

进风管锥度与供风方式对冷风发酵房流场均匀性的影响

张国荣^{1,2} 张界威¹ 季家东¹ 方 永² 陈清华¹ 胡胜信²

(1. 安徽理工大学机电工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽金鑫旭智能装备制造有限公司, 安徽 池州 247099)

摘要: [目的] 提高冷风发酵房内气流的均匀性。[方法] 利用 Fluent 软件进行数值模拟, 以平均速度和速度不均匀系数为评价指标, 在供风量不变的条件下, 探究进风管锥度对各送风口风量的影响规律; 研究不同供风方式下发酵房横截面内气流速度的分布特点, 并构建循环供风方式, 分析一个周期内各供风方式的最佳时间占比。[结果] 随着进风管锥度的增大, 始端送风口风量逐渐减小而末端逐渐增大, 当锥度为 7:5 时, 进风管送风均匀性最好; 相比于双侧供风, 单侧供风平均速度大, 有利于水分蒸发, 但流场均匀性不好, 降低了物料品质; 在循环供风方式中, 当双侧、左侧、右侧供风在 1 个周期内的工作时间占比分别为 64%, 18%, 18% 时, 流场速度均匀性最好, 相比于单一的双侧供风提高了 16.4%, 平均速度提高了 13.2%。[结论] 通过对进风管锥度以及供风方式的改进, 提高了冷风发酵房内气流的均匀性。

关键词: 冷风发酵房; 锥度; 气流均匀性; 干燥品质; 结构优化

Effects of inlet duct taper and air supply mode on flow field uniformity in cold air fermentation room

ZHANG Guorong^{1,2} ZHANG Jiewei¹ JI Jiadong¹ FANG Yong² CHEN Qinghua¹ HU Shengxin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Anhui Jinxinxu Intelligent Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chizhou, Anhui 247099, China)

Abstract: [Objective] To improve the uniformity of airflow in the cold air fermentation room. [Methods] Numerical simulations were performed using Fluent software, with average velocity and velocity non-uniformity coefficient as evaluation indexes. Under constant supply air volume, the influence of inlet duct taper on the airflow at each supply air outlet was studied. The distribution characteristics of airflow velocity in the cross-section of the fermentation room under different air supply methods were examined. A circulating air supply mode was then developed, and the optimal time proportion of each air supply method within a cycle was analyzed. [Results] As the taper of the inlet duct increased, the airflow at the starting supply port gradually decreased, while the airflow at the end increased. The best air supply uniformity in the inlet duct was achieved when the taper was 7:5. Compared with double-sided air supply, single-side air supply resulted in a higher average speed, which is beneficial for moisture evaporation. However, the uniformity of the flow field was poor, which decreased the material quality. In the circulating air supply mode, the best uniformity of the flow field velocity was achieved when the working time of the double-sided, left-side, and right-side air supply accounted for 64%, 18%, and 18% of the cycle, respectively. Compared to single double-sided air supply, the uniformity of the flow field velocity improved by 16.4%, and the average speed increased by 13.2%. [Conclusion] By improving the inlet duct taper and optimizing the air supply mode, the uniformity of airflow in the cold air fermentation room was enhanced.

Keywords: cold air fermentation room; taper; airflow uniformity; drying quality; structural optimization

在农产品加工领域,干燥是应用最广泛的方法之一^[1-2]。对于部分果蔬尤其是肉制品,低温干燥是其制作工艺中的重要一环,干燥程度以及均匀性是评价物料品质好坏的一个重要指标^[3-5]。而在企业批量生产过程中,由于干燥设备内气流组织不均匀,同一批次物料常常出现干燥不均匀现象,降低了物料品质以及干燥效率^[6],同

基金项目:安徽省农业物质技术装备重点项目(编号:HX2024042437)

