

远红外辅助热泵干燥装置性能试验*

宋小勇^{1,2} 常志娟³ 苏树强¹ 邓云¹

(1. 上海交通大学陆伯勋食品安全研究中心, 上海 200240; 2. 华北水利水电学院电力学院, 郑州 450011;

3. 郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 郑州 450002)

【摘要】 以湿毛巾为研究对象,在自行研制的远红外辅助热泵干燥装置上进行了干燥系统的性能测试。比较了热泵(HP)干燥和加热功率为500、1 000和2 000 W的远红外(FIR)辅助热泵干燥条件下,干燥室进、出口空气温度和相对湿度,以及干燥对象不同部位的温度在干燥过程中的变化情况。与单一热泵干燥相比,不同功率远红外辅助热泵干燥的除湿能力提高8.1%~22.2%。结果表明远红外辅助热泵干燥可以有效缩短干燥时间,提高干燥效率。

关键词: 远红外 热泵干燥 性能试验

中图分类号: S375; TQ028.6⁺76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0136-06

Performances of Far-infrared-assisted Heat Pump Dryer

Song Xiaoyong^{1,2} Chang Zhijuan³ Su Shuqiang¹ Deng Yun¹

(1. SJTU-Bor Luh Food Safety Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Institute of Electric Power, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China

3. School of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract

Taking wet towels as the research object, a far-infrared-assisted heat pump dryer was designed and manufactured. Wet towels were dried by using a heat pump (HP) dryer combined with far-infrared radiation (FIR) with the power of 500, 1 000 and 2 000 W. Changes of drying chamber inlet air temperature, outlet air temperature, inlet air humidity, outlet air humidity, inlet sample temperature, middle sample temperature and outlet sample temperature were all studied. The experiments were conducted under pump drying and far-infrared-assisted drying with different powers. The results showed that compared with the pump drying treatment, the dehumidification capacity was improved effectively, with values of 8.1% to 22.2%. The present data suggested that far-infrared-assisted heat pump drying could shorten the drying time, improve the drying efficiency.

Key words Far infrared, Heat pump drying, Performance test

引言

热泵干燥虽然具有能耗低、干燥温度低、干燥条件可调节范围宽、操作过程易于控制、产品质量高、环境友好等诸多优点^[1-5],并已广泛应用于木材^[6]、果蔬^[7-10]、水产品^[11-15]、谷物^[16]等热敏性物料的干

燥。但在热泵干燥中后期,空气与干燥物料之间的传质系数变小,去除这些水分需要较长的干燥时间和较多的能量消耗,干燥室进出口空气状态变化很小,影响了蒸发器降温除湿能力,热泵系统运行工况变差^[17-18]。而且,为了维持干燥温度的稳定,输入系统的电能大部分以热能的形式排出,除湿效率很

收稿日期: 2011-07-27 修回日期: 2011-09-05

*上海市自然科学基金资助项目(30771504)、上海市浦江人才计划资助项目(090628)和丰益优秀青年教师基金资助项目

作者简介: 宋小勇,博士后,华北水利水电学院讲师,主要从事食品冷链研究,E-mail: songxiaoyong@ncwu.edu.cn

通讯作者: 邓云,副教授,主要从事食品加工与营养研究,E-mail: y_deng@sjtu.edu.cn

低。远红外辐射技术实现了辐射源光谱与被加热物体吸收光谱的对应,使产品内外受热均匀,且不需加热介质,可以在缩短干燥时间的同时有效提高能量利用率和产品的质量^[19-21]。

本文针对单一热泵干燥和不同远红外加热功率辅助热泵干燥条件下,干燥室进、出口空气温度和相对湿度,以及干燥对象不同部位的温度在干燥过程中的变化情况进行研究,以期为进一步完善远红外辅助热泵干燥装置的设计提供科学的理论依据。

