干燥条件对挂面干燥脱水过程的影响

武亮，刘锐，张波，张影全，魏益民
（中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工综合性重点实验室，北京 100193）

摘要：为了解烘房内干燥介质条件（温度、相对湿度和气体流速）对挂面干燥脱水速率的影响，以及脱水速率在厚度相同，宽度不同（1 mm、2 mm 和 3 mm）挂面间的差异，本研究以某挂面生产企业 5 排 60 m 隧道式烘房生产线为研究对象，利用多功能便携式气候仪（Kestrel-4500），在线监测挂面干燥过程中干燥介质的温度、相对湿度和风速，每种条形挂面采集 12 班次（重复），在动态监测挂面干燥介质条件参数的同时，测定挂面在隧道式烘房 1 m、15 m、30 m、45 m、59 m 干燥距离处的含水率，分析各因素对挂面干燥脱水速率的影响。结果表明，采用基本相同的干燥工艺干燥厚度相同、宽度为 1、2、3 mm 的挂面，脱水速率之间无显著差异；影响挂面干燥脱水量的主要因素是相对湿度，其次是温度和风速；干燥介质各因素对挂面干燥脱水量的影响大于相同厚度、不同宽窄条形对挂面干燥脱水速率的影响。

关键词：挂面；干燥工艺；干燥介质；脱水速率；条形
文章篇号：1673-9078(2015)9-191-197 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.9.032

Impact of the Conditions of the Drying Medium on the Dehydration of Fine-dried Noodle

WU Liang, LIU Rui, ZHANG Bo, ZHANG Ying-quan, WEI Yi-min
(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agriculture Science / Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: The effects of the conditions of the drying medium such as temperature, relative humidity, and air velocity as well as varying width (1, 2, and 3 mm, with same thickness) on the drying rate of fine-dried noodle was studied using a 60-m, five-row production line in a tunnel drying room. A multifunctional, pocket weather meter (Kestrel NK-4500) was used for real-time monitoring of temperature, relative humidity, and air velocity of the medium during the drying process. Data were collected 12 times for each type of fine-dried noodle strip. While the conditions of the drying medium were monitored dynamically, the moisture content of the noodle was measured at five different drying distances (1, 15, 30, 45, and 59 m) in the tunnel drying room, and the effect of each parameter on the drying rate of the noodle was analyzed. The results showed no significant differences in the drying rates of noodle strips with different widths (1, 2, or 3 mm) and the same thickness when a similar drying process was employed. The most important factor affecting the drying rate was relative humidity, followed by temperature and air velocity. The effects of the conditions of the drying medium on noodle drying was more significant than that of the width of the noodle strip (with the same thickness).

Key words: fine dried noodle; drying process; drying medium; drying rate; strips

温度、湿度和风速是影响挂面干燥的最主要因素[1~2]；干燥脱水速率与挂面产品质量密切相关，也是评价干燥效率的主要指标。分析干燥介质各因素（温度、湿度和风速）对挂面脱水速率的影响，可以为企业挂面干燥工艺调节和控制提供依据。

科学合理的干燥工艺，不仅能够缩短干燥时间，节约能源，还能提高产品质量[3~4]。不合理的温度、相对湿度和风速不仅造成能源浪费，还会引发挂面酥条的危险。目前，多数学者将挂面的干燥过程分为三段，即预干燥、主干燥和完成干燥三段。不同的干燥段有不同的干燥目的和要求。陆启玉[5]认为在预干燥阶段主要通过控制干燥介质的相对湿度除去部分表面层水分，当相对湿度>95%或温度<10 ℃时，要适当加温；在主干燥阶段的前期要逐步提高干燥介质温度，调整湿度，保持表面层水分汽化速度小于或等于水分的内扩散速度，在主干燥的后期要继续增温，降低湿度（不可过于干燥），快速除去挂面表面水分；在最后阶段仅

收稿日期：2014-11-13
基金项目：现代农业产业技术体系建设专项（CARS-03）；公益性行业（农业）科研专项经费资助（201303070）
作者简介：武亮（1990-），男，硕士生，研究方向为农产品加工理论与技术
通信作者：魏益民（1957-），男，博士，教授，研究方向为食品科学与工程

靠流动空气的风力作用，降低挂面温度，脱去小部分水分，平衡面条内外水分和温度。对于干燥介质各因素对挂面干燥的影响，沈再春等[6]研究认为，相对湿度是影响挂面干燥的最主要因素，利用自然温度（>20 ℃），不需要人工加温，通过保潮排潮控制烘房湿度即可保证细挂面（宽度/厚度/直径<1.2 mm）的烘干质量。罗忠民等[7]认为干燥介质的温度、相对湿度和时间是影响挂面干燥的最主要因素，其中又以相对湿度影响较大，其次为干燥介质的温度。李华伟等[8]通过测定成品挂面的抗弯曲强度和和拉伸应力认为，预干燥阶段干燥介质各因素对挂面脱水速率影响的顺序为：温度>风速>相对湿度>时间。王杰等[9]通过对索道式挂面干燥工艺特征分析认为，烘房一区温度和四区湿度是挂面干燥工艺的关键控制点，一区温度越高，挂面产品抗弯强度越大，四区相对湿度越高，挂面产品水分含量越高、色泽 a*值越小。

