

# 对流干燥对烟丝表面温度及理化特性的影响

The effects on physicochemical properties and surface temperature change of cut tobacco during convection drying

段 鹏<sup>1</sup> 赵永振<sup>1</sup> 芦昶彤<sup>1</sup> 陈良元<sup>2</sup> 务文涛<sup>3</sup>

DUAN Kun<sup>1</sup> ZHAO Yong-zhen<sup>1</sup> LU Chang-tong<sup>1</sup> CHEN Liang-yuan<sup>2</sup> WU Wen-tao<sup>3</sup>

赵志伟<sup>1</sup> 王宏伟<sup>1</sup> 郑峰洋<sup>1</sup> 李龙飞<sup>1</sup> 朱文魁<sup>2</sup>

ZHAO Zhi-wei<sup>1</sup> WANG Hong-wei<sup>1</sup> ZHENG Feng-yang<sup>1</sup> LI Long-fei<sup>1</sup> ZHU Wen-kui<sup>2</sup>

(1. 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 河南 郑州 450000; 2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院烟草行业烟草工艺重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 广西中烟工业有限责任公司技术中心, 广西 南宁 530001)

(1. Technology Center of China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. Key Laboratory of Tobacco Processing Technology of CNTC, Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Technology Center of China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530001, China)

**摘要:**利用烟丝热风干燥装置,考察不同热风温度(70, 80, 90, 100, 110, 120 °C)下烟丝含水率、表面温度的变化规律,建立叶丝表面温度随含水率变化的传热传质模型,提出烟丝干燥过程中受热程度表征方法,并将干燥后(湿基含水率 12.5%)烟丝理化特性的变化与烟丝的特征温度进行了相关性分析。结果表明:①建立的传热传质模型可以较好地反映对流干燥过程中烟丝表面温度随含水率的变化规律;②烟丝中碱性香味成分、酸性香味成分、香味总量、填充值与烟丝特征温度之间均达到了极显著关系,中性香味成分、氯元素的含量与特征温度之间达到了显著关系,试验范围内总植物碱、总糖、还原糖与特征温度之间关系不显著。

**关键词:**烟丝;对流干燥;传热传质;特征温度;理化特性

**Abstract:** Moisture content and temperature variation of cut tobacco during convective drying were detected with the different hot air temperature from 70 °C to 120 °C. The heat and mass transfer model for the variation of cut tobacco surface temperature with moisture content was established, and the characteristic temperature was proposed to characterize the heating degree of cut tobacco in the drying process. Then the correlation between the physicochemical properties of cut tobacco and the characteristic temperature was analyzed after

the end of drying (12.5% moisture content of wet base). The results were present as follows: ① Heat and mass transfer model could better reflect the surface temperature change of cut tobacco in the process of convection drying; ② The relationship between characteristic temperature of cut tobacco and alkaline aroma constituents and acidic aroma components, aroma quantity, filling value of tobacco was very significant. While the total alkaloid, total sugar and reducing sugar had no significant relationship with the characteristic temperatures.

**Keywords:** cut tobacco; convection drying; heat and mass transfer; characteristic temperature; physicochemical properties

干燥是应用普遍的操作单元,过程伴随传热传质的同时进行。烟丝干燥是卷烟加工过程中最重要的环节之一,对卷烟质量有十分重要的影响<sup>[1-2]</sup>。因此,烟丝干燥过程一直是卷烟加工领域的研究热点。

解俊<sup>[3]</sup>对烟丝干燥过程中的湿热迁移进行了研究,认为干燥介质(热风)温度是影响干燥速率的最重要因素之一;李善莲<sup>[4]</sup>研究了烟叶气流干燥特性,建立了干燥过程烟叶平均含水率和表面温度变化的数学模型;邓国栋<sup>[5]</sup>建立了滚筒干燥过程中的传热与传质模型,并对传热传质过程进行了理论分析;张兰晓等<sup>[6-7]</sup>在扩散理论的基础上,建立了干燥动力学分析方法,得到了表征卷烟原料干燥特性的有效扩散系数  $De$ 、活化能  $E_0$  和平衡含水率  $Me$ ;赵静芬等<sup>[8]</sup>研究了滚筒干燥过程中叶丝含水率和温度的变化规律,发现叶丝表面温度随着含水率的变化经历了 3 个阶段,第一阶段,随着含水率下

