

网络出版时间:2013-12-25 11:05

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.01.020

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.01.020.html

贮藏过程中不同保润剂对烟丝保润效果及水分散失动力学的影响

殷春燕¹,徐志强²,汪 华²,李 玥¹,徐菲菲¹,钟 芳¹

(1 江南大学 食品学院,江苏 无锡 214122; 2 安徽中烟工业有限责任公司技术中心,安徽 合肥 230088)

[摘 要] 【目的】探讨烟丝在干燥环境中贮藏时,不同保润剂对烟丝保润效果及水分散失动力学的影响。【方法】以传统烟草保润剂甘油和新型烟草保润剂乳酸钾为代表,将喷洒了保润剂的烟丝置于干燥环境中测试其水分含量的变化。通过对 4 种常见薄层干燥模型进行非线性拟合,确定烟丝干燥速率常数,并采用 Fick 第二定律扩散模型进行动力学分析,得到烟丝内部水分的有效扩散系数。【结果】甘油和乳酸钾都能够降低烟丝的干燥速率常数和水分有效扩散系数。当甘油添加量为 2% 时,烟丝的干燥速率常数和有效扩散系数分别从 $0.413\ 8, 2.348\ 6 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 降至 $0.339\ 2, 1.702\ 9 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$,而添加 2% 乳酸钾的烟丝干燥速率常数和有效扩散系数分别为 $0.255\ 9, 1.593\ 8 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。【结论】乳酸钾具有优于甘油的保润性能。保润剂能够有效降低烟丝的干燥速率常数和水分有效扩散系数,且干燥速率常数和水分有效扩散系数随其添加量的增加而降低。

[关键词] 烟草;保润剂;干燥动力学模型;有效扩散系数;干燥速率常数

[中图分类号] TS202.3;TS426

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)01-0096-06

Effects of different humectants on water-holding capacity and moisture transfer kinetics of tobacco during storage

YIN Chun-yan¹, XU Zhi-qiang², WANG Hua², LI Yue¹, XU Fei-fei¹, ZHONG Fang¹

(1 School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2 Research and Development Centre China Tobacco Anhui Industrial Corporation, Hefei, Anhui 230088, China)

Abstract: 【Objective】Effects of different humectants on water-holding capacity and moisture transfer kinetics of tobacco during storage in dry environment were investigated. 【Method】Tobacco leaves sprayed with traditional humectant glycerol and new humectant potassium lactate were stored in dry environment and water contents in tobacco leaves were measured during the storage. Based on the fitting according to 4 common dynamic models, the drying rate constant was determined. Besides, the diffusion model based on Fick's second law was applied to determine the effective diffusion coefficient. 【Result】Both glycerol and potassium lactate decreased the drying rate constant and the effective diffusion coefficient of the tobacco leaves. When 2% glycerol was added, drying rate constant decreased from $0.413\ 8$ to $0.339\ 2$ and the effective diffusion coefficient decreased from $2.348\ 6 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ to $1.702\ 9 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$. When 2% potassium lactate was used, they decreased to $0.255\ 9$ and $1.593\ 8 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$, respectively. 【Conclusion】Potassium lactate was better than glycerol in decreasing dry rate constant and effective diffusion coefficient of tobacco leaves

[收稿日期] 2013-04-22

[基金项目] 国家烟草专卖局资助项目“卷烟烟气味觉特征及调控研究”(110200901002)

[作者简介] 殷春燕(1987—),女,河北南宫人,博士,主要从事食品物性研究。E-mail: yanzinangongyu@126.com

[通信作者] 钟 芳(1972—),女,河南新乡人,教授,博士生导师,主要从事食品物性、食品胶体研究。

E-mail: fzhong@jiangnan.edu.cn

and they could be further decreased when increasing the adding amount of humectants.

