

基于 CFD 木材干燥进出风参数优化及干燥过程模拟

孟兆新,石晋菘*,巴图,马婧尧

(东北林业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为探究在改变引入进出风口流速配比等因素下的木材中心含水率的变化情况,使用 DesignModeler 及 NX10.0 建立木材干燥域的三维流场模型,并通过结合 CFD 及正交试验方法,对单个木材在给定的多组试验工况下进行模拟,得到了试验各因素下最佳水平的参数组合。结果表明,合理地配置进出风口流速及气流温湿度对降低木材中心含水率有明显影响,为强制进排风干燥过程中控制干燥进程,通过平衡进出风口流速来调整木材(中心)干燥速率提供了理论依据。

关键词:木材干燥;计算流体力学;正交试验;速度配比;温湿度;含水率

中图分类号:S782.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0225-07

CFD Based Optimization of Inlet and Outlet Air Parameters and Simulation of Drying Process

MENG Zhao-xin,SHI Jin-song*,BA Tu,MA Jing-yao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to explore the changes of wood center moisture content with inlet and outlet velocity ratios and other factors, the three-dimensional flow field model of wood drying area was established by using Design Modeler and NX10.0. Combined with CFD and orthogonal test method, a single wood was simulated under a given number of test conditions, and the optimal parameter combination under each factor was obtained. The results showed that the reasonable configuration of inlet and outlet velocity and air temperature and humidity had obvious effect on reducing the moisture content in the center of wood, which provided theoretical basis for controlling the drying process in the process of forced air inlet and exhaust drying, and adjusting the drying rate of wood (center) by balancing the inlet and outlet flow rates.

Key words: wood drying; computational fluid dynamics; orthogonal test; speed ratio; temperature and relative humidity; moisture content

木材常规干燥过程中,通过控制流质流速与温湿度来调整干燥进程是木材干燥中重要的工艺环节,进出风平衡控制对木材干燥的整体干燥效率及综合能耗都有较大影响。在实际干燥作业中多为相关人员操作按经验控制,控制参数无定性的数值很难把握,干燥缺陷发生几率较高;通过调整分析进出风口风速变化对木材中心含水率变化影响规律,对干燥工艺参数控制有重要的意义。

在控制风速这一因素对木材干燥影响的相关研究中,多数都为定速循环风对木材干燥的影响,未获

得木材内部的温湿度及含水率瞬时变化规律,木材中含水率变化规律是制定干燥工艺参数的关键因素^[1]。运用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟进行研究已经成为当下的热点^[2]。

在相关木材干燥(窑)流体仿真研究中,有学者采用建立二维干燥窑模型结合 CFD 分析方法或数值模拟方法,在热流耦合场下,研究循环风速和温度的分布规律。通过安装导流板前后数据进行对比,进而找到风速和温度合理分布下的导流板参数。有

收稿日期:2020-07-13 修回日期:2020-08-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2572018CP08)。

作者简介:孟兆新,博士,教授。研究方向:木材干燥窑耦合分析。E-mail:349325368@qq.com

*通信作者:石晋菘。研究方向:CFD 仿真分析。E-mail:1091157742@qq.com

学者建立木材干燥窑三维干燥模型结合 CFD 分析方法或数值模拟方法,研究了不同窑体结构下的气流分布规律,为提升干燥窑内流场的速度均匀性提供理论参考^[3-4]。上述及相关研究中,多以围绕木材外部单一因素,如风速,温度等对木材干燥的研究。对木材内部的温度、相对湿度等参数变化缺乏更直观的研究。

以 CFD 仿真评估温湿度对木材中心含水率的影响变化是直观且直接的,因为木材内部温度和相对湿度变化会直接影响中心含水率数值,随之,中心处含水率变化会涉及整个木材在不同位置的含水率分布情况。又由于单一因素参数在仿真模拟中研究较多,对综合考虑到气流温度、气流相对湿度及进排风口流速配比的多因素参数下对木材干燥效果影响的研究尚不明确。所以本研究利用 CFD 及设计正交试验方法来探究在强制进排风过程中,木材中心温度、相对湿度乃至中心含水率数值变化,经试验后进行分析,得出试验最佳因素水平的参数。对干燥基准的完善和控制干燥进程提供理论依据^[5]。

