

连续式中红外-热风组合干燥设备的研制与试验

谢小雷¹, 张春晖^{1*}, 贾伟¹, 李侠¹, 王兆进², 穆国锋³

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 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:为解决现有肉干干燥设备效率低、品质差等问题,研制了一种适合肉干连续化生产的中红外-热风组合(combined mid-infrared with hot air, CMIHA)干燥设备,该设备包括进料段、加热段和出料冷却段3个单元,其中每个加热段均由输送系统、加热系统、对流循环系统和控制系统等组成。通过红外加热波长的定向设计及辐射强度的有效控制,加大红外辐射能的利用率,提高脱水效率。同时通过对连续式CMIHA干燥设备的加热系统、对流系统、冷却系统等主要工艺参数的优化计算,研制出用于肉干连续式脱水的CMIHA干燥设备,并进行生产试验,比较分析该干燥设备与传统热风干燥设备对牛肉干脱水效率及品质的影响。结果表明,在相同条件下(加热功率105 kW,加热温度70℃,热风风速1 m/s,冷却风速3 m/s,加热距离8 cm),与传统热风干燥设备相比,连续式CMIHA干燥设备能够加快牛肉干肌肉蛋白的变性,降低干燥活化能,减少脱水所需的能量,降低干燥耗时,提高生产效率,其活化能和干燥耗时分别降低了10.33%和57.14%,生产效率提高了2倍;同时,连续式CMIHA干燥设备能够减轻牛肉干表面结痂现象,减缓($P<0.05$)肌红蛋白的氧化,提高氧合肌红蛋白的含量,降低高铁肌红蛋白的含量,使牛肉干具有较好的“咬感”及色泽,其咀嚼性、剪切力、收缩率、红度 a^* 值、色度 C^* 值、色调 H^* 值均显著优于($P<0.05$)热风干燥设备,赋予了牛肉干较好的感官品质,实现了肉干的高效率、高品质脱水干燥。该研究为风干肉连续式干燥设备的研制提供了参考。

关键词:农业机械;干燥;肉;中红外;干燥效率;品质;活化能

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.039

中图分类号: TS251.52

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-06-282-08

谢小雷, 张春晖, 贾伟, 等. 连续式中红外-热风组合干燥设备的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 282-289.

Xie Xiaolei, Zhang Chunhui, Jia Wei, et al. Development and test of continuous combined mid-infrared with hot air drying equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 282-289. (in Chinese with English abstract)

0 引言

牛肉干、羊肉干、鸡肉干和猪肉干是目前市场上常见的主要肉干产品,其中牛肉干因其独特的风味和较高的营养成分占据了70%左右的市场^[1]。脱水干燥是肉干生产的关键工序,其可以降低肉干内部水分活度,减缓一些生物化学反应的发生,延长产品货架期^[2]。就目前工厂上常用的干燥方法而言^[3-5],自然风干也称晾干,加工设备简单,成本较低,但耗时较长,批次产品质量不稳定,干燥效率较低,无法实现连续化生产;烘房干燥即热风干燥,卫生条件得到改善,减少了外界灰尘和细菌的污染,但设备落后,连续化程度低,主要靠人工操作,干燥效率低,能耗高,经济效益较差^[3]。因此,为了提高肉干的生产效率,增加企业的经济效益,一种高效、节能、连续化程度较高的干燥设备的研制迫在眉睫。

中红外-热风组合(combined mid-infrared with hot air, CMIHA)干燥作为一种新型的干燥方法,具有高效、节能、环保、改善品质的特点,同时红外便于智能化控制,容易实现连续化生产^[6]。目前CMIHA干燥在糖类、淀粉含量较高的果蔬、谷物脱水方面得到了广泛的应用,如胡萝卜和土豆^[7]、香蕉^[8]、洋葱^[9]等,对于蛋白质含量较高的肉类则报道较少。基于实验室前期研究发现,CMIHA干燥因中红外较高的热效应,能够促进牛肉干内部不易流动水转变成自由水,加快扩散迁移,并借助热风蒸发散失,实现物料内外同时干燥,从而提高干燥效率,降低能耗,其耗时、耗能分别仅为热风(hot air, HA)干燥的40.62%、22.30%,同时质构和色泽也得到了改善^[10]。然而,适用于工厂连续式生产的CMIHA干燥设备的缺乏阻碍了其在肉干干燥方面的应用。为此,本文拟研制一套适用于肉干连续式脱水的CMIHA干燥设备,根据红外加热匹配吸收原理及畜禽肉的红外光谱图定向设置红外加热灯管的波长,加大红外辐射能的利用率,满足不同肉干的脱水需求;基于前期研究,有效控制设备的红外辐射强度及加热距离,提高干燥效率,降低能耗。该设备是在原有热风干燥设备基础上进行简单改造,以期解决现有干燥设备效率低、能耗高、品质差、智能化控制差等问题,提高企业的经济效益。

收稿日期: 2015-01-21 修订日期: 2015-02-26

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303082)

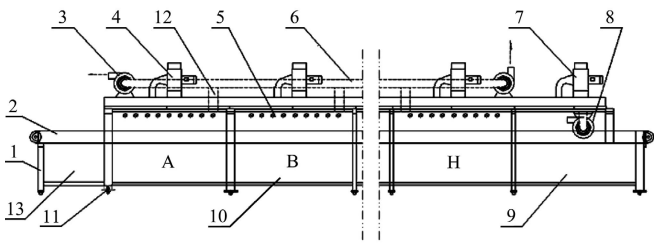
作者简介: 谢小雷,男,山东菏泽人,研究方向为肉品科学。北京 中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工综合性重点实验室,100193。Email: xiexiaolei123@126.com

