

# 中红外-热风组合干燥牛肉干降低能耗提高品质

谢小雷<sup>1</sup>, 李侠<sup>1</sup>, 张春晖<sup>1\*</sup>, 贾伟<sup>1</sup>, 李银<sup>1</sup>, 孙红梅<sup>1</sup>, 王兆进<sup>2</sup>, 穆国锋<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 泰州圣泰科红外科技有限公司, 泰州 225300; 3. 内蒙古都羊业食品有限公司, 赤峰 024000)

**摘要:**为研究中红外-热风组合(combined mid-infrared and hot air, CMIHA)干燥工艺对牛肉干干燥效果的影响, 根据红外辐射-对流组合换热控制方程, 在风速和物料尺寸固定条件下, 分析了干燥温度、辐射距离和辐射强度等因素对干燥性能效益及牛肉干品质的影响, 优化了CMIHA干燥工艺参数, 与中红外(mid-infrared, MI)干燥、热风(hot air, HA)干燥进行比较, 分析了三者在干燥过程中耗时、耗能, 及对牛肉干品质的影响。结果表明: CMIHA干燥牛肉干的最佳工艺为干燥温度70℃、辐射距离8 cm、辐射强度0.48 W/cm<sup>2</sup>, 干燥耗时130 min, 耗能0.95 (kW·h)/kg。此优化工艺的干燥耗时、耗能与MI干燥相比分别降低了30%和10%, 与HA相比分别降低了60%和78%, 耗时、耗能均显著降低( $p<0.05$ ); 与MI、HA干燥相比, CMIHA干燥牛肉干的黏聚性、咀嚼性、剪切力、收缩率和亮度值 $L^*$ 等指标得到显著改善( $p<0.05$ ); 红度值 $a^*$ 和黄度值 $b^*$ 与MI干燥无显著差异( $p>0.05$ ), 但显著高于( $p<0.05$ )HA干燥; 此工艺下牛肉干肉香味浓, 质地均匀, 色泽呈均匀的亮褐色, 总体可接受度显著高于( $p<0.05$ )MI干燥和HA干燥。与传统热风干燥相比, 中红外-热风组合干燥能显著提高经济效益和牛肉干的品质, 该研究为开发肉干新型干燥方法提供依据。

**关键词:**干燥, 优化, 品质调控, 中红外, 热风, 性能效益

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.030

中图分类号: TS251.5<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0217-10

谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 中红外-热风组合干燥牛肉干降低能耗提高品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 217-226.

Xie Xiaolei, Li Xia, Zhang Chunhui, et al. Combined mid-infrared and hot air drying reduces energy-consumption and improves quality of jerky[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 217-226. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

牛肉干是一种传统风干肉制品, 因其营养丰富, 口感独特, 保存时间长, 携带方便而快速发展成为运动、旅游、休闲肉制品<sup>[1]</sup>。据联合国粮农组织(FAO)统计, 近年来肉干的消费量呈持续上升趋势, 其中70%为牛肉干<sup>[2-3]</sup>。干燥作为牛肉干初制加工的关键工序, 不同的干燥方法会产生不同的性能效益和品质特征, 就目前常用的几种牛肉干的干燥方法而言<sup>[4-8]</sup>, 晒干和风干加工设备简单, 加工成本低, 但因其温度条件难以控制, 干燥时间长, 存在肉干品质不均一, 批次产品质量不稳定的问题, 同时脱水干燥耗能较高; 烘房/热风干燥卫生条

件得到改善, 减少了灰尘和细菌的污染, 但干燥时间长, 经济效益低<sup>[9]</sup>; 热风与微波分段干燥在改善产品品质的同时能够大幅度缩短干燥时间, 但是水分在表面聚集不利于内部水分扩散, 容易产生产品局部过焦与干燥结壳现象<sup>[10-11]</sup>, 同时设备投资高, 不利于工业化推广<sup>[12]</sup>。

红外线是介于可见光和微波之间的电磁波, 波长范围为0.76~1 000  $\mu\text{m}$ , 根据波长把红外分为短波(近)红外(0.76~2  $\mu\text{m}$ )、中波红外(2~4  $\mu\text{m}$ )和长波(远)红外(4~1 000  $\mu\text{m}$ ) 3个区域<sup>[13]</sup>。红外加热技术具有高效、节能、环保、改善品质的特点, 很早就被应用于烘干、烧烤和干燥食品原料等方面<sup>[14]</sup>。Cenkowski和Sosulski等<sup>[15]</sup>用红外加热豆片, 加热时间只用了90 s, 与传统的加热相比, 加热时间缩短为原来的1/3; Sakai和Hanzawa用红外焙烤玉米饼干和鱼肝酱, 与传统热风干燥相比节省了45%~70%的能量<sup>[16]</sup>。与单纯红外或热风干燥方式相比, 红外-热风组合干燥具有良好的协同作用<sup>[17]</sup>。目前, 国内外红外-热风组合加热技术的应用主要集中在果蔬干燥和谷物脱水等方面。王俊对蘑菇的远红外热风加热

收稿日期: 2013-05-22 修订日期: 2013-10-29

基金项目: 中央级基本科研业务费预算增量项目(2013ZL013); 公益性行业(农业)科研专项(201303082)

作者简介: 谢小雷(1989—), 男, 山东菏泽人, 研究方向为肉品科学, 北京 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, 100193。Email: xiexiaolei123@126.com

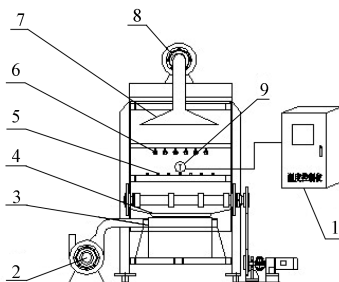
※通信作者: 张春晖(1971—), 男, 河南固始人, 研究员, 研究方向为肉品科学。北京 中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工综合性重点实验室, 100193。Email: 18910165989@163.com

特性研究表明,热风能够及时带走红外干燥室中物料蒸发的水汽,从而提高干燥效率<sup>[18]</sup>;罗剑毅等<sup>[19]</sup>采用远红外与热风组合干燥稻谷,发现组合干燥能够显著缩短干燥时间并提高稻谷品质。中红外与热风组合干燥方面,Hebbar 等<sup>[17]</sup>对胡萝卜和土豆进行了中红外与热风组合干燥的研究,发现组合干燥比热风干燥耗能减少 63%,比中红外干燥耗能减少 37%;汪喜波<sup>[20]</sup>对水稻采用中红外与热风组合干燥发现,组合干燥能够直接对物料表面及内部深层加热,在较短的时间内就可使物料内部温度得到提高,提高干燥效率。但目前利用红外与热风组合技术干燥牛肉干并未见报道。为此,本文依据牛肉的红外特征吸收光谱,根据红外匹配吸收理论和选择性加热原理<sup>[20]</sup>,利用中红外-热风组合加热技术研究 CMIHA 干燥方法对牛肉干干燥耗时、耗能及牛肉干品质的影响,优选适宜的干燥工艺,为开发肉干新型干燥方法提供依据。

