

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.12.018

胡博, 刘尧, 张勇军, 等. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的脱水蔬菜烘干机内部风道仿真设计[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 116-126, 147
Hu Bo, Liu Yao, Zhang Yongjun, et al. Simulation design of internal air duct of dehydrated vegetable dryer based on EDEM-FLUENT coupling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 116-126, 147

基于 EDEM-FLUENT 耦合的脱水蔬菜烘干机 内部风道仿真设计^{*}

胡博¹, 刘尧¹, 张勇军¹, 龙艳²

(1. 北京科技大学工程技术研究院, 北京市, 100083;
2. 北京科技大学化学与生物工程学院生物与农业研究中心, 北京市, 100083)

摘要:为解决烘干机内部热风气流分布不均匀而导致烘干物料质量不稳定、热风利用率低等问题,以新型立式多层热风烘干机为研究对象,采用 EDEM-FLUENT 气固两相流耦合方法对不同结构内部风道的气流进行仿真分析,研究烘干机内腔不同设计结构对热风风速分布和烘干效率的影响,并以风速分布和不均匀系数为评价指标对内腔挡板结构进行优化,通过对比测试得到相对理想的设计方案。仿真结果表明,改进风道竖直壁面倾斜角度、侧壁倾斜角度和阶梯间距可以有效提升气流分布均匀性。风道供气速度范围为 8~12 m/s 时,气流分布相对均匀、不均匀系数波动幅度最小。

关键词:风道设计;结构优化;数值模拟;气流分布;计算流体力学

中图分类号:TS255.8; S126 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2024) 12-0116-12

Simulation design of internal air duct of dehydrated vegetable dryer based on EDEM-FLUENT coupling

Hu Bo¹, Liu Yao¹, Zhang Yongjun¹, Long Yan²

(1. Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China;
2. School of Chemistry and Biological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Research Center of Biology and Agriculture, Beijing, 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of unstable quality of drying materials and low utilization rate of hot air caused by uneven distribution of hot air flow inside the dryer, a new vertical multi-layer hot air dryer was taken as the research object, and the EDEM-FLUENT gas-solid two-phase flow coupling method was used to simulate and analyze the air flow inside the air duct of different structures. The influence of different design structures in the inner cavity of the dryer on the distribution of hot air speed and drying efficiency was studied, and the wind speed distribution and non-uniformity coefficient were used as evaluation indexes to optimize the baffle structure of the inner cavity. A relatively ideal design scheme was obtained through comparative testing. Simulation results show that improving vertical wall tilt Angle, side wall tilt Angle and step spacing can effectively improve air distribution uniformity. When the air supply velocity ranges from 8 to 12 m/s, the flow distribution is relatively uniform and the fluctuation of non-uniform coefficient is the smallest.

Keywords: air duct design; structural optimization; numerical simulation; airflow distribution; computational fluid dynamics

0 引言

中国是脱水蔬菜最主要的生产国和出口国,而且

总量连续多年呈现增长趋势^[1]。生产脱水蔬菜的干燥方法有热风干燥、真空冷冻干燥、红外线干燥、微波干燥等多种,我国应用最为广泛的是热风干燥,目前采用

收稿日期:2023 年 6 月 20 日 修回日期:2023 年 8 月 24 日

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(32172057)

第一作者:胡博,男,1994 年生,湖北襄阳人,博士研究生;研究方向为数值仿真、图像识别控制算法。E-mail: 2311142144@qq.com

通讯作者:张勇军,男,1973 年生,山东东营人,研究员,博导;研究方向为先进自动控制算法及工业应用。E-mail: zhangyj@ustb.edu.cn

热风干燥的蔬菜产品产量约占全部产量的 90%^[2]。热风干燥法烘干蔬菜的过程中,蔬菜品质受到温度、湿度等因素的影响,烘干室内温度、湿度的分布和气流分布紧密相关,气流分布越均匀,物料各处含水量越接近,蔬菜烘干的品质就越好^[3]。

目前越来越多的烘干机应用在生产加工中,烘干机的烘干质量及能耗水平越来越受重视,但脱水蔬菜行业中还存在生产效率低、严重依赖人工、烘干能耗过大等突出问题^[4],通过优化烘干机的结构与参数提高烘干效果已成为当前研究热点^[5]。

计算流体力学是流体力学和计算机科学相互融合的一门新兴交叉学科,为工程设计应用提供了一种新的方法。模拟仿真可以清晰直观地反映内部风道流场分布情况,对研究内部风道场分布均匀性情况具有成本低、效率高优点,可简化设计过程,大大降低研发成本和难度。于洋等^[5]采用 CFD 软件 FLUENT 对枸杞烘干机烘干室内流场进行了研究,优化热风式枸杞烘干机烘干室的设计研究提供了理论依据。心男^[6]、温翔宇^[7]、吴昊^[8]等采用 EDEM—Fluent 方法对耦合颗粒开展了仿真研究。李立伟等^[9]使用 CFD—EDM 耦合方法模拟水稻侧深施肥的肥料颗粒运动。杨凯等^[10]对茶叶烘干机干燥过程建立了数学模型。霍二光^[11]对菊花烘干室内气流情况进行模拟与优化研究。刘道奇等^[12]采用 Fluent 对负压式电加热干燥机内部流场开展仿真。牟国良^[13]、张学军^[14]等对循环式干燥机和红枣干燥设备进行仿真及优化设计。国外学者 Demissie^[15]、Amanlou^[16]等使用 CFD 软件对烘干设备进行了优化设计。

本文以空气能为热源的干燥设备为对象,借助 EDEM、Fluent 和 SolidWorks 软件,采用 EDEM—Fluent 耦合仿真技术对内部风道结构、物料颗粒以及相关参数进行优化,讨论物料颗粒和风道结构对气流分布情况的影响,为烘干设备设计和制造提供参考。

1 内部风道模型建立及气流分布模拟方法

1.1 建立内部风道模型

以某烘干设备制造企业正在研制的立式多层热风烘干机为原型,整体尺寸(长×宽×高)为 15 m×6 m×9 m,分为内外两部分,外部主要包含上料传送带、风机、加热炉和热交换器,内部采用立式多层结构,主要包含四条传送带和内部风道,如图 1(a)所示。热风需要穿过多层物料烘干,其间会有动能和温度损失,需要风机及时补充风动能。为配合立式多层热风烘干机完成风机补风和余热回收,内部风道需要同时具备供气 and 回收两种功能。

工作状态下,烘干机需同时进行供气和回收工作,

所以依据功能可将内部风道分成进气风道和收集风道两部分。本文研究对象是内部风道的流场分布问题,为有效进行仿真分析,对内部风道进行简化处理,选取内部一条传送带与内部风道进行几何模型的构建,把传送带、风机与相应连接处分别进行简化,如图 1(b)所示。

烘干热气需尽可能均匀分布在物料烘干区,考虑到加工难度、成本等因素,选取内部风道竖直壁面倾斜角度、侧壁倾斜角度和阶梯间距为主要研究内容,研究三个变量对气流场的影响。采用 SolidWorks 绘制改进前内部风道三维模型如图 1(c)所示,具体参数如表 1 所示。

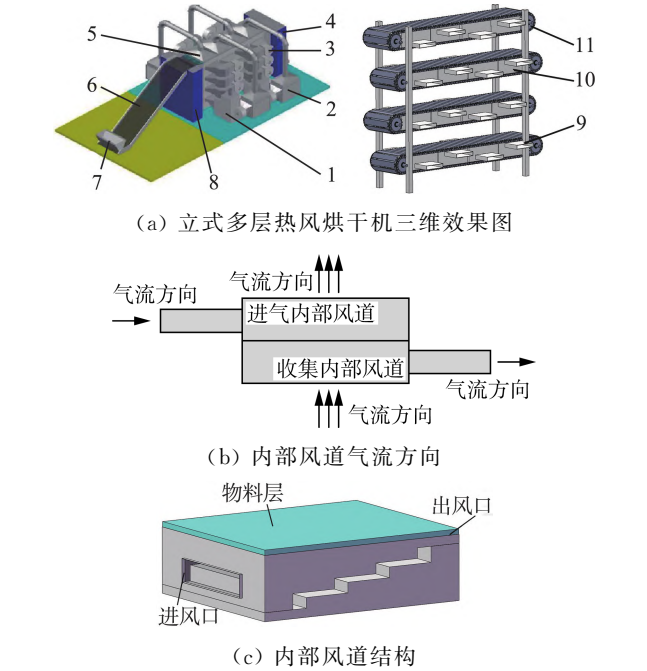


图 1 立式多层热风烘干机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air heat source dryer
1.加热炉 2.换热器 3.风机 4.设备后支架 5.废气收集器
6.上料传送带 7.上料料斗 8.设备前支架 9.内部风道进风口
10.内部风道 11.物料传送带

