生物质秸秆颗粒气流干燥试验研究及数值模拟

吕薇[1]，李彦栋[1]，李瑞扬[2]，柳建华[3]，邵海江[3]

(1.哈尔滨理工大学机械动力工程学院，黑龙江哈尔滨150080；2.哈尔滨工业大学能源科学与工程学院，黑龙江哈尔滨150001；3.兰溪市热电有限公司，浙江兰溪321100)

摘要：根据气固两相流理论，通过分析生物质燃料颗粒干燥过程的特点，建立了其在水平直管内气流干燥过程中传热传质数学模型，采用数值方法对模型进行了求解，并通过试验进行验证。分别针对物料初始含水量、入口空气温度和进料量对生物质干燥的影响进行了试验和分析。

0引言

生物质能是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源，约占全球总能源消耗的14%[1]。在我国生物质能占一次能源的33%左右，是仅次于煤的第二大能源[2]。

生物质农作物秸秆开发利用是可再生能源利用的一条重要途径。但刚收获的生物质秸秆燃料水分较大，易引起其储存变质，并且在层燃锅炉直接燃烧时难于着火和稳燃。而采用炉排上部喷入一定比例已磨碎的较干燥的生物质燃料，可有效解决这些问题。生物质干燥问题在其大规模利用中逐渐暴露出来，并已经开始成为影响农作物秸秆规模化燃烧利用的一个严重问题。要实现水分较高生物质秸秆大规模的层状燃烧利用，对部分已粉碎的生物质秸秆颗粒(粉碎后多呈颗粒状)进行有效的干燥研究具有现实意义。

气流干燥是一种高效、连续性流态化的干燥方法，其特点为：①干燥时间短；②气固两相能接触充分，有利于传热传质的进行；③设备简单，适应性广[3－5]。本文运用根据气固两相流理论建立的生物质燃料干燥过程的数学模型，对含湿的生物质燃料的气流干燥过程进行数值模拟，并通过试验验证和比较得出结论，其研究结果可为气流干燥器的设计及性能分析提供参考，为国家所鼓励的生物质发电的实际干燥过程提供有价值的指导依据。

1模型的假设

基于气流干燥的特点，为了便于数学计算，对气流干燥做一些合理的假定[6－8]：

1)物料为各向同性的均匀球形物；

2)物料的初始温度及含湿量分布均匀；

3)干燥过程中物料的体积收缩可忽略不计；

4)水分由物料内部扩散至表面，蒸发仅在表面进行；

5)热空气与物料表面间进行对流换热，再以导热的方式传向物料内部；

6)干燥管绝热。

2数学模型[9－10]

根据上述假设条件，沿两相流动方向任取一个干燥管体积元，如图 1 所示. D 为管径；G_p 干物料的质量流量；G_g 为干空气的质量流量；v_g 空气速度；v_p 为颗粒速度；dx 表示微小管路长度.

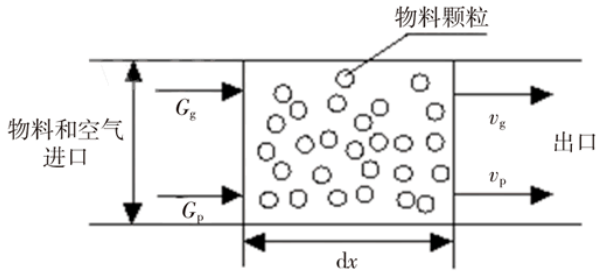

图 1　干燥管体积元

根据受力分析，化简得出颗粒速度微分方程：

$$\frac{dv_p}{dx}=\frac{3}{4}C_{DS}\frac{\rho_g(v_p-v_g)^2}{\varepsilon^{2.7}v_p d_p\rho_s(1+M)}-\frac{0.1}{D} \tag{1}$$

其中：C_{DS}为气固阻力因数；ρ_g 为气体密度，kg/m^3；v_g 空气速度，m/s；v_p 为颗粒速度，m/s；d_p 为颗粒直径，m；ρ_s 干物料密度，kg/m^3；ε 为空隙率；D 为管径，m.