**基金项目:**国家烟草专卖局重点实验室科技项目(编号:110201603001);烟草行业烟草加工形态研究重点实验室项目(编号:110201603004)

**作者简介:**段鹏,男,河南中烟有限责任公司工程师,硕士。

**通信作者:**朱文魁(1979—),男,郑州烟草研究院副研究员,博士。

E-mail: Wkzhu@163.com

**收稿日期:**2017-07-27

降,表面温度升高很快;第二阶段,随着含水率的降低,表面温度缓慢升高;第三阶段,表面温度随含水率的下降而迅速升高;Togrul等<sup>[9]</sup>在研究水果薄层干燥动力学时指出,干燥过程中物料感官质量变化与其受热程度密切相关;朴永革等<sup>[10]</sup>研究了气流干燥对烟丝中糖苷类致香成分的影响,发现随着热风温度的升高,糖苷类致香成分呈平稳下降的趋势。

上述研究主要集中在烟丝干燥动力学及不同干燥条件对卷烟感官质量的影响方面,尚无文献针对烟丝受热程度与烟丝理化特性的关联性进行报道。本研究结合实际需求,建立对流干燥过程烟丝受热程度的表征方法,探究不同的受热程度与烟丝常规化学成分、香味物质含量关联性,旨在为深入开展对流干燥提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与仪器

烤烟烟丝:云南 C2F(黄金叶生产制造中心),调整烟丝含水率 30%(湿基),恒温恒湿间平衡 48 h,待用。

电子天平:AB204-S型,感量 0.000 1 g,瑞士 Mettler 公司;

型烘箱:DHG-9623型,上海精宏试验设备有限公司;

红外线测温仪:MX2型,美国雷泰公司;

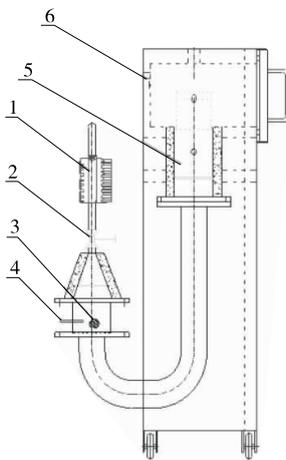
同时蒸馏萃取装置:自制;

旋转蒸发仪:RE-2000E型,上海玛尼仪器设备有限公司;

气质联用仪:Agilent 7890A/5975C GC-MS型,美国 Agilent 公司;

连续流动分析仪:Futura型,深圳市一正科技有限责任公司;

烟丝气流干燥装置(见图1):自制,包括热风加热系统及其相连干燥室。热风加热系统由质量流量计、加热丝、温度探头组成。温度探头可以调节干燥室内热风温度,干燥室内气体流量可通过质量流量计进行控制。同时,从下部进入



1. 质量流量计 2. 三通球阀 3. 加热丝 4. 温度探头 5. 盛料器  
6. 温湿度探头

图1 烟丝气流干燥装置简图

Figure 1 Diagram of convection drying device for cut tobacco

干燥室的热风通道设计有空气分布板,底部为网孔薄板状的圆筒盛料器置于空气分布板上,热风自下而上穿流穿过盛料器。

### 1.2 方法

1.2.1 装置的预热 接通电源,预热烟丝气流干燥装置,设定装置热风干燥温度(70~120℃)及热风风速(0.3 m/s),待装置参数稳定后,将 10 g 含水率为 30%(湿基)的烟丝以薄层(1~3层)的形式均匀地铺散到干燥装置的盛料器中,同时开始计时,进行干燥。

1.2.2 烟丝含水率与表面温度的测定 取样间隔时间设定为 5,10,15,20,30,45,60,90,120,180 s;到达取样时间,用红外线测温仪测定取样烟丝表面温度,结束干燥试验,迅速将样品从盛料器中取出,密封保存。

用烘箱法测定烟丝含水率<sup>[11]</sup>,考察 70~120℃热风干燥下烟丝含水率与表面温度的变化,分别进行 3 次平行试验,使用平均含水率与表面温度进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟丝传热传质模型

