

文章编号:1001-6880(2015)6-1037-05

玫瑰花瓣压花材料热风干燥动力学模型

谭颖¹,陈国菊¹,程玉瑾¹,袁爱群^{2*},马少妹²,韦冬萍²¹华南农业大学园艺学院,广州 510642; ²广西民族大学化学化工学院,南宁 530006

摘要:采用热风干燥获得压花用玫瑰花瓣,研究热风干燥温度、时间对玫瑰花瓣干燥特性、压花艺术美观性的影响,采用SEM表征玫瑰花瓣干燥过程表面微观形态特征,以期建立干燥过程动力学模型并计算动力学参数。结果表明,在试验设计温度范围内,热风干燥温度越高,时间越长,越有利于降低花瓣的水分,但会降低花瓣的艺术美观性,在热风40℃、840 min下干燥,可以获得具有较好艺术美感的玫瑰花瓣压花材料;干燥过程的有效扩散系数为 $2.524 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,活化能为11.322 kJ/mol,动力学模型可用薄层干燥Page模型来描述。

关键词:玫瑰花瓣;压花;干燥动力学;热风干燥

中图分类号:S375

文献标识码:A

DOI:10.16333/j.1001-6880.2015.06.018

Dynamic Model of Hot-Air Drying for Rose Petals as Pressed Flower Materials

TAN Ying¹, CHEN Guo-ju¹, CHENG Yu-jin¹, YUAN Ai-qun^{2*}, MA Shao-mei², WEI Dong-ping²¹College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;²College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China

Abstract: The rose petals were dried by hot-air drying to obtain the pressed flower materials. The influences of temperature or drying time on the drying characteristics, artistic beauty of rose petals were studied. Micromorphology of rose petals was characterized by SEM. The drying dynamic model was established by statistical analysis and the dynamic parameters were also calculated. The results showed that in the temperature range of experimental design, the rose petals drying rate was increased with the increasing of temperature or drying time. However, the higher temperature or longer drying time was not useful to improve the artistic beauty of rose petals. The artistic beauty of rose petals can be obtained under the drying condition of temperature 45℃, 840 min. Connect modeling coefficients of the hot air drying was $2.524 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Activation energy was 11.322 kJ/mol. The thin layer drying page model was suitable for describing the drying process of pressed rose petals by hot-air drying.

Key words: rose petals; pressed flower; drying dynamic model; hot-air drying

压花是将植物材料(根、茎、叶、花、果)通过物理或化学方法,经过脱水、保色压制和干燥处理,再经过构思而制成精致艺术品的过程。与普通的干花制备不同,压花材料的含水量不能超过安全限度,否则就易引起压花材料的品质的退化,除了水分含量要严格控制外,还必须保证压花材料的平整性、色泽等感官美观性,因此干燥是一个极为重要的环节^[1,2]。尽管压花技术已有悠久的应用历史,但迄今为止,大多数压花材料的干燥基本是沿用传统的方法凭经验进行。近些年,人们的研究^[3-5]侧重于色素在干燥过程中的变化以及如何通过化学法提高花材的颜色、外观等审美感觉。随着干燥技术的发展,

热风、微波、真空冷冻干燥等技术在干燥花的制备中得到应用^[6-9],但对于压花材料的干燥过程仍缺乏系统的理论研究,在对压花材料进行干燥时,难以准确地控制压花材料的含水量。因此,掌握压花材料含水量的变化规律,利用数学模型定量描述压花材料的干燥过程,进行干燥动力学研究,对科学制定干燥时间、调整干燥工艺、提高能效和产能等有着重要的理论及实际意义。

薄层干燥研究是探讨农副产品干燥特性的基础^[10],已广泛地应用于农副产品加工领域^[11,12],但用于压花材料干燥方面的研究却不多见^[13,14]。为了更好了解压花材料的干燥过程,本试验以压花用玫瑰花瓣为研究对象,对其热风干燥过程、外观和微观形貌变化、热解特性进行研究,确定其薄层干燥过程动力学的数学模型,并求算出干燥过程的动力学

参数,为进一步研究压花材料的热风干燥以及今后的规模化生产中干燥设备的设计、干燥工艺的制定等提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