物料含湿量随长度变化的微分方程：

$$\frac{dM}{dx}=-\frac{6k(H^*-H)}{d_p\rho_p v_p} \tag{2}$$

式中：M 为物料含水率（干基）；H 为空气含湿量，kg/kg 干空气；k 为传质系数，kg/(m^2 · s)；H^* 颗粒温度下的空气饱和含湿量；ρ_p 物料密度，kg/m^3.

根据水分平衡，得气体含湿量微分方程：

$$\frac{dH}{dx}=-\frac{6kG_p(H^*-H)}{G_g d_p\rho_p v_p} \tag{3}$$

根据传热平衡和热值传递方程，可得颗粒温度和气体温度微分方程：

$$\frac{dt_p}{dx}=\frac{6[h(t_g-t_p)-k(H^*-H)(r+C_v(t_g-t_p))]}{d_p\rho_p v_p(C_s+C_wM)} \tag{4}$$

$$\frac{dt_g}{dx}=\frac{6G_p[h(t_g-t_p)-k(H^*-H)(r+C_v(t_g-t_p))]}{G_g d_p\rho_p v_p(C_p+C_wM)} \tag{5}$$

其中：h 为对流传热系数，W/(m^2 · ℃)；r 为水分的汽化潜热；C_s 为干物料的比热，kJ/(kg · ℃)；C_w 为水的比热，kJ/(kg · ℃)；C_v 为水蒸气的比热，kJ/(kg · ℃).

式(1) ~ (5) 共同构成干燥过程的数学模型.

3模型求解和试验验证

通过计算机编程，结合物料物性参数、空气和水蒸气特性参数，在给定初始参数条件下，采用主程序调用子函数(采用ode45函数[11])来求解方程组，得到生物质燃料含水率、空气含水量等参数随管长的变化数值解，并绘制相关曲线。

以经过粉碎的玉米秸秆为试验材料，试验初始参数：管径 $D = 0.15$ m；干空气质量流量 $G_g = 0.225$ kg/s；空气入口温度 $t_{g1} = 150$ ℃；初始含湿量 $H_1 = 0.007\ 34$；干物料质量流量 $G_p = 0.012\ 5$ kg/s；初始温度 $t_{p1} = 20$ ℃；粒径 $d_p = 0.002$ m；物料初始干基含水率 $M_1 = 0.85$ kg/kg 干物料；干物料颗粒密度 $\rho_s = 100$ kg/m^3，在此条件下进行干燥模拟和试验. 物料干基含水量计算值和试验值数值见表 1.

表 1　试验值和计算值比较

数值	管长/m							
	0	1	2.2	2.7	3.2	4.2	4.7	5.7
试验值/(kg/kg)	0.83	0.72	0.68	0.66	0.65	0.64	0.62	0.60
计算值/(kg/kg)	0.83	0.71	0.67	0.66	0.65	0.63	0.63	0.61

由图2可以看出，试验值与计算值存在一定的偏差但是基本吻合，出现偏差的原因有：①模型是基于前述假设建立的；②生物质燃料含水量的测定结果受取料、测定方法等多方面影响，所以数值上会出现一定的差异。所以干燥模拟能够反映了气流干燥过程的发展趋势以及颗粒湿度在干燥管内变化的真实情况。