1 干燥域模型的分析与建立

1.1 干燥域内流场数学模型分析

干燥计算域内流体的流动遵循 3 种基本原理,即质量守恒原理、动量守恒原理、能量守恒原理。因干燥流场内涉及复杂的非线性的传热传质及耦合过程,无法求得解析解。故本研究利用有限元软件离散化方程的方法求解干燥介质流动中涉及与木材内部相关的控制方程。模型求解基于如下假设^[6-11]:木材忽略固体收缩与降解,计算域壁面绝热,木材孔隙固体和气流分布呈连续状态,通入计算域内流体为常压下理想湿空气,常密度常黏性。

经试算,流场中流体流动状态为湍流流动,控制方程的求解基于 fluent 软件的有限体积法进行即:

质量方程(连续性方程):

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f V) = 0 \tag{1}$$

式中, ρ_f 为流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ∇ 为哈密顿算子; V 为流体的速度矢量/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为时间,动量方程:

$$\rho_f \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla P = \rho_f F + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 V \tag{2}$$

式中, P 为流体内应力的张量/Pa; F 为单位质量流体的质量力; μ_{eff} 为有效动力粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)能量方程(多孔介质模型热平衡下的热量传递):

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (V \rho_f c_{\text{pf}} T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \tag{3}$$

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = \theta_o \rho_o c_{\text{po}} + \theta_f \rho_f c_{\text{pf}} \tag{4}$$

式中, c_p 为比热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 为温度/K, ρ_o 木材密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), k_{eff} 为有效热传导系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), θ_f 为木材孔隙率, θ_o 为木材固体骨架。

浓度方程:

$$\frac{\partial (\rho_f C)}{\partial t} + \nabla \cdot (V \rho_f C) = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \nabla C) \tag{5}$$

式中, C 为水分浓度/($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$); D_{eff} 为水蒸气的有效扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

标准 $k-\epsilon$ 模型:

湍流动能方程(k 方程):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f k) + \nabla \cdot (\rho_f k V) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot \nabla k + P_k - \rho_f \epsilon \tag{6}$$

式中, k 为湍动能; μ_t 为湍流粘性数; σ_k 为经验常数; ϵ 为湍动能耗散率/%; P_k 为湍动能生成项湍流能量耗散率方程(ϵ 方程):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon V) = \left(u + \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \cdot \nabla \epsilon + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho_f \epsilon) \tag{7}$$

$$u_{\text{eff}} = u + u_t, k_{\text{eff}} = k_q + u_t c_{\text{pf}} / \sigma_T \tag{8}$$

$$D_{\text{eff}} = D + u_t / \sigma_c, u_t = C_\mu \rho_f k^2 / \epsilon$$

式中, $k = 1.5 (vI)^2$, $\sigma_T = 1.0$, $\sigma_c = 1.0$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $I = 0.16 R_e^{-\frac{1}{8}}$, $\epsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / I$, $R_e = \rho_f v d / \mu$, $P_k = \mu_t [2 (\nabla^2 \cdot V) + (\nabla V)^2] R_e$ 为雷诺数, d 为水力直径。

1.2 多孔介质仿真模型的建立

在实际的干燥情况中,木材为多孔介质,木材内外质热的迁移与水分扩散和多孔介质的物性有关。以往关于木材干燥仿真中很多忽略了内部阻力系数及孔隙率的影响,一般在 CFD 仿真中将木材部分属性转化为多孔介质模型中的相关数值进行处理。研究中将流体流经多孔介质时看作单向流固耦合的问题,即先抑制木材获得没有多孔介质参与的流场初步解的方式,利用木材附近流场介质压力降数与流体速度的关系再继续求解内部相关参数^[12-14]。模拟有多孔介质参与的工况时,多孔区域附近压力降与速度之间可以定义为:

$$\Delta p_1 = a v^2 + b v \tag{9}$$

式中, $a = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$, C_2 为惯性阻力系数, v 为气流速度, Δn 为板材厚度, $b = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n$,其中 $\frac{1}{\alpha}$ 为黏滞阻力系数,模拟时取流体沿木材进风方向两侧形成的压力降作为依据,其他 2 个方向的系数取极大值。