Key words: tobacco; humectants; drying dynamic models; effective diffusion coefficient; drying rate constant

烟叶的含水量是影响烟叶韧性、燃烧性、香气、吸食舒适度等特性的重要因素,对烟叶从调制到最终产品的各个阶段都至关重要。在一些空气相对湿度较低的地区,烟丝水分将随烟草贮存时间的增加而逐渐散失,从而导致卷烟加工过程中的造碎以及抽吸过程中干燥感和刺激性的增强^[1],因此卷烟加工过程中通常加入保润剂以增强烟丝持水力,减缓水分散失速率。评价保润剂对烟草保润性能的影响常以平衡含水率的变化为指标^[1-3]。平衡含水率代表的仅是烟丝在测试环境下的平衡状态,而物料失水是一个非稳态传质过程,这一非稳态过程不仅表现在物料含水率上,也体现在物料内部水分的扩散过程中^[4-5]。建立烟丝水分动力学模型,研究烟丝失水的动力学规律,通过分析保润剂对烟丝水分扩散的影响,了解保润剂对整个烟丝干燥过程的作用,有利于深入分析和理解保润剂对烟丝保润性能的影响机制,从而能够对保润剂的性能进行更为有效的评价。因此,从动力学角度了解保润剂对烟丝水分扩散过程的影响具有重要意义。

甘油为烟草中常用的传统保润剂。乳酸钾含有羟基和羧基两类亲水基团,具有较强的保湿能力,有较高的食用安全性^[6-8],有望成为一种具有良好保润性能的新型烟草保润剂。本文以甘油和乳酸钾为保润剂,采用薄层干燥模型以及基于 Fick 第二定律的扩散模型,从动力学角度分析了烟草失水过程中保润剂对烟丝水分扩散的影响,从而对保润剂保润性能的研究提供了新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:甘油,国药集团化学试剂有限公司;乳酸钾,PURAC 公司;白肋烟烟丝,安徽中烟工业公司。

仪器:KBF-240 恒温恒湿实验箱,德国 BIND-ER;AR2130 电子精密天平,梅特勒-托利多;FD115 鼓风干燥箱,德国 BINDER。

1.2 方法

1.2.1 保润剂的保湿性 准确称量质量分数为 60%的保润剂溶液(乳酸钾和甘油)各 1 g(精确到 0.000 1 g),每份样品 3 个重复,同样称取 1 g 的纯水作为空白对照,置于恒温恒湿实验箱中,实验箱中

温度为 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度(RH)分别为 $(40 \pm 2)\%$ 及 $(70 \pm 2)\%$ 。在前 10 h 内每隔 2 h 精确称质量,10 h 后依次在 24,48,72,96 和 120 h 时称质量,计算样品的保湿率。

$$\text{保湿率} = m_t / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_t 为放置 t h 后保润剂溶液的质量; m_0 为放置前保润剂溶液的质量。

1.2.2 保润剂在烟丝中的保润性能 样品处理:将空白烟丝置于温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度(RH) $(60 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿实验箱中平衡 48 h,平衡后的烟丝水分含量在 12%左右。取平衡后的烟丝 7 份,100 g/份,采用喉头喷雾器分别将 0.05,0.1,0.2 g/mL 的甘油和乳酸钾溶液各 10 mL 均匀添加到烟丝中,使最终保润剂纯物质的用量为烟丝质量的 0.5%,1% 和 2%,加入同等体积的纯水作为空白对照。将烟丝置于 40°C 的烘箱中烘干 2 h,然后再置于温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度(RH)为 $(60 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿实验箱中平衡 48 h,参照 YC/T 31—1996^[9]测定此时烟丝的水分含量。将每种烟丝样品分成 3 份(每份精确称取 20 g),置于温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度(RH)为 $(40 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿实验箱中,分别在 2,4,6,8,10,24 和 48 h 时称质量,测定其水分含量随时间的变化(水分含量的测定采用差量法:根据样品起始含水率和各时间点样品与起始样品的质量差计算样品的即时含水率)。

1.2.3 保润剂对烟丝水分散失动力学的影响

(1)烟丝干燥动力学模型的建立。为了研究保润剂对烟丝水分散失动力学的影响,利用 Origin8.0 对试验数据进行拟合,建立合适的烟丝干燥动力学模型。常用的食品干燥动力学经验和半经验模型如下所示^[10-14]。

$$\text{Lewis: } MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt); \quad (2)$$

$$\text{Page: } MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n); \quad (3)$$

Two-term:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t); \quad (4)$$

Henderson-Pabis:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt). \quad (5)$$