## 1 中红外-热风组合干燥机的结构、工作原理及技术特点

### 1.1 结构特点

由课题组自主研发设计的中红外-热风组合干燥机主要由温度控制仪、排风机、排风管、排风斗、物料盘、红外加热管、鼓风机、鼓风机、温度传感器等部分组成,如图 1 所示。其中干燥机腔内装有 6 根红外加热管,水平排列于物料盘的上部,每个加热管都与相应的功率控制开关连接,通过功率可以调节辐射到箱内的红外波长,通过控制红外灯管的作业数量,可以调节辐射到腔内的红外强度;另外,物料盘具有 3 个调节高度(8、12、16 cm),可以根据不同物料加热需要进行调节。



1. 温度控制仪 2. 排风机 3. 排风管 4. 排风斗 5. 物料盘 6. 红外加热管 7. 鼓风斗 8. 鼓风机 9. 温度传感器  
1. Temperature control panel 2. Exhauster blower 3. Exhauster pipe 4. Exhauster scoop 5. Material tray 6. IR heat source 7. Air scoop 8. Blower 9. Temperature sensor

图 1 中红外-热风组合干燥机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of combined mid-infrared and hot air dryer

### 1.2 工作原理及技术特点

该设备是采用红外加热技术和热风强制对流

技术进行加热作业。红外加热技术是基于匹配吸收理论,当物料分子(或原子)的振动频率与接收的红外线频率相同时,会与红外辐射能量产生共振吸收,促使分子内能增加,物料内部温度升高<sup>[21]</sup>,加快内部水分往表面扩散,且加热惯性小,容易实现智能控制<sup>[13]</sup>;同时,热风的强制对流能够带走物料表面的水分,降低物料表面的温度<sup>[17]</sup>,在内外温差和水分梯度同时作用下,内部水分扩散出来,从而达到快速干燥的目的。在烘干腔与箱体外壳之间有绝热性良好的保温层,可以很好的减少热量的散失;红外加热管采用外层涂有镀金反射膜的石英灯管,实际应用中,可以根据需要,配制不同波长的灯管,灯管辐射效率达 90%。通过对整机结构及灯管的选择,中红外-热风组合干燥机的干燥效率可达 70%~80%。

## 2 红外辐射-对流组合换热控制方程

以二维为例,描述红外辐射-对流组合换热规律的控制方程,即对流换热的控制方程加上辐射传递方程为<sup>[20]</sup>

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$x$  方向

$$\rho \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$y$  方向

$$\rho \left( u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

能量方程

$$\rho c_p \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial q_{rx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ry}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为流体的黏滞系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $u_x$ ,  $u_y$  为  $x$  及  $y$  方向的流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $c_p$  为流体的定压比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda$  为流体的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $q_{rx}$ 、 $q_{ry}$  分别为  $x$  及  $y$  方向的辐射热流密度,  $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

为简化起见,计算过程中忽略体积力、黏性耗散,根据 Prandtl 边界层学说<sup>[22-23]</sup>,可将红外辐射-对流组合换热控制方程中动量方程和能量方程简化为动量方程

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (5)$$

能量方程

$$\rho c_p \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial q_r}{\partial y} \quad (6)$$

式中,  $\nu$  为运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ;  $q_r$  为辐射热流密度,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $T$  为辐射温度,  $\text{K}$ ;

由辐射-对流组合换热的控制方程式(5)和式(6)可以得出,  $x$ 、 $y$ 、 $u_y$ 、 $T$ 、 $q_r$  都是组合换热的影响因素。因此为了研究中红外-热风组合技术最佳干燥工艺, 本文在风速、物料尺寸固定情况下, 通过设计  $L_9(3^4)$  正交试验, 来考察干燥温度、辐射距离和辐射强度等关键因素对组合干燥牛肉干效率的影响。

### 3 材料与方法

#### 3.1 材料与试剂

原料肉: 由内蒙古都羊业食品有限公司提供的新鲜去皮、骨、肥膘、筋腱、肌膜的草原黄牛后腿的精肉部分(约 5 kg 的肉块), 屠宰分割后, 经  $-26^\circ\text{C}$  速冻库冻结完成后, 进行干燥试验。

试剂: 包括乙醚(分析纯)、体积分数为 95% 乙醇(分析纯)、氢氧化钾(分析纯)等均购于国药集团化学试剂有限公司。

#### 3.2 主要设备与仪器

中红外-热风组合干燥机: 中国农业科学院农产品加工研究所与泰州圣泰科红外科技有限公司联合研制, 输出功率 425~2 225 W, 物料盘尺寸 35 cm×40 cm, 最大容量 2 kg; DHG 系列电热恒温鼓风干燥箱: 上海新苗医疗器械制造有限公司, 输出功率 1 600 W, 物料盘尺寸 35 cm×40 cm, 最大容量 2 kg; 傅里叶变换红外光谱仪(德国 BRUKER 光谱仪器公司); CR-400 便捷式色差仪(柯尼卡美能达(日本)公司); TA-XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司)。

#### 3.3 试验方法

##### 3.3.1 样品预处理

将原料肉于  $4^\circ\text{C}$  解冻至中心温度为  $-2\sim 0^\circ\text{C}$ , 然后将其修整切割成 6 cm×2 cm×2 cm 的肉条, 清水漂洗, 用滤纸吸去表面水分, 单层平铺于物料盘上, 每盘约 2 kg, 然后进行干燥试验, 至湿基含水率为 50% 左右(用手轻握时, 表面略感坚硬; 用力紧握时, 感觉稍有弹性)<sup>[4]</sup>。肉条的初始含水率为  $78\%\pm 1\%$ 。

##### 3.3.2 试验设计

本试验以中红外-热风组合干燥机设备为载体, 根据牛肉红外光谱图选择对应的灯管, 来控制辐射到腔内的红外波长, 研究红外-热风组合干燥技术对

耗时、耗能及牛肉干品质的影响。由于影响试验的因子和水平较多, 本试验选取正交表  $L_9(3^4)$ , 固定风速 (1 m/s), 考察干燥温度 (A)、辐射距离 (B) 和辐射强度 (C) 对牛肉干干燥效果的影响。在传统牛肉干干燥所用温度  $50\sim 70^\circ\text{C}$ <sup>[3,5-7,24-25]</sup>, 汪喜波<sup>[20]</sup>对红外辐射在水稻干燥方面的研究, 前期单因素试验等基础上, 选取各因素水平的试验安排见表 1, 其中辐射强度是通过控制 225 W 灯管的作业数量来调节。通过测定干燥耗时、耗能, 及牛肉干剪切力、色泽等指标, 并进行极差分析、方差分析与权重分析, 筛选出最佳的中红外-热风组合干燥牛肉干工艺参数。随后将最佳的中红外-热风组合干燥工艺与单纯的热风干燥和中红外干燥进行比较试验, 并以干燥耗时、耗能, 及牛肉干质构、色泽、酸价及综合感官指标为考核指标研究 3 种干燥方法对牛肉干干燥特性的影响。

表 1 中红外-热风组合干燥工艺参数因素水平

Table 1 Levels and factors of combined mid-infrared and hot air drying technology parameters

水平 Levels	因素 Factors		
	干燥温度 $A/^\circ\text{C}$ Drying temperature	辐射距离 $B/\text{cm}$ Radiation distance	辐射强度 $C/(\text{W}\cdot\text{cm}^2)$ Radiation intensity
1	50	8	0.48
2	60	12	0.64
3	70	16	0.80

注: 每盘肉的质量约为 2 kg, 风速固定为 1 m/s。

Note: The meat weight is 2kg on each material tray, the wind velocity of fixing is 1 m/s.

