

带式气体射流冲击干燥机设计 及干燥性能试验研究

刘鑫汉¹ 巨浩羽¹ 张卫鹏² 耿亚慧¹ 苗欢¹ 侯丽媛¹

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061;

2. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048)

摘要:[目的]针对现有的气体射流冲击干燥机干燥品质不均匀、装载量较小、无法实现连续干燥的问题,设计一种新型带式气体射流冲击干燥机,以提升干燥设备的实用性和干燥效果。[方法]带式气体射流冲击干燥机主要由气流分配室、干燥腔室、离心风机、温控系统、传动系统等组成,可以根据不同的物料调整传送带速度、气流温度及风速;通过 Fluent 软件对不同喷嘴直径的气流分配室及添加不同格栅尺寸的均风板进行模拟;以马铃薯片为物料进行设备干燥性能试验并与传统热风干燥设备进行对比分析。[结果]直径为 20 mm 的喷嘴在气流分配中效果更好;在气流分配室内添加均风板后,8 mm×680 mm 格栅尺寸的均风板效果更佳,速度不均匀系数从 34.74% 降至 8.54%,最大速度偏差比从 36.08% 降至 15.45%;与热风干燥相比,带式气体射流冲击干燥机的干燥时间缩短 42.51%,干燥速率提升 254%,干燥效率显著提高。[结论]带式气体射流冲击干燥机可显著提升干燥均匀性与干燥效率。

关键词:网带式干燥机;气体射流冲击;干燥性能;流体仿真;热敏性物料

Design and experimental study on drying performance of a belt-type gas jet impingement dryer

Liu Xinhan¹ Ju Haoyu¹ Zhang Weipeng² Geng Yahui¹ Miao Huan¹ Hou Liyuan¹

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

2. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of uneven product quality, limited loading capacity, and the inability to achieve continuous drying in existing gas jet impingement dryers, a novel belt-type gas jet impingement dryer is designed to enhance the practicality and drying performance of the equipment. [Methods] The belt-type gas jet impingement dryer mainly consists of an airflow distribution chamber, a drying chamber, a centrifugal fan, a temperature control system, and a transmission system. The conveyor belt speed, airflow temperature, and air velocity can be adjusted according to the different materials. Simulations are conducted using Fluent software for airflow distribution chambers with different nozzle diameters and with the addition of flow-equalizing plates of varying grid sizes. Drying performance experiments are carried out using potato slices as the material, and the results are compared with those of conventional hot air drying equipment. [Results] A nozzle diameter of 20 mm achieves superior performance in airflow distribution. After incorporating a flow-equalizing plate into the airflow distribution chamber, the plate with an 8 mm×680 mm grid size yields the best results, reducing the velocity non-uniformity coefficient from 34.74% to 8.54% and the maximum velocity deviation ratio from 36.08% to 15.45%. Compared with a hot air dryer, the belt-type gas jet impingement dryer shortens the drying time by 42.51%, increases the drying rate by 254%, and significantly improves the drying efficiency. [Conclusion] The belt-type gas jet impingement dryer can significantly improve drying

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:32202233);河北省高等学校科学技术研究项目(编号:BJK2023047)

通信作者:巨浩羽(1989—),男,河北经贸大学副教授,博士。E-mail:ju56238@163.com

收稿日期:2025-12-31 **改回日期:**2026-05-25

引用格式:刘鑫汉,巨浩羽,张卫鹏,等. 带式气体射流冲击干燥机设计及干燥性能试验研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 94-102.

Citation: Liu Xinhan, Ju Haoyu, Zhang Weipeng, et al. Design and experimental study on drying performance of a belt-type gas jet impingement dryer[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 94-102.

uniformity and efficiency.

Keywords: mesh belt-type dryer; gas jet impingement; drying performance; fluid simulation; heat-sensitive material

气体射流冲击干燥技术(AJID)是一种将具有一定压力和温度的气体通过圆形或狭缝形喷嘴直接喷射至待干燥物料表面,利用喷嘴形成的高温高速气流与物料表面发生冲击,实现高效传热和传质的干燥方式^[1]。与传统热风干燥相比,该技术具有传热效率高、干燥速率快、受热时间短等优点^[2],已被广泛应用于中药材、果蔬、农产品及海产品加工等领域^[3-7]。

目前,现有气体射流冲击干燥机主要包括转筒式、脉动式、转盘式、倾斜料盘式及狭缝型气体射流冲击干燥机,但现有的干燥机多为封闭式箱体结构,物料需要分批干燥,无法实现连续化加工^[8-9]。姚雪东等^[10]设计了一种转筒式气体射流冲击干燥机,并将其应用于干燥披碱草种子,该设备适用于颗粒状物料,但物料在转筒内受热不均匀。王丽红等^[11]设计了一种脉动式气体射流冲击干燥机,提高了圣女果的干燥均匀性,但由于其脉动干燥的特性导致设备能耗较高。于贤龙等^[12]设计了一种苜蓿狭缝型气体射流冲击管,并借助Fluent数值模拟优化射流结构,降低了气体射流速度的变异系数。带式干燥机因其能够满足大批量、连续化干燥生产的需求,具有生产效率高、产品质量稳定等优点^[13-14],在连续化干燥工艺中具有显著优势,被广泛应用于农产品加工领域。闫鹤馨^[15]设计了一种网带式花生干燥机,并通过物理建模与数值模拟对各功能单元结构进行优化,有效提升了花生荚果的干燥效率和产品品质。刘斌^[16]设计了一种小型红外带式干燥机并成功应用于甘蓝型油菜籽干燥。