表 1 内部风道基本技术参数

Tab. 1 Basic technical parameters of internal air duct

参数	数值
整体尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	2 184×1 784×728
单层尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	2 100×1 784×510
进风口尺寸(长×宽) /(mm×mm)	220×1 000
出风口尺寸(长×宽) /(mm×mm)	1 920×1 780
内部阶梯数	5
侧壁倾斜角/(°)	0
阶梯间距/mm	450

1.2 基本假设

根据内部风道的结构特点以及热风干燥特性,对

干燥过程中的一些物理量进行合理假设。

1) 采用热风对流方式加热物料,进风速度恒定且均匀,可以忽略传送带和内部风道的热传导、热辐射对物料的影响。

2) 风道采用外部包裹有专用保温材料,热风在风道内对外部热量损失较小,可视为绝热。

3) 物料干燥过程中,假设进风口和出风口风机工作正常,排湿通风情况良好,多余的热空气可顺利地排除,且风道内未出现凝结为水或湿度过大的现象。

4) 干燥开始后,烘房内部气流很快趋于稳定,在不改变内部条件下,对气流的模拟采用稳态求解。

5) 干燥过程会伴随水蒸气的产生与传递,风道内气体运动包含了水蒸气与热风两种。本文研究目标是整个流场的分布变化,为此假设气体为 80 ℃ 的干热空气。

6) 在达到物料悬浮速度之前,物料位于传送带上,风道内气流分布与物料孔隙率和厚度相关,与物料种类相关性较小。为简化建模过程,忽略物料种类和切分大小对仿真的影响,本文选用玉米颗粒作为研究对象。

1.3 玉米颗粒 EDEM 模型和参数

1.3.1 玉米颗粒物理模型和参数

试验选用玉米颗粒作为研究对象,通过查阅资料确定所选材料的密度、泊松比和物料的剪切模量,采用游标卡尺测定玉米颗粒的直径,得到玉米颗粒长度、宽度、厚度。材料基本参数如表 2 所示^[18, 19]。由于种子形状多样,根据现场样本可分为扁平形、长扁形、类球形 3 类,如图 2 所示。

表 2 物料特性参数

Tab. 2 Material characteristic parameters

参数	玉米	钢板
泊松比	0.4	0.28
剪切模量/Pa	1.37×10^8	8.1×10^{10}
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 197	7 850



(a) 扁平形 (b) 长扁形 (c) 类球形

图 2 玉米颗粒模型

Fig. 2 Corn pellet model

通过颗粒悬浮状态下的力学平衡公式推导玉米颗粒的自由悬浮速度,采用其适用粒径法,根据物料等效直径所在范围确定阻力系数,将其代入颗粒的自由悬浮速度式求得玉米颗粒悬浮速度理论值。基于 EDEM-Fluent 气固两相流耦合仿真模拟玉米颗粒在传送带上干燥过程,得出热风流场分布和玉米颗粒悬

浮速度。其中烘干热风风速应保持在一定范围内,能够穿透物料但不超过玉米颗粒的自由悬浮速度。

1.3.2 玉米颗粒悬浮速度理论计算

在物料悬浮状态条件下,根据受力平衡原理和物料受力分析可知,物料竖直向下的重力等于物料在流体中竖直向上的浮力与竖直向上的阻力之和。在求解非球状物料的悬浮速度时引入修正系数,采用悬浮速度分区计算法和等效粒径法确定空气阻力系数值,将物料和气流特性参数代入受力平衡方程并计算悬浮速度,即获取物料悬浮速度理论数值,计算如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{cases} G = \rho g r_1 r_2 r_3 \\ F_f = \rho_a g r_1 r_2 r_3 \\ F_a = \frac{1}{2} C \rho_a S v_f^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G = F_a + F_f \\ S = r_1 r_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: G ——玉米重力, N;

F_a ——空气阻力, N;

F_f ——空气阻力, N;

C ——阻力系数;

ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ;

ρ ——物料密度, kg/m^3 ;

S ——迎风面积, m^2 ;

v_f ——物料悬浮速度, m/s ;

g ——重力加速度, $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$;

r_1 ——物料长度, m;

r_2 ——物料宽度, m;

r_3 ——物料高度, m。

对式(1)、式(2)整理,推导出物料悬浮速度计算如式(3)所示。

$$v_f = \sqrt{\frac{2gr_3(\rho - \rho_a)}{C\rho_a}} \quad (3)$$

由于阻力系数 C 是颗粒雷诺数 Re 的函数,不能直接求得物料颗粒悬浮速度,因此依据待测物料颗粒等效直径所在范围确定阻力系数。

$$C = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.5 \\ \frac{24(1 + 0.15Re^{0.087})}{Re} & 0.5 \leq Re < 1\,000 \\ 0.44 & Re \geq 1\,000 \end{cases} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_a d v_f}{\mu} \quad (5)$$

式中: μ ——空气动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

玉米密度为 $1\,197 \text{ kg}/\text{m}^3$,玉米颗粒等效直径 d 约

为 5~10 mm、空气密度 $\rho_a = 1.293 \text{ kg/m}^3$ 、空气动力粘度 $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 代入式(4)中, 得出对应阻力系数 C 的颗粒等效直径范围。经计算, 玉米颗粒等效直径均在式(4)其一范围, 因此将阻力系数 $C = 0.44$ 代入式(3)计算得: 玉米颗粒悬浮速度 15.12~21.28 m/s。

1.4 数值模拟方法

在三维建模软件 SolidWorks 中直接构建流场域和玉米颗粒模型存为 igs 格式, 导入 ANSYS Workbench 使用 Mesh 自动网格划分, 同时设置流场域的进风口、出风口和壁面并导出网格存为 msh 格式, 分别导入 ANSYS Fluent 和 EDEM 软件并设置参数。在 EDEM 种设置 3 种玉米颗粒模型数量总量为 50 000 颗, 扁平形、长扁形、类球形比例为 3:1:1, 具体形状如图 2 所示; 并设置玉米颗粒与传送带之间接触特征参数, 并设置重力加速度方向。玉米颗粒表面光滑几乎无粘附力, 玉米颗粒间、玉米颗粒与传送带间均采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型, 查阅文献获取物料仿真参数如表 3 所示^[20, 21]。

表 3 仿真参数
Tab. 3 Simulation parameters

类型	参数	数值
玉米—玉米	碰撞恢复系数	0.43
	静摩擦系数	0.27
	滚动摩擦系数	0.05
玉米—钢板	碰撞恢复系数	0.66
	静摩擦系数	0.38
	滚动摩擦系数	0.04

本文研究的是低压下的干热气体流动问题, 选择压力基求解器并确定压强速度的关联形式, 选择 SIMPLE 求解算法, 确定插值方法为一阶格式。仿真压强设置为一个标准大气压, 设置温度为 293.16 K, 在竖直方向设置重力加速度为 -9.81 m/s^2 , 求解控制采用默认设置, 设置收敛精度为 10^{-4} 。

本试验流体属于黏性湍流, 所以在进行模拟计算时, 选用具有较好收敛性能及合理精度的 $k-\epsilon$ 模型^[25], 并假设近壁处的流动符合标准壁面函数, 避免流体在壁面流动时出现失真, 更接近于实际烘烤状况。因此, 采用标准 $k-\epsilon$ 模型来模拟烘室内空气的流动。

