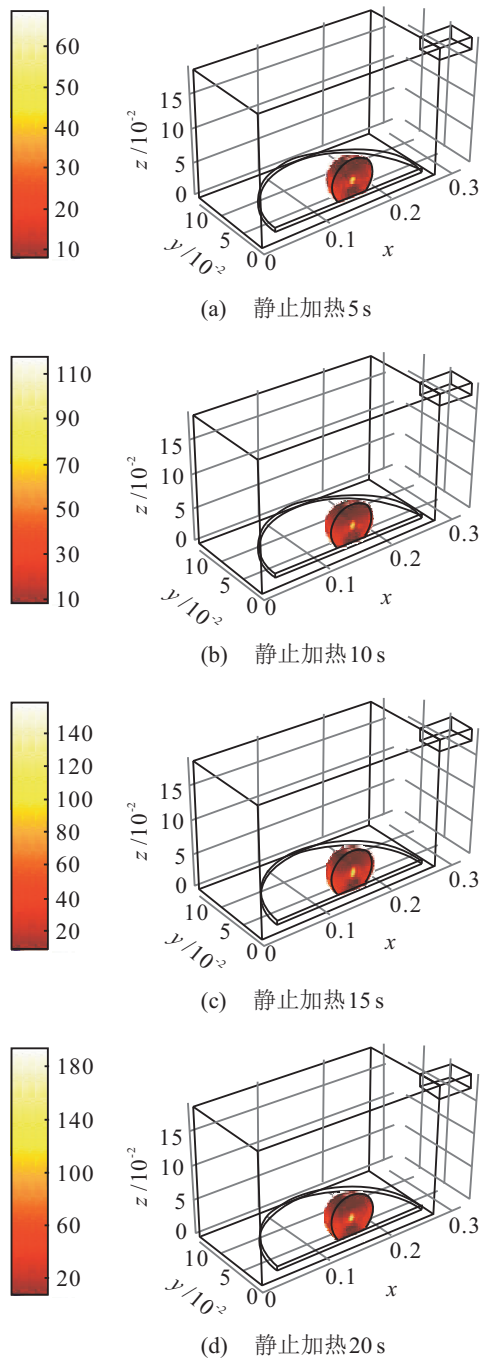


图9 静止加热

3.3 仿真结果分析

本文通过对微波加热几何模型的构建,对整个计算模型的计算过程进行分析,在考虑计算精度和降低计算量的前提下,提出求解域内及求解域边界处网格的移动变形控制.图8和图9分别为微波加热运动物料和静止物料的结果,实验中分别取时间节点5s、10s、15s、20s进行观察.由运动加热的图8与静止加热的图9相比较可以看出,微波加热运动物料在5s、10s、15s、20s时效果相比于加热静止物料,其局部最高温度分别为60°C、100°C、120°C、160°C,而微波加热静止物料其局部最高温度为70°C、110°C、130°C、

180°C,并且在静止加热4个时间节点上,被加热物料上的温度最高部分所占整个物料体积比例均很小,即都有局部热斑出现,其余绝大部分较之温度很低,其分别约为30°C、45°C、60°C、75°C,温差较大,温度均匀性较差,然而,在运动加热情况下温度均匀性有了很大的提高.相比于运动加热,物体静止加热时,虽然物体出现局部过热的面积/体积相对较少,但最高温度均高于相同处理时间的运动加热.微波加热静止与运动两种状态下物料最高温度与最低温度随时间变化的曲线如图10所示.

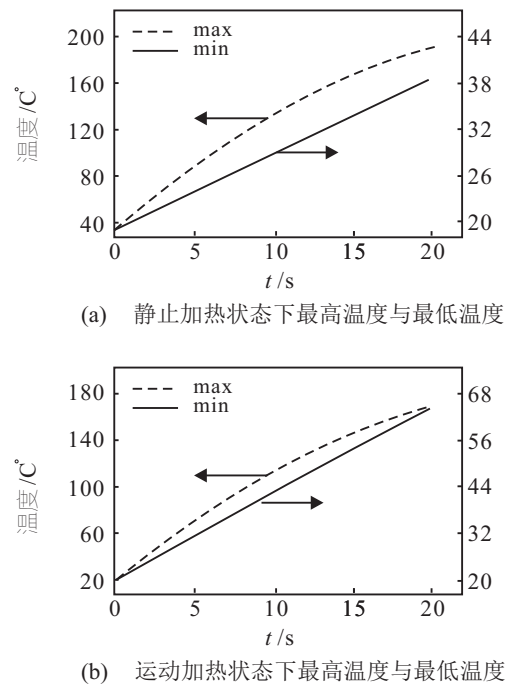


图10 最高温度与最低温度

取加热时间为20s,从图10(a)可以看出,加热静止物料达到的最高温度为180°C,平均温度为110°C;由图10(b)可知,加热运动物料达到的最高温度仅为160°C,平均温度为100°C.在加热完成后,计算整个被加热物料的温度分布标准差,加热静止为29.7°C,而加热运动为21.8°C,相比于静止加热,温度均匀率提高了26.6,说明微波加热运动物料,其温度分布的均匀性较微波加热静止物料也有了很好的提高,物料内部局部温差得到了显著的降低.

