

常规与低温纤维干燥工艺的热、炯评价

贺志强, 周永东, 孙 锋

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为实现中密度纤维板(MDF)生产的节能降耗,提高能量利用率,对 MDF 生产线的常规和低温纤维干燥工段进行了热、炯利用的对比分析。结果表明:与常规纤维干燥工艺相比,低温干燥工艺的热效率更高,干燥过程消耗热能低,且低温干燥设备的炯效率较高,可更有效地利用干燥能量。针对上述结果,从炯分析的角度,提出了 MDF 生产线节能改造、提高能量利用效率的建议。

关键词: 中密度纤维板; 纤维干燥; 热效率; 炯效率

中图分类号: TS653.6; TK219

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2013)01-0043-04

Heat Energy and Exergy Analyses of Conventional and Low-Temperature Fiber Drying Process

HE Zhi-qiang, ZHOU Yong-dong, SUN Feng

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of medium density fiberboard (MDF) manufacturing, the heat energy and exergy utilization during the conventional and low temperature fiber drying processes were compared. The results showed that heat energy utilization efficiency during the low temperature drying process was higher than during the conventional process. The specific heat energy consumption was lower in the low temperature process than consumption using the conventional process. The authors also found that the low temperature process exergy efficiency was higher than with the conventional drying process. Finally, some suggestions for saving energy during MDF production were provided.

Key words: medium density fiberboard (MDF); fiber drying; heat efficiency; exergy efficiency

国家林业局的统计数据显示,2011 年我国 MDF 的产量达到 4 973.41 万 m^3 ^[1] 我国是 MDF 生产大国,但 MDF 企业的加工技术、装备、生产工艺和管理水平参差不齐,造成 MDF 生产线的能耗差异较大。

截止到 2011 年,我国的 MDF 生产线已达 694 条,在建的 56 条。2009—2011 年之间新建成的

MDF 生产线,基本采用连续平压设备,产量大、技术水平高^[2];而 2008 年之前建设的生产线中,单线生产能力 <5 万 m^3/a 的生产线有 376 条,装备技术水平较低^[3]。

纤维板生产线中,单级纤维干燥所用热耗,占 MDF 生产总热能消耗的 54%^[4],高能耗使生产成本增加,影响企业的效益和市场竞争力。国内大多数 MDF 生产线的能源利用率 $<30\%$,是节能降耗的关键环节。

在节能技术改造中,能量利用评价指标的选择非

收稿日期: 2012-05-14; 修改日期: 2012-10-22

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201004006-1C)。

作者简介: 贺志强(1986—),男,中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

通讯作者: 周永东,男,中国林科院木材工业研究所研究员。

常重要。热效率是热能利用评价中广泛采用的指标,是基于热力学第一定律的热力学分析方法得到,但未考虑能的质量,故仅根据热效率无法确定设备节能的关键环节所在。而依据热力学第二定律的焓分析方法,可得到焓效率^[5]。

“焓”是指按理想循环可以转变为有用功的热量,是能量“量”与“质”的统一,单从用热的角度看,是指高于环境温度的那部分热量。冷、热介质间传热温差、压差或质量浓度差愈大,能量传递的损失就愈大。焓是衡量能量做功的能力,能量的焓值越大,可转变为有用功的能量越多,其价值亦越高。焓效率既可对热能利用进行评价,亦可对包含热能与电能能量系统进行综合利用评价,在节能改造中,可有效避免热能消耗量下降,但电能等其他能源消耗量上升等问题。

以往的能量利用评价研究中,已有学者对单板干燥机的热效率、焓效率进行分析^[6],在实体木材干燥方面,对太阳能供热系统进行热、焓效率分析^[7-8],但鲜见在纤维干燥方面的研究报道。在纤维低温干燥工艺中,为保证干燥质量,常需增加干燥所需风量,结果造成用电量增加。