为避免传统“设计—制造—试验—再设计”反复迭代所带来的低效率问题,越来越多学者引入计算流体力学(CFD)方法,对气体射流冲击干燥设备中的气流分配室、干燥腔体及喷嘴结构等进行数值模拟与优化研究^[17-18]。Zhang等^[19]建立了一种新型带式干燥机模型,采用CFD分析了5种不同进料厚度下的气流分布,当进料厚度为40 mm时,进料表面气流速度的均匀性可以达到最佳效果。Silesi等^[20]采用计算流体动力学(CFD)方法分析了干燥空气在瞬态下的流动行为,发现使用垂直配风通道可以通过提高干燥空气分布的均匀性来改善干燥过程。于洋等^[21]利用Fluent软件模拟仿真并进行试验验证,对换热参数进行优化,发现热水入口流速0.18 m/s,流道高度22 mm,流道宽度35 mm,换热板间距85 mm条件下换热参数最佳。

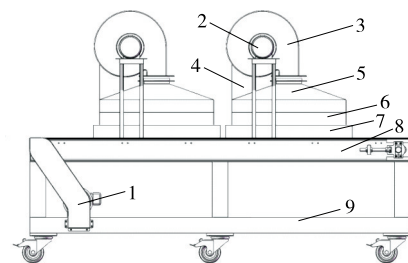
针对现有气体射流冲击干燥设备普遍存在装载量较小、干燥产品品质不均匀、难以实现连续化和规模化生产等问题,试验拟设计一种新型带式气体射流冲击干燥机。采用Anasys Fluent软件对气流分配室进行流体模拟,通

过改变喷嘴尺寸并设计添加一块均风板对气流分配室进行优化设计,以改善设备内部气流分布的均匀性并提升整体干燥效率。最后,以马铃薯片为试验物料进行干燥试验验证设备可行性,为气体射流冲击干燥设备的应用和发展提供依据。

1 整机结构

1.1 设备结构

带式气体射流干燥设备主体结构如图1所示,主要由控制系统、传动系统、加热系统、离心风机、进回风管道、气流分配室、干燥腔室、底部支架构成。



1. 传动电机 2. 离心风机 3. 进风管道 4. 回风管道 5. 气流分配室 6. 喷管组 7. 干燥腔室 8. 传送带 9. 底部支架

图1 带式气体射流冲击设备结构

Figure 1 Structure of the belt-type gas jet impingement dryer

1.2 工作原理

空气经离心风机由进风管道流经加热管送入气流分配室,经过加热管的热空气在气流分配室内分配到各个喷嘴冲击料盘上的物料,使物料在短时间内迅速升温达到干燥或熟化效果,物料放入料盘后由传送带从左侧进入物料室,经过高温气流冲击干燥后,从右侧取出。气流垂直向下喷射物料后可以在底板进行反射,使干燥接触面更大,提高干燥效率。喷管组两侧设有回风管路,与离心风机的进风口连接,可以将喷射出的热气流回收循环利用,减少热量损失,提高热干燥效率,降低能耗。该干燥机可以根据不同物料的干燥特性设置不同的带速、气流温度和风速。与现有的传统气体射流冲击干燥机相比,该干燥机可以灵活调整物料选择合适的传送带速度进行连续化批量加工,提高生产效率。

1.3 主要工作参数

带式气体射流冲击干燥机整机长、宽、高分别为2 500, 800, 1 700 mm,干燥室容积为0.064 m³,装载物料的水平不锈钢托盘尺寸为250 mm×250 mm×30 mm,气流温度为20~200 ℃可调,传送带速度为0~0.025 m/s可调,离心风机风速为0~12 m/s可调,总设备电功率为

12 kW。

2 关键部件设计与选型

2.1 气流分配室

气流分配室由进风口、分配腔室、出风喷管组 3 部分组成,空气经过离心风机、加热管加热后进入气流分配室,在分配腔室内被分配到多个长圆形喷嘴喷出,喷射到料盘上对物料进行干燥,如图 2 所示。气流分配室进风口位于气流分配室居中正上方,入口尺寸为 160 mm×120 mm,气流经进风口向下喷射;气流分配室模型上半部分为倒漏斗状结构,下半部分为长方体结构,下端尺寸为 720 mm×340 mm;出口喷管组采用矩阵式排列与上方的分配腔室连接。

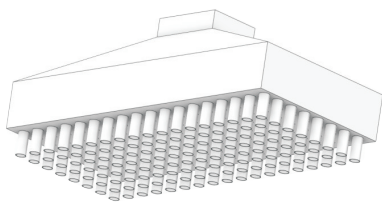


图 2 气流分配室模型图

Figure 2 Model of airflow distribution chamber

2.2 离心风机选型

空气经离心风机进入气流分配室,加热后由矩阵式喷嘴喷出,从料盘底部反射后由侧方的回风管道回收,气流分配室存在较多曲面压力,折损多,因此采用离心式循环风机可以将热气流回收后循环使用。根据实际情况,若喷嘴直径为 20 mm,喷嘴数量为 18 排×8 列共 144 支喷嘴,预计出口平均气流速度为 12 m/s 的情况下,总流量 $Q^{[22]}$ 为:

$$A = \frac{N\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

$$Q = A_2 v = \frac{N\pi d^2 v}{4}, \quad (2)$$

式中:

A ——喷嘴总面积, mm^2 ;

N ——喷嘴数量;

d ——喷嘴内径, mm ;

v ——气流流速, m/s ;