*通信作者: 张春晖,男,河南固始人,研究员,博士生导师,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: dr_zch@163.com

1 连续式中红外-热风组合干燥设备的总体设计

1.1 结构组成

基于中试与小型生产规模，以原料肉每小时 100~140 kg 处理量为基础，设计连续式中红外-热风组合干燥设备的尺寸为 20 m×2.5 m×1.5 m（长×宽×高），包括进料段、加热段和出料冷却段 3 个单元。其中，输送带的有效宽度为 2 m，有效加热段长度为 16 m（2 m×8 段）；加热段主要由绝热腔体、红外加热灯管、对流控制系统（包括循环风机、排风机、排风风道等）、可调支脚支腿和控制系统（温度控制、输送带速度、水分及干燥时间预测系统等）等组成，见图 1。



a. 结构图
a. Structure chart



b. 实物图
b. Material object

- 1. 烘干机支腿 2. 输送带 3. 排风机 4. 循环风机 5. 红外加热管 6. 排风风道 7. 冷却风机 8. 冷却排风机 9. 冷却段 10. 加热段 11. 可调支脚支腿 12. 排风口 13. 进料段
- 1. Dryer leg 2. Conveyor 3. Exhauster blower 4. Circulating fan 5. Infrared heat source 6. Exhaust duct 7. Cooling fan 8. Exhauster cooling fan 9. Cooling zone 10. Heating zone (A-H) 11. Adjustable leg 12. Exhaust outlet 13. Feed zone

图 1 连续式中红外-热风组合干燥设备示意图

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

1.2 工作原理

该干燥设备是基于红外匹配吸收原理^[6]及热风对流原理^[11]进行加热作业。将经过解冻、修整、切条后得到的肉条置于进料段输送带上进行脱水干燥，肉条随输送带进入加热段，此时，物料分子（或原子）的振动频率与定向波长的红外灯管发射的红外线发生共振吸收，产生摩擦热，内能增加，物料内部温度升高，促使内部水分往表面迁移；对流系统能够加快物料表面水分蒸发散失，降低表面温度，使内部水分在内外温差和水分梯度同时作用下，快速迁移至表面散失，形成良性循环，从而达到快速脱水的目的。另外，通过调节输送带速度可以控制物料加热时间，进而控制物料经脱水干燥后的含

水率，方便后续不同的加工方式对物料含水率要求。待物料加热完毕后，进入冷却段，此阶段能够快速降低物料内外温度，便于后续加工。该干燥设备通过输送带控制物料进料-脱水干燥-冷却一体化操作，实现肉干高效、高品质脱水干燥的连续化生产。

2 主要结构设计

2.1 中红外加热系统

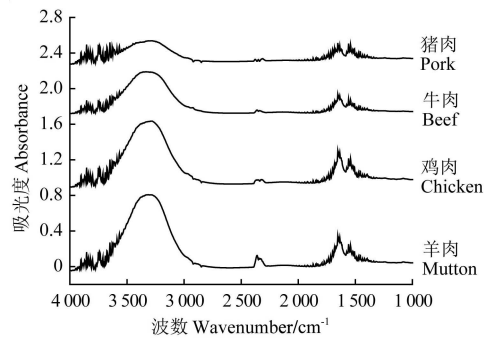
2.1.1 加热波长的定向设计

基于红外加热匹配吸收原理，参照 Gangidi 等^[12]，谢小雷等^[13]的方法对市场上常见的 4 种肉干的原料肉进行红外光谱扫描，结果如图 2 所示。由图 2a 可以得出，猪肉、牛肉、鸡肉和羊肉的红外最大吸收峰均在 3 200~3 500 cm⁻¹（红外波长为 2.8~3.1 μm），因此，考虑到波长间的干涉及不同肉质特征吸收峰的适当偏移，本文定向设计 2.8 μm 和 3.1 μm 波长的红外加热灯管（图 2b），来控制辐射到腔体内的红外波长为 2.8~3.1 μm。根据维恩位移定律^[14]，2.8 μm 和 3.1 μm 灯管的表面温度分别为：

$$T_1 = \frac{2897.8}{\lambda_{\max 1}} = \frac{2897.8}{2.8} = 1035 \text{ K} \quad (1)$$

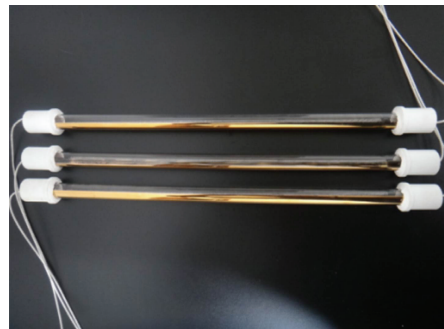
$$T_2 = \frac{2897.8}{\lambda_{\max 2}} = \frac{2897.8}{3.1} = 935 \text{ K} \quad (2)$$