4 实验分析与方法验证

根据文献[6]的研究结论可知,当热失控现象发生时,稳态温度随输入微波功率呈“S”型曲线.具体表现为:在微波加热介质温度达到稳定分布状态时,如果输入微波的功率出现微小变化,则最终导致稳态温度发生突变.为了验证动网格数值计算微波加热温度均匀性方法的有效性,开展实验分析与验证.

4.1 实验方法与设备

取活性炭磨碎后,按比例混入玻璃胶,然后用研钵初步混匀,再经干式磨样机混匀,制备成半径为30 mm的球团,将球团样品置于烘箱150°C干燥2 h.微波应用器装置及实验样品分别如图11和图12所示.



图11 微波应用器装置



图12 微波加热试样

4.2 实验结果与分析

为了验证动网格数值计算微波加热温度均匀性方法的有效性,设计相应的实验方案,分别记录在不同的功率下被加热物料的稳态温度,加热时间均为7 min.两种状态下稳态温度与输入功率关系如表1所示.

表1 两种状态下稳态温度与输入功率关系(7 min)

输入功率/W	稳态温度/°C	
	静止	运动
500	84.3	80.5
600	99.3	94.2
700	114.5	109.7
800	132.2	128.6
900	148.1~271~298.1	160.5
1000	168.1~191	220.7
1100	305	280.3

两种状态下稳态温度与输入功率变化关系如图13所示.

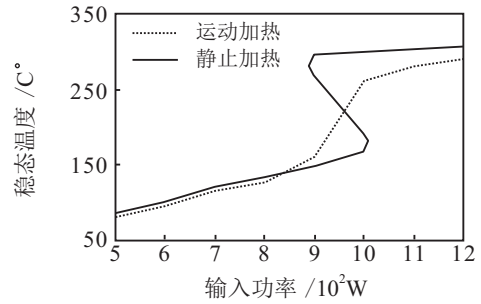


图13 两种状态下稳态温度与输入功率关系

由图13可以看出:处于静止加热状态下的物料,经过多组重复实验,在输入功率为500~800 W时,温度变化不明显;然而,在900~1000 W时,温度短时间内从148.1°C上升到271°C,又跳变到298.1°C,稳态温度发生突变现象,即当微波功率发生微小的改变时,温度产生剧烈的变化,即产生了温度热失控.处于运动状态下的物料,在整个输入功率范围内并没有温度突变现象,其温度均匀性明显优于前者,从实验角度论证了所提出的方案的有效性和可行性.

5 结论

本文从广义传输线理论出发,根据微波谐振腔体内电磁场驻波节点与腹点分布关系,提出了微波加热运动状态物料的数值计算模型.通过计算分析,并与微波加热静止物料对比,验证了其加热均匀性效果.采用动网格技术,对整个求解域网格运用不同的控制方法,对绝大部分空气域网格采用固定策略,而对于不规则的被加热物体网格,将其包含于规则的网格之内,可降低网格移动变形处理的复杂性.同时,在整个计算模型中,不仅控制了求解域内部网格移动变形,而且还对边界处网格移动变形的连续性采取了相应的控制措施.数值计算结果表明:微波加热运动物体的温度均匀性优于微波加热静止物体,验证了所提出的结合动网格技术跟踪求解域边界变化的有效性.同时,微波应用器装置加热活性炭球团的实验结果也表明:所提出的方法能有效抑制微波加热温度的突变,使物料温度分布更均匀.采用所提出的微波加热运动状态物料的数值计算模型研究微波加热物料温度的均匀性是有效可行的,为动网格技术在微波加热中的应用提供了一定的借鉴意义.

