

大豆调质塔加热层的颗粒运动和干燥层的热风流场数值仿真分析

唐静静, 吴伟中, 李 寒, 扶宇洋

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为了优化大豆调质塔加热层椭圆管和干燥层角状盒的设计, 采用离散元法 (DEM) 仿真分析加热层椭圆管的结构和分布对大豆颗粒运动的影响, 采用计算流体力学 (CFD) 仿真分析干燥层中的热空气流动规律。结果表明: 椭圆管长短轴比为 2.28:1 时, 大豆颗粒在加热层中分布均匀不堵料, 颗粒碰撞次数少, 有利于提高大豆加热效率, 并降低颗粒的破损和椭圆管的磨损程度; 相邻加热层椭圆管的轴向夹角为 90° 时颗粒经过加热层所需时间最短, 轴向夹角的变化对颗粒在加热层中产生的碰撞次数无显著影响; 当干燥层角状盒的轴向与加热层椭圆管的轴向相互平行时, 干燥层中热风存在较大湍流, 热风在干燥层中的分布更分散, 热风在角状盒两侧形成较为柔和的逆流, 更有利于大豆颗粒干燥及顺利下落。通过分析调质塔加热层及干燥层参数对大豆颗粒运动特性、热风流场分布的影响, 可为调质塔的结构设计优化提供参考。

关键词: 调质; 加热层; 干燥层; 颗粒运动; 热风流场

中图分类号: TS223.2; TQ643 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)02-0135-08

Numulation analysis of particle motion in heating layer and hot - air flow field in drying layer of soybean conditioning tower

TANG Jingjing, WU Weizhong, LI Han, FU Yuyang

(School of Electrical and Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to optimize the design of the elliptical tubes in the heating layer and the angular boxes in the drying layer of the soybean conditioning tower, the discrete element method (DEM) was adopted to analyze the influence of structure and distribution of the elliptical tubes in the heating layer on the movement of soybean particles, and the calculation fluid dynamics (CFD) method was used to analyze the hot - air flow characteristics in drying layer. The results showed that when the long and short axis ratio of the elliptical tube was 2.28:1, the soybean particles could be evenly distributed in the heating layer without plugging, and the particle collision frequency was less. It was conducive to improve the heating efficiency of soybean, and reduce the damage of the particles and the wear degree of the elliptical tube. When the axis angle of the elliptical tube in the adjacent heating layer was 90°, the time required for the particles to pass through the heating layer was the shortest, and the change of the axis angle had no significant effect on the number of collisions in the heating layer. When the axial direction of the angular box was parallel to the axial direction of the elliptical tube, there was a large turbulence of hot - air in the drying layer, the distribution of hot - air in the drying layer was more decentralized, and the hot - air

formed a softer countercurrent on both sides of the angular box, which was more conducive to the drying of soybean particles and the smooth fall. By analyzing the influence of the parameters of the heating layer and drying layer of the conditioning

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 河南省重大科技专项 (211100110100-3)

作者简介: 唐静静 (1978), 女, 副教授, 硕士, 主要从事粮油加工设备技术研发 (E-mail) tang_jing_jing@126.com。

tower on the motion characteristics of soybean particles and the distribution of the hot - air flow field , it can provide a reference for the optimization of the structural design of the conditioning tower.

Key words: conditioning; heating layer; drying layer; particle motion; hot - air flow field

调质技术是大豆油加工工艺中重要的环节,调质质量的好坏关乎大豆脱皮、破碎与轧坯等预处理的运行效果^[1]。大豆的调质软化过程涉及气固两相作用,如气固流动、传热传质。调质塔作为一种具有空间封闭、布置灵活等特点的气固两相技术装备,与油料加工技术高效、低成本、环保的发展需求契合。常见的调质塔结构由多个加热层和干燥层叠加组成。加热层中排列有多个椭圆管,管内流通蒸汽,为大豆颗粒的加热提供热能,改变大豆颗粒内部的水分分布。干燥层中均匀排列一层角状盒,箱体下方流通热风,当大豆落入干燥层中,热风将大豆表面的水分吹干。大豆颗粒从塔顶的落料口落下,穿过交叉叠加的加热层和干燥层,进行多次“加热—干燥”调质后,由塔底的出料口输出。调质塔内椭圆管和角状盒的形状和分布是影响大豆调质质量的关键因素^[2],因此有必要对其进行研究。