挂面干燥的控制调节主要是通过调节干燥介质的温度、湿度和风速，对此已有大量的研究资料。但是，烘干过程不论干燥介质参数（温度、湿度及风速）如何变化，最终反映在挂面的干燥脱水速率。因此，根据脱水速率快慢调节干燥过程和控制产品质量，可能是较好的方法。目前，国外学者根据本国自身特点研究了乌冬面、意大利面条的脱水干燥曲线并对其动力学模型进行了分析[10~13]，国内也有学者对挂面的干燥进行了研究，但对挂面干燥脱水量与烘干室工艺参数之间变化规律的研究大都是定性的论述，尚未有系统的定量研究结果。测定挂面干燥过程烘房内干燥介质参数（温度、湿度、风速）及干燥过程挂面含水率，分析干燥介质温度、湿度和风速对挂面脱水量的影响规律，明确烘房内温度、相对湿度、风速对挂面干燥脱水量的影响，为挂面干燥过程控制和工艺调节提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验对象

以河南东方面机集团有限公司生产的 5 排 60 m 隧道式烘房为研究对象。该烘房生产能力为 8 t/6 h。

1.2 仪器和设备

千分之一天平：JA2003N(上海精密科学仪器有限公司)；电热鼓风干燥箱：101 型（北京科伟永兴仪器有限公司）；Kestrel NK4500 多功能便携式气候仪（美国尼尔森-科尔曼公司）；多功能便携式气候仪能够对烘房内干燥介质参数进行连续测定，包括温度、湿度、风速、风向等。其中干燥介质的温度、湿度与风速是影响挂面干燥脱水量的主要因素，其测定精度分别为，温度：0.1 ℃，湿度：0.1%，风速：0.1 m/s。

试验面条的主要成分为小麦粉、水（32%）、食盐（1%），除此之外未添加任何食品添加剂。将小麦粉、水、食盐混匀后经和面、醒发、压延、切条制成面条。本实验中三种条形挂面厚度相同，进入烘房时面条宽度分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm。

60 m 隧道式烘房是目前挂面干燥中应用最普遍的烘房。长 60 m，宽 6 m，高 3.5 m，两端开放，5 排挂面呈直线运行，烘道顶部为平顶，四周设有保温层（图 1）。本文中，根据挂面含水率测定的位置，将 1~15 m、15~30 m、30~45 m、45~59 m 和 1~59 m 干燥段分别称为挂面干燥Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区和整个干燥过程。隧道式烘房主要由传动装置、供热系统及通风系统组成。挂面在传动系统的带动下匀速运行，运行时间约为 4 h，运行速度为 0.25 m/min。挂面上方为供热系统，利用循环导热油通过管式换热器向烘房供热。通风系统由吊扇和排潮口组成，吊扇位于导热油管上方，沿挂面运行方向两排分布（图 1）；排潮口单侧分布，呈正方形（40 cm），处于烘房的右下方位置（沿挂面运行方向观察），排潮口在干燥的前半段分布较为密集，后一段较为稀疏，各区排潮口数量分布分别为，Ⅰ区：5 个，平均间距 2.5 m；Ⅱ区：4 个，平均间距 3 m；Ⅲ区：2 个，平均间距 5 m；Ⅳ区：1 个，平均间距 7.5 m。

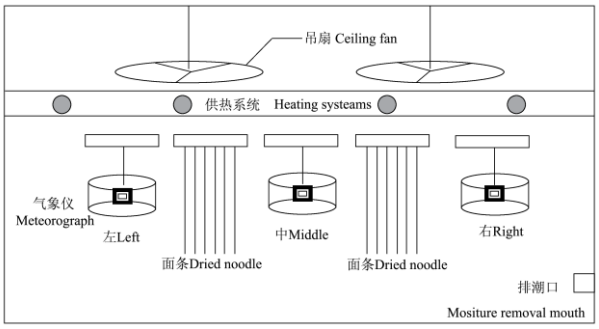


图 1 气候仪悬挂位置图

Fig.1 Positions of the weather meter

1.3 试验方法

1.3.1 挂面干燥过程干燥介质条件在线监测

根据气候仪测定要求，制作半径 0.5 m、高 0.35 m 的不锈钢圆柱形托架。将气候仪固定在不锈钢托架上；挂面切条上架后，将不锈钢托架（气候仪）悬挂于烘房挂面的传送装置上，使气候仪处于挂面悬挂的中间位置；气候仪跟随挂面的链条传送装置一起运行，动态在线监测挂面干燥过程烘房左、中、右侧位置的温