市售新鲜红色玫瑰(*Rosachinensis*,平均含水率为78.3%),DHG-9076A电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏试验设备有限公司),干燥板(孔径4 mm,孔间距8 mm),S-3400N型扫描电子显微镜(日本日立公司)。

1.2 花瓣的含水率测定

新鲜玫瑰花经去除雌蕊、花托、多余花瓣,清除表面异物,测定花瓣的含水率,然后将花瓣上下两侧依次放上吸水宣纸和薄海绵,使用干燥板将其夹住、压紧,放入事先升温好的恒温鼓风干燥箱中,开始计时,每隔一定时间测定花瓣的含水率,水分含量按照GB5009.3-2003测定。

1.3 艺术美观性

分别从1-平整度,2-完整度,3-褐变程度,4-色变程度,5-光泽度等5个不同方面对干燥后玫瑰花瓣的外观、色泽等进行评分,每项满分10分。

1.4 干燥动力学模型及参数计算

在干燥过程中,根据被干燥物料在不同时刻的含水量可计算水分比^[15-17],水分比(M_R)表示某时刻待除去的自由水分量与初始总自由水分量的比值,其表达式为:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

其中, M_t 是t时刻的干基含水量(g/g绝干物料), M_0 和 M_e 分别是初始和达到平衡时干基含水量(g/g绝干物料)。由于湿物料的平衡干基含水量 M_e 难以确定,可近似用干燥产品的最终干基含水量 M_f (g/g绝干物料)代替:

$$M_R = \frac{M_t - M_f}{M_0 - M_f} \quad (2)$$

以 M_R 对干燥时间t作图即为以水分比表示的干燥曲线。

玫瑰花瓣的干燥符合薄层干燥类型,因此可以采用常用的薄层干燥动力学模型对实验数据进行拟合,将Fick第二定律应用于薄层干燥过程可得:

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

对于较长时间的干燥过程,式(3)可简化为:

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

$$\text{两边取对数得到: } \ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D t}{4L^2} \quad (5)$$

以水分比的对数 $\ln M_R$ 对干燥时间t作图可得一条直线,从直线的斜率可求得有效水分扩散系数D。干燥温度对有效水分扩散系数D的影响关系可用阿伦尼乌斯公式表达,即:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

式中: D_0 为指前因子(m²/s), E_a 为干燥过程的活化能(kJ/mol),R为气体常数8.314 J/(mol·K),T为绝对温度(K)。对(6)式的两端取对数得:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

以有效水分扩散系数的对数 $\ln D$ 对温度的倒数1/T作图可得一条直线,由直线的斜率可求得活化能。

2 结果与讨论

2.1 玫瑰花瓣热风干燥特性

2.1.1 干燥温度对 M_R 的影响

探索实验发现,干燥板、宣纸、海绵等对玫瑰花瓣干燥的影响不大,这是因为这些材料的孔隙较大对水分从花材向环境的扩散阻力小,而温度和时间的影响较大,是因为两者均能促进水分扩散,此外由于压花花材有艺术美观性的要求,干燥的温度和时间都不能太高和太长,以最终10%~18%含水率为宜^[18]。分别选用35、40、45、50℃下,测定不同干燥时间下花瓣的含水率,水分比与时间的关系如图1所示。从图1可以看出,相同温度,干燥前期水分失去量较大,随着时间的进行,逐渐减少,这主要是前期花瓣水分含量大,水分驱动力较大,从室温升高到某个温度时表面水分在短时间内迅速蒸发,当表面水分蒸发后,花瓣内部的水分扩散到表面需要一段时间,导致水分失去量减少,后期花瓣水分含量较少,花瓣收缩后细胞间隙减小,水分的蒸发阻力不断增大,导致水分失去量减小,随着时间的延长,花瓣中水分逐渐减少,温度越高干燥速率越快,达到相同的含水率,50℃所需要的时间比30℃缩短80 min左右,45℃在840 min就可以达到压花材料所需的含水率。