1 材料、试验装置与方法

1.1 材料

选取未经使用的纯棉毛巾,试验前用水充分浸泡,挤干至不滴水。

1.2 试验装置

图1为试验装置原理图。整个装置主要由热泵、远红外系统和干燥系统等组成。热泵是由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器等组成的循环系统。热泵压缩机组为2.4 kW标准制冷压缩机组,运行工质为R22。热泵系统工作时,热泵压缩机做功并利用蒸发器回收低品位热能,在冷凝器中则使之升高为高品位热能。热泵工质在蒸发器内吸收干燥室排出的热空气中的部分余热蒸发变成蒸气,经压缩机压缩后,进入冷凝器中冷凝,并将热量传给空气。由冷凝器出来的热空气再进入干燥室(200 cm × 45 cm × 45 cm),对湿物料进行干燥。出干燥室的湿空气经蒸发器将部分显热和潜热传给工质,达到回收余热的目的;同时,湿空气的湿度降至露点析出冷凝水,除去湿空气中的水分。远红外辐射加热管(RC138干烧型,上海瑞岑电器有限公司)直径10 mm,每根长度150 mm、功率500 W,4根加热管均匀布置在箱体内部上方和下方,加热管与箱体上表面距离为12 mm,管距为140 mm。电压220 V,频率50 Hz,通过调节控制面板旋钮调节电压,从而达到调节辐射功率的目的,最高温度为200℃。本试验采用热泵和远红外加热同时开启,二者间歇性交替工作的模式。干燥室箱体上开有测量孔,用于安装温度、风速和湿度传感器。LabView数据采集系统与一个16位8通道ADAM-4018型数据采集模块相连接。由温控仪表对箱体内温度以及远红外加热管表面温度进行控制,精确控温。

1.3 测试系统

干燥室的入口和出口处,以及物料在干燥室进口、出口和中间部位分别布置经过标定的T型铜康铜热电偶,精度为0.01℃。另外,干燥室的入口和出口处的湿度和风速分别采用HMP110型湿度变送

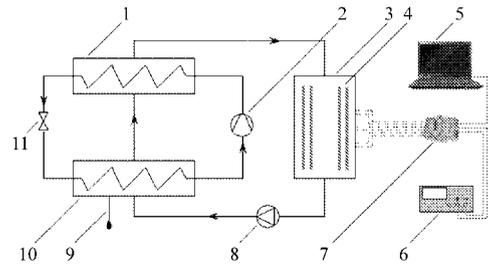


图1 试验装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

1. 冷凝器 2. 压缩机 3. 干燥室 4. 远红外加热器 5. 计算机
6. 直流稳压电源 7. 数据采集模块 8. 循环风机 9. 排水口
10. 蒸发器 11. 节流阀

器和KIMO-CTV100型热线风速测量仪进行测量。

用除水率(specific moisture extraction rates,简称SMER)表征试验装置的干燥能力,计算公式为^[3]

$$a = 3.6b/c$$

式中 a ——干燥装置除水率,kg/(kW·h)
 b ——干燥装置单位时间除水量,g/s
 c ——干燥装置消耗总功率,kW

1.4 方法

两条预湿后的毛巾层叠在一起,平行铺展于干燥室的搁物架上,保证上、下两层毛巾接触良好。然后分别在单一热泵(HP)、热泵+500 W远红外辐射(HP+5FIR)、热泵+1 000 W远红外辐射(HP+10FIR)、热泵+2 000 W远红外辐射(HP+20FIR)的条件下进行干燥。

每次试验,分别把热电偶布置在干燥室进口、出口和中间位置的两层毛巾之间,另外在HP+5FIR、HP+10FIR、HP+20FIR处理中,用热电偶检测远红外加热管表面的温度。通过控制面板把干燥温度维持在45℃左右,干燥时间2 h。每组试验重复3次。

2 结果与讨论

2.1 温度变化

图2为HP处理试验过程中干燥室进、出口处空气温度,以及湿毛巾不同部位平均温度的变化曲线。由图可见,试验开始时刻上述各温度基本相等。热泵装置开始工作后的1 000 s内,由于冷凝器对空气的加热作用,干燥室进口处空气温度快速升高,同时样品温度也随着干燥室空气温度的升高而升高。而当干燥室空气温度达到预设值(约45℃)时,在温控系统的作用下,干燥室进口处空气温度保持在一个相对稳定的范围内。在单一热泵条件下,干燥室及试验对象不同部位温度由高到低依次为:进口风、出口风、进口样品、出口样品、中间样品。

