

粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温度场的仿真

陈震 徐凤英 李长友 姚振冲

华南农业大学工程学院, 广州 510642

摘要 为解决粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温度场连续加工测控较难、品质恶变等问题, 构建了粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温升模型, 分析其辐照强度的空间变化, 并应用数值仿真方法, 研究不同粒径食品变距瞬态熟化温度场形成特性。结果表明: 粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温度场形成与辐照强度、粒径尺寸、受辐照距离等因素相关, 粒状食品表面热损速率与内能变化速率间满足能量平衡瞬态响应; 沿红外线源辐照方向, 物料内部瞬态熟化温度呈递减分布; 4 mm 粒径荔枝果肉加工食品受 50 mm 距离辐射, 其熟化温度高且均匀。

关键词 粒状食品; 红外线源; 熟化温度场; 仿真; 辐射

中图分类号 TS 205 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)01-0116-06

粒状食品结构紧密、稳定性好、营养成分不易溶失, 已成为食品加工的重要类型。热加工瞬态温度场特性是影响熟化品质与效率的重要因素。粒状食品加工瞬态温度场不仅与受热传递方式有关, 而且与粒径尺寸、辐射源结构相关^[1-2]。红外线源辐射因传热阻力低、热利用效率高、易连续布置等优点, 在食品热加工连续生产中得到较广泛应用。粒状食品受红外线源辐射作用, 其熟化瞬态温度场存在空间辐射照度和个体结构尺寸差异, 易出现内部熟化温度不均现象。这严重影响了粒状食品连续热加工品质与效率。

目前, 对粒状食品红外线源辐射熟化加工温度场控制主要采用测定, 但在线测量易受其他测试点干涉, 难以准确选取。采用损伤性在线测量, 虽可解决测试点干涉问题, 但对粒状食品造成破坏性损害。另外, 还有些食品在测量中采用超声、CT 或 MR 等无损测量, 但其测试成本较高, 不宜在生产中广泛应用。近年来, 应用数值仿真法有效模拟食品保鲜、干燥过程物料内部的温度场^[3-4], 但对粒状食品瞬态熟化温度场特性的研究尚缺。笔者通过构建粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温升模型, 分析红外线源空间辐射照度, 应用数值仿真研究不同粒径、不同距离粒状食品红外线源辐射的瞬态熟化温度场形成过程, 旨在揭示熟化温度场梯度势差特性, 为粒状食品

高效率、高品质、低成本熟化工艺参数的优化提供理论依据。

1 仿真模型与模拟方法

1.1 假设条件

I. 粒状食品为各向同性材料的球形颗粒物料, 无粘弹性、蠕变;

II. 粒状食品与红外辐射源均为灰体, 黑度系数为 1;

III. 粒状食品瞬态熟化过程无表面水分散失;

IV. 粒状食品表面与空气介质间的热扩散系数为无穷大, 且空气介质温度均匀一致;

V. 粒状食品处于开放环境中, 瞬态受热平衡时, 其内部温度场在空间上均匀。

1.2 粒状食品物料辐射仿真模型

粒状食品受红外辐射源辐射加热熟化过程中, 其表面也向环境散热, 其瞬态熟化温度场不仅与热源、个体结构尺寸相关, 也与其距辐射源及外界环境关联^[5-6], 因此其受热熟化物理平台宜为自行设计的空间可变距调节平台, 如图 1 所示。

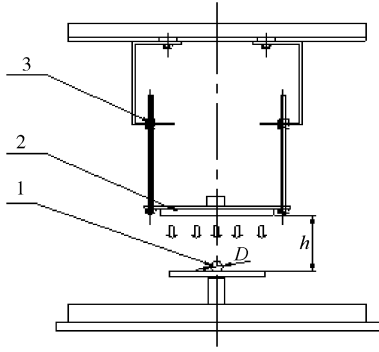
基于物理平台要求, 本试验构建能与环境对流换热的粒状食品红外线源辐射熟化变距仿真模型。在该仿真模型中, 粒状食品与红外线源辐射距离为 h , 直径为 D 。

收稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071583)

陈震, 博士, 工程师, 研究方向: 农产品加工技术与装备, E-mail: zhenchenid@scau.edu.cn

通信作者: 李长友, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工技术与装备, E-mail: lichyx@scau.edu.cn



1. 粒状物料 Particle material; 2. 辐射灯管 Radiation tube; 3. 辐射距离调节装置 Radiation distance adjusting equipment.