通信作者:张国荣(1986—),男,安徽理工大学讲师,硕士。E-mail: bzguorong@163.com

收稿日期:2024-08-19 改回日期:2025-01-12

时也造成了资源浪费。

干燥设备内部气流均匀性决定了物料品质,提升气流均匀性是干燥设备设计与改进的关键。王振文等^[7]利用数值模拟研究了导流板对菊花烘房气流分布的影响。结果表明,排风速度 6 m/s、导流板倾斜角 15°的组合方式可以使气流分布更均匀。钱睿等^[8]建立了棉花干燥多孔介质模型并探讨了原始烘房空载与满载状态下的气流分布状态,得出变方孔径匀风板可有效提升气流速度均匀性。谭均等^[9]研究了导流板参数对青花椒烘房内速度不均匀系数的影响,得出其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)。Wang 等^[10]通过在烘房进风口处安装引风罩优化了烘房流场速度分布。Silesi 等^[11]通过数值模拟分析了太阳能干燥机空气瞬态流动特性,开发气流分配系统,提高了干燥产品的性能。李国建等^[12]研究了风机数量对烘房流场的影响。结果表明,在送风量一定的条件下,4 风机送风方案最佳。陈忠加等^[13]对农机零部件烘房速度场、温度场进行了理论分析与数值模拟,得出单侧送风回风方式优于双侧送风回风,送风口数量为 8 时温度、速度均匀性较好。龚中良等^[14]通过改变隔板网孔出风孔径、排列方式提高了干燥机内部温度场均匀性。

上述研究针对不同类型烘房的优化均有一定效果,但均局限于导流板、匀风板等结构参数,且为小型设备,而供风方式对流场的影响却较少研究,同时大容积、大流量烘干设备内部气体流动更为复杂,目前对其气流分布及流场均匀性的研究尚未见报道。冷风发酵房是一种物料低温干燥设备,内部容积约 170 m³,远大于一般烘干设备。由于发酵房的供风温度与外界相差较小,房内各区域温度基本一致,水分蒸发快慢主要受局部风速影响。

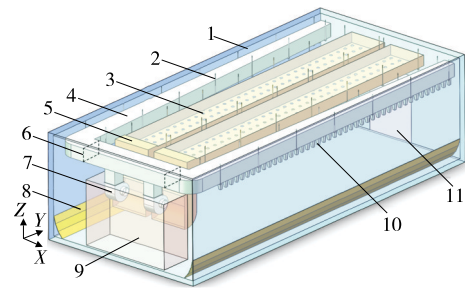
研究拟探究进风管锥度对各送风口送风量的影响,在此基础上分析不同供风方式下发酵房横截面内速度分布特点,再将不同供风方式组合成循环供风模式,分析其对流场速度均匀性的影响,旨在提升发酵房内气流均匀性,进而提高物料的干燥品质。

1 装置模型与数值模拟方法

1.1 装置模型

冷风发酵房模型如图 1 所示,该模型是基于安徽某公司的实际设备所构建,主要由空气净化系统、循环供风系统、电动控制系统、保温箱体等组成,整体呈左右对称。由于整体尺寸较大,进风管与回风管是由若干小节拼接而成,连接处用密封条和螺栓螺母固定,模型中未体现连接细节。模型的主要结构参数见表 1。

发酵房的供风方式为顶部送风,顶部回风,进风管与回风管各有两个,其一端均与过滤设备相连,送风口位于两侧,回风口位于中部。负压风机将 5~8 ℃的干冷空气排



1. 箱体 2. 吊杆组件 3. 回风口 4. 进风管 5. 回风管 6. 电动风阀 7. 风机 8. 导流板 9. 控温除湿设备 10. 送风管 11. 房门

图 1 冷风发酵房模型

Figure 1 Cold air fermentation room model

表 1 发酵房主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of fermentation room

参数	单位	数值
发酵房容积(长×宽×高)	mm×mm×mm	11 300×5 000×3 000
进风管截面尺寸(宽×高)	mm×mm	700×400
进风管进口尺寸(长×宽)	mm×mm	440×440
回风管截面尺寸(宽×高)	mm×mm	1 200×320
送风口尺寸(长×宽)	mm×mm	66×66
送风口单侧个数(两侧对称)		43
电动风阀尺寸(长×宽)	mm×mm	700×400
单个风机送风量	m ³ /h	9 600
房门尺寸(长×宽)	mm×mm	2 000×1 500