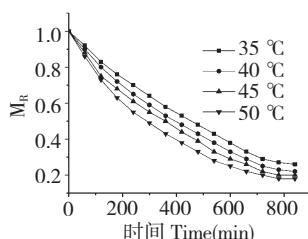


图 1 不同干燥温度下玫瑰花瓣的干燥曲线

Fig. 1 Drying curves of rose petals under different temperatures

2.1.2 热风温度对玫瑰花压花艺术美观性的影响

实验过程发现采用热风干燥,温度提高或时间延长,花瓣有轻度萎缩现象,花瓣颜色变紫,且干燥不均匀。温度对于花材干燥过程中色变的影响是较大的,当温度升高时,酚类色素的稳定性下降,微生物和酶活性显著增强引起化学反应的加速,导致花瓣的色变加剧。而热风干燥的时间较长,酚类色素易被氧化,破坏了原有的颜色导致发生褐变。虽然低温下干燥花瓣可以较好地保持花材颜色,但是水分蒸发慢,耗时太长,很难达到保色的要求,干燥时间过长,细胞因失水引起原生质体的收缩,对细胞形态起支持作用的膨压下降,较薄的细胞壁承受不起外界大气压力和原生质收缩所产生的牵拉作用而引起玫瑰花瓣发生萎缩、皱折等外观形态变化。

选择不同的热风干燥温度,840 min 后分别从 1-平整度、2-完整性、3-褐变程度、4-色变程度和 5-光泽度评价花瓣的艺术美观性,温度对玫瑰花瓣压花艺术美观性的影响如图 2 所示,从图 2 可以看到,花瓣干燥后平整度随着温度升高、时间的延长而提高,但温度升高、时间缩短可以降低褐变程度,温度高时褐变程度也随之加重,综合不同干燥温度和时间下花瓣的含水率及艺术美观性指标,认为 40 °C 下烘干 840 min,可制备用于压花材料的玫瑰花瓣。

2.2 干燥过程玫瑰花瓣表面的微观形貌

为了更好地了解干燥过程花瓣表面微观形貌的

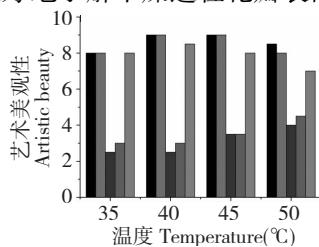


图 2 不同温度对花瓣艺术美观性的影响

Fig. 2 The effect of temperature on artistic beauty of pressed rose petals

改变,采用 SEM 观察其表面形貌^[19,20]。图 3(A)为新鲜玫瑰花花瓣的正面 SEM 图。可以看到,玫瑰花花瓣的表面由排列整齐的乳突结构组成,且乳突饱满,在每个乳突顶端有褶皱结构。图 3(B~D)为干燥 300、500、840 min 的玫瑰花花瓣的正面 SEM 图。可以看到,随着干燥的进行,阵列状的乳突结构逐渐收缩,导致中间乳突顶端的褶皱变大,最后因失水产生中空造成乳状腔体逐步塌陷。图 4(a)为新鲜玫瑰花花瓣的反面 SEM 图,可以看到,其表面有沟回结构,而且这些沟回深浅不一,高凸部分围成圈,形成围栏状。图 4(b~d)为干燥过程 300、500、840 min 玫瑰花花瓣反面的 SEM 图,可以看到,沟回结构仍然存在但已发生收缩,高凸部分逐渐萎缩,最后形成浮雕状突起。

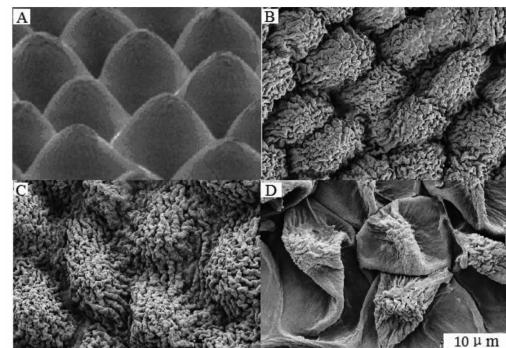


图 3 玫瑰花瓣干燥过程正面微观形貌的变化

Fig. 3 Micromorphologic changes of obverse surface for rose petals during drying



图 4 玫瑰花瓣干燥过程反面微观形貌的变化

Fig. 4 Micromorphologic changes of reverse surface for rose petals during drying

2.3 动力学模型的拟合

用于薄层干燥的动力学方程有 Lewis、Page、Henderson-Pabis、Modified-Page, 两项指数, Thompson 和 Wang and Singh 等,选取 40 °C 热风干燥数据,进