式中: MR 为水分比,表示一定干燥条件下物料中未被干燥去除的水分; t 为干燥时间(h); M_e 为平衡水分含量(kg/kg); M_0 为初始水分含量(kg/kg); M_t 为 t 时刻的水分含量(kg/kg); k 为干燥速率常数; a, b, n, k_1, k_2 为待定系数。

对添加不同含量保润剂的烟丝,分别使用上述 4 种干燥模型(公式(2)~(5))进行拟合求值,使用决定系数 R^2 和 χ^2 为统计检验指标。其中 R^2 越接近 1 说明模型能更好地解释变量的变异性; χ^2 越小说明模型越可靠。其计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(MR_{\text{c}nk,i} - \overline{MR}_{\text{exp}})^2}{(MR_{\text{exp},i} - \overline{MR}_{\text{exp}})^2}}{N - P}; \tag{6}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{c}nk,i})^2}{N - P}. \tag{7}$$

式中: $MR_{\text{exp},i}$ 为试验观测值; $MR_{\text{c}nk,i}$ 为模型预测值; $\overline{MR}_{\text{exp}}$ 为试验观测值的算术平均值; N 为试验观测值个数; P 为参数个数。

(2) 烟丝有效水分扩散系数的测定。物料内部水分扩散主要有 knudsen 扩散、液相扩散或气相扩散等。常用有效扩散系数 D_{eff} 来表示物料内部水分扩散的快慢。因此为了研究保润剂对烟丝内部水分扩散的影响,本文采用基于 Fick 第二定律的扩散模型来确定烟丝中的水分扩散系数^[15-17]。

扩散模型表示为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right). \tag{8}$$

式中: M 为物料的干基含水率(kg/kg); t 为干燥时间(s); D_{eff} 为有效扩散系数(m^2/s); x, y, z 为空间坐标的 3 个轴的方向。

本文中假设:物料初始水分均匀;可以忽略外部传质阻力,扩散只发生在垂直烟叶的方向,则扩散模型(Eq(8))经过积分求解,化简为:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (2n+1)^2}{4L^2} D_{\text{eff}} t\right). \tag{9}$$

式中: MR 为水分比; L 为烟叶厚度的 $\frac{1}{2}$ (m); n 为无穷级数,因公式(9)级数解收敛,计算过程取 $n = 1$ ^[5]。

2 结果与分析

2.1 保润剂的保湿性测定结果

保润剂具有保湿特性主要是由于保润剂含有大量的亲水基团如羟基、羧基,这些基团通过与水分子形成分子间氢键作用,从而抑制了水分子的逃逸。以传统烟草保润剂甘油和新型烟草保润剂乳酸钾为代表,本文分别研究了 2 种相对湿度环境中($RH = (40 \pm 2)\%$, $(70 \pm 2)\%$)保润剂的保湿率,结果见图 1。由图 1 可知,恒定温度下,在低湿度环境($RH = (40 \pm 2)\%$)中保润剂溶液中的水分蒸发明显慢于纯水。同等质量分数的乳酸钾溶液水分挥发速率低于甘油溶液,随着放置时间的延长,2 种保润剂溶液间保湿率差异越大,由 24 h 时的 14% 增至 120 h 的 36%。在 120 h 时,甘油溶液的保湿率仅为 31%,乳酸钾溶液的保湿率约为甘油溶液的 2 倍。

从图 1 可以看出,在 $RH = (70 \pm 2)\%$ 的环境中,纯水处于缓慢挥发状态,其水分挥发速率高于 2 种保润剂溶液,而乳酸钾溶液和甘油溶液对于水分的保持显示出了不同的趋势。随放置时间的延长,质量分数为 60% 的乳酸钾溶液能够从空气中吸收水分,而同等质量分数的甘油溶液由于其溶液表面水蒸气分压大于空气中的水蒸气分压,呈现出略微失水状态。因此可以推断,保润剂能有效保持水分,与甘油相比,乳酸钾对水分子结合作用力较大,能够更为有效地减缓水分散失速率。

