

引用格式:

徐超, 金浩, 蒋明洋, 沈凯, 潘凡达, 樊虎. 基于 CFD 的烟叶松散润叶筒气固耦合数值模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 103–110.

XU C, JIN H, JIANG M Y, SHEN K, PAN F D, FAN H. Numerical simulation of gas-solid coupling in moistening cylinder of tobacco based on CFD[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(4): 103–110.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于 CFD 的烟叶松散润叶筒气固耦合数值模拟

徐超¹, 金浩^{1*}, 蒋明洋¹, 沈凯², 潘凡达², 樊虎²

(1.华东理工大学化学学院, 上海 200237; 2.浙江中烟工业有限责任公司, 浙江 杭州 310024)

摘要: 针对烟叶松散润叶筒内部的“黑箱”问题, 基于计算流体力学(CFD)对其进行气固双向耦合的数值模拟, 通过建立可视化的流场和温度场模型, 探讨润叶过程的影响因素和影响机理。结果表明: 流场模拟中, 颗粒的存在能有效改善气体流动形式, 总体气相速率从 1.0 m/s 降低到 0.3 m/s, 增加了气固间的接触, 强化了两相间的传热; 温度场模拟中, 温度变化呈现阶段式变化, 在润叶筒前半段气固之间传热显著, 气相平均温度由 81.0 °C 下降至 68.8 °C, 颗粒平均温度从 25.0 °C 迅速升温到 64.8 °C, 后半段温度维持相对稳定, 气固间传热的热流密度随着轴向位置呈现先逐步下降后平稳的趋势; 气相、颗粒温度的模拟值与试验实测值的相对误差分别为 0.7%、-2.5%, 模拟值与试验实测值整体吻合良好, 说明模型合理有效; 随着筒体倾角、转速增大, 两相间的传热效果随之减弱, 为满足润叶工艺要求, 筒体倾角应小于 8°, 综合考虑生产速率与能耗, 转速应选择 15 r/min。

关键词: 烟叶; 松散润叶筒; 两相流; 颗粒运动; 传热; 数值模拟

中图分类号: TS43

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)04-0103-08

Numerical simulation of gas-solid coupling in moistening cylinder of tobacco based on CFD

XU Chao¹, JIN Hao^{1*}, JIANG Mingyang¹, SHEN Kai², PAN Fanda², FAN Hu²

(1.College of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2.Zhejiang Tobacco Industry Co. Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310024, China)

Abstract: Aiming at the study of the problem of ‘black box’ inside the moistening cylinder, we used the computational fluid dynamics(CFD) and proposed a numerical simulation of gas-solid two-way coupling. By establishing a visual flow field and temperature field model, the influencing factors and influencing mechanism of the blade process were investigated. The results showed that the existence of particles in the flow field simulation could effectively improve the gas flow form and the contact between gas and solid. The overall gas phase velocity decreased from 1.0 m/s to 0.3 m/s and strengthened the heat transfer between the two phases. In temperature field simulation, temperature change showed a stage-like change, and the heat transfer between the gas and solid in the first half of the moistening cylinder was significant, the average temperature of the gas phase decreased from 81.0 °C to 68.8 °C, while the average temperature of the particles rapidly increased from 25.0 °C to 64.8 °C. The temperature in the second half was relatively stable. The heat flux density of gas-solid heat transfer showed a trend of gradually decreasing and then stabilizing with axial position. The relative errors between the simulated values and the experimental values of the gas phase and particle temperature were 0.7% and -2.5% respectively, and the simulated values were in good agreement with the experimental values on the whole, indicating that the model was reasonable and effective. Further study found that with the increase of cylinder inclination and rotation speed, the heat transfer effect between the two phases decreased. To meet the requirements of the lubrication process, the inclination angle of the cylinder should be less than 8°. Considering the production rate and

收稿日期: 2023-05-20

修回日期: 2023-07-23

基金项目: 浙江中烟工业有限责任公司科技项目(ZJZY2021A006); 中国烟草总公司重点研发项目(110202102042)

作者简介: 徐超(1997—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事传质与分离及流体力学研究, 1455963935@qq.com; *通信作者, 金浩, 博士, 教授, 主要从事传质与分离及流体力学研究, jinhao@ecust.edu.cn

energy consumption, the rotational speed should be selected as 15 r/min.

Keywords: tobacco; moistening cylinder; two phase flow; particle movement; conduct heat; numerical simulation

有关烟草加工中松散润叶机的研究主要聚焦于设备的局部优化^[1-4]、工艺控制的精确性^[3]以及筒内烟叶轨迹的描述^[5-7]等,少有涉及筒内温度测量或建模的文献报道。靳毅等^[3]构建了一个PID反馈控制模型,该模型能够根据目标偏差值精确调节润叶过程中烟叶的流量,进而实现对出口烟叶含水率的实时反馈控制;周群华等^[4]则是在循环热风管线上安装了角行程执行器,从而显著提高了热风温度的过程控制CPK值;张天驿等^[5]开发了一种基于红外图像边缘检测的方法,用于精确分析润叶过程中烟叶的运动轨迹;刘栋等^[6]以CO₂膨胀烟丝作为示踪物,采用负阶跃示踪法对滚筒内部烟丝的停留时间分布进行了研究;周凯敏等^[7]则建立了一种烟丝滞留时间的数学模型,并通过离散元数值仿真模拟,发现滚筒倾角、半径、转速、滚筒烘丝机的长度和滚筒内介质风速对烟丝滞留时间的影响依次减小。此外,周学政等^[8]、唐军等^[9]、万云飞等^[10]分别研究了润叶工序对卷烟常规化学、致香成分和感官品质的影响。

在实际工况中,松散润叶筒如同一个“黑箱”,采用传统方法无法对其内部的工艺参数进行实时测量或检测,因而难以得到松散润叶筒实际运行过程中烟叶运动状况以及流场、温度等的分布规律^[2]。鉴于此,笔者采用计算流体力学(CFD)对润叶筒内部进行气固双向耦合的模拟计算,对其流场、温度场分布规律进行分析,探讨两相流的传热效果,以期对松散润叶筒的设备改进和工艺优化提供依据。