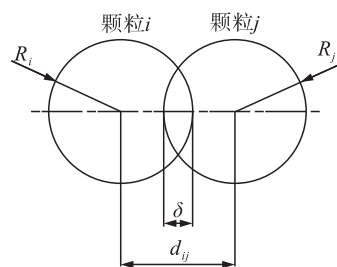
国内学者针对调质塔的结构设计进行了大量的实践探究,如:邱孟柯等^[2]基于 500 t/d 产量设计了大豆调质塔的结构,对筒壁连接、轴承密封优化等关键技术进行了探讨;曾凡中等^[3]以相同的产量,从物料衡算和热量衡算的角度进一步分析了大豆调质塔加热层、干燥层的结构设计要点;为降低调质成本,左青等^[4]提出采用 Desmet 宽板加热管技术、冷凝水回收利用技术来控制大豆调质目标参数;蒋守业等^[5]基于调质塔系统的典型工艺参数,提出限定空气加热器的出口温度和废气排放温湿度来降低成本。此外,还有学者从调质塔常见故障问题和机械磨损根因出发,提出调质塔的结构改进方案^[6-7]。综上可看出学者们主要从实践的角度积累了相关研究成果,但尚未见从学理的角度针对调质塔加热层及干燥层两个关键部位物料运动特性、气流流场进行分析的研究。因此,本研究在前人实践经验的基础上,基于某公司制造的调质塔设备结构参数,采用离散元法 (DEM) 和计算流体力学法 (CFD),通过数值模拟分析来探究调质塔加热层椭圆管的几何形状及排列方式、角状盒与椭圆管的排列方式等参数对大豆颗粒运动、热风流场分布的影响规律,以期调质塔的结构设计优化提供理论参考。

1 控制方程

1.1 颗粒相控制方程

1.1.1 颗粒接触模型

大豆颗粒在调制塔下落过程中,颗粒与塔内的加热椭圆管产生接触,同时颗粒与颗粒之间也产生接触。在 DEM 中,Hertz - Mindlin 接触模型通过牛顿第二定律和颗粒重叠量计算接触力,适用于模拟 3 个以上颗粒同时发生接触碰撞的过程^[8]。Hertz - Mindlin 接触模型示意图如图 1 所示。



注: R_i 和 R_j 分别表示颗粒*i*和*j*的半径; δ 表示两个颗粒接触时的变形量; d_{ij} 表示两个颗粒的圆心距

Note: R_i, R_j . Radii of particles *i* and *j*; δ . Deformation of the two particles in contact; d_{ij} . Centroid distance of the two particles

图 1 Hertz - Mindlin 接触模型示意图

Fig. 1 A schematic representation of the Hertz - Mindlin contact model

颗粒之间的法向力(F_n)按公式(1)计算。

$$F_n = \frac{4}{3}E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: E^* 为当量杨氏模量; R^* 为当量半径; δ_n 为法向重叠量。

E^* 和 R^* 的计算分别见式(2)、式(3)。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - \nu_j^2)}{E_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (3)$$

式中: ν_i, E_i 和 ν_j, E_j 分别代表颗粒*i*和*j*的泊松比和杨氏模量。

颗粒之间的切向力(F_t)按公式(4)计算。

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (4)$$

式中: S_t 为切向刚度; δ_t 为切向重叠量。

S_t 的计算见式(5)。

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (5)$$

式中: G^* 为当量剪切模量。

1.1.2 颗粒的运动方程

颗粒在运动过程中的位移可由牛顿第二定律求得。颗粒 i 的运动方程见式(6)。

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{dv_i}{dt} &= \sum F_i \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} &= \sum M_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: m_i 为颗粒 i 的质量; I_i 为颗粒 i 的转动惯量; v_i 和 ω_i 分别为颗粒 i 的线速度和角速度; $\sum F_i$ 和 $\sum M_i$ 分别为颗粒 i 在质心处所受的合外力和合外力矩。

1.2 气相控制方程

用于干燥大豆颗粒的热风具有三维、不可压和湍流特征, 因此在进行干燥层热风流体动力学仿真分析时, 热风的气相控制方程包括连续相控制方程、动量守恒方程及湍流模型控制方程。

1.2.1 连续相控制方程

连续相控制方程见式(7)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中: ρ 为气相密度, kg/m^3 ; u 、 v 、 w 分别是质量平均矢量速度 u 在 x 、 y 、 z 方向上的分量, m/s ; t 为时间, s 。

1.2.2 动量守恒方程

x 、 y 、 z 三个方向上的动量守恒方程见式(8)。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla(\rho u_x u) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla(\rho u_y u) &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + F_y \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla(\rho u_z u) &= -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中: τ 为应力张量。

1.2.3 湍流模型控制方程

调质塔中的热空气由于受到角状盒及加热层椭圆管的影响通常出现湍流现象。湍流模型是数值模拟中研究调质塔内热空气流动的关键部分。 $k-\varepsilon$ 湍流模型是最典型的湍流模型, 在工程问题上被广泛使用^[9-11], 本文选择该模型来研究调质塔内热空气的流动。 $k-\varepsilon$ 湍流模型控制方程见式(9)、式(10)。

$$\frac{\partial(\rho_a \xi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a k u_{ai})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_a \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a \varepsilon v_{ai})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_1 \rho_a S \varepsilon - C_2 \rho_a \frac{\varepsilon^3}{k + \sqrt{\varepsilon v_{ai}}} \quad (10)$$