图 1 辐射干燥模型结构示意图

Fig.1 Schematics of radiation drying model structure

1.3 理论分析与数值模拟

基于粒状食品红外线源辐射瞬态熟化模型,其瞬态升温过程满足^[7-8]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho c} \quad (1)$$

粒状食品的热流率为

$$q = \bar{E} \cdot A_1 + \frac{\epsilon_1 \sigma A_1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \left(\left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right) \quad (2)$$

$$F_{12} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \quad (3)$$

当 $\frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0, F_{12} = 1$ (4)

粒状食品与空气对流交换的热量为

$$\rho V C \frac{\partial T}{\partial \tau} = h A_1 \cdot (T_1 - T_\infty) \quad (5)$$

式(1)~(5)中, A_1 、 A_2 分别为粒状食品表面、红外线源辐射表面面积, m^2 ; C 为比热容, $J/(kg \cdot K)$; T_1 、 T_2 分别为粒状食品与环境的绝对温度, K ; q 为热流率, W ; ρ 为密度, kg/m^3 ; F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数; ϵ 为黑度系数; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

粒状食品受红外线源辐射加热作用如图 2 所示,其中 E_B 、 E_c 、 \bar{E} 分别为红外线源在中心、外圆点辐照强度及其平均辐照强度, W/m^2 ; I_0 为辐射强度, W/sr ; P 为总辐射功率, W ; l 、 R 、 h 分别为红外线源辐射管长及半径、线源辐射上点至物料点垂直距离, m ; α 为粒状食品对线辐射源点的张角。

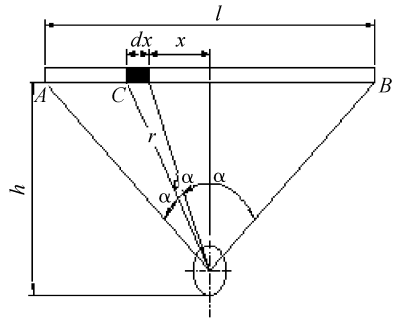


图 2 平行平面的红外线源辐射照度

Fig.2 Irradiance on parallel plane under IR linear source radiation

粒状食品受红外线源辐射加热作用,其平均辐照强度为

$$P = I_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta = \pi^2 I_0 \quad (6)$$

单位长度上的最大辐照强度为

$$I_l = \frac{I_0}{l} = 2LR \quad (7)$$

设红外线源辐射管的微小长度 dx , 则有

$$dI_\alpha = I_l \cdot dx \cdot \cos\alpha = I_l \cdot h \cdot \sec\alpha \cdot d\alpha \quad (8)$$

$$dE_\alpha = \frac{dI_\alpha}{r^2} \cos\alpha \quad (9)$$

在角度 α_1 和 α_2 之间积分^[15], 可得红外辐射线源上 A、B 点对粒状食品的平均辐照强度为

$$E = \int dE_\alpha = I_l \cdot \frac{1}{h} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \cos^2 \alpha d\alpha \quad (10)$$

因粒状食品与红外线源中心垂直且对称, 即有

$$E = \frac{I_l}{2h} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (11)$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{l}{2h} \right) \quad (12)$$

故其平均辐照强度为

$$\bar{E} = \frac{E_B + E_C}{2} \quad (13)$$

设红外线源长 l 为 300 mm, 辐射距离 h 分别为 100、150、200 mm, 则直径 34 mm 粒状食品的平均辐照强度 \bar{E} 值如表 1 所示。

由式(1)~(13)和表(1)可知, 粒状食品线源辐射熟化瞬态温度场形成存在高度非线性, 其温度场计算工作量大, 难以准确描述其瞬态温度场的形成特性, 而 ANSYS 软件在分析非线性温度场有精准、

表 1 不同红外线源距离的粒状食品平均辐照强度

Table 1 The average radiation irradiance on granular food at different IR linear source distances

高度/mm Height	A、B 点辐射强度/(W/sr) Radiation intensity at A, B points		A、B 点张角/(°) Field angle at A, B points		平均辐照度/(W/m ²) Average radiation irradiance
	I_0	I_a	α_1	α_2	\bar{E}
50	101.42	53.45	71.57	71.57	10 547.15
100	101.42	60.95	56.31	56.31	5 096.57
150	101.42	71.71	45.00	45.00	3 218.61
200	101.42	84.52	36.87	36.87	2 277.13