1 数学模型的建立

1.1 松散润叶筒结构

数值模拟过程中所用的松散润叶筒结构如图1所示。松散润叶筒主要由循环热风进口、烟叶进料口、筒体、抄板、烟叶出料口、循环热风出口、出料罩等部分组成。松散润叶筒筒体直径为1750 mm,长度为7000 mm,筒体水平向下倾斜3°,筒内安装6块长抄板。以进料口所在圆的圆心为原点建立坐标系。出料罩是一个长方体壳体,烟叶出料口为长方形,具体尺寸见图1;进气口长、宽分别为600、217 mm;出气口直径为400 mm。

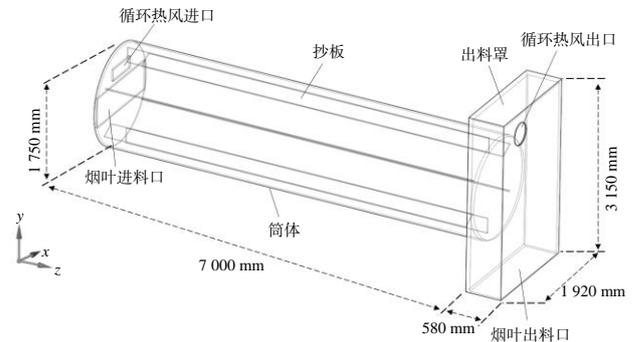


图1 松散润叶筒的结构

Fig.1 Structure diagram of moistening cylinder

1.2 网格划分

松散润叶筒整体结构复杂,运用ANSYS Mesh对物理模型计算域进行非结构性四面体网格划分,特别对抄板和进出口区域进行局部加密。为验证网格的无关性,参照文献[11]的方法,对不同数量的网格进行模拟,最终选用的网格数为1141585个。

1.3 边界条件和模拟计算方法

循环热风进口边界条件设置为质量流量进口,循环热风出口和烟叶出料口边界条件均设置为压力出口。具体模拟参数如表1所示。

表1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

模拟参数	数值
循环热风进口流量/(kg h ⁻¹)	2412
烟叶颗粒进口流量/(kg h ⁻¹)	3600
循环热风进口温度/°C	100
烟叶颗粒进口温度/°C	25
烟叶颗粒密度/(kg m ⁻³)	300
烟叶颗粒直径/mm	14 ^[7,12]
烟叶颗粒比热容/(J kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1700
循环热风出口压强/Pa	-20

气固两相流采用Euler-Lagrange方法进行模拟,其中,气相视为连续介质,采用Realizable k-ε湍流模型^[13-14];固相采用离散元模型(DPM),设置烟叶进料口为喷射面,同时使用DEM模型模拟颗粒碰撞,以提高烟叶颗粒运动轨迹预测精度^[15];计算域分为3段,分别为进料段、滚筒段、出料段。滚筒段选用滑移网格,旋转速率设置为10 r/min,筒体倾角设置为3°。

为了降低计算复杂度并优化求解过程,对模型进行以下合理假设:①假设松散润叶筒内部的各种气体为不可压缩的理想流体,即其密度在流动过程中保持不变;②假定松散润叶筒的壁面为完全绝热,从而忽略了因壁面热传导而导致的热损失;③鉴于松散润叶筒内部温度较低,忽略辐射传热的影响。

在 ANSYS Fluent 19.2 中进行数值求解,选择瞬态全隐式求解器,瞬态项的格式设定为二阶精度迎风式,采用 SIMPLE 算法进行压力-速率耦合,设定收敛性和速率残差的阈值为 10^{-3} ,能量残差的阈值为 10^{-6} ,以确保计算结果的精确性。流动相的迭代步长设定为 0.01 s,颗粒相的迭代步长设定为 0.001 s^[11,16-17]。

2 松散润叶筒内流场和温度场模拟

2.1 松散润叶筒内流场模拟

为研究松散润叶筒内部的流场分布,探究颗粒与流体之间的相互作用对气相流动的影响,对松散润叶筒内有、无颗粒的 2 种工况分别进行流场的数值模拟。

2.1.1 无颗粒进料下的流场特征

在没有固体颗粒进料,只有加热空气进料的情况下,松散润叶筒内部 $X=0.0$ m 截面气相速率分布云图及流线如图 2 所示。由图 2 可知,进口处气相速率最大,约为 4.2 m/s,明显大于筒内气相速率,且气体进入松散润叶筒后向四周扩散,气相速率迅速降低;由于进气口的采用偏心安装方式,导致润叶筒内部气流紊流现象十分明显,气相速率分布不均匀,筒内形成了多个明显涡旋区域;流体分布呈现非对称性,中心区域气相速率快,而靠近筒壁处气相速率则减慢。其可能的影响因素如下:一是受滚筒壁面的摩擦力作用,二是受筒内中心处涡旋的卷吸作用,涡旋会使周围空气向中心处靠拢。通过对出口处的观察,发现出料罩上部有一定的速率梯

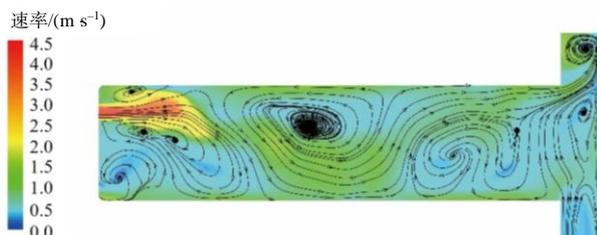


图 2 无固体颗粒进料下松散润叶筒内部气相速率云图及流线

Fig.2 Gas phase velocity cloud map and streamline inside the moistening cylinder without solid particle feeding

度,其原因是出气口存在一定负压,使得绝大部分气体向出气口方向流动。

图 3 为松散润叶筒 Z 轴处的气相速率分布曲线图。由图 3 可知,松散润叶筒内部 Z 轴处气相速率,呈现无规则小幅波动状态,总体气相速率为 1.0 m/s 左右。