式中: ρ_a 为气流密度; ξ 为气流体积分数; k 为湍流动能; u_{ai} 为空气速度矢量; μ 、 μ_t 分别为动力黏度、湍流黏度; x_i 、 x_j 分别为坐标系中的方向, 其中 i 、 j 的取值范围为 1、2、3; G_k 为湍流能量的生成率; ε 为湍流耗散率; v_{ai} 为运动黏度; σ_k 、 σ_ε 分别为湍流动能(k)和耗散率(ε)对应的普朗特数; C_1 、 C_2 、 S 均为经验常数。 $k-\varepsilon$ 湍流模型控制方程的具体计算过程可参考文献[12]。

2 模型构建和网格划分

2.1 大豆颗粒模型构建

大豆颗粒的形状在三轴方向上的尺寸略有不同, 属于非球形颗粒。参考文献[13]的研究结果, 在 DEM 软件中采用球形叠加法构建大豆颗粒模型, 如图 2 所示。大豆颗粒由 4 个球体构成, 球体位置及球径大小参数如表 1 所示。

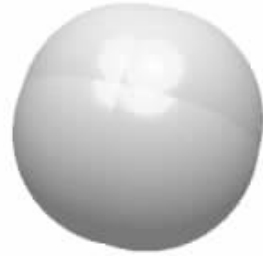


图 2 大豆颗粒模型

Fig. 2 Model of soybean particles

表 1 大豆颗粒构成球体参数

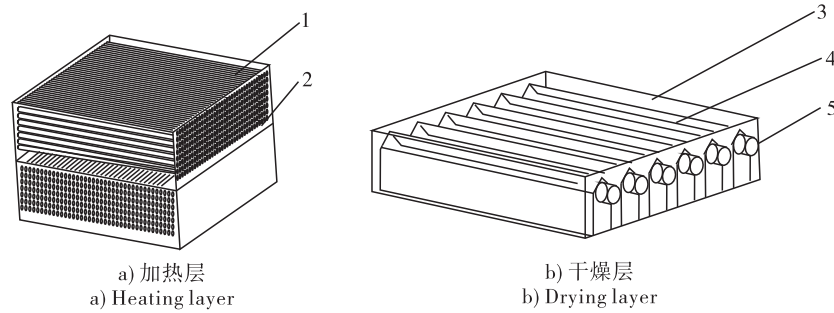
Table 1 Parameters of soybean particles

forming spheres				mm
序号	x	y	z	半径
1	0.295 091	0.272 847	-0.001 607 70	3.146
2	0.299 242	-0.268 137	-0.001 465 76	3.146
3	-0.296 881	0.268 306	0.001 924 23	3.146
4	-0.292 730	-0.272 678	0.002 066 17	3.146

2.2 加热层和干燥层模型构建

在 Solidworks 软件中建立加热层和干燥层的三维模型并进行装配。参考郑州某公司制造的调质塔结构尺寸及本仿真实验的计算设备条件, 对加热层和干燥层进行了结构简化。图 3 为加热层和干燥层的三维模型。

如图 3 所示, 加热层由平行排列的不锈钢椭圆管及 4 mm 厚的不锈钢板壳体构成。一个加热层组合由两个加热层单元交错叠加构成, 这两层加热层中的椭圆管轴向方向相互垂直。干燥层由 6 个不锈钢角状盒、12 个不锈钢进风口和 4 mm 厚的不锈钢板壳体构成。



注:1. 椭圆管;2. 加热层壳体;3. 干燥层壳体;4. 角状盒;5. 进风口

Note:1. Elliptical tube; 2. Heating layer casing; 3. Drying layer casing; 4. Angular box; 5. Air inlet

图3 加热层和干燥层的三维模型

Fig. 3 3D model of the heating and drying layers

3 仿真方法及参数设定

3.1 大豆运动轨迹仿真方法及参数设定

使用 DEM 软件进行大豆颗粒的运动仿真。颗粒-颗粒、颗粒-管壁的接触参数,包括静摩擦系数、动摩擦系数和碰撞恢复系数^[13],如表 2 所示。

表 2 大豆与设备的离散元参数

Table 2 Discrete meta-parameters of the soybean and the equipment

材料	参数	数值
大豆颗粒	泊松比	0.23
	密度	1 272 kg/m ³
	剪切模量	63 MPa
	粒径分布	正态分布,标准差 0.05
钢	泊松比	0.3
	密度	7 800 kg/m ³
	剪切模量	70 000 MPa
大豆颗粒-大豆颗粒	碰撞恢复系数	0.3
	静摩擦系数	0.39
	动摩擦系数	0.17
大豆颗粒-钢	碰撞恢复系数	0.561
	静摩擦系数	0.449
	动摩擦系数	0.09