干燥流场以干燥窑主体部分的流动区域为算例,为方便计算收敛,将其整体形状简化为长方体。干燥流场计算域长 2.08 m、宽 1.6 m、高 1.03 m;木材长 1.08 m、宽 0.6 m、厚 0.026 m。建立流场及木材模型见图 1。考虑到计算机硬件限制,网格划分方式为六面体主导和自适应控制函数网格(图 2)。

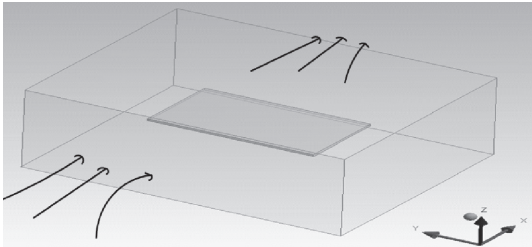


图 1 计算域流场和木材模型

Fig. 1 Flow field and wood model in computational domain

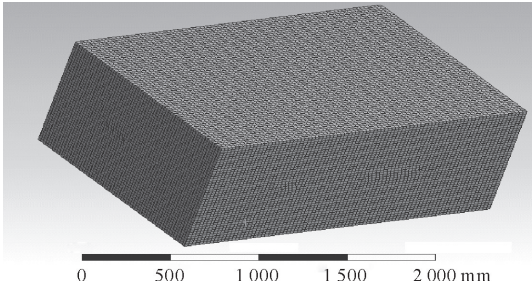


图 2 计算域网格划分模型

Fig. 2 Grid generation model of computing domain

2 边界约束与条件设置

因为木材处于外部热风风速场环境中干燥,由热气流将热量由外向木材内部传递,这一过程中在流速作用下木材内部与表面形成蒸气压力差,迫使木材内部水分在含水率梯度、温度梯度下沿毛细管系统向蒸发面及木材表面扩散^[15]。基于上述原理进行设定或表示初始化边界条件,初始温度 $T(x,y,z,0)=T_0$,平均初含水率 $M(x,y,z,0)=M_0$,初始相对湿度 $H(x,y,z,0)=H_0$ (流场计算域和木材多孔介质内部)。

基于压力与速度耦合的隐式求解器进行模拟计算,采用 simple 算法改进后的 simplec 算法,使瞬态计算更易于收敛。由于通入湿空气为常密度常黏性流体,可视为不可压缩,该条件下速度边界条件即等效于质量流量边界条件。具体设置如下:定义理想湿空气模型 moist-air(空气和水蒸气的混合项)和木材固体材料。开启能量方程,设置 $k-\epsilon$ 两方程标准湍流模型,定义木材内部水的质量分数,近壁面选择标准壁面功能。计算域中,将木材部分设为多孔介质,并设置黏性阻力系数、惯性阻力系数和孔隙

率。固体内外设为流体通过的选项。进出口处选择速度边界条件,壁面设置为绝热壁面,保持默认的迎风格式,设置监测点与监测报告,初始化方法选择标准初始化。

3 引入进出风口流速配比的正交试验设计与数值模拟

3.1 试验设计

木材常规干燥中按照实际生产作业的要求除了有定速循环进风及自由排风工况外还涉及到强制进排风干燥过程的工况。这一过程影响木材中心干燥效率的几个重要因素有通入的气流温度(A),气流相对湿度(B),进出风口流速(C、D)。建立评价该干燥过程整体效率的 2 个参考指标是:1)平均 7 000 迭代步数的时间内强制进排风下观测木材中心相对湿度的下降值;2)数值上中心相对湿度达到最低值(保留 3 位有效数字)所用时间。本研究选取这 4 个因素作为模拟调整的参数,再通过正交试验,找到评价不同指标下的因素水平的影响次序后综合判断。参考相关文献[3,10,12]计算获得木材干燥的气流温湿度、气流速度、木材内部相关属性。木材属性见表 1,制定的正交试验因素水平见表 2。

表 1 木材属性

Table 1 Wood property table

温度 /℃	相对 湿度 /%	密度 /(kg· m ⁻³)	导热系数 /(W·m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热 /(J·kg ⁻¹ · K ⁻¹)	平均 初含 水率/%	孔 隙 率/%
25	94.1	720	0.17	2 310	22	56