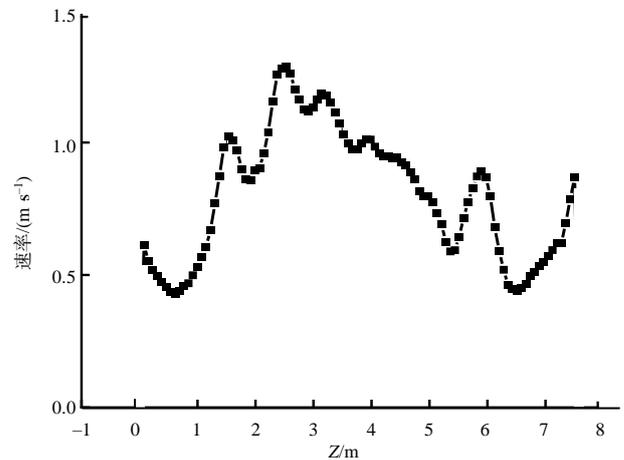


图 3 无固体颗粒进料下松散润叶筒内部 Z 轴处气相速率
Fig.3 Gas phase velocity at the Z-axis inside the moistening cylinder without solid particle feeding

2.1.2 有颗粒进料下的流场特征

在有颗粒的工况下进行气固耦合的数值模拟,在 180 s 时松散润叶筒内部流场已经达到稳态,故对 180 s 后气固双向耦合下的流场进行分析,探讨颗粒对流场分布的影响。图 4 为达到稳态后 $X=0.0$ m 截面处不同时刻(抄板运动 1 个周期)的气相速率分布云图。

从 $t=180.0$ s 时的气相速率分布云图可以看出,松散润叶筒内部气流分布比较均匀,在循环热风进口和出口处形成 2 个旋涡,进气口处的旋涡主要是由于进气口的偏心设置导致,出口旋涡形成的原因主要是出气口存在一定的负压。图 5 为 $t=180.0$ s 时松散润叶筒内部 Z 轴处的气相速率。由图 5 可以看出,筒内整体气相速率在 0.3 m/s 左右,与图 3 对比可知,颗粒的存在会阻碍气体流动,使总体气相速率从 1.0 m/s 降低到 0.3 m/s,增加气固接触时间,有利于强化气固两相间的对流传热;进口处存在一定的速率梯度,最大气相速率为 2.7 m/s,其原因是烟叶颗粒进入滚筒而引起了气流扰动;出口处由于受到出气口负压影响,轴线处最大气相速率达 0.8 m/s;计算模拟得到出气口气相速率为 4.3 m/s,接近试验中用 testo 445 型专业多功能测量仪测得的 4.6 m/s,相对误差为 -6.5%。

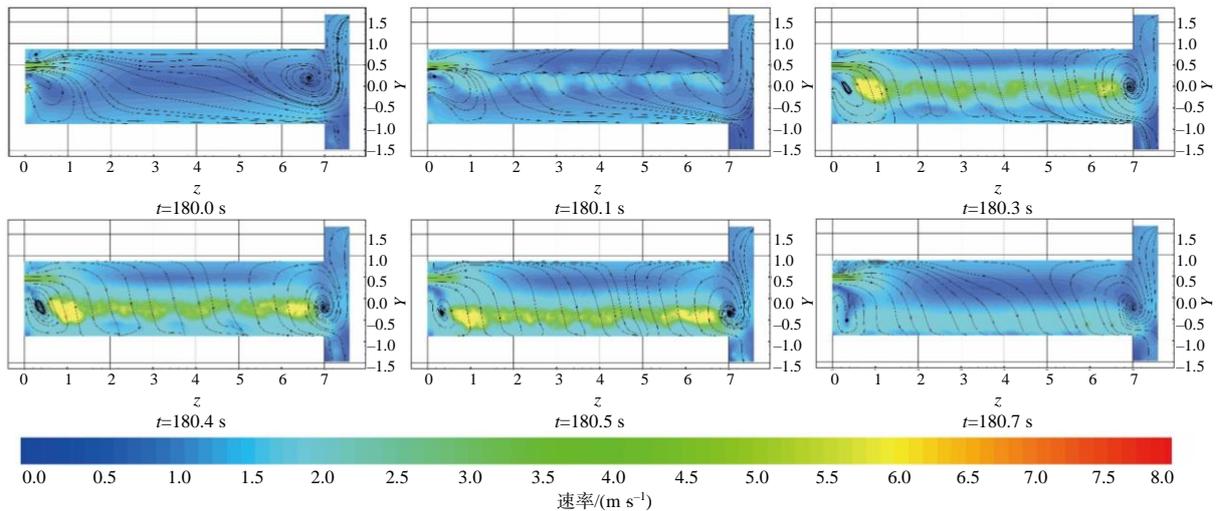
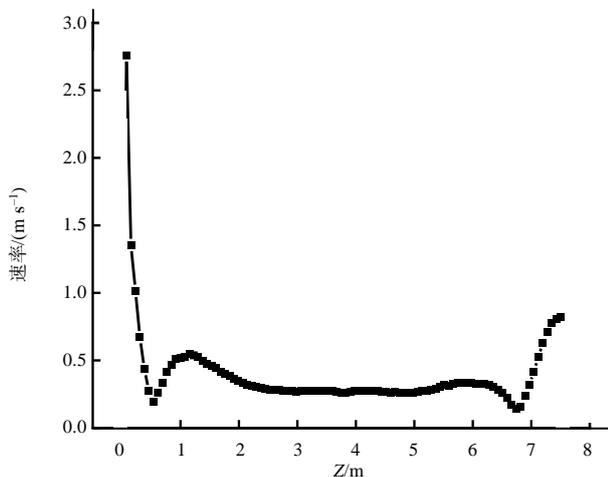


