

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.020

基于 Fluent-EDEM 耦合的茶叶红外杀青机 滚筒内流场数值模拟

The numerical simulation on temperature field inside the radiation
de-enzyme machine based on Fluent-EDEM coupling

虞文俊¹ 吴瑞梅¹ 李 红¹ 裴 刚¹ 金山峰¹

YU Wen-jun¹ WU Rui-mei¹ LI Hong¹ PEI Gang¹ JIN Shan-feng¹

黄超强¹ 朱任章¹ 杨普香² 熊爱华¹

HUANG Chao-qiang¹ ZHU Ren-zhang¹ YANG Pu-xiang² XIONG Ai-hua¹

(1. 江西农业大学工学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省蚕桑茶叶研究所, 江西 南昌 330203)

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

2. Sericulture and Tea Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330203, China)

摘要:针对目前茶叶杀青机存在杀青不均匀、热能利用率低等缺陷,提出了一种以红外辐射为热源的滚筒式杀青机,将红外热源置于滚筒中心,采用 Fluent-EDEM 耦合杀青过程中的离散场、流场和温度场,并进行耦合分析,在流体软件 Fluent 中设置湍流模型和辐射模型,在离散元软件 EDEM 中建立茶叶与茶叶及茶叶与滚筒的接触模型,耦合求解计算得到杀青机滚筒内流场温度分布和杀青叶升温曲线,实现对茶叶杀青过程中流场的数值模拟,并与同型号的电加热滚筒内流场模拟结果进行比较。模拟结果表明,电加热结构的温度流场在滚筒内均匀分布,热能利用率低;而红外杀青机滚筒内流场温度分布主要集中在滚筒右部及底部,能将大部分热能直接辐射到杀青叶上,热能利用率高,该杀青装置能使杀青叶在短时间内快速升温,从而快速钝化酶的活性,提高茶叶品质。红外杀青机滚筒内的温度实测值与模拟值的相对误差约为 0.99%,说明模拟过程中参数设置是合理的。

关键词:茶叶;辐射杀青;电加热杀青;温度场;Fluent;EDEM;耦合

Abstract: The temperature distribution inside the drum of tea cylinder water-removing machine is the main factor affecting the quality of the tea. In view of the defects of the current tea cylinder water-removing machine, including the uneven water-removing

and low thermal energy utilization, a tea cylinder water-removing machine was designed with infrared radiation as the heat source in the present study. The infrared heat source was placed in the center of the cylinder. The approach of combining EDEM and Fluent was used to analyze the discrete field, flow field and temperature field during the de-enzyme process. The turbulence model and the radiation model were installed in the software Fluent, then the contact model of tea leaves and cylinder was established by the discrete element software EDEM. The temperature distribution of the flow field in the drum and the temperature rise curve of de-enzyme green leaves were obtained through coupled calculation, realizing the numerical simulation of the de-enzyme process, then the simulation results with the same type of electric heating machine were compared. The simulation results showed that the temperature flow field of electric heating structure was evenly distributed in the drum, and the utilization rate of heat energy was low. While filming for the infrared temperature distribution in the flow field in the cylinder was mainly concentrated in the right and bottom rollers, and could put most of thermal radiation on the steamed directly. With the utilization of the high heat energy, the editing device could make the steamed quickly to heat up and warm effect, thus the enzyme activity was passivated in a short time, improving the quality of the tea. The relative error between the measured temperature and the simulated value was about 0.99%, indicated a reasonable parameter setting.

Keywords: tea; radiation de-enzyme; electric heating de-enzyme; temperature field; Fluent; EDEM; coupling

基金项目:江西省重点研发计划项目(编号:20171ACF60004);江西省茶叶产业技术体系(编号:JXARS-02)

作者简介:虞文俊,男,江西农业大学在读硕士研究生。

通信作者:熊爱华(1974—),男,江西农业大学讲师,博士。

E-mail: aihuaok2004@163.com

收稿日期:2019-04-25

杀青是绿茶加工的第一道关键工序^[1],茶叶杀青必

须在短时间内使鲜叶温度升到 85 ℃ 以上^[2],并将叶温保持一定时间,以彻底钝化酶的活性^[3-4]。滚筒式杀青机是中国应用最广的一种茶叶杀青机械^[5],但目前多以燃煤、燃气、生物质燃料和电为热源,其中燃煤、燃气的热惯性大,生物质燃料颗粒不易结渣,点火时污染物不易控制,而电加热方式存在能耗高、杀青不均匀等缺陷^[6]。红外辐射源能量与辐射温度的 4 次方成正比,能提供比对流加热高几十倍的热流密度^[7],具有升温快、能耗低、干燥质量好、环保等优势,广泛用于玉米^[8]、稻谷^[9]等农产品干燥,也有研究将红外技术用于茶叶的杀青^[10]。