##### 3.3.3 指标测定

1) 耗时的测定: 干燥前测定原料肉初始含水率, 试验中每隔 20 min 测定牛肉干质量, 直至湿基含水率为 50% 左右时, 干燥结束。

2) 耗能的测定: 能耗计算公式

$$W = \frac{P \times t}{m}$$

式中,  $W$  为能耗,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $P$  为功率,  $\text{kW}$ ;  $t$  为干燥时间,  $\text{h}$ ;  $m$  为物料质量,  $\text{kg}$ 。

3) 水分的测定: 恒温干燥法 (GB/T9695.15-2008)。

4) 色差的测定:  $\text{CIE-L}^* \text{a}^* \text{b}^*$  (1976) 法<sup>[26]</sup>, 用便携式色差仪直接测定样品表面的亮度值  $L^*$ 、红度值  $a^*$  和黄度值  $b^*$  值。

5) 收缩率: 小米置换法<sup>[27]</sup>, 干燥前采用浮力法测量肉条的体积, 干燥后采用小米置换法测量牛肉干的体积。收缩率计算公式

$$R_s = \frac{V_o - V_t}{V_o} \times 100\%$$

式中,  $R_s$  为收缩率, %;  $V_0$  为干燥前牛肉干的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_t$  为干燥后牛肉干的体积,  $\text{cm}^3$ 。

6) 剪切力: TA-XT Plus 质构仪测定, 测试采用切刀探头, 力臂 25 kg, 测前速度 5 mm/s, 进刀速度为 10 mm/s, 进刀距离是 25 mm。

7) 质构特性测定 (texture profile analysis, TPA): 将干燥结束的牛肉干沿着垂直纤维的方向切成  $2\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的肉样, 并用 TA-XT Plus 质构仪进行测定, 以“二次压缩”模式进行质地剖面分析, 每个处理的样品平行测定 5 次, 结果取 5 次测定平均值。选取的 4 个分析指标为硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性。测定条件: 探头 P35, 测前速率 2.0 mm/s, 测中速率 2.0 mm/s, 测后速率 10.0 mm/s, 压缩比 40%, 剪切感应力 5.0 g, 探头 2 次测定间隔时间 5.00 s; 触发类型为自动。

8) 酸价的测定: 指示剂滴定法 (GB/T 5530-1998)

9) 品质感官评价: 按 Ji-Hun Choi<sup>[1]</sup>的方法, 选取 11 个有经验的感官评价员对牛肉干制品进行评价打分, 打分标准为: 色泽 (1=完全不满意, 10=完全满意)、风味 (1=完全不喜欢, 10=完全喜欢)、嫩度 (1=非常硬, 10=非常柔软) 和总体可接受度 (1=无法接受, 10=完全接受)。换样前, 评价员要进行漱口, 清除口中的样品。

10) 牛肉红外光谱图: 按 Gangidi 等<sup>[28]</sup>的方法适度修改, 采用多次衰减全反射技术 (attenuated total reflection, ATR) 进行测量, 取适量解冻后的肉样放于 ATR 附件上扫描, 红外谱图记录采用 OMNIC 软件, 测定范围  $4\,000 \sim 400\text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数 100 次, 扫描速度  $0.63\text{ cm/s}$ , 分辨率  $32\text{ m}^{-1}$ 。

### 3.3.4 中红外干燥与热风干燥方法技术参数

中红外干燥: 将牛肉切成  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  尺寸的肉条, 放置于中红外干燥箱内, 根据牛肉红外光谱图选择中红外波长  $2.8 \sim 3.1\text{ }\mu\text{m}$ , 控制温度  $70^\circ\text{C}$ , 辐射距离 0.8 cm, 辐射强度  $0.48\text{ W/cm}^2$ , 干燥至湿基含水率 50% 左右<sup>[4]</sup>。

热风干燥: 将牛肉切成  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  尺寸的肉条, 放置于鼓风干燥箱内, 控制温度  $70^\circ\text{C}$ , 风速 1 m/s, 辐射距离 0.8 cm, 干燥至湿基含水率 50% 左右<sup>[4,6]</sup>。

### 3.3.5 数据分析

采用 SAS9.2 软件进行极差分析和方差分析, 并用多重比较分析法对中红外-热风组合干燥与中红外干燥和热风干燥的干燥效果进行比较, 上述试验如未特殊说明均至少为 3 次重复, 结果均表示为“平均值 $\pm$ 标准差”。

## 4 结果与分析

### 4.1 中红外-热风组合干燥红外波长确定

牛肉中含有水分、蛋白质、脂肪等物质, 组成这些物质的化学基团经红外线照射后会形成特定的吸收峰。由牛肉的红外光谱图 (图 2) 可以得出, 牛肉在  $3\,200 \sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$  ( $2.8 \sim 3.1\text{ }\mu\text{m}$ ) 和  $1\,600\text{ cm}^{-1}$  ( $6.25\text{ }\mu\text{m}$ ) 左右具有较高的红外吸收。其中  $2.8 \sim 3.1\text{ }\mu\text{m}$  吸光度最高, 达到 0.56 左右, 其主要为牛肉中一些多肽 N-H 基团和水分 O-H 基团的伸缩振动; 其次是  $6.25\text{ }\mu\text{m}$  吸光度, 达到 0.2 左右, 其主要为牛肉中一些多肽 C=O 基团的伸缩振动, 此结果与 Gangidi 等<sup>[28]</sup>报道的绞碎牛肉红外光谱图结果一致。因此, 为了提高红外加热效率, 本试验选择波长为  $2.8 \sim 3.1\text{ }\mu\text{m}$  的中红外, 选择 225 W ( $3.1\text{ }\mu\text{m}$  左右) 和 450 W ( $2.8\text{ }\mu\text{m}$  左右) 的灯管来控制辐射到腔内的中红外波长为  $2.8 \sim 3.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