烟丝在对流干燥过程中,干燥介质以对流传热的方式将热量传给烟丝,烟丝吸收能量后一部分用于提高烟丝表面温度,另一部分用于蒸发烟丝内部的水分。对干燥过程作以下假设:干燥过程中对流换热系数、烟丝与干燥介质接触的面积、烟丝的比热容均为常数。采用能量守恒方程描述烟丝干燥的能量传递过程。

$$hA(T_a - T) = M_t C_t \frac{dT}{dt} + M_t R_w \frac{dX}{dt}, \quad (1)$$

式中:

$h$  —— 对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$A$  —— 对流换热中烟丝与热风接触的有效面积,  $m^2$ ;

$T_a$  —— 干燥介质干球温度,  $^\circ C$ ;

$T$  —— 烟丝表面温度,  $^\circ C$ ;

$M_t$  —— 烟丝干重,  $kg$ ;

$C_t$  —— 烟丝的比热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;

$R_w$  —— 水的汽化潜热,  $J/kg$ ;

$X$  —— 烟丝干基含水率, %。

研究者<sup>[12-14]</sup>根据不同的湿热处理过程,基于扩散模型开展了众多的经验与半经验模型研究,其中 Newton 模型见式(2),可以很好地描述干燥过程中含水率随时间的变化规律,不同热风干燥条件下(80~120℃)烟丝含水率随时间变化的数据用 Newton 模型进行拟合,结果见图2,由图2可知,拟合结果与试验结果的吻合度较高,相关系数  $R^2$  均  $>0.992$ 。

$$M_R = \exp(-kt), \quad (2)$$

式中:

$M_R$  —— 水分比,即  $M_R = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$ ,  $X, X_0, X_e$  分别为

$t$  时刻、初始时刻和平衡时刻的干基含水率, %;

$k$  —— 模型参数。

烟丝终点的平衡含水率与初始时刻的含水率比较,平衡含水率较小,可省略  $X_e$ ,或者认为  $X_e$  为 0,  $M_R = X/X_0$ 。

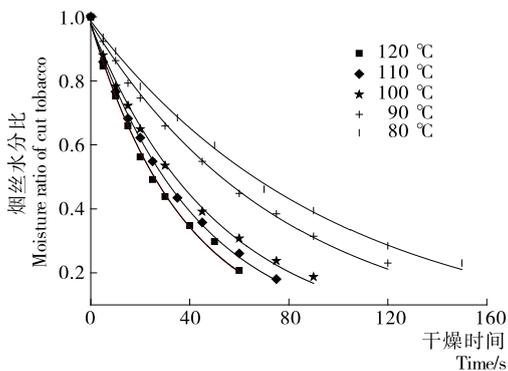


图 2 不同干燥条件下含水率的拟合

Figure 2 Fitting of moisture content under different drying conditions

将式(2)代入式(1)得:

$$hA(T_a - T) = M_t C_t \frac{dT}{dt} - X_0 M_t R_w k \exp(-kt) \quad (3)$$

令:

$hA = m$ ;  $M_t C_t = n$ ;  $X_0 M_t R_w k = p$ , 则式(3)可简化为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{m}{n}(T_a - T) + \frac{p}{n}\exp(-kt) \quad (4)$$

初始条件:  $t=0, T=T_0$ 。

将式(4)求解可得:

$$T = T_a + \frac{p}{m - nk}\exp(-kt) + (T_0 - T_a - \frac{p}{m - nk})\exp(-\frac{m}{n}t) \quad (5)$$

式中:

$m, n, p, k$ ——常数。

令:

$$\frac{p}{m - nk} = k_1, \frac{m}{n} = k_2, \text{将式(2)代入式(5)可得:}$$

$$T = T_a + k_1 MR + (T_0 - T_a - k_1)MR^{\frac{k_2}{k}} \quad (6)$$

可以得到烟丝表面温度随水分比变化的动力学模型, 见

式(6), 即在一定范围内烟丝表面温度与水分比的关系为  $\frac{k_2}{k}$

次多项式关系。将不同干燥条件下烟丝表面温度随水分比变化的数据用式(6)进行拟合, 见图 3。不同干燥条件下, 模

型参数  $k_1, \frac{k_2}{k}$  以及相关系数  $R^2$  值见表 1。由图 2 和表 1 可知, 该模型能较好地描述对流干燥条件下烟丝表面温度随水分比的变化规律。