度、相对湿度和风速。气候仪数据采集间隔为 10 s。

1.3.2 样品采集及含水率测定方法

连续采样 1、2、3 mm 条形挂面各 12 班次，分别在 1 m、15 m、30 m、45 m、59 m 干燥距离处五排面的左、中、右 3 处位置的中间采样，并记录（采样位置见图 1），共采集挂面样品 540 份。样品采集后用自封袋密封，放至室温。

将湿挂面（1 m、15 m、30 m 位置处）用剪刀剪成小段，混匀，称样；干挂面（45 m、59 m 处）先粉碎、混匀，再称样。称取 10 g 左右的样品，在 135 ℃的条件下烘烤 4 h；然后放入干燥器中，冷却至室温；用千分之一天平称重，并记录。每份样品测量两次，取其平均值。含水率及脱水量计算方法如下所示：

$$含水率（W\%）=\frac{湿面条质量m_1-干面条质量m_2}{湿面条质量m_1}\times 100\%$$

脱水量（W%）= 前一距离的含水率W_1 - 后一距离的含水率W_2

1.4 数据分析

测定结果用 SPSS18.0 进行方差分析、简单相关分析，利用 Excel2003 进行图表绘制。

2 结果分析

2.1 三种条形挂面干燥介质特征与脱水特性分析

2.1.1 1 mm 条形挂面干燥工艺参数特征分析

1 mm 条形挂面的干燥介质参数如表 1 所示。由表 1 可知，烘房内干燥介质温度呈先升后降的趋势，Ⅰ区温度最低（27.87 ℃），III 区最高（45.55 ℃），烘房末端温度（39.99 ℃）显著的高于烘房前端温度（27.87 ℃）；烘房 III 区温度变异系数最小（2.88%），温度最为稳定。烘房内相对湿度和风速逐渐降低。相对湿度在各干燥区均低于 90%，烘房末端相对湿度较为稳定，变异系数（3.09%）较其他三区小。烘房内风速最不稳定，各干燥区变异系数均大于 80%，平均风速大小在各干燥区均低于 1.0 m/s，在烘房的Ⅳ区平均风速较低，仅有 0.50 m/s。

表 1 1mm 条形挂面干燥过程介质参数分析

Table 1 Drying conditions of the noodle strip of 1 mm width

条形	干燥段	温度/℃	CV/%	湿度/%	CV/%	风速/(m/s)	CV/%
1 mm	1~15 m（Ⅰ区）	27.87±4.44^{d}	15.93	84.48±4.65^{a}	5.50	0.95±0.80^{a}	84.21
	15~30 m（II 区）	41.10±2.69^{b}	6.55	80.49±4.12^{b}	5.12	0.89±0.73^{b}	82.02
	30~45 m（III 区）	45.55±1.31^{a}	2.88	73.87±4.16^{c}	5.63	0.79±0.74^{c}	93.67
	45~59 m（Ⅳ区）	39.99±2.39^{c}	5.98	68.70±3.09^{d}	4.50	0.50±0.62^{d}	124.00
	1~59 m	38.64±7.15	18.50	76.67±7.40	9.65	0.78±0.74	94.87

注：同一列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著。

2.1.2 1mm 条形挂面干燥脱水特性分析

随着干燥的进行，1 mm 条形挂面含水率逐渐降低（表 3）。1 mm 条形挂面在进入烘房时其含水率为 30.97%~29.83%，干燥结束时其含水率为 11.99%~13.44%，根据挂面行业标准（SB/T10068-1992），成品挂面含水率均小于标准规定的含水率（<14.5%），满足产品质量要求。挂面在进入烘房和结束干燥时其含水率最为稳定，变异系数较小；干燥过程中挂面含水率变化较大，变异系数较高，在干燥进行到一半（30 m）时，变异系数最大（7.84%）。

由表 2 可知，1 mm 条形挂面干燥过程各区脱水量分别为，Ⅰ区：33.21%，II 区：40.97%，III区：22.79%，Ⅳ区：3.03%，呈现先增后减的趋势。脱水量主要集中在干燥的前一半距离（30 m）内，其脱水量占脱水总量的 74.18%；在干燥的后一半干燥距离内脱水量较少，尤其是在干燥的Ⅳ区，脱水量最少，仅占脱水总量的 3%左右（表 2）。

表 2 1 mm 条形挂面不同干燥段脱水量

Table 2 Extent of dehydration at different drying stages of the noodle strip of 1 mm width