图4 有固体颗粒进料下松散润叶筒内部气相速率云图

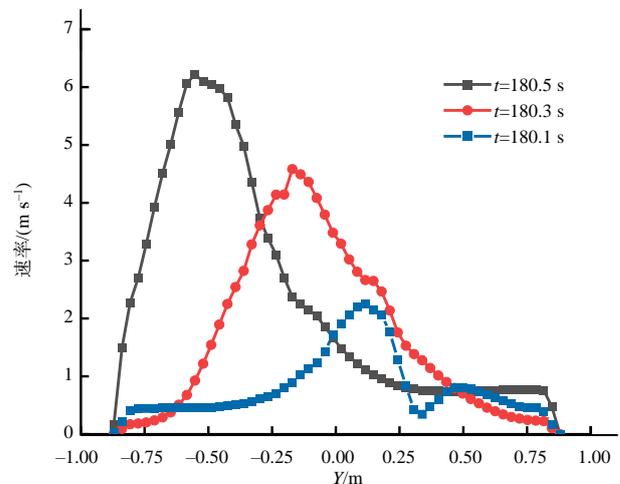
Fig.4 Gas phase velocity nephogram inside the moistening cylinder with solid particle feeding

图5 $t=180.0$ s时有固体颗粒进料下松散润叶筒内部Z轴处的气相速率Fig.5 Gas phase velocity at the Z-axis of $t=180.0$ s inside the moistening cylinder with solid particle feeding

当 t 为 180.1~180.7 s 时, 由于烟叶颗粒从抄板上洒落, 带动空气扰动, 致使润叶筒内部气相速率分布随着颗粒下落而变化。当 $t=180.1$ s 时, 有烟叶颗粒从抄板上掉落, 颗粒的运动会影响气相流动; 随着时间的流逝, 大量烟叶颗粒都从抄板上洒落, 进而影响到整个滚筒内部的流场; 当 $t=180.7$ s 时, 大多数烟叶颗粒掉落在松散润叶筒底部, 整个洒落过程大约为 0.8 s。由于筒体以 10 r/min 的速率旋转, 当 $t=181.0$ s 时, 后一块抄板到达前一块抄板的位置。烟叶颗粒洒落过程是 1 个周期性过程, 烟叶颗粒不断地被抄起、洒落, 循环往复, 优化了流场分布及增强了气固间的接触效率, 进而有效提升了其综合换热效果。

由图 6 可知, 在各时段内, 气相速率在垂直 Y

轴方向上均呈现先升高后降低的变化趋势; 而随着时间推移, 颗粒位置也逐渐接近润叶筒底部, 颗粒下落速率逐渐加快; 由于气相受颗粒运动的影响, 相应位置的气相速率也随之增大, 最大气相速率可达到 6.4 m/s。

图6 有固体颗粒进料下松散润叶筒内 $X=0.0$ m 和 $Z=4.0$ m 处 Y 轴方向的气相速率Fig.6 Gas phase velocity in the Y-axis direction at $X=0.0$ m and $Z=4.0$ m inside the moistening cylinder with solid particle feeding

2.2 气固耦合下松散润叶筒内温度场模拟

2.2.1 气固耦合下松散润叶筒内部温度分布

由图 7 可知, 加热空气从筒体上部的进气口进入润叶筒, 在 $Z=0.0\sim 3.0$ m 段的竖直截面上, 由于热气流上升, 导致滚筒内上部气相温度高于下部温度, 气相温度场呈现不均匀分, 同时, 颗粒抛洒改变了气体流动形式, 滚筒内气体逐渐混合均匀, 使得滚筒后半段竖直截面上气相温度场基本均匀分

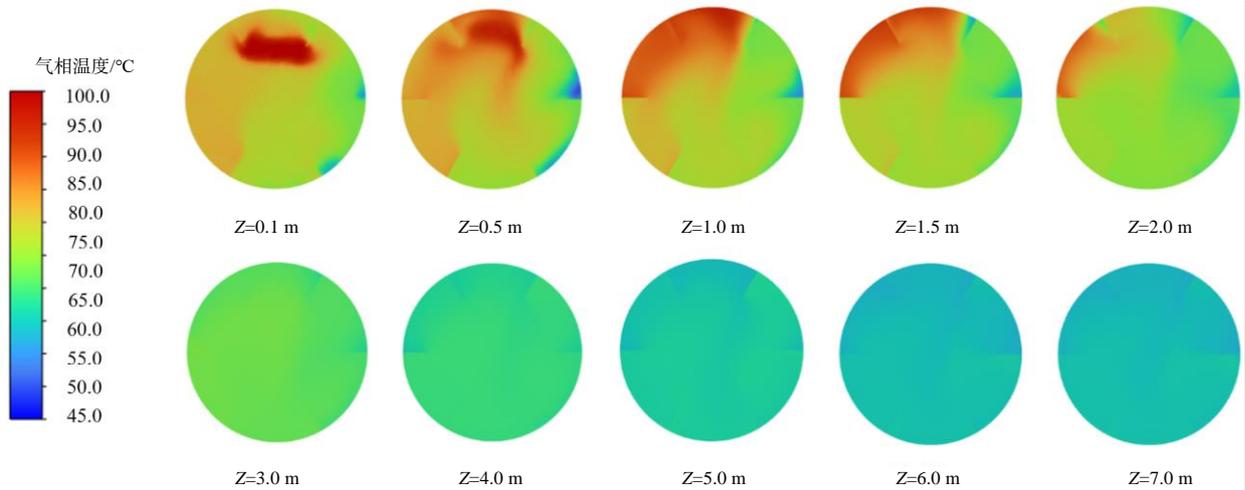


图 7 气固耦合下松散润叶筒内竖直截面气相温度分布

Fig.7 Gas phase temperature distribution of vertical section inside the moistening cylinder under gas-solid coupling

布。此外，抄板附近气相温度变化明显，造成这种现象的原因可能是颗粒与气相之间温差较大，与颗粒接触后的下侧、右侧抄板附近气相温度会偏低，当颗粒洒落时，受上部热气流的影响，抄板附近气相温度也随之升高。