标准 $k-\epsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ϵ 方程如式(6)~式(8)所示^[23, 24]。

湍动能 k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

耗散率 ϵ 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \cdot \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

式中: μ_t ——层流黏性系数;

μ_t ——湍流黏性系数;

ρ ——流体密度;

t ——时间;

x_i, x_j ——位移在 i, j 方向的分量;

u_i, u_j ——流体速度在 i, j 方向的分量;

G_k ——层流速度梯度产生的湍流动能;

G_b ——浮力产生的湍流动能;

C_μ ——湍流常数, 取 0.09;

$G_{\partial \epsilon}$ ——湍流扩散率;

σ_k ——湍动能的湍流普朗特数, 取 1.0;

σ_ϵ ——耗散率的湍流普朗特数, 取 1.3;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ ——经验常数, 取 1.44、1.92。

1.5 边界条件设定

烘干机稳定工作时, 物料均匀平铺在内部流水线上, 热气通过外部风机从进风口流送入进气内部风道, 在穿过物料层时进行热交换以实现物料干燥, 同时进出风口温度及风速保持恒定。根据经验数据和试验结果, 确定气流进出口边界条件和风道壁面边界条件。进风口选择速度进口边界条件, 速度设置为 10 m/s; 物料层上表面选择压力出口边界条件作为出口边界。内部风道壁面为固定壁面, 不与外部进行热量交换, 壁面温度与常温环境温度保持一致, 所以壁面边界条件设置为固定壁面且忽略壁面粗糙程度、壁面温度设置为 293 K。

EDEM-Fluent 气固耦合模拟选用 Lagrangian 模型, 气流对固体颗粒的作用选取 Free-stream 模型; 根据 EDEM 与 Fluent 耦合数据传递的时间匹配要求, 玉米颗粒在 EDEM 中的时间步长分别设置为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$, 在 Fluent 中的时间步长分别设置为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$; 根据前期试验效果, 设置入风口风速为 10 m/s, 运行软件并获取玉米颗粒气固耦合仿真结果。

1.6 评价指标

为真实全面地反映模拟仿真后的内部风道流场均匀性情况及气流分布特性, 本文选取了平均速度、气流分布云图和不均匀系数 3 种评价指标。结合 3 种指标

分析,可以精确直接得到内部风道及参数的变化。

1) 平均速度。内部风道各参考面的平均风速大小,反映了其气流强度大小。平均风速越大,越有利于气流在内部风道的流动,滞留在风道内的可能性越小^[25, 26]。

$$\bar{V} = \frac{\sum V_n}{n} \quad (10)$$

式中: $\bar{V}$ ——速度分布的总体均值, m/s;

n ——选取的监测点数;

V_n ——各监测点速度, m/s。

2) 气流分布云图。气流分布云图能够直观地反映出气流的速度、温度、压力等分布情况,通过对气流分布云图的观察和对比,可以挑选出较好的内部风道结构,主要采用速度云图^[26-29]。

3) 速度不均匀系数 M 。为了内部风道各参考面风速分布的均匀性进行客观评价,引入速度不均匀系数 M ^[30-32], 计算如式(11)所示。

$$M = \frac{\sigma}{\bar{V}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: σ ——平均速度标准差。

速度不均匀系数 M 越大,说明风道内部风速分布越不均匀; M 越小,代表风速分布均匀性越好,表明干燥后的产品均匀性或品质会越好。此外,在同一结构不同监测平面的速度不均匀系数 M 越接近,说明风道内部风速分布越相似。

2 网格无关性验证

改进前内部风道网格划分为 108 863、203 291、570 321、1 150 422 和 2 234 706,共 5 种数目进行数值模拟。坐标系位置如图 3(a)所示, Y 方向参考面位置如图 3(b)所示,选取内部风道($X=0, Z=0$)沿 Y 方向,以及选取内部风道($X=0, Y=0$)沿 Z 方向,两个平面上风速分布来表征网格划分数量对热风运动的影响。风道与玉米颗粒的耦合模型如图 3(c)所示,耦合模型气流速度场分布如图 3(d)所示。

不同网格数气流速度分布如图 4 所示,可以看出气流速度在不同位置点趋势相同,但网格数为 108 863 与 203 291 时,在 Y 轴(0.18 m, 0.55 m)间与 Z 轴(0.15 m, 1.5 m)间截面风速与其余 3 种网格相差较大。随网格加密,仿真模拟结果间的截面风速差值逐渐减小。这是由于此处气流波动大和湍流变化较剧烈,引起误差增大。当网格数量增大后模拟速度趋势相同,可以满足仿真要求,选取网格数目为 1 150 422 进行模拟仿真。改进后的风道结构网格无关性验证过程与上述一致,选取网格数目 $1.1 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^6$ 的网格进行仿真。

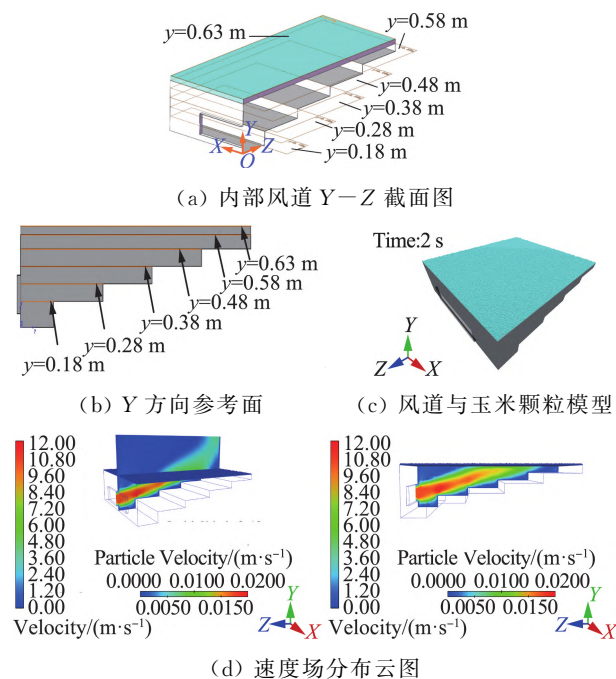


图 3 参考面位置与改进前风道

Fig. 3 Reference surface position and improved front air duct

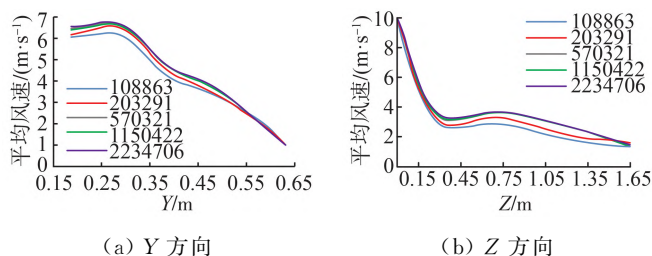


图 4 不同网格数下气流速度分布图

Fig. 4 Distribution of airflow velocities with different mesh number

3 内部风道速度场模拟与分析

如图 5 所示,气流从左侧进风口水平进入,经风道的右侧壁面偏移,沿竖直方向穿过物料流出。在此过程中,气流会产生湍流、回流、滞留等不利于热风流出情况,为此本文通过调节右侧壁面倾斜角度、前后侧壁倾斜角度和阶梯间距优化风道内流场的分布情况。

3.1 五级壁面倾斜角度对速度场的影响

左侧气流接触到右侧壁面会产生回流和湍流,并在右侧壁面五个夹角处会产生部分低流速区,导致热风滞留在风道内。调整内部风道五级壁面倾斜角度可减小回流和低流速区,将倾斜角分别设置为 15° 、 30° 、 45° 、 60° ,并进行仿真测得最佳角度。选取 Y-Z 平面上的两个截面($X=0$ m, $X=0.5$ m)和物料层下表面所处截面($Y=0.58$ m)进行分析。