HP+5FIR处理干燥室进出口处空气、样品不

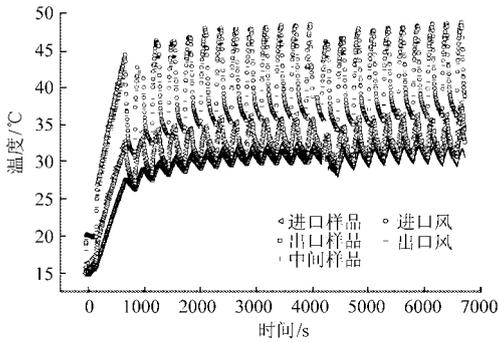


图2 HP处理不同部位温度变化曲线

Fig.2 Temperature changes of HP treatment

同部位平均温度的变化曲线见图3。因红外加热本身具有升温快的特点,所以在试验开始后的1000s,远红外加热管温度急剧上升,由初始的19.54℃升高至171.43℃。而在相同的时间内,虽然进口风、出口风、进口样品、出口样品、中间样品的温度也上升较快,但升温速率低于远红外,分别升高了35.18、38.32、21.48、18.77、19.94℃。

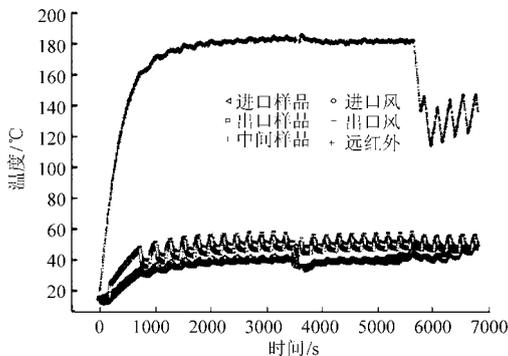


图3 HP + 5FIR处理不同部位温度变化曲线

Fig.3 Temperature changes of HP + 5FIR treatment

图4为HP + 10FIR处理干燥室进出口空气以及毛巾各部位平均温度的变化情况。在试验最初的1000s,远红外加热管温度由初始的19.68℃快速升至186.02℃。而进口风、出口风、进口样品、出口样品、中间样品的温度在相同的时间内,仅分别升高了26.86、35.05、21.96、23.26、22.98℃。

比较图2~5发现,不同处理之间有相似之处:干燥室进口处样品、中间样品和出口处样品的温度波动范围较小,而干燥室进、出口处空气的温度波动相对较大。符合最初的设计目的,通过温控系统的调节作用,使样品维持在相对稳定的干燥温度,保证产品质量。

由图2~5可以看出,对无远红外辅助加热的HP处理,干燥室内及试验对象不同部位温度由高到低依次为:进口风、出口风、进口样品、出口样品、中间样品。而对HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR处理,对应部位的温度由高到低依次为:出口风、进口风、进口样品、出口样品、中间样品。可以发现,主