图 8-a 为滚筒内烟叶颗粒温度分布图；图 8-b 为松散润叶筒内轴向截面气相温度云图；图 9 为 Z 轴向上气固耦合下松散润叶筒内平均温度。从图 8 和图 9 可知，烟叶颗粒被抄板抄起、撒落并呈螺旋式向 Z 方向正向运动，与气相进行热交换，轴向上烟叶颗粒温度变化分为 2 个阶段：第一阶段，在 Z=0.0~4.0 m 段，颗粒平均温度从 25.0 °C 迅速升温

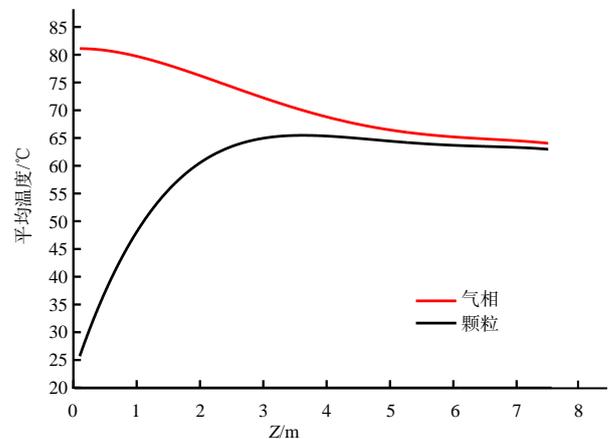


图 9 气固耦合下松散润叶筒内 Z 轴向上的平均温度

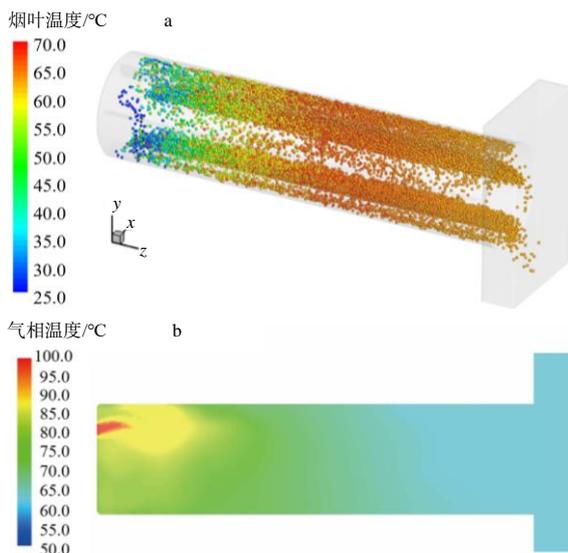
Fig.9 Average temperature in the Z-axis direction inside the moistening cylinder under gas-solid coupling

到 64.8 °C，烟叶颗粒温度变化明显；第二阶段，在 Z=4.0~7.5 m 段，烟叶颗粒平均温度基本稳定在 64.0 °C 左右，温度变化不大，最终烟叶颗粒出口温度为 63.4 °C，接近实测值 65.0 °C，相对误差为 -2.5%。

循环热风从进口进入润叶筒后，温度迅速降低，在轴向上气相温度变化也分为 2 个阶段：第一阶段，在 Z=0.0~4.0 m 段，由于气相与颗粒温差较大，提升了传热速率，气相平均温度明显下降，由 81.0 °C 下降至 68.8 °C；第二阶段，在 Z=4.0~7.5 m 段，气相平均温度基本维持在 64.0 °C 左右，温度变化不大，最终气相出口平均温度为 63.7 °C，接近实测值 63.3 °C，相对误差为 0.6%。

2.2.2 气固耦合传热

1) 气固两相间的对流传热。在松散润叶筒内，



a 烟叶温度云图；b 气相温度云图。

图 8 气固耦合下松散润叶筒内的温度分布

Fig.8 Temperature distribution in moistening cylinder under gas-solid coupling

烟叶颗粒温度变化主要是受到颗粒与壁面、颗粒与颗粒之间的接触和碰撞产生的导热，颗粒与气相间的对流换热以及滚筒内的辐射传热的影响。滚筒内温度不高，辐射传热量可忽略；筒体壁面绝热，且同位置处颗粒温度相差不大，热传导的作用较小；烟叶与热空气之间温差大，且相对速率快，使得对流传热系数大；因此，烟叶颗粒温度变化是由气固两相间的对流传热主导的。

气-固两相之间的热流密度计算公式如下。

$$q=h(T_g-T_s) \tag{1}$$

式中： q 为热流密度； h 为对流传热系数； T_g 为气相平均温度； T_s 为固相颗粒平均温度。由于松散润叶筒结构复杂，气体流量不稳定，烟叶面积难以测算，故采用化工流化床中的对流系数^[18-19]来计算，气相与烟叶颗粒之间平均对流换热系数设为 $210.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 。

松散润叶筒 Z 轴向不同位置处的热流密度如图 10 所示。从图 10 可以看出，热流密度随着 Z 轴向位置呈现先逐步下降后平稳的趋势，在进口处热流密度最高，达到 $11\ 033.4 \text{ W}/\text{m}^2$ ；在 $Z=0.0\sim 4.0 \text{ m}$ 段，热流密度逐步下降，且下降速率也逐渐减缓；在后半段，热流密度趋于稳定，在 $200.0 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右。这是由于松散润叶筒前半段气固温差大，在大的传热推动力之下热流密度最高，传热效果最好。