高效计算优势,因此本试验应用该软件进行数值仿真,比较不同粒径、不同红外辐射距离的粒状食品瞬态熟化温度场特性。

2 结果与分析

基于粒状食品受红外线源辐射的可变径、变距仿真,分别对粒状食品与红外线源进行物性参数设定。以荔枝果肉类粒状加工食品为例,其传热系数

为 $0.51 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度为 $941.31 \text{ kg}/\text{m}^3$,比热容为 $3.71 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[8],其初始温度与环境温度均为 295 K ,而红外线源表面辐射温度则为 573 K 。在压力恒定的情况下,红外线源与粒状食品简化为面与面辐射^[4,9],并采用 4 节点 PLANE55 平面单元划分红外辐射源与粒状食品。设置后的粒状食品与红外线源划分网格如图 3-A 所示,网格化后的节点位置则如图 3-B 所示。

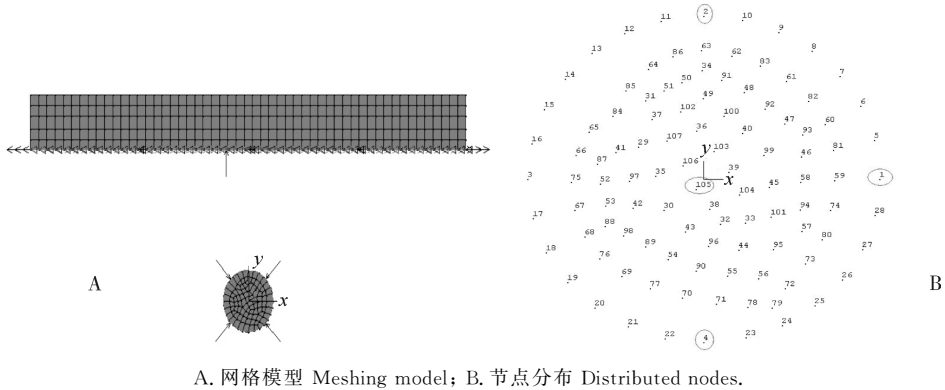


图 3 粒状食品红外线源辐射的网格模型及其节点分布

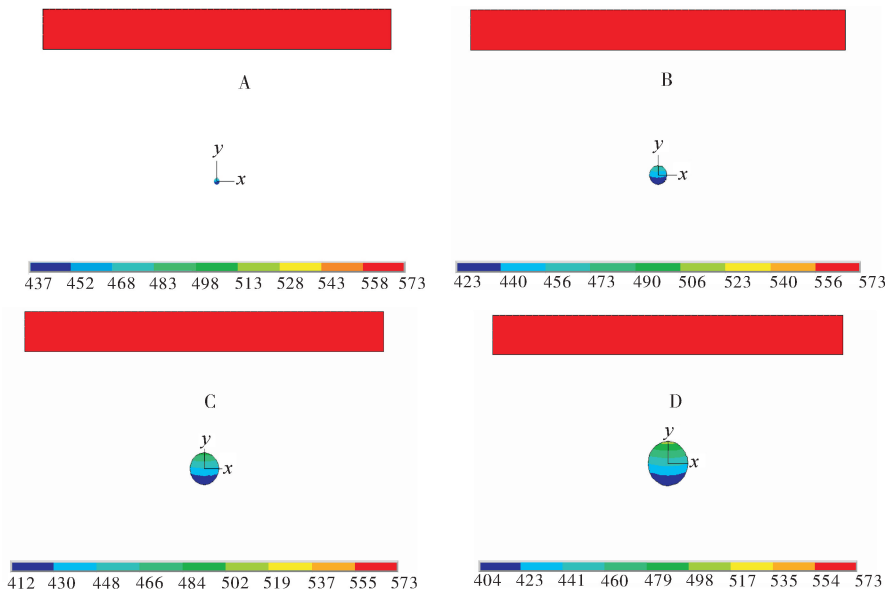
Fig. 3 Meshing model for granular food under IR linear source radiation and its distributed nodes

