

应用技术

顶风机型木材干燥窑气流循环的优化设计

祁亮, 严平, 赵晔玫, 曹伟武

(上海工程技术大学, 上海 201620)

摘要: 对顶风机型木材干燥窑气流循环不均匀的原因进行了分析,为解决这一问题,在干燥窑顶部气流转向处,安装水平-垂直导流装置,同时在垂直风道一侧设置水平可调导流装置。利用 Sc/Tetra 软件进行模拟分析的结果表明,窑内气流速度提高,速度场分布的均匀性改善,锯材间隙的平均风速及干燥均匀性提高,提高了生产效率。

关键词: 木材干燥; 气流循环; 导流装置; 顶风机型干燥窑

中图分类号: TS652; S781.71 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2015)04-0031-05

Airflow Circulation Design for Roof Ventilated Wood Drying Kilns

QI Liang, YAN Ping, ZHAO Ye-mei, CAO Wei-wu

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

Abstract: To improve uneven airflow circulation in roof ventilated wood drying kilns, the authors designed two devices. One had horizontal-vertical airflow guidance devices which were installed on the top corner of the kilns, and the other had an adjustable vertical airflow guidance device which was set on the side airway in the kilns. The results showed that average airflow speed and uniform velocity in the air distribution field in the kilns were improved significantly with a shorter drying cycle and better production efficiency.

Key words: wood drying; airflow circulation; airflow guidance devices; roof ventilator kilns

在木材干燥生产中,发达国家能源成本仅占干燥总成本的 30%左右,而我国占 67%以上^[1-2],我国木材干燥的节能潜力巨大。

顶风机型木材干燥窑因具有技术成熟、适应性强等诸多优点,成为国内外最常用的木材干燥窑,现存主要问题是沿材堆高度方向空气难以均匀分配。循环风速的高低及均匀性,直接决定了窑内温度场、湿度场的均匀性,进而影响材堆整体的干燥均匀度、干燥缺陷的产生、干燥周期等^[3-4]。因此,改善顶风机型干燥窑的气流循环特性,是木材干燥设备技术创新和节能减排的有效途径之一,对提高锯材产品质量、企

业生产效率以及经济效益,具有十分重要的指导作用。

鉴于此,针对顶风机型干燥窑内材堆干燥不均匀的现象,笔者提出并设计了 2 种导流装置,可有效帮助生产企业进行节能改造,并提高锯材干燥质量、缩短干燥周期。

1 顶风机型干燥窑存在的问题与解决方法

1.1 原因分析

图 1 为常规顶风机型干燥窑的结构示意图。

如图 1 所示,在干燥窑中,锯材用隔条隔开,形成带有多个水平间隙的材堆,干燥窑顶部的风机送出的空气流经加热器升温,热空气沿干燥窑顶部由水平方向转向,进入右侧垂直风道,再逐步分流转向流经材

收稿日期: 2014-10-10; 修改日期: 2015-06-03
基金项目: 上海市大学生创新活动计划项目(cs1301001)。
作者简介: 祁亮(1989—), 男, 上海工程技术大学本科生。
责任作者: 严平, 女, 上海工程技术大学教授级高工。

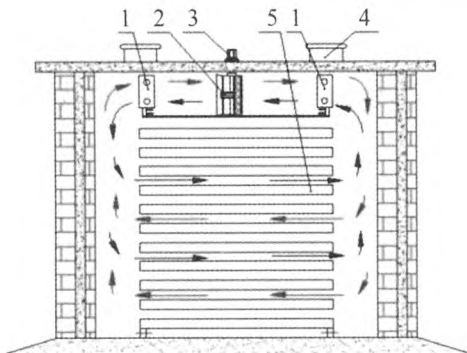


图 1 常规顶风机型干燥窑结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of a conventional roof ventilator wood drying kiln

堆间的各水平间隙,将热量传递给锯材。随着干燥时间延长,热空气气流温度逐渐降低、湿度逐渐增大,湿空气通过左侧的垂直风道上升,经加热器加热后返回到风机的吸风口,此时完成一个顺时针循环(如顺时针箭头所示)。