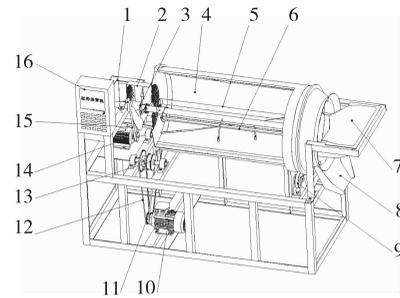
目前,鲜茶叶的杀青升温过程主要由制茶师凭经验控制^[11],难以保证茶叶品质。有学者利用流体分析软件模拟鲜茶叶的加热过程,徐海卫等^[2]设计了一种三段式螺旋导叶板(进叶导板、出叶导板、工作导板)滚筒杀青机,每段导叶板采用不同的螺旋升角,利用 Fluent 流体分析软件模拟鲜茶叶的受热状况,以此为参考来优化杀青机结构,但并未研究鲜茶叶在滚筒内的升温情况和滚筒内流场温度场分布。鲜叶在杀青过程中受热情况除受滚筒内温度场分布影响外,还与鲜叶在滚筒内的运动有关。Fluent-EDEM 耦合模拟方法能同时考虑温度场和颗粒运动的相互影响,是目前较新的一种模拟多相流数值分析方法^[12-13]。施重驹等^[14]针对热风滚筒杀青机热能利用率不高、杀青质量和产量受限制等缺陷,利用 Fluent-EDEM 联合对杀青滚筒内流场温度和离散场进行耦合模拟分析,基于仿真结果,对杀青机导叶板数量、高度和进风口结构进行了优化,优化样机的杀青试验表明,杀青叶质量得到改善,产能提高 25%。但有关红外技术^[15]在茶叶杀青和干燥方面理论模型研究较少,探索杀青滚筒内温度变化曲线和鲜茶叶升温曲线等相关理论模型,能更准确研究鲜茶叶在红外辐射过程中的物性变化,从而优化杀青机结构。

试验拟研究茶叶红外杀青机在杀青过程中滚筒内温度场的分布及茶叶颗粒的干燥曲线模型,采用 Fluent-EDEM 耦合方法对滚筒内的杀青温度和鲜茶叶颗粒运动进行模拟,在 Fluent 软件中将滚筒内流场温度求解至收敛后,利用 UDF 耦合接口将流场温度信息传递至 EDEM 中,EDEM 根据茶叶颗粒模型和颗粒-流体相间热传递和热辐射模型对颗粒的温度进行迭代计算,将颗粒的运动信息由耦合接口传回至 Fluent 中,Fluent 根据反馈信息进入下一个时间步长迭代,反复多次迭代后,在 Fluent 中得到杀青过程中滚筒内的温度场分布,在 EDEM 中得到鲜茶叶在杀青过程中的升温曲线模型。为证明红外辐射的杀青效果,同时对电加热杀青机进行 Fluent-EDEM 耦合,并将两种杀青机的模拟结果进行对比,为茶叶杀青机的结构优化设计提供理论基础。

1 茶叶红外杀青机整体结构及工作原理

1.1 整体结构

茶叶红外杀青机总体结构如图 1 所示,由机架、滚筒、红外加热系统、传感系统、驱动系统以及控制系统等组成。滚筒由托轮支撑在支架上,滚筒内壁焊有螺旋叶片,红外加热系统由一根不锈钢空心管悬挂于滚筒中心,2 个半椭圆形法兰盘分别安装在空心管两端,法兰盘上开有多个通孔,红外辐射管安装在法兰盘的通孔中;法兰盘上半部固定有不锈钢防护罩,以防止鲜茶叶在滚筒内壁上升过程中掉在辐射管上而烧焦。滚筒内空心轴部分钻有小孔,红外传感器和温湿度传感器的接线从控制柜由空心轴穿过,悬挂在空心管上。鲜茶叶进料和出料在滚筒右端完成,由大电机的正反转驱动滚筒进行正反转,使鲜茶叶在滚筒内来回杀青。排湿风扇安装在带轮右侧面,由带传动带动风扇进行正反转。



1. 机架 2. 风扇罩 3. 排湿风扇 4. 滚筒 5. 不锈钢防护罩
6. 红外加热管 7. 进料斗 8. 出料斗 9. 托轮 10. 大电机
11. 小链轮 12. 链条 13. 大链轮 14. 小电机 15. 皮带 16. 控制系统

图 1 茶叶红外杀青机总体结构图

Figure 1 Schematic diagram of tea cylinder de-enzyme machine using infrared source

1.2 工作原理

首先,在控制面板上设定滚筒内鲜茶叶的杀青温度、滚筒内规定的湿度以及杀青时间初始参数,控制系统发出指令,开启红外辐射管,同时启动大电机,带动滚筒反转。当温度传感器检测到滚筒内温度达到设定值时,向控制系统反馈信号,鲜茶叶从进料口进入滚筒内,茶叶在滚筒内随螺旋导叶片的转动进行轴向移动和翻抛并吸收红外辐射热量,鲜茶叶升温并蒸发出水分。当腔内温度超过杀青温度规定的上限值时,控制系统发出指令,关闭其中的数根红外管,保证腔内温度保持在设定的杀青温度范围内,当腔内湿度超过杀青湿度规定的上限值时,控制系统发出指令,开启排湿风扇正转进行排湿。当到达所设定的杀青时间时,大电机反转并使滚筒转速加快,驱动滚筒正转将杀青叶快速从滚筒内排出,同时小电机反转且转速加快,助推杀青叶快速排出以免被烧焦,完成一