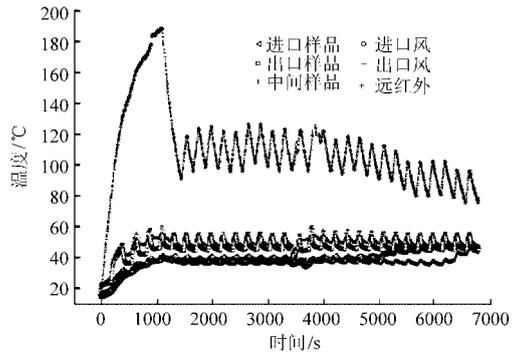


图4 HP + 10FIR处理不同部位温度变化曲线

Fig.4 Temperature changes of HP + 10FIR treatment

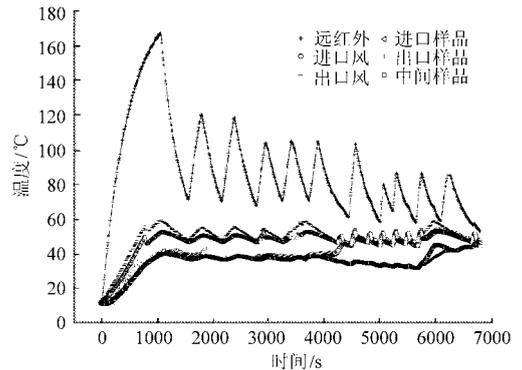


图5 HP + 20FIR处理不同部位温度变化曲线

Fig.5 Temperature changes of HP + 20FIR treatment

要区别在于进、出口空气的温度高低在有远红外辅助加热两种情况下完全相反。对单独的热泵干燥处理,进、出口空气的温度变化与张忠进等^[3]的研究结果类似,即由于干燥室的干燥空气需要对湿物料加热,使物料内部水分发生迁移并气化,同时吸收来自湿物料的水分,因此从干燥室进口到出口,空气的相对湿度逐渐降低,即干燥室出口处空气的温度始终低于进口处的温度。而在HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR处理中,远红外辅助加热使干燥室的温度尽可能维持在预设温度,借助于加热速率较快的特点,在循环风机作用下,导致出口处空气的温度高于进口处空气。由图2~5可知,在干燥过程中,物料的平均温度始终小于干燥室内的空气温度,但在干燥过程末期,二者之间的差异逐渐减小。

比较图3~5发现,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR处理过程中,远红外加热管的温度曲线有一定差异。其中HP + 5FIR在试验开始初期(1000s左右)迅速上升至最高温度171.43℃之后,并在大部分时间内维持这个温度,仅在试验末期出现短时间的下降。而HP + 10FIR和HP + 20FIR处理的红外加热温度曲线有相同之处,在1000s时上升至最高温度188.79℃和166.9℃,紧接着就开始下降并在大部分时间内维持在较低的温度值。在整个干燥过程中,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR

处理的红外加热平均温度分别为 166.3、109.8 和 87.28℃。

2.2 干燥室湿度变化

图 6~9 为试验过程中干燥室内进、出口处空气平均相对湿度变化曲线。可以看出,试验开始时刻干燥室进、出口处的空气湿度基本相等。而当热泵装置开始工作后,干燥室空气温度的快速升高导致材料表面自由水快速蒸发,因此在极短的时间内,干燥室内空气的相对湿度急剧升高。而且与 HP 处理相比,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理因远红外加热升温速度快,干燥室的相对湿度在试验开始阶段均高于 HP 处理,且随着加热功率的增加,相对湿度值亦升高。

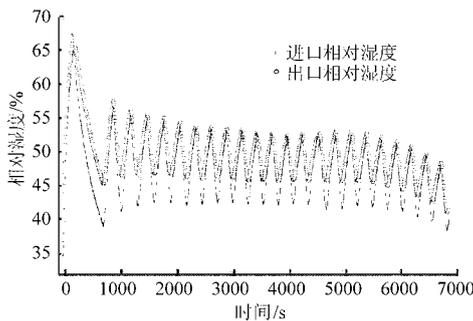


图 6 HP 处理干燥室进出口相对湿度变化曲线
Fig. 6 Relative humidity curves of drying chamber inlet and outlet of HP treatment

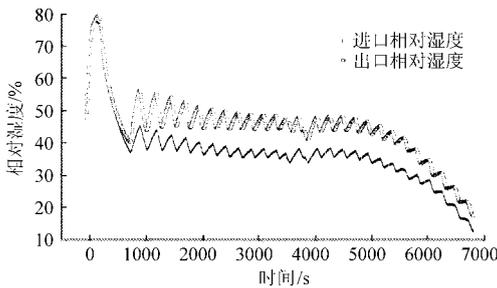


图 7 HP + 5FIR 处理干燥室进出口相对湿度变化曲线
Fig. 7 Relative humidity curves of drying chamber inlet and outlet of HP + 5FIR treatment

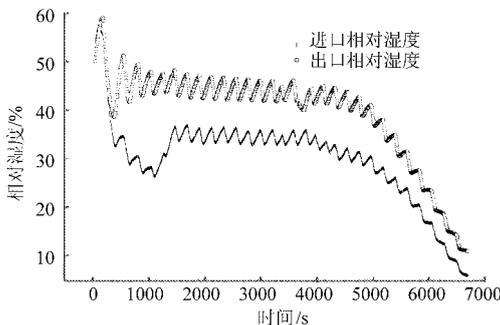


图 8 HP + 10FIR 处理干燥室进出口相对湿度变化曲线
Fig. 8 Relative humidity curves of drying chamber inlet and outlet of HP + 10FIR treatment

