

生物质秸秆直管气流干燥模拟与试验分析

吕薇, 姚志跃, 孙宏伟, 李彦栋

(哈尔滨理工大学 机械与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:基于两相流理论,建立了生物质秸秆直管气流干燥模拟方程,利用 Matlab 语言调用标准四阶 Runge-Kutta 法,得到了数值解.建立了干燥试验台,进行了单因素试验并得到试验结果,通过对比得出模拟结果与试验结果吻合.分析了初始含水量和热风温度对干燥的影响.

关键词:气流干燥; 模拟仿真; 试验分析; 初始含水量; 热风温度

中图分类号: TK 6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)01-0026-04

Simulation and Experimental Analysis of Pneumatic Drying Biomass Straw in a Vertical Pipe

LÜ Wei, YAO Zhi-yue, SUN Hong-wei, LI Yan-dong

(School of Machinery and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Based on two-phase flow theory, the numeral solution of the mathematical simulation equation stood for gas flow drying process which refers to straw fuel in straight horizontal tube obtained by the standard four-step Runge-Kutta method. Test bed of pneumatic drying was established, and the test results were summed up by making single-factor test on the test bed. The results of simulating and single-factor test were coincided. The influences of initial moisture content and air temperature are analyzed.

Key words: air drying; simulation; experimental analysis; initial moisture content; air temperature

0 引言

生物质能是可再生能源,它具有资源面广、对环境影响小等特点,在未来可持续能源系统中占有重要地位^[1-2].但是刚收获的农业秸秆等因其水分较大而易引起储存变质,燃烧困难等现象是亟待解决的问题,故要实现生物质大规模的燃烧利用,对生物质进行有效的干燥研究具有现实意义.气流干燥是对流传热干燥的一种方式,也称“瞬间干燥”.在气流干燥过程中,物料在加热气体中分散,同时完成输送和干燥两种功能^[3].由于干燥物料均匀悬浮于流体中,因而两相接触面积大,强化了传热与传质过

程^[4].本文通过两相流理论研究,建立秸秆干燥过程的数学模型,对干燥过程进行了数值模拟.

并通过气流干燥试验台进行试验,综合分析影响干燥效果的因素,为大规模生物质直燃的干燥提供指导依据.

1 干燥过程数学模型

1.1 模型假设

按照传质传热理论,基于气流干燥的特点,对气流干燥做一些假定^[5-6]:

- 1) 气流两相并流悬浮,无返混现象;
- 2) 气流温度和湿度在管的横截面上均匀化,

收稿日期: 2010-09-19

作者简介: 吕薇(1963—),女,教授,E-mail: ziyi2011@sina.com;

姚志跃(1986—),男,硕士研究生.

随高度发生变化;

- 3) 固体颗粒在管的横截面上均匀分布;
- 4) 固体颗粒为球形, 大小均匀;
- 5) 管壁绝热良好, 在气固悬浮体和环境间没有热辐射;
- 6) 固体为恒速干燥.

1.2 干燥过程数学模型

根据试验模拟秸秆干燥流程如图 1 所示. 研究其机理, 建立干燥过程的数学模型^[7-10].

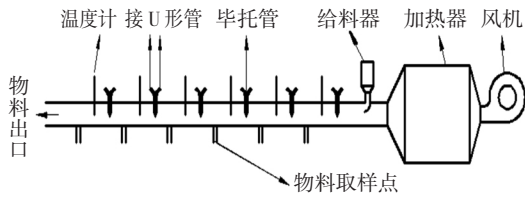


图 1 秸秆干燥流程示意图

1) 物料温度方程. 根据热平衡原理可得

$$\frac{dt_p}{dx} = \frac{6h(t_g - t_p) - 6W[\gamma + t_g - t_p]c_v}{\rho_m dv_p(c_m + c_w X)}$$

式中: t_p 为物料温度; h 为对流传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; W 为物料干燥速率; γ 为水的汽化潜热; c_v 为水蒸气的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ_m 为物料密度, kg/m^3 ; d 为物料当量直径, m ; c_m 为物料比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; c_w 为水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; X 为含水率, %.

2) 热风温度方程. 根据热传递原理可得

$$\frac{dt_g}{dx} = \frac{-6hG_1(t_g - t_p)}{\rho_m dv_p L(c_g + Yc_v)}$$

式中: t_g 为热风温度; G_1 为物料流量, kg/s ; L 为热风流量, kg/s .

