

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.01.004

木材热风干燥室空气流场均匀性研究

孙慧慧, 严平, 范乐羊, 曹伟武

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对木材在常规木材热风干燥室存在板材开裂、变形翘曲, 板材最终含水率不均匀等问题, 设计了可调控引导送风罩和移动调节装置; 转动定位螺母调节导流舌板位置可改变出风口大小; 驱动电机带动滚轮转动, 可实现风机支撑框架整体沿 X 方向移动自动调节; 利用计算流体力学 (CFD) 软件 SC/Tetra 对优化设计前后的干燥室内空气流场进行数值模拟计算, 并对气流速度特性进行测试分析。结果表明优化设计后的干燥室沿板材堆垛高度方向上各层气流速度偏差可控制在 $\pm 10\%$ 以内; 空气流场分布的均匀性提高了 70%。优化后的干燥室木材干燥质量和干燥效率得到明显提升。

关键词:木材干燥室; 空气流场; 均匀性; 移动调节装置; 可调控引导送风罩; 数值模拟

中图分类号: TS65; TK173

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2016)01-0014-06

Study on Uniformity of Air Flow Field in Hot Air Wood Drying Kiln

SUN Huihui, YAN Ping, FAN Leyang CAO Weiwu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of plate cracking and warping deformation, final uneven moisture content of plate of drying in the conventional hot air wood drying kiln, we designed adjustable guide air cover and mobile adjustment device of the fan. The position of the guide plate can be adjusted by the rotating the positioning nut to change the outlet size. The wheel can be drive by the driving motor, resulting in the automatic adjustment of the supporting frame of the fan along the X direction. Adopted Computational Fluid Dynamics (CFD) software SC/Tetra to numerical simulation calculate and analyze the air flow field in the before and after drying kiln design optimization, then measured and analyzed characteristics of the air velocity. The airflow velocity deviation of the layers can be controlled within about $\pm 10\%$. The uniformity of air flow field distribution can be improved by 70%. After the adoption of new technology optimization, the drying kiln improves the drying quality and efficiency.

Key words: wood drying kiln; air flow field; uniformity; mobile adjustment device; adjustable guide air cover; numerical simulation

干燥是木材加工过程中能耗最大的工序, 其能耗占企业总能耗的 40% ~ 70%^[1-2]。热风干燥室是木材加工企业使用最多的干燥设备, 干燥室内的干燥介质热空气流的循环特性, 尤其是循环气流速度分布的均匀性是影响干燥质量的重要因素之一, 也是衡量干燥设备性能的主要技术指标^[3-4]。因此, 创新设计干燥室并将其与干燥工艺配合使用, 改善干燥室内循环气流速度的均匀性, 对提升木材干燥设备的性能有重大的意义。

1 常规干燥室存在的缺陷及原因

1.1 常规干燥室工作原理分析

常规热风干燥室如图 1 所示, 湿板材堆垛装入干燥室内进行干燥时, 堆垛各层板材之间形成水平气道。当风机 7 启动时, 空气流经过右侧散热器 4 加热升温, 经 90°转向进入右侧竖直风道, 再经 90°转向进入板材间水平气道。热空气流通过水平气道时吸收板材中析出的水分而湿度增加、温度降低, 然后通过左侧竖直风

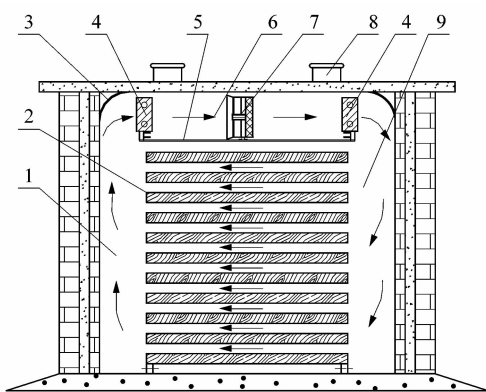
收稿日期: 2015-08-15; 修回日期: 2015-10-21

基金项目: 上海市“助推计划”项目 (QT1311GC); 上海市教育委员会产学研项目 (B-8913-13-010)。

作者简介: 孙慧慧 (1989), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为动力机械设计与制造、节能装置设计及自动控制。