次杀青全过程。

2 数值模拟及分析

2.1 欧拉耦合数学模型

利用 Fluent 和 EDEM 软件模拟茶叶杀青过程,有两种 Fluent-EDEM 耦合计算模型:Lagrangian 模型和 Eulerian 模型,其中 Lagrangian 模型只考虑流体相和颗粒相的动量交换,不考虑颗粒相对流体相的作用,且该模型还要求颗粒相模型体积分数不超过 15%。而 Eulerian 模型是基于多相流框架的耦合方法^[16],除考虑流体相和颗粒相之间的动量交换外,还考虑颗粒相对于流体相的影响^[14]。因杀青过程中茶叶颗粒与温度场之间存在动量、质量和能量的相互交换。因此,本研究选择 Eulerian-Eulerian 模型,以考虑茶叶颗粒运动对温度的影响。

2.1.1 Fluent-EDEM 阻力模型 Fluent-EDEM 耦合采用一种改进的自由流阻力^[17]来计算作用在球形颗粒上的力。阻力系数 C_D 取决于雷诺数 R_e :

$$R_e = \frac{\alpha \rho L |\nu|}{\eta} \quad (1)$$

自由流体阻力方程: $F_d = 0.5 C_d \rho A |\nu| \nu$,

其中:

$$C_d = \begin{cases} 24/R_e, R_e \leq 0.5 \\ 24 \left(1.0 + \frac{0.25 R_e^{0.687}}{R_e} \right), 0.5 \leq R_e \leq 100.0 \\ 0.44, R_e > 100.0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

η ——流体的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

L ——颗粒球的直径, m ;

ν ——颗粒与流体间的相对速度, m/s ;

α ——CFD 网格单元的自由体积, m^3 ;

A ——颗粒的投影面积, m^2 。

2.1.2 流体守恒定律 杀青过程中,茶叶颗粒会影响滚筒内的连续相气体运动^[14],故在原有的 Eulerian 模型上引入一个相体积分数 α ,如不考虑杀青过程中的传质过程,则质量和动量守恒方程为:

$$\text{质量守恒公式: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho \alpha) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \alpha v_i) = 0, \quad (3)$$

$$\text{动量守恒公式: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho \alpha v_i) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho \alpha v_i v_j) = -\alpha$$

$$\frac{\partial p}{\partial X_i}(\alpha \tau_{ij}) + \rho \alpha g_i + F_i, \quad (4)$$

式中:

α ——空气相的体积率, %;

v_i ——空气相在笛卡尔坐标 i 方向上的流速分量, m/s ;

τ_{ij} ——黏性应力张量, Pa ;

g_i ——坐标 i 方向上的体积力, N ;

F_i ——空气相和颗粒相的相互作用力, N 。

2.1.3 热传递理论

(1) 热对流^[18]方程:

$$Q_{PF} = \frac{K_F N_{\mu P}}{d_p} A_p \Delta T_{PF}, \quad (5)$$

式中:

Q_{PF} ——热量, J ;

A_p ——颗粒表面系数;

ΔT_{PF} ——温度差, K ;

P, F ——分别表示流体相和固体相;

K_F ——气体热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

$N_{\mu P}$ ——努赛尔数(流率与传导率的比值);

d_p ——颗粒直径, m 。

(2) 辐射能量方程:

$$Q = \epsilon \sigma_b A T^4, \quad (6)$$

式中:

Q ——辐射能量, W ;

T ——绝对温度, K ;

A ——物质的表面积, m^2 ;

σ_b ——黑体的辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ϵ ——物体的发射率。

2.2 仿真模型建立

试验研究 6CST-60 型红外辐射杀青机的滚筒内温度场分布,该模型红外加热系统置于滚筒中心,为简化模拟分析计算,仅对杀青机等直径部分进行杀青过程模拟(鲜茶叶在杀青过程中,主要落在此区域内),应用 PROE 5.0 建模软件建立红外杀青机三维模型,导入到 ICM CFD 17.0 中进行网格划分,将生成的 MESH 文件导入至 Fluent 17.0 中进行温度场分析。为对比红外杀青机的节能效果,研究模拟以电加热方式相同型号 6CST-60(以电加热方式的杀青机,其加热源采用通电线圈缠绕在滚筒壁外表面进行加热)滚筒内温度场分布及滚筒内的升温情况,并与红外辐射进行对比,采用与红外辐射模型的相同处理方式,滚筒模型网格划分见图 2。