HP 处理,干燥室进、出口空气相对湿度经历快

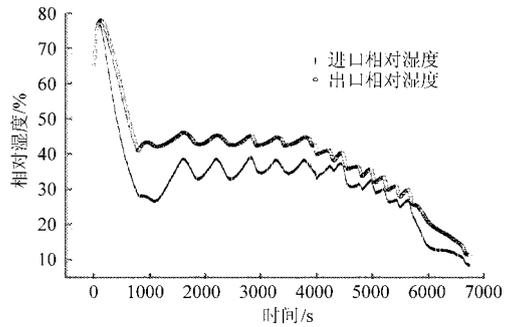


图 9 HP + 20FIR 处理干燥室进出口相对湿度变化曲线
Fig. 9 Relative humidity curves of drying chamber inlet and outlet of HP + 20FIR treatment

速升高、快速下降和缓慢下降 3 个阶段,而另外 3 种处理则表现为快速升高、快速下降、缓慢下降和快速下降 4 个阶段。最主要的差异在 4 000 s 之后,也就是在干燥后期,此阶段主要的去除对象是占总除湿量比例很小的结合水,然而由于被干燥的物料表面皱缩、结壳,干湿界面逐渐向内部退缩,使得空气与干燥物料之间的传质系数变小,去除这些水分需要很长的干燥时间和消耗较多的能量。并且由于空气与干燥物料之间的传质系数小,使得干燥室进、出口空气状态变化很小,影响了蒸发器降温除湿能力,蒸发器吸收水分的显热和潜热有限,热泵系统运行工况变差,除湿效率很低。而对于 HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理,远红外辐射技术基于光谱匹配共振吸收的原理,样品内外受热均匀,升温迅速,即使在干燥后期,依然具有较强的除湿能力。

比较图 6~9 发现,4 种处理干燥室进出口空气的相对湿度总体表现为出口大于进口,这与张忠进等^[3]的研究结果一致。依据热泵干燥的工作原理,经过蒸发器的除湿作用,循环空气的水分部分析出,进入干燥室的空气的相对湿度较低。干燥空气继而在干燥室内吸收物料中的水分,导致出口处空气的相对湿度始终高于进口处空气。需要指出的是,随着干燥过程的进行,毛巾中水分减少,水分蒸发速度减慢,干燥室进、出口空气相对湿度差逐渐减小。另外还发现,与 HP 处理相比,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理干燥室出口处空气的相对湿度明显高于进口处空气湿度。原因可能是在远红外作用下,物料单位时间内水分的蒸发量较大。

2.3 除水率变化

表 1 为不同处理条件下,干燥装置除水率的变化情况。可以看出,对任一处理,随着干燥过程的进行,除水率呈现递减的趋势。由上文分析可知,不同处理条件下干燥室空气相对湿度总体表现为下降(图 6~9),而热泵干燥装置的除水率与干燥室内部

空气的相对湿度显著相关^[3]。另外,与单独热泵干燥相比,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理的除水率有显著性差异($P < 0.05$),说明远红外辅助热泵干燥有效提高了干燥效率。此外发现,在本试验条件下,HP + 10FIR 和 HP + 20FIR 两处理的除水率差异性不显著($P > 0.05$),这就要求在设计远红外辅助热泵干燥系统时,要综合考虑效益、成本等因素,为实际生产提供有价值的参考数据。

表 1 不同处理下的除水率

Tab. 1 Effects of different treatments on SMER

处理	kg/(kW·h)	
	处理时间/h	
	1	1.9
HP	3.78 ± 0.100 ^a	4.33 ± 0.104 ^a
HP + 5FIR	5.36 ± 0.118 ^b	4.68 ± 0.109 ^b
HP + 10FIR	6.22 ± 0.120 ^c	5.01 ± 0.121 ^c
HP + 20FIR	6.43 ± 0.131 ^c	5.29 ± 0.128 ^c

注:每列不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

3 结束语

对单一热泵干燥和远红外辅助热泵干燥,在整个干燥过程中,前者干燥室出口空气温度小于进口空气温度,而后者则恰恰相反。HP + 5FIR 处理的远红外加热管在大部分干燥时间内均维持在较高的温度,而 HP + 10FIR 和 HP + 20FIR 两处理则维持在较低的温度。

与 HP 处理相比,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理因远红外加热升温速度快,干燥室的相对湿度在试验开始初期均高于 HP 处理,并与远红外加热功率呈正相关;在远红外作用下,HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理干燥室出口处的空气湿度明显高于进口处空气相对湿度,而 HP 处理二者之间的差异相对较小,远红外辅助热泵干燥在干燥后期依然出现湿度快速下降的现象,表明远红外辅助热泵干燥具有更强的除湿能力;HP + 5FIR、HP + 10FIR、HP + 20FIR 处理的除水率有显著提高。