E-mail: 18317130086@163.com

道向上流动,由左侧散热器加热返回风机进风口,空气流完成一个顺时针循环。根据干燥工艺的要求,间隔一段时间风机反转,形成逆时针循环气流。在干燥初期,板材中水分较多,此时应打开进、排气道 8,将部分高湿度热空气排放至室外带走板材中析出的水分,同时引入室外干空气,使循环气流始终保持一定干度,便于板材干燥。由此可见,要使板材堆垛各处板材均匀干燥,循环气流速度的均匀性是关键。但在实际生产中存在一些问题:①板材堆垛左、右上角部分板材经常出现开裂、变形翘曲^[5];②板材堆垛沿高度方向各层板材最终含水率不均匀,干燥质量差^[6-7]。



1—左侧竖直风道;2—板材堆垛;3—圆弧导流板;4—散热器;5—槽钢导轨;6—水平气道;7—风机;8—进、排气道;9—右侧竖直风道。

图1 常规热风干燥室结构图

Figure 1 Structure map of conventional hot air drying kiln

1.2 常规干燥室内气流数值模拟与结果分析

1.2.1 物理模型和求解设置

为了找到实际生产中常规热风干燥室出现问题的原因,本文采用计算流体动力学(CFD)软件 SC/Tetra 对干燥作业时干燥室内空气流速进行数值模拟,按照实验室的干燥室 1:1 建模,干燥室模型尺寸为:沿 X 方向宽 4.6 m,沿 Y 方向长 3.8 m,沿 Z 方向高 3.2 m。热风干燥室内板材堆垛和风机位置如图 2 所示,干燥室上部配置 2 台风机,每台功率 1.1 kW,风机进风口和出风口都是直径为 420 mm 圆形,风机支撑框架置于中间位置,板材堆垛中单片板材厚度为 50 mm,各片板材间放置的隔条厚度为 40 mm,整个板材堆垛高 2 200 mm。

在利用 SC/Tetra 的前处理软件时,设置的边界条件为:风机轴流风速为 2 m/s,风机进风口采用压力边界条件,干燥室壁和板材表面采用无滑绝热壁面边界条件,选取 Realizable κ - ε 湍流模型,关闭全部进、排

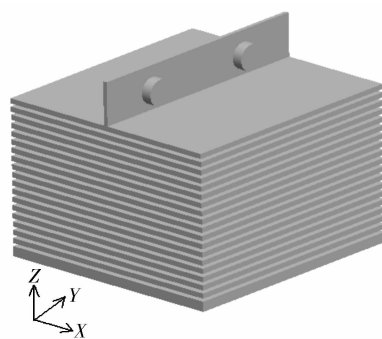


图2 常规干燥室内部结构图

Figure 2 Internal structure map of conventional drying kiln

气道。网格划分后如图 3 所示,最后,把网格文件和边界条件同时导入到 SC/Tetra 求解器中进行计算。

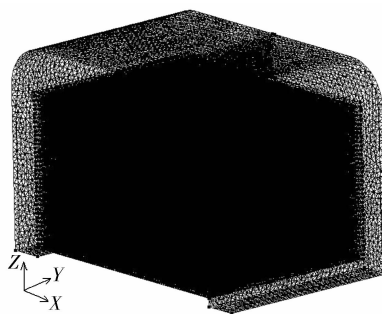


图3 常规干燥室网格划分结果

Figure 3 Mesh generation results of conventional drying kiln

1.2.2 气流数值模拟结果

常规热风干燥室内的空气流速度场分布如图 4 所示。从图中看出:①风机出风口的气流发散、送风速度迅速降低导致气流下倾,部分气流到达右侧竖直风道之前就与顶层板材水平面接触碰撞,部分直接射至竖直风道的外侧壁上,气流在水平-垂直转向处紊乱堆积无法形成光滑顺畅射流,使竖直风道上方产生涡流,这就导致了板材堆垛左、右上角部分板材经常出现开裂、变形翘曲;②竖直风道上方产生的涡流影响了堆垛上层水平气道的风速,使板材堆垛沿高度方向的空气流速分布不均匀,这就导致了板材堆垛沿高度方向各层板材最终含水率不均匀,干燥质量差。