式中：T₁、T₂ 为 2.8 μm、3.1 μm 灯管表面温度，K；λ_{max1}、λ_{max2} 为灯管的波长，μm。根据灯管表面温度，定向设计红外灯管，2.8 μm、3.1 μm 灯管的参数分别为 220 V，2.5 kW 和 220 V，1.8 kW。



a. 红外光谱图

a. Infrared spectrogram



b. 红外加热管

b. Infrared heat source

图 2 不同种类肉的红外光谱图及红外加热管

Fig.2 Infrared spectrogram of different kinds of meat and infrared heat source

2.1.2 辐射强度

红外线的合理布置不仅能使腔内物料受热均匀, 提高干燥效率, 同时还能使能量得到充分利用^[15]。为了更好地说明红外辐射能的利用率, 现揭示辐射空间角系数。图 3 为两黑体表面之间的红外辐射换热。根据兰贝特定律^[14], dS_1 投射到 dS_2 微面上的辐射热流为:

$$dQ_{1,2} = I dS_1 \cos \alpha_1 d\omega_1 \quad (3)$$

其中, 法向辐射强度服从兰贝特定律, 即 $E=I\pi$, 则

$$dQ_{1,2} = \frac{E_1}{\pi} dS_1 \cos \alpha_1 d\omega_1 \quad (4)$$

又由 $d\omega_1 = \frac{ds_2 \cos \alpha_2}{r^2}$ 得:

$$dQ_{1,2} = \frac{E_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (5)$$

两边积分得出:

$$Q_{1,2} = E_1 \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (6)$$

则辐射空间角系数为:

$$\beta_{1,2} = \frac{Q_{1,2}}{E_1 S_1} = \frac{1}{S_1} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (7)$$

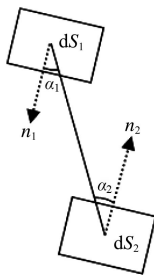
同理得出:

$$\beta_{2,1} = \frac{1}{S_2} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (8)$$

则

$$\beta_{1,2} S_1 = \beta_{2,1} S_2 \quad (9)$$

式中, $Q_{1,2}$ 为黑体 1 对黑体 2 的辐射热流, W/m^2 ; I 为定向辐射强度, $W/(m^2 \cdot Sr)$; S_1 、 S_2 分别为黑体 1、2 的面积, m^2 ; α_1 、 α_2 分别为两黑体连线与法线 n_1 、 n_2 的夹角, ($^\circ$); ω_1 为黑体 1 球面的立体角, Sr ; E_1 为黑体 1 的辐射力, $W/(m^2 \cdot Sr)$; r 为两黑体间的距离, m ; $\beta_{1,2}$ 、 $\beta_{2,1}$ 分别为黑体 1 对黑体 2 及黑体 2 对黑体 1 的辐射空间角系数, %。



注: S_1 、 S_2 分别为黑体 1、2 的面积, m^2 ; r 为两黑体间的距离, m ; α_1 、 α_2 分别为两黑体连线与法线 n_1 、 n_2 的夹角, ($^\circ$)。

Note: S_1 、 S_2 indicate areas of the black body 1 and 2, respectively. r indicates distance between the two black bodies. α_1 、 α_2 indicate included angles between black bodies and normals.

图 3 两个黑体表面之间的辐射换热

Fig.3 Radiation heat transfer between surface of two black body

由此可以得出, 按照同样的比例改变, 黑体的大小 S_1 和 S_2 , 保持空间的几何相似, 即 2 个表面的相对位置、大小不变, 则辐射空间角系数 $\beta_{1,2}$ 和 $\beta_{2,1}$ 保持不变。因此, 同一辐射空间内, 红外灯管工作的数量越多, 其辐射至腔体内的强度则越大。文献^[13]报道合理的辐射强度能够

使红外灯管得到最大化利用, 过高的辐射强度反而会导致部分红外加热灯管变成间歇式加热, 造成辐射能浪费。目前, 生产上肉干脱水干燥常用的温度为 $40 \sim 80^\circ C$, 因此为了充分利用灯管的辐射能, 基于前期研究, 该设备每个腔体内安装 9 根灯管 (4 根 $2.8 \mu m$ +5 根 $3.1 \mu m$), 每根灯管等间距安装, 同时为了提高波长分布的均匀性, 相同波长的灯管交叉排列, 此时每个加热段内最大辐射强度为:

$$R = \frac{4 \times P_1 + 5 \times P_2}{LB} = \frac{4 \times 2.5 \text{ kW} + 5 \times 1.8 \text{ kW}}{2m \times 2m} = 4.75 \text{ kW/m}^2 \quad (10)$$

式中: R 为红外辐射强度, kW/m^2 ; P_1 、 P_2 分别为 $2.8 \mu m$ 、 $3.1 \mu m$ 波长红外灯管功率, kW ; L 为每个加热段输送带的有效长度, m ; B 为输送带的有效宽度, m 。

设备作业过程中, 可以通过控制红外灯管工作数量来控制腔体内的辐射强度, 避免辐射能的浪费。

2.1.3 辐射距离

红外加热灯管与物料间的距离能够直接影响物料的干燥效率和品质特性^[13]。为了方便调节辐射距离, 该设备专门设置了可调支脚支腿来控制输送带与红外加热灯管的距离, 进而控制红外辐射距离。汪喜波^[14]报道红外辐射距离越近, 物料干燥效率越高, 但其品质较差; 因此, 综合考虑干燥效率及产品品质以及前期研究, 确定输送带与红外加热灯管的可调辐射距离为 $8 \sim 16 \text{ cm}$ 。

2.1.4 加热段功率

加热段最大加热消耗功率为:

$$W = EF = 4.75 \text{ kW/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 \times 8 = 152 \text{ kW} \quad (11)$$

式中: W 为干燥室加热消耗功率, kW ; E 为辐射强度, kW/m^2 ; F 为加热面积, m^2 。

2.2 热风对流循环系统

根据腔体所需的最大风速 (1 m/s) 来选择风机:

加热段与送风管路连接处的横截面积为:

$$S = \pi r_1^2 = 3.14 \times 0.15^2 = 0.07 \text{ m}^2 \quad (12)$$

最大风速的体积流量为:

$$L_{\max} = V_{\max} S = 1 \times 0.07 \times 3600 = 252.0 \text{ m}^3/\text{h} \quad (13)$$

风机功率为:

$$P_3 = L_{\max} \rho \eta = 252 \times 3000 \times 0.85 / (1000 \times 3600) = 0.18 \text{ kW} \quad (14)$$