表 2 正交试验因素水平

Table 2 Factor level table of orthogonal test

水平	因素			
	A/℃	B/%	C/(m·s ⁻¹)	D/(m·s ⁻¹)
1	68	25	1	1
2	70	30	2	2
3	73	15	3	3

3.2 仿真试验设置及结果

仿真设置(以多孔介质设置为例)和干燥区域流场流线图见图 3。

本研究利用 L9(3⁴)正交表进行数值模拟,L 为正交表,9 为试验次数,4 为因素数,3 为水平数,试验表见表 3。

3.3 试验结果直观分析

木材中心的温度和相对湿度变化也是可以表征干燥效果优劣的一个重要评判依据。尤其在人为干预的强制进排风情况下,对干燥效率的要求与控制就格外重要。表 4 与表 5 中的 K1、K2、K3 值对应

4 个因素的各个水平的试验指标之和, k_1,k_2,k_3 为 K_1,K_2,K_3 除以各水平对应试验次数的均值,最后再计算极差 R_j ,这样可以直观得出各因素作用下对试验结果的影响,极差越大对试验结果的影响越显著^[16-18]。由极差大小可以反映出影响木材中心湿度差值的主要因素为气流湿度。气流温度,进出口速度对木材中心湿度下降幅度影响较小。由图 3 和图 4、图 5 折线图得出,同种因素下木材中心相对湿度降幅最大所对应的水平和同种因素下中心湿度达

到极值所用时间最少对应的水平为最优参数,所以通过极差分析得出较优组合为 A2B3C3D3,正交试验表中没有出现此组合,命名编号为试验 10,在包含 B3 的试验中选取较优的试验 3、8 两组;反映达到中心湿度极值所用时间的主要因素为进口速度。出口速度、气流温度、气流湿度对达到极值的时间影响依次减小。从包含 C3 的组合中选取较优试验 5、7 两组,即通过极差选择的试验组合与上述正交表选出的试验再进行最终的比对筛选。

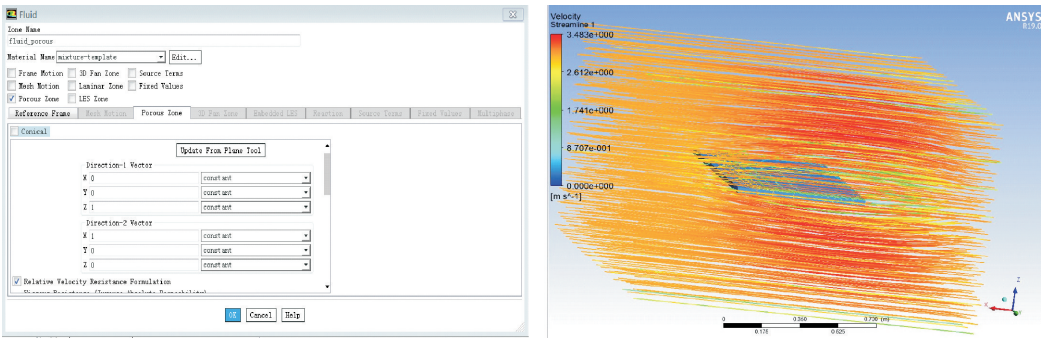


图 3 模拟部分参数设置和干燥流场流线

Fig. 3 Parameter setting diagram of simulation part and streamline diagram of drying flow field

表 3 正交试验数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results of orthogonal test

正交试验数值模拟结果					指标 1	指标 2
试验 编号	A /℃	B /%	C /(m·s ⁻¹)	D /(m·s ⁻¹)	中心湿度 差值	时间 (×617 ts)
1	68	25	1	1	0.722	683.1
2	70	30	2	1	0.675	476.3
3	73	15	3	1	0.824	302.4
4	73	30	1	2	0.672	578.6
5	70	25	3	2	0.724	255.1
6	68	15	2	2	0.822	434.5
7	68	30	3	3	0.674	257.4
8	70	15	1	3	0.824	379.3
9	73	25	2	3	0.724	436.6

表 4 试验直观分析(指标 1)

Table 4 Visual analysis table of test (index 1)

	A	B	C	D
K1	2.218	2.170	2.218	2.221
K2	2.223	2.021	2.221	2.218
K3	2.220	2.470	2.222	2.222
k1	0.739	0.723	0.739	0.740
k2	0.741	0.674	0.740	0.739
k3	0.740	0.823	0.741	0.741
R _j	0.002	0.149	0.002	0.002
R _j 大小	B>A=C=D			