大豆颗粒工厂为尺寸 300 mm × 300 mm 的虚拟平面,距加热段上平面 1 000 mm,颗粒生成速度为 5 000 粒/s,颗粒的初始速度为 0。

基于调质塔尺寸过大,以及用于仿真分析的计算设备硬件基础,在设定设备几何条件时保持加热层壳体的高度与实际设备一致,减小加热层壳体的长、宽尺寸。设备仿真条件为壳体长、宽均为 906 mm,高度 1 020 mm,壳体厚度 4 mm;椭圆管短轴尺寸 35 mm,上方加热层椭圆管的顶部距加热层壳体顶部 120 mm,相邻椭圆管垂直边距 20 mm,上下两层加热层按椭圆管轴向相互垂直进行叠加,在下方加热层的底部添加颗粒集料器,用以收集由加热层中落出的颗粒并统计其数量。

基于上述设备仿真条件,设定不同的椭圆管长短轴比、相邻两层加热层椭圆管轴向夹角,对大豆的运动进行仿真分析。

(1) 椭圆管长短轴比对大豆颗粒运动的影响仿真

设定椭圆管长短轴比分别为 1:1 (35 mm × 35 mm)、2:1 (70 mm × 35 mm)、2.28:1 (80 mm × 35 mm,实际设备采用的椭圆管)、3:1 (105 mm × 35 mm)进行仿真分析,研究不同椭圆管长短轴比条件下大豆颗粒在加热层中下落时的颗粒分布及颗粒速度变化。不同长短轴比椭圆管在加热层中的分布如图 4 所示。

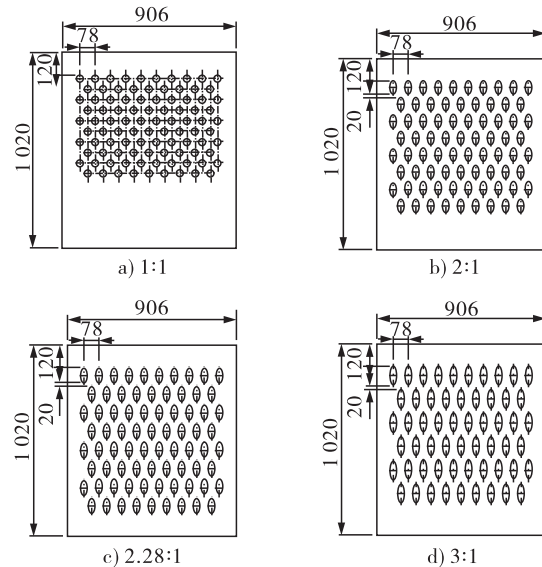


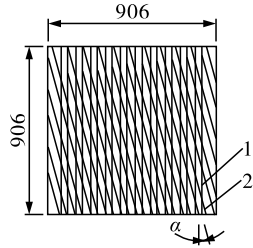
图 4 不同长短轴比的椭圆管分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of elliptical tubes with different long and short axis ratios

(2) 上下加热层椭圆管排列方式对大豆颗粒运动的影响仿真

固定椭圆管尺寸为 80 mm × 35 mm,上方加热层椭圆管方向固定,下方加热层椭圆管的轴向夹角

(α) 分别按照 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 进行仿真, 椭圆管轴向排列方式如图 5 所示。



注: 1. 上方加热层椭圆管; 2. 下方加热层椭圆管

Note: 1. Upper heating layer elliptical tube; 2. Lower heating layer elliptical tube

图 5 相邻加热层椭圆管排列示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the elliptical tubes arranged in the adjacent heating layer

3.2 热风流场仿真及参数设定

采用 Solidworks flow simulation 进行热风流场 CFD 仿真。构建的模型参数为实际设备参数: 干燥层壳体尺寸为长、宽均 3 000 mm, 高度 760 mm; 热风口内径尺寸 $\Phi 207$ mm; 加热层壳体尺寸为长、宽均 3 000 mm, 高度 1 020 mm; 椭圆管尺寸为 80 mm \times 35 mm。参照文献[3]的热空气流量计算方法, 设定流体边界条件: 入口为干燥层左右两端共 12 个进风

口, 热空气的体积流量为 $2.58 \text{ m}^3/\text{s}$; 干燥层上端面及最下端加热层的下端为静压面, 网格划分为 3 级。设定 2 个不同的仿真条件: 一为干燥层下方加热层的椭圆管轴向与角状盒轴向垂直, 二为干燥层下方加热层的椭圆管轴向与角状盒轴向平行。图 6 为热风流场计算域示意图, 其包含一层干燥层及两层加热层(两层加热层的椭圆管轴向与干燥层角状盒轴向垂直)。