2 热风干燥室优化设计

为了改善常规干燥室存在板材开裂、变形翘曲,板材最终含水率不均匀的实际问题。采用新技术对常规干燥室进行优化设计,如图 5 所示。图中设置了可控引导送风罩 11,调节风机出风口空气流的速度;并设置了风机移动调节装置 10 使风机出风口气流的射

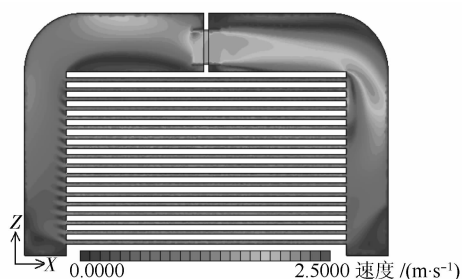
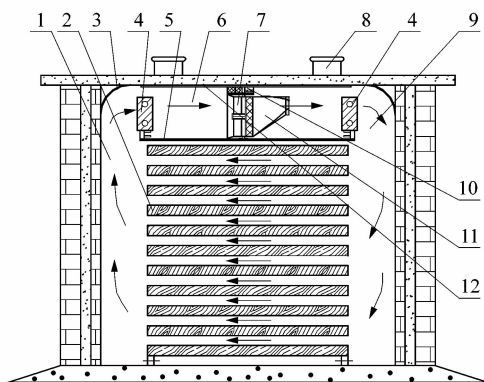


图4 常规干燥室速度场分布图

Figure 4 Velocity field distribution map of conventional drying kiln

程与风机至竖直风道之间的距离相匹配,使气流射流到达竖直风道上方正好沿干燥室顶角的圆弧形导流板90°转入竖直风道,使送风气流的射流顺畅、分布均匀。



1—左侧竖直风道;2—板材堆垛;3—圆弧导流板;4—散热器;5—槽钢导轨;6—水平气道;7—风机;8—进、排气道;9—右侧竖直风道;10—移动调节装置;11—可调控引导送风罩;12—工字钢导轨。

图5 优化设计后的干燥室结构图

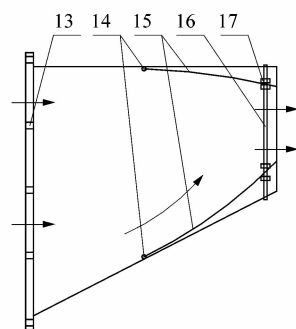
Figure 5 Structure map of after-optimization design drying kiln

2.1 可调控引导送风罩

如图6所示,可调控引导送风罩是一个圆形变矩形的异形变径壳体,呈倒喇叭筒形状。送风罩底座圆形外圈螺栓连接于风机的送风端口,其矩形出风口内设计上、下2块弧形导流舌板15;导流舌板的根部以铰链14铰接于引导送风罩的内壁上;在矩形出风口两侧,设置定位螺杆16,根据不同干燥工艺要求,通过转动定位螺母17调节导流舌板位置,改变出风口截面面积和射流角度以控制气流的速度,从而使气流以贴附射流形式水平射出,可调控引导送风罩三维视图如图7所示。