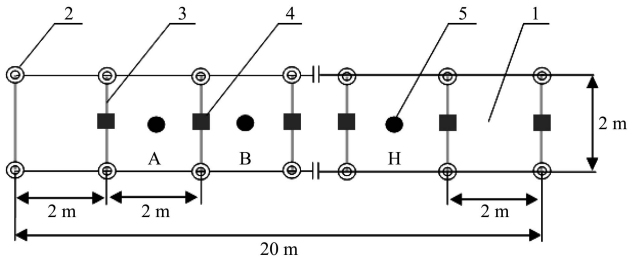
式中: P_3 为每个加热段内的风机功率, kW ; S 为干燥腔体与送风管路连接处的横截面积, m^2 ; r_1 为干燥腔体与送风管路连接处的半径, m ; L_{\max} 为最大风速的体积流量, m^3/h ; V_{\max} 为腔体所需最大风速, m/s ; ρ 为风机入口和出口的压差, Pa ; η 为风机效率。

考虑到实际外界消耗, 每个加热腔体的循环鼓风机的功率为 0.3 kW , 其均由江苏泰州圣泰科红外科技有限公司制造。

2.3 输送系统

物料输送带采用不锈钢 (06Cr19Ni10) 金属丝网制作, 其可以促进腔内热空气的流通, 防止物料掉落。物料在腔体内的停留时间是通过改变输送带的速度来控

制。输送系统的俯视图如图 4 所示，其主要由输送带、滑轮、滚轴、重力传感器和温度传感器组成。每个加热室滚轴旁边均设置一个重力传感器，实现实时监测物料的干燥情况；每个加热室内的输送带速度均可以通过各自的滑轮及滚轴单独调节，从而根据物料干燥情况来适当调节输送带速度，提高批次间物料的均一性。另外，每个加热室内均设置一个温度传感器，用来实时监测加热腔内温度，实现控温干燥。



1. 输送带 2. 滑轮 3. 滚轴 4. 重力传感器 5. 温度传感器
1. Conveyor 2. Pulley 3. Roller 4. Gravity sensor 5. Temperature sensor
图 4 传送系统俯视图

Fig.4 Planform of conveyer system

2.4 冷却系统

冷却系统的设置能够快速降低肉干干燥后的温度，便于后续加工。根据腔体所需的最大风速（3 m/s）来选择冷却风机：

干燥腔体与冷却风机送风管路连接处的横截面积为：

$$S_3 = \pi r_2^2 = 3.14 \times 0.2^2 = 0.13 \text{ m}^2 \quad (15)$$

最大冷风风速的体积流量为：

$$L_{1\max} = V_{1\max} S_3 = 3 \times 0.13 \times 3600 = 1404 \text{ m}^3/\text{h} \quad (16)$$

冷却风机功率为：

$$P_4 = L_{1\max} \rho \eta = 1404 \times 3000 \times 0.8 / (1000 \times 3600) = 0.94 \text{ kW} \quad (17)$$

式中： P_4 为冷却端风机功率，kW； S_3 为干燥腔体与冷却风机送风管路连接处的横截面积， m^2 ； r_2 为干燥腔体与冷却风机送风管路连接处的半径，m； $L_{1\max}$ 为最大冷风风速的体积流量， m^3/h ； $V_{1\max}$ 为腔体所需最大冷却风速， m/s ； ρ 为风机入口和出口的压差，Pa； η 为风机效率。

考虑到实际外界消耗，冷却端的冷却风机的功率为 1.2 kW，由江苏泰州圣泰科红外科技有限公司制造。

2.5 控制系统的设计

本设备采用 STK-III 型控制器智能化控制，各参数连续可调，由液晶触摸屏及可编程控制器组成，主要控制界面如图 5 所示。触摸屏是人机操作界面，通过它可以直接设定各加热段的腔体温度、输送带速度等，同时还可实时显示各操作单元参数的设定数据及物料当前含水率、干燥时间等，实现肉干脱水干燥的实时监控。该控制系统（软件著作权授权号：2013SR155184）是基于腔体内温度传感器、质量传感器及滑轮上的动力传感器采集参数，通过 Microsoft visual C# 软件进行编程，并借助可编程控制器（programmable logic controller, PLC）实现人机对话。由图 5 可以看出，中红外-热风组合干燥设备控制系统能够控制进料端、加热段、出料端输送带运

行速度，加热段（A-H）腔体内的温度，以及基于物料质量的变化来预测物料含水率及干燥时间。首先，通过进料端输送带速度来控制进料量；其次，通过加热段每个腔体内的温度及输送带速度来控制物料加热时间；最后，通过出料端输送带速度来控制物料冷却时间。当加热段物料含水率低于或高于预测值时，可通过调节相应输送带的速度进行控制，进而控制干燥物料的含水率，提高产品的均匀性。温度传感器、质量传感器及动力传感器均由圣泰科红外科技有限公司制作。



图 5 中红外-热风组合干燥设备控制系统

Fig.5 Control system of combined mid-infrared and hot air dryer

3 性能试验

3.1 主要仪器与试剂

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）；Q200 差示扫描量热仪（美国 TA 公司）。试验中所用到的磷酸氢二钠和磷酸氢钠均购于国药集团化学试剂有限公司。