3.3.1 中心湿热变化分析 由图 6、图 7 可见,观察木材中间截面的相对湿度、温度变化云图(以试验 10 为例),在瞬时通入热风时,干燥域内温度和木材

温度为常温状态且没有立刻增加,但干燥域内初始相对湿度较木材内部相对湿度较小,水蒸气分压较小,所以在短时间内木材有排湿的过程。随着热风的进入,干燥域内蒸气压与热风相叠加,木材开始吸湿到达极值时,强制进排风干燥开始,木材温度开始上升。图 7 中有木材升温从木材的顶角(迎风一侧)处开始,逐渐向内部乃至中心扩散;随着木材温度升高,中间区域的气液也向边缘、表面扩散排出,所以由图 6 和图 7 温湿度分布云图可反映中心含水率及其周围含水率的变化情况:中间截面含水率数值分布的整体减少直接影响了中心含水率数值的减少,中间区域与边缘形成含水率梯度。中心含水率随温湿度同步变化,即短时间内骤降然后上升最后再逐渐减少的状态,中心处升温排湿的快慢由引入进出口风速度配比下的综合因素而定。

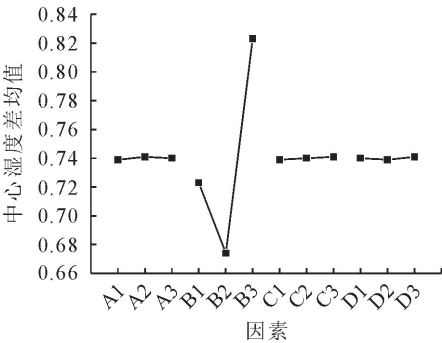


图 4 因素与中心湿度差的关系

Fig. 4 Relationship between factors and central humidity difference

表 5 试验直观分析(指标 2)

	A	B	C	D
K 1	1 375	1 374.8	1 641	1 461.8
K 2	1 110.7	1 312.3	1 347.4	1 268.2
K 3	1 317.6	1 116.2	814.9	1 073.3
k 1	458.3	458.3	547	487.3
k 2	370.2	437.4	449.1	422.7
k 3	439.2	372.1	271.6	357.8
R _j	88.1	86.2	275.4	129.5
R _j 大小	C>D>A>B			

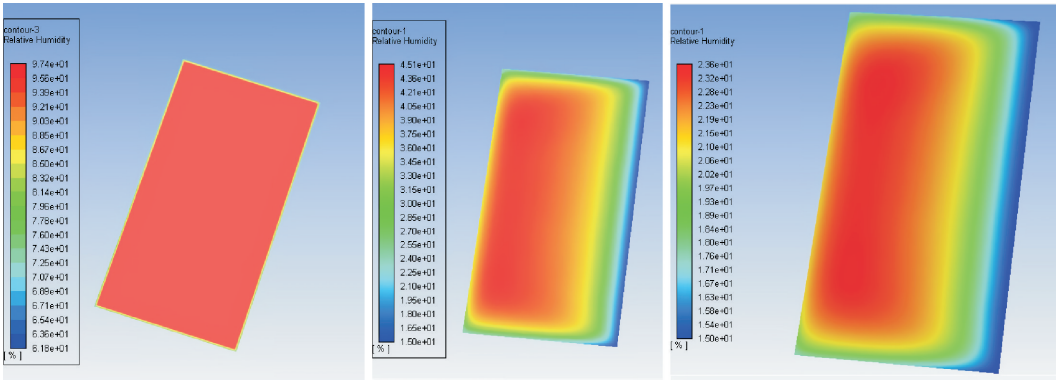


图 6 中间截面相对湿度变化云图(0—75 * 617ts)