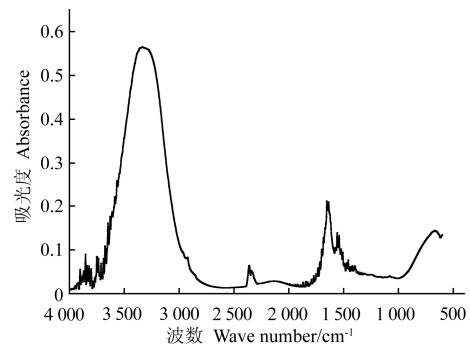


图 2 牛肉红外光谱图  
Fig.2 Infrared spectra of beef

### 4.2 中红外-热风组合干燥适宜工艺参数确定

以辐射-对流组合换热控制方程为基础, 针对干燥温度、辐射距离和辐射强度等因素的正交试验结果如表 2 所示。

根据牛肉干生产要求, 干燥耗时、耗能以低为好, 剪切力的大小反应牛肉干的嫩度, 在一定范围内, 其值越低说明牛肉干嫩度越好<sup>[25]</sup>,  $L^*$  值反应牛肉干的亮度,  $a^*$  值反应肉干的红色,  $b^*$  值反应牛肉干的黄色值, 在一定范围内, 三者的值越高, 表明牛肉干的色泽品质越好<sup>[3,29]</sup>。由表 2 得出, 牛肉干的剪切力范围为  $161.41 \sim 434.24\text{ N}$ ,  $L^*$  值范围为  $23.4 \sim 30.33$ ,  $a^*$  值范围为  $10.31 \sim 19.1$ ,  $b^*$  值范围为  $5.03 \sim 9.81$ , 大部分与 Thiagarajan<sup>[30]</sup>报道的牛肉干剪切力范围  $101.7 \sim 261.3\text{ N}$ ,  $L^*$  值范围  $25.95 \sim 36.25$ 、 $a^*$  值范围  $12.48 \sim 21.44$ 、 $b^*$  值范围  $7.45 \sim 15.02$  一致, 只有少数部分偏离。由表 2 中的  $R$  可知, 干燥过程中耗时、耗能、剪切力、 $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值等指标所对应的 3 因素主次顺序有所不同, 其中耗时、耗能的影响因子  $A > B > C$ , 即干燥温度对耗时、耗能影响

最为重要, 最佳组合均为  $A_3B_1C_1$ ; 剪切力的影响因子以干燥温度最为重要, 最佳组合为  $A_2B_1C_1$ ;  $L^*$  值的影响因子以辐射强度最为重要, 最佳组合为  $A_3B_1C_2$ ;  $a^*$  值的影响因子以辐射距离最为重要, 最佳组合为  $A_3B_1C_2$ ,  $b^*$  值的影响因子以干燥温度最为重要, 最佳组合为  $A_3B_1C_2$ , 由极差分析可以确定的最佳因素为  $B_1$ 。由表 2 中的  $Pr$  可以看出, 在 0.05 显著水平上, 只有 A 因素对耗时影响显著 ( $p=0.04$ ), 对能耗和  $b^*$  值影响弱显著 ( $p=0.06$  和  $p=0.08$ ), 其余因素对指标影响都不显著 ( $p>0.1$ ), 因此在省时、节能和保持黄度的基础上确定最佳 A 因素为  $A_3$ ; 在 0.05 显著水平上, C 因素对各项指标影响均不显著 ( $p>0.1$ ), 但与耗时、 $L^*$  值和  $a^*$  值相比, C 因素对剪切力的影响 ( $p=0.25$ ) 最为显著, 对能耗和  $b^*$  值影响 ( $p=0.27$ ) 次之, 因此, 在考虑节能和低剪切力的情况下选择最佳因素为  $C_1$ 。

经综合分析确定中红外-热风组合干燥牛肉干最佳因素水平组合为  $A_3B_1C_1$ , 即干燥温度  $70^{\circ}\text{C}$ 、辐射距离 8 cm、辐射强度  $0.48\text{ W}/\text{cm}^2$ 。由于  $A_3B_1C_1$  未出现在正交试验中, 因此对其开展验证试验。验证结果得出, 因素水平组合  $A_3B_1C_1$  干燥牛肉干耗

时( $120\pm 10.81$ ) min、耗能( $1.76\pm 0.08$ ) kW·h, 牛肉干的剪切力、 $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值分别为( $143.57\pm 3.43$ )N、 $28.53\pm 1.02$ 、 $14.01\pm 1.22$ 、 $9.83\pm 0.79$ 。与正交试验中 9 组因素水平组合相比,  $A_3B_1C_1$  因素水平组合干燥牛肉干的干燥耗时、耗能、剪切力均较低(干燥耗时仅比  $A_3B_1C_3$  略高),  $L^*$  值、 $b^*$  值均高于 9 组因素水平组合的平均值(27.44、7.52), 仅  $a^*$  值略低于 9 组因素水平组合的平均值(15.03)。

为进一步验证中红外-热风组合干燥牛肉干最佳因素水平组合为  $A_3B_1C_1$ , 本文采用多人权重分析, 根据干燥耗时、耗能、剪切力、 $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值等指标在生产中的重要性, 对它们进行权重系数划分<sup>[31]</sup>。经 12 名专业评定员进行权重划分后得出, 干燥耗时、耗能、剪切力、 $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值所占权重系数分别为 30%、30%、10%、10%、10%、10%。为了减少误差, 干燥耗时和剪切力分别以小时和 kg 为单位来计算, 综合评分  $y$  采用公式:  $y=0.1\times L^*+0.1\times a^*+0.1\times b^*-0.3\times$  干燥耗时- $0.3\times$  耗能- $0.1\times$  剪切力, 其中  $y$  评分越大越好。由表 3 可以得出第 10 组综合评分显著高于( $p<0.05$ )其余 9 组评分。即  $A_3B_1C_1$  为中红外-热风组合干燥牛肉干综合评分最高的因素水平组合。

表 2 中红外-热风组合干燥牛肉干工艺参数正交试验、极差分析和方差分析

Table 2 Range and variance analysis of orthogonal experiment of drying process parameters in combined mid-infrared and hot air drying