Q ——气流流量, m^3/h 。

经计算,所需流量 Q 为 1 950 m^3/h ,考虑到管道阻力、分配不均匀等问题,实际生产中通常取 10%~20% 的余量,为保障气体射流冲击的风速,最终选择耐高温型锅炉式引风机(见图 3),型号为 YN5-47(台州风锋机电有限公司)。风机转速为 2 800 r/min ,流量为 2 250 m^3/h ,电压为 380 V,功率为 1 100 W,频率为 50 Hz。

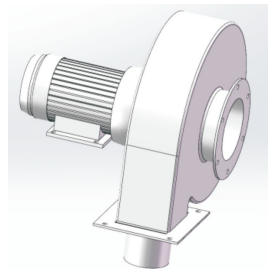


图 3 离心风机结构示意图

Figure 3 Centrifugal fan structure

2.3 加热管选型

气体射流冲击干燥介质为高温气体,气体可以在离心风机的鼓风过程中循环加热,考虑到气体输送管道为密闭的循环系统且需要进行保温,为便于安装,采用电加热管加热,在气流分配室及干燥腔室结构外侧包裹保温棉防止热量损失。按式(3)计算加热管功率^[23]。

$$P = \frac{(T_2 - T_1)(C_g + C_v w) Q v}{3\,600}, \quad (3)$$

式中:

P ——加热管总功率, W ;

T_1 ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_2 ——气体加热后温度, $^{\circ}\text{C}$;

C_g ——干空气的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$;

C_v ——水蒸气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$;

w ——空气的湿含量(25 $^{\circ}\text{C}$ 时取 9.9 g/kg 空气(相对湿度 50%));

Q ——气体流量, m^3/h ;

v ——加热气体的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

假设环境温度 T_1 为 20 $^{\circ}\text{C}$,根据设备设计要求, T_2 为 80 $^{\circ}\text{C}$,计算得出加热管总功率约为 27.2 kW ,因热气流可以经离心风机不断循环加热,因此选用每根功率为 1.5 kW 的加热管,共 3 根。经实际测量,从 20 $^{\circ}\text{C}$ 升至 80 $^{\circ}\text{C}$ 需 12 min ,符合生产需求。

2.4 传动系统设计

用于气体射流冲击干燥的传送带应具有耐高温、耐腐蚀及良好的透气性,适合连续式运行,因此试验采用不锈钢网带,由不锈钢丝网、滚子链、齿轮滚筒轴、横向链杆、传动电机及减速器组成,网带结构如图 4 所示。钢丝网带宽度(中心距)320 mm ,串轴间距 100 mm ,滚子直径 16 mm ,链条节距 25 mm ,丝径 1.2 mm 。由钢丝网带相互串接形成带长为 4 514 mm 的链式输送网带。

链传动和带传动共同固定在底部支架上。链传动传动齿轮通过齿轮滚筒轴与底部外支架连接,传动上端设置送料轨道,保证物料单排进入系统,两端设置进料口和出料口。链传动采用三相异步电机驱动,两侧设有主动齿轮、从动齿轮,主动齿轮通过联轴器与传动电机输出端

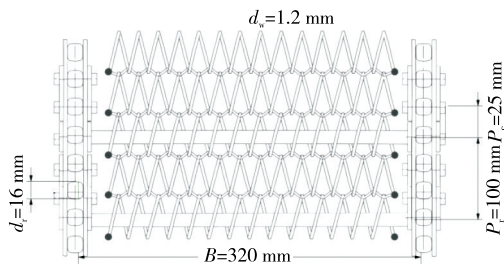


图4 网带结构示意图

Figure 4 Mesh belt structure

减速器相连接,传动电机由变频器控制,外接一个散热风扇保证机器长时间运行。传动轴两端有螺纹,通过螺帽轴向固定在链节之间。因传送带仅涉及水平方向传动,故平均传动比为1。齿轮数影响整体的平滑程度及使用寿命,最低要求齿轮数 ≥ 11 ,试验机中使用齿轮数12。考虑到安装及荷载问题,选用三相异步交流电动机,功率750 W、频率50 Hz、转速1 400 r/min,使用两台RV系列蜗轮蜗杆减速器达到减速效果,一级减速器1:10,二级减速器1:30,总减速比1:300。

2.5 控制系统设计

控制系统(图5)用于设备的启动、传动带速度的调节、风速的调节和温度的精准控制。主机控制模块:采用Weinview公司的MT8072iE触摸屏,采用RS 485串口通过Modbus协议实现通讯功能,采用IY-BM0606控制模块实现各单元的启停控制。传送带速度模块:采用ZUKED三相电机1.5 kW的通用变频器,用于传动电机运行状态显示及频率参数的设定,通过调节变频器输出频率,改变三相异步电机转速实现对传送带速度的连续调节。风机风速调节:采用台达VFD型1.5 kW的三相交流变频器,实现离心风机启停控制及风量设定,从而控制喷嘴出口流速,满足不同物料的风速控制。温度控制:温度由Pt100型探针式温度传感器实时检测,检测信号输入至PID温度控制器。温度控制器根据设定温度与实际温度

