

李志国,罗会龙,刘兆宇,等. 双压缩机密闭式热泵烤烟系统性能研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):182-186.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.032

双压缩机密闭式热泵烤烟系统性能研究

李志国, 罗会龙, 刘兆宇, 孙茹男, 惠 宽

(昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500)

摘要:为研究空气源热泵烟叶烘烤的系统特征,并为工程实际应用提供有意义的参考,本研究测试了 1 种具加热及除湿功能的密闭式热泵烤烟系统双压缩机的运行特征,并基于 Solkane 软件对系统进行了热力性能分析。分析结果表明,整个烟叶烘烤过程,热泵加热子系统和除湿子系统的平均性能系数分别为 2.99 和 3.08,综合系统平均性能系数为 3.68,综合系统瞬时性能系数最大值为 4.19;整个过程的除湿能耗比为 2.41 kg/(kW·h)。此外,对比该系统与生物质颗粒烤房的烘烤成本发现,烘烤得到 1 kg 干烟叶,该系统较生物质颗粒烤房节约成本 54.70%。

关键词:密闭式热泵;烟叶烘烤;性能系数

中图分类号:TS43

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2021)03-0182-05

烟叶烘烤是一个大量耗能的过程^[1-2],若使用燃煤做主要燃料,烤干 1 kg 烟叶通常需要 1.5 ~ 2.5 kg 标准煤^[3]。但煤炭的燃烧排放是大气污染的主要污染源之一^[4],且燃煤具有燃烧不稳定,热能利用率低等多种问题。发展与利用清洁能源进行烟叶烘烤将是今后烟叶密集烘烤的发展趋势^[5]。赵新帅等将生物质颗粒燃料替代煤炭在烟叶烘烤中做了一定应用研究,但生物质颗粒燃烧依然会排放环境污染物^[6-7]。1950 年热泵干燥技术以其节

能优势在美国获取专利后便在工业领域获得了迅速发展应用^[8-10]。宫长荣等 2003 年开展热泵烟叶烘烤研究,研究结果表明,热泵自控烘烤设备利用热泵加热和冷凝除湿,充分利用热能,提高了热能利用率,提高了烤后烟叶质量,具有显著的环境效益和社会效益^[11]。贺智谋等研究表明,空气源热泵烤房烤后烟叶外观质量优于传统密集烤房,且上等烟率也有所提高^[12-13]。孙晓军等根据热泵原理进行了热泵型烟叶烤房的设计探究及实例运行,研究结果表明,热泵烤房可有效提高烟叶烘烤质量,明显降低烘烤成本^[14]。彭宇等使用热泵并利用太阳能作为辅助热源,探究了热泵型太阳能密集烤房的节能效果,热泵型太阳能密集烤房比热泵烤房节省能耗成本 32.86%^[15]。Bryan 等使用热泵作为供热除湿设备对烟叶进行烘烤除湿,发现使用热泵之后的烤房较普通对照烤房烤后烟叶质量得到提高,烘

收稿日期:2020-06-28

基金项目:国家自然科学基金(编号:51766005);云南省烟草专卖局科技项目(2019S30000241019)。

作者简介:李志国(1995—),男,云南宣威人,硕士,主要从事热泵烘烤及建筑节能研究。E-mail:1610338683@qq.com。

通信作者:罗会龙,博士,教授,主要从事太阳能利用及暖通空调研究。E-mail:huilongkm@126.com。

表技术与传感器,2017(3):118-120,126.

[2]姚达雯,周国平,王鑫鑫,等. 基于 WSNs-SMS 的低功耗水质检测系统设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(11):109-112.

[3]孙 卓. 基于 WSN 和 ZigBee 的水质监测系统设计[J]. 电子设计工程,2017,25(24):96-100.

[4]蔡向科,高振斌,范书瑞. 一种低功耗水产养殖水质监测系统设计方案[J]. 渔业现代化,2018,45(4):47-50.

[5]谢宁俊,侍孝一,杨 洁,等. 基于 nRF24L01 模块的中继协作通信系统设计与实现[J]. 现代电子技术,2015,38(21):67-71.

[6]龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输[J]. 电子世界,2016(10):115.

[7]Mohamed A, Axel S. Free space range measurements with Semtech LoRa™ technology[C]// 2nd international symposium on wireless

systems within the conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems. Offenburg:IEEE,2014:19-23.

[8]徐冬冬. LoRa 与 NB-IoT 技术开启物联网新格局[J]. 科学技术创新,2017(24):116-117.

[9]Augustin A, Yi J Z, Clausen T, et al. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things[J]. Sensors, 2016, 16(9):1466.

[10]赵 静,苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016,40(21):50-57.

[11]Petajajarvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, et al. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3):1-16.