3) 颗粒速度方程

根据动量定理可得管内物料的运动速度:

$$\frac{dv_p}{dx} = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_g (v_g - v_p)^2}{\varepsilon^2 d \rho_m (1 + X) v_p} - \frac{0.1}{D}$$

式中: v_p 为颗粒速度, m/s ; C_D 为阻尼系数; ε 为孔隙率; D 为管径, m .

4) 热风含水率方程

根据质平衡原理可得热空气的含水率:

$$\frac{dY}{dx} = \frac{6WG_1}{\rho_m dv_p L}$$

式中 Y 为热风含水率, %.

5) 物料含水率方程

根据干燥速率定义可得

$$\frac{dX}{dx} = \frac{-6W}{\rho_m dv_p}$$

X 为物料含水率, %.

式(1) ~ (5) 构成一阶常微分方程组, 表示了颗粒与介质的几个主要参数随干燥管长度变化的关系.

2 模拟计算方法分析

模拟计算, 即求解出由上述 5 个一阶常微分方程的初值问题构成的模拟方程组, 相当于得出沿干燥管长度变化的颗粒速度 v_p 、湿含量 X 、空气湿度 Y 、颗粒温度 t_p 、空气温度 t_g 、风速 V 的试验结果. 其解法有很多种, 如 Euler 法、Runge - Kutta 法和多步法等. 其中 Runge - Kutta 法是常用的方法, 其优点是: 即保证了足够的准确度, 又不需要计算高阶数项. 本文利用 Matlab^[11] 语言调用标准四阶 Runge - Kutta 法模拟计算. 其程序结构框图如图 2 所示.

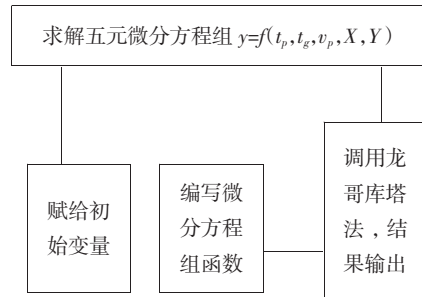


图 2 程序结构框图

3 干燥模拟结果及分析

微分方程初始条件为: $v_p = 0.1 m/s$; $Y = 0.007$

34; $t_g = 180 ^\circ C$; $t_p = 20 ^\circ C$; $\omega = 1$ (ω 为干基含水率);

干燥管初值条件: $D = 0.6 m$; $G_1 = 0.8532 kg/s$; $L =$

$7G_1$; $x = 20 m$; 得出模拟曲线, 如图 3 所示.

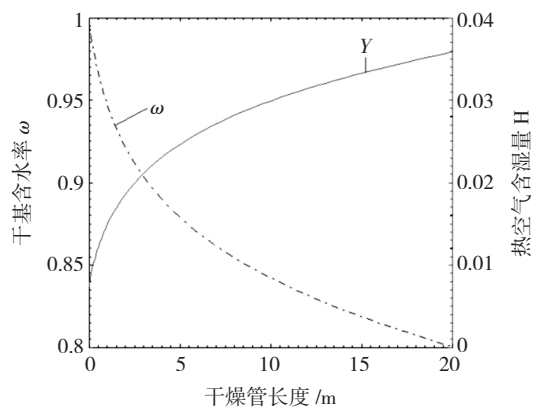


图 3 秸秆干基含水率和热风含水率干燥模拟曲线

由图 3 中 ω 即干基含水率的曲线可知, 秸秆的

直流干燥过程可分为两个阶段,即快速干燥段和降速干燥段^[2].在快速干燥段,干燥曲线呈抛物线下降,干燥速率从零开始逐渐增加,且增速很快,在图中表现为这一阶段中曲线上各点斜率的绝对值不断增加;在降速干燥段,干燥曲线按抛物线轨迹下降,曲线中各点的斜率明显下降,干燥速率也随之降低.

4 模拟结果与试验结果对比

因实际生产中的秸秆含水率在40%~55%左右,故此通过对干基秸秆兑水来模拟实际秸秆的含水状态.试验参数如表1所示.