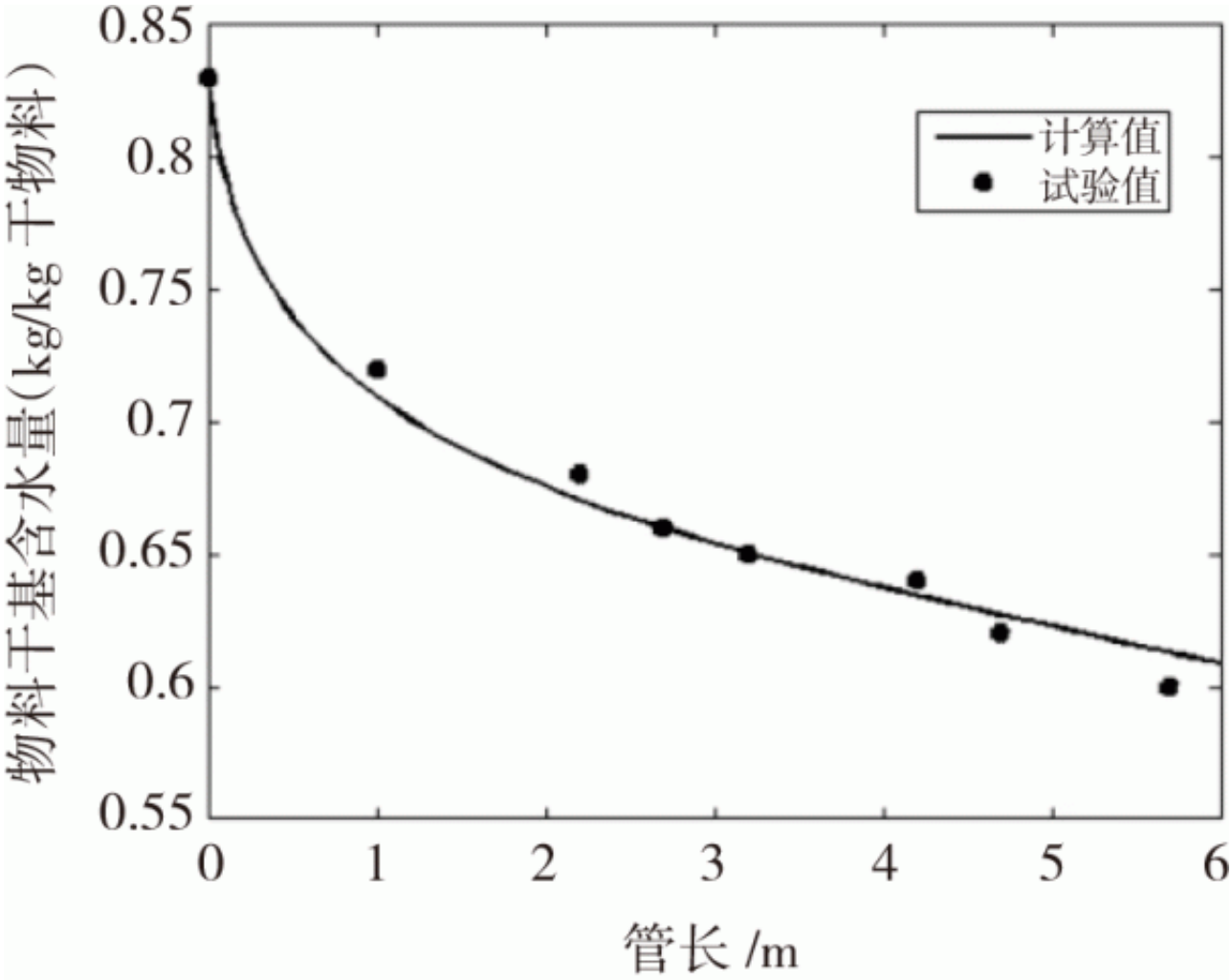

图 2　物料含水量随管长的变化曲线

4结果分析

图3可以看出，气流干燥过程大致可分为两段。在干燥过程的起始阶段，物料与空气的湿度变化较大，这是由于固体颗粒与气体流速之间的相对速度和温度差较大，碎物料能够在气流中较好的分散，物料的全部表面积都可作为干燥的有效面积。同时由于气流对物料的分散和搅拌作用，使蒸发表面不断更新。因此，固体颗粒与热空气之间传热传质驱动力很大，传热传质强度大、较剧烈。在这个阶段，干燥过程已经进行得相当充分，所以此阶段固体颗粒湿度和热空气温度随干燥管长度增加其值降低幅度较大；随后干燥过程进入缓和期，随着固体颗粒速度及温度的提高和热空气温度、速度的降低，热空气与固体颗粒间传热传质驱动力减小，各项参数数值变化趋于缓和。