分别选取单颗粒状食品中心处、最上端、最右端和最下端共 4 处节点进行比较,节点位置如图 3-B 中圆圈标记所示。为便于比较各点瞬态熟化温度场差异,依次定义上述 4 处节点为 P1、P2、P3、P4。设定粒状食品与红外线源瞬态熟化温度场数值仿真求解总时间为 100 s ,步长为 1 s ,采用 Radiosity 求解器求解^[9]。通过仿真求解,可得到 4、14、24、34 mm 4 种不同粒径食品红外线源辐射的温度云图及其节点温度与时间的变化曲线(图 4 和图 5); 同样,可得 50、100、150、200 mm 4 种不同辐射距离的粒状食品的温度云图及其节点温度与时间的变化曲线(图 6 和图 7)。

由图 4 和图 5 可知,不同粒径食品红外线源辐射其整体均有温升,瞬态熟化温度沿红外线源辐照方向物料内部呈温度递减分布。在粒状食品沿红外

线源辐照方向最近端面的温度高,但该等温分布区域占比少,在其相反端面则温度最低,等温分布区域占比大,而在中心处与其等距的最外端面则形成过度温度区。粒径越小,粒状食品各端面点的瞬态熟化温度场改变越小,并与粒径中心温度场接近相等。粒径食品在快速温升后均可达到瞬态的平衡状态。

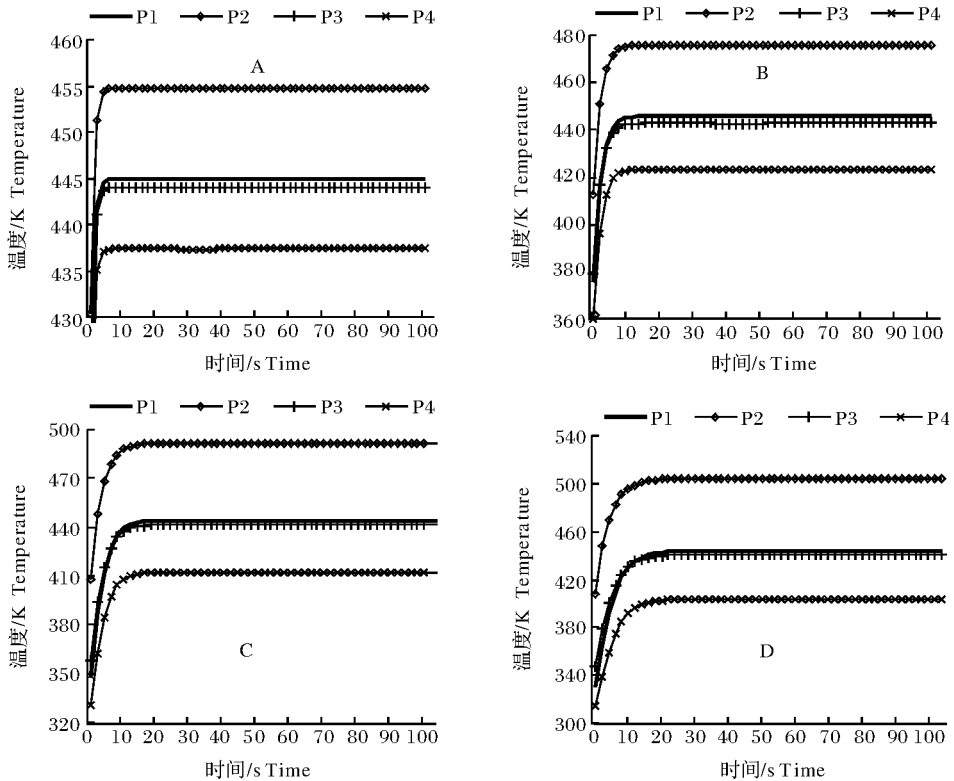
由图 6 和图 7 可知,不同辐射距离的粒状食品红外线源辐射,各粒状食品整体均有温升。在辐射熟化初始阶段,粒状食品内部快速升温,并迅速转入相对稳定持续的温度场中连续熟化。粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温度场存在明显的梯度,其近红外源端面升温快、温度高,易造成熟化过度、品质劣变,但其相反端面则升温慢、温度低,易造成熟化不足,因而出现粒状食品熟化不均现象。该温度场势差同样存在于粒径中心及其外表面。随着与辐射源



A. 4 mm; B. 14 mm; C. 24 mm; D. 34 mm.

图 4 辐射距离 100 mm 和辐照时间 100 s 时不同粒径食品红外线源辐射的温度云图

Fig. 4 Temperature contours of granular food IR linear source radiation at different particle diameters under radiation distance 100 mm and irradiation time 100 s



