

# 稳定热湿条件下白肋烟干燥动力学在线分析

刘相君<sup>1</sup>, 郝瑞<sup>1</sup>, 周碧波<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>, 王廷<sup>1</sup>

(1. 黑龙江烟草工业有限责任公司 技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 郑州烟草研究院 烟草工艺重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:**利用烟草热湿处理特性在线分析装置,对5种白肋烟干燥动力学特性进行实验研究.在考察干燥介质温度、湿度对白肋烟干燥过程的影响基础上,利用修正的菲克模型予以模拟,结果表明:湿度为0.11 kg/kg,干燥温度在100~160℃内,有效扩散系数 $D_e$ 值随着温度的升高而逐渐增大;温度为130℃,干空气湿度在0.05~0.23 kg/kg内, $D_e$ 值随着湿度升高而逐渐降低.

**关键词:**白肋烟;热湿处理;干燥动力学;在线分析

中图分类号:TS452 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1004-1478.2012.04.020

## Study on drying kinetics online analysis of burley tobacco under steady heating-moistening condition

LIU Xiang-jun<sup>1</sup>, HAO Rui<sup>1</sup>, ZHOU Bi-bo<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>

(1. Tech. Center, Heilongjiang Tobacco Ind. Co., Ltd., Harbin 150001, China;

2. Key Lab. of Tobacco Proc. Tech., Zhengzhou Tobacco Research Inst., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The feature of drying kinetics of five burley tobacco were studied with an online device of heating-moisture treatment for analyzing, based on investigating the effects of temperature and relative humidity of medium on drying process, it was simulated using modified Fick's model. The results showed that the effective diffusion coefficient  $D_e$  value increases gradually with the temperature when humidity is 0.11 kg/kg, drying temperature is within 100~160℃, the  $D_e$  value reduces as humidity rises gradually when temperature is 130℃, dry air humidity is 0.05~0.23 kg/kg.

**Key words:** burley tobacco; heating-moistening processing; drying kinetics; online analysis

## 0 引言

白肋烟烘焙工艺是混合型卷烟加工中的重要组成部分,对提高白肋烟品质有重要作用.白肋烟烘焙是指热湿介质对白肋烟进行一定时间的加工,其中热湿介质的温度、湿度是重要影响因素.现有白肋烟处理研究<sup>[1-5]</sup>多侧重于加工前后的对比,较

少从过程变化的角度进行分析;或多是针对具体加工设备,考察操作参数对加工后白肋烟质量的影响,得到的结论只针对单一设备的个性化问题,缺乏共性技术的研究.鉴于此,本文选用不同地区、不同部位和等级的5种白肋烟作为研究对象,利用烟草热湿处理特性在线分析装置<sup>[6-7]</sup>,对其干燥特性进行实验分析,以期对白肋烟加工提供参考.

收稿日期:2011-11-23

作者简介:刘相君(1982—),男,黑龙江省哈尔滨市人,黑龙江烟草工业公司助理工程师,主要研究方向为烟草工艺.

通信作者:王廷(1982—),男,黑龙江省哈尔滨市人,黑龙江烟草工业公司助理工程师,主要研究方向为烟草工艺.

# 1 实验条件与数据处理方法

## 1.1 实验材料与装置

选取5种白肋烟烟叶作为研究对象(见表1).利用烟草热湿处理特性在线分析装置(郑州烟草研究院提供)进行干燥动力学实验.

表1 实验样品

编号	产地	等级	年份
A1	巴西	BF2	2005
A2	巴西	CF2	2005
A3	湖北恩施	C2F	2006
A4	湖北恩施	B3	2006
A5	湖北宜昌	马里兰 HMC2	2006

## 1.2 样品前处理

分别测定5种原料烟叶的初始含水率,根据烟叶加湿过程中干物质不变的原理,计算一定量样品所需的加水量,并对所选原料均匀加湿,使其达到目标含水率35%.处理后样品密封,室温平衡48h,备用.

## 1.3 实验条件

根据实验装置的性能和实验原料对流薄层的干燥需求,通过预实验确定实验风速为0.06 m/s,同时确定原料的初始质量为2g.在此实验条件下,具有较好的数据重现性和稳定性.通过改变气氛环境的温度和湿度,研究卷烟原料干燥特性.由单因素实验原则确定实验条件见表2.

