DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.80832 [文章编号] 1003-5788(2024)01-0101-07

枸杞烘干箱温度场优化及仿真

Optimization and simulation analysis of temperature field of wolfberry drying box

于 洋[1] 蔚明强[1] 王尔杰[1] 陈廷敏[1,2]

YU Yang[1] *YU Mingqiang*[1] *WANG Erjie*[1] *CHEN Tingmin*[1,2]

(1. 西安科技大学机械工程学院,陕西 西安 710054;2. 宁夏链杞智汇科技有限公司,宁夏 石嘴山 753400)

(1. *College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Ningxia Lianqi Zhihui Technology Limited Company, Shizuishan, Ningxia* 753400, *China*)

摘要:目的:提高枸杞干制品品质。**方法:**采用标准 Realizable k-ε 湍流模型进行理论分析,利用 Fluent 软件仿真运算并结合实验验证,探究烘干室换热温度场分布规律,并对换热参数进行优化。以温度均匀性系数以及温度分布云图为评价标准,分析换热板入口流速、换热板流道宽度、换热板流道高度、换热板间距对烘干箱温度场均匀性的影响。**结果:**对烘干室结构参数进行优化后,温度云图显示出的高温区面积大且比较集中,两端和中间的温度梯度小。优化后的温度标准偏差比优化前降低了 0.64%,模拟值与试验值的整体趋势大体相同,其误差值为 2.56%。**结论:**枸杞烘干温度分布均匀性最佳的工艺条件为热水入口流速 0.18 m/s,流道高度 22 mm,流道宽度 35 mm,换热板间距 85 mm。

关键词:烘干箱;温度场;优化;枸杞

Abstract: Objective: To improve the quality of wolfberry drying. **Methods:** Standard Realizable k-ε turbulence model was used for theoretical analysis, and fluent software was used for simulation and experimental verification to study the distribution law of heat exchange temperature field in the drying chamber, and to optimize the parameters of the heat exchange plate. The effects of heat exchanger plate inlet flow rate, heat exchanger plate runner width, heat exchanger plate runner height and heat exchanger plate spacing on the temperature field uniformity of the drying chamber were analyzed by taking the temperature uniformity coefficient and the temperature distribution cloud diagram as the evaluation criteria. **Results:** After the optimization of the structural parameters of the drying chamber, the temperature cloud diagram showed a large and concentrated high temperature zone, with small temperature gradients at the two ends and in the middle. The standard deviation of the temperature after optimization was reduced by 0.64% compared with that before optimization, and the overall trend of the simulated and experimental values was more or less the same, and the overall error value of the experimental and simulated values was 2.56% according to the calculation formula. **Conclusion:** The uniformity of temperature distribution is best when the hot water inlet flow rate is 0.18 m/s, the runner height is 22 mm, the runner width is 35 mm, and the heat exchanger plate spacing is 85 mm.

Keywords: drying oven; temperature field; make superior; wolfberry

枸杞具有重要的经济以及药用价值[1-2],其含水量高达 80%,果肉柔软且表皮较薄,容易受到微生物的感染和外部因素导致的损坏而变质。常温下,枸杞果实采摘后贮藏 2~3 d 就会发生腐烂变质[3-4],即使在冷藏情况下也只能贮藏 7 d 左右[5-6]。

目前,枸杞制干方式主要有自然干燥、热风干燥、真空干燥等[7]。其中,真空干燥具有不加碱、污染小、除菌效果好、农药残留少等优点。张倩等[8]优化了裙带菜真空干燥工艺,提高了干燥效率和烘干品质,但未对烘干设备进行研究。于洋等[9]通过数值模拟方法对烘干箱换热管参数进行分析,发现如果烘干箱温度场分布相对均匀,则换热管的换热系数远小于换热板,在使用一段时间后管内容易结垢,使得烘干箱温度场分布均匀性和换热效果不能满足需求,烘干效果不理想。Hoang 等[10]在数值模拟计算时对试验设备进行了一系列假设,确保模型简化后,对干燥箱模型进行了模拟优化,模拟结果与实际结果相近。李赫等[11]对菊花干燥机内的流场特性进行了分析,通过数值模拟得到了干燥机温度场等内部情况。由于枸杞果实结构与其他物品相差较大,目前将数值模拟

基金项目:陕西省秦创原科技创新专项(编号:2021ZDZX-GY-0006)

作者简介:于洋(1968—),男,西安科技大学教授,硕士。E-mail: yuy@xust.edu.cn

收稿日期:2023-08-28 **改回日期:**2023-12-15

应用于枸杞烘干箱温度场的研究较少。试验拟采用数值模拟计算方法对枸杞烘干箱内温度场均匀性进行研究，分析烘干箱参数（包括换热板入口流速、换热板流道宽度、换热板流道高度和换热板间距）对温度场均匀性的影响，旨在为枸杞真空干燥设备的研发改造提供依据。