3.2 试验方法

试验用样品为低温成熟后的新鲜去皮、骨、肥膘、筋腱、肌膜的草原黄牛后腿的精肉部分（约 25 kg 的肉块），经-26℃冻结，贮藏 14 d 后，于 4℃解冻至中心温度为-2~0℃，然后将其修整切割成 10 cm×2 cm×2 cm 的肉条，单层平铺于输送带上，每排放置 50 根肉条，每米放置 10 排，进行牛肉干干燥试验，至失重 50%左右，达到后续加工要求。基于前期单因素试验及实验室前期研究^[13]，连续式中红外-热风组合干燥设备干燥牛肉干的较优工艺为加热功率 105 kW，加热温度 70℃，热风风速 1 m/s，冷却风速 3 m/s，加热距离 8 cm，在此条件下比较分析连续式中红外-热风组合干燥设备（试验组）与热风干燥设备（对照组）对牛肉干性能效益及品质的影响。

热风干燥设备（对照组）：加热功率 105 kW，加热温度 70℃，热风风速 1 m/s，冷却风速 3 m/s，加热距离 8 cm。

3.3 测定指标

1) 耗时的测定：以输送带上第一排牛肉样品为目标，记录从开始脱水至失重 50%，其在加热段运行的时间。

2) 差示扫描量热法（differential scanning calorimetry, DSC）分析肌肉蛋白的热流。取 2 g 肉样放入液氮中保存，

参考 Deng 等^[16]的方法进行测定。准确称取液氮保存的肉样 10~12 mg, 立即密封于铝盒中, 放入 DSC 仪中进行测定, 样品先于 20℃ 平衡 2 min, 再以 5℃/min 的升温速率从 5℃ 升至 100℃, 每个样品平行测定 3 次。

3) 活化能: 将牛肉样品分别置于 40、50、60、70、80℃ 下进行脱水干燥, 基于阿伦尼乌斯公式绘制水分有效扩散系数与干燥温度的关系, 求出活化能。具体计算公式如下:

肉干的有效水分扩散系数按照公式 (18) 计算^[10]

$$D_{eff} = \frac{-0.032 \ln MR - 0.016}{(t/d^2)} = \frac{-0.032 \ln(Mt/Mo) - 0.016}{(t/d^2)} \quad (18)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; MR 为水分比; Mt 为 t 时刻物料干基含水率, %; Mo 为物料初始干基含水率, %; d 为牛肉干截面正方形的边长, m ; t 为干燥时间, s 。

平均水分扩散率计算公式为^[17]:

$$D_{e,avg} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{e,i}}{n} \quad (19)$$

式中: $D_{e,avg}$ 为平均水分扩散率, m^2/s ; n 为取样次数。

活化能计算公式为^[18]

$$\ln(D_{e,avg}) = -\frac{1}{R(T+273)} E_a + \ln(D_0) \quad (20)$$

式中: E_a 为肉干干燥活化能, kJ/mol ; R 为气体摩尔常数, 其值 $8.314 \times 10^{-3} kJ/(mol \cdot K)$; T 为干燥温度, $^{\circ}C$; D_0 为物料在 273 K 下的水分扩散系数, 为定值, m^2/s 。

4) 剪切力及质地剖析 (texture profile analysis, TPA) 的测定: 参照谢小雷等^[13]的方法。

5) 收缩率: 采用小米置换法^[19], 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:

$$R_s = \frac{V_o - V_t}{V_o} \times 100\% \quad (21)$$

式中: R_s 为收缩率, %; V_o 为干燥前牛肉干的体积, cm^3 ; V_t 为干燥后牛肉干的体积, cm^3 。

6) 色泽的测定: CIE-L* a^* b^* (1976) 法^[20], 用便携式色差仪直接测定牛肉干表面的亮度值 L^* 、红度值 a^* 和黄度值 b^* 值, 并计算色度值 C^* (chroma) 和色调值 H^* (hue)。

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \quad H^* = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (22)$$

7) 肌红蛋白含量的测定: 参照 Krzywicki^[21]的方法。

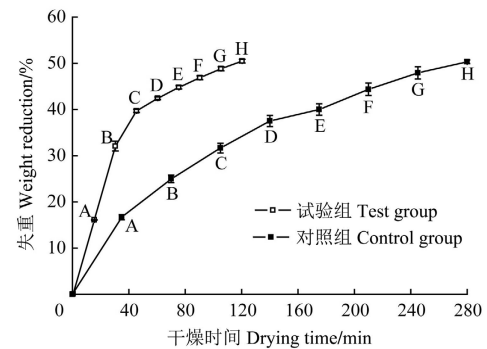
8) 感官评价: 按 Ji-Hun Choi^[22]的方法, 选取 11 个有经验的感官评价员对干燥后牛肉干进行评价打分, 打分标准为: 1=完全不满意, 10=完全满意。

4 结果与分析

4.1 牛肉干干燥耗时的测定

图 6 为输送带上第一排牛肉样品在连续式中红外-热

风组合干燥设备 (试验组) 与热风干燥设备 (对照组) 中的干燥曲线, 从图中可以得出, 与对照组相比, 将第一排原料牛肉脱水至失重 50%, 试验组耗时降低了 57.14%, 其耗时仅为 120 min, 而对照组耗时为 280 min; 同时, 设备正常作业后 (每天运转 10 h 以上), 连续式中红外-热风组合干燥设备每小时能够干燥 120 kg 原料样品, 显著高于 ($P < 0.05$) 热风干燥设备每小时干燥 40 kg 原料样品, 企业生产量提高了 2 倍。由此可以得出, 连续式中红外-热风组合干燥设备能够显著提高 ($P < 0.05$) 牛肉干的脱水效率, 降低干燥耗时, 提高生产效率。