表2 实验条件

编号	干球温度/℃	湿球温度/℃	湿度/(kg·kg <sup>-1</sup> )	干空气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	蒸馏水流速/(g·h <sup>-1</sup> )
T1H3	100	60	0.12	18.3	176.6
T2H3	115	60	0.12	17.8	162.7
T3H3	130	60	0.11	18.3	149.6
T4H3	145	60	0.11	16.8	137.3
T5H3	160	60	0.10	16.4	125.8
T3H1	130	50	0.05	19.1	68.8
T3H2	130	55	0.08	17.3	105.8
T3H4	130	65	0.16	16.1	202.1
T3H5	130	70	0.23	14.7	263.5

## 1.4 数据处理方法

白肋烟干燥过程的动力学实验的主要目的,是获得对流干燥过程中物料质量随时间的变化规律.热、质传递过程的相互耦合及白肋烟空间分布特性使此问题复杂化.为此,在做白肋烟干燥过程的动

力学研究时做以下几点假设<sup>[8]</sup>:物料内部均匀分布且各向同性,初始温度和湿度分布均匀;水分以液态形式扩散至物料表面,然后在表面蒸发;忽略热、质传递过程中的耦合作用及物料内部的温度差;不考虑物料干燥过程中发生的变形和收缩效果,以平均值代替;质传递过程可以用菲克扩散定律表示.

根据以上假设,考虑质量传递过程,用菲克第二定律描述为

$$\partial M / \partial t = D_e \partial^2 M / \partial L^2$$

式中, $M$ 为任意 $t$ 时刻干基含水率, $t$ 为干燥时间/s, $D_e$ 为有效扩散系数(传质系数)/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>), $L$ 为白肋烟片的堆积厚度/m.

此过程的解为<sup>[9]</sup>

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} =$$

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 D_e \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 t\right] \quad (1)$$

式中, $M_0$ 为初始含水率; $M_e$ 为平衡含水率其测定依据是在各相应实验温、湿度下平衡2h以上; $M$ 为瞬时含水率.

式①等号左边分子分母同时除以干基质量,右边简化,于是方程①可简化<sup>[10]</sup>为

$$MMR = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_e t}{L^2}\right) \quad (2)$$

式中, $MMR$ 为修正后的含水率比; $W_0$ 为初始质量; $W_e$ 为平衡质量; $W$ 为瞬时质量; $L$ 为烟丝宽度,实验取值0.001m.

根据动力学原理可知,有效扩散系数 $D_e$ 与热空气温度符合阿伦尼乌斯关系式为

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

式中, $D_0$ 为扩散常数(指前因子)/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>), $E_a$ 为表观活化能/(kJ·mol<sup>-1</sup>),气体常数 $R=0.008314$  kJ/(mol·K), $T$ 为介质温度/K.

模型参数的计算步骤为:1)根据实验数据计算得到白肋烟干燥过程中修正的含水率比 $MMR$ 随时间 $t$ 变化的干燥曲线;2)据式②拟合 $MMR$ 与 $t$ 的关系,可得到卷烟原料在不同温度和湿度环境条件下的有效扩散系数 $D_e$ ;3)据式③回归 $D_e$ 与空气温度 $T$ 之间的关系,可得到白肋烟的表观活化能 $E_a$ .

## 2 结果与讨论

图1—图5分别为5种白肋烟片烟样品在不同

温度条件下(湿度分别为 0.12 kg/kg,0.12 kg/kg, 0.11 kg/kg,0.11 kg/kg,0.10 kg/kg)的修正含水率比随时间的变化曲线.图6—图10分别为5种白肋

烟片烟样品在不同湿度条件下(温度为 130℃)修正的含水率比随时间的变化曲线.

