

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.08.017

谭均, 王教领, 王子轩, 等. 导流板对青花椒堆积式烘干烘房内流场均匀性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(8): 186-200.

导流板对青花椒堆积式烘干烘房 内流场均匀性的影响

谭均¹, 王教领², 王子轩¹, 刘恩谷¹,
黄园园¹, 杨明金¹, 杨玲¹, 蒲应俊¹

1. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室/西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;
2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014

摘要: 烘房内流场均匀性对青花椒烘干品质和能效提升具有重要影响。该文基于 Realizable k-ε 湍流模型和匀风板多孔跃升边界条件构建青花椒堆积式烘干烘房三维模型, 并对三维模型网格无关性和模型可靠性进行验证。以导流板角度、导流板位置和导流板长度为试验因子, 通过单因素试验确定 BBD(Box-Behnken Design) 试验因子水平, 并通过方差分析得到各试验因子的影响程度, 通过回归分析得到导流板最优参数。以原始烘房为对照, 通过空载和加载试验得到导流板对青花椒堆积式烘干烘房内流场均匀性的定量评价。结果表明: 建立的烘房三维模型具有较高的可靠性, 空载和加载时监测截面基于模拟风速和实测风速的速度不均匀系数平均相对误差分别为 3.65% 和 2.09%; 导流板参数对烘房内速度不均匀系数影响显著性由大到小依次为导流板角度(极显著)、导流板长度(显著)、导流板位置(显著), 导流板最优参数为导流板角度 86.01°、导流板位置 924.75 mm、导流板长度 855.51 mm; 导流板使烘房上部烘干区域形成 2 个子区间, 有利于烘干区域流场均匀性提高; 与原始烘房相比, 优化烘房在空载和加载时的速度不均匀系数分别降低 39.2%, 20.1%, 烘房内流场均匀性得到较大提升。

关 键 词: 堆积式烘干; 流场均匀性; 导流板; BBD 试验;
优化; 青花椒

中图分类号: TV854

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2023)08-0186-15



Effect of Deflector on Flow Field Uniformity of Stack Drying Chamber for Green Sichuan Pepper

TAN Jun¹, WANG Jiaoling², WANG Zixuan¹, LIU Engu¹,
HUANG Yuanyuan¹, YANG Mingjin¹, YANG Ling¹, PU Yingjun¹

收稿日期: 2022-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301575); 农业农村部现代农业装备重点实验室开放基金课题(ht20200705); 重庆市教育委员会项目(kjcx2020002; cys22217).

作者简介: 谭均, 硕士研究生, 主要从事机械设计与理论研究.

通信作者: 杨玲, 教授.

1. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions / College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

Abstract: The flow field uniformity of drying chamber has an important influence on the drying quality of green Sichuan pepper and energy efficiency. Based on Realizable k- ϵ Turbulence Model and uniform plate Porous Jump boundary condition, a 3D model of green Sichuan pepper stack drying chamber was constructed, and the mesh independence and reliability of the 3D model were verified. The angle, position and length of the deflector were taken as the test factors. The levels of BBD (Box-Behnken design) test factors were determined by the single factor test. The significance of the influence of test factors was obtained by analysis of variance. The optimal parameters of the deflector were obtained by regression analysis. With the original drying chamber as the control, the flow field uniformity of the drying chamber with deflector was quantitatively evaluated through no-load and load tests. The results showed that the established 3D model of the drying chamber had high reliability. The average relative errors of the velocity non-uniformity coefficients based on the simulated air speed and the measured air speed on the monitoring section under no-load and load were 3.65% and 2.09%, respectively. The influence of deflector parameters on the velocity non-uniformity coefficients in the drying chamber was: angle (particularly significant) > length (significant) > position (significant). The optimal parameters of the deflector were the angle of 86.01°, position of 924.75 mm, and length of 855.51 mm. The deflector helped the upper drying area of the drying chamber to form two sub-regions, which was beneficial to improve the flow field uniformity in the drying area. Compared with the original drying chamber, the velocity non-uniformity coefficients of the optimized drying chamber under no-load and load decreased by 39.2% and 20.1%, respectively. The flow field uniformity of the drying chamber was greatly improved.

Key words: stack drying; flow field uniformity; deflector; BBD test; optimization; green Sichuan pepper

青花椒 *Zanthoxylum schinifolium* 为芸香科植物, 是十分重要的经济作物^[1]。青花椒是我国调味调料品的重要来源, 且有药用价值, 广泛种植于四川、重庆、云南、贵州等地^[2]。近年来, 随着农业产业结构调整, 其种植面积不断扩大^[3]。新鲜青花椒含水率高, 在储存和运输过程中容易因霉烂、褐变而使品质降低。对青花椒进行烘干处理可降低其含水率、延长储存时间、提升经济价值^[4]。传统堆积式烘干采用挖坑并结合砖砌构建烘房, 坑部形成高度为 400~500 mm 的匀风室, 上部堆积厚度为 1.2~1.5 cm 带枝花椒或净椒, 烘房上部敞开或以麻袋覆盖, 热源多为燃煤式热风炉, 能耗高、污染重、安全性差, 属于需淘汰的落后生产工艺装备。采用空气能热泵作为替代热源, 用工业绝热板材制成闭式烘房, 自动控制水分排出, 具有能效高、环境友好、安全性好、控制方便等优点, 逐渐成为青花椒烘干领域的研究热点^[5]。烘房内流场均匀性决定了烘干速率、烘干品质和能耗。国内外研究人员借助 CFD(Computational Fluid Dynamics)对烘房内流场均匀性进行了相关研究, 主要集中在改进烘房结构、增设辅助匀风装置两方面。陈忠加等^[6]、牛天宝等^[7]探究了不同送风回风方式对烘房内部温度、速度均匀性的影响; 师建芳等^[8]、张健平^[9]探究了烘房入口处不同风机数量对烘房内流场均匀性的影响; 龚中良等^[10]、代建武等^[11]通过改变出风孔径、排列方式等来优化其内部流场; 刘瑞等^[12]针对气体射流冲击干燥机气流分配室提出了 3 种不同的优化结构; Wang 等^[13]通过在烘房进风口处安装引风罩优化烘房内流场分布; Song 等^[14]研究了入口气流速度、人口直径、隔板数量对西洋参干燥室内气流和温度分布的影响。学者们还探究了烘房内不同形状、不同数量的导流板对其内部流场均匀性的影响^[15-20]; 王鹏浩^[21]探究了排风速度、导流板角度、导流板位置对空载和加载工况烘房内流场的影响; 陈竹筠^[22]探究了不同间距的格栅对热泵型海带烘房内气流的影响。综上可知, 烘房结构及导流板的设置都会影响其流场均匀性。

本文针对青花椒空气能热泵烘干装备, 采用数值研究和实验研究相结合的手段, 探讨导流板对青花椒

堆积式烘干烘房内流场均匀性的影响, 基于 BBD 试验和统计分析优化了导流板尺寸和工作参数, 可为青花椒高品质绿色烘干工艺及烘房设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器设备

材料: 青花椒(九叶青), 2022 年 6 月购于重庆市璧山区; 细食用盐, 用于密度法测量孔隙率。

仪器设备: 5HGKB-4 型空气能热泵烘干机(自制); WD412 型风速传感器(杭州且远科技有限公司); FBS-760A 型卤素水分测定仪(厦门市弗布斯检测设备有限公司); BSA224S-CW 型电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司); 烧杯、量筒若干。