根据窑内湿度要求,部分湿空气通过干燥窑顶部右侧的排湿窗排出,同时等量的外部干空气通过顶部左侧的排湿窗进入干燥窑,与窑内的热空气混合后继续循环。

为保证材堆干燥的均匀性,通常采用空气流顺时针循环 2~3 h 后,通过风机同步回转装置,将多台风机同步回转 180°,再逆时针循环 2~3 h(如逆时针箭头所示),空气流反复循环,直至达到锯材的终含水率要求^[5-6]。

分析沿材堆高度方向,导致空气流速不均匀的原因如下:

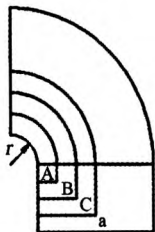
1) 空气流从干燥窑顶部沿水平方向转向进入右侧或左侧垂直风道的过程中,由于离心力作用,垂直风道上部外侧壁面处的气流密度较大,压力较高,而其内侧靠近材堆处的气流密度则较小,压力较低,因而转向拐角内侧会形成涡流,导致转向气流在垂直风道中分布不均匀。

2) 空气流在垂直风道中,沿材堆高度方向向下流动时,随着气流不断向材堆水平间隙中分流,垂直风道中的气流速度逐渐减小,则动压力逐渐降低,静压力逐渐升高。因此,材堆下方水平间隙中的气流量大于上方,从而导致沿材堆高度方向上风速分布不均匀。

1.2 导流装置的工作原理

1.2.1 水平-垂直转向导流装置

水平-垂直转向导流装置由 2 块或 2 块以上的导流弯板组成,将其安装在干燥窑顶部转角处,引导沿干燥窑顶部水平流动的气流平滑转向,进入垂直风道(图 2)。导流弯板的片数需依据干燥窑垂直风道的宽度确定,各片的间隔距离依据等流量原则,按照表 1 中的参数进行设定。



A、B、C均表示距离材堆的距离; a为垂直风道宽度; 下同

图 2 水平-垂直转向导流弯板位置示意图
Fig. 2 Position of horizontal-vertical airflow guidance curve plate

表 1 内外弧形导流弯板片数及位置设置
Tab. 1 Number and positions of curve plate

垂直风道 宽度/mm	导流片数	导流片位置		
		A	B	C
500~1000	1	0.33a		
1000~1500	2	0.25a	0.5a	
>1500	3	0.125a	0.33a	0.5a

单块导流弯板由铝合金材料制成,其曲面形式常为内外同心弧型,这种导流弯板因其导流效果佳而常被使用。一般而言,弯板内弧的曲率半径 $r=0.5a$ (a 为垂直风道宽度),外弧的曲率半径不宜小于 $(1.5\sim 2.0)a$ ^[7-8],导流弯板的长度与水平风道宽度一致,弯板迎风边缘应光滑。

安装水平-垂直导流装置后的干燥窑结构,如图 3 所示。

1.2.2 水平可调导流装置

为解决垂直风道中空气流沿材堆水平间隙流动时,流量分配不均匀的问题,笔者设计了水平可调导流装置,其结构组成见图 4。该装置的每个水平出口处均安装了一块导流板,导流板的长度自上而下逐渐加长,使得在垂直风道中自上而下不断被分流的空气流,在一个流通截面逐渐缩小的流道中流动,保证了流经气流的压力不变,从而实现了空气流在每个水平出口的风速相等,使流经材堆每个水平间隙的空

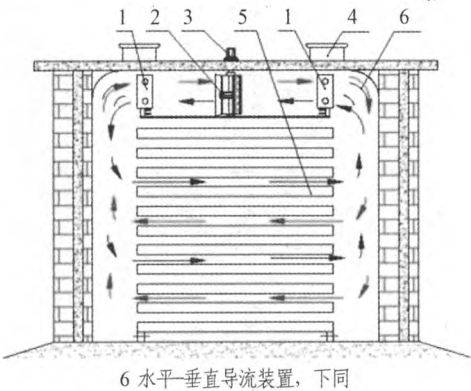


图 3 安装水平-垂直导流装置的干燥窑
Fig. 3 Structure of a wood drying kiln with horizontal-vertical airflow guidance devices