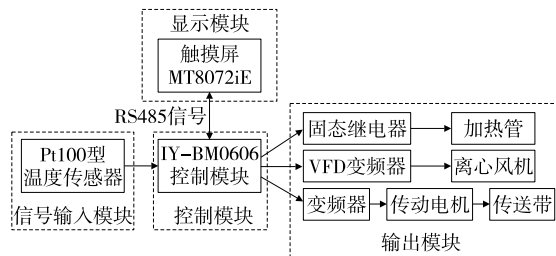


图5 控制系统示意图

Figure 5 Control system

的偏差,输出控制信号至固态继电器,从而实现对加热管的通断控制,保证干燥过程温度稳定^[24]。

3 气流分配室流场模拟与优化

3.1 喷嘴尺寸优化

喷嘴的尺寸、喷嘴与喷嘴的间距与排列形式均是影响气体射流冲击干燥效率的重要因素。喷嘴一般在几何形状上可以分为圆形和条形,开孔率相同时,矩阵排列的圆形喷嘴的传热系数比矩阵排列的高50%~100%^[25],且圆形喷嘴的喷嘴直径 D 越大,物料在气流冲击作用下产生流态化所需的喷嘴出口风速越低^[25]。在喷嘴横向间距 x_n 及纵向间距 y_n 介于 $2D \sim 4D$ 范围时,气体的换热效率较高,顺排阵列的强化换热效果好于叉排阵列的,特别是沿阵列射流下游矩形排列的优势更为明显^[26]。

为比较不同喷嘴尺寸对气流分配室流畅均匀性的影响,防止设计后产生不均匀问题,基于上述理论,设计3种不同尺寸的喷嘴模型,喷嘴直径 D 分别为16, 20, 24 mm,得到3种方案的横向间距 x_n 分别为40, 40, 50 mm,纵向间距 y_n 分别为38, 40, 50 mm,3种方案的喷嘴分别为9排 $\times$ 18列、8排 $\times$ 18列、7排 $\times$ 14列,如图6所示。

为探究不同尺寸喷嘴对流场的影响,建立初始模型简化后利用FLUENT自带的网格划分软件对所建模型进行网格划分,按网格大小 4×10^{-3} m、网格数量4 938 430的网格进行计算。分配腔室内热空气为稳态流动,因热

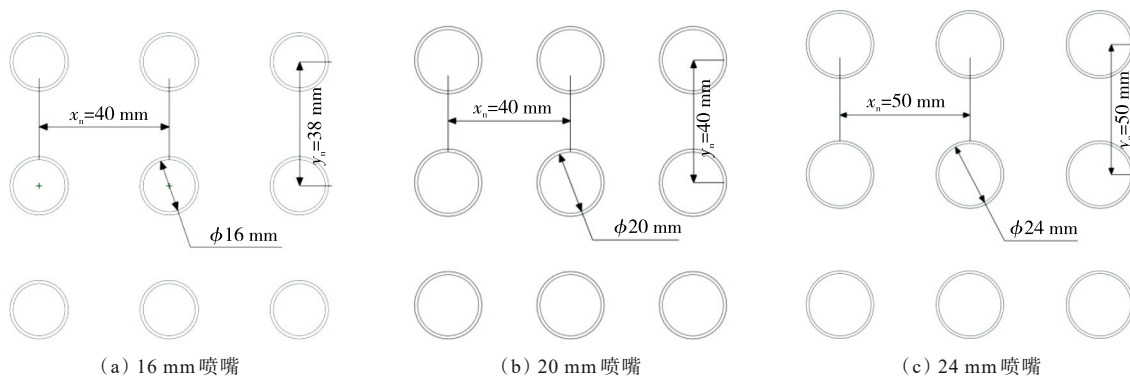


图6 喷嘴间距示意图

Figure 6 Nozzle spacing

空气的流动速度较低,假设气体是不可压缩的理想气体,故流动状态满足连续方程和动量守恒方程。

选取速度入口为进口边界条件,入口方向与入口平面垂直,根据前期模拟情况及实际使用情况设定入口流速 12 m/s,入口、出口流体温度均为 373 K(100 ℃)。出口直接接触于物料表面,选取大气压力作为压力边界值,入口、出口湍流值根据经验公式计算取值分别为 3.84%,5.00%。计算采用有限容积法离散控制方程,压力速度耦合计算方法采用 SIMPLE 算法,残差精度定为 10^{-4} ,迭代次数为 600 步。

为比较不同尺寸喷嘴的模拟效果,监测所有喷嘴出口处的平均速度 $\bar{v}$ 、平均温度 $\bar{T}$ 作为评价指标。选取不均匀系数 M 和速度偏差比 E 定量比较各方案之间的均匀性差异, M 值和 E 值越低,表明各喷嘴间的喷出速度或温度与平均速度或温度的差值越小,气流场分布越均匀。

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum(T_i - \bar{T})^2}{n}} \quad M_T = \frac{\sigma_T}{\bar{T}}, \quad (4)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum(v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad M_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}, \quad (5)$$

$$E = \frac{|\bar{v}_L - \bar{v}|}{\bar{v}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

M_T ——温度不均匀系数;

σ_T ——温度方差;

$\bar{T}$ ——温度平均值,K;

M_v ——速度的不均匀系数;

σ_v ——速度方差;

$\bar{v}$ ——速度平均值,m/s;

$\bar{v}_L$ ——列喷嘴速度均值。

假设气流分配室长度方向为 x 方向,宽度方向为 y 方向,高度方向为 z 方向。模拟结果如图 7 所示。热气流进入分配腔室后在中心轴线方向形成高流速集中区和低流速盲区,气流垂直向下喷射无法及时向两侧扩散。单一调整喷嘴直径仅能改变射流的初始动能,无法消除气流在分配室内流动时因两侧边界产生涡流效应,也无法解决不同喷嘴射流之间的相互干扰问题,导致热空气分布不均匀的本质问题未得到根本解决。其中,直径 24 mm 的喷嘴特征尤为明显,热空气在中间区域过于集中,无法有效改变热空气的分布。这与代建武等^[22]的研究结果一致,由于出风口的位置与进风口相对应,因此中心线方向的气流向两侧形成反向的低速涡流区域,导致两侧出风口速度较低。