条形	干燥段	干燥脱水量%	脱水百分比%
1 mm	1~15 m（Ⅰ区）	5.79±1.86	33.21
	15~30 m（II 区）	7.14±2.12	40.97
	30~45 m（III 区）	3.97±1.74	22.79
	45~59 m（Ⅳ区）	0.53±0.44	3.03
	1~59 m	17.43±0.60	100

2.2 2 mm、3 mm 条形挂面干燥介质特征与脱水特性分析

为了分析不同条形挂面干燥过程干燥脱水速率的差异，本研究在测定 1 mm 挂面干燥温度、相对湿度、风速及含水率的同时，采用相同的方法连续测定 2 mm 与 3 mm 条形挂面各 12 班次。结果表明，三种

条形挂面在烘房内的干燥时间没有显著性差异（p<0.05），均能在相同的干燥时间内（h）完成干燥，其中，1 mm：4.03±0.05[a]，2 mm：4.06±0.06[a]，3 mm：4.05±0.13[a]；三种条形挂面干燥介质温度、湿度和风速变化规律相同，各因素在三种条形挂面之间差异较小，数值上较为接近。

表 3 三种条形挂面干燥过程不同干燥距离的含水率

Table 3 Moisture content of three noodle strips at different drying distances

挂面干燥距离/m	含水率/%		
	1 mm	2 mm	3 mm
1 m	30.14±0.28[a]	30.06±0.38[a]	30.16±0.45[a]
15 m	24.45±1.80[a]	24.76±1.73[a]	24.34±1.25[a]
30 m	16.96±1.33[a]	17.44±1.47[a]	17.47±1.07[a]
45 m	13.40±0.42[a]	13.42±0.61[a]	13.04±0.42[b]
59 m	12.83±0.37[a]	12.74±0.25[a]	12.39±0.36[b]

注：同一行不同小写字母表示 P<0.05 水平上差异显著。

表 3 为三种条形挂面干燥过程不同距离处的含水率。由表 3 和图 2 可知，三种条形挂面干燥过程其含水率变化规律相同，含水率随着干燥的进行逐渐减少，最终含水率都能满足产品质量要求（<14.5%）。在干燥距离为 1 m、15 m 和 30 m 时，三种条形挂面的含水率之间不存在显著性差异（p<0.05），在干燥距离为 45 m 和 59 m 时，1 mm 和 2 mm 条形挂面含水率之间不存在显著性差异，3 mm 条形挂面的含水率略低于 1 mm 和 2 mm 条形挂面含水率（表 3）。虽然干燥距离为 45 m 和 59 m 处三种条形挂面含水率之间存在显著性差异，但其含水率差值最大仅为 0.44%（<0.5%），能够满足实际生产的过程控制要求。

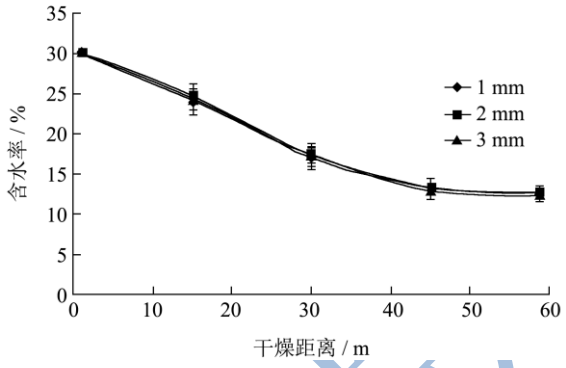


图 2 三种条形挂面干燥过程含水率变化

Fig.2 Changes in the moisture content of the noodle strips of three widths during the drying process

2.3 三种条形挂面干燥过程脱水量差异分析

表 4 为三种条形挂面在各个干燥区段内的脱水量。由表 4 可知，2 mm 和 3 mm 条形挂面在各个干燥区段内的脱水量变化与 1 mm 条形挂面变化规律相同，呈现先升后降的趋势。在各干燥区段内三种条形挂面的干燥脱水量之间不存在显著性差异（p<0.05），即三种条形挂面在各个干燥区段内的脱水速率之间不存在显著性差异。对于整个干燥过程，3 mm 条形挂面的干燥脱水量略高于 1 mm 和 2 mm 条形挂面的干燥脱水量，而 1 mm 与 2 mm 条形挂面的干燥脱水量之间不存在显著性差异（p<0.05）。

表 4 不同条形挂面干燥过程脱水量

Table 4 Amount of dehydration of the noodle strips of three widths during the drying process