1.2 方法

1.2.1 孔隙率测量和烘房加载

新鲜青花椒含水率为 67.54%, 鲜果直径 5.5 mm。参考文献[23]采用密度法测量孔隙率, 如图 1 所示。青花椒堆积密度和真实密度分别为 641.79 kg/m^3 和 961.59 kg/m^3 , 计算得到青花椒孔隙率为 33.0%。烘房加载方式如图 2 所示, 装载厚度为 30 mm。



图 1 孔隙率测量



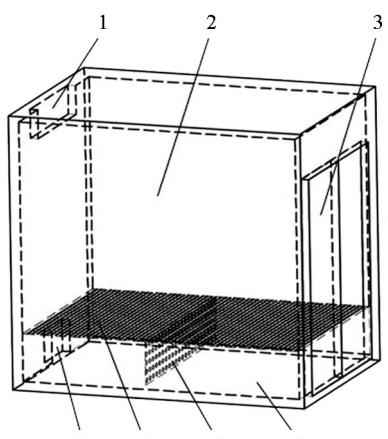
图 2 烘房加载

1.2.2 仿真模型建立

空气能热泵烘干机外形如图 3 所示, 其烘房由出风口、烘干区、门、匀风室、导流板、匀风板、进风口等组成, 如图 4 所示。采用 SolidWorks 建立烘房三维模型, 主要尺寸参数为: 内腔长宽高 $1800 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$; 进风口 $330 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$; 出风口 $700 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$; 匀风板 $1800 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$; 匀风板孔径 3 mm、厚度 3 mm、孔隙率 18.1%; 匀风室高度 330 mm; 门尺寸 $1100 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ (模型中当作墙面)。导流板尺寸根据实验方案确定。



图 3 空气能热泵烘干机外形



1. 出风口; 2. 烘干区; 3. 门; 4. 匀风室;
5. 导流板; 6. 匀风板; 7. 进风口

图 4 烘房结构

建模时, 为便于数值模拟和实验验证, 进行如下处理: ① 不考虑烘房壁厚, 绝热壁面; ② 不考虑匀风板厚度, 并设置无厚度多孔跃升边界条件^[24]; ③ 干燥介质空气视为不可压缩理想气体^[25]。

采用无厚度多孔跃升边界条件, 可避免考虑匀风板上约 6 万个孔径为 3 mm 小孔带来的计算资源消耗问题。30 mm 装载厚度属于深床干燥范畴, 可考察堆积式烘干在一定装载量条件下的烘房流场均匀性。

采用 ICEM(International Council for Educational Media)软件对烘房三维模型进行非结构网格划分, 如图 5 所示。为保证计算精度, 进风口、出风口、匀风板及物料层的网格密度大于壁面。空载烘房网格数量为 2.67×10^6 , 加载烘房网格数量为 2.8×10^6 。在进行网格无关性和模型可靠性验证时未考虑导流板; 在进行单因素试验和 BBD 试验时, 考虑导流板(图 6)。试验导流板参数包括导流板角度 θ 、导流板位置 S 、导流板长度 L 。固定导流板其他参数, 包括宽度 300 mm、孔径 15 mm、孔间距 60 mm、厚度 1 mm。

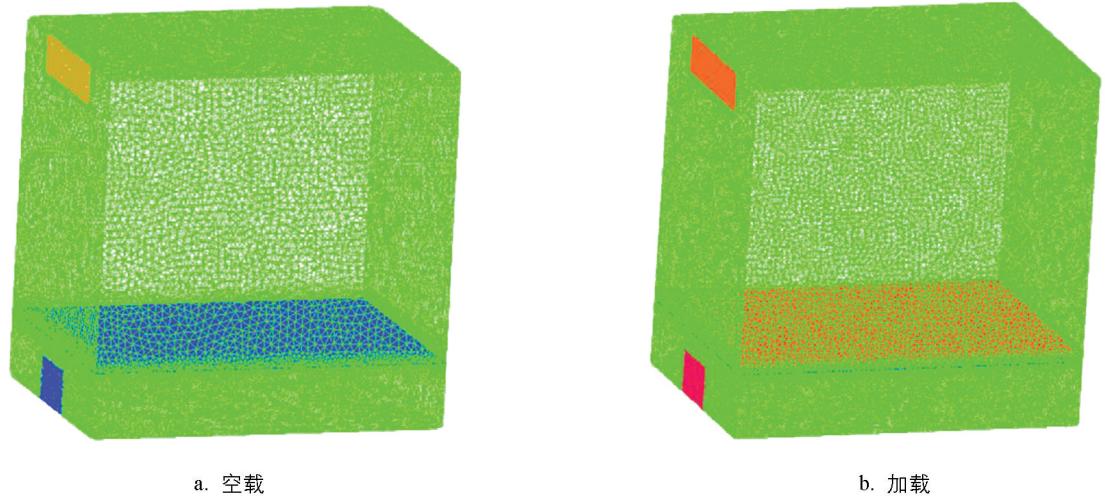


图 5 烘房三维模型网格划分

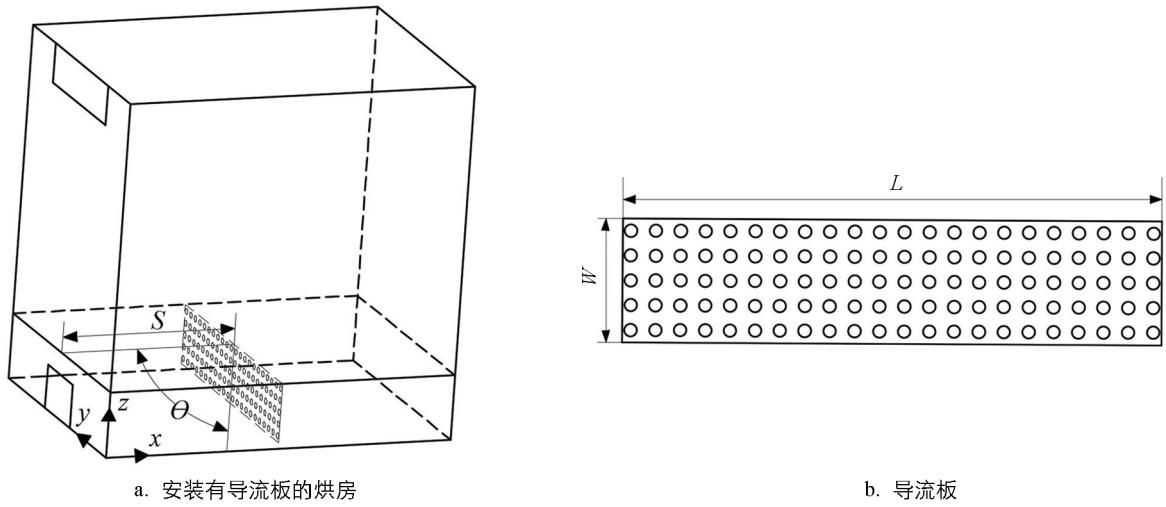


图 6 导流板安装及结构

烘房边界条件及参数设置见表 1。进风口选择速度入口, 其大小由风速传感器测量得到; 出风口选择压力出口; 参考文献[27]计算入口、出口湍流强度及水力直径; 匀风板选择多孔跃升^[25]; 物料层设置为多孔介质, 参考文献[24]方法测量孔隙率、黏性阻力系数及惯性阻力系数; 烘房其他部分选择无滑移绝热壁面边界条件。