由表 1 可知,不同直径喷嘴对应的平均温度集中在 362~365 K,温度不均匀系数仅在 1.50%~1.82%,差距极小,表明喷嘴尺寸对干燥系统温度场的调控作用有限,与顾翰文等^[27]的研究结论相契合。从速度指标来看,直径 20 mm 的喷嘴表现出最优的气流分配特性:速度不均匀系数为 34.74%、最大速度偏差比 E 为 36.08%,优于其他两种喷嘴。结合图 7 可知,尽管 20 mm 喷嘴的平均速度低于 16 mm 喷嘴的,但其最大速度与最小速度的差值更小,说明气流在分配室内的速度梯度更平缓。即使是最优的 20 mm 喷嘴,其速度不均匀系数仍 $>30\%$,热空气分布不均匀的本质问题未得到根本解决。综上,后续优化过程采用综合性能更优的 20 mm 喷嘴,通过内部结构改良提升气流均匀性。

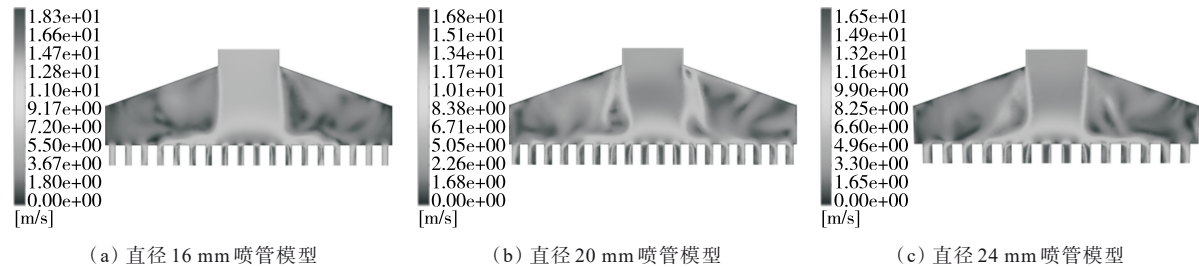


图 7 改变喷管尺寸的速度云图

Figure 7 Velocity contour plot with varying nozzle sizes

表 1 改变喷嘴尺寸后的监测结果

Table 1 Monitoring results with varying nozzle sizes

喷管直径/ mm	平均温度/K	温度不均匀 系数/%	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度不均匀 系数/%	最大速度 偏差比/%
16	362.57	1.50	6.76	8.76	3.96	37.87	41.50
20	362.42	1.82	6.49	9.49	5.07	34.74	36.08
24	364.64	1.78	4.45	7.68	2.56	54.35	72.50

3.2 气流分配室结构优化

不均匀的气流会产生大量的涡流和湍流,这些涡流需要消耗能量来维持,是一种能量损失^[28]。为使气流分布更均匀,优化气流分配室的原始模型,在原始模型 $z=150$ mm平面(喷嘴上方150 mm)处添加一块720 mm×340 mm×2 mm的格栅状均风板,如图8所示。均风板通过在热空气进入下半部分区域之前梳理气流,使其变得平稳有序,可以有效减少涡流,从而降低系统的总压损,降低风机能耗,气流更加均匀有序。均风板本身也会产生一定的阻力,增加系统的压损。因此,设计出均匀度高且能量损失低的均风板尤为重要^[29]。根据前期模拟设置 d 分别为8,12,20 mm,长均为680 mm的不同尺寸格栅进行模拟,控制方程、模拟边界条件及求解设置同原始模型。

由图9可知,热空气进入分配腔室后垂直向下喷射,直接在均风板平板上产生极大速度差,在均风板表面均匀分配到各个均风孔中,将热空气分成上下两个部分,下

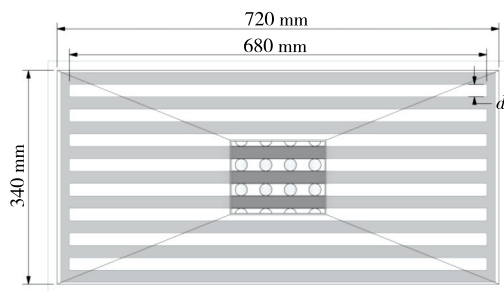


图8 格栅状均风板示意图(俯视图)

Figure 8 Schematic diagram of grid-like wind-equalizing plate (vertical view)

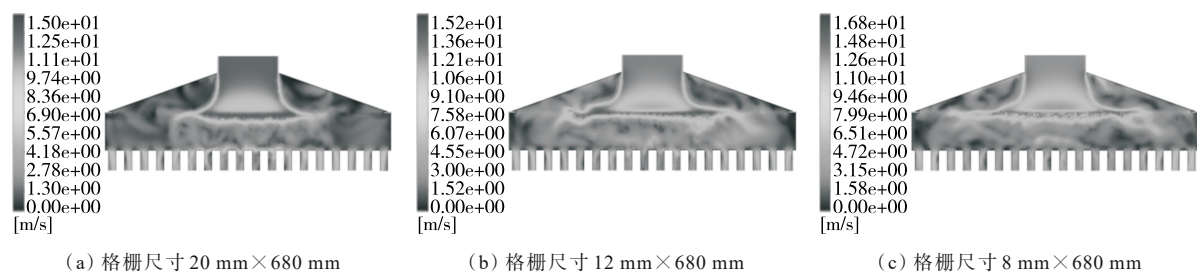


图9 添加均风板后的速度云图

Figure 9 Velocity contour plot after adding a wind-equalizing plate

表2 不同均风板尺寸的监测结果

Table 2 Monitoring results after setting uniform wind plates of different sizes

格栅尺寸/ mm	平均温度/K	温度不均匀 系数/%	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度不均匀 系数/%	最大速度 偏差比/%
20×680	365.38	0.68	5.78	6.91	4.91	14.82	27.28
12×680	366.22	0.56	5.89	6.78	5.07	12.67	19.64
8×680	367.15	0.64	6.01	7.23	5.64	8.54	15.45

