

中密度纤维板纤维气流干燥的模拟计算

谢拥群¹, 张璧光²

(1. 福建农林大学材料工程学院, 福建 南平 353001; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 管道气流干燥是中密度纤维板生产中主要的纤维干燥方式, 广泛应用于我国的人造板生产中, 采用数学方法并建立合理的数学模型对其分析研究是解决生产实际问题和系统设计的经济有效的方法之一。在借鉴国外研究成果的基础上, 作者提出了可对该系统进行模拟的数学模型, 并与实际生产系统进行了验证对比。

关键词: 木纤维; 气流干燥; 数学模型; 模拟计算

中图分类号: TS653.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2002)05-0033-04

Simulation Computation of a Pneumatic Drying System for MDF

XIE Yong-qun¹, ZHANG Bi-guang²

(1. Fujian Agricultural and Forestry University, Nanping 353001, Fujian, China;

2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Pneumatic drying is widely used in the production of medium density fiberboard (MDF) in China. And the simulation computation is one of the methods for managing and designing the tube-type pneumatic drying system. Basic on international achievements in the subject, a mathematic model to make simulation computation on the drying system was set up. Test results showed the simulated system agreed with the actual system.

Key words: Wood fiber; Pneumatic drying; Mathematic model; Simulation computation

自80年代初我国第一条中密度纤维板生产线建成投产以来, 中纤板的生产得到了迅猛发展, 20多年来长盛不衰。在中纤板生产的各个环节中, 纤维干燥是至关重要的一环。当前, 管道气流干燥方法被国内外广泛应用于中纤板实际生产中, 因此, 建立合理的数学模型是一件十分重要的工作, 可以为生产工艺的制定提供理论依据, 藉以提高产品质量、降低能源消耗; 并为系统优化设计奠定基础, 因而受到国内外科技工作者的普遍重视。

管道气流干燥是固体流态化中稀相输送在干燥方面的应用^[1], 具有气固两相传质传热的表面积大、热效率高、干燥时间短、处理量大、易于实现自动连续生产等特点, 因而成为中纤板生产中纤维的主要干燥形式。对这一系统数学模型的分析主要从气固两相流的运动^[1]和纤维在气流中的传质传热两个方面

进行^[2]。本文在建立数学模型的同时, 结合实际生产实例进行模拟计算和分析, 并与实际系统的工艺参数和检测数据进行验证。

1 数学模型的建立

1.1 纤维在干燥管道中的运动分析

中纤板生产中的纤维气流干燥管道系统由风机、加热器、干燥管道、旋风分离器组成, 见图1。气流由一高压风机送入加热器后进入垂直管道, 并与由热磨机出口管喷入的湿纤维混合, 再经过水平管道和旋风分离器分离, 废气排入大气; 而干纤维进入料仓, 完成了纤维干燥过程。经实践证明, 这种结构合理且有效。

单根纤维在管道中运动的力平衡方程为:

$$F_m = F_s + F_b - F_t$$

式中: $F_s = \xi A_t \rho_g (v_g - v_t)^2$, 为上升气流对纤维的拽力^[1];

$F_b = V_t \rho_g g$, 为气体对纤维的浮力;

$F_t = V_t [\rho_t / (1-X)] g$, 为湿纤维的重力;

收稿日期: 2001-11-16

作者简介: 谢拥群(1960-), 男, 福建农林大学材料工程学院院长、副教授, 北京林业大学在职博士生。

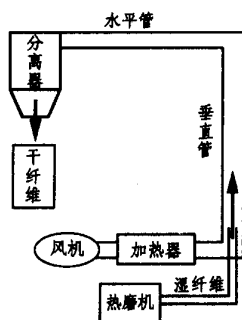


图1 气流干燥示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the drying system

ρ_f —纤维的密度;

ρ_g —空气的密度;

v_f —纤维速度;

V_f —纤维的体积;

ξ —纤维与气体间的阻力系数;

X —湿纤维含水率;

v_g —气体速度;

A_f —纤维在运动方向的投影;

g —重力加速度。

将同类项合并,则有:

$$F_m = \xi \rho_g A_f (v_g - v_f)^2 + V_f [\rho_g - \rho_f / (1 - X)] g$$

由于 $\rho_g \ll \rho_f$, 故气体浮力不计, 且 $F_m = \rho_f V_f / (1 -$

$X) \cdot \frac{\partial v_f}{\partial x}$, 可得单根纤维在管中的微分运动方程:

$$\xi \rho_g A_f (v_g - v_f)^2 - \alpha V_f g \rho_f / (1 - X) = \rho_f V_f / (1 - X) \cdot \frac{\partial v_f}{\partial x} \quad (1)$$