1 模型的建立

1.1 物理模型

真空烘干箱（图 1）由主箱体、换热板、底座、保温棉和控制面板等组成，烘干箱内采用换热板热水循环模式，换热板为一进一出，烘干箱后部有一个主入水口和一个主出水口。箱体壁面采用 10 mm 的不锈钢板，保温棉采用硅酸钙保温棉。烘干箱外型为长型圆柱体（6 000 mm×Φ 1 620 mm），箱体内物料装载面积为 30 m^2，箱内容积为 13 m^3，换热板共有 14 层，2 列。该烘干箱通过能量交换机组给热水箱加热，达到一定温度后，通过循环系统，将高温热水送入烘干箱换热器内，进行辐射散热后水通过出水口进入水箱，如此往复循环实现果实的制干。

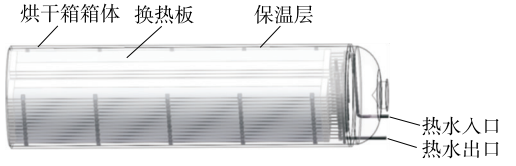

图 1 烘干室的几何模型

Figure 1 Simplified geometric model of drying chamber

1.2 数学模型

为简化数学模型，对烘干箱作出假设：① 烘干箱外壁面视为绝热，散热忽略不计；② 干燥箱壁厚及换热板壁厚各处厚度一致；③ 忽略外部环境温度对烘干箱的影响。

烘干箱内流体流动满足连续方程、动量守恒方程和能量守恒方程，连续方程和动量守恒方程描述换热流体流动过程，能量方程描述热量传递[12]。考虑试验模拟的流动特性较为复杂，采用 Realizable k-ε 湍流模型[13]能更好地表现其流动特性。控制方程式为[14]：

（1）连续性方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0, \tag{1}$$

式中：

ρ——流体密度，kg/m^3；

u、v、w——3 个方向的流速分量，m/s^2。

（2）动量方程：

u 动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+div(\rho uU)=\frac{\rho p}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}+F_x, \tag{2}$$

v 动量方程：

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+div(\rho vU)=\frac{\rho p}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}+F_y, \tag{3}$$

w 动量方程：

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+div(\rho wU)=\frac{\rho p}{\partial z}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}+F_z, \tag{4}$$

式中：

U——合速度，m/s；

p——流体承受的压力，Pa；

τ_{xx}、τ_{yx}、τ_{zx}——黏性应力 τ 的分量，Pa·s；

F_x、F_y、F_z——沿 x、y、z 方向的体积力，N。

（3）能量方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vT)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wT)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{C_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{C_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{C_p}\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\Phi+S_T, \tag{5}$$

式中：

S_T——热源，W/m^3；

C_p——物质的比热容，J/(kg·K)；

T——温度，K；

Φ——机械能转换热能的部分。

（4）湍流模型方程：

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M, \tag{6}$$

$$\rho\frac{d\varepsilon}{d_t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right]+\rho C_1S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{V}\varepsilon}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b, \tag{7}$$

式中：

G_k——平均速度引起的湍动能，m^2/s^2；

G_b——由浮力引起的湍动能，m^2/s^2；

Y_M——可压缩流体对总耗散率的影响，W/mm^2；

$C_{1\varepsilon}$、C_2、$C_{3\varepsilon}$——经验常数（$C_{1\varepsilon}=1.44$，$C_2=1.9$，$C_{3\varepsilon}=0.09$）；

σ_k、σ_ε——湍动能和耗散率所对应的普朗特数（$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.5$）。

2 原始模型温度场模拟分析

2.1 边界条件

入口边界条件选择入口流速为 0.15 m/s，入口温度设置为 343 K（70 ℃），特征长度为 50 mm，流体密度为 977.8 kg/m^3，流体黏滞系数为 4.06×10^{-4} Pa·s，出口边界条件为压力出口，设定大气压力为出口边界。换热板内热水流动状态为湍流运动，因此选择雷诺数湍流模型[15]各数值代入式（8）得到雷诺数为 18 432.3。

$$R_e=\frac{\rho vD}{\mu}, \tag{8}$$

式中:

R_e——雷诺数;

ρ——流体密度,kg/m^3;

v——流体流速,m/s;

D——特征长度,mm;

μ——流体黏滞系数,Pa·s。

将计算得到的雷诺数代入式(9)得到烘干箱入口管道处的湍流强度为 0.046 9。

$$I=0.16\frac{1}{R_e^{\frac{1}{8}}}。\tag{9}$$

2.2　原始模型温度场模拟

枸杞均匀摊铺于物料架上,且放置在换热板之间,坐标原点设置在烘干箱中心位置,图 2 为烘干箱零点截面图。

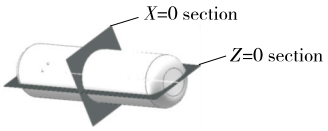

图 2　$X=0$、$Z=0$ 截面图

Figure 2　$X=0$, $Z=0$ cross-section view

通过 Fluent 软件对烘干箱箱体内温度场进行模拟分析,其分布云图如图 3 所示。在 Z 轴方向上截取 6 个截面进行温度场的分析,每层换热板厚度为 24 mm,换热板上下层间距为 80 mm。由图 3 可知,截取截面靠近烘干箱内测温度分布较低且在两端部温度较为集中,在烘干箱 Z 截面方向上,不同截面温度分布也不均匀。说明烘干箱参数设置不合理会导致烘干箱内部温度分布不均匀。