半部分气流在均风板的导流作用下被均匀分配,使其在喷管喷出前已实现大部分的均匀分布,优化后的模型与原始模型相比有显著均风效果。格栅结构将原本无规则扩散的气流分割为若干独立的窄通道,强制气流沿通道方向流动,有效破碎了原始模型中形成的大尺度涡流,避免了气流碰撞导致的动能损耗,与原始模型相比无明显高速涡流区和低速盲区,颜色更加连续。格栅尺寸20 mm×680 mm的均风板气流在中部区域较为集中,而格栅尺寸8 mm×680 mm的均风板气流已向两侧充分扩散后再进入喷管,并未因通道过窄导致气流局限于上方,效果更优,与吴敏等^[30]的研究结果一致。增加均风板后速度矢量分布得到进一步改善,低速扰流区明显减弱。

由表2可知,随着格栅宽度从20 mm减至8 mm,速度不均匀系数从14.82%逐步降至8.54%,最大速度偏差比从27.28%降至15.45%;同时,平均温度从365.38 K稳步升至367.15 K,温度不均匀系数始终稳定在0.56%~0.68%,优于原始模型。说明均风板在改善速度场均匀性的同时,还强化了温度场的稳定性。其中,格栅尺寸8 mm×680 mm的方案更佳,其在实现最低速度不均匀系数和最大速度偏差比的同时,平均速度达到6.01 m/s,高于20 mm×680 mm和12 mm×680 mm的,均风板的添加对整体气流稳定性和均匀性有了较大提升,可以作为合适的方案应用于实际生产中。

4 干燥机性能验证

4.1 试验与方法

将新鲜马铃薯(初始湿基含水率为82.67%)清洗后用厨房纸擦干表面水分,切片(厚度8 mm)。取(100±0.5) g马铃薯片,铺平后分别放入电热鼓风干燥机和带式

气体射流冲击干燥机, 根据实际情况, 前 60 min 每隔 10 min 称取一次质量, 60 min 后每隔 30 min 称取一次质量, 直到样品干基含水率 $\leq 10\%$ 结束试验。干燥温度分别为 50, 60, 70, 80 $^{\circ}\text{C}$, 带式气体射流冲击干燥机风速 9 m/s, 每组重复 3 次试验, 结果用平均值 $\pm$ 标准差表示, 采用 Origin 2021 软件绘图。

4.2 结果分析

由图 10 可知, 不同干燥温度下, 水分比随时间的延长不断下降, 当干燥温度分别为 50, 60, 70, 80 $^{\circ}\text{C}$ 时, 热风干燥时间分别为 600, 540, 480, 390 min, 气体射流冲击干燥时间分别为 390, 330, 240, 210 min, 干燥温度越高干燥效率越快, 与薛珊等^[31]的研究结果一致。相同温度下, 带式气体射流冲击干燥机的干燥时间相较于传统热风干燥机

分别缩短了 35.00%, 38.89%, 50.00%, 46.15%, 说明带式气体射流冲击干燥机的干燥效率更高, 效果更好。

由图 10(c)和图 10(d)可知, 干燥温度越高, 干燥速率越快。气体射流冲击干燥由于高速气流的作用, 导致马铃薯片干燥过程为明显的降速过程, 随着干燥时间的延长, 内部水分不断向表面迁移, 干燥速率不断降低, 这与王立霞等^[32]的研究结果一致。热风干燥由于无高速气流使内部水分向外迁移导致干燥速率较低, 干燥效率低。当干燥温度为 80 $^{\circ}\text{C}$ 时, 热风干燥和气体射流冲击的最大干燥速率分别为 0.288, 0.969 $\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。不同干燥温度下, 气体射流冲击干燥的最大干燥速率相较于热风干燥的分别提升了 261%, 260%, 260%, 236%, 说明气体射流冲击干燥机的干燥速率比传统热风干燥机的有较大提升。