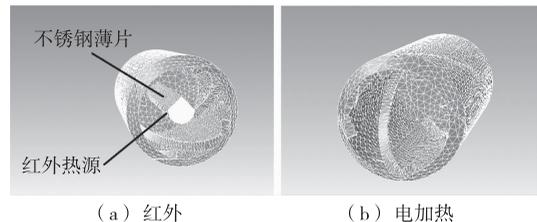


图 2 红外和电加热杀青机滚筒网格划分

Figure 2 The mesh generation of infrared and electric heating cylinder de-enzyme machine

2.3 初始条件及边界条件确定

2.3.1 红外辐射加热杀青机 Fluent 软件参数设置:在入口采用 pressure-inlet 压力入口条件,压力设为一个标准大气压,湍流强度 5%,湍流黏度比 10;出口采用 pressure-outlet 压力出口条件,湍流强度 5%,湍流黏度比 10;滚筒壁面及螺旋导叶片旋转速度均为 35 r/min;红外辐射热源壁面温度为 711 K(当加热功率为 6 kW 时,由红外测温仪测量得到的滚筒内壁实际温度值),选 $\kappa\text{-}\epsilon$ 模型,因本杀青机主要以红外辐射为主,故选能量方程和辐射模型,并选用辐射模型里的 Discrete Ordinates 模型,发射率 0.945。EDEM 软件参数设置如下:颗粒与颗粒之间的热传递采用 Hertz Mindlin with heat conduction 模型,颗粒与壁面之间采用 Hertz Mindlin(no slip)接触模型,茶叶颗粒温度初始值 300 K,茶叶颗粒总数 40 000。

2.3.2 电加热杀青机 Fluent 软件参数设置除了红外辐射热源壁面温度设为 513 K 外(当功率为 6 kW 时,由红外测温仪测量得到的滚筒内壁实际温度),其他参数设置相同。EDEM 软件参数设置与红外辐射加热杀青机条件相同。

2.4 Fluent-EDEM 耦合参数设置

在设置耦合参数时,阻力模型采用自由流模型,传热模型选用 Li & Mason 模型,并同时选辐射模型。耦合过程中,Fluent 和 EDEM 的信息由耦合接口进行交换,则在耦合过程中需要满足一定要求:① Fluent 中设置的时间步长必须是 EDEM 中时间步长的整数倍;② EDEM 通常选择 Rayleigh 时间步长的 5%(30%作为时间步长^[19]);③ Fluent 中网格单元的体积不能小于 EDEM 中颗粒的体积。表 1 为茶叶颗粒本构模型参数^[20]。

表 1 茶叶颗粒本构模型参数

Table 1 Parameters of the constitutive model of tea particles

颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒杨氏模量/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	颗粒泊松比	颗粒恢复系数	颗粒间静摩擦系数	颗粒间动摩擦系数
532.4	7.1×10^6	0.4	0.36	1.0	0.71
颗粒-滚筒恢复系数	颗粒-滚筒静摩擦系数	颗粒-滚筒动摩擦系数	颗粒比热容/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	热传导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	
0.49	0.75	0.5	3.80	0.058	

3 鲜茶叶杀青过程中滚筒内温度场分布模拟结果分析

3.1 红外加热与电加热滚筒内温度场分布对比

鲜茶叶在杀青前,先要对滚筒进行预热。由图 3 可看出,电加热杀青机滚筒内流场温度分布较均匀,而红外杀青机滚筒内流场温度主要集中在滚筒右部及底部。杀青过程中,鲜茶叶随螺旋叶片进行轴向移动及径向抛洒运动,则大部分时间落在滚筒的右部及底部。由此可知,对于本文所研究的红外杀青机,其大部分热量辐射在鲜

叶上,热能利用率高,从而提高杀青效率;而电加热结构杀青机,温度场分布均匀,则只有少部分热量作用于鲜茶叶,热能利用率低。

图 4(a)为 2 s 时,茶叶颗粒的温度基本为初始设定温度 300 K;图 4(b)、(c)分别为 20,45 s 时,茶叶颗粒被壁面加热并随滚筒转动的抛洒和轴向移动温度分布图。由图 4 可知,20 s 时,茶叶颗粒温度上升到 306 K 左右,45 s 时,上升到 318 K 左右。模拟结果表明,电加热方式的杀青叶温度在 45 s 内上升了 18 K。