Fig. 6 Cloud chart of relative humidity change on middle surface

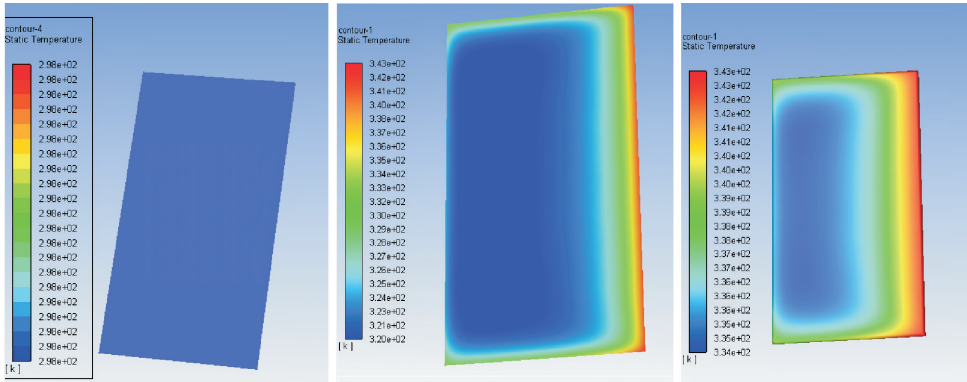


图 7 中间截面温度变化云图(0—75 * 617ts)

Fig. 7 Cloud chart of temperature change on middle surface

3.4 验证分析

通过参数组合验证中心含水率变化规律与温湿度变化规律,为干燥工艺参数的确定与更改提供参考,试验对比见表 6。

表 6 试验对比结果

试验 编号	A /℃	B /%	C /(m·s ⁻¹)	D /(m·s ⁻¹)	中心 湿度差	时间 /(×617 ts)
3	73	15	3	1	0.824	302.4
5	70	25	3	2	0.724	255.1
7	68	30	3	3	0.674	257.4
8	70	15	1	3	0.824	379.3
10	70	15	3	3	0.824	234.3

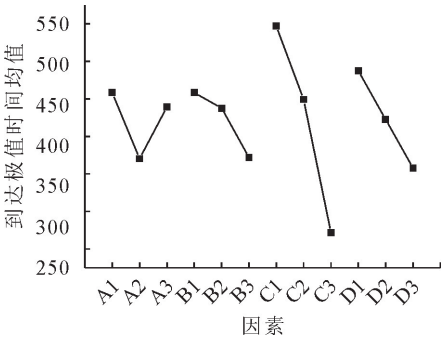


图 5 因素与极值时间关系

Fig. 5 Time relation diagram of factors and extremum

在本研究的试验中,引入多指标综合评价的最终目的是:选出最优的参数工况,提升木材中心干燥效率,即确保中心干燥时间用时较短,加大中心含水率和相对湿度的降幅。由式(10)可得出在参考 2 种指标的综合评价下的中心含水率变化情况。图 8 和图 9 为综合考虑 2 种指标下较优试验组的中心含水率变化(峰值后每次取间隔 250 时间步的数据计算)和木材中心温度变化图。

木材的含水率方程可由黑尔伍德-霍尔罗宾公式有:

$$M=\frac{1800}{W}\left(\frac{K_2H}{100-K_2H}+\frac{K_1K_2H}{100+K_1K_2H}\right)\tag{10}$$

$$W=216.9+0.019\ 61F+0.005\ 72F^2$$
$$K_1=3.73+0.036\ 42F-0.000\ 154\ 7F^2$$
$$K_2=0.674+0.001\ 053F-1.74\times10^{-6}F^2$$
$$F=\frac{9}{5}(T-273)+32$$

(11)

式中, M 为木材含水率/ $\%$, W,K_1,K_2 为含水率的相关系数, T 为木材温度/ K ; H 为木材内部的相对湿度/ $\%$, F 为华氏温度。