序号 No	干燥温度 A Drying temperature / $^{\circ}\text{C}$	辐射距离 B Radiation distance /cm	辐射强度 C Radiation intensity / $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	干燥耗时 Drying time/min	耗能 Drying energy/(kW·h)	剪切力 Shear force/N	$L^*$ 值 $L^*$ value	$a^*$ 值 $a^*$ value	$b^*$ 值 $b^*$ value
1	1	1	1	300±20.11	4.37±0.29	217.66±6.47	29.00±1.24	19.10±2.04	7.38±0.62
2	1	2	2	460±25.30	8.43±0.46	350.35±25.87	28.08±1.85	13.16±1.83	5.98±0.57
3	1	3	3	440±20.10	9.72±0.44	434.24±23.42	25.13±0.46	10.31±0.34	5.03±0.33
4	2	1	2	180±6.54	3.30±0.12	161.41±12.64	28.73±2.24	18.91±1.49	9.81±1.13
5	2	2	3	220±10.09	4.86±0.22	245.20±17.05	26.30±0.55	14.60±1.55	6.75±0.43
6	2	3	1	240±9.87	3.50±0.14	186.00±15.88	23.40±1.16	11.79±1.14	5.88±0.67
7	3	1	3	100±7.07	2.21±0.16	218.25±19.80	27.22±1.07	16.25±0.77	9.28±1.01
8	3	2	1	200±8.76	2.92±0.13	235.69±12.35	28.74±1.62	15.18±1.19	8.49±0.61
9	3	3	2	160±9.79	2.93±0.18	218.15±24.5	30.33±1.89	15.93±1.47	9.07±1.12
				A	B	C	A	B	C
耗时 Drying time	$K_1$	400	193	247	耗能 Drying energy	$K_1$	7.51	3.29	3.60
	$K_2$	213	293	267		$K_2$	3.89	5.40	4.89
	$K_3$	153	273	253		$K_3$	2.69	5.38	5.60
	R	247	100	20		R	4.82	2.11	2.00
	F 值	25.98	4.63	0.16		F 值	15.85	3.70	2.59
	$Pr>F$	0.04	0.18	0.86		$Pr>F$	0.06	0.21	0.27
剪切力 Shear force	$K_1$	34.09	20.32	21.75	$L^*$ 值 $L^*$ value	$K_1$	27.4	28.32	27.05
	$K_2$	20.16	28.27	24.83		$K_2$	26.14	27.71	29.05
	$K_3$	22.86	28.52	30.53		$K_3$	28.76	26.29	26.22
	R	13.93	8.20	8.78		R	2.62	2.03	2.83
	F 值	8.35	3.33	3.04		F 值	1.28	0.81	1.58
	$Pr>F$	0.11	0.23	0.25		$Pr>F$	0.44	0.55	0.39
$a^*$ 值 $a^*$ value	$K_1$	14.19	18.09	15.36	$b^*$ 值 $b^*$ value	$K_1$	6.13	8.82	7.25
	$K_2$	15.10	14.31	16.00		$K_2$	7.48	7.07	8.29
	$K_3$	15.79	12.68	13.72		$K_3$	8.95	6.66	7.02
	R	1.60	5.41	2.28		R	2.82	2.16	1.27
	F 值	0.32	3.83	0.69		F 值	11.83	7.86	2.71
	$Pr>F$	0.76	0.21	0.59		$Pr>F$	0.08	0.11	0.27

表 3 中红外-热风组合干燥牛肉干工艺参数综合评分  
Table 3 Synthesis score of drying process parameters in Combined mid-infrared and hot air drying

序号 No	干燥温度 <i>A</i> Drying temperature / $^{\circ}\text{C}$	辐射距离 <i>B</i> Radiation distance /cm	辐射强度 <i>C</i> Radiation intensity /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	综合评分 ( $y$ ) Synthesis score
1	1	1	1	0.52±0.14f
2	1	2	2	-3.68±0.1i
3	1	3	3	-5.50±0.36j
4	2	1	2	2.21±0.29b
5	2	2	3	-0.30±0.03h
6	2	3	1	-0.04±0.0001g
7	3	1	3	1.89±0.001c
8	3	2	1	0.96±0.13e
9	3	3	2	1.63±0.09d
10	3	1	1	2.65±0.19a

注：同一列的不同字母表示不同因素水平差异显著 ( $p<0.05$ )，第 10 组为优化后的组合。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different factor levels ( $p<0.05$ ), number 10 is the optimized parameter.

综上所述，因素水平组合  $A_3B_1C_1$ ，即干燥温度  $70^{\circ}\text{C}$ 、辐射距离 8 cm、辐射强度  $0.48\text{ W}/\text{cm}^2$  为中红

外-热风组合干燥牛肉干最适工艺参数。

#### 4.3 不同干燥方式对牛肉干干燥特性的比较

##### 4.3.1 不同干燥方式对牛肉干干燥效果的比较

将中红外-热风组合干燥最佳技术参数与传统热风干燥和中红外干燥进行比较试验，结果见表 4。

在性能效益方面，中红外-热风组合干燥利用中红外加热技术和热风强制对流技术，由红外线不通过介质直接对物体加热，并由热风及时带走物体表面水分，热效率有较大提升<sup>[16-17]</sup>。从表 4 中可以得出，中红外-热风组合干燥技术干燥耗时和耗能分别仅为热风干燥耗时、耗能的 40% 和 22%，为中红外干燥耗时、耗能的 70% 和 90%。与热风干燥相比，中红外-热风组合干燥和中红外干燥耗时、耗能均显著降低 ( $p<0.05$ )；另外，与中红外干燥相比，中红外-热风组合干燥耗时、耗能也得到显著的降低 ( $p<0.05$ )。Hebbbar 等<sup>[17]</sup>也曾报道，对土豆采用中红外与热风组合干燥，发现组合干燥耗时、耗能仅为热风干燥耗时、耗能的 52% 和 37%，为中红外干燥耗时、耗能的 64% 和 63%。

表 4 不同干燥方式对牛肉干干燥效果的比较

Table 4 Comparison of effect with different drying methods on jerky

项目 Column		干燥方式 Drying methods		
		中红外-热风组合干燥 Combined mid-infrared and hot air drying	中红外干燥 Mid-infrared drying	热风干燥 Hot air drying
性能 效益 Performance and benefit	干燥耗时 Drying time/min	130±10.25c	190±11.23b	320±17.21a
	耗能 Drying energy/( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.95±0.04c	1.07±0.05b	4.26±0.07a
	硬度 Hardness/N	134.95±7.94a	124.66±18.13a	119.36±9.90a
品质 Quality	弹性 Springiness	0.72±0.03a	0.69±0.03ab	0.65±0.05b
	黏聚性 Gumminess	0.57±0.03a	0.52±0.04b	0.54±0.02b
	咀嚼性 Chewiness/N	55.08±2.65a	44.01±2.74b	42.43±3.92b
	剪切力 Shear force/N	146.22±9.41b	243.82±23.72a	255.98±20.68a
	收缩率 Shrinkage rate/%	39.95±0.59b	49.94±3.29a	52.28±3.22a
	酸价 Acid value/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	3.4±0.49a	3.27±0.24a	3.89±0.4a
	<i>L</i> *值 <i>L</i> * value	28.56±2.51a	25.93±0.76b	22.84±0.88c
	<i>a</i> *值 <i>a</i> * value	12.93±1.37a	11.71±1.15a	7.4±1.58b
	<i>b</i> *值 <i>b</i> * value	7.62±1.76a	6.67±0.25ab	4.95±1.14b

注：同一行同一指标的不同字母表示 3 种干燥方法差异显著 ( $p<0.05$ )。

Note: Different letters in the same row indicate significant differences between three drying methods ( $p<0.05$ ).