注: A-H 为干燥设备加热段。

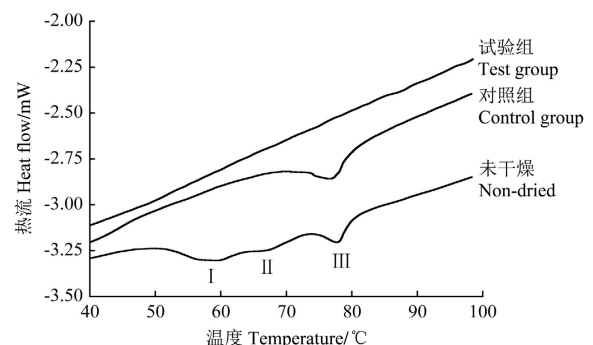
Note: A-H response to heating zones of drying equipment

图 6 干燥曲线

Fig.6 Drying curves

4.2 牛肉干肌肉蛋白质 DSC 的测定

未变性的肌肉蛋白热流分析图谱一般存在 3 个峰, 峰 I 代表肌球蛋白头部变性引起的热流变化, 峰 II 代表肌球蛋白尾部和肌浆蛋白变性引起的热流变化, 峰 III 代表肌动蛋白变性引起的热流变化; 当其中任一峰消失时, 表明对应的蛋白已发生变性^[16]。由图 7 可以得出, 连续式中红外-热风组合干燥设备 (试验组) 得到的牛肉干肌肉蛋白已全部变性, 而热风干燥设备 (对照组) 得到的牛肉干肌动蛋白还未完全变性。这与 Malinowska-Panczyk 等^[23]报道的较高热效应能够使肌肉蛋白发生变性结果一致。



注: I、II、III 分别为肌球蛋白头部、肌球蛋白尾部和肌浆蛋白、肌动蛋白。
Note: I, II, III response to myosin head, myosin tail and sarcoplasm protein, actin, respectively.

图 7 牛肉干的热流分析

Fig.7 Thermal analysis of jerky

Huff-Lonergan 等^[24]报道, 肌肉蛋白的变性能够降低蛋白本身的持水性, 进而加快不易流动水向自由水转变, 增强水分的流动性。由此可以得出, 与热风干燥设备相

比,连续式中红外-热风组合干燥设备能够加快牛肉干肌肉蛋白变性,进而降低蛋白持水性,加快水分迁移,提高干燥效率。同时,试验组牛肉干肌肉蛋白的完全变性,表明肉干在脱水干燥阶段已完全熟化,从而使其具有较好的肉香味。

4.3 牛肉干干燥活化能

活化能是指物料干燥过程中脱去单位摩尔的水分所需要的能量,活化能越大表明物料越难脱去水分^[25]。连续式中红外-热风组合干燥设备(试验组)和热风干燥设备(对照组)干燥牛肉干的水分有效扩散系数与干燥温度的关系。2种干燥设备干燥牛肉干均满足阿伦尼乌斯公式($R^2 > 0.99$),同时,试验组在40、50、60、70及80℃下的平均水分扩散系数分别为1.83、2.92、4.12、5.55及7.64 m²/s,均大于对照组(0.64、1.10、1.59、2.15及3.21 m²/s),表明在不同温度下,试验组的脱水效率均显著高于($P < 0.05$)对照组。另外,试验组和对照组水分有效扩散系数(y_1 、 y_2 , m²/s)与干燥温度(x , °C)的关系为

$$y_1 = -3874.2x + 13.023 \quad R^2 = 0.9963 \quad (23)$$

$$y_2 = -4320.2x + 13.406 \quad R^2 = 0.9933 \quad (24)$$

式中: y_1 为连续式中红外-热风组合干燥设备(试验组); y_2 为热风干燥设备(对照组); R^2 为决定系数。

根据公式(20)计算得出试验组和对照组的干燥活化能分别为32.21 kJ/mol和35.92 kJ/mol,前者与后者相比,牛肉干的干燥活化能降低了10.33%。由此可以得出,连续式中红外-热风组合干燥设备能够降低牛肉干的活化能,使其水分更容易散失,从而提高干燥效率。这可能是由于中红外较强的热效应能够加快牛肉干内部不易流动水向自由水转变^[10,26],从而减少脱水所需的能量,降低活化能,提高脱水效率。

4.4 牛肉干的品质

质构是牛肉干重要的品质指标之一,较好的质构特性能够赋予牛肉干较好的“咬感”,进而增加消费者的满意度,提高经济效益^[22]。连续式中红外-热风组合干燥设备得到的牛肉干内外质地较均匀,且收缩较小,而热风干燥设备得到的牛肉干内外质地差别较大,收缩较大,且表面结痂较严重,其也是阻碍牛肉干内部水分迁移,造成干燥效率较低的主要原因之一。咀嚼性是硬度、弹性及黏聚性的综合表现,其值越大说明肉样口感方面对应的“咬感”就越好^[27]。收缩率的大小直接反映产品总体密度、总体孔隙度、孔隙尺寸和比体积等结构性指标,其值越大,产品品质越差^[28]。从表1中的质构结果可以得出,连续式中红外-热风组合干燥设备得到的牛肉干咀嚼性、嫩度、收缩率分别为44.79 N、143.59 N和45.48%,其均显著优于热风干燥设备(对照组)35.87 N、182.69 N和55.0%。综上所述,与热风干燥设备相比,连续式中红外-热风组合干燥设备能够显著改善($P < 0.05$)牛肉干的质构,使其具有较好的“咬感”。