表 1 边界条件及参数

边界条件	参数	边界条件	参数
入口速度/(m·s ⁻¹)	10	匀风板孔隙率/%	18.1
入口温度/℃	50	匀风板黏性阻力系数/m ⁻²	1.9×10 ⁹
入口湍流强度/%	3.6	匀风板渗透率/m ²	5.3×10 ⁻¹⁰
入口水力直径/mm	264.0	匀风板惯性损失系数/m ⁻¹	1.6×10 ⁵
出口压力/Pa	101 325.0	青花椒孔隙率/%	33.0
出口湍流强度/%	3.7	青花椒黏性阻力系数/m ⁻²	6.2×10 ⁷
出口水力直径/mm	310.0	青花椒惯性阻力系数/m ⁻¹	11 864.0

采用 Ansys Fluent 软件对三维模型求解, 选择 Realizable k-ε 湍流模型及 SIMPLE 算法。压强设置为标准大气压, 在竖直方向重力加速度设置为 -9.81 m/s², 采用混合初始化方式, 收敛精度设置为 1×10⁻⁴。Realizable k-ε 模型中湍动能 k 和扩散率 ϵ 的方程分别为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (1)$$

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

式(1)、式(2)中, ρ 为密度, kg/m³; μ 为层流黏性系数, Pa·s; μ_t 为湍流黏性系数, Pa·s; x_i, x_j 分别为位移在 i, j 方向上的分量, m; G_k 为层流速度梯度产生的湍流动能, m²/s²; G_b 为浮力产生的湍流动能, m²/s²; C_{1g}, C_{2g}, C_{3g} 为湍流经验常数; σ_k 为湍动能的湍流普朗特常数; σ_ϵ 为耗散率的湍流普朗特常数。模型参数设置同文献[22]。

1.2.3 试验方法

通过单因素试验分析导流板角度、导流板位置和导流板长度对烘房内流场及流场均匀性的影响, 并确定 BBD 试验因子水平。通过 BBD 试验确定各试验因子的影响程度, 并优化导流板尺寸和工作参数。表 2 为单因素试验安排, 试验号 5, 8, 15 具有相同的因子组合, 仅试验 1 组。表 3 为 BBD 试验因子水平。

表 2 单因素试验安排

试验号	导流板角度 $\theta/^\circ$	导流板位置 S/mm	导流板长度 L/mm
1	30	900	1 300
2	45		
3	60		
4	75		
5	90		
6	90	500	1 300
7		700	
8		900	
9		1 100	
10		1 300	
11	90	900	500
12			700
13			900
14			1 100
15			1 300

表 3 BBD 试验因子水平

水平	因子		
	导流板角度 $\theta/^\circ$	导流板位置 S/mm	导流板长度 L/mm
1	60	700	700
2	75	900	900
3	90	1 100	1 100

1.2.4 评价指标

根据速度云图和速度不均匀系数评价烘房流场均匀性。

速度不均匀系数为监测平面上观测点速度均方差与平均速度的比值^[26], 可表达为:

$$M = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, M 为速度不均匀系数; σ 为速度均方差, m/s ; \bar{V} 为平均速度, m/s ; N 为观测点数量; V_i 为观测点速度, m/s 。速度不均匀系数越小, 表明该平面上的速度分布越均匀。

实测时, 选取 3 个监测平面, 其 z 坐标分别为 600 mm、1 000 mm、1 400 mm, 每个平面选取 9 个观测点, 选取位置从平面中心向 x 和 y 方向双向展开, x 方向间距为 400 mm, y 方向间距为 250 mm, 即 x 方向布置 3 行, y 方向布置 3 列。 x, y, z 坐标设置见图 6。测量时, 每个观测点测量 3 组数据, 每组数据 100 次重复。仿真时, 选取 5 个监测平面, 其 z 分别为 600 mm、800 mm、1 000 mm、1 200 mm、1 400 mm, 每个平面选取 377 个观测点, 选取位置从平面中心向 x 和 y 方向双向展开, x 方向间距为 60 mm, y 方向间距为 100 mm, 即 x 方向布置 29 行, y 方向布置 13 列。

2 结果与分析

2.1 网格无关性及模型可靠性验证

选择不同网格划分策略改变网格大小, 得到 1 598 302, 2 369 430, 2 665 263, 4 001 428 共 4 种网格数目进行网格无关性验证。空载时在烘房坐标系中 y 和 z 分别为 1 000 mm 的两个平面交线上, 验证不同网格划分策略下风速随 x 坐标位置的变化情况, 如图 7 所示。由图 7 可知, 不同的网格划分策略风速随 x 坐标位置变化趋势基本相同, 当网格数目为 2 665 263 时, 增加网格数目对风速变化影响很小。因此, 为了减少计算量, 采用网格数目为 2 665 263 的网格划分策略进行后续数值研究。

分别选取 z 坐标为 600 mm、1 000 mm、

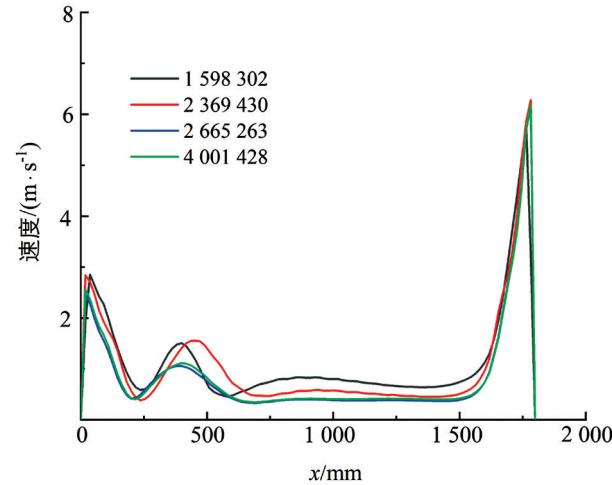


图 7 网格数目对风速的影响

1 400 mm 3 个平面上的风速进行模型可靠性验证。空载时 3 个平面各观测点风速模拟值和实验值数据见表 4。3 个平面风速模拟值和实验值相对误差的平均值分别为 5.87%, 5.78%, 7.38%。根据各观测点风速数据, 可以计算出 3 个平面上基于模拟风速和实测风速的速度不均匀系数, 如图 8a 所示。3 个平面上模拟风速的速度不均匀系数分别为 0.48, 0.61, 0.58, 实测风速的速度不均匀系数分别为 0.46, 0.6, 0.61, 其相对误差分别为 4.35%, 1.67%, 4.92%, 平均为 3.65%。加载时, 3 个平面各观测点风速模拟值和实验值数据见表 5。3 个平面风速模拟值和实验值相对误差的平均值分别为 9.87%, 9.24%, 9.16%。3 个平面上基于模拟风速和实测风速的速度不均匀系数, 如图 8b 所示。3 个平面上模拟风速的速度不均匀系数分别为 0.42, 0.87, 0.67, 实测风速的速度不均匀系数分别为 0.41, 0.85, 0.68, 其相对误差分别为 2.44%, 2.35%,