鉴于此,本研究分别针对纤维常规干燥工艺与低温干燥工艺,进行热效率和焓效率的计算与分析,以期对 MDF 纤维干燥工艺改进、节能降耗、降低生产成本提供技术依据。

1 能量利用分析方法

1.1 热平衡分析法

以纤维干燥管道作为热能利用系统,其热平衡如图 1 所示。

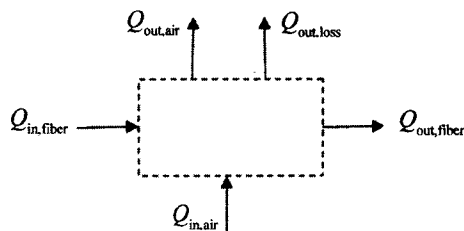


图 1 纤维干燥热平衡示意图

Fig. 1 Energy input and output during fiber drying

图 1 中: $Q_{in,air}$ —进入干燥管道经换热器加热湿空气的能量, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$Q_{in,fiber}$ —进入干燥管道施胶后湿纤维的能量, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$Q_{out,fiber}$ —离开干燥管道干纤维的能量;

$Q_{out,air}$ —离开干燥管道尾气的能量,包括:湿纤维中水分蒸发消耗的能量($Q_{out,vapor}$, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维)、湿空气的能量;

$Q_{out,loss}$ —干燥管道自身的散热损失。

1) 热效率 η : 为热磨施胶后的湿纤维水分汽化所消耗的热能(有效利用热能)与纤维干燥系统输入热能之比。

$$\eta = \frac{Q_{out,vapor}}{Q_{in,air} + Q_{in,fiber}} \times 100\% \quad (1)$$

2) 比能耗,指单位质量纤维干燥所耗热能, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维。

1.2 焓平衡分析法

纤维干燥过程不仅需要消耗热能,同时也消耗动能。图 2 为纤维干燥的焓分析模型。内部焓损:指由于系统内部不可逆过程,如摩擦、节流及温差传热等引起的焓损失;外部焓损:指物质和热量散失到周围环境中的焓损失,包括设备散热、排放湿空气等造成的焓损失。

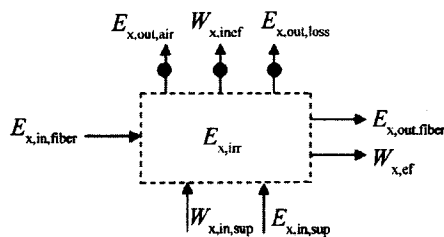


图 2 纤维干燥焓平衡示意图

Fig. 2 Exergy input and output during fiber drying

图 2 中:●代表外部焓损; $W_{x,in,sup}$ —进入干燥管道经换热器加热后湿空气的动焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$E_{x,in,sup}$ —进入干燥管道经换热器加热后湿空气的焓焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$E_{x,in,fiber}$ —进入干燥管道热磨施胶后湿纤维的热焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$W_{x,ef}$ —干燥过程动焓损(有效耗焓), $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维;

$W_{x,inef}$ —排出的湿空气动焓(无效耗焓);

$E_{x,out,fiber}$ —离开干燥管道干纤维带出的热焓;

$E_{x,out,air}$ —排出干燥管道湿空气的焓焓,包括施

胶后湿纤维中水分的汽化耗焓($E_{x, out, vapor}$, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维)、湿空气的焓焓;

$E_{x, out, loss}$ —管道自身的散热焓损;

$E_{x, irr}$ —干燥传热过程及湿纤维与干燥介质混合引起内部焓损。

1) 焓效率 η_{gen} :指热力系统中焓的利用程度,即湿纤维中水分汽化所消耗的焓与纤维干燥系统输入焓之比。

$$\eta_{gen} = \frac{E_{x, out, vapor} + W_{x, ef}}{E_{x, in, sup} + E_{x, in, fiber} + W_{x, in, sup}} \quad (2)$$

2) 设备热力学完善度:即纤维干燥设备输出的各项焓之和与输入的各项焓之和的比值。干燥过程的不可逆性对设备的能量利用效率起决定性作用^[8],设备内部能量转化过程与热力学第二定律的理想状态相比,体现出设备的热力学完善程度。