3　结果与分析

3.1　温度均匀性评价指标

在数值模拟后处理过程中,可以直接提取温度云图上的网格节点温度值,并按式(10)计算温度标准偏差(SD)[16]。

$$S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(T_i-\overline{T})^2}\ ,\tag{10}$$

式中:

S——温度标准偏差;

n——温度测点数目;

T_i——各测点温度值,℃;

$\overline{T}$——各测点平均温度,℃。

温度均匀性系数是利用标准偏差这一统计学概念进行温度场均匀性的量化,反映各测点的温度值相对于温度平均值的偏离程度,判断出烘干箱温度场的均匀程度。SD 值越小则反映温度场均匀程度越高,SD 值越大则反映温度场的均匀程度越低。

3.2　单因素分析

3.2.1　入口流速对温度均匀性的影响　图 4 为流速从 0.1 m/s 增大到 0.4 m/s 时 $X=0$、$Z=0$ 截面温度分布云图。由图 4 可知,随着入口流速的增大,换热板间高温集中区域先增大后减小,当入口流速为 0.2 m/s 时,高温区域面积最大,此时温度均匀性最好。

3.2.2　换热板流道高度对温度均匀性的影响　由图 5 可知,当流道高度从 15 mm 增大到 30 mm 时,各截面的温度分布云图质量先变好再变差,且在流道高度为 30 mm 时,截面的温度梯度和均匀性最差,在流道高度为 20 mm 时,截面的温度分布相对更均匀,高温区域面积最大。

3.2.3　换热板流道宽度对温度均匀性的影响　由图 6 可知,当流道宽度从 35 mm 增大到 65 mm 时,各截面的温度分布逐渐变差,且在流道宽度为 65 mm 时,温度梯度和均匀性最差,在流道宽度为 35 mm 时,截面的温度分布相对均匀,此时温度均匀性最好。

3.2.4　换热板间距对温度均匀性的影响　由图 7 可知,当换热板间距从 80 mm 增大到 95 mm 时,各截面的温

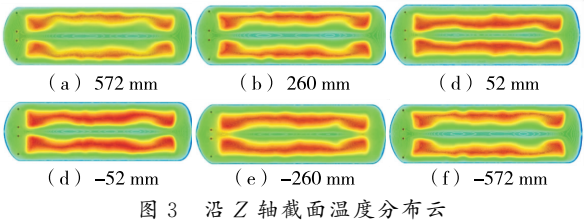

图 3　沿 Z 轴截面温度分布云

Figure 3　Temperature distribution cloud along the Z-axis section

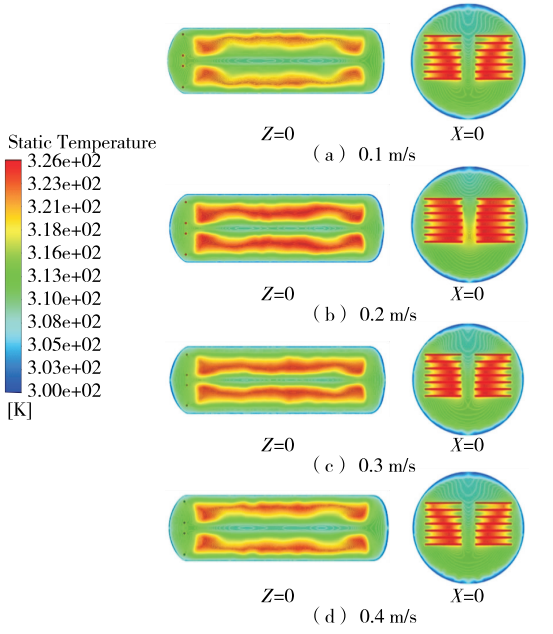

图 4　不同流速下的温度分布云图

Figure 4　Temperature distribution cloud for each cross-section at different flow rates

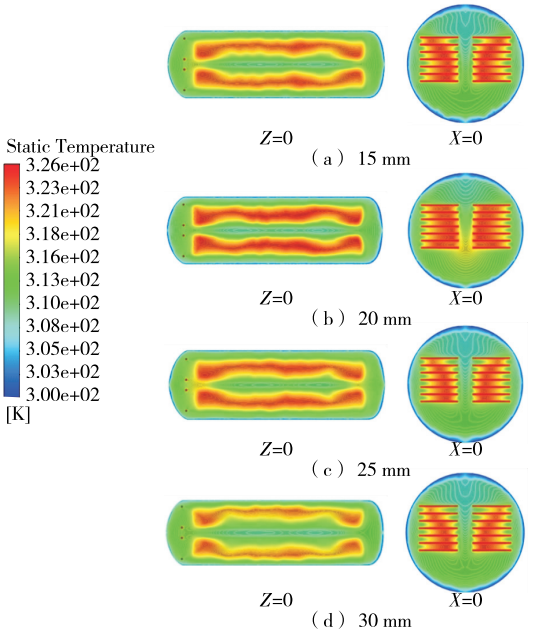

图 5　不同流道高度下的温度分布云图

Figure 5　Temperature distribution cloud for each cross section at different runner heights