1.47%，平均为 2.09%。风速和速度不均匀系数的试验和仿真结果表明，本文建立的仿真模型可靠性高，可用于后续相关研究。

表 4 模型可靠性验证(空载)

监测点	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%
		模拟值	实测值			模拟值	实测值			模拟值	实测值	
1	600	0.18	0.17	5.88	1 000	0.34	0.31	9.68	1 400	0.36	0.40	10.00
2		0.43	0.46	6.52		0.33	0.36	8.33		0.47	0.44	6.82
3		0.40	0.44	9.09		0.45	0.49	8.16		0.66	0.64	3.13
4		0.66	0.70	5.71		1.08	1.12	3.57		1.26	1.16	8.62
5		1.10	1.07	2.80		1.83	1.92	4.69		1.83	2.03	9.85
6		1.06	1.11	4.50		1.64	1.67	1.80		1.56	1.47	6.12
7		0.35	0.37	5.41		0.37	0.40	7.50		0.23	0.25	8.00
8		0.73	0.76	3.95		0.90	0.96	6.25		0.72	0.66	9.09
9		0.71	0.78	8.97		0.99	0.97	2.06		1.09	1.04	4.81
				5.87				5.78				7.38
				(平均值)				(平均值)				(平均值)

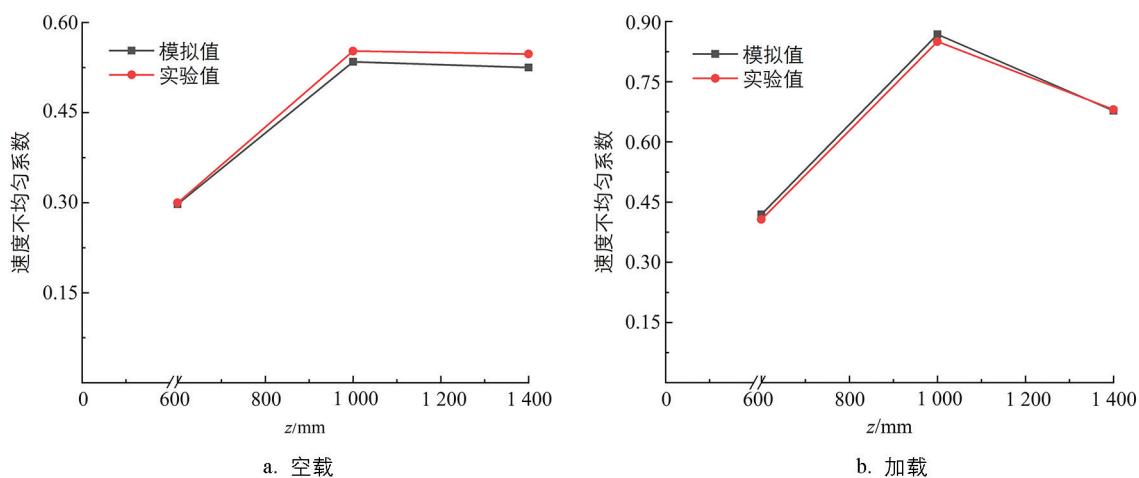


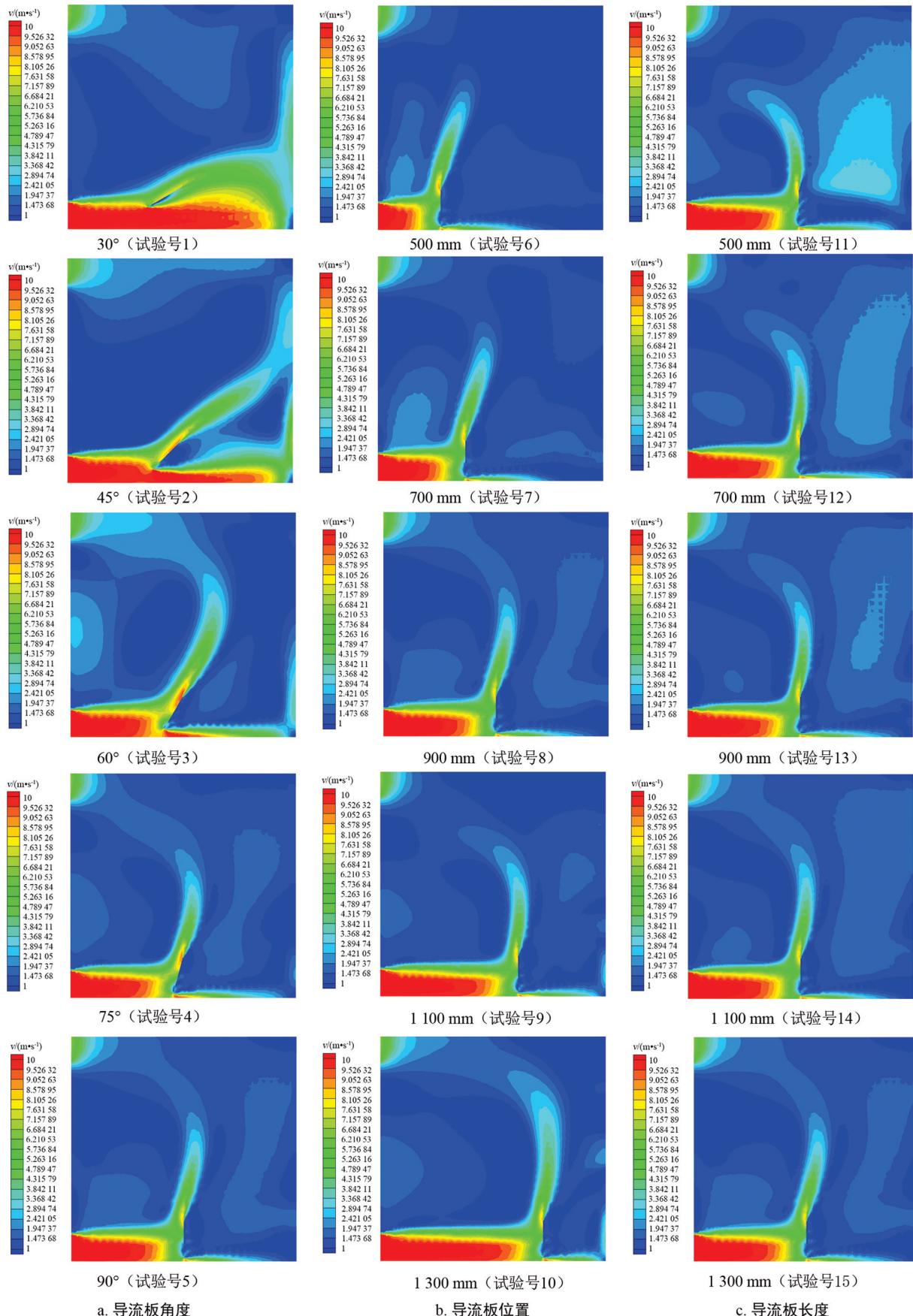
图 8 监测平面速度不均匀系数

表 5 模型可靠性验证(加载)