入进风管,电动风阀调节开口大小控制两侧通风量,由若干送风口吹至房内,在底部导流板的作用下,空气在干燥区域形成对流,与物料充分接触并带走表面的水分,最后沿回风管流入过滤设备内,经干燥、恒温后再次进入供风系统,如此循环。

1.2 数值模拟方法

试验是研究低压气体流动问题,空气在整个气流循环过程中压力和温度变化较小,密度变化较小,因此将空气看作不可压缩的理想气体^[15]。采用稳态、压力基求解器,插值方法设为二阶迎风格式,选择 Simple 算法。模型进口设置为速度型进口,根据风机送风量以及进口尺寸可得出具体进口速度,出口为压力型出口,表压为 0。发酵房壁面与风管壁面不产生任何移动,所以壁面设置为无滑移壁面,且不考虑壁面的粗糙度。考虑到重力的影响,Z 轴方向设置重力加速度为 -9.81 m/s²。

数值模拟中流体为黏性湍流,选用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,此时湍流动力黏性系数不再是常数,引入与旋转和曲率有关的内容,适用于旋转均匀剪切流,特别是对射流

曲率变化大的情形有较好表现,对应的控制方程为^[16-17]:

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

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}}, \quad (2)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \quad (4)$$

$$\eta = S \frac{k}{\epsilon} = (2S_{ij} \cdot S_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}, \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (7)$$

式中:

μ ——层流黏性系数;

μ_t ——湍流黏性系数;

ρ ——流体密度, kg/m³;

x_i, x_j ——位移在 i, j 方向上的分量, m;

u_i, u_j ——速度在 i, j 方向上的分量, m/s;

G_k ——平均速度梯度引起的湍动能, m²/s²;

k, ϵ ——湍动能和湍动能耗散率, m²/s²;

C_μ ——与应变率相关的常数;

σ_k ——湍动能的湍流普朗特常数, 取 1.0;

σ_ϵ ——耗散率的湍流普朗特常数, 取 1.3;

C_2 ——经验常数, 取 1.9。

1.3 速度均匀性评价指标

为了评价不同参数条件下流场分布均匀性问题,引入平均速度 v_a 和速度不均匀系数 K_v , 表达式为^[18-19]:

$$v_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad (8)$$

$$K_v = \frac{\sigma_v}{v_a} \times 100\%, \quad (9)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_a)^2}, \quad (10)$$

式中:

v_a ——监测点速度平均值, m/s;

v_i ——监测点速度 ($i=1, 2, 3, \dots$), m/s;

n ——监测点数量;

K_v ——速度不均匀系数;

σ_v ——速度标准差。

平均速度 v_a 代表发酵房整体风流大小, 值越大, 表明

蒸发效果越好, 物料干燥速度越快。速度不均匀系数 K_v 代表气流分布情况, 值越小, 表明气流速度场均匀性越好, 物料干燥的质量越好。

1.4 网格无关性验证

网格合理划分是平衡计算资源与结果精度的关键。分别将网格数划分为 1 782 356, 2 839 168, 4 456 530, 5 690 548, 6 801 549 进行仿真模拟, 选择 Y 方向模型中心线 ($X=2\ 500\text{ mm}, Z=1\ 500\text{ mm}$) 上点的速度来体现网格数量对气流运动的影响, 模拟结果如图 2 所示。由图 2 可知, 网格数为 1 782 356 时的模拟结果与其他网格数的相差较大, 其余 4 种网格数量下气流速度在不同位置变化趋势相同, 随着网格数量不断加密, 各监测点的数据差值逐渐减小。因此, 网格数为 4 456 530 可满足仿真要求。