A. 4 mm; B. 14 mm; C. 24 mm; D. 34 mm.

图 5 不同粒径食品红外线源辐射温度与时间的变化曲线

Fig. 5 Transient temperature-time curves of granular food IR linear source radiation at different particle diameters

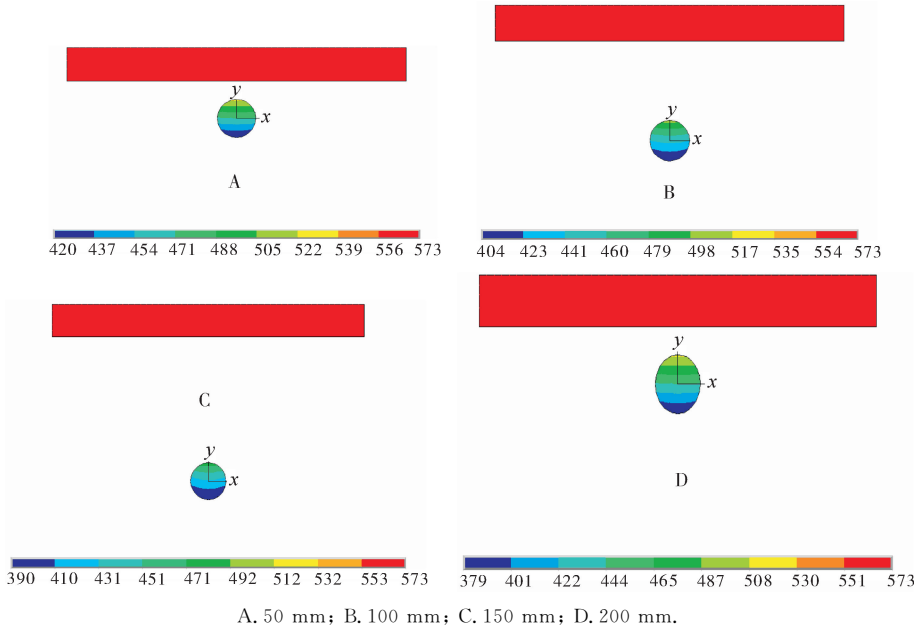


图 6 粒径 34 mm 和时间 100 s 时不同辐射距离粒状食品红外线源辐射的温度云图
 Fig. 6 Temperature contour of granular food IR linear source radiation at different radiation distances under particle diameter 34 mm and irradiance time 100 s