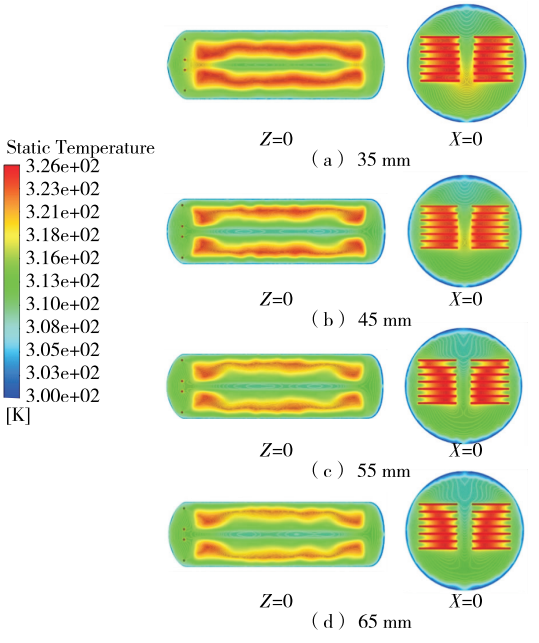

图 6　不同流道宽度下的温度分布云图

Figure 6　Temperature distribution cloud for each cross section at different runner widths

度云图高温区域先变大后变小，当换热板间距为 95 mm 时，温度梯度和均匀性最差，当换热板间距为 85 mm 时，截面温度分布相对更均匀，高温区域面积相对最大。

将各截面采集到的数据进行计算得到其温度标准偏差，并绘制 X、Z 截面温度标准偏差折线图如图 8～图 11 所示。

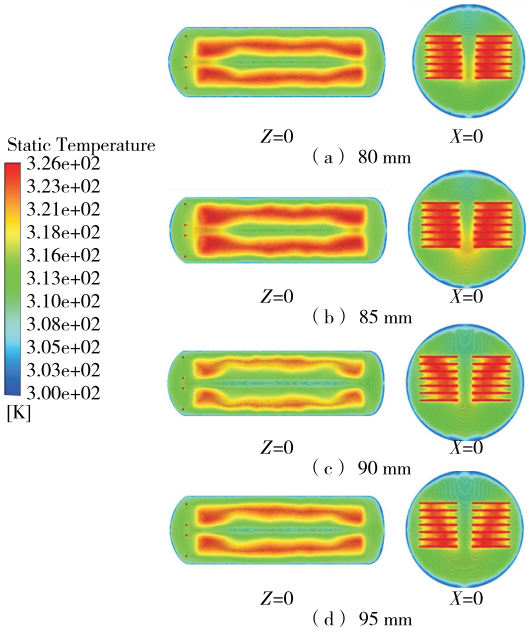

图 7　不同换热板间距下的温度分布云图

Figure 7　Temperature distribution cloud for each section at different heat exchanger plate spacing

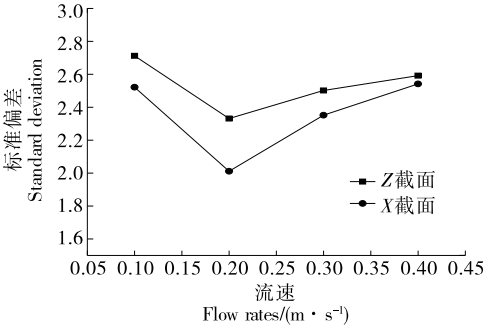

图 8　流速—标准差图

Figure 8　Flow rate-standard deviation plot

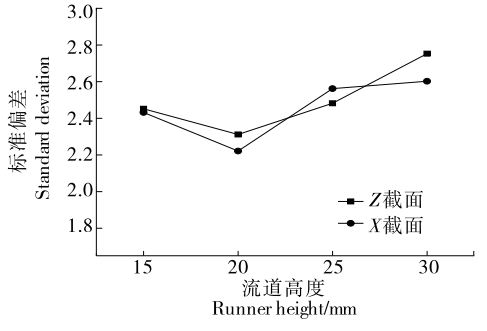

图 9　换热板流道高度—标准差图

Figure 9　Runner height-standard deviation plot

由图 8 可知，当入口流速为 0.1～0.2 m/s 时，温度标准偏差逐渐下降且幅度较大；当入口流速为 0.2～0.4 m/s 时，温度标准偏差逐渐上升，且在 0.2 m/s 时最低。因此，热水入口流速为 0.1 m/s 时，换热板的温度均匀性最差；