### 2.2 烟丝特征温度表征

目前, 用于表征烟丝受热程度的方法很少, 现多用出口温度的高低来表征干燥过程中烟丝的受热程度, 该法存在一些不合理性, 烟丝干燥是一个变化的受热过程, 单点出口温度高低并不能准确代表整个干燥过程中烟丝的受热情况, 因此, 为更好表征烟丝在对流干燥过程中的受热程度, 本试验提出特征温度  $T'$  的概念, 即用特征温度  $T'$  来衡量烟丝的受

表 1 不同干燥条件下模型拟合参数

Table 1 Model fitting parameters under different drying conditions

干燥介质温度/°C	$k_1$	$k_2/k$	$R^2$
70	1.15	1.71	0.99
80	1.02	1.43	0.99
90	0.93	1.15	0.99
100	0.94	1.10	0.97
110	0.98	1.04	0.96
120	0.97	1.07	0.98

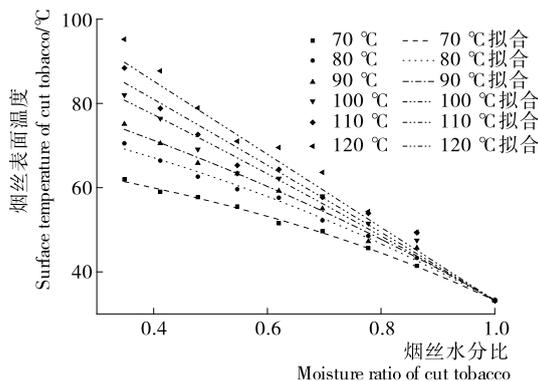


图 3 不同干燥条件下烟丝表面温度随水分比的变化

Figure 3 Change of surface temperature with moisture content of cut tobacco under different drying conditions

热程度, 由于烟丝的受热程度与瞬时烟丝表面温度 ( $T$ ) 以及烟丝水分比的变化率 ( $x$ ) [见式(7)] 均呈正比, 因此可以用烟丝表面温度与烟丝水分比的变化率的乘积来代表烟丝瞬时受热程度, 然而, 在整个干燥过程中干燥时间的长短也与烟丝受热程度呈正比, 因此可以将烟丝特征温度  $T'$  定义为式(8)。

水分比变化率的表达式为:

$$x = \frac{MR_0 - MR}{MR_0} \quad (7)$$

式中:

$x$ ——水分比变化率;

$MR_0$ ——初始时刻烟丝水分比;

$MR$ ——任意时刻烟丝水分比。

特征温度的表达式为:

$$T' = \int_0^t T dx \quad (8)$$

式中:

$T'$ ——烟丝干燥特征温度, °C;

$t$ ——将烟丝干燥至含水率 12.5% (湿基) 时所用的时间, s;

$T$ ——任意时刻烟丝表面温度, °C;

$x$ ——水分比的变化率。

将式(6)与式(7)代入式(8)得:

$$T' = - \int_0^t (T_a + k_1 MR + (T_0 - T_a - k_1)MR^{\frac{k_2}{k}}) dMR \quad (9)$$

结合表1与式(9)可以得到不同对流干燥条件下烟丝特征温度,见表2。

表2 不同干燥条件下烟丝特征温度

Table 2 Characteristic temperature of cut tobacco under different drying conditions

干燥条件/℃	烟丝特征温度/℃
120	62.44
110	57.21
100	53.83
90	49.80
80	46.06
70	41.64

由表2可知,随着干燥介质温度的升高,烟丝的特征温度逐渐增大,烟丝的受热程度越高,与实际情况相符合。

### 2.3 烟丝理化特性变化

经调研<sup>[9-10]</sup>可知,在干燥过程中被干燥物料综合受热程度与干燥后物料的品质密切相关,烟丝干燥过程亦是如此,不同的干燥条件对卷烟的理化品质有着十分重要的影响,而烟丝中常规化学成分与香味成分的含量变化在一定程度上