在物性指标方面，3 种干燥方法干燥牛肉干的 TPA 指标均在 Thiagarajan 等<sup>[30]</sup>，明建等<sup>[32]</sup>报道的牛肉干 TPA 指标范围（弹性：0.71~0.86，黏聚性：0.38~0.81，硬度：74.48~136.84 N，咀嚼性：11.87~57.55 N）之内。其中，中红外-热风组合干燥得到的牛肉干黏聚性值和咀嚼性值分别为 0.57 和 55.08 N，均显著高于 ( $p<0.05$ ) 中红外干燥的 0.52、44.01 N 和热风干燥的 0.54、42.43 N；剪切力值为 146.22 N，显著低于中红外干燥的 243.82 N 和热风干燥的 255.98 N；弹性值为 0.72，显著高于 ( $p<$

0.05) 热风干燥的 0.65，但与中红外干燥无显著差异；另外，三者的硬度值无显著差异 ( $p>0.05$ )。咀嚼性是硬度、弹性及黏聚性的综合表现体现，反映了肉干从可咀嚼状态到可吞咽状态所需的能量，在一定范围内，其值越大说明熟制品口感方面对应的“咬感”就越好<sup>[33]</sup>。由表 4 可以得出，与中红外干燥和热风干燥相比，中红外-热风组合干燥能够显著改善牛肉干的质构特性，使其具有较好的口感。收缩率是干燥食品组织结构的最重要评价指标，它的大小直接影响干燥产品总体密度、固体密度、总

体孔隙度、孔隙尺寸和比体积等所有其他结构性指标,收缩率越大,产品品质越差<sup>[34]</sup>。由表 4 可以得出,中红外-热风组合干燥得到的牛肉干收缩率为 39.95%,显著低于 ( $p<0.05$ ) 中红外干燥的 49.94% 和热风干燥的 52.28%,此 3 种结果均在 Thiagarajan 等<sup>[30]</sup>报道的牛肉干收缩率范围之内,这表明与中红外干燥和热风干燥相比,中红外-热风组合干燥能够显著改善 ( $p<0.05$ ) 牛肉干的内部质构特性,这与其干燥得到的牛肉干具有较好的口感结果一致。

在色泽及氧化指标方面,中红外-热风组合干燥的  $a^*$  值和  $b^*$  值显著高于 ( $p<0.05$ ) 热风干燥,但与中红外干燥差异不显著,  $L^*$  值显著高于 ( $p<0.05$ ) 中红外干燥和热风干燥;另外,与热风干燥相比,中红外-热风组合干燥和中红外干燥得到的牛肉干酸价差异不显著 ( $p>0.05$ )。

综上所述,由表 4 结果可以得出,与中红外干燥

和热风干燥相比,中红外-热风组合干燥能够显著降低 ( $p<0.05$ ) 干燥耗时、耗能,改善牛肉干的质构特性;同时,与热风干燥相比,中红外-热风组合干燥和中红外干燥能够显著改善 ( $p<0.05$ ) 牛肉干的色泽。

#### 4.3.2 不同干燥方法干燥牛肉干感官品质的比较

不同干燥方法干燥牛肉干感官品质审评结果如表 5 所示。由于中红外-热风组合干燥是利用红外线匹配吸收和选择性加热的原理对肉样进行加热,水分由物体内部传递到表面后,在热风的强制对流下快速挥发,并带走表面热量,降低表面温度<sup>[17]</sup>,从而降低表面硬化现象,提高牛肉干的感官品质。由表 5 可以看出,中红外-热风组合干燥牛肉干的风味、嫩度和总体可接受度等感官得分明显高于 ( $p<0.05$ ) 中红外干燥和热风干燥;色泽得分显著高于 ( $p<0.05$ ) 热风干燥,但与中红外干燥差异不显著 ( $p>0.05$ );这与表 4 中剪切力、收缩率和色泽等结果基本吻合。

表 5 不同干燥方式干燥牛肉干感官品质的比较

Table 5 Comparison of sensory quality of jerky with different drying methods

干燥方式 Drying methods	感官评价指标 Sensory evaluation index			
	色泽 (10) Color(10)	风味 (10) Flavor(10)	嫩度 (10) Tenderness(10)	总体可接受度 (10) Overall acceptability(10)
中红外-热风组合干燥 Combined mid-infrared and hot air drying	亮褐色、基本均匀 Bright brown, basic even 7.5a	肉香味浓、无异味 Strong meat fragrance, no abnormal taste 7a	质地较软、均匀 Soft texture, even 7a	7a
中红外干燥 Mid-infrared drying	褐色、基本均匀 Brown, basic even 7a	肉香味浓、无异味 Strong meat fragrance, no abnormal taste 6.3b	质地较软、基本均匀 Soft texture, basic even 6b	6.5b
热风干燥 Hot air drying	黑褐色、基本均匀 Black brown, basic even 5b	肉香味淡、异味较轻 Low meat fragrance, low abnormal taste 4.5c	质地较硬、局部结壳 Tough texture, local crust 3.2c	4c

注:同一列的不同字母表示 3 种干燥方法差异显著 ( $p<0.05$ )

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between three drying methods ( $p<0.05$ ).

## 5 讨论

目前牛肉干脱水干燥大多采用自然风干、热风干燥等方法,大多存在耗时较长,耗能较高,干燥效率低,品质差等缺陷,因此本文开发了一种中红外-热风组合干燥方法,以期提高牛肉干干燥效率、提升产品品质。通过试验验证,与传统热风干燥和单纯中红外干燥相比,该方法不仅能够缩短干燥时间,降低能耗,提高经济效益,同时还能改善牛肉干的质构特性和色泽。王相等<sup>[13]</sup>, Sakai 等<sup>[16]</sup>, Kathiravan 等<sup>[35]</sup>报道,红外辐射提供的热流密度比对流加热高几十倍,而且红外辐射热量传递不需要中间介质,直接投入物体内部,且物料形状的不规则对加热均匀性影响很小,从而能够加快水分的传热过程,提高干燥速率;Hebbbar 等<sup>[17]</sup>报道,与中红外干燥相比,中红外-热风组合干燥能够显著降低耗时和耗能是因为热风的强制对流能够带走物料表

面的水分,降低物料表面的温度,在内外温差和水分梯度同时作用下,内部水分扩散出来,从而加快水分的传质过程。表 2 中,当控制腔内温度为 50~70℃时,辐射强度对干燥耗时影响不显著,可能是因为本试验所用中红外-热风组合干燥机的红外辐射强度是通过调节作业灯管的数量来控制,而腔内温度和热风温度主要靠红外灯管加热维持,0.48 W/cm<sup>2</sup> 强度的红外线足已维持 50~70℃的温度,过高的辐射强度反而会导致部分灯管变成间歇式加热,造成能耗浪费。

质构特性是描述干燥品质的重要指标, Kathiravan 等<sup>[35]</sup>报道红外加热技术能够使物料表面和内部同时加热,传热、传质方向一致,物料内外受热均匀,表面硬化现象较轻,从而使物料具有较好的质构特性。Ozdemir 等<sup>[36]</sup>报道物料在干燥或烘烤过程中会发生一些非酶促褐变反应,如美拉德反