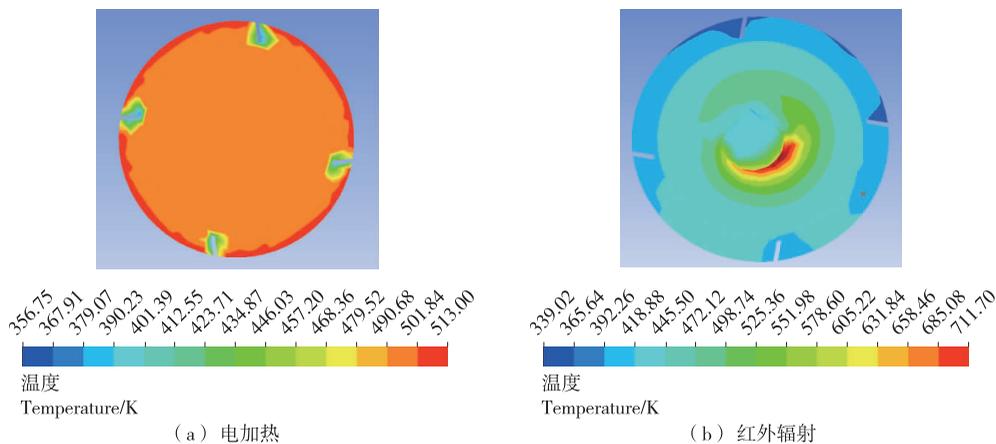


图 3 电加热和红外辐射杀青机滚筒内预加热流场温度分布截面图

Figure 3 Sectional view of temperature distribution of pre-heating flow field in the cylinder of electric heating and infrared de-enzyme machine

图 5(a)为 2 s 时,茶叶颗粒的温度也为初始设定温度 300 K 左右;图 5(b)、(c)分别为 20,45 s 时,茶叶颗粒被红外辐射加热并随着滚筒转动在滚筒内的抛洒和轴向移动。由图 5 可知,20 s 时,茶叶颗粒温度上升至 320 K 左右;45 s 时,上升至 347 K 左右。模拟结果表明,红外辐

射方式的杀青叶温度在 45 s 上升了 47 K,比电加热方式高出 29 K。在相同杀青时间内,杀青叶在红外杀青机滚筒内的升温速度比在电加热方式升温快 161%。由图 6 可知,当茶叶物性参数相同时,相对于电加热方式,杀青叶受红外辐射加热较电加热升温快得多,杀青效率更高。

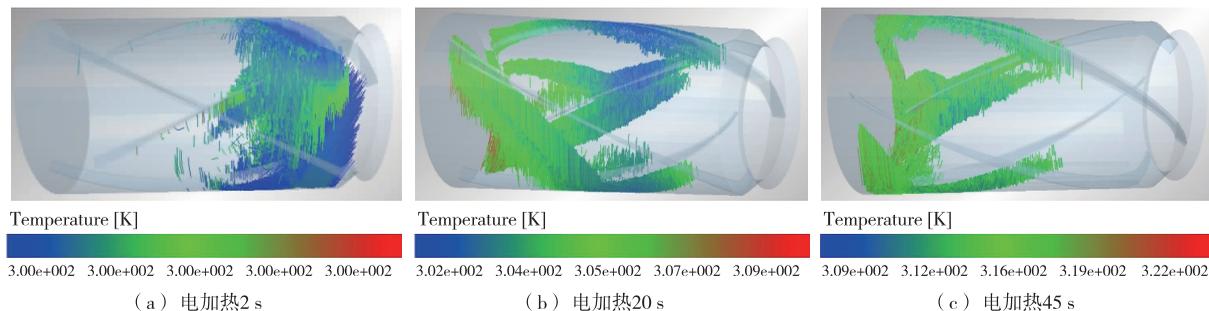


图 4 电加热机滚筒内茶叶颗粒在不同杀青时间的运动及温度分布

Figure 4 The motion trial and temperature distribution of tea particles in different de-enzyme time in the cylinder of electric heating de-enzyme machine

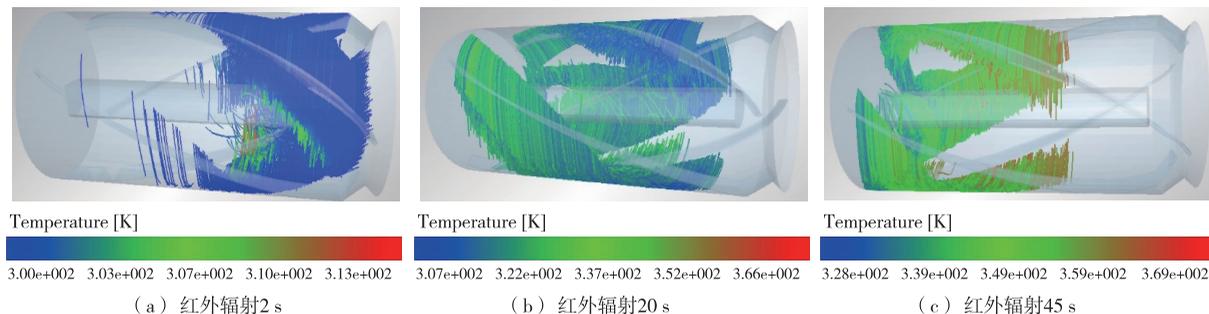


图 5 红外辐射杀青机滚筒内茶叶颗粒在不同杀青时间的运动及温度分布

Figure 5 The motion trial and temperature distribution of tea particles in different de-enzyme time in the cylinder of infrared de-enzyme machine