可以影响卷烟感官品质,烟丝的填充能力则直接影响卷烟的卷制品质<sup>[2]</sup>,因此可以开展相关的研究,探究烟丝在干燥过程中受热程度与烟丝填充能力、常规化学成分、香味成分是否存在关联,由于烟丝特征温度是对烟丝综合受热程度的反应,因此以烟丝特征温度为基础,采用双变量相关分析<sup>[15]</sup>分别进行填充值、常规化学成分、香味成分与烟丝表面温度的相关性分析。

在不同对流干燥条件下,将烟丝干燥至含水率12.5%(湿基)左右烟丝的填充值、香味成分、常规化学成分随着烟丝特征温度的变化规律见表3~5。

表3 不同干燥条件下烟丝填充值变化

Table 3 Change of filling value of cut tobacco under different drying conditions

烟丝特征温度/℃	填充值/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )
62.44	4.37
57.21	4.26
53.83	4.22
49.80	4.08
46.06	4.07
41.64	3.99

表4 烟丝香味物质在不同干燥条件下的目标响应<sup>†</sup>

Table 4 Target response of aroma components of cut tobacco under different drying conditions

香味成分	烟丝特征温度/℃					
	62.44	57.21	53.83	49.80	46.06	41.64
2-乙酰基吡喃	1.31E+06	1.11E+06	1.26E+06	1.62E+06	1.37E+06	1.56E+06
吡啶甲醛	2.75E+05	2.47E+05	3.37E+05	3.49E+05	3.43E+05	4.22E+05
2-乙酰基吡咯	1.50E+06	2.71E+06	3.05E+06	2.74E+06	3.75E+06	4.68E+06
吡啶	1.80E+06	1.94E+06	2.30E+06	2.63E+06	2.70E+06	3.34E+06
2,5-2-甲基吡咯	2.06E+05	1.68E+05	2.18E+05	2.51E+05	2.32E+05	2.81E+05
2-甲基吡喃	3.09E+05	2.22E+05	2.43E+05	3.18E+05	3.09E+05	2.81E+05
3-吡啶甲醛	2.34E+05	3.08E+05	5.81E+05	5.25E+05	3.53E+05	7.52E+05
2-戊基吡喃	1.39E+05	1.16E+05	1.29E+05	1.55E+05	1.30E+05	1.51E+05
壬酸	2.83E+05	1.36E+05	1.68E+05	2.47E+05	1.78E+05	2.35E+05
辛酸	1.82E+05	1.30E+05	1.10E+05	2.19E+05	2.06E+05	1.80E+05
肉豆蔻酸	1.48E+06	1.61E+06	1.60E+06	2.04E+06	2.07E+06	2.16E+06
十五酸	8.38E+06	6.59E+06	5.82E+06	7.19E+06	6.63E+06	6.98E+06
棕榈酸	4.49E+07	6.47E+07	7.10E+07	7.09E+07	9.08E+07	9.89E+07
α-亚麻酸	8.54E+06	1.56E+07	2.22E+07	1.64E+07	2.98E+07	3.39E+07
硬脂酸	9.59E+05	1.99E+06	1.98E+06	2.01E+06	3.00E+06	3.21E+06
5-甲基糠醇	1.57E+05	1.58E+05	1.52E+05	2.22E+05	2.03E+05	2.04E+05
5-甲基糠醛	9.53E+05	7.23E+05	8.96E+05	1.04E+06	9.88E+05	1.07E+06
苯甲醛	6.63E+05	4.28E+05	6.00E+05	7.34E+05	6.05E+05	7.68E+05
苯酚	4.14E+05	5.78E+05	7.89E+05	8.70E+05	8.00E+05	9.70E+05
苯甲醇	4.68E+06	4.46E+06	6.04E+06	6.51E+06	6.02E+06	8.11E+06
苯乙醛	1.03E+07	7.32E+06	9.21E+06	1.13E+07	9.46E+06	1.17E+07
芳樟醇	8.71E+04	2.84E+05	2.92E+05	4.09E+05	3.43E+05	3.47E+05
麦芽醇	1.27E+04	3.74E+04	2.92E+03	0.00E+00	2.40E+04	5.23E+04