监测点	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%	坐标/ mm	风速/(m·s ⁻¹)		相对误差/%
		模拟值	实测值			模拟值	实测值			模拟值	实测值	
1	600	0.10	0.12	16.67	1 000	0.12	0.11	9.09	1 400	0.23	0.21	9.52
2		0.08	0.09	11.11		0.57	0.61	6.56		0.77	0.71	8.45
3		0.12	0.11	9.09		0.11	0.12	8.33		0.25	0.24	4.17
4		0.18	0.21	14.29		0.13	0.15	13.33		0.14	0.12	16.67
5		0.28	0.31	9.68		0.81	0.87	6.90		0.90	0.85	5.88
6		0.18	0.17	5.88		0.15	0.14	7.14		0.16	0.18	11.11
7		0.23	0.25	8.00		0.12	0.13	7.69		0.27	0.29	6.90
8		0.34	0.33	3.03		0.78	0.72	8.33		0.78	0.81	3.70
9		0.24	0.27	11.11		0.16	0.19	15.79		0.29	0.25	16.00
				9.87				9.24				9.16
				(平均值)				(平均值)				(平均值)

2.2 单因素试验

图 9 和图 10 分别为单因素试验风速的速度云图和速度不均匀系数影响图。

图9 单因素试验速度云图($y=650$ mm竖直面)

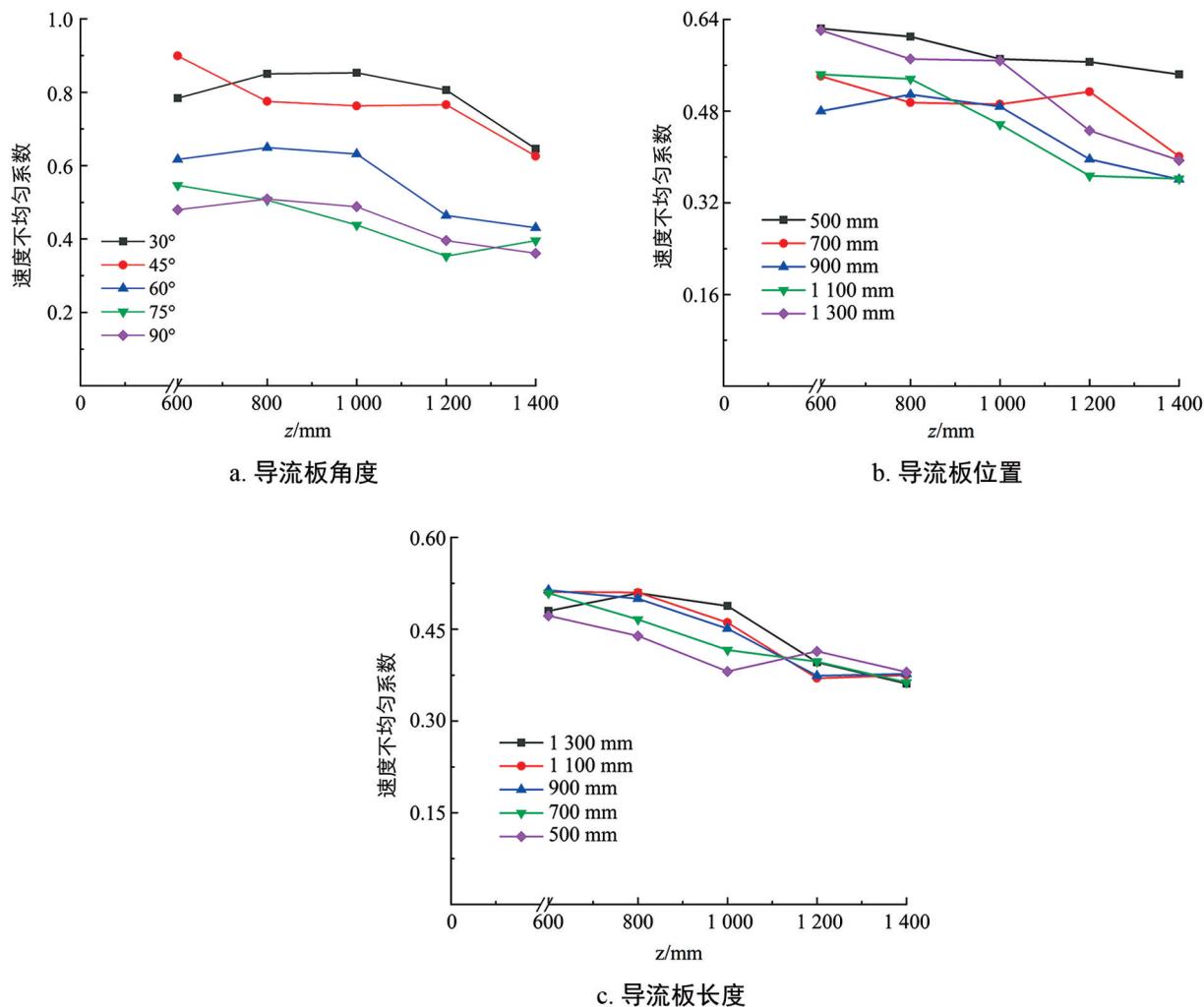


图 10 单因素试验速度不均匀系数

随着导流板角度增大, 导流板对进风口高速流动气流的挡风效果增强, 一部分气流流向烘干区, 能够很大程度地避免匀风室内高速流体直接流向右侧(门侧), 然后经上部空间直接回流出风口(图 9a). 与导流板角度 $30^\circ, 45^\circ$ 相比, 导流板角度为 $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时的速度不均匀系数更低(图 10a). 因此, 选定导流板角度为 $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 进行后续 BBD 试验.

随着导流板位置的改变, 导流板对进风口高速流动气流沿烘房空间分布作用明显, 导流板太靠近进风口(如位置 500 mm 处)或太靠近右侧(如位置 1300 mm 处)都不利于流场均匀性的提高. 导流板太靠近进风口, 在右侧上方区域形成低速区; 导流板太靠近右侧, 在烘房中心区域形成低速区(图 9b). 与导流板位置 500 mm、1300 mm 相比, 导流板位置为 700 mm、900 mm、1100 mm 时的速度不均匀系数更低(图 10b). 因此, 选定导流板位置为 700 mm、900 mm、1100 mm 进行后续 BBD 试验.

随着导流板长度的增加, 导流板对进风口高速流动气流的挡风效果增强, 使经导流板两侧流向烘房右侧的气流减少, 速度云图均匀性降低(图 9c). 与导流板长度 1100 mm、1300 mm 相比, 导流板长度为 500 mm、700 mm、900 mm 时的速度不均匀系数更低(图 10c). 但是, 当监测平面高度增大到 1200 mm 后, 导流板长度为 500 mm 时的速度不均匀系数较大, 且监测平面平均速度较低. 综合考虑, 选定导流板长度为 700 mm、900 mm、1100 mm 进行后续 BBD 试验.

2.3 BBD 试验

使用 Design-Expert 12 中的 Box-Behnken 模块, 以导流板角度、导流板位置和导流板长度作为试验因子, 以 $z=1000$ mm 平面上的速度不均匀系数为响应值, 设计 3 因子 3 水平 BBD 试验. 表 6 为 BBD 试验设计与结果, 表 7 为 BBD 试验方差分析.