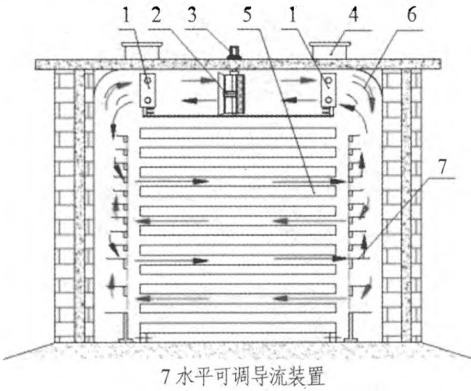


图 5 同时安装水平-垂直和水平可调导流装置的干燥窑
Fig. 5 Structure of a wood kiln with two airflow guidance devices

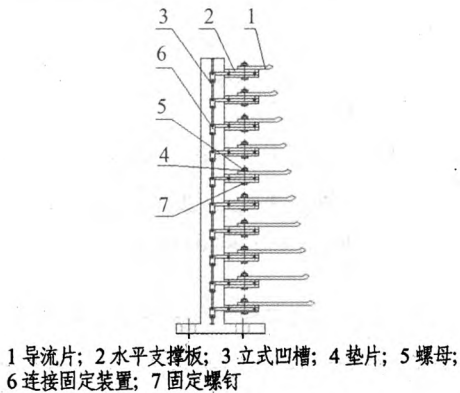


图 4 水平可调导流装置示意图
Fig. 4 Structure of adjustable vertical airflow guidance devices

气流量均匀。安装时，每个水平出风口应严格对准材堆之间的水平间隙风道。

每一片水平导流片可以水平移动，以调节导流片伸入垂直风道的深度，从而控制出口风速；导流片的末端设计成上翘的圆弧形，以更好地引导气流。导流片的数量取决于材堆间隙的风道数，保证流经每一层锯材上下表面的气流风速相同，从而使各层锯材的干燥速率趋于一致，实现均匀干燥。

水平可调导流装置在干燥窑中的安装示意图，如图 5 所示。

上述干燥工艺是针对同树种、同厚度的锯材干燥而设计。另外，也可根据不同树种或者锯材厚度，通过调节水平导流片间距，对垂直风道中的气流进行不均匀分割，个性化设定各间隙气流的风量、风压，形成多种风速，实现同一窑内多种厚度规格和多树种锯材的同时干燥，提高干燥窑的适应性和干燥效率。

2 模拟验证试验

为了探究安装导流装置干燥窑内气流的优化效果，笔者采用 CFD(Computational fluid dynamics)数值模拟方法^[9]进行验证。

设定干燥窑的长度 4.3 m、宽度 2.6 m、高度 3.1 m，配置 5 台风机；锯材厚度 50 mm，隔条厚度 50 mm，干燥窑垂直风道的宽度 $a=700$ mm，选用圆弧导流弯板，板厚 2 mm。曲率半径按照表 1 和风道平面尺寸计算，在干燥窑左右两侧顶部，分别设置 1 片导流弯板，图 2 的 A 位置处导流片曲率半径为 581 mm；同时对干燥窑顶部左右两侧直角处做平滑处理。

利用 Sc/Tetra 处理软件，按照上述参数建立干燥窑的二维有限元模型，并设置边界条件：风机出口采用速度入口边界条件，风速 2 m/s；风机进口压力边界条件，静压为 0；干燥窑四壁采用无滑移绝热壁面边界条件；其他参数保持软件默认。选择 k-εRealizable 模型^[9]进行模拟迭代计算，然后进行网格划分，网格数量约为 100 万，且网格质量满足计算要求^[10-11]，将划分好的网格导入 Sc/Tetra 软件中。为便于计算，假设 4 个排湿窗全部为关闭状态。

2.1 窑内气流速度场分布分析

安装导流装置前后，窑内的空气流速度场分布，如图 6 所示。

从图 6a 看出，改造前窑内的气流在水平-垂直转向处存在涡流，最高一层锯材气道的风速较低，在材堆高度方向上的气流速度分布不均匀。

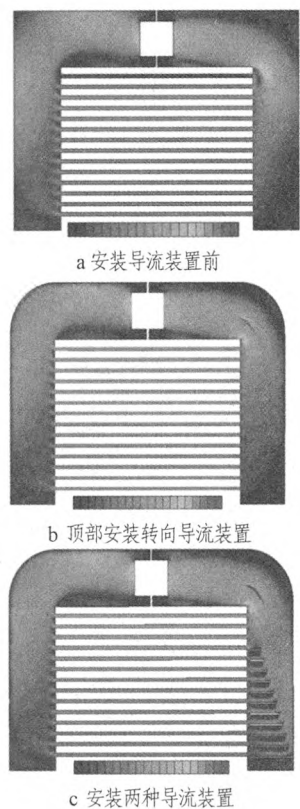


图 6 干燥窑内的气流速度场分布
Fig. 6 Velocity field distribution of the kilns with and without an air guidance device