2.2 风机移动调节装置

风机移动调节装置如图8所示,2台风机7置于支撑框架18上,支撑框架上端右侧安装绕线式电动机



13—螺栓孔;14—铰链;15—弧形导流舌片;16—定位螺杆;17—定位螺母。

图6 可调控引导送风罩二维平面图

Figure 6 Two-dimensional plan map of adjustable air guide cover

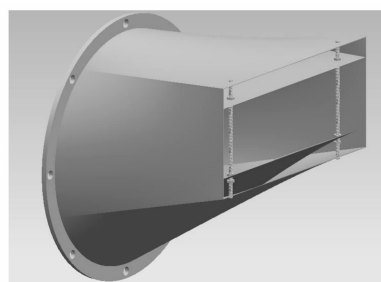
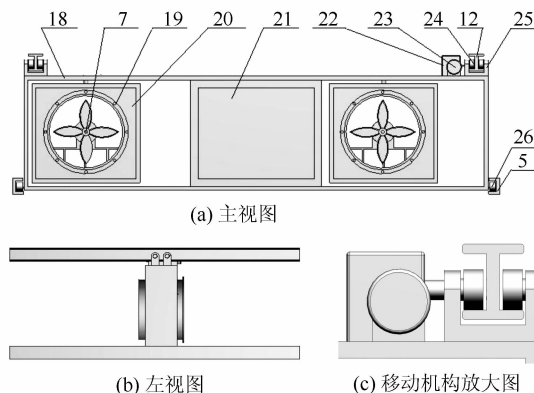


图7 可调控引导送风罩三维视图

Figure 7 Three-dimensional view of adjustable air guide cover

23,电动机通过减速箱22连接滚轮24,滚轮置于工字钢导轨12内。驱动电机带动滚轮转动,可实现风机支撑框架整体沿X方向移动自动调节,使风机出风口空气流的射程和风机与竖直风道之间距离相匹配。



5—槽钢导轨;7—风机;12—工字钢导轨;18—支撑框架;19—风机罩;20—风机架;21—隔板;22—减速箱;23—绕线式驱动电机;24—滚轮;25—吊耳;26—滑轮。

图8 移动调节装置视图

Figure 8 View of mobile adjustment device

2.3 优化设计后气流数值模拟与结果分析

2.3.1 物理模型和求解设置

在干燥室内设置了可控引导送风罩和风机移动调节装置,而后对其进行建模,干燥室内木材堆垛和风机位置如图9所示。风机进风口是直径为420 mm圆形,出风口设置为宽为450 mm,高为300 mm的矩形,矩形出风口面积小于常规干燥室的圆形出风口面积,在风机功率不变的情况下,为实现送风气流的射程与风机至竖直风道之间的距离相匹配,开启风机移动调节装置把支撑框架整体沿 X 方向移动一段合适距离;并在风机出风口设置了可控引导送风罩,其他设置的物理模型尺寸和求解条件与常规热风干燥室数值模拟相同。

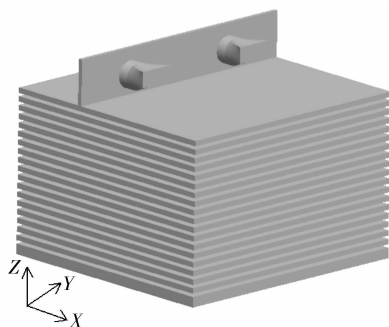


图9 优化设计后干燥室内部结构图

Figure 9 Internal structure map of after-optimization design drying kiln

2.3.2 气流数值模拟结果

通过风机移动调节装置合理调节风机位置,并在风机出风口设置了可控引导送风罩,干燥室内速度场分布如图10所示。从图中看出:①引导送风罩出口的气流速度增加,形成的射流能光滑顺畅地流到竖直风道内,水平-垂直转向处的涡流消失,板材堆垛上方4层水平气道的气流速度提高,沿木材堆垛高度方向的气流速度趋向均匀;②优化设计后的气流射程、速度可以调控,并使气流射程与风机至竖直风道之间的距离相匹配,形成光滑顺畅的射流,消除气流碰撞和涡流等不利因素。