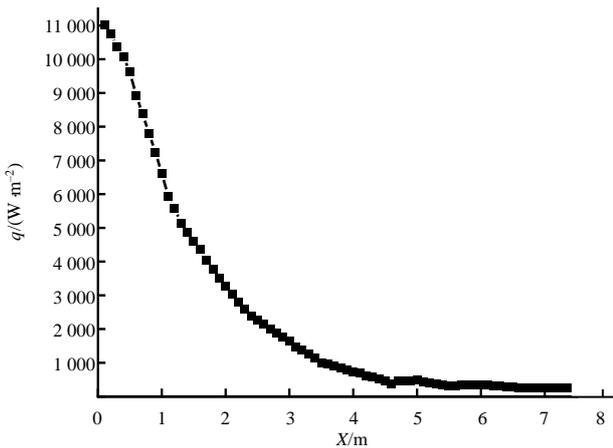


图 10 松散润叶筒内 Z 轴向的热流密度

Fig.10 Heat flux density in the Z-axis direction inside the moistening cylinder

2) 气固两相温度变化率。为探究松散润叶筒内部气相、颗粒温度在 Z 轴方向上的温度变化情况，对温度求一阶导数^[20]，其变化曲线如图 11 所示。

对气相平均温度求导， $\frac{dT_g}{dZ} < 0$ ，气相温度曲线

呈单调递减，如图 11 所示，其降温速率逐渐减小，直至后半段维持在一定值。对烟叶颗粒平均温度求导， $\frac{dT_s}{dZ} > 0$ ，颗粒温度曲线呈单调递增，其升温速率逐渐减小，直至后半段也维持在一定值。对比气相温度与颗粒温度，在 Z 轴向 $0.0\sim 4.0 \text{ m}$ 段， $\frac{dT_g}{dZ} < \frac{dT_s}{dZ}$ ，颗粒温度变化较快；在 $4.0\sim 7.5 \text{ m}$ 段，两者的温度变化均趋于稳定。这些温度条件符合烟叶润叶工艺要求，即在入口区域尽量升温，在出口处保持均匀稳定。

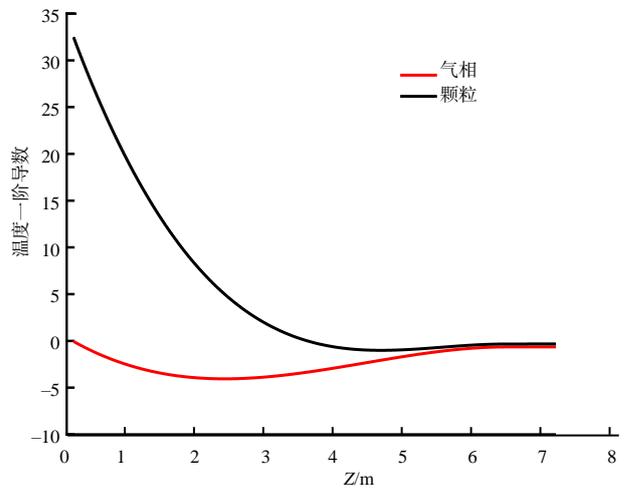


图 11 温度对 Z 轴位置的一阶导数

Fig.11 The first derivative of temperature with Z-axis respect to position

3 数值模拟与试验检测对比验证

为验证数值模拟的合理性，模拟计算松散润叶筒内部轴向方向的气相和烟叶颗粒平均温度分布，并与实际工业生产中相同位置处布置的热电偶(热电偶型号 HMR1010，杭州佐格通信设备有限公司出品，温度测量精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)实测值进行比较。

由于在实际工况中滚筒筒体旋转，温度传感器难以固定，缺乏成熟的温度测量方法。优先考虑将温度传感器固定在滚筒抄板处，对筒内温度进行采集。设置 14 个监测点，1#~14#监测点在 Z 轴上的位置分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.3、7.5、0.8、1.1、2.9、3.5、5.1、6.3、7.0 m。其中，6#监测点为烟叶出料口空气温度，7#监测点为循环热风出口温度。1#~5#监测点分别监测 2 h 内轴向不同位置的筒

内温度情况，统计计算温度稳定段试验数据，选取 2 次数据求平均值。8#~14#监测点分别监测轴向不同位置的烟叶温度。

从表 2 可知，1#监测点处温度相对误差较大，这是因为该处气固温差大；松散润叶筒内 14 个监

测点的模拟值与实测值的最大相对误差小于 10%，平均相对误差为 4.1%，平均绝对误差为 2.6℃，可见，温度模拟结果与实测结果整体吻合良好，模拟结果可较好地反映松散润叶筒内的温度分布和变化规律，建立的 CFD 模型合理有效。

表 2 筒内温度模拟值与实测值的比较

Table 2 Comparison of simulated and measured values of temperature in cylinder

监测点	位置 Z/m	模拟筒内温度/℃	实测筒内温度/℃	绝对误差/℃	相对误差/%
1	2.0	70.3	64.1	6.2	9.7
2	3.0	69.0	67.0	2.0	3.0
3	4.0	67.8	68.5	-0.7	-1.0
4	5.0	65.8	69.0	-3.2	-4.6
5	6.0	64.6	68.6	-4.0	-5.8
6	7.3	63.5	64.1	-0.6	-0.9
7	7.5	63.6	63.3	0.3	0.5
8	0.8	43.2	46.7	-3.5	-7.5
9	1.1	51.9	49.6	2.3	4.6
10	2.9	64.3	68.5	-4.2	-6.1
11	3.5	65.8	66.4	-0.6	-0.9
12	5.1	64.4	69.2	4.8	-6.9
13	6.3	63.5	65.4	-1.9	-2.9
14	7.0	63.0	65.0	2.0	-3.1

4 松散润叶筒倾角和转速对颗粒温度的影响

松散润叶筒的倾角和转速是实际生产过程中的 2 个关键参数，倾角和转速会影响颗粒在筒内的停留时间，致使气相温度分布和传热过程改变，从而影响到颗粒的温度分布。选择滚筒转速为 10 r/min，分别对滚筒筒体倾角为 3°、5°、8°、10° 的情况进行数值模拟。选择筒体倾角为 5°，分别对松散润叶筒转速为 5、10、15、20 r/min 的情况进行数值模拟。

4.1 不同倾角对颗粒温度变化的影响

图 12 为当滚筒转速为 10 r/min 时不同倾角下沿 Z 轴向的气相和颗粒的温度。从图可以看出，在 Z 为 0.0~1.0 m 段气相温度相对稳定，且随着倾角的增大，进口段气相温度越高，其原因主要是倾角越大，颗粒停留时间越短，气固两相传热越不充分，导致气相温度越高；在 Z 为 1.0~7.0 m 段，随着两相间的传热，气相温度逐步下降，不同倾角下降速率相差不大；在滚筒与出料罩连接处即 Z=7.0 m 处，由于循环热风出口有一定的负压，致使烟叶出料口有少量空气倒吸，外界空气与循环热风混合，使得气相温度出现骤降。