条形	1~15 m（Ⅰ区）	15~30 m（II 区）	30~45 m（III 区）	45~59 m（Ⅳ区）	1~59 m
1mm	5.79±1.86[a]	7.14±2.12[a]	3.97±1.74[a]	0.53±0.44[a]	17.43±0.60[b]
2mm	5.31±1.77[a]	7.31±2.20[a]	4.03±1.51[a]	0.68±0.50[a]	17.33±0.49[b]
3mm	5.82±1.18[a]	6.87±1.82[a]	4.43±1.15[a]	0.65±0.43[a]	17.77±0.55[a]

注：同一列不同小写字母表示 P<0.05 水平上差异显著。

2.4 挂面干燥脱水量与干燥介质参数的关系

2.4.1 干燥介质各因素与三种条形挂面脱水量的简单相关性

三种条形挂面干燥脱水量与干燥介质条件参数密切相关（表 5）。由表 5 可知，温度和相对湿度会显著的影响挂面干燥的脱水量，其中又以相对湿度对挂面干燥的影响最大，风速对三种条形挂面的干燥脱水量影响较小。1 mm 条形挂面，干燥的Ⅰ区相对湿度与挂面干燥脱水量呈显著负相关，在其他干燥区段温度、相对湿度对挂面干燥脱水量的影响均不显著。对于整个干燥过程，1 mm 挂面脱水量与相对湿度之间呈显著负相关，与温度、风速之间关系不显著。2 mm 条形挂面干燥的Ⅰ区脱水量与湿度之间极显著负相关；II 区、Ⅳ区脱水量与相对湿度极显著正相关；在其他干燥区段挂面脱水量与温度湿度关系不显著。3 mm 条形挂面干燥的Ⅳ区脱水量与温度极显著负相关；在其他干燥区段挂面脱水量与温度、相对湿度关系不显著。在干燥的不同阶段，风速与三种条形挂面干燥脱水量关系均不显著。

2.4.2 二次回归分析

为进一步明确干燥介质参数与挂面干燥脱水量

（速率）的关系，制作散点图，并进行二次回归分析。

表 5 1 mm、2 mm 和 3 mm 条形挂面干燥介质条件与挂面脱水量的相关性

Table 5 Correlation between drying conditions and the amount of dehydration of the 1-, 2-, and 3-mm noodle strips at different drying stages

条形	干燥段	温度	相对湿度	风速
1 mm	1~15m（Ⅰ区）	NS	-0.357*	NS
	15~30m（II 区）	NS	NS	NS
	30~45m（III 区）	NS	NS	NS
	45~59m（Ⅳ区）	NS	NS	NS
2 mm	1~15m（Ⅰ区）	NS	-0.377*	NS
	15~30m（II 区）	NS	0.612**	NS
	30~45m（III 区）	NS	NS	NS
	45~59m（Ⅳ区）	NS	0.437**	NS
3 mm	1-15m（Ⅰ区）	NS	NS	NS
	15-30m（II 区）	NS	NS	NS
	30-45m（III 区）	NS	NS	NS
	45-59m（Ⅳ区）	-0.571**	NS	NS

注：*表示相关系数 α=0.05 显著水平，**表示相关系数 α=0.01 显著水平。

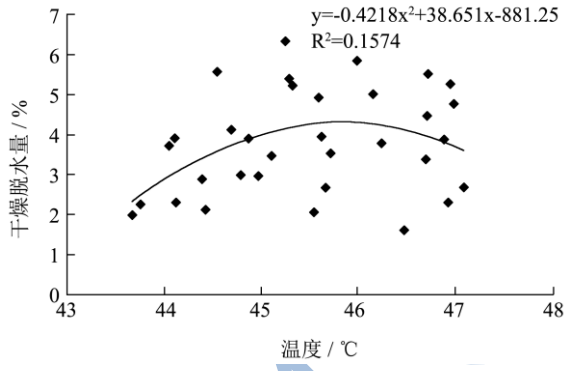


图 3 1mm-III 区干燥介质温度-干燥脱水量关系

Fig.3 Dehydration-temperature curve at stage III (1-mm noodle strip)

结果表明，1 mm 条形挂面干燥的 III 区温度，2 mm 条形挂面 III 区风速、Ⅳ区温度，3 mm 条形挂面 III 区温度、Ⅳ区湿度与挂面干燥脱水量（速率）均呈二次曲线关系（图3~图7），分别解释其变异的15.74%、23.52%、15.13%、19.34%、19.74%。1 mm 条形挂面干燥的 III 区，在一定范围内，挂面干燥脱水速率随温度（<45.82 ℃）的增加而提高，但超过该温度就会对挂面干燥脱水速率产生负向影响。2 mm 条形挂面干燥的 III 区、Ⅳ区，在一定范围内（风速<1.24 m/s、温度<39.66 ℃），干燥速率随风速、温度的升高而降低，超过该范围挂面的干燥脱水速率会加快。3 mm 条形挂面干燥的 III 区、Ⅳ区，一定范围内（温度<45.79℃、相对湿度<69.02%），干燥速率随温度、相对湿度的升高而降低，超过该范围干燥脱水速率会加快。