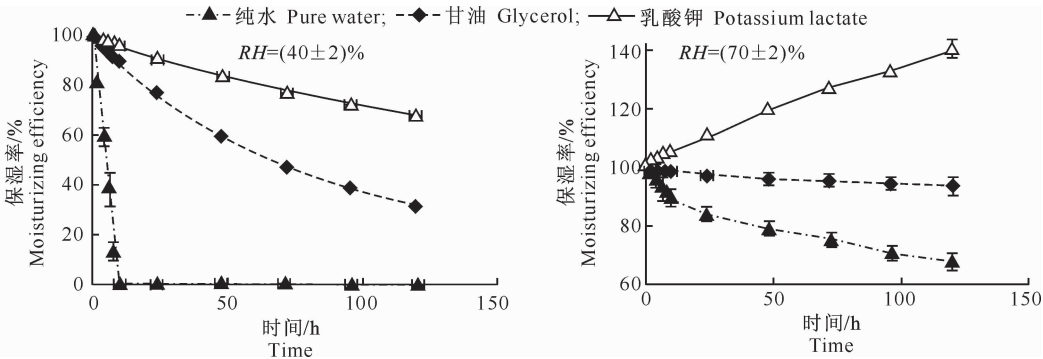


图 1 不同环境湿度下保润剂的保湿率

Fig. 1 Moisturizing efficiency of humectants with different relative humidity

2.2 添加保润剂烟丝的水分变化分析

为了进一步探讨在低湿度环境中保润剂对烟丝水分含量变化的影响,分别按照烟丝质量的 0.5%,1% 和 2%将甘油和乳酸钾添加到烟丝中进行保润性测试。由于喷洒保润剂后,样品水分含量较高,故将样品先置于 $T=(22\pm1)^{\circ}\text{C}$ 、 $RH=(60\pm2)\%$ 的

环境中平衡,然后再置于 $RH=(40\pm2)\%$ 的环境中进行保润性能测试,结果见图 2。由图 2 可知,在 $RH=(60\pm2)\%$ 的环境下平衡后,样品的含水率在 $11.9\%\sim14.2\%$ 。甘油和乳酸钾都能够提高烟丝的平衡含水率,且烟丝平衡含水率随保润剂添加量的增加而增加。

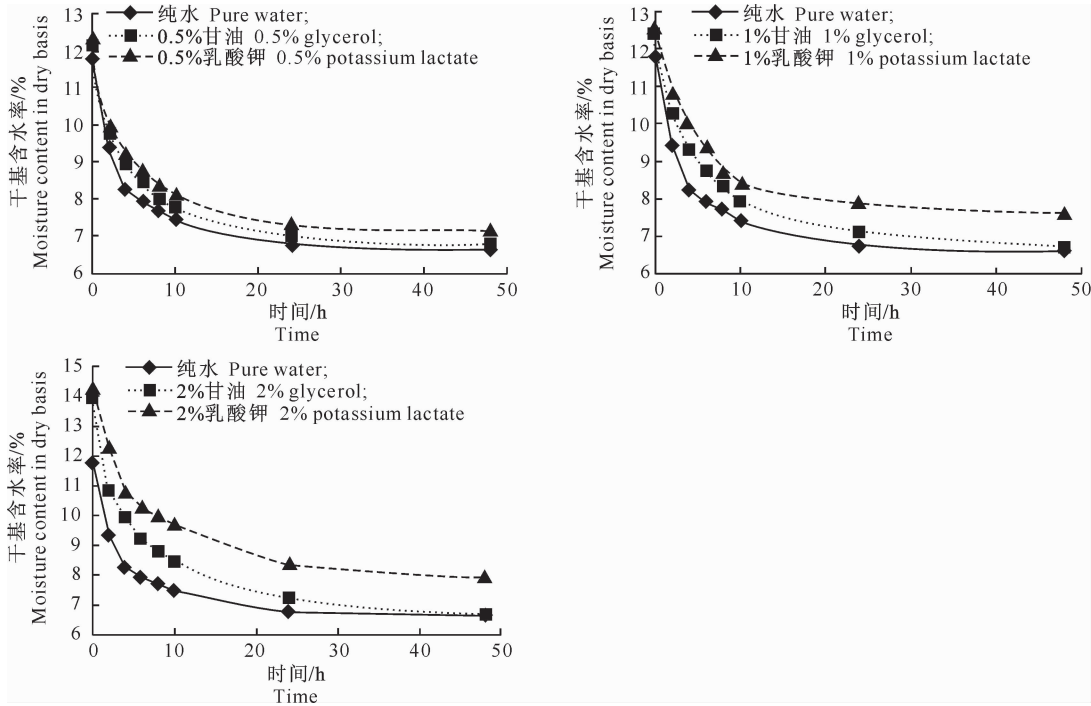


图 2 保润剂对烟丝持水性的影响
Fig. 2 Effects of humectants on the moisture holding capacity of tobacco leaves