表1 模拟实际秸秆的含水状态.试验参数

热风温度/℃	初始含水率/(%)	风量/(kg/h)	物料量/(kg/h)
150	56	900	90
140	53	850	75
130	50	800	60
120	46	750	45
100	44	700	30

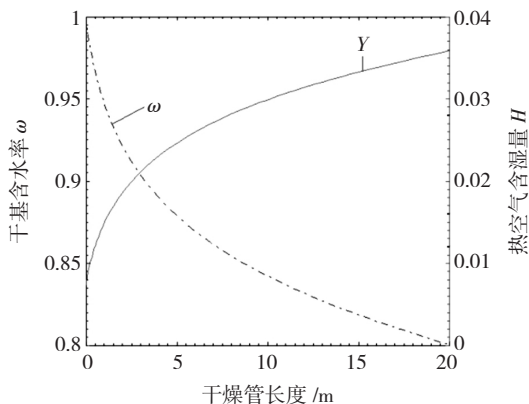


图4 热风温度不同时秸秆干燥的模拟与试验曲线

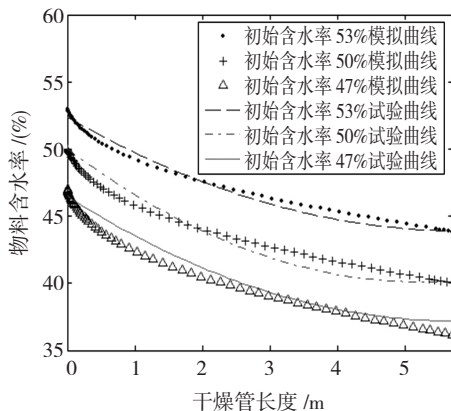


图5 初始含水率不同时秸秆干燥的模拟与试验曲线

由上图4、图5可以看出,试验曲线与模拟曲线基本吻合,证明干燥过程的数学模型及数值求解是正确的;但是存在一定的偏差,这是由于:1)模型是基于前述假设建立的;2)秸秆含水率的测定结果受取样、测定方法等多方面影响,所以实际过程中会出现一定的差异.

5 干燥影响因素的分析

5.1 热风温度的影响

由图6可见:第一,干燥曲线的斜率都是随着干燥温度的升高而不断增加,这说明提高干燥温度有助于提高干燥速率、降低干燥时间.从理论上分析,提高干燥温度即提高了干燥过程中湿物料与干燥介质之间的温度差,而温度差和浓度差则是干燥过程中传热传质的驱动力,所以温度差的增加必然会直接导致传热强度的增加.水分在干燥过程中由液态向气态的转换,以及脱离物料都需要热量,因此干燥速率将随着干燥温度的增加而增加.但由于干燥温度的升高所引起的干燥速率的增加程度并不相等.第二,虽然每次试验所采用的同种物料都是同一组,初始含水率也尽量保持相等,风速也相同,但是观察每组的干燥曲线图不难发现,每次的干燥并不能去除等量的水分:干燥温度低时,蒸发脱出的水分少,干燥温度高时则反之.这说明干燥温度的高低直接决定了干燥所能进行的深度,对于终态含水率要求特别低的干燥物料,干燥温度所能达到的深度必需要小于需要的终态含水率.

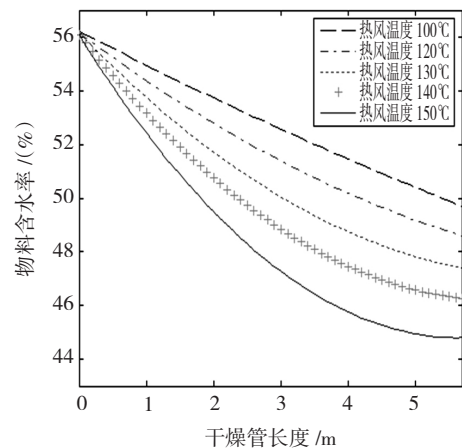


图6 热风温度不同时秸秆干燥的干燥曲线

5.2 初始含水率的影响

图7中每条干燥曲线都随含水率的高低依次排列,没有交叉;这说明秸秆的干燥时间随含水率

的增加而增加,初始含水率越高,所需干燥时间越长.但是每个曲线的变化规律又各不相同,即每种初含水率下的干燥时间都有其独特的特点,仔细分析产生这种情况的原因主要是由于秸秆物料内部水分的结合力所导致的,干燥过程中这种结合力的破坏是通过温度差来实现的^[3].如果温度差没有达到破坏相应结合力的极限,那么在这个范围内,不论如何提高温度,对干燥效果的影响也不会很大,但是一旦达到了这个所谓的破坏力极限,那么相应的结合水分就可以顺利地脱除出来,干燥时间也就非常明显缩短了,这也是试验过程加热温度同样都是升高 10℃,但产生的干燥效果却相差很大的原因.