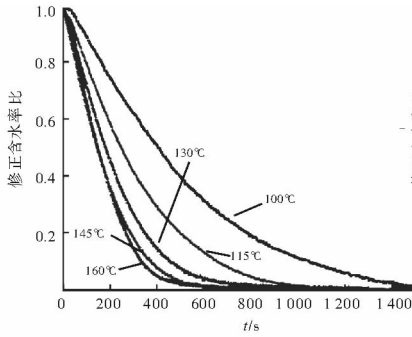


图1 不同温度下巴西BF2修正含水率比随时间变化曲线

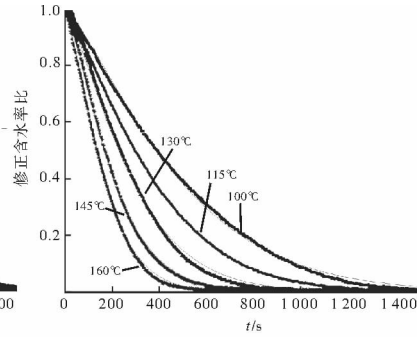


图2 不同温度下巴西CF2修正含水率比随时间变化曲线

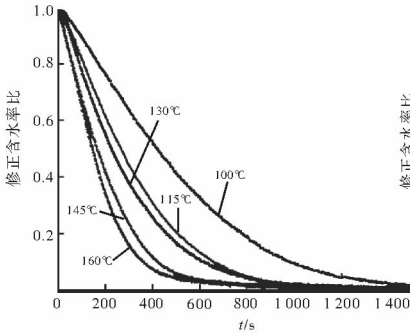


图3 不同温度下恩施B3修正含水率比随时间变化的曲线

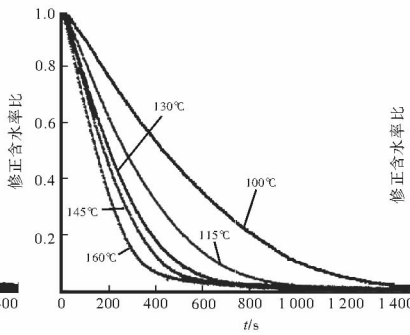


图4 不同温度下恩施C2F修正含水率比随时间变化的曲线

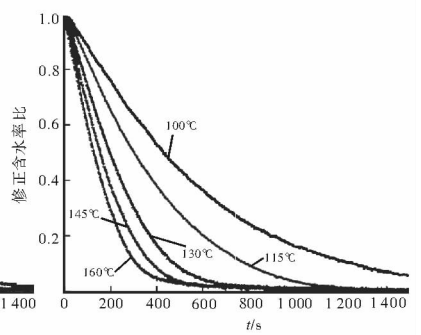


图5 不同温度下马里兰HMC2修正含水率比随时间变化曲线

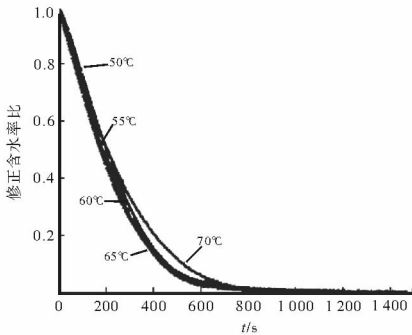


图6 不同湿度下巴西BF2修正含水率比随时间变化的曲线

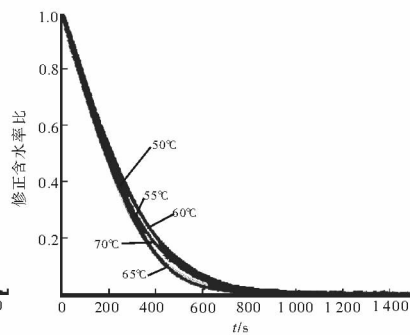


图7 不同湿度下巴西CF2修正含水率比随时间变化的曲线

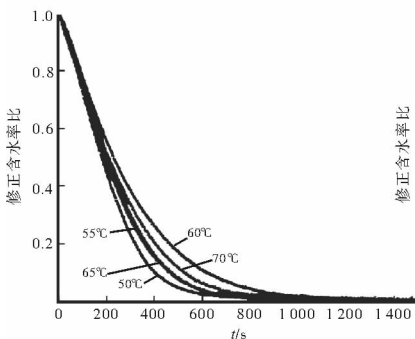


图8 不同湿度下恩施B3修正含水率比随时间变化的曲线

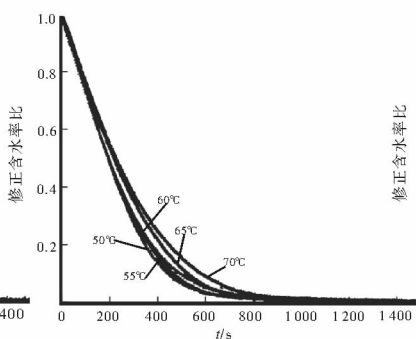


图9 不同湿度下恩施C2F修正含水率比随时间变化的曲线

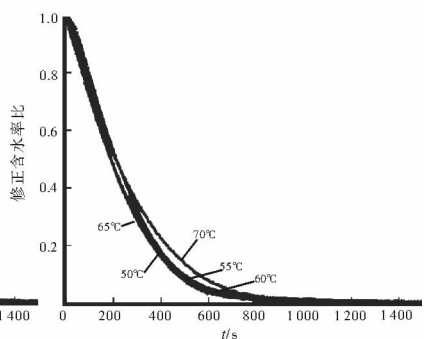


图10 不同湿度下马里兰HMC2修正含水率比随时间变化的曲线

## 2.1 气氛温度对白肋烟干燥特性的影响

表3为5种白肋烟片烟样品在不同温度条件下干燥时的动力学数据及相关系数。

由图1—图5可知,5种白肋烟样品在不同温度下的干燥过程呈现规律性的变化,从修正的含水率比随时间的变化趋势可知,其干燥速度随着温度的升高而加快;样品的修正含水率比在前段时间内快速下降,而后逐步趋于平衡状态。

由表3可知,用修正的非克模型能够较好地模拟5种白肋烟干燥过程,模型中实验值与预测值之间的相关系数的平方均高于0.99,在实验的温度范围内(100~160℃),有效扩散系数 $D_e$ 随温度的升高而逐渐增大.从模型预测中可以看出5种白肋烟干燥过程随温度的升高而加快,利用阿伦尼乌斯公式可以较好地模拟 $D_e$ 随温度的变化关系,其实验值与预测值之间的相关系数均在0.95以上。

表3 5种白肋烟在不同温度条件下干燥时的动力学数据及相关系数

样品	温度/℃	$D_e \times 10^{-10} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$	$E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$D_0 \times 10^{-6} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
巴西 BF2	100	0.96	0.999 57	30.82	2.31
	115	1.76	0.999 11		
	130	2.69	0.999 64		
	145	3.57	0.998 96		
	160	3.71	0.997 98		
巴西 CF2	100	1.01	0.998 60	31.58	2.60