应,从而使物料产生一定的色泽。适度的褐变反应会使肉干呈现诱人的亮褐色或红褐色,过度褐变反应则会使肉干呈现黑褐色或黑色,降低肉干的感官品质<sup>[37]</sup>。中红外-热风组合干燥的牛肉干具有较好的色泽,可能是因为红外线的光子能量低,在加热过程中,物料中的成分热分解小,化学性质不容易改变<sup>[13]</sup>,虽然表 4 中中红外-热风组合干燥和中红外干燥得到的牛肉干酸价与热风干燥无显著性差异,但总体呈现轻微下降趋势;同时,中红外-热风组合干燥牛肉干因时间较短,减少了发生美拉德反应持续的时间,从而避免了美拉德反应的过度发生,使牛肉干呈现较好的色泽。导热系数低,表面硬化,产品品质低等是热风干燥最常见的问题,而由表 4 可以得出,与热风干燥相比,中红外-热风组合干燥很好的弥补了热风干燥的缺陷;同时红外加热惯性小,容易实现智能控制,设备投资小,费用低,容易实现智能化控制和标准化作业。

## 6 结 论

本试验中采用的中红外-热风组合干燥与中红外干燥和热风干燥相比,能显著降低干燥耗时、耗能和改善牛肉干的质构。与中红外干燥相比,干燥耗时、耗能分别降低了 30% 和 10%,黏聚性和咀嚼性分别增加了 0.05 和 11.07 N,剪切力和收缩率分别减少了 97.61 N 和 9.99% ( $p < 0.05$ );与热风干燥相比,干燥耗时、耗能分别降低了 60% 和 78%,黏聚性和咀嚼性分别增加了 0.03 和 12.65 N,剪切力和收缩率分别减少了 109.76 N 和 12.33%。另外,与热风干燥相比,中红外-热风组合干燥与中红外干燥还能够显著改善牛肉干的色泽。综上所述,中红外-热风组合干燥技术能够显著提高牛肉干干燥性能效益,改善牛肉干的品质。

### [参 考 文 献]

- [1] Choi J H, Jong Y J, Doo J H, et al. Effects of pork/beef levels and various casings on quality properties of semi-dried jerky[J]. *Meat Science*, 2008, 80(2): 278—286.
- [2] Heinz G, Hautzinger P. Meat Processing Technology for Small-to Medium Scale Producers[M]. Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific (RAP) Publication, 2010: 2—20.
- [3] Banout J, Kucerova I, Marek S. Using a double-pass solar drier for jerky drying[J]. *Energy Procedia*, 2012, 30: 738—744.
- [4] 张铁峰, 旭日花. 内蒙古地区风干牛肉的产品特性及工艺探讨[J]. *畜牧与饲料科学*, 2012, 33(4): 40—42. Zhang Tiefeng, Xu Rihua. Discussion on the characteristics and technology of air-dried beef products in Inner Mongolia[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2012, 33(4): 40—42. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郑灿龙, 靳焱. 传统牛肉干制作工艺要点[J]. *肉类工业*, 1999(4): 20—21. Zheng Canlong, Jin Ye. The production essential of traditional beef jerky[J]. *Meat Industry*, 1999(4): 20—21. (in Chinese with English abstract)
- [6] 汪磊, 庞雪凤, 王国泽, 等. 牛肉干干燥工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(9): 328—329. Wang Lei, Pang Xuefeng, Wang Guoze, et al. The drying process optimization of beef jerky[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(9): 328—329. (in Chinese with English abstract)
- [7] 冉旭, 刘学文, 王文贤. 牛肉干生产新工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(8): 52—53. Ran Xu, Liu Xuewen, Wang Wenxian. Research the new process technology of the beef jerky[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 24(8): 52—53. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郑灿龙, 靳焱, 范丽芳, 等. 牛肉干传统制作工艺改进与现代化生产[J]. *肉类研究*, 1999(4): 30—33. Zheng Canlong, Jin Ye, Fan Linfang, et al. Modified technology for traditional dried beef[J]. *Meat Research*, 1999(4): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [9] 葛长荣, 马美湖. 肉与肉制品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 150—151.
- [10] 关熔, 廖兰, 曾庆孝, 等. 热风微波干燥龙眼肉工艺的优化[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(8): 86—90. Guan Rong, Liao Lan, Zeng Qingxiao, et al. Optimization of drying process of Longan meat by hot-air and microwave technology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, 34(8): 86—90. (in Chinese with English abstract)
- [11] Datta A K, Ni H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 51(4): 355—364.
- [12] 陈建. 牛肉干的微波烘干与杀菌[J]. *农产品加工*, 2005(7): 31. Chen Jian. Microwave drying and sterilizing of beef jerky[J]. *Farm Products Processing*, 2005(7): 31. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(7): 177—182. Wang Xiangyou, Cao Ruibin, Sun Chuanzhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7): 177—182. (in Chinese with English abstract)
- [14] Sandu C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis[J]. *Biotechnology Progress*, 1986, 2(3): 109—119.