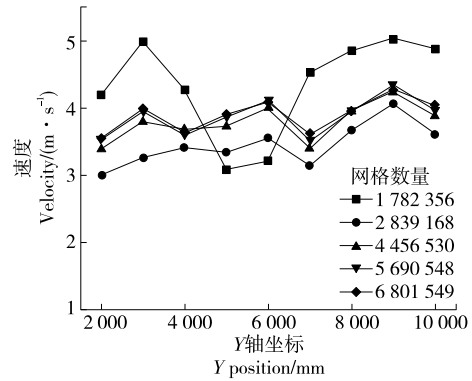
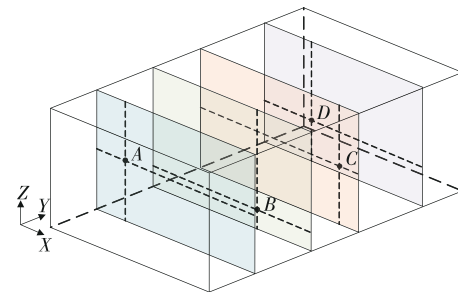


图 2 网格无关性验证

Figure 2 Verification of grid independence

1.5 结果准确性验证

为验证模拟数据的准确性, 对冷风发酵房进行数据测量, 任意选取发酵房干燥区域内 4 个监测点, 以各点的速度大小为验证对象。为了准确找出监测点位置, 提前在地面上标好坐标值, 并用伸缩杆确定高度值, 各点位置如图 3 所示。设备结构参数与所建模型基本一致, 风速测量采用高精度 HT-9829 热敏风速仪。



$A(1\ 300, 2\ 200, 1\ 500)$ 、 $B(3\ 500, 4\ 600, 600)$ 、 $C(4\ 300, 6\ 500, 1\ 500)$ 、 $D(1\ 700, 9\ 200, 1\ 200)$

图 3 测点位置

Figure 3 Point location measurement

测量过程中,设备稳定运行,但各处气流仍处于波动状态,风速仪读数并不是一个稳定的值,一次测量误差较大,其次测量人员站位应尽量远离测点,以减小对气流的影响。最终读数方法为将风速仪在测点处稳定 20 s,每 2 s 记录一次数据,去除明显偏离的数据,剩下的平均值作为该点的风速值。

表 2 为双侧供风方式下各测点试验值与仿真值。由表 2 可知,仿真值基本符合实际,误差均在 10% 以内。整体误差原因包括:测量人员站位对流场造成阻碍和干扰、风速仪本身的测量误差。总体来看,此模型可以反映发酵房内真实流场分布。

表 2 监测点试验数据与仿真数据

Table 2 Experimental and simulation data on monitoring points

点位置	试验值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/%
A	0.91	0.86	5.5
B	1.82	1.71	6.0
C	0.73	0.80	9.6
D	1.08	1.01	6.5

2 结果与分析

2.1 进风管锥度对送风口速度的影响

送风口均匀分布在进风管两侧(见图 4),由于进风管较长,送风口的风速会直接影响干燥区域风速大小,而各送风口尺寸相同,因此风速分布均匀性主要与进风管锥度有关。进风管长度为定值,定义锥度表达式为:

$$C = W : L, \quad (11)$$

式中:

C ——进风管锥度, mm/mm ;

W ——进风管起始端宽度 mm ;

L ——尾部宽度, mm 。

模型中进风管起始端宽度固定为 700 mm,尾部宽度直接影响锥度大小,宽度值越小表示锥度越大。

在进风口速度为 14 m/s 的条件下,进风管内流场速

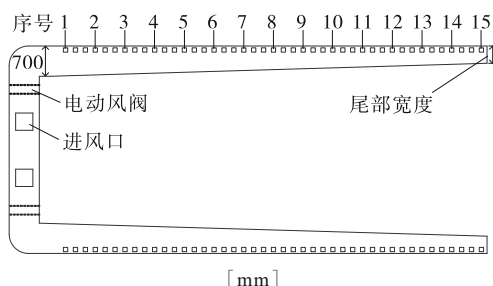


图 4 进风管仰视图

Figure 4 Top view of inlet duct

度大小如图 5 所示。由图 5 可知,随着气流从各送风口流出,其速度在进风管内沿 Y 方向逐渐减小,直至末端为 0,变化较为平缓。而送风口处的气流速度变化较快,且越靠近始端变化越剧烈,这是因为气流在馆内流动方向与送风口流出方向不一致,流出时在惯性作用下偏向送风口一侧,进风管始端气流速度比末端快,因而始端偏离比末端明显。