	115	1.43	0.999 88		
	130	2.00	0.997 48		
	145	3.02	0.998 78		
	160	4.06	0.998 96		
恩施 B3	100	0.95	0.998 80	29.53	1.40
	115	1.67	0.999 84		
	130	1.93	0.998 69		
	145	3.02	0.997 38		
	160	3.66	0.998 59		
恩施 C2F	100	0.91	0.998 48	30.30	1.79
	115	1.64	0.999 61		
	130	2.36	0.999 26		
	145	2.81	0.998 04		
	160	3.72	0.998 01		
马里兰 HMC2	100	0.82	0.996 48	37.91	17.7
	115	1.37	0.999 15		
	130	2.46	0.99923		
	145	3.36	0.998 91		
	160	4.30	0.997 79		

通过对白肋烟样品干燥过程的动力学模型分析,可以得到在实验范围内任意条件下5种白肋烟干燥的特性曲线.通过对样品所得到的表观活化能和指前因子数据计算可以得到任意温度下的有效扩散系数,从而横向对比不同白肋烟样品在同一温度下干燥速度的快慢。

## 2.2 气氛湿度对白肋烟干燥特性的影响

表4为5种白肋烟在不同湿度条件下干燥时的动力学数据及相关系数。

由图6—图10可知,5种白肋烟样品在不同湿度下的干燥过程中,除恩施 C2F外,多数未呈现规律性的变化,其原因可能是在实验范围内(湿度范围0.05~0.23 kg/kg干空气),湿度对5种白肋烟样品干燥过程影响较小.关于湿度影响的研究中,恩施 C2F样品呈现了规律性的变化,其规律基本揭

表4 5种白肋烟在不同湿度条件下干燥时的动力学数据及相关系数(温度均为130℃)

样品	湿度/(kg·kg <sup>-1</sup> )	$D \times 10^{-10} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$
巴西 BF2	0.05	2.49	0.998 33
	0.08	2.69	0.999 34
	0.11	2.79	0.998 84
	0.16	2.78	0.998 53
	0.23	2.29	0.998 41
巴西 CF2	0.05	2.23	0.999 76
	0.08	2.66	0.998 63
	0.11	2.21	0.999 46
	0.16	2.73	0.998 51
	0.23	2.46	0.998 87
恩施 B3	0.05	2.92	0.998 17
	0.08	2.59	0.999 54
	0.11	1.91	0.999 16
	0.16	2.51	0.999 12
	0.23	2.27	0.999 04
恩施 C2F	0.05	2.62	0.998 51
	0.08	2.54	0.999 09
	0.11	2.44	0.998 77
	0.16	2.20	0.998 75
	0.23	2.01	0.999 02
马里兰 HMC2	0.05	2.28	0.997 66
	0.08	2.61	0.999 31
	0.11	2.55	0.998 85
	0.16	2.58	0.998 75
	0.23	2.18	0.997 62