行以上动力学模型拟合,拟合结果较好的列在表1。从表1的结果可以看到,玫瑰花瓣的真空干燥过程用Page方程拟合的决定系数 R^2 较高,而卡方(χ^2)均方根(RMSE)最小,因此该过程可用Page方程模型描述,其动力学方程的表达式为 $M_R = \exp(-1.6655 \times 10^{-3}t^{1.0144})$ 。计算过程的有效水分扩散系数和活化能结果见表2,从表2的数据可以看到,其有效水分扩散系数的数值随温度的升高而增大、这是温度升高花瓣的干燥速率增大使得含水量下降加快

的主要原因。玫瑰花瓣在35~50℃内干燥的有效水分扩散系数数值符合薄层类物质干燥的有效扩散率范围 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,其活化能数值小于40 kJ/mol,符合物理过程的活化能范围。以此干燥数学模型可预测出压花材料干燥过程中水分的变化规律,结合对压花材料水分的要求,可计算不同热风干燥的时耗,从而估计能耗,为设计高效经济的压花材料专用干燥装备与制定科学的干燥工艺提供理论参考。

表1 动力学模型的拟合结果

Table 1 Fitting results of the drying dynamic model

模型 Models	模型方程 Model equations	T (℃)	R^2	$S (10^{-2})$	$E (10^{-2})$
Newton	$M_R = \exp(-kt)$	35	0.9795	0.3946	8.1721
		40	0.9808	0.2002	6.5951
		45	0.9842	0.1996	5.9485
		50	0.9846	0.2041	6.7123
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	35	0.9981	0.0997	0.00617
		40	0.9986	0.0622	0.00271
		45	0.9960	0.0799	0.00687
		50	0.9977	0.0354	0.00112
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	35	0.9976	0.0946	4.8826
		40	0.9971	0.04879	2.1817
		45	0.9928	0.06234	4.0614
		50	0.9915	0.08979	5.0004
Tompson	$t = a\ln M_R + B(\ln M_R)^2$	35	0.9851	0.2301	14.2141
		40	0.9869	0.2111	17.3548
		45	0.9890	0.1389	11.2444
		50	0.9897	0.1177	11.3254

表2 热风干燥动力学参数

Table 2 Dynamic parameters of hot air drying

T (℃)	D (m^2/s)	$E_a (\text{kJ/mol})$
35	$2.299 \times 10^{-10}, R^2 = 0.9947$	
40	$2.524 \times 10^{-10}, R^2 = 0.9965$	
45	$2.681 \times 10^{-10}, R^2 = 0.9949$	11.322, $R^2 = 0.9940$
50	$7.708 \times 10^{-10}, R^2 = 0.9920$	

2.4 动力学模型的验证

为了验证Page方程模型的准确性,选择40℃

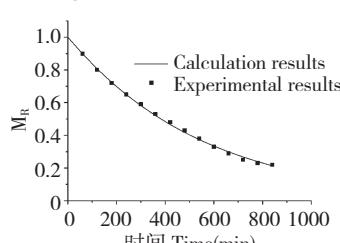


图5 热风干燥理论值与实验值比较

Fig. 5 Comparison of theoretical values and actual measured values of hot air drying

条件的热风干燥实验数据和Page方程计算的 M_R 对时间 t 作图,得到图5,从图5可以看到,计算值和实验值吻合较好,进一步说明采用Page方程模型来描述玫瑰花瓣的热风干燥是可靠的。

3 结论

通过对玫瑰花瓣压花材料的热风干燥过程及特性的研究,发现热风温度对玫瑰花瓣干燥速度的影响较大,温度越高,干燥越快;在相同干燥时间下,玫瑰花瓣压花材料的艺术美观性随着温度的升高,逐

渐增强,当温度超过45℃后又有减弱的趋势,在热风40℃、840 min下干燥,可以制备具有较好艺术美感的玫瑰花瓣压花材料。随着干燥的进行,玫瑰花瓣正面原排列整齐的乳突结构逐渐收缩,引起乳突顶端的褶皱变大且间距逐步增大,最后因失水产生中空造成乳状腔体塌陷;花瓣反面的沟回结构发生收缩,高凸部分逐渐萎缩,最后形成浮雕状突起。玫瑰花瓣热风干燥过程的有效扩散系数为 $2.524 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,活化能为11.322 kJ/mol,其干燥动力学模型可用薄层干燥Page模型来描述,其表达式为 $M_R = \exp^{(-1.6655 \times 10^{-3} t^{1.0144})}$ 。