由图 7 可知,电加热杀青机的颗粒温度分布在 312~320 K,该温度段内颗粒数量达到 99.35%;红外杀青机的

颗粒温度分布在 333~369 K,该温度段内颗粒数量达到 99.45%。由此可知,在相同杀青时间内,红外杀青机内茶叶颗粒的温度整体较高,在短时间内均达到了快速升温的效果。因此,与电加热杀青机相比,本装置采用的红外加热系统更能符合杀青叶需快速升温以钝化氧化酶活性的杀青要求。

综上模拟分析,红外辐射杀青机的热能利用率要高于电加热的,大大提高杀青效率。

3.2 试验验证

为验证模拟过程中模型选择的正确性,本文采用 MAX6675 温度传感器安置在红外辐射杀青机滚筒内壁面,对滚筒壁面升温情况进行监测,得到壁面升温实测曲线,同时在杀青机模型壁面相同位置处设置监测点,模拟监测点的升温变化。由图 8(a)可知,当用 3 根红外管加热到 2 500 s 时,滚筒内温度实测值趋于平稳,约为 355 K,而模拟值在 2 500 s 时,基本稳定在 351.5 K 左右,模拟值与实测值相对误差为 0.99%;由图 8(b)可知,当采

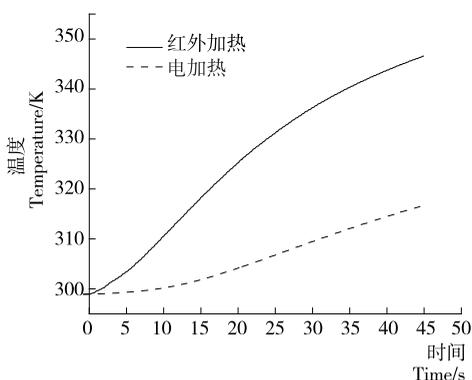


图 6 电加热和红外杀青机滚筒内茶叶颗粒在 0~45 s 的温度曲线

Figure 6 Temperature curve of tea particles in 0~45 s in the cylinder of electric heating and infrared de-enzyme machine

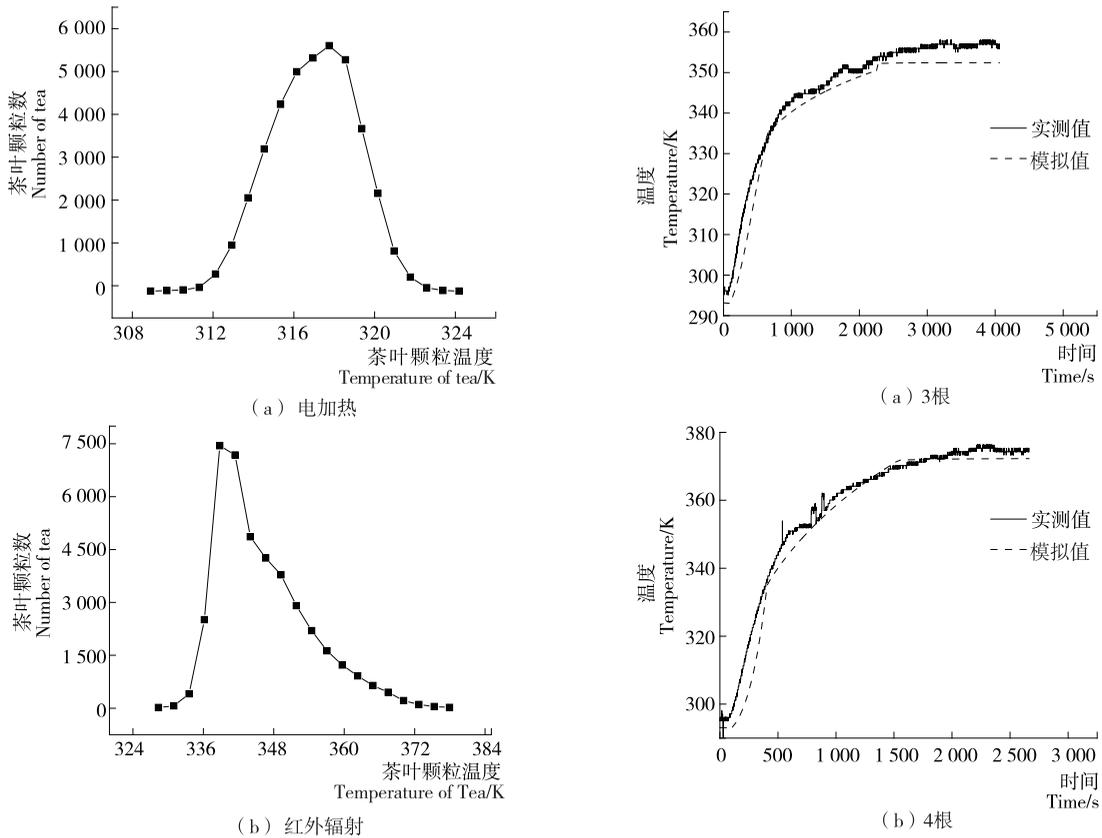


图 7 电加热和红外辐射杀青机滚筒内不同温度场下茶叶颗粒数量分布

Figure 7 Quantity distribution of tea particles in different temperature fields in the cylinder of electric heating and infrared de-enzyme machine