示了湿度对干燥过程的影响,即随着干燥介质湿度的增加,白肋烟干燥速率减慢.这与前人针对烟丝干燥动力学的研究结果一致,增加湿度的作用是降低了白肋烟样品向干燥介质中的传质动力,其表现为干燥速度减慢.湿度对其他4种样品的影响基本可以从湿度0.05 kg/kg干空气和0.23 kg/kg干空气两个极端情况中看到,降低传质动力后对白肋烟干燥过程有影响.

由表4可知,用修正的非克模型能够较好地模拟5种白肋烟干燥过程,模型中实验值与预测值之间 $R^2$ 均高于0.99.从恩施C2F样品中可以看出,在实验湿度范围内(0.05~0.23 kg/kg干空气),有效扩散系数随湿度的升高而逐渐降低,可以从模型预测中说明该白肋烟干燥速度随湿度的升高而减慢.此外,根据实验数据计算出的有效扩散系数在 $2.01 \times 10^{-10} \sim 2.58 \times 10^{-10}$ 之间,所以在实验范围内湿度对干燥速度的影响不大.

### 3 结论

本文利用烟草热湿处理特性在线分析装置,对5种白肋烟干燥动力学特性进行实验研究,得出如下结论.

1)在考察分析干燥介质温度对5种白肋烟干燥过程的影响规律基础上,利用修正的非克模型对此过程进行模拟,结果表明:模型中实验值与预测值之间 $R^2$ 均大于0.99.在实验的温度范围内(100~160℃),有效扩散系数 $D_e$ 随温度的升高而逐渐增大,并可以利用阿伦尼乌斯公式较好地模拟这种关系,其实验值与预测值之间的相关系数均大于0.95.

2)在考察分析干燥介质湿度对5种白肋烟干燥过程的影响规律基础上,利用修正的非克模型对

此过程进行模拟,结果表明:模型中实验值与预测值之间 $R^2$ 均大于0.99.从恩施C2F样品中可以看出,在实验的湿度范围内(0.05~0.23 kg/kg干空气),有效扩散系数 $D_e$ 随湿度的升高而逐渐降低,可以从模型预测中说明该白肋烟干燥速度随湿度的升高而减慢.在实验考察范围内,根据实验数据计算出的有效扩散系数 $D_e$ 在 $2.01 \times 10^{-10} \sim 2.58 \times 10^{-10}$ 之间,所以在实验范围内湿度对干燥速度的影响不大.

### 参考文献:

- [1] 卢杰英,吴金良,王加深,等.白肋烟处理前后化学成分的变化规律探讨[J].烟草科技,2000(10):3.
- [2] 堵劲松,王宏生,王兵,等.白肋烟加工工艺技术研究[J].烟草科技,2001(6):3.
- [3] 李晓,姚光明,杜荣杰.酶解法处理白肋烟的实验研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2006,21(2):33.
- [4] 陈建军.白肋烟烘焙关键工艺参数设置与加工质量[J].烟草科技,2007(6):12.
- [5] 曾强,王道宽,黄胜翰,等.滚筒式烘焙设备在白肋烟烘焙中的应用[J].干燥设备与技术,2010(3):117.
- [6] 中国烟草总公司郑州烟草研究院.烟草热湿处理特性在线分析装置:中国,200510107366.X[P].2006-06-28.
- [7] 李斌,王宏生,张兰晓,等.烟草热湿处理特性在线分析装置的研究与应用[J].烟草科技,2008(2):527.
- [8] Ertekin C. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model[J]. J of Food Eng, 2004, 63:349.
- [9] Crank J. Mathematics of diffusion[M]. 2nd ed. London: Oxford University Press, 1975.
- [10] 刘泽,李斌,于川芳.复合传热对薄层烟丝干燥强化传质作用的动力学分析[J].烟草科技,2009(9):5.