从图 5(a)~图 5(d)可以看出,气流从左侧进风口进入风道,在惯性作用下一直流动到接触竖直壁面,气流开

始向进风口远端上部和两侧低压区扩散,导致进风口近端上部和阶梯壁面夹角处产生一定范围的低速区。进风口近端上部低速区面积随着倾斜角度增加而增加,这是由壁面倾斜对气流阻碍减小,更多的气流流入进风口远端上部所致。对比图 5(a)~图 5(h)可以看出, $X=0.5$ m 平面比

$X=0$ m 平面气流速度明显减小,最大速度减小至 9 m/s,进风口近端上部低速区面积增加。从图 5(i)~图 5(l)中可以看出,随着倾斜角度增加, $Y=0.58$ m 平面的气流速度提升,两侧低速区域面积减小,中部高速区面积增大。倾斜角为 30° 时,气流高速区面积最大。

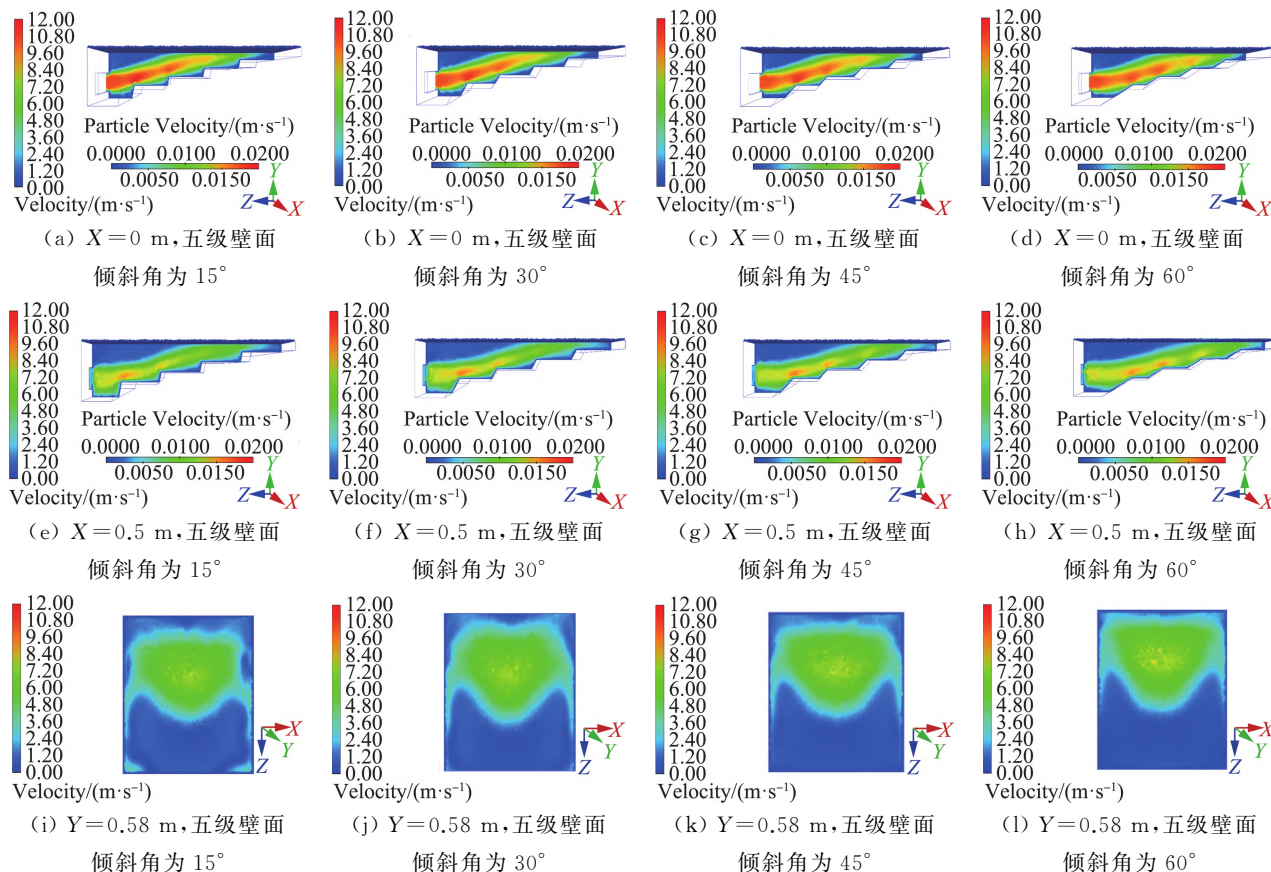


图 5 五级壁面不同倾角速度场分布云图

Fig. 5 Velocity field distribution at different inclinations on the five stage wall

为了更好地表现出风道内气流的均匀分布情况,试验选取 $X-Z$ 平面上的 6 个截面进行分析,基本覆盖了整个风道空间。监测的截面沿 Y 轴方向分布,分别为 $Y=0.18$ m、 $Y=0.28$ m、 $Y=0.38$ m、 $Y=0.48$ m、 $Y=0.58$ m、 $Y=0.63$ m。监测截面各监测点设置如下: X 轴方向布置 35 列, Z 轴方向根据长度分别设置为 5 行、14 行、23 行、32 行、41 行。各监测点间距 50 mm,6 个平面分别选取 175、490、805、1 120、1 435、1 435 个监测点,统计记录各监测面上监测点的速度,计算平均速度和速度不均匀系数。

从图 6(a)可知,壁面倾角为 0° 、 15° 时,在监测面 0.28 m 以下区域,平均速度逐渐增加;在监测面 0.28 m 以上区域,随着监测面的高度增加平均速度逐渐减小。壁面倾角为 30° 、 45° 和 60° 时,平均速度随监测面的高度增加一直减小。由于壁面倾角的作用,使得垂直流向第一级阶梯的气流沿壁面向右上和左下流动,壁面处湍流损耗降低,进风口近端气流平均速度增加;而进风口远

端气流随着壁面倾角增加,平均速度先增大后减小,其中 30° 时平均速度最大。

从图 6(b)可知,原始模型在 0.18 m 和 0.28 m 处不均匀系数最大,随监测面高度增加,不均匀系数整体趋势是减小的,在 0.58 m 处稍有增加。壁面倾角从 0° 增加到 60° ,风道底部不均匀系数逐渐降低,但 0.28 m 以上区域不均匀系数明显增加;即底部气流分布情况改善,但上部均匀性变差。经综合分析,壁面倾角为 30° 时,各监测面不均匀系数较小且平均速度最大,其气流均匀性优于其他方案。

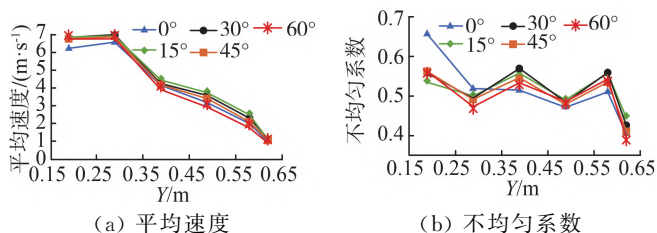


图 6 五级壁面不同倾角时平均速度及不均匀系数

Fig. 6 Distribution of average velocity and unevenness of velocity

3.2 侧壁倾斜角度对速度场的影响

气流从进风口流入风道,从高压区进入低压区,气压减小气流向四周扩散。如图 7 所示,在风道底部低于进风口且没有出风口,左右两侧下部会产生低流速区和湍流,存在热风滞留情况。内部风道侧壁向内倾斜可减小湍流和低流速区,角度调整为 15° 、 30° 、 45° ,侧壁上保留 85 mm 垂直壁面用于安装和固定使用,如图 7 所示。