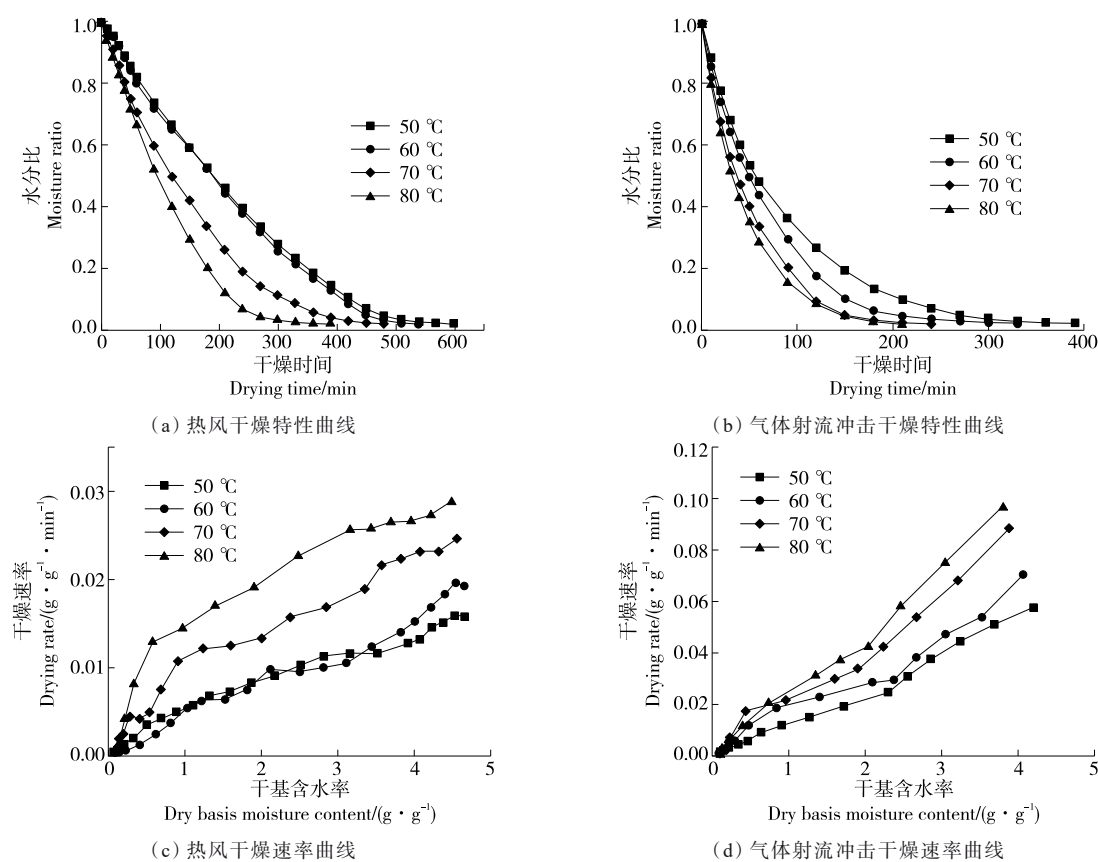


图 10 两种干燥方式下马铃薯片的干燥特性曲线

Figure 10 Drying characteristic curves of potato slices under two drying methods

5 结论

相较于传统的热风干燥机, 气体射流冲击干燥机可以实现连续干燥批量生产。由于喷嘴与物料之间流程短, 对比纵向狭缝型气体射流冲击干燥机与脉动式气体射流冲击干燥机, 试验设备具有干燥效率高、受热时间短等优点。通过改变喷嘴的直径尺寸和添加均风板两种方

案分别进行了 Fluent 模拟仿真, 速度不均匀系数从最初的 34.74% 降至 8.54%, 最大速度偏差比从最初的 36.08% 降至 15.45%, 得到更优的气流分配室方案。以马铃薯片为试验物料对带式气体射流冲击干燥机进行了性能试验, 相较于热风干燥机, 干燥时间缩短了 42.51%, 干燥速率提升了 254%, 表明该设备可以在干燥生产中提高生产效率, 缩短干燥时间, 具有实际应用价值。但设备体积较