续表 4

香味成分	烟丝特征温度/℃					
	62.44	57.21	53.83	49.80	46.06	41.64
苯乙醇	5.11E+06	4.65E+06	6.08E+06	6.96E+06	6.43E+06	8.11E+06
$\beta$ -大马酮	2.78E+07	2.08E+07	2.20E+07	2.91E+07	2.56E+07	2.85E+07
香叶基丙酮	6.55E+06	4.27E+06	4.66E+06	6.36E+06	5.11E+06	6.21E+06
二氢猕猴桃酯	2.87E+06	4.28E+06	5.02E+06	4.65E+06	6.06E+06	7.01E+06
巨豆三烯酮 1	2.10E+06	1.56E+06	1.70E+06	2.26E+06	1.94E+06	2.37E+06
巨豆三烯酮 2	1.20E+07	8.99E+06	1.01E+07	1.31E+07	1.14E+07	1.38E+07
巨豆三烯酮 3	1.45E+06	1.61E+06	1.81E+06	1.80E+06	2.28E+06	2.59E+06
巨豆三烯酮 4	8.25E+06	7.15E+06	7.85E+06	9.63E+06	9.07E+06	1.04E+07
螺岩兰草酮	4.59E+05	4.59E+05	4.96E+05	6.10E+05	5.40E+05	6.95E+05
棕榈酸甲酯	2.15E+07	2.25E+07	2.47E+07	2.73E+07	2.80E+07	3.31E+07
亚油酸甲酯	3.22E+06	3.55E+06	4.28E+06	4.33E+06	4.87E+06	5.82E+06
亚麻酸甲酯	4.62E+06	5.56E+06	4.18E+06	3.73E+06	4.75E+06	5.70E+06
硬脂酸甲酯	2.09E+06	2.29E+06	2.74E+06	2.86E+06	3.26E+06	3.75E+06
酸性香味成分	6.48E+07	9.07E+07	1.03E+08	9.90E+07	1.33E+08	1.46E+08
碱性香味成分	5.77E+06	6.83E+06	8.12E+06	8.59E+06	9.20E+06	1.15E+07
中性香味成分	1.15E+08	1.02E+08	1.14E+08	1.34E+08	1.28E+08	1.51E+08
香味成分总量	1.86E+08	1.99E+08	2.25E+08	2.41E+08	2.70E+08	3.08E+08

† 用峰面积的大小来表示香味物质的含量。

表 5 不同干燥条件下烟丝常规化学成分变化

Table 5 Changes of routine chemical components in cut tobacco under different drying conditions

烟丝特征温度/℃	总植物碱/%	总糖/%	还原糖/%	氯/%
62.44	1.99	22.67	22.14	0.23
57.21	1.91	21.94	21.59	0.24
53.83	2.27	25.85	24.96	0.30
49.80	2.27	25.62	24.74	0.30
46.06	2.25	25.70	24.67	0.29
41.64	2.25	26.06	25.24	0.30

表 6 烟丝特征温度高低与填充值、常规化学成分及香味成分相关性分析<sup>†</sup>

Table 6 Correlation analysis between characteristic temperature and filling value, routine chemical components and aroma components of cut tobacco

相关指标	总植物碱	总糖	还原糖	氯	碱性香味成分	酸性香味成分	中性香味成分	香味总量	填充值
person 相关性	-0.747	-0.802	-0.810	-0.815*	-0.977**	-0.966**	-0.839*	-0.983**	0.985**

† \* 表示 0.05 水平显著, \*\* 表示 0.01 水平显著(双尾  $t$  检验)。

程中,一些酸类、脂类、醇类、酮类、吡啶类化合物随着水分的散失被带走,另一些糖苷结合类的香味物质在高温下裂解,产生易挥发性物质随着干燥进行而散失,导致各类香味物质的损失<sup>[17]</sup>。与此同时,烟丝内部在受热的同时伴随着美拉德反应的进行,产生酮类、呋喃类的香味物质<sup>[18-19]</sup>,此外,高温可使类胡萝卜素发生降解产生巨豆三烯酮、紫罗兰酮、大马酮和二氢猕猴桃内酯等物质<sup>[20]</sup>,这些香味物质多为中性香味物质;烟丝受热强度的增加对除了氯元素外其他常规化学成分的影响并不明显,可能是因为烟丝中常规化学成分