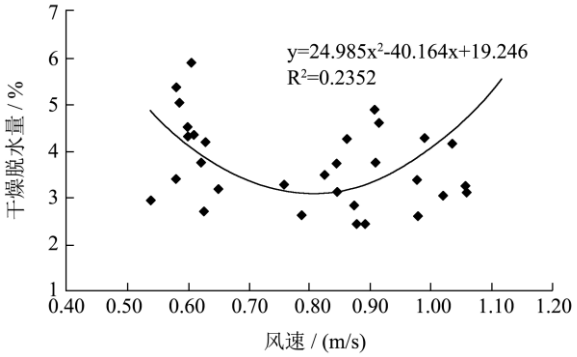


图 4 2mm-III 区干燥介质风速-干燥脱水量关系

Fig.4 Dehydration-air velocity curve at stage III (2-mm noodle strip)

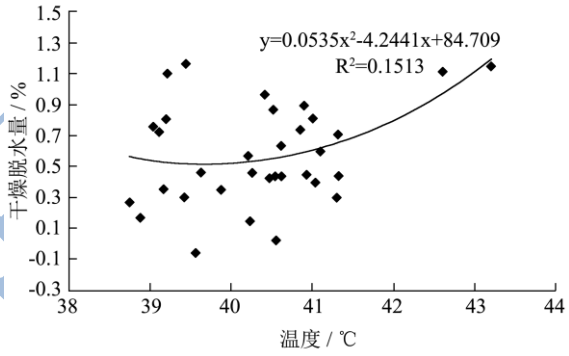


图 5 2mm-Ⅳ区干燥介质温度-干燥脱水量关系

Fig.5 Dehydration-temperature curve at stage Ⅳ (2-mm noodle strip)

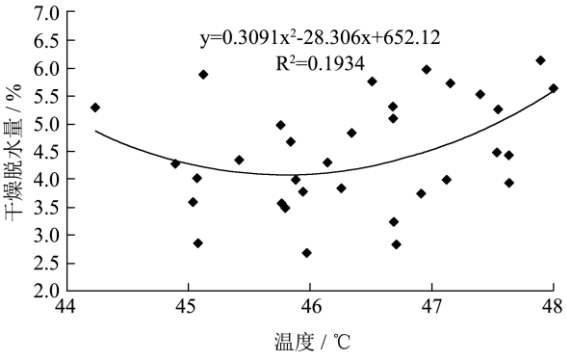


图 6 3mm-III 区干燥介质温度-干燥脱水量关系

Fig.6 Dehydration-temperature curve at stage III (3-mm noodle strip)

2.4.3 各区干燥工艺参数与整个干燥过程干燥脱水量的关系

由表 6 可知，挂面在整个干燥过程的脱水量与烘房各区干燥介质参数密切相关。其中，干燥脱水量与烘房各区相对湿度显著或极显著负相关，与烘房Ⅰ区，III 区，Ⅳ区的温度极显著正相关，与烘房各区风速之

间关系不显著。

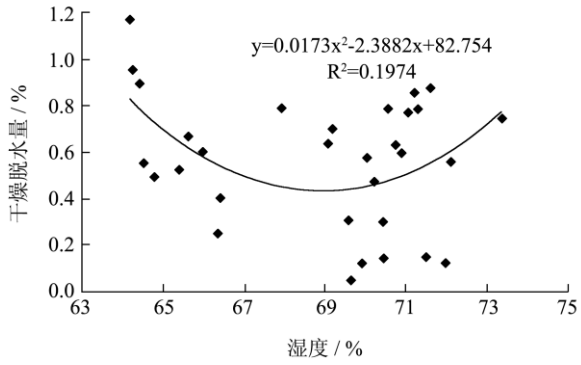


图 7 3㎜-Ⅳ区干燥介质湿度-干燥脱水量关系

Fig.7 Dehydration-relative humidity curve at stage Ⅳ (3-mm noodle strip)

表 6 干燥介质条件与挂面干燥脱水总量的相关性

Table 6 Correlation between conditions of the drying medium at different drying stages and the amount of dehydration during noodle drying

各区干燥介质条件	相关性
Ⅰ区温度	0.286**
Ⅰ区相对湿度	-0.319**
Ⅰ区风速	NS
II 区温度	NS
II 区相对湿度	-0.249*
II 区风速	NS
III 区温度	0.409**
III 区相对湿度	-0.362**
III 区风速	NS
Ⅳ区温度	0.288**
Ⅳ区相对湿度	-0.303**
Ⅳ区风速	NS