3 气流场均匀性分析

为了更好地验证2套新装置对提高干燥室内空气流均匀性的效果,分别对图4、图10对应的优化设计前、后干燥室内空气流速特性进行测试^[8]。在干燥室内沿板材堆垛高度方向从上到下18层水平气道内各布置3个水平测点,各层水平测点依次布置在水平气道进风口A、中间B、出风口C处,各测点位置如图

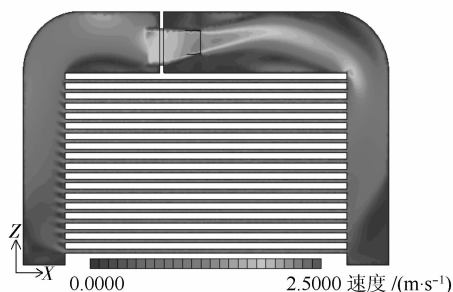


图10 优化设计后干燥室速度场分布图

Figure 10 Velocity field distribution map of after-optimization design drying kiln

11所示。在SC/Tetra后处理软件SC/post中运用Pick命令分别测得各水平气道测点的风速。

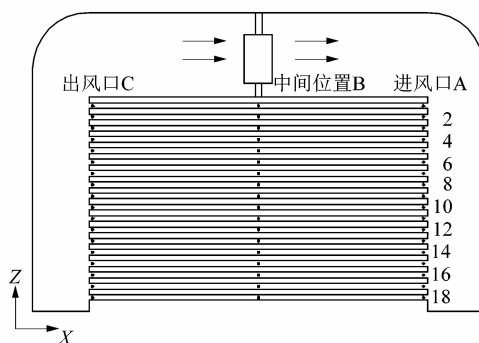


图11 竖直测点分布图

Figure 11 Distribution map of vertical measuring points

常规干燥室干燥时,统计结果如表1和表2所示,沿板材堆垛高度方向各层水平气道A、B、C3点的气流平均速度范围为0.49~1.46 m/s,所有测点气流总平均风速为1.20 m/s,其中1~4层水平气道气流平均速度范围为0.49~0.95 m/s,5~18层范围为1.30~1.46 m/s,各水平气道气流速度总均方差为0.30 m/s,总变异系数为25%;优化设计后的干燥室干燥时,统计结果如表3和表4所示,各层水平气道的气流平均速度范围为0.89~1.26 m/s,所有测点气流总平均风速为1.19 m/s,沿板材堆垛高度方向各水平气道气流速度总均方差为0.09 m/s,总变异系数为7%。常规和优化设计后的干燥室内各层测点气流平均速度分布如图12所示,气流速度特性比较如表5所示。综合表1~5和图12可以清晰地发现:优化设计后的干燥室沿板材堆垛高度方向上各层水平气道气流速度总均方差降低了0.21 m/s,总变异系数降低了18%,各层气流速度偏差可控制在约 $\pm 10\%$ 以内。说明在设置了可控引导送风罩和风机移动调节装置后各层送风气流

速度差异变小, 气流速度趋于均匀, 均匀性提高了 70%。可见, 优化设计的 2 套装置比较理想地改善了干燥室内气流速度的均匀性。

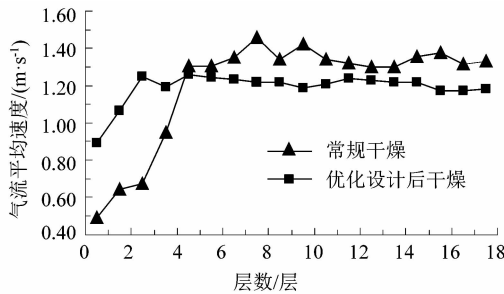


图 12 各层测点气流平均速度分布图

Figure 12 Airflow average velocity distribution map of each measuring points

表 1 常规干燥室内各测点气流速度

Table 1 Airflow velocity of each measuring points of the conventional drying kiln $m \cdot s^{-1}$