以干燥样品的主要常规化学成分指标及关键计算因子、烟丝填充值及香味成分归类结果组成 9 个变量组用 Spass 19.0 软件分别进行烟丝常规化学成分、填充值、香味成分与烟丝特征温度的双变量相关分析结果见表 6。

由表 6 可知,碱性香味成分、酸性香味成分、香味总量、填充值与烟丝特征温度之间达到了极显著的关系,烟丝中氯的含量以及中性香味成分的含量与烟丝特征温度呈显著关系,除了填充值与烟丝特征温度呈正相关外其他都与烟丝特征温度呈负相关。这是因为随着烟丝受热程度的增加,烟丝脱水速率加快,烟丝在内部温湿度变化所产的应力作用下卷曲变形程度越高,从而使得烟丝的填充性增大<sup>[16]</sup>;在干燥过

结构相对稳定,一定范围内受热程度的改变不足以使烟丝常规化学成分发生大的改变。

### 3 结论

本试验建立了对流干燥条件下烟丝表面温度随水分比的变化模型,提出了特征温度的概念,探究了烟丝在干燥过程中受热程度与烟丝填充能力、常规化学成分、香味成分的关联性,可以得出以下结论:① 通过所建立的模型发现烟丝表面温度与水分比的关系为多项式关系,该模型能较好地描述对流干燥过程中烟丝表面温度随水分比的变化规律;

② 提出了特征温度的概念,用以表征整个对流干燥过程中烟丝的受热程度,发现烟丝填充值与特征温度呈负相关,酸性、碱性、中性香味成分均与特征温度呈正相关。本试验着重研究了对流干燥过程中烟丝受热程度与烟丝理化品质之间的关联性,填补了该研究方向的空白,但是该研究仅仅局限于对流干燥条件,对于其他干燥条件烟丝受热程度与烟丝理化品质的关联性则需要后续的研究。

### 参考文献

- [1] 王超,谭鹤群.我国干燥技术的研究进展及展望[J].农机化研究,2009,31(12):221-224.
- [2] 顾中铸,徐爱琴,吕留根,等.烟丝干燥特性研究[J].南京师范大学学报,2007,7(1):32-36.
- [3] 解俊.多孔介质(烟丝)干燥过程热湿迁移特性研究与计算机模拟[D].南京:东南大学,2001:19-36.
- [4] 李善莲.烟叶对流特性的实验研究[D].郑州:郑州烟草研究院,2004:17-37.
- [5] 邓国栋.烟丝滚筒干燥过程数值模拟[D].郑州:郑州烟草研究院,2006:15-35.
- [6] 张兰晓.卷烟原料对流干燥实验与动力学分析研究[D].郑州:郑州烟草研究院,2007:17-30.
- [7] 刘泽.烟丝在复合传热过程中干燥动力学研究[D].郑州:郑州烟草研究院,2009:17-32.
- [8] 赵静芬,李斌,朱文魁,等.滚筒干燥过程中叶丝表面温度变化特征[J].烟草科技,2011(6):12-15.
- [9] TOGRUL I T, PEHLIVAN D. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruit under open-air sun drying process [J].