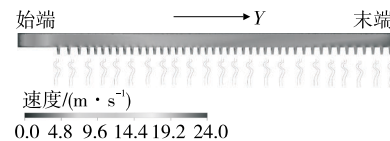


图 5 进风管速度云图

Figure 5 Cloud map of inlet duct velocity

基于送风口气流速度分布特点,利用单个送风口流量与面积的比值表示各自出口的风速,送风风速的均匀性即可代表发酵房流场沿 Y 方向的均匀性。送风口共有 43 个,按图 4 选取 15 个送风口,并结合实际情况选择不同进口风速进行仿真模拟,得出进风管在不同锥度下各送风口的速度大小以及速度不均匀系数。

图 6 为进口速度为 14 m/s 时各送风口速度值。由图 6 可知,进风管锥度对两端送风口速度影响较大,而对中部区域速度影响较小。当 $C=7:2$ 时,最大速度、最小速度分别为 16.81, 12.89 m/s ,差值 3.92 m/s ,当 $C=7:7$ 时,最大速度、最小速度分别为 15.54, 14.81 m/s ,差值 0.73 m/s ,随着锥度的增大,送风口速度从头至尾由下降趋势变为上升趋势。这是由于随着锥度的增大,进风管截面积逐渐减小,导致气流速度变大,在尾部端面阻挡下形成了较大动压,最终增大了送风口气流速度。

由图 7 可知,在进风管单侧进口风速为 7, 14, 21, 28 m/s 条件下,送风口速度不均匀系数变化趋势一致,均为先减小后增大,最小值分别为 0.030, 0.032, 0.033,

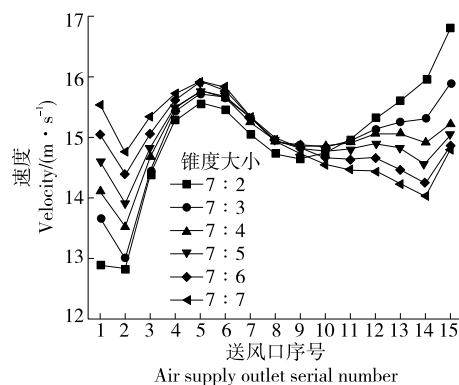


图 6 不同锥度下送风口速度分布

Figure 6 Velocity distribution of air supply port under different tapers

0.033,基本相同,对应的进风管锥度为7:6,7:5,7:5,7:5。说明不同的进口条件对最佳锥度的取值影响较小,这仅在进口风速较低时产生,因为风速低,气流动能小,在长达11 m的进风管内增加了流动的不确定性,而发酵房工作时进口风速基本>10 m/s,故可忽略部分极端条件影响,当尾部宽度为500 mm时,进风管取得最佳锥度7:5,送风口均匀性最好。

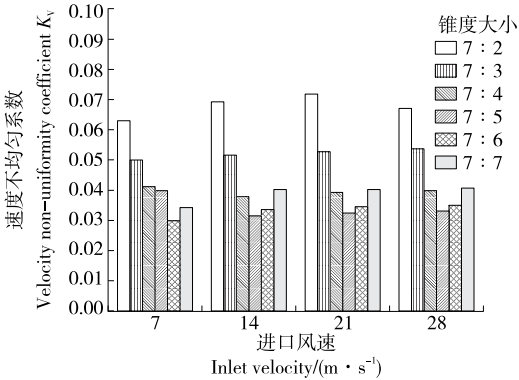


图7 送风口速度不均匀系数
Figure 7 Velocity non-uniformity coefficient of air supply port

2.2 风阀开关对发酵房速度场的影响

进风管的锥度影响干燥区域内气流沿Y方向的速度分布,而两侧的电动风阀通过调节过流面积可影响X-Z平面内的速度分布。电动风阀开合大小为无极调控,在进风管取最佳锥度7:5的条件下,选择两侧全开和一侧全开一侧全关两种模型,即单侧供风模型和双侧供风模型,将Y=5 650 mm截面(发酵房的中心截面)作为监测面,并在监测面中选取147个点监测气流速度大小。监测点的分布为:Z轴方向300~2 100 mm,间隔300 mm;X轴方向500~4 500 mm,间隔200 mm。