式中: 在垂直管内取 $\alpha=1$, 在水平管内 $\alpha=0$ 。

在纤维匀速运动的情况下: $\frac{dv_f}{dt} = 0$ 。

$$v_{fm} = v_g \left\{ 1 - 0.0639 d_f^{0.3} \left[\frac{\rho_f}{(1 - X)} \right] \right\} \quad (2)^{[11]}$$

式中: v_{fm} 为纤维匀速运动速度; d_f 为纤维直径。

$$\text{当 } 4 > Re \geq 0.1 \text{ 时, } \xi = \frac{11}{Re^{0.72}} \quad (3)^{[11]}$$

$$\text{当 } 100 > Re \geq 4 \text{ 时, } \xi = \frac{6.5}{Re^{0.36}} \quad (4)^{[11]}$$

1.2 纤维在管道中的传热

在稀相条件下, 强制对流传热^[7]为:

$$N_\mu = \frac{h d_p}{\lambda_g} = 0.0061 Re^{0.8} \beta^{-0.43} \quad (5)$$

式中: N_μ 为努塞尔特数; h 为传热系数; d_p 为水力直径; λ_g 为气体导热率。

$$Re \text{ 为雷诺数, } Re = \frac{d_p (v_g - v_f) \rho_g}{\mu} \quad (6)^{[1]}$$

$$\beta \text{ 为纤维浓度, } \beta = 4 \frac{Q_f}{v_f \pi D^2} \quad (7)$$

式中: μ 为空气动力粘度; Q_f 为纤维流量; D 为干燥管直径。

1.3 纤维在管道中的传质

在稀相条件下, 强制对流时纤维表面与气流间的传质系数为:

$$K_c = h \left[\frac{D}{\lambda_g} \right]^{2/3} (C_{pg} \rho_g)^{-1/3} \quad (8)^{[10]}$$

式中: C_{pg} 为气体热容。

单根纤维与气体的热质交换方程:

$$\left[\frac{2}{L_f} + \frac{4}{d_f} \right] h (T_g - T_f) = \rho_f v_f [C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} \Delta H \frac{\partial X}{\partial x}] \quad (9)^{[10]}$$

$$-\rho_f v_f \frac{\partial X}{\partial x} = \left[\frac{2}{L_f} + \frac{4}{d_f} \right] K_c (p_f^v - p_g^v) \quad (10)^{[10]}$$

$$-C_{pg} \rho_g \mu \frac{\partial T_g}{\partial x} = \beta \rho_f v_f [C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} - \Delta H \frac{\partial X}{\partial x}] \quad (11)^{[4]}$$

$$\rho_g \mu \frac{\partial Y}{\partial x} = -\beta \rho_f v_f \frac{\partial X}{\partial x} \quad (12)^{[4]}$$

式中: T_g —气体温度; T_f —纤维温度; X —纤维含湿量; Y —气体含湿量; p_f^v —纤维表面水蒸气分压; p_g^v —气体中水蒸气分压; ΔH —水的汽化潜热; C_{pf} —纤维的热容系数; x —管长坐标。

空气温度和纤维含水率存在如下关系:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) = \alpha_1 \left[\frac{2}{L_f} + \frac{4}{d_f} \right] (T_d - T_w) / (\Delta H \rho_f v_f) \quad (13)^{[10]}$$

当含水率大于 50% 时, $\alpha_1=1$; 含水率在 50%~20% 时, $\alpha_1=0.288$; 含水率低于 20% 时, $\alpha_1=0.023$ 。

T_d, T_w 分别为干燥管内干湿球温度。

将 (1) 式进行简化, 只考虑纤维的一维运动, 即

$$\frac{\partial v_f}{\partial x} = \frac{\partial v_f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial x} = v_f \cdot \frac{\partial v_f}{\partial x}, \text{ 可得:}$$

$$\xi \rho_g A_f (v_g - v_f)^2 \alpha V_f g \rho_f / (1 - X) = \rho_f V_f / (1 - X) V_f \cdot \frac{\partial v_f}{\partial x} \quad (14)$$

2 模拟计算及试验比较

为简化计算, 对系统进行如下假设: ①只考虑纤维沿干燥管轴方向的一维运动; ②干燥过程稳定后, 各点参数稳定不变; ③各参数只随 x 的改变而改变; ④气体为不可压缩流体, V_g 为定值; ⑤气体及纤维的物理性质在整个干燥过程中不发生变化。

鉴于以上假设, 式 (9)~(14) 六个偏微分方程转化为常微分方程, 加上式 (3) [或 (4)]、(5)~(8) 五个代数方程, 构成了中纤板纤维气流干燥的模拟计算的数学模型, 即一次常微分方程组, 使用差分方程方法完成计算^[5]。计算框图见图 2。