参 考 文 献

- Castell-Palouá, Simal S. Heat pump drying kinetics of a pressed type cheese[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(2): 489 ~ 494.
- Chua K J, Chou S K, Ho J C, et al. Heat pump drying: recent developments and future trends[J]. Drying Technology, 2002, 20(8): 1 579 ~ 1 610.
- 张忠进, 玄哲浩, 王国华. 热泵干燥装置的性能试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 140 ~ 143.
Zhang Zhongjin, Xuan Zhehao, Wang Guohua. Experimental study on performances of heat pump dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37 (8): 140 ~ 143. (in Chinese)
- Pal U S, Khan M K. Heat pump drying of food materials: a critical review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 44(2): 119 ~ 124.
- 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 热泵干燥系统性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 94 ~ 98.
Zhang Xukun, Li Huadong, Xu Gang, et al. Experimental study on the performance of heat pump drying system [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 94 ~ 98. (in Chinese)
- Fatouh M, Metwally M N, Helali A B, et al. Herbs drying using a heat pump dryer [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15 ~ 16): 2 629 ~ 2 643.
- Chua K J, Chou S K, Ho J C, et al. Heat pump drying: recent developments and future trends [J]. Dry Technology, 2002, 20(8): 1 579 ~ 1 610.
- Hawladar M N A, Perera C O, Tian M. Properties of modified atmosphere heat pump dried foods [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(3): 392 ~ 401.
- Queiroz R, Gabas A L, Telis V R N. Drying kinetics of tomato by using electric resistance and heat pump dryers [J]. Dry Technology, 2004, 22(7): 1 603 ~ 1 620.
- Teeboonma U, Tiansuan J, Soponronnarit S. Optimization of heat pump fruit dryers [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(4): 369 ~ 377.
- 石启龙, 薛长湖, 赵亚, 等. 热泵变温干燥对竹荚鱼干燥特性及色泽的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 83 ~ 86.
Shi Qilong, Xue Changhu, Zhao Ya, et al. Effect of time-varying temperature drying on drying characteristics and color of horse mackerel dried by heat pump dehumidifier [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 83 ~ 86. (in Chinese)
- Shi Q L, Xue C H, Zhao Y, et al. Drying characteristics of horse mackerel (Trachurus Japonicus) dried in a heat pump dehumidifier [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 12 ~ 20.

- 13 Shi Q L, Xue C H, Zhao Y, et al. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus Japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(1):74 ~ 81.
- 14 石启龙, 赵亚, 李兆杰, 等. 热泵干燥过程中竹荚鱼水分迁移特性[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(2): 122 ~ 126.
Shi Qilong, Zhao Ya, Li Zhaojie, et al. Characteristics of moisture migration during drying of horse mackerel by heat pump dehumidifier[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(2): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 15 石启龙, 赵亚, 李兆杰, 等. 竹荚鱼热泵干燥数学模型研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5): 110 ~ 114.
Shi Qilong, Zhao Ya, Li Zhaojie, et al. Mathematical modeling on heat pump drying of horse mackere[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(5): 110 ~ 114. (in Chinese)
- 16 Prasertsan S, Saen-saby P. Heat pump drying of agricultural materials[J]. *Dry Technology*, 1998, 16(1 ~ 2): 235 ~ 250.
- 17 Pal U S, Khan M K. Performance evaluation of heat pump dryer [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47(2): 230 ~ 234.
- 18 Ceylan I, Aktas M, Dogan H. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(1): 216 ~ 222.
- 19 林喜娜, 王相友, 丁莹. 双孢蘑菇远红外干燥神经网络预测模型建立[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5): 110 ~ 114.
Lin Xi'na, Wang Xiangyou, Ding Ying. Experiment on neural network prediction modeling of far infrared radiation drying for *Agaricus bisporu*[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5): 110 ~ 114. (in Chinese)
- 20 王相友, 曹瑞兵, 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): 183 ~ 188.
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuanzhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7): 183 ~ 188. (in Chinese)
- 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 Xi'na. 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)