图 6b 中,安装水平-垂直导流装置后,气流在水平-垂直转向时左上角处的涡流消失,最高一层锯材气道的风速明显提高,沿材堆高度方向的风速趋于一致。说明干燥窑左上角靠近壁面顶部拐角处的涡流已消除,提高了转向区域气流速度分布的均匀性。

图 6c 中,同时安装 2 种导流装置,窑内垂直风道由上至下的气流速度分布更均匀。

2.2 速度场均匀性检测

在材堆中部,沿高度方向设置了 14 个监测点(图 7a),利用 Sc/Tetra 处理软件,提取各监测点的气流速度,结果如图 7b 和表 2 所示。

由图 7b 和表 2 可知,未安装导流装置时,干燥窑内各测点气流速度平均值,明显低于风机出口风速(2 m/s),特别是测点 13 和 14 的气流速度明显降低,存在严重的不均匀性。

安装导流装置后,各测点气流平均风速明显提高,循环的热空气可均匀通过材堆之间的水平间隙,实现均匀干燥。

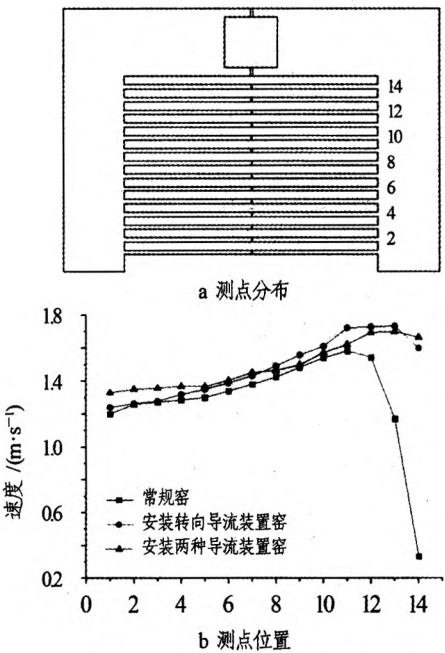


图 7 干燥窑内的测点分布和各测点的速度分布
Fig. 7 Measuring position and airflow velocity distribution in the kilns

表 2 改造前后窑内气流速度检测结果
Tab. 2 Airflow velocity testing results in kilns with and without air guidance devices

类别	气流速度/ (m·s ⁻¹)	平均风速		平均 风速 增幅/ %	材堆顶部 气流均匀 性增幅/ %
		检测值/ (m·s ⁻¹)	比出口 风速降 幅/%		
改造前 常规窑	0.30~ 1.73	1.24	38	0.30	
安装转向 导流装置	1.24~ 1.74	1.48	26	0.17	19
安装两种 导流装置	1.33~ 1.70	1.49	25	0.13	20

3 能耗分析

表 3 为安装两种导流装置前后,干燥窑的能耗对比。

表 3 优化前后干燥窑的能耗对比
Tab. 3 Energy consumption of the kilns with and without air guidance devices

类别	锯材 材积/m ³	电机 功率/kW	风机 数量/台	月耗电 费/元	干燥 周期/天
改造后	80	1.1	5	3696	35
改造前	80	3.0	5	10944	38

注:工业用电平均价格为 0.8 元/(kW·h)。

从表 3 看出,对干燥相同材积的锯材,安装两种导流装置后,干燥窑比改造前可节省电费 7 248 元/月,降幅约 66%,干燥周期缩短 3 天。

4 结论

1) 在顶风机型干燥窑内安装水平-垂直导流装置后,与安装前相比,实现了气流水平-垂直 90°平滑转向,平均风速提高了 19%,气流均匀性提高了 42%。同时安装两种导流装置后,材堆水平间隙的平均风速提高 20%,气流均匀性提高了 55%。

2) 安装导流装置后的干燥窑,窑内循环气流的平均风速和速度场分布均匀性明显提高;且能够满足不同厚度规格和树种锯材的干燥要求。

3) 安装导流装置后,干燥窑耗电量减少 66%,干燥周期缩短,干燥成本降低。

参考文献:

- [1] 张晓明. 木材干燥的节能途径[J]. 林业劳动安全, 2002(2): 36-38.
- [2] 曹恒武, 田振山. 干燥技术及其工业应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 127-128, 133.
- [3] 张璧光, 谢拥群. 木材干燥的国内外现状与发展趋势[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(1): 7-14.
- [4] 李磊, 陈广元. 多级弧形板导流装置及其对木材干燥室介质循环均匀性的改善[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 128-130.
- [5] 严平, 曹伟武, 施胜辉. 木材干燥烘房循环气流引导供风系统新技术应用研究[J]. 上海理工大学报, 2012, 34(5): 487-491.
- [6] 严平, 曹伟武, 钱尚源, 等. 干燥窑用风机自动回转供风系统的研制[J]. 木材工业, 2008, 22(1): 25-27.
- [7] 黄翔. 空调工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 406-409.
- [8] 王汉青. 通风工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 238-276.
- [9] 闫一野, 刘美爽. 木材干燥窑内风速与流场均匀性的数值模拟[J]. 东北林业大学学报, 2012(6): 134-138.
- [10] 张杨, 吴哲, 曹军. 木材干燥窑结构对窑内空气流动特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012(9): 116-121.
- [11] Zhang Ruixue, Cao Jun, Sun Liping. Numerical simulation on airflow pattern in wood drying kiln [J]. Forest Engineering, 2010(1): 25-29.
- [12] Song G, Kimura F, Piao G. Orientational distribution of cellulose nanocrystals in a cellulose whisker as studied by diamagnetic anisotropy [J]. Macromolecules, 2013, 46 (22): 8957-8963.
- [13] Kupiainen L, Ahola J, Tanskanen J. Distinct effect of formic and sulfuric acids on cellulose hydrolysis at high temperature [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012, 51 (8): 3295-3300.
- [14] Lu H, Gui Y, Zheng L, et al. Morphological, crystalline, thermal and physicochemical properties of cellulose nanocrystals obtained from sweet potato residue [J]. Food Research International, 2013, 50 (1): 121-128.
- [15] Lu Q, Tang L, Lin F, et al. Preparation and characterization of cellulose nanocrystals via ultrasonication-assisted FeCl_3 -catalyzed hydrolysis [J]. Cellulose, 2014, 21 (5): 3497-3506.
- [16] Tang Y, Yang S, Zhang N, et al. Preparation and characterization of nanocrystalline cellulose via low-intensity ultrasonic-assisted sulfuric acid hydrolysis [J]. Cellulose, 2014, 21 (1): 335-346.
- [17] Lu Z, Fan L, Zheng H, et al. Preparation, characterization and optimization of nanocellulose whiskers by simultaneously ultrasonic wave and microwave assisted [J]. Bioresource Technology, 2013, 146 (19): 82-88.
- [18] Filson P B, Dawson-Andoh B E, Schwegler-Berry D. Enzymatic-mediated production of cellulose nanocrystals from recycled pulp [J]. Green Chemistry, 2009, 26 (11): 1808-1814.
- [19] Xu Y, Salmi J, Kloser E, et al. Feasibility of nanocrystalline cellulose production by endoglucanase treatment of natural bast fibers [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 51 (5): 381-384.
- [20] Li W, Yue J, Liu S. Preparation of nanocrystalline cellulose via ultrasound and its reinforcement capability for poly(vinyl alcohol) composites. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19 (3): 479-485.
- [21] Cheng M, Qin Z, Liu Y, et al. Efficient extraction of carboxylated spherical cellulose nanocrystals with narrow distribution through hydrolysis of lyocell fibers by using ammonium persulfate as an oxidant [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2 (1): 251-258.
- [22] Bai W, Holbery J, Li K. A technique for production of nanocrystalline cellulose with a narrow size distribution [J]. Cellulose, 2009, 16 (3): 455-465.
- [23] Guan X, Cueto R, Russo P, et al. Asymmetric flow field-flow fractionation with multiangle light scattering detection for characterization of cellulose nanocrystals [J]. Biomacromolecules, 2012, 13 (9): 2671-2679.

(责任编辑 张一萍)

(上接第 25 页)

(责任编辑 向琴)