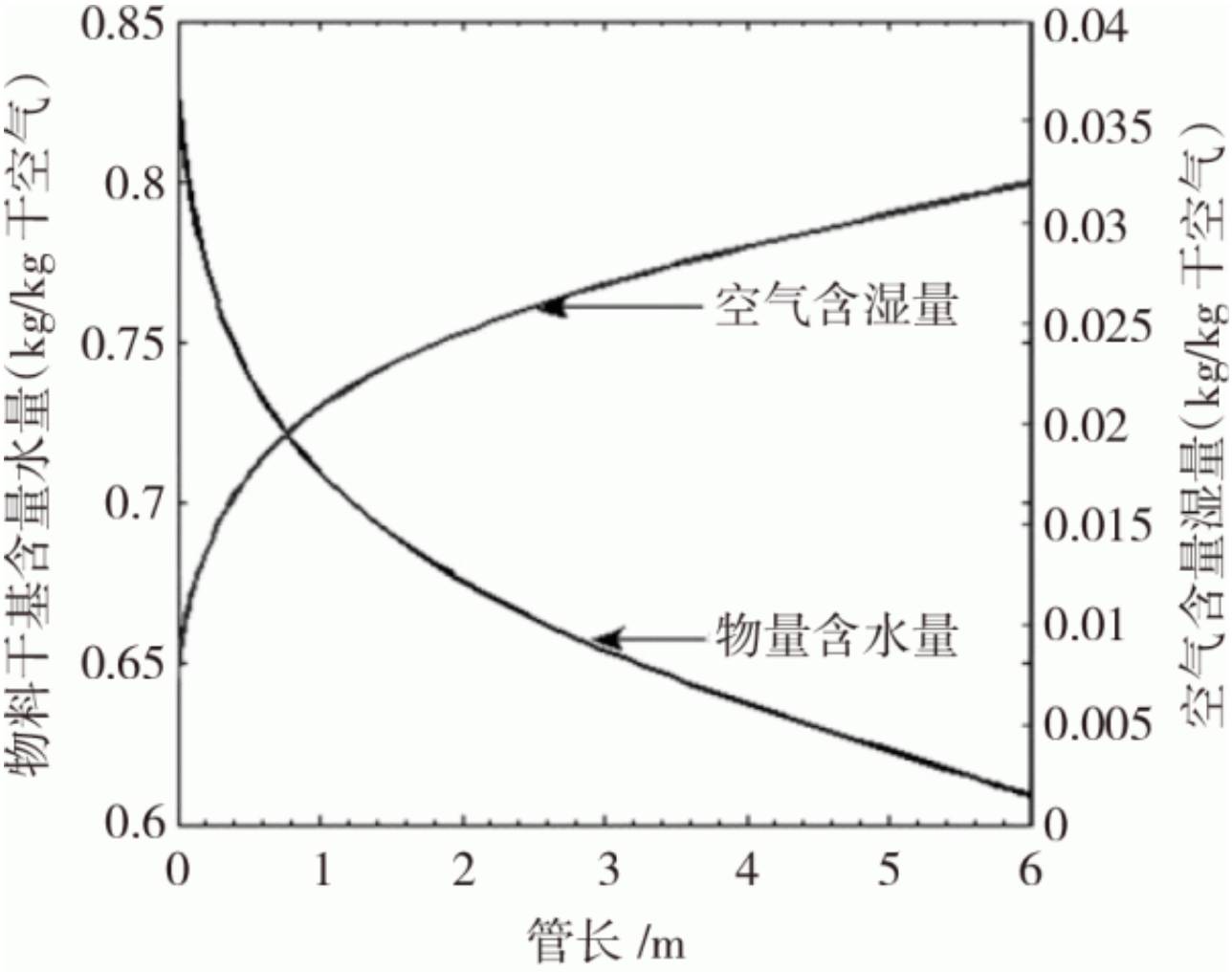

图3　空气及颗粒含水量随管长的变化曲线

5干燥的影响因素分析

5.1初始含水量对干燥的影响

在空气温度140°C，进料量1.5kg/min条件下，按不同初始含水量56%～43%进行气流干燥试验，试验结果如图4。可以看出干燥主要集中在干燥管的前段，1～2m阶段干燥较快，之后干燥较缓慢。在干燥管长度相同的情况下，通过对比可以看出，初始含水量越高达到干燥要求越困难。实际干燥操作时，可以预先对所要干燥物料在不影响使用的情况下进行必要的晾晒，以求较快达到所需的干燥效果。

5.2空气温度对干燥的影响

在试验台进料量为1.5kg/min，物料初始含水量50%条件下，按空气不同进口温度(100～150°C)进行生物质秸秆燃料气流干燥试验，试验结果如图5。由曲线可以看出，随着气流温度的升高，干燥速率也随之增大，干燥效果越好。这是因为空气温度的提高，使气固两相温差增大，二者之间的传热传质加剧[12]。随着空气温度的提高，生物质秸秆颗粒表面水分蒸发速度加快，内部水分扩散速度也加快，最终结果就是干燥速率提高。这说明提高空气入口温度有利于干燥的进行。