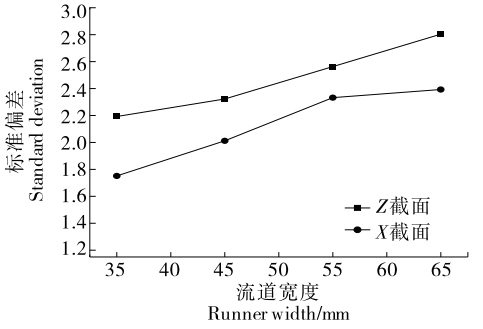

图 10　换热板流道宽度—标准差图

Figure 10　Runner width-standard deviation plot

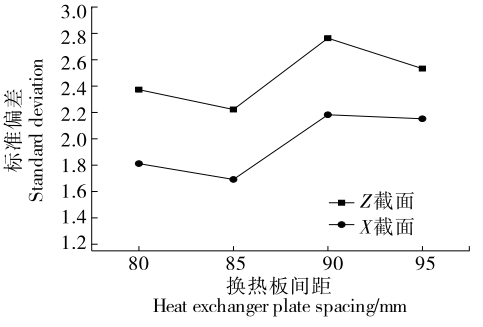

图 11　换热板间距—标准差图

Figure 11　Heat exchanger platespacing-standard deviation plot

热水入口流速为 0.2 m/s 时,换热板的温度均匀性最好。流速较小时,由于流体具有一定黏度,流动状态为层流,换热板壁面温度均匀性较差,当流速到达一定值时换热板壁面温度分布均匀,随着流速增加到一定程度后,管侧的压力损失提高,使出水压力过低影响换热性能和温度均匀性。结合温度分布云图可知,当入口流速为 0.2 m/s 时温度分布均匀性相对较好,且高温面积区域最大。

由图 9 可知,当流道高度为 15～30 mm 时,温度标准偏差先减小后增大,当流道高度为 20 mm 时,温度标准偏差最小。结合云图,当流道高度为 20 mm 时,温度分布最均匀。

由图 10 可知,当流道宽度为 35～65 mm 时,温度标准偏差逐渐增大;当流道宽度为 35 mm 时,温度标准偏差最小;当流道宽度为 65 mm 时,温度标准偏差最大,温度分布均匀性最差,说明流道宽度为 35 mm 时,温度分布均匀性最好。

由图 11 可知,温度标准偏差先下降后上升,同时结合其分布云图可以得出换热板间距为 85 mm 时,温度分布最均匀。

3.3　响应面优化

3.3.1　试验设计　根据单因素试验结果,选取入口流速、换热板流道宽度、换热板流道高度、换热板间距 4 个因素进行 BBD 试验,因素水平表见表 1,试验设计及结果见表 2。

表 1　因素水平表

Table 1　Table of factor levels

水平	A 入口流速/(m·s^{-1})	B 换热板流道宽度/mm	C 换热板流道高度/mm	D 换热板间距/mm
−1	0.10	35	15.0	80.0
0	0.25	50	22.5	87.5
1	0.40	65	30.0	95.0

表 2　Box-Behnken 试验表

Table 2　Box-Behnken test table

试验号	A	B	C	D	温度标准偏差
1	−1	−1	0	0	2.1
2	1	−1	0	0	2.9
3	1	1	0	0	2.7
4	0	1	0	0	3.0
5	0	0	0	0	2.5
6	0	0	1	−1	2.6
7	0	0	−1	1	2.5
8	0	0	1	1	2.7
9	−1	0	0	−1	2.2
10	1	0	0	−1	2.9
11	−1	0	0	1	3.0
12	0	0	0	−1	2.5
13	0	−1	−1	0	2.1
14	0	1	−1	0	2.6
15	0	0	−1	−1	2.5
16	0	1	1	0	2.6
17	−1	0	−1	0	2.5
18	1	0	−1	0	2.9
19	−1	0	1	0	2.8
20	1	0	1	0	3.0
21	0	−1	0	−1	2.2
22	0	1	0	−1	2.7
23	0	−1	0	1	2.4
24	0	1	0	1	3.1
25	0	0	0	0	2.5
26	0	−1	1	0	2.5
27	1	0	0	1	2.8
28	−1	0	0	0	2.5
29	1	0	0	−1	2.5

3.3.2　结果分析　通过 Design-Expert 软件进行数据处理,得到回归模型方程:

$$Y=2.52+0.118A+0.243B+0.092C+0.117D-0.321AB-0.05AC-0.225AD-0.10BC+0.05BD+0.025CD+0.211A^2+0.003B^2+0.001C^2+0.039D^2。\quad(11)$$

由表 3 可知，模型 $P<0.01$，极显著，说明模型的拟合真实程度良好。入口流速、换热板流道宽度和换热板间距对烘干箱温度均匀性影响显著，且依次为换热板流道宽度＞换热板间距＞入口流速。由 Design-Expert 软件分析可知，温度最均匀的工艺条件为入口流速0.18 m/s、换热板流道宽度 35 mm，换热板流道高度22 mm、换热板间距 85 mm。