图8为两侧风阀全部打开时速度云图。由图8可知,两股气流从送风口排出后均沿壁面流动并在中间汇合,然后共同向上流向回风口,部分气流未直接流出而是在惯性作用下再次融入两侧新气流中,因此形成了左右对称的两个漩涡。漩涡外围速度3.5 m/s左右,向内逐渐减小,中心处约为0.8 m/s,变化较大。

风阀左开右关速度云图如图9所示。由图9可知,在单侧供风时送风口气流呈射流状喷出,速度明显增大,经底面和侧面反射后部分气流从回风口流出,其余则沿墙壁形成一个大的漩涡。在漩涡的外围,刚从送风口喷出的气流速度最大,约7 m/s,随着射流扩散,速度降为4 m/s左右,但漩涡中心区域速度仅为0.5 m/s,变化范围较大。

对比两种供风模型,气流在发酵房内均会形成漩涡。双侧供风形成左右两个涡,且两股气流的相遇削弱了彼

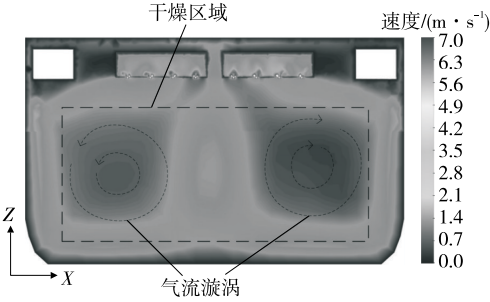


图8 双侧供风气流速度分布
Figure 8 Double-sided air supply airflow velocity distribution

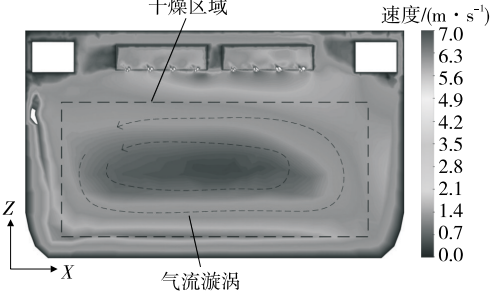


图9 单侧供风气流速度分布
Figure 9 Single-sided air supply airflow velocity distribution

此流动速度,因此旋流速度较小;单侧供风只形成一个涡,送风口喷出的气流速度快使整个涡的旋流速度较大。不论双涡还是单涡,其涡心均位于干燥区域内部,使大面积工作范围内的风速较低,降低了干燥效率,漩涡外围与中心速度的悬殊加剧了整个流场速度不均匀程度。

表3 不同供风方式下各速度范围占比

Table 3 Proportion of each speed range under different air supply modes

速度/(m·s ⁻¹)	双侧供风		单侧供风	
	监测点数	占比/%	监测点数	占比/%
0.00~1.00	31	21.1	27	18.4
1.01~2.00	58	39.5	32	21.8
2.01~3.00	35	23.8	29	19.7
3.01~4.00	22	15.0	28	19.0
4.01~5.00	1	0.7	26	17.7
5.01~6.00	0	0.0	3	2.0
6.01~7.00	0	0.0	2	1.4

各监测点的速度大小分布如表3所示。双侧供风条件下,84%的监测点速度分布在0~3 m/s范围内,最大速度4.05 m/s,平均速度1.90 m/s,速度不均匀系数0.477;单

侧供风条件下,监测点速度在 0~5 m/s 内分布较为分散,最大速度 6.43 m/s,平均速度 2.58 m/s,速度不均匀系数 0.557。相比于双侧供风,单侧供风的平均速度高出 35.8%,速度不均匀系数大 16.8%,表明单侧供风方式更有利于工作区域内水分蒸发,增大了物料干燥速率,但干燥均匀性较差,降低了同一批次物料的品质。