- [15] Cenkowski S, Sosulski P W. Cooking characteristics of split peas treated with infrared heat[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(3): 715—720.
- [16] Sakai N, Hanzawa T. Applications and advances in far infrared heating in Japan[J]. Trends in Food Science and Technology, 1994, 5(11): 357—362.
- [17] Hebbar H U, Vishwanathan K H, Ramesh M N. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(4): 557—563.
- [18] 王俊. 远红外与热风混合干燥香菇的质热特性的研究[J]. 农业工程学报, 1998(4): 257—258.  
Wang Jun. Research of mixed far-infrared and hot air drying thermal characteristics of mushroom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998(4): 257—258. (in Chinese with English abstract)
- [19] 罗剑毅. 稻谷的远红外干燥特性和工艺的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 2006.  
Luo Jianyi. Study on Drying Characteristic and Technology of Paddy Dried by Far-infrared[D]. Hang Zhou: Bio-systems engineering and food science college of Zhe Jiang University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [20] 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学工学院, 2003.  
Wang Xibo. Theoretical Analysis and Experimental Study on Combined Convective and Infrared Radiation Drying[D]. Bei Jing: Engineering College of China Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王相友, 林喜娜. 果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 114—120.  
Wang Xiangyou, Lin Xina. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 114—120. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨同舟. 食品工程原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 20—29.
- [23] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197—211.
- [24] 吴峰, 吴应利, 黄名英. 不同腌制剂与腌制时间对牛肉干品质的影响[J]. 食品科技, 2003(增): 230—232.  
Wu Feng, Wu Yingli, Huang Mingying. The influence of curing liquid and curing time on the quality of dried beef[J]. Food Science and Technology, 2003(suppl): 230—232. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨艳, 于功明, 王成忠. 木瓜蛋白酶对牛肉干品质的影响[J]. 肉类工业, 2009(7): 48—51.  
Yang Yan, Yu Gongming, Wang Chengzhong. Effect of papain on nature construction of beef jerky[J]. Meat Industry, 2009(7): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [26] Honikel K O. Reference methods for the assessment of physical characteristic of meat[J]. Meat Science, 1998, 49(4): 447—457.
- [27] 张国琛, 毛志怀, 牟晨晓, 等. 微波真空干燥扇贝柱的物理和感官特性研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 141—144.  
Zhang Guochen, Mao Zhihui, Mu Chenxiao, et al. Physical and sensory properties of vacuum microwave dried scallop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [28] Gangidi R R, Proctor A, Pohlman F W. Rapid determination of spinal cord content in ground beef by attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 124—127.
- [29] Konieczny P, Stangierski J, Kijowski J. Physical and chemical characteristics and acceptability of home style beef jerky[J]. Meat Science, 2007, 76(2): 253—257.
- [30] Thiagarajan I V. Combined Microwave-Convection Drying and Textural Characteristics of Beef Jerky[D]. Saskatoon: Graduate studies and research college of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan, 2008.
- [31] 茆诗松, 周纪芴, 陈颖. 试验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004: 190—197.
- [32] 明建, 李洪军. 不同酶嫩化处理对牛肉物性的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(12): 156—159.  
Ming Jian, Li Hongjun. Effect of proteinase-induced tenderization on physical properties of beef[J]. Food Science, 2008, 29(12): 156—159. (in Chinese with English abstract)
- [33] 阮征, 李汴生, 朱志伟, 等. 不同冻结速率对脆肉鲩鱼片冻结特性的影响研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 250—254.  
Ruan Zheng, Li Biansheng, Zhu Zhiwei, et al. Effects of different freezing rates on the freezing characteristics of Ctenopharyngodon idellus C. et V fillets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(2): 250—254. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘书成, 张常松, 吉宏武, 等. 不同干燥方法对罗非鱼片品质和微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 221—227.  
Liu Shucheng, Zhang Changsong, Ji Hongwu, et al. Effect of drying methods on qualities and microstructure of tilapia fillet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 221—227. (in Chinese with English abstract)
- [35] Kathiravan K, Harpreet K K, Soojin J, et al. Infrared heating in food processing: An overview[J].

Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 2—13.

[36] Ozdemir M, Devres O. Analysis of color development during roasting of hazelnuts using response surface

methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(1): 17—24.

[37] 阙建全, 谢笔钧. 食品化学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 112—125.

## Combined mid-infrared and hot air drying reduces energy-consumption and improves quality of jerky

Xie Xiaolei<sup>1</sup>, Li Xia<sup>1</sup>, Zhang Chunhui<sup>1\*</sup>, Jia Wei<sup>1</sup>, Li Yin<sup>1</sup>, Sun Hongmei<sup>1</sup>, Wang Zhaojin<sup>2</sup>, Mu Guofeng<sup>3</sup>

(1. Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; 2. Tai Zhou Sheng Tai-ke Infrared Technology Co., Ltd, Taizhou 225300, China; 3. Inner Mongolia Meng Du Sheep Food Co., Ltd, Chifeng 024000, China)

**Abstract:** Drying was the key procedure of jerky processing, different drying methods had different economic benefits and impacts on the quality of jerky. For traditional hot air (HA) drying method has some defects in thermal efficiency, new drying method that combined mid-infrared and hot air (CMIHA) drying was investigated in this paper. CMIHA drying machine was heated directly by mid-infrared without media and convective mode, which significantly increased the rate of energy conversion and energy utilization. The thermal efficiency of CMIHA machine was 70%-80%, and the temperature drift range could be controlled under  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . The structure composition, operational principle and technical characteristics of CMIHA drying machine were introduced in this study. Taking fresh beef as test material, the parameters of CMIHA drying process of jerky was optimized with range analysis, variance analysis and synthesis score analysis.

Based on the heat transfer equation of combined radiation and convection, the orthogonal experiments of three factors including drying temperature (50, 60,  $70^{\circ}\text{C}$ ), radiation distance (8, 12, 16 cm) and radiation intensity (0.48, 0.64,  $0.80\text{ W/cm}^2$ ) were carried out with the fixed wind velocity (1 m/s) and jerky size. The indices including drying performance and benefit, shear force and color of jerky were measured. According to the range analysis, radiation distance  $B_1$  (8 cm) was preliminarily considered as the optimum dryer parameter, but drying temperature (A) and radiation intensity (C) could not be determined. According to the variance analysis, A had significant difference ( $p < 0.1$ ) in drying time, drying energy and  $b^*$  value and C had no significant difference ( $p > 0.1$ ) in all indices, but compared with drying time,  $L^*$  value and  $a^*$  value, C had more important impacts on shear force, drying energy and  $b^*$  value. So as for the low shear force and drying energy-consuming,  $A_3C_1$  ( $70^{\circ}\text{C}$ ,  $0.48\text{ W/cm}^2$ ) was preliminarily considered as the optimum drying parameter. Comprehensive analysis of the drying performance and benefit, quality of jerky, the appropriate drying parameter of CMIHA drying machine was  $A_3B_1C_1$ . Through synthesis score analysis,  $A_3B_1C_1$  had the highest score among the ten drying parameters. Then the best CMIHA drying process was compared with mid-infrared (MI) drying (drying temperature  $70^{\circ}\text{C}$ , radiation distance 8 cm, radiation intensity  $0.48\text{ W/cm}^2$ ) and HA drying (drying temperature  $70^{\circ}\text{C}$ , heat distance 8 cm, wind velocity 1 m/s), the indices including drying performance and benefit, shear force, texture profiles analysis (TPA), shrinkage rate, acid value and color were measured. The results showed that compared with MI drying and HA drying, CMIHA drying significantly reduced ( $p < 0.05$ ) the drying time and energy, its time-consuming and energy-consuming were only 70% and 90% of that with MI drying, 40% and 22% of that with HA drying. Besides, compared with HA drying, CMIHA drying could significantly increase ( $p < 0.05$ ) springiness, gumminess, chewiness,  $L^*$  value,  $a^*$  value,  $b^*$  value and decrease ( $p < 0.05$ ) shear force and shrinkage rate. Compared with MI drying, CMIHA drying could significantly increase ( $p < 0.05$ ) gumminess, chewiness,  $L^*$  value and decrease shear force and shrinkage rate, but there were no significant ( $p > 0.05$ ) differences in springiness,  $a^*$  value and  $b^*$  value. Based on the sensory quality, jerky with CMIHA drying could be easier accepted than that dried by MI drying and HA drying. So, compared with the traditional hot air drying, CMIHA drying could significantly increase economic benefit and quality of jerky. This study can provide a reference for the new drying method of jerky.

**Key words:** drying, optimization, quality control, mid-infrared, hot air, performance and benefit

(责任编辑: 刘丽英)