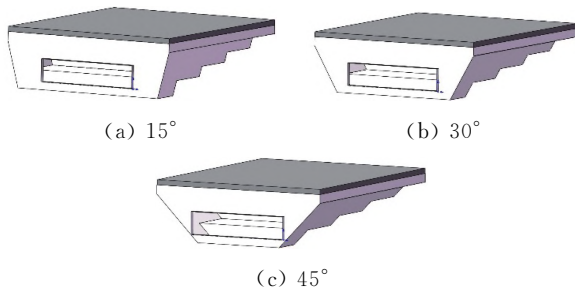


图 7 不同侧壁倾角的内部风道

Fig. 7 Internal air duct with different side wall inclination

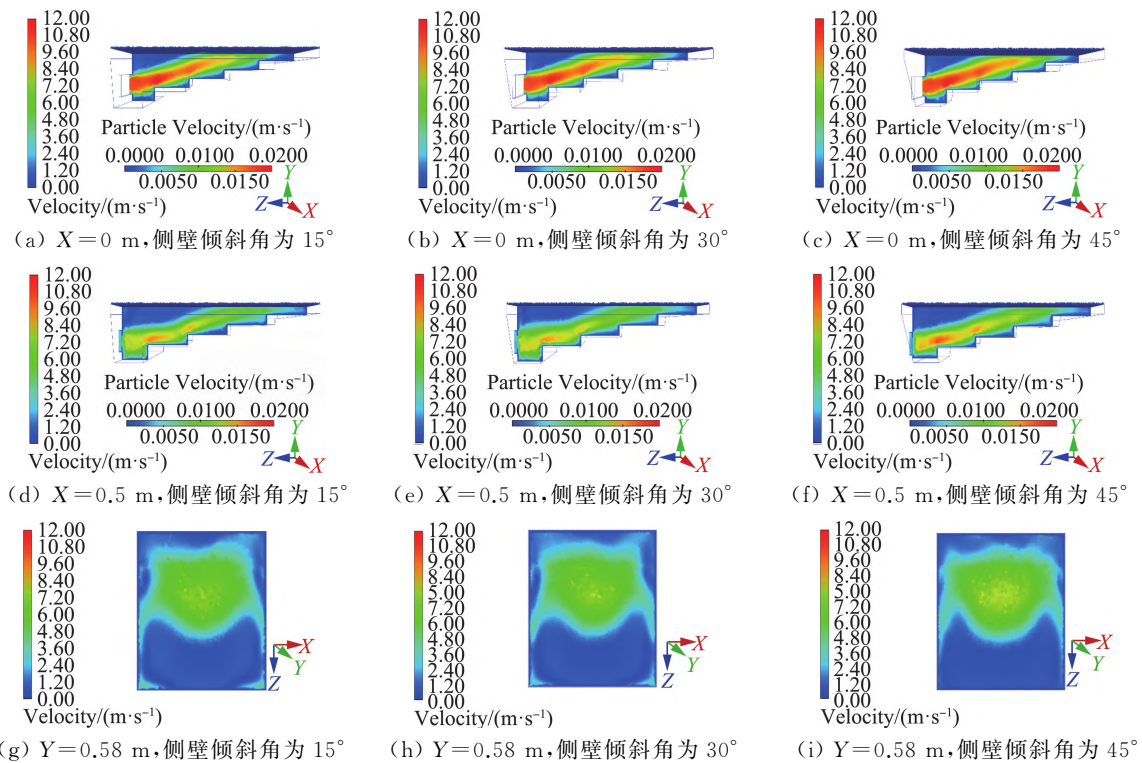


图 8 不同侧壁倾角时速度场分布云图

Fig. 8 Velocity field distribution at different side wall angles

为了更好地表现出风道内气流的均匀分布情况,与 3.1 节一致,试验选取 $Y=0.18$ m、 $Y=0.28$ m、 $Y=0.38$ m、 $Y=0.48$ m、 $Y=0.58$ m、 $Y=0.63$ m, X 轴方向布置 35 列, Z 轴方向根据长度分别设置为 6 行、15 行、24 行、33 行、42 行。各监测点间距 50 mm,6 个平面分别选取 210、525、840、1 155、1 470、1 470 个监测点,计算平均速度和速度不均匀系数。

从图 9(a)可知,侧壁倾角为 15° 、 30° 、 45° 时,随着

选取 $Y-Z$ 平面上的两个截面 ($X=0$ m, $X=0.5$ m) 和物料层下表面所处截面 ($Y=0.58$ m) 进行分析。从图 8(a)~图 8(c)可以看出,随着侧壁角度增加,阶梯壁面低速区面积逐渐减少。对比侧壁角度 15° 、 30° 、 45° 时的速度云图,可以发现角度越大,风道中部气流速度越大。如图 8(d)~图 8(f)所示,随着侧壁角度从 15° 增大到 45° ,风道中部的气流速度同样增加,气流在惯性作用下一直运动到接触竖直壁面,气流才向进风口远端上部和侧壁低压区扩散。侧壁角度 45° 的模型底部空间小,气流更多流向进风口远端,两侧气流量减小,所以进风口近端上部气流低速区比其他两种模型大。从图 8(g)~图 8(i)可以看出,随着侧壁倾斜角度增加,风速 $2\sim 3$ m/s 区域面积减小并向中间集中,风速 $4\sim 7$ m/s 区域显著增加。侧壁角度 45° 速度云图大于 2 m/s 的区域比其他两种模型大于 2 m/s 的区域大,气流更连续集中。通过分析风道内各截面的速度分布云图,设置侧壁倾斜 45° 时气流分布均匀性较好。

监测面的高度增加平均速度逐渐减小。在 0.38 m 和 0.48 m 处,侧壁倾斜 15° 、 30° 模型平均速度小于原模型,其余参考面平均速度均大于原模型。而倾斜 45° 模型平均速度在各参考面均大于其他模型。从图 9(b)可知,监测面在小于 0.38 m 以下区域,改进模型不均匀系数逐渐增加;监测面在大于 0.38 m 区域,改进模型不均匀系数波动减小。由于侧壁倾斜作用,改进模型在 0.28 m 处的气流更加集中,不均匀系数减小;而在

0.38 m 处气流扩散更广,不均匀系数增加。与改进模型对比,原始模型在 0.18 m 和 0.28 m 处不均匀系数最大,在 0.38 m 和 0.58 m 处不均匀系数最小。经综合分析,侧壁倾角为 45°时,各监测面不均匀系数相对较小且平均速度最大,其气流均匀性优于其他方案。

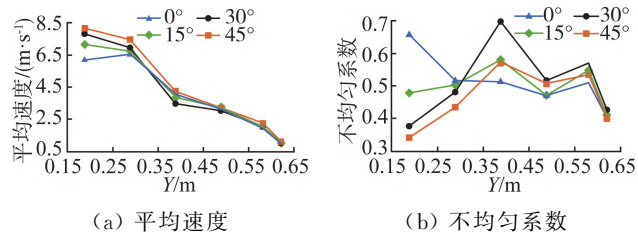


图 9 不同侧壁倾角时平均速度及不均匀系数

Fig. 9 Distribution of average velocity and unevenness of velocity

3.3 阶梯间距对速度场的影响

气流从左侧进风口流入,接触到右侧壁面会产生回流和湍流,适当调整阶梯间距可以减小湍流改善流场分布情况。为方便表述将进风口与最近垂直壁面之间距离记为间距 1,按远离进风口方向将垂直壁面间水平距离依次记为间距 2、间距 3、间距 4、间距 5。根据热风烘干机设计需要,间距 1 与外部结构固定,需要保持 300 mm 不变,间距 2、间距 3、间距 4 和间距 5 的总长度为 1 800 mm。由图 5 和图 8 可知,高流速区靠近进风口远端一侧,适当缩短间距 2 和 3,并适当增加间距 4 和间距 5 可改变高流速区位置。此外缩短间

距 2 和间距 3,可缩小风道前部体积,降低湍流强度和气流动能损失。模型阶梯间距参数设定如表 4 所示,方案五是对照组,增加间距 2 和 3 减小间距 4 和 5。选取 Y—Z 平面上的两个截面($X=0\text{ m}$, $X=0.5\text{ m}$)和物料层下表面所处截面($Y=0.58\text{ m}$)进行分析。

表 4 五种内部风道方案阶梯间距参数
Tab. 4 Step spacing parameters of five internal air duct schemes

项目	方案一(原始)	方案二	方案三	方案四	方案五
间距 1	300	300	300	300	300
间距 2	450	300	350	400	600
间距 3	450	300	400	400	450
间距 4	450	500	450	500	400
间距 5	450	700	600	500	350