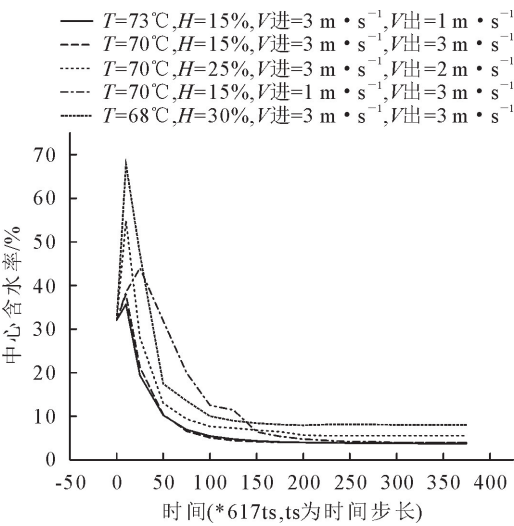


图 8 木材中心含水率变化

Fig. 8 Change chart of wood center moisture content

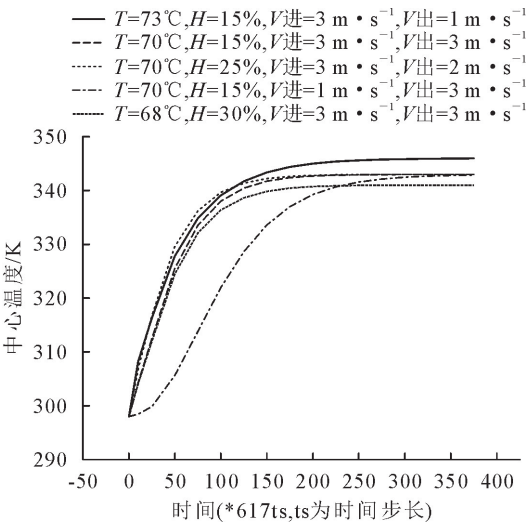


图 9 木材中心温度变化

Fig. 9 Temperature change chart of wood center

一般在只考虑自由排风的情况下,木材的干燥速率和干燥区域的循环风速,温湿度是呈正相关的。气流相对湿度越小,温度越高干燥速度越快^[19-22]。但涉及到强制进排风干燥过程的工况,且干燥木材的平均初含水率较低时,配置进出风口流速对干燥效率的影响十分重要。从图 9 看出,从中心升温效

率上可首先确定进口速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为最佳参数之一。从中心含水率图来看,含水率降幅最为明显的 2 组为试验 3 和试验 10,干燥达到相应平衡含水率时 2 组的中心处含水率分别为 3.77% 和 3.91% 。从干燥速率方面考虑,图 8 中的各组试验用时较为均衡,整体用时较少,干燥约 3 h 时($175\times617\text{ ts}$),试验 10 中心干燥速率约为试验 3 的 1 倍,3~6 h 时段,试验 3 和试验 10 的中心含水率降幅较小,干燥速率均较为缓慢,在实际干燥过程中都会加大系统的整体能耗,所以均不建议考虑该时段的干燥效率。综上所述,综合考虑到较短时间内中心含水率和相对湿度降低的幅度、升温所带来的综合能耗等情况下,选择试验 10 为本研究的最佳试验。

4 结论与讨论

本研究利用 fluent 有限体积法,引入气流温湿度和进出口风速配比的多因素水平参数,通过设计正交试验方法对单个木材进行多组试验的数值模拟,得到了该设计因素水平范围内的最佳工况,经极差选取和解析式计算分析后得出如下结论:

1)设计正交试验表经数值模拟,通过对通入气流不同温湿度、配置进出风口速度的组合来评估木材中心的干燥效率,最终得出气流温度 70°C 、湿度 15% 、进口速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、出口速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为最优因素水平的试验组合,中心干燥效率高。

2)数值模拟为实际木材干燥作业中控制干燥进程及相应控制系统的完善提供了参考,即通过改变通入气流的温度、相对湿度和平衡入口或出口气流流速使干燥速率增加,可有效降低中心含水率数值,缩短干燥周期,减少综合能耗。

3)运用仿真模拟来合理的配置多参数的干燥情况对一些干燥基准的完善或新干燥基准的制定提供了理论支持。三维模拟一定程度上揭示了木材中心温湿度及干燥区域中的流场情况,显示出了仿真计算的直观性。

4)数值模拟中对应的木材属性及温湿度参数是基于参考文献[12]中阔叶材的部分属性进行设置,因木材与干燥室种类属性和干燥基准较多,本研究不能完全反映流场和木材内部湿热变化情况,但借助计算机仿真进行该类型及相关的分析对实际干燥作业下调控干燥进程是有理论意义的。

参考文献:

[1] 孙丽萍,张少如,张任甫,等. 多参数智能木材干燥监控系统实现[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):266-271,286.
SUN L P,ZHANG S R,ZHANG R F,et al. A multi-paramete-

ter intelligent monitor and control system for wood drying[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 266-271, 286. (in Chinese)

[2] 洪工画, 孟阳, 高建民, 等. 计算流体力学数值仿真技术及其在木材干燥研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2017, 30(4): 47-50.