3) 外部焓损率:纤维干燥过程中,外部焓损占总焓损的比例。

4) 比焓耗:单位质量的纤维干燥所需焓耗, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维。

2 结果与讨论

试验于 2011 年 11 月在广西某 MDF 生产企业

表 1 纤维干燥工艺及相关参数

指标	常规干燥	低温干燥
绝干纤维产量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	14 045.7	
干燥工艺类型	先施胶后干燥	
干燥介质	湿空气	
干燥管道入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	170	120
干燥管道出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	70	50
风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	224 731	280 914
施胶前湿纤维含水率/%	60	
施胶前湿纤维温度/ $^{\circ}\text{C}$	170	
纤维终含水率/%	10	
干燥管道长/m	120	
干燥管道直径/m	1.9	
胶黏剂固体含量/%	40	
固体胶施加量/%	13	
固体石蜡施加量/%	1.4	
固化剂施加量/%	1.2	
成品板规格(宽 $\times$ 长 $\times$ 厚)/mm	1 220 $\times$ 2 440 $\times$ 12	
成品板密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	750	
成品板含水率/%	6	
日有效工作时间/h	22.5	
年有效工作时间/d	300	

注:固体胶、固体石蜡、固化剂的施加量均指占绝干纤维质量比例。

进行。环境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 85%。生产线为 2000 年投产的国产设备,年产量 12 万 m^3 。技术改造前采用常规干燥工艺,后改造为低温干燥工艺。原料均采用小径桉木,胶种为脲醛胶。干燥工艺参数见表 1。

2.1 热能利用分析

2 种纤维干燥工艺的热能利用情况见表 2。

表 2 不同干燥工艺下纤维干燥热能及占总热能的比例

Tab. 2 Comparison of total energy input and output under different fiber drying processes

能量类别	热能/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维)		所占比例/%	
	常规干燥	低温干燥	常规干燥	低温干燥
进入的湿纤维	500.8	500.8	19.9	22.1
进入的湿空气	2 021.2	1 763.2	80.1	77.9
离开的干纤维	79.8	44.3	3.2	2.0
排出的湿空气	2 351.7	2 172.8	93.2	96.0
管道散热	90.6	46.9	3.6	2.0

由表 2 的数据可知,由于干燥温度低于常规干燥工艺,低温干燥工艺中,进入湿空气的热能及其所占总热能的比例,均低于常规干燥工艺。与常规干燥工艺相比,低温干燥工艺的尾气温度较低,干纤维离开干燥管道时所含热能较低;排出的湿空气温度低,其热能亦较低,回收利用有一定难度,故节能潜力不大;低温干燥工艺的温度较低,管道自身的散热损失也偏低。

此外,由于常规干燥系统风量波动,会对热能产生较大影响,为保证干燥过程的稳定,设计的系统热能常偏大。

纤维干燥热能评价指标的分析结果,列于表 3。

表 3 不同干燥工艺下纤维干燥热效率和比能耗

Tab. 3 Heat efficiency and specific energy consumption of fiber drying under different drying processes

评价指标	常规干燥	低温干燥
热效率/%	69.8	76.6
比能耗/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干纤维)	2 021.2	1 763.2

表 3 显示,低温干燥工艺的热效率高干常规干燥工艺;低温干燥工艺中单位质量产品的能耗,低于常规干燥工艺,每小时可节约能量 $35.6 \times 10^5 \text{ kJ}$,相当于 0.121 t 标准煤,折合为 872.9 t/a 标准煤。

2.2 焓利用分析

纤维干燥系统焓分析的计算结果,见表 4。

表 4 不同干燥工艺下纤维干燥系统各部分
烟及占总烟的比例

Tab. 4 Total exergy input and output during fiber drying
under different drying processes

能量类别	烟/(kJ·kg ⁻¹ 干纤维)		所占比例/%	
	常规干燥	低温干燥	常规干燥	低温干燥
进入湿纤维的热烟	163.9	163.9	21.4	25.9
进入湿空气的动能烟	93.0	110.4	12.1	17.5
进入湿空气的焓烟	509.5	357.7	66.5	56.6
管道散热烟损	20.4	8.3	2.7	1.3
离开干纤维的热烟	10.5	3.4	1.4	0.5
排出湿空气的焓烟	358.5	296.0	38.6	46.8
排出湿空气的动能烟	18.6	22.1	2.4	3.5
干燥过程的动能烟损	74.4	88.4	9.7	14.0
内部不可逆烟损	284.0	213.8	37.1	33.8