参考文献(References)

[1] 黄卡玛, 卢波.微波加热化学反应中热失控条件的定量研究[J].中国科学(E辑:科学技术),2009,39(2):266-271.
(Huang K M, Lu B. Out of control conditions of thermal microwave heating in chemical reaction set quantitative research[J]. Chinese Science (E: Science and

- Technology), 2009, 39(2): 266-271.)
- [2] Feng X, Sun J, Ouyang M, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module[J]. *J of Power Sources*, 2015, 275: 261-273.
- [3] Spinner N S, Field C R, Hammond M H, et al. Physical and chemical analysis of lithium-ion battery cell-to-cell failure events inside custom fire chamber[J]. *J of Power Sources*, 2015, 279: 713-721.
- [4] Ayappa K G. Modelling transport processes during microwave heating: A review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 1997, 13(2): 1-69.
- [5] Chatterjee A, Basak T, Ayappa K G. Analysis of microwave sintering of ceramics[J]. *Aiche J*, 1998, 44(10): 2302-2311.
- [6] Kriegsmann G A. Thermal runaway in microwave heated ceramics: A onedimensional model[J]. *J of Applied Physics*, 1992, 71(4): 1960-1966.
- [7] Yang B, Liang G A, Peng J H, et al. Self-adaptive PID controller of microwave drying rotary device tuning on-line by genetic algorithms[J]. *J of Central South University*, 2013, 20(10): 2685-2692.
- [8] Lopez E, Nigro N, Storti M, et al. A minimal element distortion strategy for computational mesh dynamics[J]. *Int J for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 69(9): 1898-1929.
- [9] Ghatage S V, Khan M S, Peng Z, et al. Settling/rising of a foreign particle in solid-liquid fluidizedbeds:Application of dynamic mesh technique[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 170: 139-153.
- [10] Yang D. Investigation of the excess pore water pressure inside compacted asphalt mixture by dynamic triaxial tests[J]. *Construction Building Materials*, 2017, 138: 363-371.
- [11] 蔡显新, 王文凯, 蒋燕英, 等. 一种有效的网格自适应方法[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(2): 241-245.
(Cai X X, Wang W K, Jiang Y Y, et al. An efficient mesh adaptive method[J]. *J of Computational Mechanics*, 2007, 24 (2): 241-245.)
- [12] Liang X, Min X U, Jie L I, et al. Flutter and dynamic analysis based on CFD/CSD coupling method[J]. *J of Vibration Shock*, 2012, 31(3): 106-110.
- [13] Keye S. Fluid-structure coupled analysis of a transport aircraft and flight-test validation[J]. *J of Aircraft*, 2011, 48(2): 381-390.
- [14] 傅德彬, 姜毅. 用动网格方法模拟导弹发射过程中的燃气射流流场[J]. *宇航学报*, 2007, 28(2): 423-426.
(Fu D B, Jiang Y. Simulation of the flow field of a gas jet during the launching of a missile by moving mesh method[J]. *J of Astronautics*, 2007, 28 (2): 423-426.)
- [15] Soto O A, Baum J D, Lohner R. Inter-element stabilization for linear large-deformation elements to solve coupled CFD/CSD blast and Impact problems[C]. 54th Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf. Boston: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2013: 240-241.
- [16] 顾继慧. 微波技术[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2004: 108-126.
(Gu J H. Microwave technology[M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 2004: 108-126.)
- [17] Saltiel C, Datta A K. Heat and mass transfer in microwave processing[J]. *Advances in Heat Transfer*, 1999, 82(4): 1-94.
- [18] Zhang W, Gao C, Ye Z. Research progress on mesh deformation method in computational aeroelasticity[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2014, 35(2): 303-319.
- [19] Xie L, Xu M, Zhang B, et al. Space points reduction in grid deforming method based on radial basis functions[J]. *J of Vibration Shock*, 2013, 32(10): 141-145.
- [20] Schuster D M, Liu D D, Huttshell L J. Computational aeroelasticity: Success, progress, challenge[J]. *J of Aircraft*, 2003, 40(5): 843-856.
- [21] Lopez E, Nigro N, Storti M, et al. A minimal element distortion strategy for computational mesh dynamics[J]. *Int J for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 69(9): 1898-1929.
- [22] Guojun Liao, Dale Anderson. A new approach to grid generation[J]. *Applicable Analysis*, 2007, 44(3): 285-298.
- [23] Tukovic Z, Jasak H. A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow[J]. *Computers & Fluids*, 2012, 55: 70-84.
- [24] Wan D, Turek S. Fictitious boundary and moving mesh methods for the numerical simulation of rigid particulate flows[J]. *J of Computational Physics*, 2007, 222(1): 28-56.
- [25] Mairabito C, Nareyanan A, Perez D, et al. Femlab model of a couple electromagnetic-thermal boundary value Problem[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006: 1-58.

(责任编辑: 闫妍)