大,存在一定的热损失。后续可以根据设备用电量计算实际生产耗能寻找节能方案,根据物料本身的相对湿度进行全自动调控。

参考文献

- [1] 时静,刘颖沙,王文光. 气体射流冲击在农产品加工中的应用及展望[J]. 农产品加工, 2020(12): 70-72.
Shi J, Liu Y S, Wang W G. Application and prospect of air-impingement jet technology in agricultural products processing [J]. Farm Products Processing, 2020(12): 70-72.
- [2] Deng L Z, Mujumdar A S, Yang W X, et al. Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44 (1): e14294.
- [3] 杨慧,贾文婷,金新文,等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄中试工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(22): 113-117.
Yang H, Jia W T, Jin X W, et al. Study on pilot technology research of air impingement drying for seedless purple grapes [J]. Food Research and Development, 2020, 41(22): 113-117.
- [4] 谢永康,董全有,林雅文,等. 气体射流冲击干燥花生工艺的优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 298-307.
Xie Y K, Dong Q Y, Lin Y W, et al. Optimization study on air impingement drying process for peanuts[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(5): 298-307.
- [5] 谭卓弘,李艾青,陈田玺,等. 脱盐海参气体射流冲击干燥特性及复水品质[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 17-26.
Tan Z H, Li A Q, Chen T X, et al. Effect of air impingement drying on drying characteristics and rehydration quality of desalted sea cucumber[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 17-26.
- [6] Rodríguez-Ramírez J, Farzad M, Noori O'Connor Z, et al. Radial Jet Reattachment impingement drying of corn tortillas[J]. Drying Technology, 2023, 41(16): 2 638-2 649.
- [7] 巨浩羽,赵士豪,赵海燕,等. 中草药干燥加工现状及发展趋势[J]. 南京中医药大学学报, 2021, 37(5): 786-796.
Ju H Y, Zhao S H, Zhao H Y, et al. Present situation and developing trend on drying of Chinese herbs[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 37 (5): 786-796.
- [8] 巨浩羽,赵海燕,于贤龙,等. 基于温湿度控制的箱式果蔬热风干燥机设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 97-103.
Ju H Y, Zhao H Y, Yu X L, et al. Design and experiment of box type hot air drier for fruits and vegetables based on temperature and humidity control[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 97-103.
- [9] 王教领,宋卫东,丁天航,等. 澳洲坚果中红外干燥机设计与试验[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 110-114.
Wang J L, Song W D, Ding T H, et al. Design and experiment of mid-infrared dryer for macadamianut[J]. Food & Machinery, 2019, 35(8): 110-114.
- [10] 姚雪东,高振江,林海,等. 披碱草种子的气流冲击式转筒干燥试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 132-137.
Yao X D, Gao Z J, Lin H, et al. Air-impingement rotary drying experiments of *Elymus dahuricus* seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 132-137.
- [11] 王丽红,高振江,林海,等. 脉动式气体射流冲击干燥机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 141-144.
Wang L H, Gao Z J, Lin H, et al. Pulsed air-impingement dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 141-144.
- [12] 于贤龙,高振江,代建武,等. 苜蓿气体射流冲击联合常温通风干燥装备设计及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 293-300.
Yu X L, Gao Z J, Dai J W, et al. Design and experiment of air-impingement jet combined with normal temperature ventilation dryer for alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 293-300.
- [13] 于超,陈书法,钮硕硕,等. 夹心海苔隧道式烘烤设备优化设计与试验[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 96-100, 179.
Yu C, Chen S F, Niu S S, et al. Optimization design and experimental research of sandwich seaweed tunnel baking equipment[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 96-100, 179.
- [14] 魏新龙,李三平,吴立国,等. 基于Fluent的核桃带式连续烘干机设计[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 80-88.
Wei X L, Li S P, Wu L G, et al. Design of walnut belt continuous dryer based on Fluent[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 80-88.
- [15] 闫鹤馨. 网带式花生干燥机流场数值模拟与结构优化[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024: 18-19.
Yan H X. Numerical simulation and structural optimization of flow field in mesh belt peanut dryer[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024: 18-19.
- [16] 刘斌. 小型红外带式干燥机的设计与研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 19-21.
Liu B. Design and research of a small infrared belt dryer[D]. Chongqing: Southwest University, 2016: 19-21.
- [17] 韩瑜丛,金听祥,张振亚. 火龙果热泵干燥数值模拟及试验[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 117-122.
Han L C, Jin T X, Zhang Z Y. Numerical simulation and experimental study of pitaya during heat pump drying[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 117-122.
- [18] 肖李,李立君,罗红,等. 油茶籽微波干燥数值模拟与试验研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 97-106.
Xiao L, Li L J, Luo H, et al. Numerical simulation and experimental study of microwave drying of *Camellia oleifera* seeds[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 97-106.
- [19] Zhang Q, Huang M F, Wang J, et al. Investigation on airflow distribution under different feed thickness combined CFD

- modeling and experimental verification[J]. *Drying Technology*, 2021, 39(3): 306-323.
- [20] Sileshi S T, Hassen A A, Adem K D. Simulation of mixed-mode solar dryer with vertical air distribution channel[J]. *Heliyon*, 2022, 8(11): e11898.
- [21] 于洋, 蔚明强, 王尔杰, 等. 枸杞烘干箱温度场优化及仿真[J]. *食品与机械*, 2024, 40(1): 101-107, 114.
- Yu Y, Yu M Q, Wang E J, et al. Optimization and simulation analysis of temperature field of wolfberry drying box[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 101-107, 114.
- [22] 代建武, 肖红伟, 谢龙, 等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 238-244.
- Dai J W, Xiao H W, Xie L, et al. Design and experiment of tilted tray air-impingement dryer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 238-244.
- [23] 杨涛庆, 郑霞, 肖红伟, 等. 基于含水率变化的气体射流冲击干燥过程温度自适应控制系统[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 52-62.
- Yang T Q, Zheng X, Xiao H W, et al. Temperature adaptive control system for air-impingement drying process based on moisture content change[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(2): 52-62.
- [24] 巨浩羽, 肖红伟, 方小明, 等. 果蔬真空一蒸汽脉动漂烫机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 230-238.
- Ju H Y, Xiao H W, Fang X M, et al. Design and experiment of vacuum-steam pulsed blancher for fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 230-238.
- [25] 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000: 31-35.
- Gao Z J. Experimental research on mechanism and parameters of air-impingement jet drying of particulate materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000: 31-35.
- [26] 王磊, 张靖周, 杨卫华. 密集型阵列冲击射流换热特性实验[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(6): 1 264-1 269.
- Wang L, Zhang J Z, Yang W H. Experimental research on heat transfer characteristics of denser jet array impingement[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(6): 1 264-1 269.
- [27] 顾翰文, 谢晶, 王金锋. 压力条件对不同尺寸条缝喷嘴换热的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(4): 87-92.
- Gu H W, Xie J, Wang J F. Influence of different pressure on heat transfer of nozzle with different sizes[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(4): 87-92.
- [28] Han J W, Zhao C J, Yang X T, et al. Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 883-893.
- [29] 郭子文, 张晓勤, 王志琴, 等. 热风红外联合干燥装置均风板的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2024, 46(1): 238-246.
- Guo Z W, Zhang X Q, Wang Z Q, et al. Design and experiment of uniform outflow plate in hot air infrared combined drying device[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(1): 238-246.
- [30] 吴敏, 段豪, 王振文, 等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 483-492.
- Wu M, Duan H, Wang Z W, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 483-492.
- [31] 薛珊, 赵武奇, 高贵田, 等. 苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(4): 743-754.
- Xue S, Zhao W Q, Gao G T, et al. Drying characteristics and model of bitter melon slice in air-impingement jet dryer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(4): 743-754.
- [32] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 131-140.
- Wang L X, Lan H, Zheng Q Y, et al. Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 131-140.