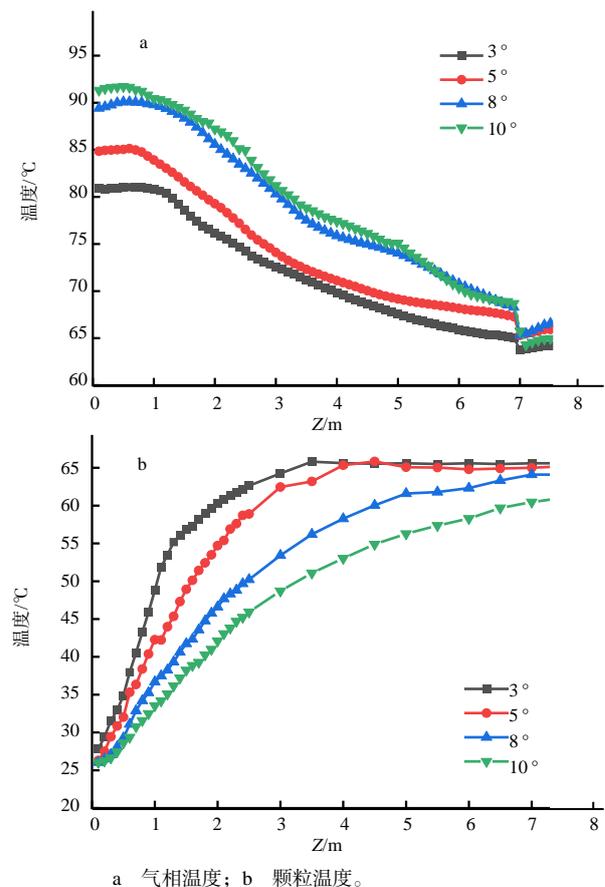
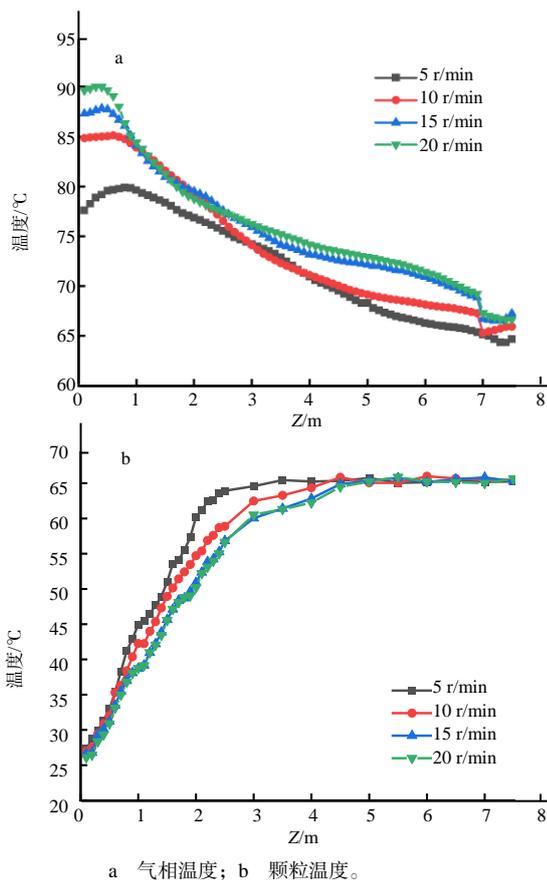


图 12 不同倾角下松散润叶筒内 Z 轴向气相和颗粒的温度
Fig.12 Temperature of gas phase and particles in the Z-axis direction inside different inclination angles under the moistening cylinder

从图 12-b 可知,在滚筒前半段颗粒温度迅速攀升,后半段温度增长趋势相对平稳;随着倾角增大,烟叶颗粒停留时间变短,气固两相接触时间减少,致使同位置下颗粒温度降低,且颗粒最高能被加热到 64.0 °C 左右;因此,松散润叶筒倾角与传热效果呈负相关。根据烟叶润叶工艺要求,出口烟叶温度需达到 63.0 °C 以上,而当筒体倾角为 8° 时,烟叶颗粒温度为 63.1 °C;因此,为满足润叶工艺要求,筒体倾角应小于 8°。

4.2 不同转速对颗粒温度变化的影响

图 13 为当筒体倾角为 5° 时不同转速下沿 Z 轴方向的气相和颗粒的温度。从图可以看出,在 Z 为 0.0~1.0 m 段气相温度相对稳定;在 Z 为 1.0~7.0 m 段,随着两相间的传热,气相温度逐步下降,且 15 r/min 与 20 r/min 下的气相温度基本一致。



a 气相温度; b 颗粒温度。

图 13 不同转速下松散润叶筒内 Z 轴向气相和颗粒的温度
Fig.13 Temperature of gas phase and particles in the Z-axis direction inside the moistening cylinder under different speeds

由图 13-b 可知,在 Z 为 0.0~4.0 m 段,烟叶颗粒温度迅速升高,在后半段温度均维持在 64.0 °C 左右。转速越大,颗粒温度上升速率越慢,但当转速

大于 15 r/min 时,对颗粒温度分布基本没有影响;因此,松散润叶筒转速与传热效果呈负相关。在工业生产中,提高转速会减少烟叶停留时间,从而提高生产速率,但会增加能耗。综合考虑,转速应选择 15 r/min 较为适宜。

5 结论

1) 松散润叶筒内 14 个温度监测点的模拟值与实测值,平均绝对误差为 2.6 °C,平均相对误差为 4.1%,说明所建模型合理有效。

2) 颗粒对流场的影响较大,颗粒的存在会使松散润叶筒内流场分布更均匀,整体气相速率从无颗粒时的 1.0 m/s 左右下降至 0.3 m/s 左右,增加气固接触时间;同时,颗粒洒落会引起空气扰动,使气相速率分布随着颗粒下落而变化。