用 4 根红外管,实测值在 2 500 s 时,基本稳定在 371 K 左右;模拟值在 2 500 s 时,基本稳定在 371 K 左右,相对误差为 0;由图 8(c)可知,当采用 5 根红外管,实测值在 2 700 s 时,基本稳定在 387 K 左右;模拟值在 2 700 s 时,基本稳定在 389.5 K 左右,相对误差为 0.65%左右。经过 3 组实测与模拟对比,模拟值与实测值的误差都较小,说明杀青机模拟所选模型和参数设置是正确的。

4 结论

试验为探讨滚筒内杀青叶的温度变化情况,采用 Fluent-EDEM 耦合模拟滚筒内流场分布状态,得到了红外杀青机与电加热杀青机的流场温度及茶叶颗粒温度模拟值。模拟结果表明:在相同杀青时间内,红外辐射杀青机内茶叶升温速率约为电加热杀青机的 161%,且在相同时间内,红外杀青机滚筒内茶叶颗粒温度整体较高,证明了该装置红外辐射杀青效果优于电加热的。同时滚筒内螺旋导叶板的螺旋角、倾角、导叶板高度对滚筒内茶叶起着抛洒的作用,对茶叶与滚筒内温度流场的接触会产生影响,因此研究也可以为导叶板的结构参数设计和优

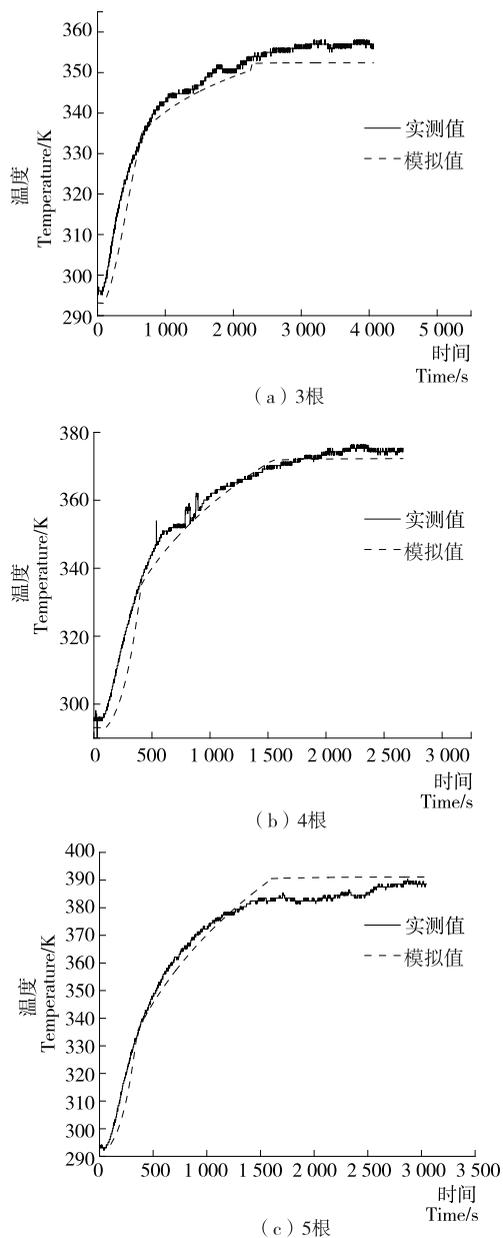


图 8 不同数量红外管时壁面实测与模拟曲线的对比
Figure 8 Comparison between measured and simulated wall curves of 3, 4 and 5 infrared tubes

化提供依据。

参考文献

[1] 王钟音. 茶叶杀青机理初探[J]. 茶叶, 1999(3): 154-158.
 [2] 徐海卫, 谭和平, 李刚, 等. 滚筒式茶叶杀青机导叶板螺旋运动模型研究[J]. 茶叶科学, 2014, 34(4): 381-386.
 [3] 吴本刚, 肖孟超, 刘美娟, 等. 催化式红外杀青对绿茶热风干燥的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 126-132.
 [4] 朱德文, 岳鹏翔, 袁弟顺. 不同杀青方法对绿茶品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 275-279.