2.3 风阀周期性运动对发酵房速度场的影响

观察两种供风方式的云图可知,单一的供风方式总会形成稳定的漩涡,造成流场速度不均匀,但两种情况的涡心并不重合。为了使速度大小能够互补,提高干燥区域在一个供风周期内速度均匀性,可使单、双侧供风交替运行,按照双侧供风、左侧供风、右侧供风方式循环,由于左、右侧供风时的气流分布对称,其时间占比应相同。此时,干燥区域内各点的当量速度大小可由一个供风周期内各时段速度加权平均值表示,权重值即为供风时间占比。

每种供风方式在一个周期内的时间占比与监测点当量速度关系为

$$v_i = \frac{1}{T} \left(\lambda T \cdot v_{i1} + \frac{1-\lambda}{2} T \cdot v_{i2} + \frac{1-\lambda}{2} T \cdot v_{i3} \right) = \lambda v_{i1} + \frac{1-\lambda}{2} (v_{i2} + v_{i3}), \quad (12)$$

式中:

λ ——时间因子(表示双侧供风的工作时间占比),取值范围 0~1;

v_{i1} 、 v_{i2} 、 v_{i3} ——在双侧供风、左侧供风、右侧供风时第 i 个监测点速度, m/s;

T ——循环周期, s;

v_i ——引入时间因子后监测点速度在一个周期内的加权平均值($i=1, 2, 3, \dots, n$);

n ——监测点数量。

结合仿真数据, λ 每取一个值都会有一组 v_i 值与其对应,再根据式(8)~式(10),可得出此时的速度不均匀系数 K_v 、平均速度 v_a 与 λ 的函数关系,利用数值计算方法得出变化结果如图 10 所示。

图 10 中左右端点对应两种极端情况,分别为左右交替供风和双侧供风。随着 λ 值增大即双侧供风时间增加,平均速度从 2.58 m/s 线性递减至 1.90 m/s,变化差值 0.68 m/s,速度不均匀系数先减小后增大,在 λ 为 0.64 时取得最小值。整体表明双侧供风时间比例的增大降低了平均速度但一定程度上提高了流场均匀性,而流场均匀性是影响物料品质的重要因素,所以 0.64 为时间因子 λ 的最佳取值,即双侧供风时间占比为 64% 时流场均匀性最好。此时速度不均匀系数为 0.4,平均速度为 2.15 m/s,相比于单一的双侧供风,这种循环供风使速度均匀性提高了 16.4%,平均速度提高了 13.2%。

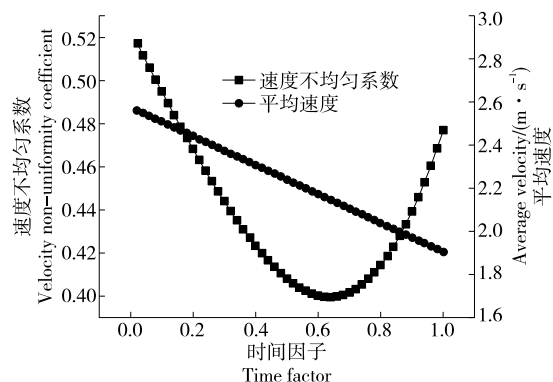


图 10 时间因子对干燥区域流场的影响

Figure 10 Effect of time factor on flow field in drying area

3 结论

通过改变进风管锥度以及风阀开关等条件研究了冷风发酵房内气流速度分布规律。结果表明,①进风管锥度主要影响两端送风口风量,随着尾部宽度增大,始端送风口风量逐渐增大而末端逐渐减小。当尾部宽度为 500 mm 即进风管锥度为 7:5 时,送风口速度不均匀系数取得最小值 0.033,进风管送风均匀性最好。②在风机供风量 9 600 m³/h 时,发酵房内单、双侧供风的平均速度分别为 2.58, 1.90 m/s,速度不均匀系数分别为 0.557, 0.477。相比于双侧供风,单侧供风平均速度大,有利于水分蒸发,但干燥均匀性不好,降低了物料品质。③在双侧、左侧、右侧供风组合构成的循环供风方式中,当其工作时间占比分别为 64%, 18%, 18% 时,速度不均匀系数取得最小值 0.4,相比于单一的双侧供风,速度均匀性提高了 16.4%,平均速度为 2.15 m/s,提高了 13.2%。后续可在仿真模型中加入湿度源,进而模拟发酵房内水蒸气扩散过程,总结湿度分布规律。