表 6 BBD 试验设计与结果

试验号	导流板角度	导流板位置	导流板长度	速度不均匀系数
1	1	2	3	0.623 5
2	1	3	2	0.661 2
3	3	2	3	0.460 6
4	2	1	3	0.528 2
5	2	2	2	0.410 3
6	2	2	2	0.421 1
7	3	2	1	0.408 3
8	2	3	1	0.533 1
9	2	3	3	0.554 7
10	1	1	2	0.554 7
11	2	1	1	0.490 6
12	3	3	2	0.435 5
13	1	2	1	0.601 6
14	2	2	2	0.414 2
15	3	1	2	0.495 8

表 7 BBD 试验方差分析

来源	平方和	自由度	F 值	p 值	显著性
模型	0.093 9	9	65.74	0.000 1	* *
A	0.051 3	1	323.33	<0.000 1	* *
B	0.001 7	1	10.45	0.023 1	*
C	0.002 2	1	14.01	0.013 4	*
AB	0.007 0	1	43.81	0.001 2	* *
AC	0.000 2	1	1.46	0.281 6	
BC	0.000 1	1	0.4032	0.553 4	
A^2	0.013 0	1	81.58	0.000 3	* *
B^2	0.014 4	1	90.49	0.000 2	* *
C^2	0.008 9	1	56.02	0.000 7	* *
残差	0.000 8	5	—	—	
失拟项	0.000 7	3	8.18	0.110 9	
误差	0.000 1	2	—	—	
	0.094 7	14	—	—	

注: *, ** 分别表示 $p < 5\%$, $p < 1\%$ 水平差异具有统计学意义。A, B, C 分别为 θ, S, L 的水平值。

由统计分析可知, A, AB, A^2 , B^2 和 C^2 对速度不均匀系数影响极具有统计学意义, B, C 对速度不均匀系数影响具有统计学意义($p < 5\%$), 其他项对速度不均匀系数影响不具有统计学意义。各单因素对速度不均匀系数影响从大到小依次为导流板角度、导流板长度、导流板位置。

对表 7 中数据进行回归拟合, 剔除不具有统计学意义项, 得到二次回归方程:

$$\begin{aligned}
 M = & 0.4152 - 0.0801A + 0.0144B + 0.0167C - 0.0417AB + \\
 & 0.0592A^2 + 0.0624B^2 + 0.0491C^2
 \end{aligned} \quad (5)$$

回归模型 $F=65.74>F_{0.05}=6.94$, $p=0.0001<0.05$, 说明模型具有高的显著性; 整体模型失拟项 $p=0.1109>0.01$, 说明模型具有很高的可信度; 回归方程的决定系数 $R^2=0.9916$, 调整系数 $R_{Adj}^2=0.9765$, 说明回归方程的预测值和实验值拟合良好, 即该模型能够较好地预测试验结果.

图 11 为速度不均匀系数交互作用响应面图. 随着导流板角度及导流板与进风口距离增大, 速度不均匀系数呈现出先减小后缓慢增加的趋势, 导流板角度 90°、导流板位置 900~1 000 mm 区间具有较低的速度不均匀系数(图 11a); 随着导流板与进风口距离及导流板长度增大, 速度不均匀系数呈现出先缓慢减小的后缓慢增加的趋势, 导流板长度 900 mm、导流板位置 900 mm 区域具有较低的速度不均匀系数(图 11b). 图 11c 所示, 较低速度不均匀系数对应导流板角度与导流板长度参数与图 11a 和图 11b 一致.

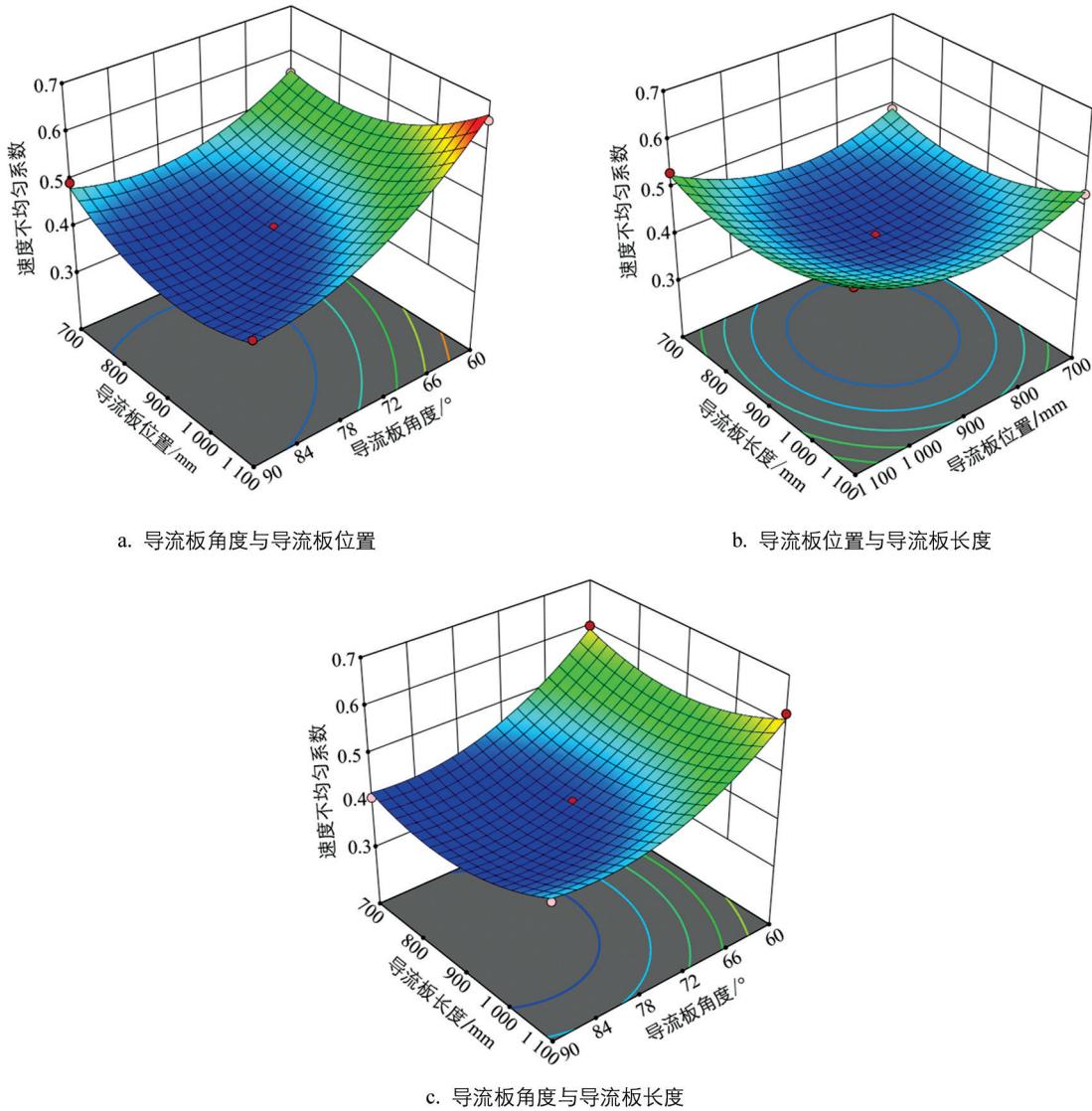


图 11 速度不均匀系数交互作用响应面

2.4 烘房优化

根据 BBD 试验回归方程, 以速度不均匀系数最小为目标, 得到最优点流板参数为导流板角度 86.01°、导流板位置 924.75 mm、导流板长度 855.51 mm. 此时, $z=1 000$ mm 平面上的速度不均匀系数预测值为 0.3849. 根据导流板最优参数, 建立基于 CFD 的烘房三维模型并求解, 可以得到不同平面上的速度不均