如图 2 所示,在低湿度环境中 ($RH=(40\pm2)\%$),所有样品在放置的前 24 h 内水分含量迅速降低,24 h 后水分散失开始变得缓慢。相对于纯水对照,甘油和乳酸钾都表现出了保湿作用,但乳酸钾的保湿效果更为明显,在试验的整个阶段,添加乳酸钾的样品水分含量始终高于甘油样品。这与 2.1 中保湿率测定的结果一致,说明乳酸钾有效减缓了烟丝水分的散失,具有优于甘油的保湿性能。

从图 2 还可知,不同的保润剂添加量也将影响卷烟的保润性能。随着乳酸钾添加量的增加,乳酸钾样品的实时水分含量与空白对照水分含量之差也随之增加。在放置 48 h 时,纯水对照样品的水分含量为 6.61%,添加 0.5%,1%,2%乳酸钾的样品较纯水对照分别提高了 8.32%,15.13%和 19.06%。

2.3 保润剂对烟丝水分散失动力学的影响

2.3.1 保润剂对烟丝干燥动力学模型的影响 由于各样品的初始含水率不同,因此在计算烟丝的干燥动力学模型时,首先将试验得到的干基含水率转

化成水分比 MR 。表 1 列出了不同干燥动力学模型对试验数据模拟后所得到的拟合检验指标 R^2 和 χ^2 。由表 1 可知,对于所有样品,Lewis 模型表现出最低的 R^2 值以及最大的 χ^2 值,其次为 Henderson-Pabis 模型。Page 模型和 Two-terms 模型的 R^2 均高于 0.99,相应的 χ^2 小于 8.89×10^{-4} ,其中,Page 模型具有最大的 R^2 值和最小的 χ^2 值。因此,Page 模型能够更好地描述烟丝在贮藏过程中水分散失的变化规律。

Page 模型对各样品试验数据拟合得到的待定系数如表 2 所示。由表 2 可知,在相同的干燥环境下,添加纯水的烟丝表现出了最高的干燥速率常数 k 。甘油和乳酸钾能够降低 Page 模型中的 k 值,且 k 值随保润剂添加量的增加而降低。当添加量相同时,乳酸钾较甘油更为有效地降低了 k 值。说明 k 值不仅与环境中温度、风速相关^[18],也与样品自身持水性能相关。

表 1 烟丝干燥动力学模型拟合统计结果

Table 1 Statistical results obtained from different drying models of tobacco leaves

处理方法 Processing method	Lewis		Page		Two-term		Henderson-Pabis	
	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
纯水 Pure water	0.908 1	0.116 3	0.997 6	$2.504\ 1\times10^{-4}$	0.996 6	$3.626\ 4\times10^{-4}$	0.971 3	0.003 0
0.5% 甘油 0.5% glycerol	0.912 9	0.088 5	0.999 4	$6.435\ 9\times10^{-5}$	0.999 2	$8.885\ 8\times10^{-4}$	0.976 2	0.002 5
1% 甘油 1% glycerol	0.943 4	0.057 7	0.998 3	$1.886\ 5\times10^{-4}$	0.997 6	$2.628\ 4\times10^{-4}$	0.987 0	0.0014
2% 甘油 2% glycerol	0.883 4	0.079 9	0.999 4	$1.346\ 3\times10^{-4}$	0.998 6	$6.362\ 8\times10^{-4}$	0.962 2	0.003 8
0.5% 乳酸钾 0.5% potassium lactate	0.918 4	0.079 1	0.999 2	$1.250\ 9\times10^{-4}$	0.998 8	$7.596\ 4\times10^{-4}$	0.996 9	0.003 2
1% 乳酸钾 1% potassium lactate	0.885 5	0.109 7	0.995 7	$4.870\ 5\times10^{-4}$	0.994 1	$6.642\ 6\times10^{-4}$	0.993 9	$6.945\ 2\times10^{-4}$
2% 乳酸钾 2% potassium lactate	0.927 4	0.047 9	0.992 7	$7.636\ 6\times10^{-4}$	0.992 8	$7.289\ 8\times10^{-4}$	0.972 4	0.002 9