牛肉干在脱水干燥过程中伴随着肌红蛋白的氧化,导致氧合肌红蛋白转变成高铁肌红蛋白,使肉色由鲜红

色变成黑褐色,色泽变差^[29]。从表1中的色泽结果可以得出,连续式中红外-热风组合干燥设备(试验组)得到的牛肉干 a^* 值、 C^* 值、 H^* 均显著高于($P < 0.05$)热风干燥设备(对照组),同时氧合肌红蛋白含量显著高于($P < 0.05$)热风干燥,而高铁肌红蛋白含量显著低于($P < 0.05$)热风干燥,表明连续式中红外-热风组合干燥设备能够减缓肌红蛋白的氧化,提高氧合肌红蛋白的含量,降低高铁肌红蛋白的含量,从而使牛肉干具有较好的色泽。这可能是由于中红外较高的干燥效率^[30],能够减缓乳酸脱氢酶和高铁肌红蛋白还原酶活性的降低,进而加快L-乳酸与NAD反应产生NADH,促进高铁肌红蛋白被高铁肌红蛋白还原酶还原为氧合肌红蛋白,从而使肉干呈现较好的色泽^[21, 31]。另外,从表1中的感观分析结果还可以得出,与传统热风干燥设备(对照组)相比,连续式中红外-热风组合干燥设备(试验组)得到的牛肉干色泽、质地及总体可接受度均显著较高($P < 0.05$)。综上所述,与传统热风干燥设备相比,连续式中红外-热风组合干燥设备能够显著改善($P < 0.05$)牛肉干的品质,使其具有较好的质构和色泽。

表1 牛肉干的品质
Table 1 Quality of jerky

指标 Index	试验组 Test group	对照组 Control group
质构 Texture		
咀嚼性 Chewiness/N	44.79 ± 5.09a	35.87 ± 7.06b
剪切力 Shear force/N	143.59 ± 3.38b	182.69 ± 9.73a
收缩率 Shrinkage rate/%	45.48 ± 2.60b	55.0 ± 1.50a
色泽 Color		
a^* 值 Redness value	13.38 ± 0.66a	7.34 ± 0.69b
C^* 值 Chroma value	16.85 ± 0.98a	8.80 ± 0.79b
H^* 值 Hue value	37.35 ± 0.76a	33.42 ± 1.06b
氧合肌红蛋白质量分数 Content of Oxy myoglobin/%	28.44 ± 0.09a	16.48 ± 0.21b
高铁肌红蛋白质量分数 Content of Met myoglobin/%	33.24 ± 0.10b	51.19 ± 0.30a
感官评价 Sensory evaluation		
色泽 Colour	8.20 ± 0.71a	6.22 ± 0.44b
风味 Flavour	7.72 ± 0.64a	7.54 ± 0.68a
质地 Tenderness	7.59 ± 0.86a	5.69 ± 0.46b
总体可接受度 Overall acceptability	7.63 ± 0.65a	6.31 ± 0.48b

注:同一行同一指标不同字母表示两种干燥方法差异显著($p < 0.05$)。
Note: Different letters in the same row indicate significant differences between two drying methods ($p < 0.05$).

5 结论

针对企业现行使用的热风干燥设备,干燥效率低,品质较差等问题,本文设计了一种连续式中红外-热风组合(combined mid-infrared with hot air, CMIHA)干燥设备,并进行了生产试验。

1) 该干燥设备是在现有热风干燥设备的基础上改造而成,主要包括进料端、加热段和出料冷却端3个单元,其中每个加热段均由输送系统、加热系统、对流循环系统和控制系统组成。

2) 生产试验表明,在相同条件下(加热功率 105 kW, 加热温度 70℃, 热风风速 1 m/s, 冷却风速 3 m/s, 加热距离 8 cm),与原有热风干燥设备相比,连续式 CMIHA 干燥设备能够加快肌肉蛋白的变性,降低干燥活化能,减少牛肉干脱水所需的能量,进而提高牛肉干脱水效率,降低干燥耗时,提高生产效率,其活化能降低了 10.33%,干燥耗时降低了 57.14%,生产量提高了 2 倍。

3) 与热风干燥设备相比,连续式 CMIHA 干燥设备能够改善 ($P < 0.05$) 牛肉干的品质,其能够减轻 ($P < 0.05$) 牛肉干表面结痂现象,减缓 ($P < 0.05$) 肌红蛋白的氧化,提高 ($P < 0.05$) 氧合肌红蛋白的含量,降低 ($P < 0.05$) 高铁肌红蛋白的含量,使牛肉干呈现较好的质构和色泽,增加 ($P < 0.05$) 其总体可接受度。