HONG G H, MENG Y, GAO J M, *et al.* CFD numerical simulation technology and its application in wood drying research [J]. World Forestry Research, 2017, 30(4): 47-50. (in Chinese)

[3] 孟兆新, 于彪, 李尚, 等. 基于热流耦合的木材干燥窑风速温度分布解算[J]. 森林工程, 2015, 31(1): 49-53.

[4] 张杨, 吴哲, 曹军. 基于计算流体力学的木材干燥窑内三维流动的数值模拟[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(12): 135-140.

ZHANG Y, WU Z, CAO J. Numerical simulation of three dimensional flow field in wood drying kiln based on computational fluid dynamics[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(12): 135-140. (in Chinese)

[5] 张璧光. 实用木材干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[6] YOUNSI R, KOCAEFE D, PONCSAK S, *et al.* CFD modeling and experimental validation of heat and mass transfer in wood poles subjected to high temperatures; a conjugate approach[J]. Heat Mass Transfer, 2008, 44: 1497-1509.

[7] WILTON PEREIRA DA SILVA, LAERSON DUARTE DE SILVA, CLEIDE M D P S E SILVA *et al.* Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature[J]. Wood Sci. Technol., 2011, 45: 787-800.

[8] 江帆, 徐勇程, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.

[9] 牟国良, 张学军, 史增录. 结合 Flunet 仿真软件的循环式干燥机改进设计研究[J]. 浙江农林学报, 2015, 27(4): 684-689.

MOU G L, ZHANG X J, SHI Z L. Research on the improved design of circulating dryer combined with fluent simulation software[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry, 2015, 27(4): 684-689. (in Chinese)

[10] 孟兆新. 木材干燥窑的多场耦合建模仿真与优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[11] RINDANG A, PANGGABEAN S, WULANDARI F. CFD analysis of temperature drying chamber at rotary dryer with combined energy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1155: 1-6.

[12] 何正斌, 伊松林. 木材干燥理论[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.

[13] REMKI B, ABAHRI K, TAHLAITI M, *et al.* Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 57: 135-141.

[14] ZHAO Y K, WANG Z H, HIDA I, *et al.* Studies on pre-treatment by compression for wood drying I: effects of compression ratio, compression direction and compression speed on the reduction of moisture content in wood[J]. J. Wood Sci., 2015, 61: 113-119.

[15] 张英杰, 窦延光. 毛白杨防腐处理材干燥工艺[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 194-197.

ZHANG Y J, DOU Y G. Drying technology for preservative-treated *Populus tomentosa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 194-197. (in Chinese)

[16] ZADIN V, KASEMÄGI H, VALDNA V, *et al.* Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 267: 465-475.

[17] EITELBERGER J, SVENSSON S, DE BOREST K. Theory of transport processes in wood below the fiber saturation point. Physical background on the microscale and its macroscopic description[J]. Holzforschung, 2011, 65: 337-342.

[18] 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.

YU Y, LU Y, LI R L. Parameter optimization of dryer based on fluent [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2019, 47(13): 140-143. (in Chinese)

[19] 赵庚, 陈广元. 基于 Fluent 的节能型干燥窑内部结构优化研究[J]. 森林工程, 2015, 31(3): 47-53.

ZHAO G, CHEN G Y. Research on optimization of internal structure of energy-saving drying kiln based on Yang Xuefluent[J]. Forest Engineering, 2015, 31(3): 47-53. (in Chinese)

[20] 茹煜, 贾志成, 郁金. 基于 Fluent 软件的木材干燥窑内部流场分析研究[J]. 木材加工机械, 2010, 21(4): 12-15.

RU Y, JIA Z C, YU J. Flow field analysis of wood drying kiln based on fluent [J]. Wood Processing Machinery, 2010, 21(4): 12-15. (in Chinese)

[21] 贾潇然, 刘珊杉, 周雅菲, 等. 循环风速对桦木干燥速度影响的研究[J]. 森林工程, 2019, 35(6): 42-47.

JIA X R, LIU S S, ZHOU Y F, *et al.* Effect of circulating wind speed on drying rate of birch[J]. Forest Engineering 2019, 35(6): 42-47. (in Chinese)

[22] 孟兆新, 李尚, 肖定福, 等. 木材干燥窑内部流场改进与风速均匀性研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 247-251.

MENG Z X, LI S, XIAO D F, *et al.* Improvement of flow field and uniformity of wind speed in wood drying kiln [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 247-251. (in Chinese)