表 2 Page 模型的拟合系数

Table 2 Fitting results of the Page model

处理方法 Processing method	k	n
纯水 Pure water	0.413 8	0.663 2
0.5% 甘油 0.5% glycerol	0.355 3	0.678 9
1% 甘油 1% glycerol	0.348 7	0.674 9
2% 甘油 2% glycerol	0.339 2	0.631 7
0.5% 乳酸钾 0.5% potassium lactate	0.354 9	0.669 9
1% 乳酸钾 1% potassium lactate	0.303 9	0.680 9
2% 乳酸钾 2% potassium lactate	0.255 9	0.720 4

2.3.2 保润剂对烟丝水分扩散系数的影响 由图 2 可知,烟丝在低湿环境下失水是降速干燥阶段,说明在这一失水过程中,烟丝内部的水分扩散速率小于表面气化速率,内部的水分扩散是控制水分散失速率的主导因素。基于 Fick 第二定律的扩散模型可以用来描述食品的降速干燥特性。将空白样品及添加保润剂样品的实时水分含量带入公式(9),通过 Origin 8.0 非线性回归分析,得到烟丝的水分有效扩散系数,如表 3 所示。由表 3 可知,在测试环境下($T=(22\pm1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $RH=(40\pm2)\%$),样品烟丝的水分有效扩散系数为 $1.593\ 8\times10^{-10}\sim2.348\ 6\times10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$,与 Saravacos 等^[19]报道的食品物料干燥过程中有效扩散系数为 $0.01\times10^{-11}\sim50\times10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ 吻合。

由表 3 可以看出,与添加纯水的样品相比,保润剂能不同程度降低烟丝内部水分有效扩散系数。对于添加同一种保润剂的样品而言,水分有效扩散系数随其添加量的增加而降低。在相同的添加量下,添加乳酸钾样品的水分有效扩散系数低于甘油样品,这与上述 Page 模型的结果一致。其中,添加 2%乳酸钾样品的水分有效扩散系数最低,较纯水对

照降低了 32.14%。这可能是由于添加保润剂后,保润剂和烟丝内部的水分结合,导致水分在样品中的扩散能力减弱,从而降低了水分的散失速率。

表 3 烟丝的水分有效扩散系数

Table 3 Effective diffusion coefficients of moisture in tobacco leaves

处理方法 Processing method	$D_{eff}/$ ($\times10^{-10}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
纯水 Pure water	2.348 6
0.5% 甘油 0.5% glycerol	2.067 9
1% 甘油 1% glycerol	2.007 1
2% 甘油 2% glycerol	1.702 9
0.5% 乳酸钾 0.5% potassium lactate	2.013 3
1% 乳酸钾 1% potassium lactate	1.949 4
2% 乳酸钾 2% potassium lactate	1.593 8

3 结 论

(1)保润试验结果表明,烟丝水分散失是降速干燥过程,内部水分扩散控制着烟丝干燥速率。

(2)从动力学角度分析了保润剂对烟草持水性能的影响。通过对 4 种常见的食品干燥动力学经验和半经验模型进行非线性拟合,以决定系数 R^2 和 χ^2 为评价指标,发现 Page 模型为描述烟丝水分散失过程的最佳模型。Page 模型中干燥速率常数随保润剂添加量的增加而降低。

(3)依据 Fick 第二定律的扩散模型,得到在干燥环境($T=(22\pm1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $RH=(40\pm2)\%$)下烟丝内部水分有效扩散系数在 $1.593\ 8\times10^{-10}\sim2.348\ 6\times10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 。保润剂能够降低烟丝内部水分的有效扩散系数,且有效扩散系数随其添加量的增加而降低。