3) 在松散润叶筒前半段,气相温度场呈现不均匀分布,且气固间传热显著,气相平均温度由 81.0 °C 下降至 68.8 °C,其降温速率呈现先增大后减小的趋势;颗粒平均温度从 25.0 °C 迅速升温到 64.8 °C,其升温速率逐渐减小。在后半段气固两相温度相对维持稳定。

4) 对流传热是松散润叶筒内部热量传递的主要方式,气固间传热的热流密度随着轴向位置呈现先逐步下降后平稳的趋势。在进口处,由于气固温差大,在大的传热推动下热流密度最高,达到 11 033.4 W/m²;在后半段,热流密度趋于稳定,在 200.0 W/m² 左右。

5) 松散润叶筒倾角、转速与传热效果呈负相关,且倾角对传热的影响要小于转速的。为满足润叶工艺要求,筒体倾角应小于 8°;综合考虑生产速率与能耗,转速应选择为 15 r/min。

参考文献:

- [1] 廖和滨,陈庆平,张志阳,等. 润叶加料喷嘴固定支架装置的改进[J]. 烟草科技, 2013, 46(5): 22-24.
- [2] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.
- [3] 靳毅,李文伟,陈霞,等. 一种松散回潮工序的出口含水率的控制方法及系统: CN110893001A[P]. 2020-03-20.

(下转第 128 页)

- [29] LI Y, ZHAO R N, LI Y, et al. Limonin enhances the antifungal activity of eugenol nanoemulsion against *Penicillium italicum* in vitro and in vivo tests[J]. Microorganisms, 2021, 9(5): 969.
- [30] KLANG V, VALENTA C. Lecithin-based nanoemulsions[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2011, 21(1): 55–76.
- [31] HEURTAULT B, SAULNIER P, PECH B, et al. Physico-chemical stability of colloidal lipid particles[J]. Biomaterials, 2003, 24(23): 4283–4300.
- [32] HE Q, GUO M M, JIN T Z, et al. Ultrasound improves the decontamination effect of thyme essential oil nanoemulsions against *Escherichia coli* O157: H7 on cherry tomatoes[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 337: 108936.
- [33] GADKARI P V, SHASHIDHAR M G, BALARAMAN M. Delivery of green tea catechins through oil-in-water(O/W) nanoemulsion and assessment of storage stability[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 199: 65–76.
- [34] 李畅, 薛璐, 芦晶, 等. 高压微射流均质法制备二十二碳六烯酸藻油脂质体及其性质分析[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 110–117.
- [35] 史亚濛. 花椒精油纳米乳液的制备、特性表征及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [36] MCCLEMENTS D J. Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques[M]. 3rd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.
- [37] HUNTER R J. Foundations of Colloid Science[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [38] SARI T P, MANN B, KUMAR R, et al. Preparation and characterization of nanoemulsion encapsulating curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 540–546.
- [39] KOMAIKO J, SASTROSUBROTO A, MCCLEMENTS D J. Encapsulation of ω -3 fatty acids in nanoemulsion-based delivery systems fabricated from natural emulsifiers: sunflower phospholipids[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 331–339.
- [40] 姜欣雨. 姜黄素纳米乳液的制备及其在香菇保鲜中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [41] FLORES-ANDRADE E, ALLENDE-BALTAZAR Z, SANDOVAL-GONZÁLEZ P E, et al. Carotenoid nanoemulsions stabilized by natural emulsifiers: whey protein, gum Arabic, and soy lecithin[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 290: 110208.
- [42] ÖZTÜRK B. Nanoemulsions for food fortification with lipophilic vitamins: production challenges, stability, and bioavailability[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(7): 1500539.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正

(上接第110页)

- [4] 周群华, 李元发, 吕志宏, 等. 一种用于烟草片烟松散回潮机热风温度控制装置: CN208850665U[P]. 2019-05-14.
- [5] 张天骅, 蒋红海, 忽正熙. 基于红外图像边缘检测的松散回潮过程中烟草运动轨迹分析[J]. 新技术新工艺, 2016(3): 103–105.
- [6] 刘栋, 李华杰, 罗登炎, 等. 滚筒加工设备烟丝停留时间分布的测定方法[J]. 烟草科技, 2011, 44(5): 5–10.
- [7] 周凯敏, 何晋, 盛科, 等. 滚筒烘丝机内烟丝停留时间模型的建立及数值模拟[J]. 烟草科技, 2016, 49(5): 94–99.
- [8] 周学政, 何蓉, 李东亮, 等. 松散回潮工艺参数对卷烟叶丝常规化学成分的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 137–140.
- [9] 唐军, 周冰, 唐丽, 等. 松散回潮工序加工强度对烟丝致香物质的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(3): 66–69.
- [10] 万云飞, 王广超, 王彬彬, 等. 松散回潮工序对卷烟感官质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(10): 101–103.
- [11] 沈凯, 潘凡达, 李旭, 等. 松散润叶筒三维传热传质过程数值模拟[J]. 轻工学报, 2023, 38(5): 96–103.
- [12] 耿凡, 徐大勇, 袁竹林, 等. 滚筒干燥器中颗粒混合运动的三维数值模拟[J]. 应用力学学报, 2008, 25(3): 529–534.
- [13] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide[M]. Canonsburg, USA: ANSYS Inc., 2011.
- [14] 任述光, 陈赛, 吴明亮, 等. 小型油菜联合收获机双风道气流清选装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(4): 472–479.
- [15] ALVAREZ P I, SHENE C. Experimental study of residence time in a direct rotary dryer[J]. Drying Technology, 1994, 12(7): 1629–1651.
- [16] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [17] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new k - ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227–238.
- [18] 段兵兵, 王恒旭, 张学军, 等. 湿空气与水直接接触冷凝 CFD 模拟研究[J]. 制冷技术, 2019, 39(1): 28–33.
- [19] 王洪远. 基于动态双网格的鼓泡流化床传热特性的数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- [20] 晏丽红, 谢中华. 间壁式单程换热器两侧流体温度分布的研究[J]. 天津科技大学学报, 2016, 31(3): 48–53.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正