从图 10(a)~图 10(h)可知,方案二中进风口近端上部低流速区面积最小,同时高流速区域面积最大且靠近中间。方案五中进风口近端上部低流速区面积最大,气流集中在进风口远端,速度分布不均匀。从图 10(i)~图 10(l)中可以看出,随着间距 2 和间距 3 的增加,高流速区气流速度减小,并逐渐向进风口远端靠近。进风口近端低流速区面积增加,两侧壁面气流速度减小。其中方案二中部气流速度最大,进风口近端低速区分布集中。通过分析风道内各截面的速度分布云图,认为方案二气流分布均匀性较好。

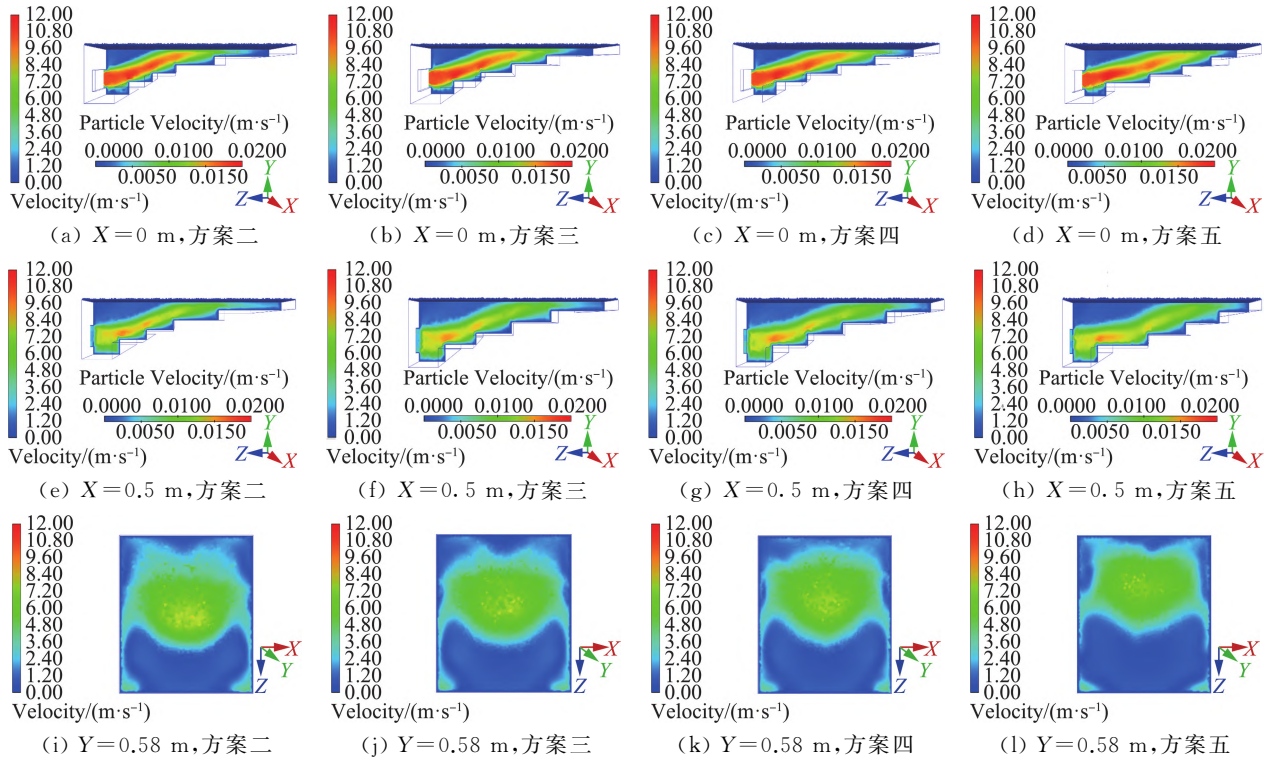


图 10 不同阶梯间距时速度场分布云图

Fig. 10 Velocity field distribution at different step spacing

与 3.1 节一致,试验选取 $Y=0.18\text{ m}$ 、 $Y=0.28\text{ m}$ 、 $Y=0.38\text{ m}$ 、 $Y=0.48\text{ m}$ 、 $Y=0.58\text{ m}$ 、 $Y=0.63\text{ m}$,6 个

截面进行分析,各面分别选取监测点数量如表 5 所示,统计记录各监测面上监测点的速度,计算平均速度和速度不均匀系数。

表 5 五种方案监测点参数

Tab. 5 Monitoring point parameters of five schemes mm

项目	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
Y=0.18 m	175	175	175	175	175
Y=0.28 m	490	385	420	455	595
Y=0.38 m	805	595	700	735	910
Y=0.48 m	1 120	945	1 015	1 085	1 190
Y=0.58 m	1 435	1 435	1 435	1 435	1 435
Y=0.63 m	1 435	1 435	1 435	1 435	1 435

从图 11(a)可知,随着监测面的高度增加,四种改进方案平均速度逐渐减小。方案二、方案三、方案四平均速度情况好于原模型,其中方案二在 0.38 m、0.48 m 和 0.58 m 处平均速度明显大于其他方案;方案五在 0.18 m 和 0.28 m 处速度大于原模型,其余参考面平均速度均小于原模型。

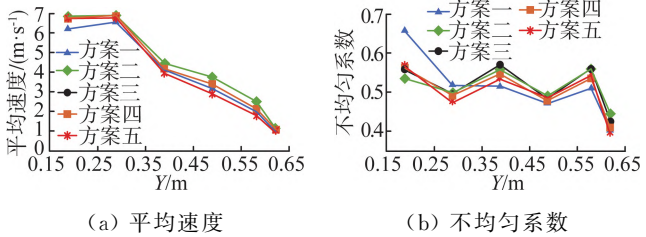


图 11 不同阶梯间距平均速度及不均匀系数
Fig. 11 Distribution of average velocity and unevenness of velocity

从图 11(b)可知,随着监测面的高度增加,四种改进方案不均匀系数在 0.4~0.6 范围内波动。间距 2 和间距 3 越小时,不均匀系数的波动越小,其中方

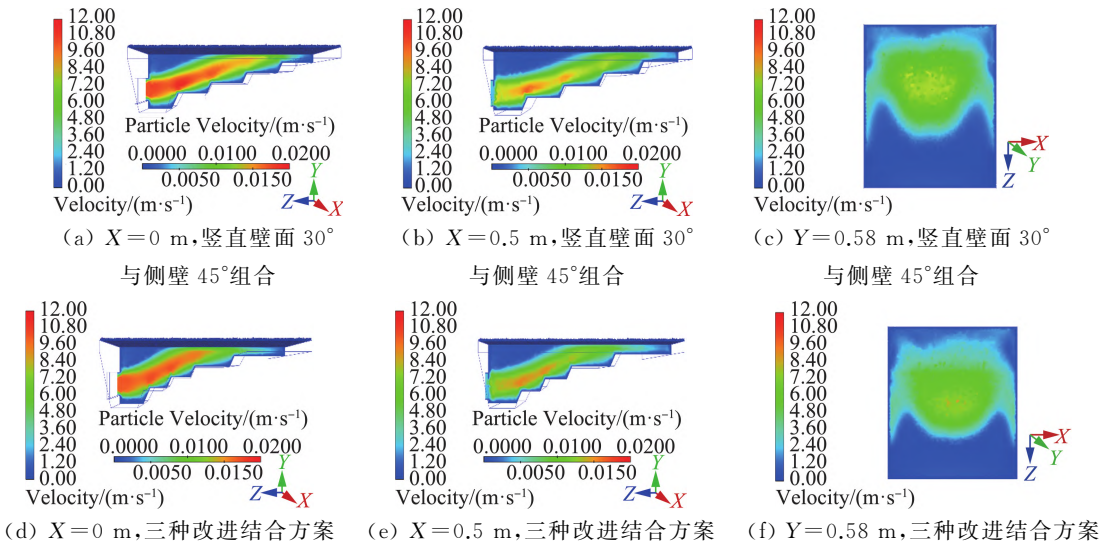


图 12 优化方案速度场分布云图

Fig. 12 Velocity field distribution with the optimized scheme

案五波动最大,方案二波动最小。经综合分析,方案二各监测面不均匀系数波动较小且平均速度最大,其气流均匀性优于其他方案。

3.4 优化方案组合与对比分析

通过调整烘干机内部风道竖直壁面倾斜角度、侧壁倾斜角度和阶梯间距 3 种优化方法进行模拟分析,对比确定了每种优化方法的最佳选择:竖直壁面倾斜角度 30°、侧壁倾斜角度 45°、阶梯间距方案二,上述三种方案气流分布均匀性最佳。为进一步研究优化方法结合效果,先选择竖直壁面倾斜角度 30°和侧壁倾斜角度 45°进行组合设计。在此基础上,结合阶梯间距方案二。