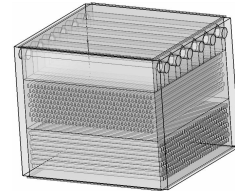


图 6 热风流场计算域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the hot-air flow field calculation domain

4 结果分析

4.1 椭圆管长短轴比对大豆颗粒运动规律的影响

为确保仿真分析过程获取的数据稳定, 选择大豆颗粒开始落料后的第 1.62 s 时加热层的颗粒分布进行运动规律的研究, 如图 7 所示。

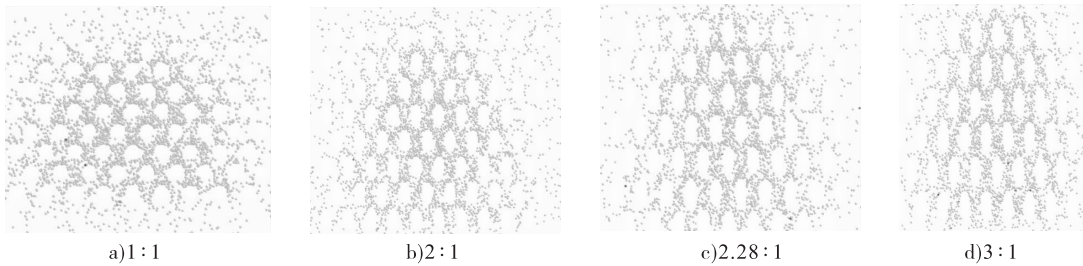


图 7 不同椭圆管长短轴比条件下的颗粒分布图

Fig. 7 Particles distribution diagram of elliptical tubes with different long and short axis ratios

从图 7 可看出, 在相同时间段内, 当椭圆管长短轴比为 1:1 时, 颗粒在加热层中的分布最广, 但在加热管之间容易形成物料堆积。随着椭圆管长短轴比的增大, 颗粒的分布越窄, 椭圆管之间形成堵料的概率越小。

图 8 为不同椭圆管长短轴比条件下颗粒下落的平均速度曲线, 曲线的时域范围为大豆颗粒从加热层顶部开始下落的时刻到穿过加热层落入底部集料器的时刻。

如图 8 所示, 大豆颗粒在初始阶段做自由落体运动, 其速度迅速增加, 在经过加热层中均布的多个椭圆管加热区域时, 受到椭圆管的阻挡及颗粒与椭圆管产生接触和碰撞, 整体平均速度呈衰减趋势。同时, 由图 8 还可看出, 椭圆管长短轴比越大, 大豆

颗粒落入集料器的时间越短, 即大豆颗粒在加热层中的受热时间越短。

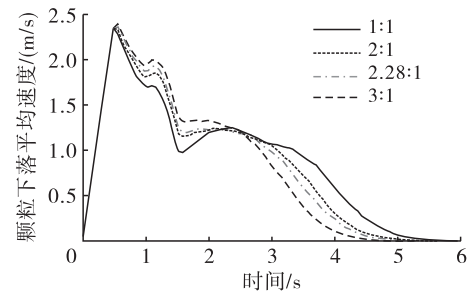


图 8 不同椭圆管长短轴比条件下颗粒下落的平均速度曲线
Fig. 8 Particle motion velocity curve at different long and short axis ratios of elliptical tubes

在加热层内, 颗粒产生的碰撞主要包括颗粒与椭圆管的碰撞、颗粒与颗粒的碰撞。利用 Origin 软

件对颗粒速度曲线中的显著增减点数量统计发现,当椭圆管长短轴比为1:1时,颗粒速度显著增减变化为11次,当椭圆管长短轴比为2:1时,颗粒速度显著增减变化为8次,当椭圆管长短轴比为2.28:1和3:1时,颗粒速度显著增减变化均为7次。颗粒速度显著增减变化的次数反映颗粒在加热层中产生的碰撞情况。颗粒速度显著增减变化次数越多,颗粒在加热层中产生碰撞的次数越多。碰撞可引起颗粒破碎和椭圆管磨损,故椭圆管长短轴比取大值将

有利于保持颗粒的完整度和降低椭圆管的磨损程度。综合前述椭圆管长短轴比对颗粒分布的影响,以及对颗粒在加热层中运动时间的影响,选取椭圆管长短轴比为2.28:1可以使颗粒在经过加热层时不产生堵料,在受热的过程中产生的碰撞较少。