层数	A	B	C	3 测点速度平均值	均方差
1	0.62	0.41	0.43	0.49	0.12
2	0.65	0.63	0.65	0.64	0.01
3	0.69	0.66	0.67	0.67	0.02
4	0.77	0.97	1.10	0.95	0.17
5	1.21	1.32	1.39	1.31	0.09
6	1.26	1.38	1.27	1.30	0.07
7	1.29	1.36	1.40	1.35	0.06
8	1.44	1.46	1.47	1.46	0.02
9	1.36	1.32	1.35	1.34	0.02
10	1.43	1.41	1.42	1.42	0.01
11	1.44	1.37	1.21	1.34	0.12
12	1.31	1.23	1.42	1.32	0.10
13	1.28	1.27	1.35	1.30	0.04
14	1.32	1.40	1.18	1.30	0.11
15	1.29	1.37	1.41	1.36	0.06
16	1.37	1.35	1.41	1.38	0.03
17	1.25	1.32	1.38	1.32	0.07
18	1.34	1.36	1.29	1.33	0.04

表 5 气流速度特性比较

Table 5 Comparative statement of airflow velocity characteristics

特性指标	气流速度/($m \cdot s^{-1}$)			均方差/($m \cdot s^{-1}$)			变异系数/%		
	最小值	最大值	总变异系数	最小值	最大值	总变异系数	最小值	最大值	总变异系数
常规干燥(S)	0.41	1.47	1.20	0.28	0.31	0.30	24.00	26.00	25.00
优化设计后干燥(S')	0.78	1.28	1.19	0.07	0.11	0.09	5.00	9.00	7.00
$\Delta(S' - S)$	0.37	-0.19	-0.01	-0.21	-0.20	-0.21	-19.00	-17.00	-18.00

4 结论

为了改善常规热风干燥室存在板材开裂、变形翘曲, 板材最终含水率不均匀的实际问题, 提高干燥室内送风气流速度的均匀性, 本文设计了可调控引导送风罩和风机移动调节装置, 并采用计算流体动力学

表 2 各测点平均速度和总均方差

Table 2 Average speed and total mean

square error of measuring points $m \cdot s^{-1}$

测点位置	18 层平均速度	总均方差
A	1.18	0.28
B	1.20	0.31
C	1.21	0.31

表 3 优化设计后的干燥室内各测点气流速度

Table 3 Airflow velocity of each measuring points of after-optimization design drying kiln $m \cdot s^{-1}$

层数	A	B	C	3 测点速度平均值	均方差
1	1.05	0.78	0.85	0.89	0.14
2	1.00	1.10	1.10	1.07	0.06
3	1.25	1.23	1.27	1.25	0.02
4	1.17	1.21	1.20	1.19	0.02
5	1.28	1.25	1.25	1.26	0.02
6	1.19	1.26	1.28	1.24	0.05
7	1.17	1.26	1.27	1.23	0.06
8	1.19	1.23	1.24	1.22	0.03
9	1.18	1.22	1.25	1.22	0.04
10	1.13	1.22	1.21	1.19	0.05
11	1.20	1.23	1.19	1.21	0.02
12	1.24	1.23	1.24	1.24	0.01
13	1.24	1.21	1.24	1.23	0.02
14	1.20	1.24	1.21	1.22	0.02
15	1.22	1.23	1.20	1.22	0.02
16	1.13	1.21	1.17	1.17	0.04
17	1.17	1.15	1.20	1.17	0.03
18	1.14	1.21	1.20	1.18	0.04

表 4 优化后各测点平均速度和总均方差

Table 4 Average speed and total mean square

error of measuring points after optimization $m \cdot s^{-1}$

测点位置	18 层平均速度	总均方差
A	1.18	0.07
B	1.19	0.11
C	1.20	0.10

(CFD)软件 SC/Tetra 对干燥作业时干燥室内空气流速进行数值模拟, 分析得到如下结果:

1) 可调控引导送风罩可以调节空气流速, 风机移动调节装置可以自动调节风机支撑框架整体沿 X 方

(下转第 22 页)