以挂面干燥各区的温度和相对湿度为自变量，对挂面整个干燥过程的干燥脱水量进行逐步回归，得到多元回归方程 $Y=13.500+0.150T_{III}-0.042H_{IV}$ $R^2=0.206$。回归方程表明，烘房 III 区的温度和Ⅳ区的相对湿度是影响整个干燥过程挂面脱水量的最主要因素，III 区温度越高，Ⅳ区的相对湿度越低，则挂面的干燥脱水量越大，最终产品含水率越低，其中又以 III 区温度对挂面干燥脱水量的影响最大，其解释了变异的 16.5%。

3 讨论

3.1 干燥介质条件对不同条形挂面干燥脱水过程的影响

挂面在干燥过程中除了受到干燥介质参数的影响外，还会受到面条规格的影响。前人研究认为，截面积小的挂面比截面积大的容易干燥[14]。三种条形挂面干燥初始含水率相同，不同班次产量较为稳定（8 t/6 h），干燥介质条件各参数基本一致，最终挂面产品的含水率要求相同，则不同条形挂面干燥过程除去的总水量相同。1、2、3 mm 挂面经相同的和面、压延工艺，湿面条的厚度基本相同，只是切条的面刀不同（宽窄不同），面条越窄，其表面积越大，干燥速率相应也较快，即 1 mm 挂面干燥速率最快，2 mm 挂面次之，3 mm 挂面干燥速率最慢。分析结果表明，三种条形挂面干燥过程其含水率及各干燥段脱水量之间差值较小，干燥脱水速率几乎无差异。这说明在该烘房内挂面干燥脱水速率受挂面条形的影响较小，而与干燥介质特性密切相关。干燥介质各因素又会受到烘房结构的影响，这就进一步说明适宜的烘房结构对挂面干燥过程保潮、稳定产品质量和提高能量利用率有直接的促进作用。虽然在各个干燥段内三种条形挂面含水率之间没有显著性差异，但对于整个干燥过程，3 mm 条形挂面脱水量略高于 1 mm 和 2 mm 条形（表 4）。这与干燥介质及挂面本身的差异有关。虽然不同条形干燥介质参数在数值上较为接近，差异较小，但是随着干燥过程的进行，这种差异对挂面干燥影响的量效关系开始显现。此外，本研究中所采用的挂面的规格对挂面的整个脱水过程产生了影响。

由相关性和回归分析结果可知，干燥介质对挂面干燥脱水量的影响随挂面条形的变化表现为首先是湿度，其次是风速，最后是温度。这是因为 1 mm 条形挂面的比表面积较 2 mm 和 3 mm 条形挂面要大，湿度的变化对挂面的脱水影响较大，而 3 mm 条形挂面较 1 mm 和 2 mm 条形挂面较宽，温度的传导较慢，在干燥的后期温度的变化对挂面干燥的影响要较其他因素大。本实验中所采用的面条厚度相同，只是宽度不同，对于薄厚、宽窄差异较大的挂面，其干燥过程存在哪些差异，还需要作进一步的研究。此外，采用相同干燥工艺参数干燥不同条形挂面的质量和能效之间的差异，也需要进一步的研究。实际生产中，虽然采用基本相同的干燥工艺可以使得三种条形挂面脱水速率之间无显著差异，但建议企业在实际生产过程中最好在某一烘房内固定生产一种条形的挂面，以期稳定产量，保证质量。

3.2 干燥介质条件对挂面干燥脱水过程干燥脱水速率的影响

干燥介质的温度、相对湿度和风速是挂面烘干的

基本条件。温度能提高挂面自身热量、促进内部水分向表面转移，是挂面水分得以蒸发的动力；相对湿度直接反映了空气的吸水能力，湿度的高低，决定着挂面水分蒸发的快慢；流通的空气不仅可以带出烘房内的湿空气，还对烘干室内温湿度的均匀性和分布产生影响。挂面的干燥是干燥介质条件各因素综合作用的结果，但各因素对挂面干燥的影响不同。由实验结果可知，湿度是影响挂面干燥脱水量的最主要因素，其次是温度和风速，这与沈再春[6]、罗忠民[7]等人的观点一致。但在不同的干燥阶段各因素对挂面干燥的影响不同。研究结果表明，烘房 III 区温度，Ⅳ区的相对湿度是影响挂面整个干燥过程脱水量的最主要因素。其中Ⅳ区的相对湿度对挂面干燥脱水量的影响与王杰等[9]的研究结果一致。