表 3　模型方差分析†

Table 3　Model analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.830 0	14	0.130 6	8.110 0	0.000 2	* * *
A	0.140 7	1	0.140 7	8.730 0	0.010 4	* *
B	0.658 3	1	0.658 3	40.860 0	＜0.000 1	* * *
C	0.100 8	1	0.100 8	6.260 0	0.205 4	
D	0.163 3	1	0.163 3	10.140 0	0.006 6	* * *
AB	0.262 0	1	0.262 0	16.260 0	0.001 2	* * *
AC	0.010 0	1	0.010 0	0.620 6	0.443 9	
AD	0.202 5	1	0.202 5	12.570 0	0.003 2	* * *
BC	0.040 0	1	0.040 0	2.480 0	0.137 4	
BD	0.010 0	1	0.010 0	0.620 6	0.443 9	
CD	0.002 5	1	0.002 5	0.155 2	0.699 6	
A^2	0.263 1	1	0.263 1	16.330 0	0.001 2	* * *
B^2	0.000 1	1	0.000 1	0.002 8	0.958 4	
C^2	0.006 7	1	0.006 7	0.000 4	0.984 0	
D^2	0.009 7	1	0.097 0	0.603 7	0.450 1	
残差	0.225 6	14	0.016 1			
失拟项	0.225 6	10	0.022 6			
误差项	0.000 0	4	0.000 0			
总和	2.05	28				

†　* * * 表示极显著（$P<0.01$）；* * 表示显著（$P<0.05$）。

3.4　优化后烘干箱温度场模拟分析

将上述所得到的一组最佳数据进行模拟仿真计算，为了将优化前和优化后进行对比，仿真模拟时设置的边界条件等参数均保持一致。同样，在 Z 轴方向截取 6 个截面，如图 12 所示，各个截面的高温区比较集中，两端和中间的温度梯度较小，高温区整体呈矩形分布，物料在此区域有更好的烘干效果，且优化后温度云图的高温区集中程度明显好于原烘干箱。

将模拟仿真的数值进行温度采集点的选取，并与优化前的仿真数据进行对比，计算得到优化后的温度标准偏差比优化前的降低了 0.64%，优化后的烘干箱温度场均匀性更好。

3.5　实验验证

进一步制定温度值数据采集方案：在换热板之间选取中间的平面，共选取6个平面，每个平面均匀选取5个温度采集点位置作为烘干箱内温度采集点，并实时记录其实际温度值，分布云图上采集点位置必须与实际采集的温度点位置相同（见图 13）。

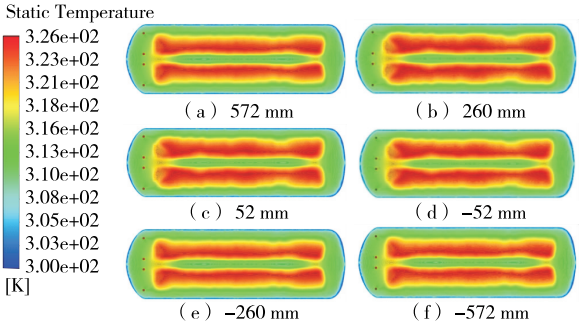

图 12　优化后沿 Z 轴截面温度分布云图

Figure 12　Cloud view of temperature distribution along Z-axis section after optimization

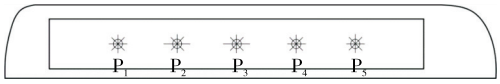

图 13　温度采集点位置示意图

Figure 13　Schematic diagram of temperature collection point location

试验采用高精度防水探头温度计采集温度值，工作温度为－50～110 ℃，测量精度为±0.5 ℃，误差率为0.1 ℃。各截面采集的温度值见表 4，不同截面的数据分析见表 5。

由表5可知，各截面温差最小的为截面6，最大的为

表 4　采集点温度值

Table 4　Temperature values of collection points　℃

Z 轴	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
截面 1	47.2	45.3	44.8	43.5	45.2
截面 2	46.8	43.9	44.5	45.1	45.6
截面 3	46.7	43.1	45.3	44.4	45.5
截面 4	46.5	45.8	43.7	43.6	46.1
截面 5	45.9	44.7	42.9	44.8	46.3
截面 6	46.6	44.2	43.2	45.7	44.9

表 5　不同截面温度分析

Table 5　Temperature analysis of different cross sections　℃

截面	最高温度	最低温度	温差	平均温度
截面 1	47.2	43.5	3.7	45.20
截面 2	46.8	43.9	2.9	45.18
截面 3	46.7	43.1	3.6	45.00
截面 4	46.5	43.6	2.9	45.14
截面 5	46.3	42.9	3.4	44.95
截面 6	46.6	43.2	3.4	44.72