由图 12 可知,两种组合方案在 X=0 m 截面气流分布情况相似,三种改进结合方案在 X=0.5 m 截面气流充分扩散,进风口近端上部和阶梯壁面低速区明显减小,相比于竖直壁面 30°与侧壁 45°组合方案,气流均匀性得到改善。竖直壁面 30°与侧壁 45°组合在 Y=0.58 m 截面气流都集中在进风口远端,三种改进结合方案近端和侧壁边沿区域有低速区面积更小,截面整体气流均匀性更好。

从图 13(a)可知,随着监测面的高度增加,五种方案的平均速度逐渐减小,变化趋势相同,其中三种改进结合方案的平均速度最大。从图 13(b)可知,侧壁 45°和两种组合方案不均匀系数变化趋势相同,阶梯间距和竖直壁面最优方案不均匀系数在 0.4~0.6 之间波动。侧壁 45°对 0.18 m 监测面平均速度和不均匀系数提升明显。三种改进结合方案的不均匀系数除 0.18 m 面外,在其他监测面均为最小,其中 0.38 m 和 0.58 m 明显提升,各监测面气流均匀性有所提升。三种改进结合方案的气流均匀性优于其他四种改进方案,选择三种改进结合方案作为内部风道。

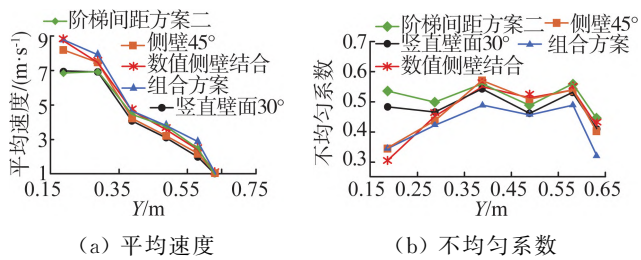


图 13 平均速度及不均匀系数

Fig. 13 Distribution of average velocity and unevenness of velocity

3.5 进风速度对内部风道速度场的影响

每个内部风道外设置一台变频风机,用于输送干

燥热风的和回收干燥后废气。考虑变频风机供气速度大小对内部风道速度场的影响,选择 4 个风速(4 m/s、6 m/s、8 m/s、12 m/s)与原始设置数值 10 m/s 时进行对比分析。选取 Y-Z 平面上的一个截面($X=0$ m)进行分析。

从图 14 可以看出,随着变频风机供气速度的增加,各区域速度均匀性变化不大,进风口近端上部和远端低流速区有所减少。供风速度为 4 m/s、6 m/s 时,阶梯壁面夹角存在低流速区;供风速度为 8 m/s、10 m/s、12 m/s 时,气流分布情况相似,阶梯壁面和进风口远端低流速区明显减小。

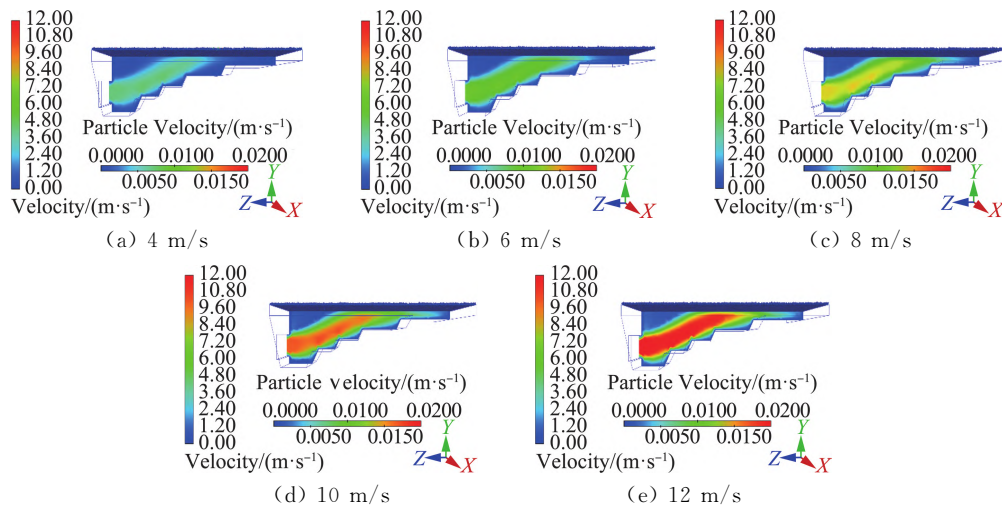


图 14 不同进风速度时速度场分布云图

Fig. 14 Velocity field distribution at different inlet velocity

从图 15(a)可知,变频风机供气速度越大,则各监测面的平均速度越大;在不同供气速度下,各监测面的平均速度变化趋势相同。供气速度为 4 m/s、6 m/s 时,平均速度变化平缓;供气速度为 8 m/s、10 m/s、12 m/s 时,平均速度变化逐步增加,其中在(0.28 m, 0.38 m)波动幅度最大。从图 15(b)可知,供气速度为 4 m/s 时,各监测面不均匀系数均为最大;变频风机供气速度为 6 m/s、8 m/s、10 m/s、12 m/s 时,各监测面的不均匀系数变化趋势相似。

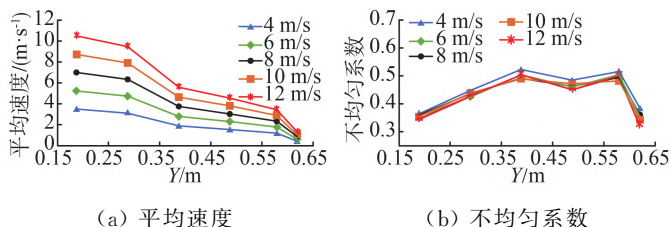


图 15 平均速度及不均匀系数

Fig. 15 Distribution of average velocity and unevenness of velocity

4 结论

利用离散元 EDEM 软件对玉米颗粒建立多物理

模型,并与计算流体力学 FLUENT 软件耦合,对不同风道结构进行模拟分析,完成网格划分及相应边界条件的设定,模拟出气流在烘干单元中的分布情况。初步解决立式多层热风烘干机供气系统实际需要,研究结果为立式多层热风烘干机结构设计优化和后续内部风道改进提供技术指导和理论支持。

1) 在进风速度相同时,改进风道竖直壁面倾斜角度、侧壁倾斜角度和阶梯间距可以提升气流分布均匀性。设置风道竖直壁面倾斜角度 30° 时,风道内气流分布性最好;设置侧壁倾斜角度 45° 时气流分布效果最好;阶梯间距 1 至间距 5 分别设置为 300 mm、300 mm、300 mm、500 mm、700 mm 时,气体流动性最好。

2) 在进风口面积相同时,风道竖直壁面倾斜角度、侧壁倾斜角度和阶梯间距组合方案的气流均匀性优于三种单一改进方案,风道内气流流动强度提升明显,气流均匀性有很大改善。

3) 风机供气速度为 8~12 m/s 时,在此速度区间各截面分布情况最为接近、不均匀系数波动幅度最小,进入物料层的气流分布相对均匀,同时气压适中保证气流穿过且不会吹飞物料。