匀系数模拟值。其中, $z=1000\text{ mm}$ 平面上的速度不均匀系数模拟值为 0.3887。预测值与模拟值之间的相对误差为 0.98%。分别选取 z 为 600 mm、1 000 mm、1 400 mm 3 个平面上的风速进行仿真与试验对比。优化烘房空载时, 3 个平面各观测点风速模拟值和实验值数据见表 8。3 个平面风速模拟值和实验值相对误差的平均值分别为 6.03%, 6.43%, 9.08%。优化烘房加载时, 3 个平面各观测点风速模拟值和实验值数据见表 9。3 个平面风速模拟值和实验值相对误差的平均值分别为 9.98%, 8.70%, 6.83%。因此, 该仿真结果与烘房内部实际结果相近, 可用于探究烘房内部的流场变化。

表 8 优化烘房仿真与试验结果对照(空载)

监测点	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%
	模拟值	实测值	模拟值	实测值		模拟值	实测值	模拟值	实测值		模拟值	实测值	模拟值	实测值	
1	600	1.03	1.12	8.04	1 000	0.47	0.43	9.30	1 400	0.14	0.16	12.50			
2		1.24	1.28	3.13		0.53	0.57	7.01		0.18	0.20	10.00			
3		1.04	0.6	8.33		0.50	0.47	6.38		0.16	0.14	14.29			
4		3.8	3.63	4.68		1.51	1.62	6.79		0.43	0.47	8.51			
5		4.3	4.41	2.49		1.79	1.71	4.68		0.30	0.33	9.09			
6		3.78	3.58	5.59		1.57	1.44	9.03		0.51	0.48	6.25			
7		0.59	0.54	9.26		0.80	0.86	6.98		0.68	0.61	11.48			
8		0.32	0.34	5.88		0.71	0.74	4.05		0.77	0.74	4.05			
9		0.62	0.58	6.90		0.86	0.83	3.61		0.76	0.72	5.56			
				6.03				6.43				9.08			
				(平均值)				(平均值)				(平均值)			

表 9 优化烘房仿真与试验结果对照(加载)

监测点	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%	坐标/ mm		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误 差/%
	模拟值	实测值	模拟值	实测值		模拟值	实测值	模拟值	实测值		模拟值	实测值	模拟值	实测值	
1	600	0.15	0.13	15.38	1 000	0.11	0.10	10.00	1 400	0.64	0.59	8.47			
2		0.35	0.31	12.90		0.17	0.18	5.56		0.28	0.31	9.68			
3		0.23	0.24	4.17		0.13	0.11	18.18		0.56	0.53	5.66			
4		1.92	2.04	5.88		1.58	1.67	5.39		0.64	0.67	4.48			
5		2.81	2.85	4.75		2.34	2.41	2.90		0.90	0.99	9.09			
6		1.95	1.87	4.28		1.67	1.74	4.02		0.65	0.62	4.84			
7		0.07	0.08	12.50		0.10	0.11	9.09		0.27	0.28	3.57			
8		0.15	0.17	11.76		0.41	0.45	8.89		0.47	0.50	6.00			
9		0.09	0.11	18.18		0.12	0.14	14.29		0.28	0.31	9.68			
				9.98				8.70				6.83			
				(平均值)				(平均值)				(平均值)			

根据导流板最优参数, 建立烘房三维模型, 按照前述方法求解得到优化烘房流场速度云图, 并与相同参数原始烘房(未安装导流板)进行比较, 如图 12 所示。监测优化烘房和原始烘房截面高度 600 mm、800 mm、1 000 mm、1 200 mm、1 400 mm 各观测点风速, 从而得到各水平面上的速度不均匀系数(表 10), 并绘出速度不均匀系数随监测高度的变化曲线, 如图 13 所示。

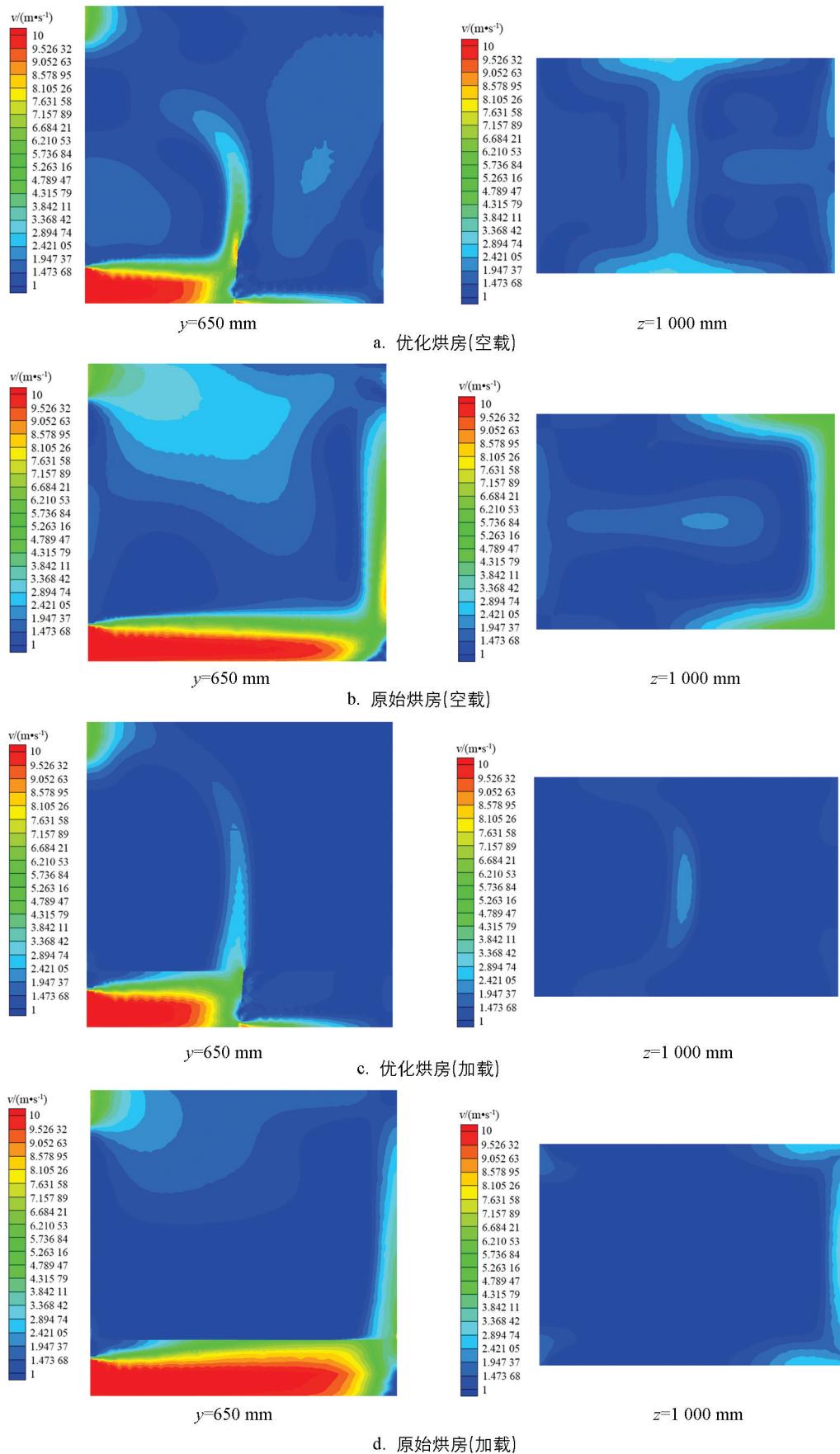


图 12 优化烘房和原始烘房速度云图

表 10 烘房流场均匀性指标

截面高度 / mm	速度不均匀系数			
	优化烘房(空载)	优化烘房(加载)	原始烘房(空载)	原始烘房(加载)
600	0.493 7	0.607 9	0.894 1	0.983 7
800	0.468 1	0.628 7	0.790 9	0.949 9
1 000	0.388 7	0.603 6	0.719 9	0.760 6
1 200	0.403 6	0.591 2	0.652 6	0.625 5
1 400	0.384 5	0.483 1	0.521 2	0.518 5