4.2 椭圆管轴向夹角对大豆颗粒运动的影响

图9为相邻两层加热层的椭圆管轴向夹角分别为15°、30°、45°、60°、75°、90°条件下,大豆颗粒经过下层加热层的颗粒分布图。

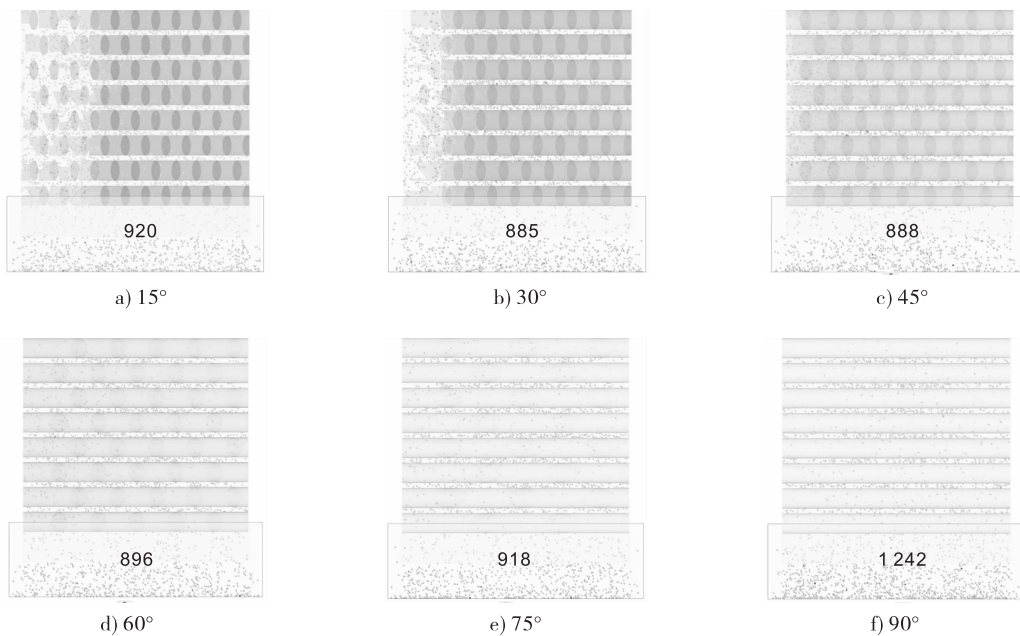


图9 相邻两层加热层不同椭圆管轴向夹角下的颗粒分布图

Fig. 9 Distribution of particles at different elliptical tube axial angles in two adjacent heating layers

通过统计相同时间段内大豆颗粒落入集料器中的数量来反映椭圆管排列变化对大豆颗粒下落速度的影响。不同椭圆管轴向夹角条件下穿过两层加热层的颗粒数量存在变化:当轴向夹角为15°时,有920粒大豆颗粒穿过两层加热层;当轴向夹角为30°、45°、60°、75°时,穿过两层加热层的大豆颗粒数分别为885、888、896、918粒;当轴向夹角为90°时,大豆颗粒数增加明显,为1242粒,说明交叉排列为垂直夹角时大豆颗粒下落情况最快,加热时间最短。

图10为相邻两层加热层中椭圆管不同轴向夹角下颗粒下落的平均速度曲线。

由图10可看出,大豆颗粒从加热层顶部落至加热层底部的过程中速度发生多次显著增减变化,利用Origin软件统计颗粒速度增减变化频次,发现椭圆管轴向夹角的变化对颗粒速度增减变化次数的影响不大,均在8~9次范围内。

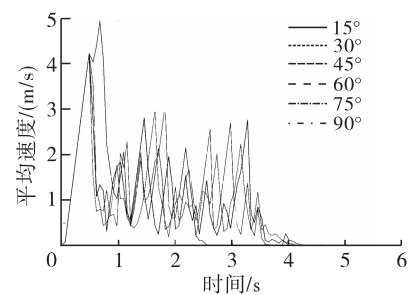


图10 相邻两层加热层椭圆管不同轴向夹角下颗粒下落的平均速度曲线

Fig. 10 Particle motion velocity curve at different elliptical tube axial angles in two adjacent heating layers

4.3 干燥层热风流场分析

图11为干燥层角状盒的轴向与相邻加热层椭圆管的轴向相互垂直情况下热风流场轨迹线图。图12为干燥层角状盒的轴向与相邻加热层椭圆管的轴向相互平行情况下热风流场轨迹线图。