从表 4 可看出,常规和低温干燥工艺,因为进入系统的湿纤维具有相同的温度、流量及施胶工艺等,因此其热烟是一致的。低温工艺的干燥温度较低,但所需风量较大,消耗的动能较大,故低温干燥所用的湿空气焓烟低、动能烟高。

因低温干燥工艺的温度低于常规干燥,故管道散热烟损较低;排出的干纤维和湿空气温度均较低,离开的干纤维热烟和排出湿空气的焓烟亦均低于常规干燥工艺。低温、常规干燥工艺中排出的湿空气的焓烟,约占排出湿空气热能的 15%,可见尽管离开湿空气的总热能较大,但其可用能烟却很少。

低温干燥所需风量较大,其排出湿空气的动能烟、用于运输纤维的动能烟损,均高于常规干燥;低温干燥的内部不可逆烟损较低,主要是因为低温干燥中,湿纤维与干燥介质混合时引起的烟损较低。

纤维干燥烟评价指标分析结果,见表 5。

表 5 不同干燥工艺下纤维干燥烟评价

Tab. 5 Exergy evaluation indicators of fiber drying
under different drying processes

评价指标	常规干燥	低温干燥
比烟耗/(kJ·kg ⁻¹ 干纤维)	602.5	468.1
设备烟效率/%	50.1	55.5
设备热力学完善度/%	62.9	66.2
外部烟损率/%	11.7	10.2

表 5 所列数据显示,与常规干燥工艺相比,低温干燥工艺的设备热力学完善度较好,外部烟损率较低,设备烟效率较高,说明低温干燥工艺的能量利用,更接近于热力学第二定律能量转换的理想状态。

3 结论与建议

1) 与常规纤维干燥工艺相比,低温干燥工艺的热效率高,热力学完善性好,设备烟效率高,能量利用程度更高。

2) 依据对两种纤维干燥工艺的热、烟评价及分析结果,建议安装热管式余热回收装置等,回收纤维干燥排气热能,将常规干燥排出的热能,用于干燥系统环境空气的预热;低温干燥工艺的排放尾气湿度较大,可用于生产线中木片的预热,从而减少木片预热所耗用大量高品质的能源。

3) 优化 MDF 生产线设备用能配置,形成能量的梯级利用,尽量减少设备的外部烟损:① 锅炉尾气经除尘净化后,用作纤维干燥所需的部分热空气,将锅炉的外部烟损,转化为纤维干燥段的输入烟;② 依据生产线干燥温度,调整导热油加热系统的管路顺序配置;高温工艺设备采用经锅炉加热的高温热油进行加热,低温工艺设备的加热则可利用高温工艺设备使用后的热油,即高温用热设备的外部烟损,转化为低温用热设备的输入烟。

4) 建议利用热力学第二定律的烟分析及评价指标,对人造板生产中的不同工艺、生产规模,或技术改造前后生产线的能量利用,进行综合能耗对比及评价。

参考文献:

[1] 2011 年我国人造板产量统计数据[J]. 木材工业, 2012, 26 (5):60.

[2] 俞敏. 我国中密度纤维板设备制造行业的发展格局[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(12):4-9.

[3] 肖小兵. 我国中密度纤维板生产发展现状与分析[J]. 林产工业, 2009, 36(1):9-10.

[4] Jingge Li, Shu sheng Pang, Eric W Scharpf. Modeling of thermal energy demand in MDF production[J]. Forest Products Journal, 2007, 57(9):97-104.

[5] 张璧光,甘雪菲,伊松林. 常规木材干燥室不同供热状况的烟损失分析[J]. 林业科技开发, 2012, 26(1):44-46.

[6] 常健民,徐瑞玉. 单板干燥机的热能利用分析[J]. 东北林业大学学报, 1990, 18(4):74-79.

[7] 张璧光,霍光青. 太阳能干燥系统几种循环的烟分析[M]. 北京:科学出版社, 1999: 50-54.

[8] I Dincer, A Z Sahin. A new model for thermodynamic analysis of a drying process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004 (47):645-52.

(责任编辑 张一萍、姜 征)