由图 12 可知, 优化烘房流场受到导流板的作用, 其上部烘干区域形成 2 个子区间, 有利于烘干区域流场均匀性的提高, 烘房加载后其流场均匀性有所降低。由表 10 和图 13 可知, 与原始烘房相比, 优化烘房(空载)各截面高度平均速度不均匀系数降低 39.2%, 优化烘房(加载)各截面高度平均速度不均匀系数降低 20.1%, 烘房内流场均匀性得到较大提高。

3 结论

1) 基于 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型和匀风板多孔跃升边界条件的烘房三维模型, 对青花椒堆积式烘干流场及均匀性具有较高的可靠性。空载和加载时监测截面上基于模拟风速和实测风速的速度不均匀系数平均相对误差分别为 3.65% 和 2.09%。

2) 导流板参数对烘房内速度不均匀系数的影响从大到小依次为导流板角度、导流板长度、导流板位置。以速度不均匀系数最小为目标, 导流板最优参数为导流板角度 86.01°、导流板位置 924.75 mm、导流板长度 855.51 mm。

3) 导流板使烘房上部烘干区域形成 2 个子区间, 有利于烘干区域流场均匀性的提高。与原始烘房相比, 优化烘房(空载)速度不均匀系数降低 39.2%, 优化烘房(加载)速度不均匀系数降低 20.1%, 烘房内流场均匀性得到较大提高。

参考文献:

- [1] 李瑞, 武逸凡, 李守太, 等. 基于 ANSYS Workbench 和 ADAMS 的振动式花椒采摘机仿真分析及参数优化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(12): 57-66.
- [2] 田冰, 王玲, 彭林, 等. 多指标综合评分法优化青花椒热泵-微波联合干燥工艺 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 149-155.
- [3] 杨林生, 杨敏, 彭清, 等. 重庆市九叶青花椒施肥现状评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 61-68.
- [4] 代建武, 付琪其, 黄欢, 等. 青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 279-287.
- [5] 李国建, 崔蕴涵, 吴爽, 等. 热泵烘干房流场 Fluent 建模与仿真分析 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(3): 425-432.
- [6] BABU A K, KUMARESAN G, ANTONY AROUL RAJ V, et al. CFD Studies on Different Configurations of Drying Chamber for Thin-Layer Drying of Leaves [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020, 42(18): 2227-2239.

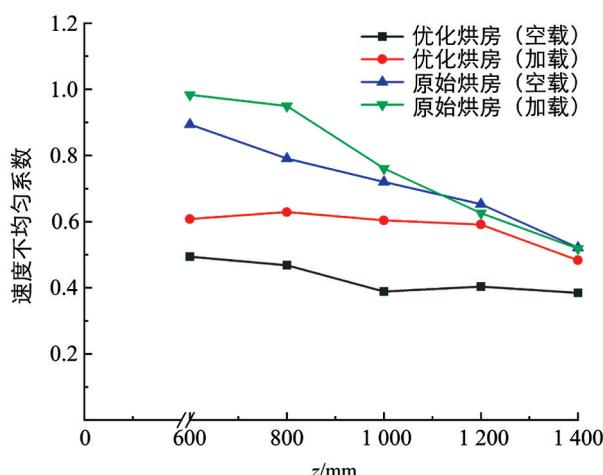


图 13 烘房速度不均匀系数

- [6] 陈忠加, 雷雯雯, 王青春. 基于温度和速度均匀性的侧送风烘房设计及仿真 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 18-26.
- [7] 牛天宝, 朱云, 王琼, 等. 三七烤房两向循环仿真研究 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(12): 185-189.
- [8] 师建芳, 吴中华, 刘清, 等. 不同进风方案下隧道烘干窑热风流场 CFD 模拟和优化 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 315-321.
- [9] 张健平. 油菜籽流化床干燥传热传质特性与布风板结构参数优化的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [10] 龚中良, 王鹏凯, 李大鹏, 等. 多温区网带式干燥机热流场分析与结构优化 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 40-47.
- [11] 代建武, 肖红伟, 白竣文, 等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 69-76, 295.
- [12] 刘瑞, 董继先, 王栋, 等. 菊花热风烘房的流场模拟及结构优化 [J]. 机械设计, 2021, 38(1): 47-54.
- [13] WANG P, LIU G H, AO S M, et al. Numerical Investigation of Airflow and Heat Transfer Characteristics and Optimal Design of the American Ginseng Drying Room [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 115885.
- [14] SONG M, KIM K, YOON H K. Numerical Study of the Enhancement of Flow Uniformity in a Tray Dryer Chamber [J]. New & Renewable Energy, 2016, 12(3): 68-73.
- [15] LUO W J, LIN C Y, WU N F, et al. Performance Enhancement of a Sludge Continuous Feed Heat Pump Drying System by Air Deflectors and Auxiliary Cooling Subsystems [J]. Energies, 2020, 13(24): 51-66.
- [16] DANIELA S O V A, BOGDAN B E D E L E A N. Performance Assessment of a Laboratory Drying Kiln Designed with and without Baffles [J]. Pro Ligno, 2012, 8(2): 89-99.
- [17] 张金徽. 基于太阳能热泵联合干燥甜叶菊系统设计与干燥室仿真 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2019.
- [18] SHAMSUDDEEN M M, CHA D A, KIM S C, et al. Effects of Decompression Condition and Temperature on Drying Rate in a Hybrid Heat Pump Decompression Type Dryer Used for Seafood Drying [J]. Drying Technology, 2021, 39(15): 2130-2144.
- [19] 张杨, 吴哲, 曹军. 基于计算流体力学的木材干燥窑内三维流场的数值模拟 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(12): 135-140.
- [20] 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.
- [21] 王鹏浩. 海带干燥特性及热泵烘干室气流组织研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [22] 陈竹筠. 玉米顺流干燥箱体内流场的数值分析与结构优化 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- [23] 郜玉聪. 低温闭式循环污泥干化设备烘房风场基础数值模拟研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [24] 金莎, 沈惬意, 孙大明, 等. 基于 CFD 方法的孔板送风气流组织优化研究 [J]. 低温工程, 2015(1): 23-28.
- [25] 李赫, 张志, 任源, 等. 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析 [J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 133-138.

责任编辑 夏娟