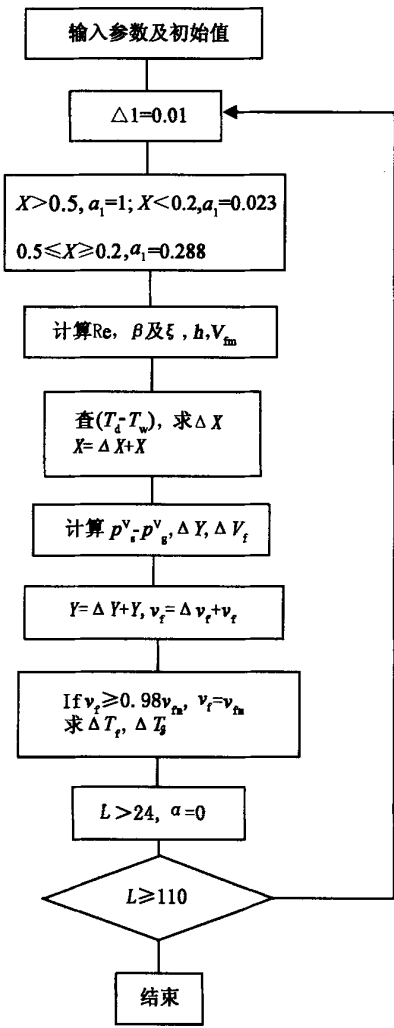


图 2 程序计算框

Fig. 2 The program of calculation

式(2)作为 v_f 的控制方程,当 v_f 的计算值达到 v_{fm} 计算值 98% 时,以式(2)代替(14)进行计算。

令 $\Delta T = (T_d - T_w)$,并将其与 Y, T_g 的关系做成一个数据库,随时调用处理。

令 $(p_g^* - p_g^*) = \Delta P$,由式(10)进行计算。以福建省光泽中密度纤维板厂的生产线为计算实例。该厂采用四川东华机械厂的设备,于 1995 年建成一条年产量为 15 000 m^3 的生产线,并于 1997 年完成 30 000 m^3 生产能力的改造。经过几年的运行证明,各项工艺参数是合理稳定的。有关气体及纤维的物理性质参数列于表 1,纤维气流干燥系统的工艺参数列于表 2。

说明:因为该系统为生产系统,测定点受到限制。纤维含湿量的实际测定是在管道入口处取料后而测定;管内温度是在入口处安装热电偶测定的。

表 1 气体及纤维的物理性质^[1~4]

Tab. 1 Physical characters of gas and fiber

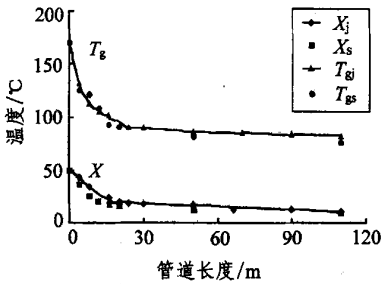
参数名称	数值
纤维密度 $\rho_f / (kg \cdot m^{-3})$	540
空气密度 $\rho_g / (kg \cdot m^{-3})$	0.825
纤维直径 d_f / m	4.6×10^{-5}
空气导热率 $\lambda_g / [W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	2.72×10^{-2}
纤维长度 L_f / m	2.45×10^{-3}
空气粘度 $\mu / (Pa \cdot s)$	2.45×10^{-5}
空气热容 $C_{pg} / [kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	1.0
纤维热容 $C_{pf} / [kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	2.4
汽化潜能 $\Delta H / (kJ \cdot kg^{-1})$	2200
纤维水力直径 / m	0.9×10^{-4}

表 2 干燥系统参数及初始条件

Tab. 2 Initial conditions and parameters of drying system

系统参数	数值	初始条件	数值
干燥管径 D / m	0.8	气流入口温度 $T_{g0} / ^\circ C$	170
垂直管长 L_q / m	24	纤维含水率 $X_0 / \%$	50
水平管长 L_s / m	86	纤维入口温度 $T_{f0} / ^\circ C$	120
风机风量 $Q / (m^3 \cdot h^{-1})$	50698	纤维入口速度 $v_{f0} / (m \cdot s^{-1})$	11
干纤维流量 $Q_d / (t \cdot h^{-1})$	3.54	大气湿度 $Y_0 / \%$	11

图 3 为纤维含水率和管内温度的计算和实测值曲线。



X_j —纤维含水率计算值, X_s —纤维含水率实测值;
 T_{gj} —温度计算值, T_{gs} —温度实测值

图 3 纤维含水率和管内温度模拟计算和实测值

Fig. 3 Comparison of moisture content and temperature of fiber inside the pipe between simulated computation and actuality

3 结果分析与讨论

1) 从图 3 可以看出:纤维含水率从入口处的 50%,到干燥管道的前 20 m 左右处急剧下降至 20% 左右,而在管道的后 90 m 内变化较小;干燥管道内温度变化曲线与纤维含水率的相似,亦从入口处的 170 $^\circ C$,到管道 20 m 处迅速下降到了 90 $^\circ C$ 附近,表明数学模型模拟计算的结果与实际系统情况基本吻合;