综上所述,连续式中红外-热风组合干燥设备能够实现肉干高效率、高品质的干燥,为肉干高效率、高品质干燥设备的研制提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Banout J, Kucerova I, Marek S. Using a double-pass solar dryer for jerky drying[J]. *Energy Procedia*, 2012, 30: 738—744.
- [2] Putranto A, Chen X D, Xiao Z Y, et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(4): 638—645.
- [3] 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.
- [4] Ishihara Y, Moreira R, Souza G D, et al. Study of the warner-bratzler shear force, sensory analysis and sarcomere length as indicators of the tenderness of sun-dried beef. *Molecules*, 2013, 18(8): 9432—9440.
- [5] Trujillo F J, Wiangkaew C, Pham Q T. Drying modeling and water diffusivity in beef jerky[J]. *Journal of Food engineering*, 2007, 78(1): 74—85.
- [6] Krishnamurthy K, Khurana H 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.
- [7] 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.
- [8] Pekke M A, Pan Z L, Atungulu G G, et al. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, 6(3): 58—70.
- [9] Pathare P B, Sharma G P. Effective moisture diffusivities of onion slices undergoing infrared convective drying[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(3): 285—291.
- [10] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 牛肉干中红外-热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 322—330.
Xie Xiaolei, Li Xia, Zhang Chunhui, et al. Moisture mobility mechanism of beef jerky during combined mid-infrared and hot air drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(14): 322—330. (in Chinese with English abstract)
- [11] Clemente G, Bon J, Sanjuán N, et al. Drying modelling of defrosted pork meat under forced convection conditions[J]. *Meat Science*, 2011, 88(3): 374—378.
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 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[J]. Beijing: Engineering College of China Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [15] Khir R, Pan Z L, Salim A, et al. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 1126—1132.
- [16] Deng Y, Rosenvold K, Karlsson A H, et al. Relationship between thermal denaturation of porcine muscle proteins and water-holding capacity[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(5): 1642—1648.
- [17] Singh B, Gupta A K. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(2): 459—470.
- [18] Shi J, Pan Z L, Mchugh T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(10): 1962—1972.
- [19] 张国琛, 毛志怀, 牟晨晓, 等. 微波真空干燥扇贝柱的物理和感观特性研究[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 Agriculture Engineering*, 2004, 20(3): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [20] Honikel K O. Reference methods for the assessment of physical characteristic of meat[J]. *Meat Science*, 1998, 49(4): 447—457.
- [21] Krzywicke K. The determination of haem pigments in meat[J]. *Meat Science*, 1982, 7(1): 29—36.
- [22] 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.
- [23] Malinowska-Panczyk E, Walecka M, Pawlowicz R, et al. The effect of high pressure at subzero temperature on proteins solubility, drip loss and texture of fish (cod and salmon) and mammal's (pork and beef) meat[J]. *Food Science and Technology International*, 2014, 20(5): 383—395.
- [24] Hernández-Herrero M M, Duflos G, Malle P, et al. Collagenase activity and protein hydrolysis as related to spoilage of iced cod (*Gadus morhua*)[J]. *Food Research International*, 2003, 36(2): 141—147.
- [25] Trujillo F J, Wiangkaew C, Pham Q T. Drying modeling and water diffusivity in beef jerky[J]. *Journal of Food engineering*, 2007, 78(1): 74—85.
- [26] Traffano-Schiffo M V, Castro-Giráldez M, Fito P J, et al. Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography[J]. *Journal of Food engineering*, 2014, 128(5): 103—110.
- [27] 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 Agriculture Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(2): 250–254. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Agriculture Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 221–227. (in Chinese with English abstract)
- [29] Renner M. Review: Factors involved in the discoloration of beef meat[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1990, 25(6): 613–630.
- [30] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 不同干燥方式对牛肉干物性特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 346–354.
Xie Xiaolei, Li Xia, Zhang Chunhui, et al. Effects of different drying methods on physical characteristics of beef jerky[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 346–354. (in Chinese with English abstract)
- [31] Xiong Y L. Protein and Implication for Muscle Food Quality[M]. New York: John Wiley and Sons Incorporation, 2000: 85–111.

Development and test of continuous combined mid-infrared with hot air drying equipment

Xie Xiaolei¹, Zhang Chunhui^{1*}, Jia Wei¹, Li Xia¹, Wang Zhaojin², Mu Guofeng³

(1. Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 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 efficiency was always considered to be the most important factor by factories, however, low thermal conductivity and case hardening of the material slowed the moisture migration in hot air drying, and resulted in more time and energy consumption. So to solve the existing problems of present drying equipment, a continuous drying equipment of combined mid-infrared and hot air (CMIHA) was developed in this paper. This drying equipment included feed section, heating sections and cooling section, of which each heating section was made up of four parts, i.e. conveying system, heating system, convective circulation system and control system. As we all know, since infrared energy is converted into heat only when material absorbs the radiation, it was essential to select a heat source emitting radiation with the range in which the material to be processed had maximum absorption. So, the radiation wavelength of infrared was selected by the infrared spectra of meats, and the radiation intensity could be controlled by changing the amount of working lamps to make good use of the radiation energy. At the same time, this equipment was developed by calculating the main technological parameters of convection system, cooling system and heating system, and then the production verification test was also done to compare the difference between CMIHA drying and hot air drying on beef jerky. Results showed that, in the same conditions (heating power 105 kW, heating temperature 70°C, wind velocity 1 m/s, cooling wind velocity 3 m/s, heating distance 8 cm), compared with hot air drying, the continuous CMIHA drying equipment could speed up muscle protein denaturation, reduce activation energy, reduce the energy that jerky needed to accelerate moisture migration, and improve drying efficiency. The time consumption that the beef samples in the first row on the conveyor dehydrated from raw to weight reduction by 50% for CMIHA drying equipment was 120 min, and the production efficiency was 120 kg/h, if the working time of equipment was more than 10 h every day. However, the time consumption and production efficiency of hot air drying equipment were 280 min and 40 kg/h, respectively. Besides, compared with hot air drying equipment, CMIHA drying equipment could reduce the case hardening of jerky, significantly decrease ($P<0.05$) the value of shear force and shrinkage rate, and increase ($P<0.05$) the values of chewiness of jerky, and the chewiness, shear force and shrinkage rate were 44.79 N, 143.59 N and 45.48%, respectively, but those of hot air drying were 35.87 N, 182.69 N and 55.0%, respectively. As we all know, different kinds of myoglobin can make meat have different colors, of which myoglobin is kermesinus, oxymyoglobin is bright red and metmyoglobin is taupe brown. Compared with hot air drying equipment, CMIHA drying equipment could increase the content of oxymyoglobin, and reduce the content of metmyoglobin, which made jerky have better color. The values of a^* (redness value), C^* (chroma value) and H^* (hue value) of jerky dried with CMIHA were significantly higher ($P<0.05$) than hot air. Besides, the sensory evaluation of jerky dried with CMIHA drying had higher scores than hot air drying. This study can provide valuable information for designing and developing this new continuous combined mid-infrared and hot air drying equipment that can be used for solving the problems that low drying efficiency and poor quality of jerky.

Key words: agricultural machinery; drying; meats; mid-infrared; drying efficiency; quality; activation energy