截面 2,二者温差均>2 ℃,说明优化后的烘干箱换热效果显著。各截面平均温度最大的为截面 1,最小的为截面 6,二者差值为 0.32 ℃<0.50 ℃,同时结合优化后模拟温度标准偏差为 1.72%,说明优化后的烘干箱温度均匀性良好,烘干箱温度均匀性和换热能力均达到要求。

使用平均绝对误差[17]来评价数值模拟计算结果与实际实测数据结果之间的误差值,并按式(12)进行计算。

$$e = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|T_e - T_p|}{T_e}\right)i\ , \tag{12}$$

式中:

e——平均绝对误差,%;

n——采集点数目;

T_e——实测温度值,℃;

T_p——数值模拟温度值,℃。

由图 14 可知,模拟值与试验值的整体趋势大体相同,试验值与模拟值的整体误差值为 2.56%,在 5%以下[18],因此模拟仿真结果可靠。

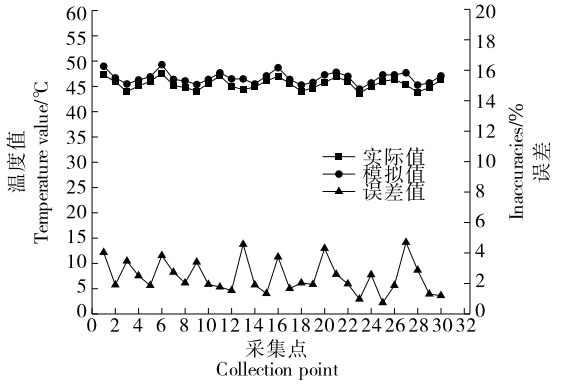

图 14　模型与试验数据的比较

Figure 14　Comparison of model and experimental data

4　结论

针对枸杞烘干箱温度不均匀的问题,对烘干箱结构参数进行优化,运用数值模拟方法研究枸杞真空烘干箱内温度场的分布情况,模拟得出不同参数下各截面的温度分布云图。结果表明,当烘干箱内热水入口流速为0.18 m/s、换热板流道高度为 22 mm、换热板流道宽度为 35 mm、换热板间距为 85 mm 时,温度均匀性最好;优化后温度标准偏差比优化前降低了 0.64%。由于烘干箱设计体积较大存在耗能高的缺点,因此,后续研究应在温度相对均匀情况下偏重于提高干燥效率,可通过研究真空度、优化换热板内流道结构等提高干燥效率和温度均匀性。

参考文献

[1] 袁海静, 安巍, 李立会, 等. 中国枸杞种质资源主要死态学性状调查与聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14: 627-633.
YUAN H J, AN W, LI L H, et al. Survey and cluster analysis of major necropsy traits of Chinese wolfberrygermplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14: 627-633.

[2] LI H Y, RUAN Y W, KAU P. Effect of lyceum barbarum (Wolfherry) on alleviating axonal degeneration after partial optic nerve transection[J]. Cell Transplantation, 2015, 24: 403-417.

[3] 赵游丽, 冯美, 康建宏. 不同温度处理对采后枸杞果实呼吸强度和品质的影响[J]. 农业科学研究, 2010, 31(4): 34-36, 45.
ZHAO Y L, FENG M, KANG J H. Effects of different temperature treatments on respiratory intensity and quality of postharvest restrained fruits[J]. Agricultural Science Research, 2010, 31(4): 34-36, 45.

[4] 张曦燕. 枸杞鲜果采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. 宁夏农林科技, 2010(6): 81-82.
ZAHGN X Y. Research progress of postharvest storage and preservation technology of fresh fruit of wolfberry [J]. Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010(6): 81-82.

[5] 马琴. 枸杞干燥及对多糖含量影响的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013: 3-7.
MA Q. Experimental study on drying of Lycium barbarum and its effect on polysaccharide content [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013: 3-7.

[6] 韩爱芝, 白红进, 耿会玲, 等. 响应面法优化超声辅助提取黑果枸杞叶片总黄酮的工艺研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 114-118, 122.
HAN A Z, BAI H J, GENG H L, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of total flavonoids from leaves of black fruit wolfberry by response surface methodology [J]. Journal of Northwest Forestry College, 2013, 28(1): 114-118, 122.

[7] 高月. 枸杞干燥方法及其促干剂的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015: 1-8.
GAO Y. Research on the drying method of wolfberry and its drying promoter[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015: 1-8.

[8] 张倩, 李世愉, 李秀辰, 等. 裙带菜微波真空干燥质热传递特性与品质优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 166-173.
ZHANG Q, LI S Y, LI X C, et al. Heat transfer characteristics and quality optimization of microwave vacuum drying of wakame[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 166-173.

[9] 于洋, 贾智旗, 杨国锋, 等. 基于 FLUENT 的真空干燥箱参数优化及仿真分析[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(2): 145-150.
YU Y, JIA Z Q, YAGN G F, et al. Optimization and simulation analysis of vacuum drying oven parameters based on FLUENT[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(2): 145-150.