风速对挂面干燥脱水的影响较小，一方面与风速在烘房内的变化较为剧烈有关，另一个方面也说明，烘房内风速的主要作用是通过调节干燥介质的相对湿度、温度对挂面干燥产生影响。此外，风速的变化还与烘房内外的湿热传递转移有直接关系，这对研究挂面干燥的能效关系具有重要的意义。在实际干燥过程中，干燥介质的温度和风速能够进行直接调节控制，湿度的调节主要是通过调节温度和风速控制干燥速率和排潮量间接地调节。由各因素的变异程度可知，各因素调节的稳定性为：温度>风速，但如果想对烘房内干燥介质进行快速调节，则调节的顺序为：风速>温度，即可以通过调节风速对烘房内干燥介质条件进行快速的调节。

4 结论

实际生产过程中，可以采用基本相同的干燥工艺干燥厚度相同、宽度为 1、2、3 mm 条形的挂面，其产品含水率之间无显著差异。影响挂面干燥的主要因素是湿度，其次是温度和风速，但在不同条形挂面及同一条形挂面的不同干燥区段其表现略有差异；影响 1 mm 条形挂面干燥脱水量的最主要因素是湿度，其次是温度，风速对 1 mm 条形挂面干燥脱水量的影响较小；影响 2 mm 条形挂面干燥脱水量的最主要因素是湿度，其次是风速，再次是温度；影响 3 mm 条形挂面干燥脱水量的最主要因素是温度，其次是湿度，风速对 3 mm 条形挂面干燥脱水量的影响较小。干燥介质各因素对挂面干燥脱水量的影响大于本实验条形对挂面干燥脱水量的影响。对于整个干燥过程，其脱水量主要受到烘房 III 区温度，Ⅳ区相对湿度的影响。此外对于干燥介质参数（温度、相对湿度、风速）的选择并非越大越好，要在考虑挂面干燥工艺要求、产品质量和综合效益的基础上合理确定。

参考文献

[1] Hou G Gary, Otsubo S, Okusu H, et al. Noodle processing technology, in Asian noodles: Science, technology, and processing (ed Hou G Gary) [M]. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 2010

[2] Fu B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing [J]. Food Research International, 2008, 41(9): 888-902

[3] Inazu T, Iwasaki K, Furuta T. Effect of air velocity on fresh Japanese noodle (Udon) drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(2): 277-280

[4] 张凌云,魏青,吴颖,等.不同干燥方式对金牡丹乌龙茶品质的影响[J].现代食品科技,2013,29(8):1916-1920
ZHANG Ling-yun, WEI Qing, WU Ying, et al. Effect of different drying technologies on qualities of Jinmudan Oolong tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29 (8):1916-1920

[5] 陆启玉.挂面生产工艺与设备[M].北京:化学工业出版社,2007
LU Qi-yu. Production process and equipment of Chinese dried noodle [M]. Beijing: Chemical industry press, 2007

[6] 沈再春.现代方便面和挂面生产实用技术[M].北京:中国科学技术出版社,2001
SHEN Zai-chun. Modern practical processing technique of instant noodles and Chinese dried noodle [M]. Beijing: China Science and Technology press, 2001

[7] 罗忠民.挂面脱水及空气温湿度参数的设计与研究[J].中国粮油学报,1988,3(4):42-48
LUO Zhong-min. The dehydration of dried noodle and the temperature relative humidity research in noodle drying process [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1988, 3(4): 42-48

[8] 李华伟,陈洁,王春,等.预干燥阶段对挂面品质影响的研究[J].粮油加工,2009,40(5):84-86
LI Hua-wei, CHEN Jie, WANG Chun, et al. The effect of drying medium parameters to quality of dried noodle in initial drying stage [J]. Cereal and Oils Processing, 2009, 40(5): 84-86

[9] 王杰,张影全,刘锐,等.挂面干燥工艺研究及其关键参数分析[J].中国粮油学报,2014,29(10):88-93
WANG Jie, ZHANG Ying-quan, LIU Rui, et al. Study on the drying process and its key parameters of Chinese dried noodle [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils

Association, 2014, 29(10): 88-93

[10] Ogawa T, Kobayashi T, Adachi S. Prediction of pasta drying process based on a thermo gravimetric analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(1): 129-134

[11] Villeneuve S, Gédinas P. Drying kinetics of whole durum wheat pasta according to temperature and relative humidity [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(3): 465-471

[12] Inazu T, Iwasaki K, Furuta T. Effect of temperature and relative humidity on drying kinetics of fresh Japanese noodle (Udon) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2002, 35(8): 649-655

[13] Inazu T, Iwasaki K. Mathematical evaluation of effective moisture diffusivity in fresh Japanese noodles (udon) by regular regime theory [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(3): 440-444

[14] 秦中庆.日本制面新技术发展动向(二)[J].粮食与食品工业,1999,26(4):34-37
QIN Zhong-qing. New development trend of Japanese noodle processing technology(二) [J]. Cereal & Food industry, 1999, 26(4): 34-37

现代食品科技