2) 干燥管道的前 20 m 是垂直干燥段,在此段

74%左右的水分完成了蒸发,这是因为入口的湿纤维含有大量的自由水;同时,干燥初期纤维表面的水分迅速蒸发,从管内工作介质中吸收了大量的热量,导致工作介质的温度迅速下降和含湿量相应上升,所以在干燥管道的后90 m段,空气介质的干燥能力减弱,且由于此段所干燥的是纤维中的吸着水,因而干燥速率明显下降;

3) 建立的数学模型能较好地模拟实际系统,可以用于中纤板纤维干燥管道系统的分析与设计;

4) 从模拟计算和实测结果看,建议在干燥管道后半部分补充部分干热空气,以弥补空气介质干燥的能力不足,从而提高干燥速度。

参考文献:

- [1] 潘永康,等. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001, 346~424.
- [2] 周筠清. 传热学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999, 154~164.
- [3] 朱政贤. 木材干燥[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989, 48~98.

- [4] 杨强生. 对流传热与传质[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985, 216~245.
- [5] S V 帕坦卡. 传热与流体流动的计算[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 91~110.
- [6] Gorbis Z R, Spokoyny F E. Momentum and Heat Transfer in Turbulent Gas-solid Flows [M]. NY: Begell House, Inc., 1995.
- [7] Gorbis Z R. Heat Transfer and Mechanics of through Disperse Flows[M]. Moscow: Energiya Publishing House, 1970.
- [8] Michaelides E E, Lasek A. Fluid-solids Flow with Thermal and Hydrodynamic Non-equilibrium[J]. Inc. J. Heat Mass Transfer, 1987, 30(12): 2663~2669.
- [9] Pang S. External Heat and Mass Transfer Coefficients for Kiln Drying of Softwood Timber [J]. Drying Technology-An International Journal, 1996, 14(3&4): 859~871.
- [10] Pang S. Mathematical Modeling of MDF Fiber Drying; Drying Optimization[J]. Drying Technology-An International, 2000, 18(7).
- [11] Perry R H, Green D W. Preey Chemical Engineers' Handbook [M], NY: McGraw-Hill Inc., 1984.

欢迎订阅 2003 年《林产工业》

由国家林业局林产工业规划设计院和中国林产工业协会主办,中国林业机械协会协办的专业技术性刊物,全国中文核心期刊之一,首批中国期刊方阵“双效期刊”。1964年创刊。主要报道应用技术,融科技性、实用性、学术性、信息性于一体,服务于林产工业建设。主要内容:林产工业发展的技术方针和政策;介绍制材,木材干燥,胶合板、纤维板、刨花板等各类人造板、非木质人造板,各类人造板饰面,木质地板等室内装饰装修材料,胶料生产和应用,家具制造,制浆和造纸以及林产化工等方面的先进经验和新技术、新材料、新设备、新工艺;报道上述领域的科研设计成果;综述

国内外林产工业现状、水平及发展趋势。所辟栏目:综述,研究与分析,生产与应用,专题讲座,国外技术,综合信息,企业简介等。主要对象:本行业及相关行业从事生产、管理、科研和开发、设计、教学、咨询和市场营销人员。为加强企业交流,介绍新设备、新工艺和新技术,本刊辟有黑白/彩色广告版。

双月刊,大16开64页,单月中旬出版,国内外公开发行,定价每期8元,全年48元,挂号每期另加2元。邮发代号:2-141,读者可向当地邮局或本刊编辑部订阅。

地址:100010 北京朝内大街130号 电话:010-65220126、65135577 转 6223 邮件:cfpidit @ public3.bta.net.cn
开户行:农行东城支行朝内分理处 户名:林业部林产工业规划设计院 帐号:190701040000625

2003 年《林业科技开发》杂志征订启事

系国家林业局科学技术司与南京林业大学等合办的国家级技术开发指导性刊物,以注重开发、推广成果、服务生产为宗旨,着重报道国内经济林、用材林、防护林以及木竹材加工、人造板制造方面的最新成果与经验,同时提供各种信息服务。面向基层、面向生产,内容实用、新颖、广泛,可持续性。适合地(市)、县林业科研、技术开发及木材加工企业、林业生产经营者、林业院校师生阅读。

双月刊,大16开,72页,公开发行。刊号CN32-1160/S,邮局发行代号28-103,5元/册,全年30元,逢单月25日出版。

欢迎到当地邮局(所)订阅,亦可向本刊发行组订阅(每册另加邮寄费1元)。欢迎索刊试读。

地址:南京市龙蟠路南京林业大学内(210037)
电话:025-5427227,5427298