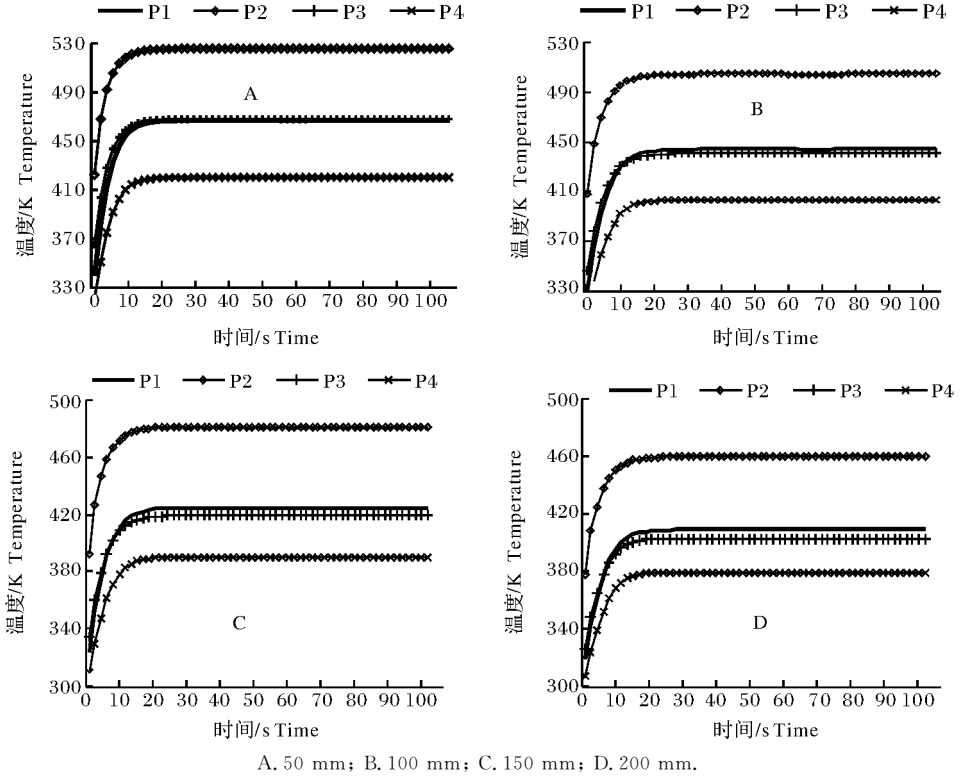


图 7 不同距离食品红外线源辐射瞬态温度与时间的变化曲线
 Fig. 7 Transient temperature-time curves of granular food with same diameter at different distances under IR linear source radiation

的距离增大,粒状食品整体温升逐步降低,粒径中心及其外表面温度差加大,中心温度逐步高于外表面。

综合不同粒径、不同辐射距离的粒状食品红外线源辐射熟化温度场特性可知,粒状食品红外线源辐射存在局部温度场梯度,造成熟化不均现象。但可通过减小食品粒径和缩短辐射距离,并对其进行间歇翻转,则能增大辐射熟化速率,提升能源利用效率和熟化加工品质。

3 讨论

瞬态温度场分布是影响粒状类食品微观品质结构的重要因素,其瞬态温升是粒状食品熟化加工的重要外部势场动力。采用4 mm粒径、50 mm红外线源辐射瞬态熟化并间歇翻转,有利于提升荔枝果肉加工粒状食品的能源利用效率和熟化加工均匀度。红外线源辐射瞬态温度场的系统研究,不仅可完善食品热加工安全与品质,而且能进一步优化其他粒状物质热加工的测控过程,从而实现红外线源辐射加工的安全、高效、精准应用。但粒状食品红外线源辐射熟化品质与动力是物质结构与物理和化学作用的综合结果,其瞬态熟化温度场形成与其能量、

物质传输、相变转化过程等相耦合,形成机理较复杂,故仿真研究仍需进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] MONGPRANEET S, ABE T, TSURUSAKI T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(2): 147-156.
- [2] 徐凤英,李长友,陈震.荔枝真空远红外辐射过热干燥的特性[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(4): 495-499.
- [3] 蔡云秀.基于ANSYS的普洱茶微波干燥过程温度场的数值分析[D].昆明:昆明理工大学材料科学与工程学院, 2009.
- [4] 伍培,张卫华,郑洁,等. ANSYS有限元软件在减压冷却保鲜研究中的应用[J]. *制冷与空调*, 2009(4): 1-5.
- [5] 郭时印,谭兴和,李清明,等.热处理技术在果蔬贮藏中的应用[J]. *河南科技大学学报*, 2004, 24(2): 54-58.
- [6] 张保生.果蔬冷藏间温度场和速度场的耦合关系探析[J]. *安徽理工大学学报*, 2004, 24(5): 32-35, 40.
- [7] 李长友,钱东平. *工程热力学与传热学*[M].北京:中国农业大学出版社, 2004.
- [8] 张建奇,方小平. *红外物理*[M].西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- [9] 张国智,胡仁喜,陈继刚. ANSYS10.0热力学有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社, 2007.

Simulation of temperature field during IR linear source radiation transient curing for granular food

CHEN Zhen XU Feng-ying LI Chang-you YAO Zhen-chong

College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract To effectively solve the problems of the transient curing temperature field being out of control and the the malignant phenomenon of curing quality of the food being ruined during in granular food the continuous processing of granular food by using IR (infrared) linear source radiation, the rising temperature model of IR linear source radiation transient curing for granular food was built in this research to analyze its spatial change of irradiance. By means of numerical simulation software, the temperature field form characteristics of transient curing for different diameter granular food with different diameters under different radiation distances were investigated. The results show that the temperature field formation of IR linear source radiation transient curing for granular food depend closely on radiation intensity, particle size, and radiation distance, etc. The heat loss rate on the granular food surface and its change rate of internal energy correspond with the energy balance transient response, and the transient curing temperature field distribution in material reveals a decline along the direction of IR linear source radiation, and in the processing of litchi flesh with 4 mm particle diameter under 50 mm radiation distance, its curing temperature distribution is high and uniform.

Key words granular food; IR linear source; curing temperature field; simulation; radiation