(下转第 120 页)

工厂的应用,可以满足啤酒发酵温度的控制要求。

尽管研究的控制策略较简单且实用,但啤酒发酵温度是个建模难的过程,研究也只针对几个重要的特点来设计控制器,寻找更精确的对象模型是下一步研究的重点,而且建模过程中的影响因素较多,需要较多的实际经验,都有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 李楠楠,袁文杰,王娜,等. 菊粉酶基因在酿酒酵母中的表达及乙醇发酵[J]. 生物工程学报, 2011, 27(7): 1 032-1 039.
- [2] 俞静,江佳稀,张永强,等. 鹰嘴豆孢克鲁维酵母利用菊芋原料同步糖化与发酵生产乙醇[J]. 生物工程学报, 2010(7): 982-990.
- [3] 汪伦记,董英. 以菊芋粉为原料同步糖化发酵生产燃料乙醇[J]. 农业工程学报, 2009(11): 263-268.
- [4] 庞会利,李景原,秦广雍. 耐高温乙醇酵母的研究现状及进展[J]. 酿酒科技, 2008(2): 99-102.
- [5] 焦晓红,方一鸣,吴晓明. 连铸结晶器振动位置环的非线性 PID 控制器设计及应用[J]. 自动化仪表, 2001, 22(7): 4-5.
- [6] 姜琳,刘衍珩,关立文,等. 基于模糊神经网络与动态规划的控制优化算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2 229-2 230.
- [7] 杜金钊,巨里,赵殿轩. 模糊控制在啤酒发酵温度控制中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(9): 108-110, 117.
- [8] 孙家琪,蒋念平. 啤酒发酵罐温度的快速抗干扰预测控制[J]. 信息技术, 2014(12): 9-12, 16.
- [9] 毕德成,张道雷,郭东波. 工业生产中啤酒发酵度影响因素的研究[J]. 中国酿造, 2012(12): 116-118.
- [10] 任晓镭,李明杨,陈胜慧子,等. 乳酸菌分离及混菌培养对

酿酒酵母乙醇发酵的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 255-259.

- [11] 李丙才,姜映红,叶碧成. 啤酒发酵过程模糊智能 PID 控制[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 68-71.
- [12] WANG De-jin. Synthesis of PID controllers for high-order plants with time-delay[J]. Journal of Process Control, 2009(10): 1 763-1 768.
- [13] 赵莎茹. 发酵过程中温度模糊控制的研究[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(4): 70-73.
- [14] 王建国,顾廷权,曹广益,等. 时滞系统的最优 PID 控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2 995-2 998.
- [15] 杜锋,雷鸣. 啤酒发酵过程温度控制策略[J]. 酿酒, 2002(6): 50-52.
- [16] TORSTEN B, ANDREAS G. Optimal control of beer fermentation processes with Lipschitz-constraint on the control[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2014, 120(4): 444-458.
- [17] 卢万银. 基于模糊控制技术的啤酒快速发酵控制[J]. 酿酒科技, 2012(9): 90-92.
- [18] 才辉,张光新,周泽魁. 基于 T-S 模型的动态预测在啤酒发酵温度控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005(S2): 745-747.
- [19] 薛福珍,庞国仲,林盛荣. 啤酒发酵过程的建模仿真与控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(4): 502-508.
- [20] TRELEA I C, TITICA M, LANDAUDS, et al. Predictive modelling of brewing fermentation: From knowledge-based to black-box models[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001(4): 405-424.
- [21] 章家岩,钱宏,冯旭刚,等. 基于 Smith 预估补偿的连铸结晶器液位控制策略[J]. 中国机械工程, 2012, 23(16): 1 947-1 951.

(上接第 109 页)

- [5] 袁海波,许勇泉,邓余良,等. 绿茶电磁内热滚筒杀青工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 250-258.
- [6] 詹星星,赵章风,钟江,等. 茶叶杀青机电磁加热过程模拟及关键参数设计[J]. 机电工程, 2018, 35(1): 43-47.
- [7] 王相友,操瑞兵,孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007(7): 177-182.
- [8] 孙传祝,王相友. 红外玉米穗干燥机设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 137-140.
- [9] 渠琛玲,王红亮,刘畅,等. 粮食辐射干燥的研究进展[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 186-189.
- [10] 吴全金,孙威江,吴占富. 远红外加热技术在茶叶加工及制品中的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 220-224.
- [11] 虞文俊,熊爱华,刘仲寿,等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的茶叶红外杀青机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 110-114.
- [12] 戴聪聪,龙小建,罗小燕,等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的离心选矿机搅拌器仿真分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(7): 93-98.

- [13] 蒋梅胜,李恒,李林书,等. 基于 CFD-DEM 耦合法的灭火车风筒优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 104-111.
- [14] 施重驹,张宪,钟江,等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1 050-1 055.
- [15] 张丽丽,王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 193-195.
- [16] 顾强,张世豪,安晓红,等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的爆炸抛掷特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 611-616.
- [17] 石林榕,吴建民,赵武云,等. 基于 CFD-EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 273-278.
- [18] 李志杰,王素芬,黄剑虹,等. 基于 EDEM 绿茶滚筒杀青机温度场研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23): 235-237.
- [19] 黄思. 流体机械数值仿真研究及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2015: 105.
- [20] 何磊,张宪,赵章风,等. 基于 PFC3D 的茶叶杀青过程数值模拟和设备参数分析[J]. 茶叶, 2013, 39(1): 17-23.