参考文献

- Chen GJ(陈国菊), Zhao GF(赵国防). Pressed Flower Art (压花艺术). Beijing: China Agriculture Press, 2009. 2.
- Zhang Jun(张俊). The study of pressing and preservation of dehydrated flower. *Northern Horticul*(北方园艺), 2010, 9: 109-111.
- Liu Y(刘峰), Wang L(王丽), Liu HQ(刘慧芹), et al. Study on color-keeping technology of the rosachinensis petals as pressed flower material. *Hubei Agric Sci*(湖北农业科学), 2011, 50: 3331-3333.
- Safeena SA, Patil VS. Studies on the effect of microwave oven drying on flower quality of dried dutch rose flowers. *Nat Acade Sci Lett*, 2014, 37: 19-24.
- Nowak R, Olech M, Pecio L, et al. Cytotoxic, antioxidant, antimicrobial properties and chemical composition of rose petals. *J Sci Food Agric*, 2014, 94: 560-567.
- Song CF(宋春芳), Qin YH(覃永红), Chen X(陈希), et al. Experiments on microwave vacuum drying of rose. *Trans Chin Soc Agric Eng*(农业工程学报), 2011, 27: 389-392.
- Song CF(宋春芳), Qin YH(覃永红), Zhou L(周黎), et al. Effects of different drying methods on quality of rose petals. *J Northeast Forest Univ*(东北林业大学学报), 2011, 39(3): 41-43.
- Safeena SA, Patil VS. Effect of hot air oven and microwave oven drying on production of quality dry flowers of dutch roses. *J Agric Sci*, 2013, 5: 179-189.
- Quintero Ruiz NA, Demarchi SM, Giner SA. Effect of hot air, vacuum and infrared drying methods on quality of rose hip (*Rosa rubiginosa*) leathers. *Int J Food Sci Technol*, 2014, 49: 1799-1804.
- Wang N(王宁), Liu WX(刘文秀), Li FC(李凤城), et al. Thin layer drying model of apricot at low temperature. *Trans Chin Soc Agric Mach*(农业机械学报), 2011, 42: 140-144.
- Iqba S, Devinder D, Shashi P. Optimisation of drying of French marigold (*Tagetes patula* Linn.) flowers. *Int Agric Eng J*, 2006, 15: 11-15.
- Li XD(李晓冬), Liu HY(刘鸿雁), Hu BS(胡柏松), et al. Research on vacuum drying characteristic of yellow chrysanthemum. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), 2010, 38: 10895-10897.
- Lee JH, Kim HJ. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L) slices. *Food Sci Technol*, 2009, 42: 180-186.
- Liu K(刘珂), Zhu WX(朱文学). Study on hot air drying characteristic of pressed peony and dynamic model. *J Agric Mech Res*(农机化研究), 2010, 11: 188-192.
- Wang BH(王宝和). Review of drying kinetics. *Drying Technol Equip*(干燥技术与设备), 2009, 7: 51-56.
- Zhang YJ(张亚晶). Research on hot-air drying characteristics and heat and mass model of carnation. Kunming: Kunming University of Science and Technology(昆明理工大学), MSc. 2012.
- Sun SH(孙淑红). Research on pressing technology of peony. Luoyang: Henan University of Science and Technology(洛阳:河南科技大学), MSc, 2011.
- Hong B(洪波). Manufacturing Process and Application of Drying Flower. Beijing: China Forestry Press, 2009.
- Lin GH(林国辉), Wang YL(王育林), Peng YH(彭永宏). Observation on the ultrastructure of petal of cut rose flowers by SEM. *J South China Norm Univ*(华南师范大学学报) 2001, 3: 106-110.
- Wang MC(王明超), Yang QL(杨青林), Wang C(王春), et al. Effects of micro-and nano-structure on the adhesive property of rose petals. *Chem J Chin Univ*(高等学校化学学报), 2011, 32: 1594-1597.