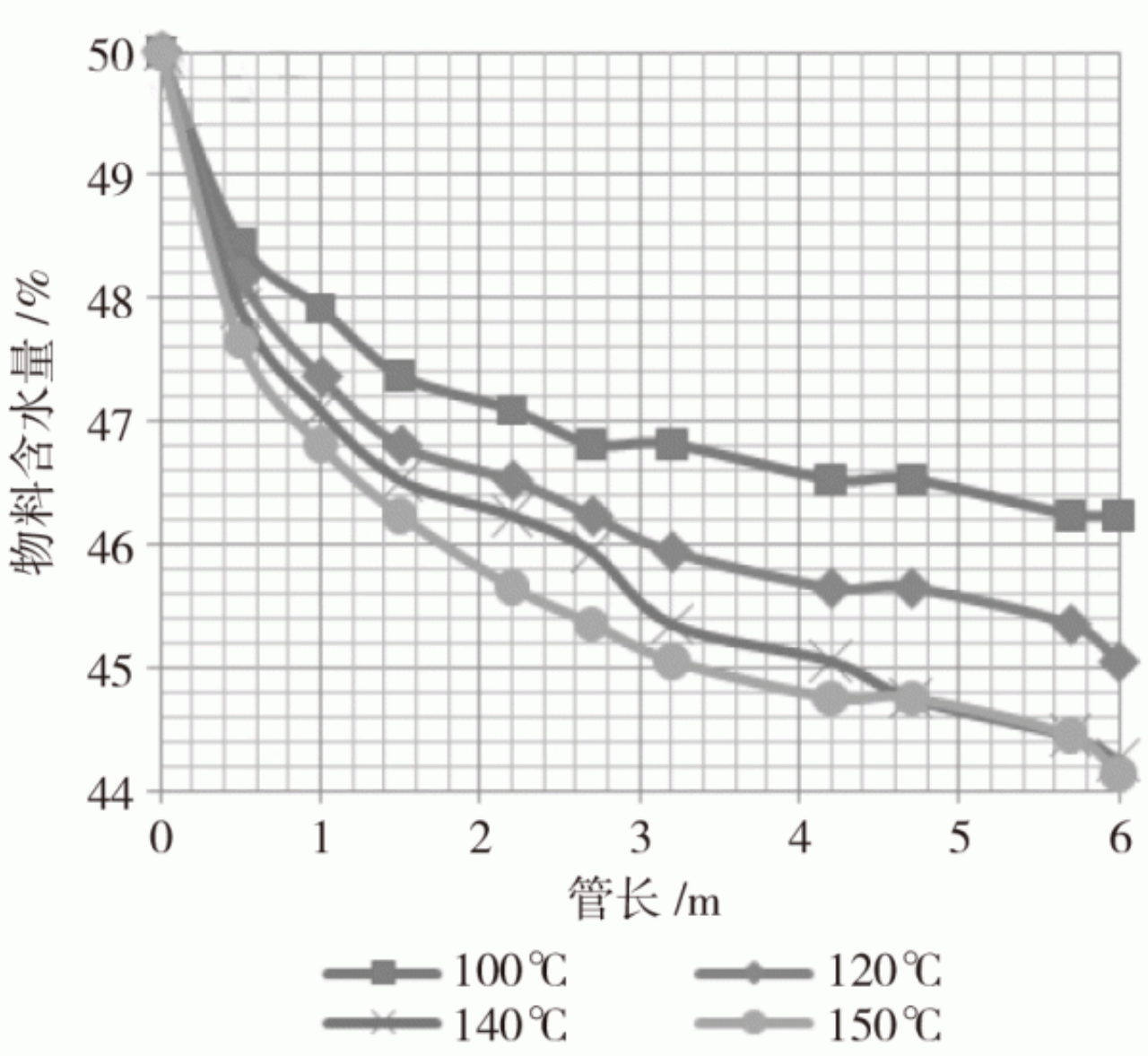

图 5　空气温度对干燥的影响

5.3湿物料质量流量对干燥的影响

干燥气流温度为140°C，物料初始含水量为50%，在仅改变物料质量流量的条件下进行试验。试验结果如图6所示。湿物料质量流量的变化即是干燥过程中气固两相质量比的变化。从图中可以看出，随着物料流量的减小，即气固比的增大，颗粒沿干燥管长度干燥速率增大，颗粒通过干燥器出口时的湿度显著减少。物料流量减小，意味着更多的热空气作为介质来移除物料中水分，空气中可以容纳的水蒸气量也相应的增加。但是气固比过高，会导致排气温度过高，使得热空气的热能不能有效地利用，造成能源浪费。而且，较高的气固比，也会导致气流和被干燥颗粒速度过快，使得颗粒在干燥管内滞留时间变短，也会造成热量不能够充分被利用；所以适当的气固比，有利于提高干燥效果。