参 考 文 献

- [1] 张学杰. 我国蔬菜及其加工出口产业发展状况与对策[J]. 中国蔬菜, 2018(8): 1—7.
- [2] 侯瑞明, 吕利贞. 脱水蔬菜的干制方法及其控制分析[J]. 农产品加工, 2017(24): 59—61.
- [3] 王益强. 热泵干燥技术在脱水蔬菜加工中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2016(9): 114—115.
- [4] 姜财勇, 程云, 杨亚男. 脱水果蔬产业现状及发展前景[J]. 现代食品, 2019(12): 48—50.
- [5] 于洋, 卢宇, 李若兰. 基于 FLUENT 的烘干机参数优化[J]. 机床与液压, 2019, 47(13): 140—143.
- [6] 心男. 基于 EDEM—FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [7] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM—Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69—77.
Wen Xiangyu, Jia Honglei, Zhang Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM—Fluent coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69—77.
- [8] 吴昊, 夏俊芳, 张国忠, 等. 基于 EDEM—Fluent 仿真的自旋射流式挖藕机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 9—14.
Wu Hao, Xia Junfang, Zhang Guozhong, et al. Design and experiment of spin-jet flow type lotus root digging machine based on EDEM—Fluent [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 9—14.
- [9] 李立伟, 孟志军, 王晓鸥, 等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 171—180.
Li Liwei, Meng Zhijun, Wang Xiaoou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 171—180.
- [10] 杨凯, 高俊明, 李浩. 茶叶烘干机干燥过程数学模型的建立[J]. 福建茶叶, 2016, 38(11): 11—12.
- [11] 霍二光. 菊花烘干室内气流组织模拟与优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [12] 刘道奇, 范传辉, 董慧锋, 等. 基于 Fluent 的负压式电加热干燥机内部流场分析与机构参数优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 94—98.
Liu Daoqi, Fan Chuanhui, Dong Huifeng, et al. Analysis of internal flow field and optimization of mechanism parameters of negative pressure electric heating dryer based on Fluent [J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 94—98.
- [13] 牟国良, 张学军, 史增录. 结合 Fluent 仿真软件的循环式干燥机改进设计研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(4): 684—689.
Mou Guoliang, Zhang Xuejun, Shi Zenglu. Improved design of circulating dryer based on Fluent [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(4): 684—689.
- [14] 牟国良, 张学军, 史增录, 等. 红枣干燥设备的流场仿真研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 157—161.
Mou Guoliang, Zhang Xuejun, Shi Zenglu, et al. A numerical simulation of drying equipment on jujube fruit [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, 49(6): 157—161.
- [15] Demissie P, Hayelom M, Asfaw A K, et al. Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 1128—1134.
- [16] Amanlou Y, Zomorodian A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(1): 8—15.
- [17] Chhanwal N, Anishparvin A, D Indrani, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 452—460.
- [18] 张克平, 侯传凯, 孙步功, 等. 收获期豌豆籽粒离散元仿真参数标定[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 286—294.
Zhang Keping, Hou Chuankai, Sun Bugong, et al. Discrete element simulation parameter calibration of pea grains at harvest time [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 286—294.
- [19] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36—42.
Wang Yunxia, Liang Zhijie, Zhang Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 36—42.
- [20] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 69—77.
Zhang Rongfang, Zhou Jilei, Liu Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 53(S1): 69—77.
- [21] 周海玲. 玉米果穗物理力学性质研究及脱粒过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Zhou Hailing. The physical and mechanical property research of corn ears and simulated analysis of corn threshing progress [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [22] 赵丹华, 李国琳. 基于 Fluent 的玉米烘干塔内温度仿真研究[J]. 农业与技术, 2015, 35(17): 38—40.
Zhao Danhua, Li Guolin. Simulation of temperature in corn drying tower based on Fluent [J]. Agriculture and Technology, 2015, 35(17): 38—40.

(下转第 147 页)

- 2020, 32(2): 82—90.
- [15] 王晓婷, 赵展, 王阳, 等. 基于改进 Mask R—CNN 的植物表型智能检测算法[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 151—157.
Wang Xiaoting, Zhao Zhan, Wang Yang, et al. Intelligent detection algorithm of plant phenotype based on improved Mask R—CNN [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 151—157.
- [16] 吴昊昱. 基于小样本学习的自然场景图像中茶叶病害识别[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [17] 余胜, 谢莉. 基于迁移学习和卷积视觉转换器的农作物病害识别研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8): 191—197.
Yu Sheng, Xie Li. Research on plant disease identification based on transfer learning and convolutional vision transformer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 191—197.
- [18] 孙肖肖. 基于深度学习的茶叶嫩芽检测和叶部病害图像识别研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [19] 项小东, 翟蔚, 黄言态, 等. 基于 Xception—CEMs 神经网络的植物病害识别[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 177—186.
Xiang Xiaodong, Zhai Wei, Huang Yantai, et al. Plant disease recognition based on Xception—CEMs neural network [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 177—186.
- [20] 周晓丽, 周立军, 伊力塔, 等. 基于光谱图像的森林病虫害自动检测方法[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 420—426.
- [21] 王美华, 吴振鑫, 周祖光. 基于注意力改进 CBAM 的农作物病虫害细粒度识别研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 239—247.
Wang Meihua, Wu Zhenxin, Zhou Zuguang. Fine-grained identification research of crop pests and diseases based on improved CBAM via attention [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 239—247.
- [22] 胡根生, 吴继甜, 鲍文霞, 等. 基于改进 YOLOv5 网络的复杂背景图像中茶尺蠖检测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 191—198.
Hu Gensheng, Wu Jitian, Bao Wenxia, et al. Detection of *Ectropia ciliaris* in complex background images using improved YOLOv5 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 191—198.
- [23] 陈继清, 韦德鹏, 龙腾, 等. 基于卷积神经网络的害虫分类[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11): 188—194.
Chen Jiqing, Wei Depeng, Long Teng, et al. Pest classification based on convolutional neural network [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11): 188—194.
- [24] 温长吉, 王启锐, 陈洪锐, 等. 面向大规模多类别的病虫害识别模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 169—177.
Weng Changji, Wang Qirui, Chen Hongrui, et al. Model for the recognition of large-scale multi-class diseases and pests [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8): 169—177.
- (上接第 126 页)
- [23] 孙帮成, 李明高, 李明, 等. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [24] 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, 2007.
- [25] 李若兰. 空气能热风式枸杞烘干机流场均匀性模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
Li Ruolan. Simulating study on flow field hot-air lycium barbarum dryer [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [26] Menasria F, Zedairia M, Moummi A. Numerical study of thermohydraulic performance of solar air heater duct equipped with novel continuous rectangular baffles with high aspect ratio [J]. Energy, 2017, 133(15): 593—608.
- [27] 任海伟, 李金平, 刘增光, 等. 太阳能干燥室内部气流场分布 CFD 数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 235—238.
Ren Haiwei, Li Jinping, Liu Zengguang. Numerical simulation of airflow fields in solar drying chamber by CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 235—238.
- [28] Romero V M, Cerezo E, Garcia M I, et al. Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program [C]. ISES Biennial Solar World Congress, 2014.
- [29] 吕豪, 吕黄珍, 王雷, 等. 微波—热风振动流化床干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 344—351, 248.
Lü Hao, Lü Huangzhen, Wang Lei, et al. Design and experiment of microwave-hot-airflow vibrating dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 344—351, 248.
- [30] 闫一野, 陈海峰, 张士玺. 基于 Fluent 的木材压干窑风速均匀性数值模拟 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(2): 151—154.
Yan Yiye, Chen Haifeng, Zhang Shixi. Numerical simulation of wind velocity homogeneity in wood press-drying kiln based on Fluent [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(2): 151—154.
- [31] 张志伟, 刘建军. 各种湍流模型在 FLUENT 中的应用[J]. 河北水利, 2008(10): 25—26.
- [32] 王振文, 吴敏, 徐新民, 等. 热泵烘房结构及参数优化仿真设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 464—475.
Wang Zhenwen, Wu Min, Xu Xinmin, et al. Optimal simulation design of structure and parameter in heat pump drying room [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 464—475.