[10] HOANG M L, VERBOVEN P, BAERDEMAEKER D J, et al. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics[J]. International Journal of Refrigeration. 2000, 23(3): 127-140.

[11] 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 chrysanthemum hot air drying flow field characteristics based on FLUENT[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 133-138.

(下转第 114 页)

review[J]. Comput Electron Agric, 2018, 153: 69-81.

[11] 张书彦, 张文毅, 余山山, 等. 图像处理技术在信息农业中的应用现状及发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22): 9-13.
ZHANG S Y, ZHANG W Y, YU S S, et al. Application status and development trend of image processing technology in information agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(22): 9-13.

[12] 张巧芬, 高健. 机器视觉中照明技术的研究进展[J]. 照明工程学报, 2011, 22(2): 31-37.
ZHANG Q F, GAO J. Research progress of lighting technology in machine vision[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(2): 31-37.

[13] 王红雨, 尹午荣, 汪梁, 等. 基于 HSV 颜色空间的快速边缘提取算法[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 765-772.
WANG H Y, YIN W R, WANG L, et al. Fast edge extraction algorithm based on HSV color space[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(7): 765-772.

[14] 李华强, 喻擎苍, 方玫. Canny 算子中 Otsu 阈值分割法的运用[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(9): 2 297-2 299.
LI H Q, YU Q C, FANG M. Application of Otsu thresholding method on Canny operator[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(9): 2 297-2 299.

[15] 张红霞, 王灿, 刘鑫, 等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 11-18.
ZHANG H X, WANG C, LIU X, et al. New progress in image edge detection algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(14): 11-18.

[16] 李静, 陈桂芬, 丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4): 371-375.
LI J, CHEN G F, DING X Q. Research on image edge detection method based on improved canny algorithm[J]. Computer Simulation, 2021, 38(4): 371-375.

[17] 王小俊, 刘旭敏, 关永. 基于改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(14): 196-198.
WANG X J, LIU X M, GUAN Y. Image edge detection algorithm based on improved Canny operator[J]. Computer Engineering, 2012, 38(14): 196-198.

[18] MITTAL M, VERMA A, KAUR I, et al. An efficient edge detection approach to provide better edge connectivity for image analysis[J]. IEEE, 2019, 7: 33 240-33 255.

[19] 胡林, 周国民, 丘耘, 等. 苹果树图像分割算法研究综述[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 100-108.
HU L, ZHOU G M, QIU Y, et al. Review on studying image segment algorithms of apple trees[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(2): 100-108.

[20] 魏巍, 申铉京, 千庆姬. 工业检测图像灰度波动变换自适应阈值分割算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(8): 944-953.
WEI W, SHEN X J, QIAN Q J. An adaptive thresholding algorithm based on grayscale wave transformation for industrial inspection images[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(8): 944-953.

[21] 颜明重, 黄冰逸, 朱大奇. 基于灰度波动的水下图像分割[J].哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9): 1 268-1 273.
YAN M C, HUANG B Y, ZHU D Q. Underwater image segmentation based on grayscale wave[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(9): 1 268-1 273.

[22] MEI S, GENG Y, HOU J, et al. Learning hyperspectral images from RGB images via a coarse-to-fine CNN[J]. Science China (Information Sciences), 2022, 65: 1-14.

[23] 吴永清, 李明, 张波, 等. 高光谱成像技术在谷物品质检测中的应用进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(5): 165-173.
WU Y Q, LI M, ZHANG B, et al. Progress in application of hyperspectral imaging technology in grain quality detection[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(5): 165-173.

(上接第 107 页)

[12] 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008(1): 3-15.
QIAN R J, DONG S L, YUAN X F. Research progress in fluid-solid coupling theory[J]. Space Structure, 2008(1): 3-15.

[13] 刘厚根, 秦贞国, 吴元兴. 基于 CFD 的机械增压器进、排气口的结构优化[J]. 机械设计, 2016, 33(7): 49-53.
LIUH G, QIN Z G, WU Y X. Structural optimization of inlet and exhaust ports of mechanical supercharger based on CFD[J]. Mechanical Design, 2016, 33(7): 49-53.

[14] 陈红意, 赵满全. 干燥箱内温度场和气流场的建模仿真与试验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(8): 98-101.
CHEN Y H, ZHAO M Q. Modeling simulation and experimental study of temperature and airflow fields in drying oven[J]. Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(8): 98-101.

[15] 陶向前. 枸杞真空脉动烘干箱结构参数优化及分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2020: 22-25.
TAO X Q. Optimization and analysis of structural parameters of vacuum pulsation drying box for wolfberry[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020: 22-25.

[16] 袁宏. 强制对流烤箱流动与结构优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 18-20.
YUAN H. Forced convection oven flow and structural optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 18-20.

[17] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 125-130.
PA T A. Numerical calculation of heat transfer and fluid flow[M]. ZHANG Z. Beijing: Science Press, 1984: 125-130.

[18] 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: 31-37.
HUO E G. Simulation and optimization study of airflow organization in chrysanthemum drying room[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016: 31-37.