由图11可见,当干燥层中安装的角状盒轴向与相邻加热层中的椭圆管轴向相互垂直时,热风进入

干燥层后,在干燥层的中央区域形成较小湍流。热风的流动轨迹线主要集中在干燥层中央区域,形成束状分布。

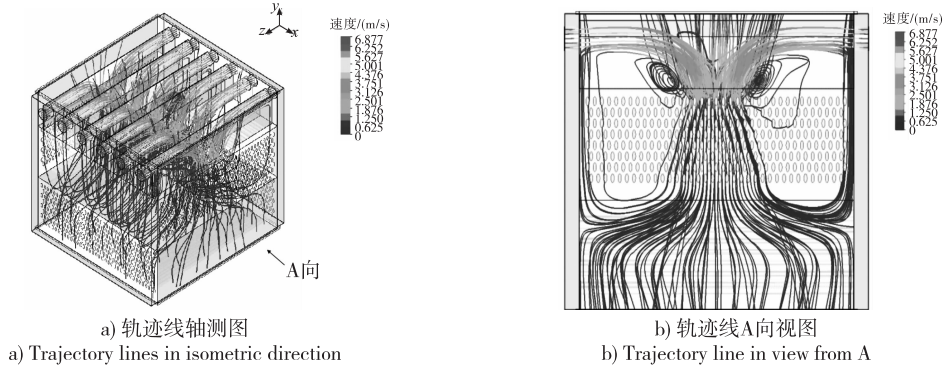


图 11 角状盒与椭圆管轴向相互垂直时热风流场轨迹线图

Fig. 11 Trajectory lines of hot - air flow field in axial perpendicular of the angular box and the elliptical tube

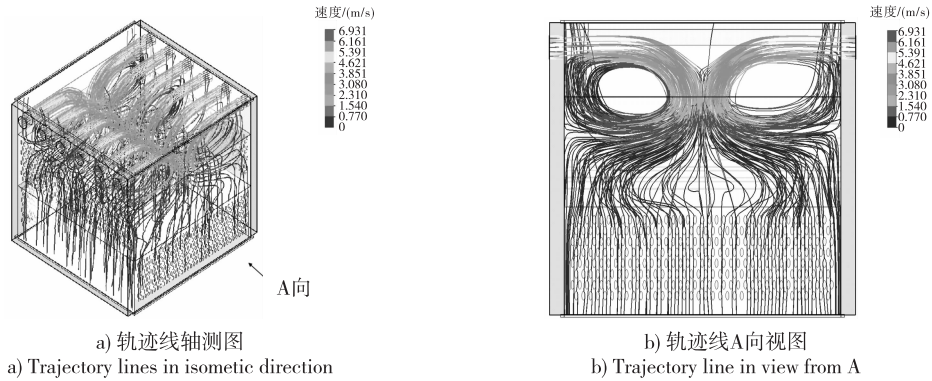


图 12 角状盒与椭圆管轴向相互平行时热风流场轨迹线图

Fig. 12 Trajectory lines of hot - air flow field in axial parallel of the angular box and the elliptical tube

由图 12 可见,当干燥层中的角状盒轴向与相邻加热层中的椭圆管轴向相互平行时,热风进入干燥层后形成较大湍流。从图 12b 热风的流动轨迹线的分布上看,热风形成的湍流形状有利于风干大豆颗粒

的表面水分。

图 13 为在角状盒的轴向与加热层椭圆管的轴向分别相互垂直和平行的情况下,在垂直于角状盒轴线方向上调质塔中部的热风流场速度切面图。

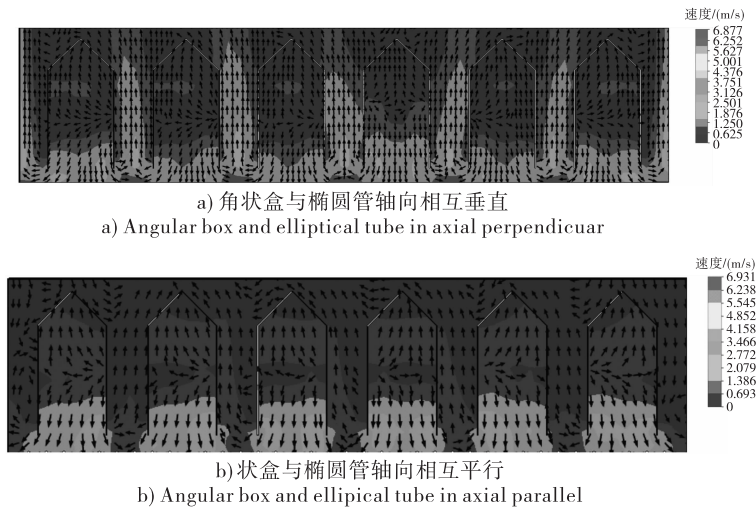


图 13 热风流场速度切面图

Fig. 13 Velocity section diagram of hot - air flow field

热风由进风口进入角状盒内为束状气流,束状边缘受到角状盒内侧壁影响,部分气流向角状盒中

心移动。受气流自重影响,气流在角状盒内部总体呈现向下运动趋势,运动至干燥层底部时,受椭圆管

阻拦,部分气流向角状盒外部两侧逸出并向上运动,在角状盒之间形成逆流,对下落的大豆颗粒进行干燥。如图 13a 中角状盒两侧的气流出现高速逆流现象,图 13b 中角状盒两侧的气流逆流速度较低,较低的逆流速度有利于大豆颗粒在受到热风干燥的同时顺利下落。