参考文献

- [1] 刘烨, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 农产品干燥过程数值模拟研究现状 & 进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 331-339.
LIU Y, CHEN P X, ZHU W X, et al. Study on numerical simulation in drying of agricultural products[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 331-339.
- [2] XIAO H W, MUJUMDAR A S. Importance of drying in support of human welfare[J]. Drying Technology, 2020, 38(12): 1 524-1 543.
- [3] 张卫鹏, 韩梦悦, 巨浩羽, 等. 山药片阶段降湿烘干特性及多物理场耦合模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 115-122, 240.
ZHANG W P, HAN M Y, JU H Y, et al. Drying efficient improvements with step-down relative humidity and multi-field coupling model construction during hot air drying of yam slices [J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 115-122, 240.
- [4] 杨波若, 陈韬, 孙小萌. 真空干燥工艺对广式香肠品质的影响

- [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 157-165.
- YANG B R, CHEN T, SUN X M. Effect of vacuum drying methods on the quality of Cantonese-style sausage[J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 157-165.
- [5] RAMAJ I, SCHOCK S, MÜLLER J. Drying kinetics of wheat (*Triticum aestivum* L., cv. 'pionier') during thin-layer drying at low temperatures[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9 557.
- [6] 巨浩羽, 张卫鹏, 于贤龙, 等. 恒温下相对湿度对果蔬热风干燥特性和品质的影响及调控[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 29-40.
- JU H Y, ZHANG W P, YU X L, et al. Influence of relative humidity on the drying characteristics and quality of fruits and vegetables during constant temperature hot air drying as well as controlling strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 29-40.
- [7] 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 Z W, WU M, XU X M, 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.
- [8] 钱睿, 吴达科, 杨明金. 基于 Fluent 的棉花烘房流场均匀性优化[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 152-161.
- QIAN R, WU D K, YANG M J. Optimization of flow field uniformity in cotton drying room based on Fluent[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 152-161.
- [9] 谭均, 王教领, 王子轩, 等. 导流板对青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.
- TAN J, WANG J L, WANG Z X, et al. Effect of deflector on flow field uniformity of stack drying chamber for green Sichuan pepper[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(8): 186-200.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- LI G J, CUI Y H, WU S, et al. Modeling and simulation analysis of flow field in heat pump drying room based on Fluent[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(3): 425-432.
- [13] 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.
- CHEN Z J, LEI W W, WANG Q C. Design and simulation of side air supply drying room based on temperature and velocity homogeneity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 18-26.
- [14] 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.
- GONG Z L, WANG P K, LI D P, et al. Analysis and structure optimization of the temperature and flow fields of the belt dryer with multi-temperature zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 40-47.
- [15] 蒋红樱, 成立, 颜红勤, 等. 不同形状的泵站封闭式进水池喇叭口水力性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 31-35.
- JIANG H Y, CHENG L, YAN H Q, et al. Simulation and validation of hydraulic performance of closed-style pump sump with different bell-mouth shapes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 31-35.
- [16] 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.
- LIU R, DONG J X, WANG D, et al. Flow-field simulation and structural optimization of the chrysanthemum hot air drying room[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1): 47-54.
- [17] 耿智化, 李孟卿, 朱丽春, 等. 基于控温控湿的沙棘红外联合热风干燥均匀性与工艺[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 120-133.
- GENG Z H, LI M Q, ZHU L C, et al. Drying uniformity and technology of sea buckthorn with infrared combined hot air via temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 120-133.
- [18] 张伟, 严平. 热风干燥烘房气流速度场均匀性优化[J]. 轻工机械, 2019, 37(1): 83-87.
- ZHANG W, YAN P. Optimization of airflow velocity field uniformity in hot air drying kiln[J]. Light Industry Machinery, 2019, 37(1): 83-87.
- [19] 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.
- LI H, ZHANG Z, REN Y, et al. Simulation analysis of flow field characteristics of Chrysanthemum drying based on FLUENT[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 133-138.