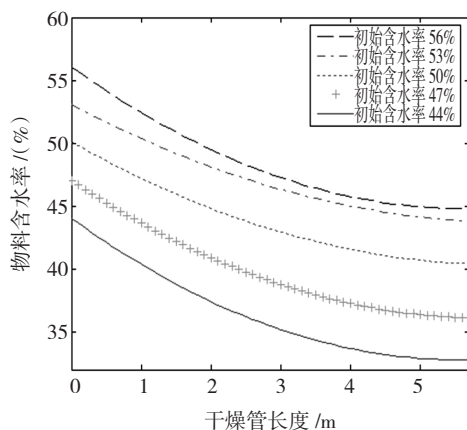


图 7 初始含水率不同时秸秆的干燥曲线

5.3 气固比的影响

由图 8 及图 9 可知,在相同的管段长度内,单位时间进入管内的物料量越大则干燥效果越差,而单位时间的热空气质量流量越大,干燥效果则越好,即气固比越大干燥效果越好;所以应该在考虑经济因素的前提下,适当提高气固比,有利于干燥.

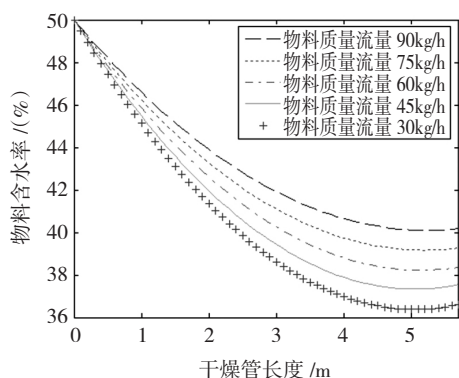


图 8 物料质量流量不同时秸秆的干燥曲线

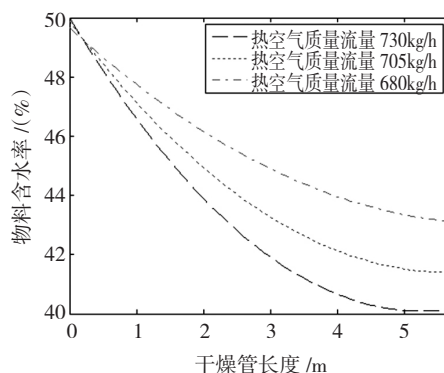


图 9 热空气质量流量不同时秸秆的干燥曲线

6 结 论

- 1) 基于两相流理论建立了秸秆颗粒气流干燥的一维数学模型,该模型较全面地考虑了干燥管内实际发生的过程,通过试验发现试验曲线与模拟曲线基本吻合,证明模型是正确的;
- 2) 提高热风温度,也就是提高了干燥过程中湿物料温度与热风之间的温度差,使得干燥速率增加;
- 3) 适当增大气固比,可以加强干燥效果,节省干燥时间;
- 4) 初始含水率越高,则干燥所需要的时间相应增加.

通过对秸秆颗粒的干燥过程模拟仿真,得出了秸秆颗粒直管气流干燥的影响因素及其干燥规律,模拟结果跟试验结果基本吻合,证明了模型的正确性.期望在实际生产中能够利用模拟与试验结论解决秸秆颗粒的干燥问题,利用干燥特性提高直管气流干燥效率及经济效益,促进生物质能的利用及发展,从而为广泛利用可再生能源,达到节能减排和低碳燃烧做出贡献.