(4)与甘油相比,乳酸钾具有更优的吸湿性能及

保润特性,能够更为有效地降低烟丝的干燥速率常数和有效扩散系数。

[参考文献]

[1] 郭国宁,严恒,蔡冰,等. KSAP-T 的保润性能及其应用研究 [J]. 安徽农业科学,2010,38(12):6569-6572.
Guo G N, Yan H, Cai B, et al. Characteristics and application of novel humectant KSAP-T in tobacco [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(12): 6569-6572. (in Chinese)

[2] 伍锦鸣,卓浩廉. 淀粉改性烟草保润剂的制备 [J]. 现代食品科技,2012,28(1):77-81,42.
Wu J M, Zhuo H L. Production of a modified-starch tobacco humectants additive [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(1): 77-81, 42. (in Chinese)

[3] 严恒,郭国宁,程艳,等. 魔芋葡甘聚糖基吸水剂的保润性能研究 [J]. 食品工业科技,2010(3):142-144.
Yan H, Guo G N, Cheng Y, et al. Study on moisture retention of konjac super absorbent polymer [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010(3): 142-144. (in Chinese)

[4] 侯伟华. 茶叶烘干机理与烘干机的节能改进 [D]. 武汉:华中农业大学,2009.
Hou W H. Drying mechanism of tea and improvement about dryer energy-saving [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[5] 范柳萍. 低脂胡萝卜脆片的加工及贮藏研究 [D]. 江苏无锡:江南大学,2005.
Fan L P. Study on proessing and storage of low-fat carrot chips [D]. Wuxi, Jiangsu: Jiangnan University, 2005. (in Chinese)

[6] Astruc T, Labas R, Vendeuvre J L, et al. Beef sausage structure affected by sodium chloride and potassium lactate [J]. Meat Science, 2008, 80(4): 1092-1099.

[7] Weaver R A, Shelef L A. Antilisterial activity of sodium, potassium or calcium lactate in pork liver sausage [J]. Journal of Food Safety, 1993, 13(2): 133-146.

[8] Knock R C, Seyfert M, Hunt M C, et al. Effects of potassium lactate, sodium chloride, sodium tripolyphosphate, and sodium acetate on colour, colour stability, and oxidative properties of injection-enhanced beef rib steaks [J]. Meat Science, 2006, 74(2): 312-318.

[9] 国家烟草专卖局. YC/T 31—1996 烟草及烟草制品:试验的制备和水分的测定 烘箱法 [S]. 北京:中国标准出版社,1996.

State Tobacco Monopoly Bureau. YC/T 31—1996 Tobacco and tobacco products: Preparation of test sample and determination of water content-oven method [S]. Beijing: China Standard Press, 1996. (in Chinese)

[10] Doymaz İ. Drying behaviour of greenbeans [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(2): 161-165.

[11] Sacilik K, Unal G. Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 207-215.

[12] Madambaa P S, Robert H D, Ken A B. The thin-layer drying characteristics of garlic slices [J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75-97.

[13] Roberts J S, Kidd D R, Padilla-Zakour O. Drying kinetics of grape seeds [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 460-465.

[14] 何新益,程莉莉,刘金福,等. 苹果片变温压差膨化干燥特性与动力学研究 [J]. 农业机械学报,2012,43(5):130-135.
He X Y, Cheng L L, Liu J F, et al. Drying characteristics and dynamics of apple slices by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 130-135. (in Chinese)

[15] Walton L R, Henry Z A, Henson W H. Moisture diffusion in the cured burley tobacco leaf [J]. Transactions of the ASA-BE, 1976, 19(4): 796-800.

[16] Walton L R, Casada M E, Henson W H. Diffusion of moisture from burley tobacco leaves during curing [J]. Transactions of the ASABE, 1982, 25(4): 1099-1102.

[17] Fernando W J N, Low H C, Ahmad A L. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials: A study on slices of banana, cassava and pumpkin [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(4): 310-316.

[18] 关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型 [J]. 农业机械学报,2012,43(2):151-158,191.
Guan Z Q, Wang X Z, Li M, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151-158, 191. (in Chinese)

[19] Saravacos G D, Maroulls Z B. Transport properties of foods [M]. United States: Marcel Dekker, Inc, 2001.