- Journal of Food Engineering, 2004, 65(3): 413-425.
- [10] 朴永革,李元实,崔龙吉,等.气流干燥对烟丝中糖苷类致香成分的影响[J].农产品加工:学刊,2010(7):44-47.
- [11] 国家烟草专卖局.YC/T 31—1996 烟草及烟草制品试样的制备和水分的测定烘箱法[S].郑州:国家烟草质量监督检验中心,1996:1-3.
- [12] ZAFER Erbay, FRLIZ Icier. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(5): 441, 464.
- [13] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying[J]. Drying Technology, 2002, 20(7): 1 503-1 513.
- [14] MA BASUNIA M A, ABE T. Thin-layer re-wetting of rough rice at low and high temperatures [J]. Journal of Stored Products Research, 2005, 41(2): 163-173.
- [15] 资文华,何邦华,刘坚,等.滚筒干燥叶丝过程工艺参数优化[J].昆明理工大学学报:自然科学版,2012(4):85-91.
- [16] 朱勇,何邦华,刘泽,等.制丝线主要热处理工序前后原料致香成分差异性解析[J].烟草科技,2013(3):37-42.
- [17] 张强,董高峰,李红武,等.滚筒烘丝机工艺参数对烤烟感官质量的影响[J].烟草科技,2011(11):10-18.
- [18] 徐如彦,毛多斌,许学坤,等.HXD工艺条件对烟丝香味成分的影响研究[J].安徽农学通报,2008,14(21):103-105.
- [19] 刘新民,杜咏梅,程森,等.烤烟烟丝填充值与其理化指标和感官品质的关系[J].中国烟草科学,2012,33(5):74-78.
- [20] 张成敏,刘志华,肖燕,等. $\beta$ -胡萝卜素化学降解产物研究[J].烟草科学研究,1999(1):46-50.

(上接第183页)

- [9] MANUEL G, FELICIDAD R, PEDRO A, et al. Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(2): 167-173.
- [10] MANUEL G, ANA M, BONASTRE O, et al. Effect of fibre size on the quality of fibre-enriched layer cakes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(1): 33-38.
- [11] GAN H E, KARIM R, MUHAMMAD S K S, et al. Optimization of the basic formulation of a traditional baked cassava cake using response surface methodology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(4): 611-618.
- [12] MAYRA D R, GEORGINA C D, MARIANO G G, et al. Effect of whey protein isolate addition on physical, structural and sensory properties of sponge cake[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 633-639.
- [13] 国家粮食局.GB/T 24303—2009 粮油检验 小麦粉蛋糕烘焙品质试验 海绵蛋糕法[S/OL].(2012-01-04)[2017-03-05].  
<http://down.foodmate.net/standard/sort/3/28572.html>.
- [14] 王凤,陈诚,杨紫璇,等.不同乳化剂在中日两国面粉重油蛋糕面糊体系中的比较研究[J].食品与机械,2017,33(1):1-6.
- [15] 梁权.麸皮蛋糕的制作及其品质研究[J].粮食加工,2016,41(1):62-64.
- [16] MIZUKOSHI M, MAEDA H, AMANO H. Model studies of cake baking II: Expansion and heat set of cake batter during baking[J]. Cereal Chemistry, 1980, 57(5): 352-355.

- [17] GUILLARD V, BROYART B, BONAZZI C, et al. Moistured-iffusivity in sponge cake as related to porous structure evaluation and moisture content[J]. Journal of Food Science, 2010, 68(2): 555-562.
- [18] 周德君.豆渣对蛋糕品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [19] 付成程,郭玉蓉,薛战峰,等.苹果肉渣膳食纤维蛋糕的研制及其质构分析[J].农产品加工:学刊,2012(11):39-42.
- [20] 段丽丽,贾洪锋,徐向波,等.葡萄皮粉在蛋糕中的应用[J].食品与发酵科技,2017,53(1):53-55,104.
- [21] 渠雪娜,陈为凤,刘晓宇,等.高纤维玉米蛋糕蒸制加工的研究[J].食品工业,2017,38(1):57-60.
- [22] 代养勇,王志刚,董海洲.添加玉米粉对蛋糕品质影响的研究[J].中国食品与营养,2011,17(5):56-59.
- [23] 王美.紫薯清蛋糕配方及工艺方法研究[J].食品研究与开发,2011,32(6):86-89.
- [24] 马腾飞,林雪婷,王丽霞,等.魔芋紫薯海绵蛋糕工艺优化及品质检验[J].长江大学学报:自科版,2016,13(27):54-60,77.
- [25] 惠丽娟.荞麦杂豆蛋糕的加工技术及影响其品质的因素的研究[D].武汉:华中农业大学,2008:18-19.
- [26] SAHI S S, ALAVA J M. Functionality of emulsifiers in sponge cake production[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 83(14): 1 419-1 429.
- [27] 高雪丽,樊震江,张晖.红薯蛋糕的开发[J].农业机械,2013(2):72-75.