参 考 文 献:

- [1] 蒋高明,庄会永. 未来能源发展新趋势: 生物质直燃发电 [J]. 环保与发明, 2009(2): 29-32.
- [2] 吕薇,李彦栋,柳建华,等. 生物质秸秆燃烧动力学特性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(5): 129-131.
- [3] SHI Jinyan, CHEN Junruo, HAO Tan, et al. Numerical Simulation of pneumatic Drying Wet Alumina Particulates [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(2): 98-100.
- [4] 金辉. 气流干燥技术研究现状与发展趋势 [J]. 现代农业科技, 2010(5): 31-35.
- [5] 石金艳,陈君若,谈浩. 氧化铝气流干燥过程数值模拟 [J]. 现代制造工程, 2009(2): 98-100.

(下转第 34 页)

5 结 语

该仿真分析完成了验证总体方案设计可行性和提供一些合理性建议的目的. 通过对仿真计算结果的分析, 娱乐风洞所有主体结构满足静态强度和刚度要求, 总体方案可行. 求得的支座反力对土建工艺设计起到了很好的指导作用, 大大降低了建设成本. 主体结构 2 总体刚度分布合理, 总体模态分布良好, 未出现模态密集现象, 从低速风洞风扇段设计的一般经验可以得出风扇段工作发生共振的可能性很小. 由于拐角导流片作了近似模拟, 该处结果只能作为一般性参考.

所有计算的强度、刚度结果都比较小, 从经济性方面考虑都应该进行优化、降低设计成本. 但是基于风扇段工作振动的复杂性, 只对主体结构 1 的拐角段和收缩段提出结构优化方案. 通过减少其壳体厚度及筋、翼板厚度和数量的试算分析, 建议将其所有厚度由 10 mm 减少到 6 mm, 筋、翼板的间距增加到原来的 1.5 倍.

参 考 文 献:

- [1] 刘政崇. 高低速风洞气动与结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 389 - 391.
- [2] 刘政崇. 风洞结构设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 157 - 159.
- [3] 王超棋. FL-26 风洞洞体结构水压试验应力有限元分析 [J]. 长沙: 国防科技大学航天与材料工程学院, 1996: 35 - 42.
- [4] 解亚军, 郭琦. NF-6 风洞洞体有限元计算与水压试验 [J]. 实验流体力学, 2005, 19(2): 110 - 114.
- [5] 董国庆, 王仲仁. FL-9 低速增压风洞主体结构有限元分析与气压试验 [J]. 实验流体力学, 2007, 21(4): 77 - 82.
- [6] 陈振华, 陈万华. 2.4m 风洞大迎角机构结构设计有限元分析 [J]. 实验流体力学, 2008, 22(4): 84 - 88.
- [7] 陈万华, 王超棋. 某风洞主体结构的有限元分析 [J]. 实验流体力学, 2005, 19(3): 90 - 93.
- [8] 王元兴. 成都娱乐风洞有限元分析 [C] // 第六届中国 CAE 工程分析技术年会. 2010: 475 - 480.
- [9] 刘兵山, 黄聪. Patran 从入门到精通 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 355 - 360.
- [10] 王元兴, 陈万华. FL-26 风洞扩散段结构优化分析 [J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(2): 95 - 99.

(编辑: 付长缨)

(上接第 29 页)

- [1] 刘显茜, 陈君若, 刘美红, 等. 直管气流干燥氧化铝过程计算机仿真 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 67 - 70.
- [2] 皮杰. 气流干燥过程数值模拟 [J]. 株洲工学院学报, 2003, 17(5): 56 - 58.
- [3] 黄志刚, 朱慧, 李栋, 等. 颗粒物料传热传质过程的数值仿真与实验研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(9): 330 - 332.
- [4] 李军辉, 谭建平. 拟薄水铝石气流干燥过程数值模拟 [J]. 凿岩机械气动工具, 2003(3): 67 - 70.
- [5] 曾伍兰. 气流干燥过程的数学模拟 [J]. 化工设备与管道, 2006, 3(1): 8 - 10.

- [1] GERALD Recktenwald. 数值方法和 MATLAB 实现与应用 [M]. 伍卫国, 万群, 张辉, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2004: 76 - 85.
- [2] 雷廷宙. 秸秆干燥过程的实验研究与理论分析 [D]. 大连: 大连理工大学: 材料学院, 2006.
- [3] 张国芳. 流化床干燥秸秆的实验研究 [D]. 江苏: 江苏大学: 材料学院, 2008.

(编辑: 付长缨)