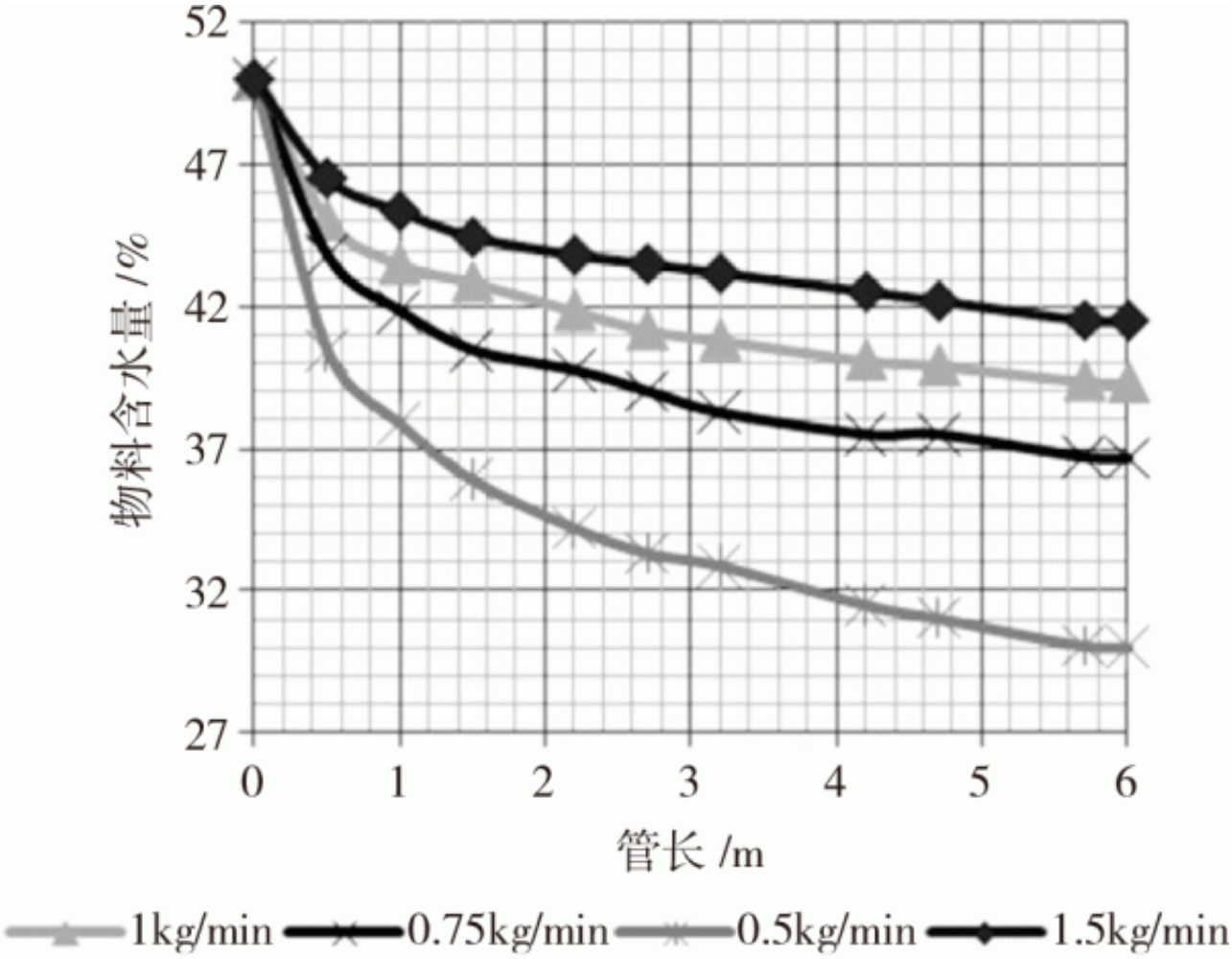

图 6　物料质量流量对干燥的影响

6结语

通过干燥试验验证，模拟结果与试验结果吻合，干燥数学模型正确，此模型能够较好地模拟及预测整个干燥过程传热传质状况。对影响干燥的因素进行试验研究和分析。能够为生物质发电中的实际干燥问题提供有价值的参考依据。

参考文献：

[1]蒋剑春.生物质能源应用研究现状与发展前景[J].林产化学与工业，2002(2)：75－80.

[2]朱清时，阎立峰，郭庆祥.生物质洁净能源[M].北京：化学工业出版社，2002：16－20.

[3]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。

[4]戴素杰。气流干燥在季戊四醇生产中的应用[J].辽宁化工，2006，35(4)：236－237.

[5]吴群英.气流干燥铜精矿热风炉燃油优化[D].长沙：中南大学信息科学与工程学院，2007：15－20.

[6]赵镇南.对流传热与传质[M].北京：高等教育出版社，2007.

[7]梁明海，周全申，乔永钦，等谷朊粉气流干燥管设计计算[J].粮食加工，2008，33(1)：60－63.

[8]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.

[9]郑国生，曹崇文.颗粒物料气流干燥的数学模型[J].北京农业工程大学学报，1994，14(2)：35－42.

[10]郑晓冬.脉冲式气流干燥器的操作与结构优化模拟研究[D].青岛：青岛科技大学化工学院，2006：20－30.

[11]GERALD Recktenwald.数值方法和MATLAB实现与应用[M].伍国，万群，张辉，等译.北京：机械工业出版社，2004.

[12]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.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/120859.html