5 结 语

在调质塔加热层结构中,椭圆管长短轴比的变化对大豆颗粒在加热层中的分布和运动速度有显著影响。椭圆管长短轴比越大,加热层中的整体颗粒分布越不容易发生物料卡堵现象,颗粒在加热层中的受热时间越短。颗粒在加热层内下落过程中产生多次碰撞,颗粒的瞬时速度出现多次增减变化,椭圆管长短轴比越小,颗粒产生碰撞的次数越多,越不利于保持颗粒的完整度和降低椭圆管的磨损程度。综合前述仿真分析,选取椭圆管长短轴比为 2.28:1 可以使颗粒在经过加热层时不堵料,在受热的过程中产生的碰撞较少。

相邻加热层中椭圆管轴向夹角对大豆颗粒的运动有一定影响。当椭圆管轴向夹角越大时,颗粒在加热层中的运动时间越短,但椭圆管轴向夹角对颗粒在加热层中下落时产生的碰撞现象影响不显著。不同的椭圆管轴向夹角条件下,颗粒在加热层中产生碰撞的次数均在 8~9 次范围内。

干燥层角状盒的安装方向对热风的流动有明显影响。当角状盒的轴向与椭圆管的轴向相互垂直时,干燥层中热风的分布呈现束状集中,热风在角状盒两侧形成高速逆流。当角状盒的轴向与椭圆管的轴向相互平行时,干燥层中热风存在较大湍流,热风在干燥层中的分布更分散,热风在角状盒两侧形成较为柔和的逆流,更有利于大豆颗粒干燥的同时顺

利下落。

参考文献:

- [1] 范彩霞,陈帮军. 大豆调质塔的设计[J]. 中国油脂, 2014,39(10): 93-95.
- [2] 邱孟柯,肖培军,陈俊强,等. 大豆调质塔的设计与开发[J]. 粮食与食品工业,2016,23(1):77-79.
- [3] 曾凡中,马志强,董可林. 大豆调质塔的设计计算[J]. 中国油脂,2017,42(10):154-156.
- [4] 左青,左晖. 大豆压榨厂节能增效措施实践[J]. 中国油脂,2020,45(9):122-127,133.
- [5] 蒋守业,吴金锐,郝克非,等. 大型大豆预处理车间生产工艺研究与设计应用[J]. 中国油脂,2019,44(8):153-160.
- [6] 何远平,王宏平,陶守军,等. 大豆调质塔常见故障与维修实践[J]. 中国油脂,2022,47(4):153.
- [7] 陈俊强,陆俐俐,张瑞洋,等. 大豆调质塔回转下料器结构设计改进研究[J]. 粮食与食品工业,2015,22(3):79-81.
- [8] MUNJIZA A. The combined finite: Discrete element method [M]. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2004.
- [9] 王龙,徐雪萌,张永宇,等. 旋流起旋装置参数对散粮气力旋流输送特性的影响[J]. 包装与食品机械,2023,41(4):7-12,19.
- [10] 王明旭,赵子炎,陆凯凡. 气固分离称重料仓的设计与模拟分析[J]. 中国油脂,2023,48(3):144-148.
- [11] 米国强,黄志刚,胡淑珍,等. 基于 Fluent 的螺旋榨油机压榨段流场仿真[J]. 食品与机械,2021,37(3):85-88.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [13] 张涛,刘飞,赵满全,等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):86-92.

(上接第 122 页)

5 结 语

鉴于进口大豆水分、杂质、未成熟粒率、热损等因素给国内大豆加工企业原料成本、运输储存、加工成本和产品质量带来的影响,建议国家相关行业监管部门出台统一的进口转基因大豆常规理化标准,在大豆装运离港前对水分、杂质、未成熟粒率、热损等理化指标进行标准规定,以规范进口大豆质量。根据 GB 1352—2023 和 LS/T 3111—2017,建议进口大豆常规理化指标规定如下:水分含量 $\leq 13.0\%$,杂质

含量 $\leq 1.0\%$,未熟粒率 $\leq 3.0\%$,热损伤粒率 $\leq 3.0\%$ 。

参考文献:

- [1] 倪江枫. 成熟与未成熟大豆的油脂成分分析及其低温结晶特性的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2023.
- [2] HUI Y H. 贝雷: 油脂化学与工艺学:第五卷[M]. 徐生庚,裴爱泳,译. 北京:中国轻工业出版社,2001.
- [3] 韩丽娟. 浅析大豆油回色的主要因素[J]. 黑龙江粮食,2004(6):39-40.