烤成本也得到降低^[16]。

迄今为止,涉及密闭式热泵烤烟系统性能的研究较少。本试验研究了双压缩机密闭式热泵烤房的系统性能,同时对比其与生物质颗粒烤房烘烤成本。

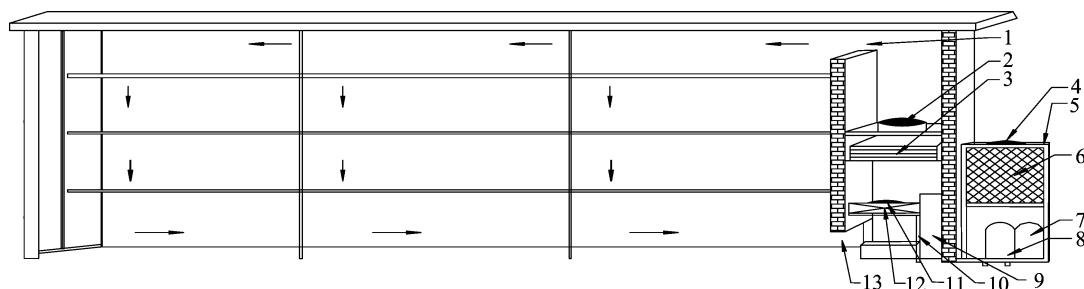
1 试验装置与方法

1.1 试验装置

双压缩机密闭式热泵烤烟系统主要由压缩机(2台)、冷凝器、室内蒸发器、室外换热器、膨胀阀、风机和装烟室等组成,系统装置见图1。

系统在冷凝器的前端安装有功率为 1.6 kW 的轴流风机 1 台,在室内蒸发器上端装有 0.3 kW 除湿内风机 1 台,室外换热器为顶出风结构,外风机功率为 0.4 kW。

此系统可实现热泵加热和除湿 2 种功能。系统原理见图 2,热泵加热子系统由冷凝器(3)、室外换热器(6)、加热压缩机(7)、外风机(4)、内循环风机(2)组成。热泵除湿子系统由冷凝器(3)、室内蒸发器(12)、除湿压缩机(8)、除湿内风机(11)、冷凝水通道(10)组成。



1—进风口; 2—内循环风机; 3—冷凝器; 4—外风机; 5—室外设备框架; 6—室外换热器; 7—加热压缩机(1#); 8—除湿压缩机(2#); 9—温湿气流通道; 10—冷凝水通道; 11—除湿内风机; 12—室内蒸发器; 13—回风口

图1 试验装置

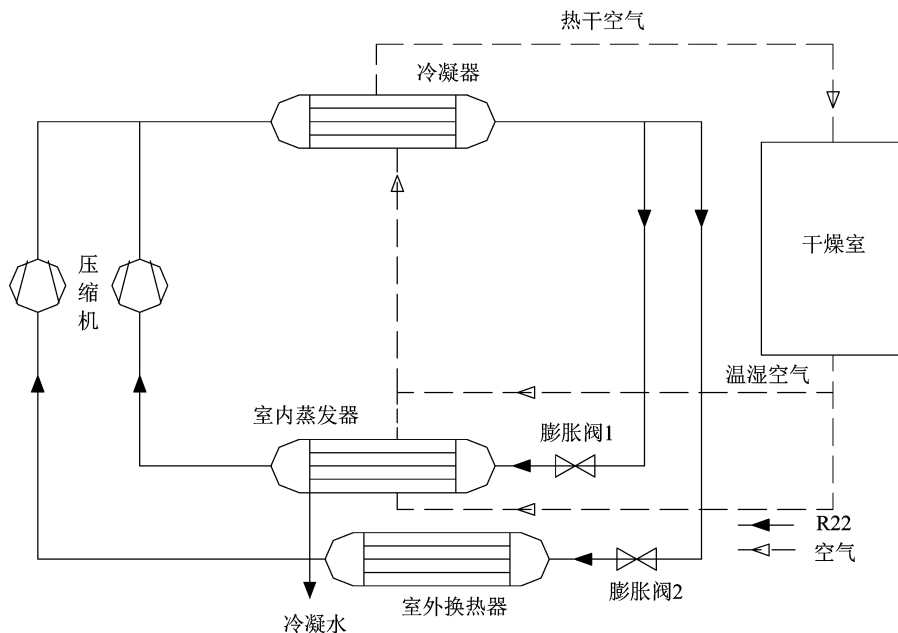


图2 双压缩机密闭式热泵系统原理

热泵加热:根据热力学第二定律^[17],通过加热压缩机(7)消耗电能做功,将室外换热器(6)内的制冷剂液体蒸发以吸收环境空气中的热量。制冷剂经压缩机(7)做功后变为高温高压蒸汽后进入冷凝器(3)冷凝放出大量热量,热量被内循环风机(2)从加热室经进风口(1)送入装烟室对烟叶进行烘烤。此后制冷剂经膨胀阀又被送至室外换热器蒸发,依

此循环往复。

热泵除湿:经回风口(13)流出的气流部分或全部经过室内蒸发器(6)与制冷剂进行热交换,将温湿气流温度降低至露点温度,水蒸气冷凝排出,降低其水蒸气分压力。被除湿后的气流由除湿内风机(11)牵引进入加热室,经冷凝器(3)加热后送入装烟室烘烤烟叶。

1.2 试验材料

烟叶烘烤品种为红花大金元。供试烟叶按照同一部位、同一时间、成熟度一致的原则,选取中部叶为供试材料。双压缩机密闭式热泵烤烟系统内装 3 958.63 kg 鲜烟,装烟方式为 3 层编竿装烟。为对比烘烤经济性,采用生物质颗粒烤房烘烤相同部位烟叶进行对照,其装烟量为 3 704.70 kg 鲜烟,装烟方式相同。

1.3 试验方法

双压缩机密闭式热泵烤烟系统及生物质颗粒烤房烘烤工艺均以 3 段式烘烤理论^[18]为基础。双压缩机密闭式热泵烤房中的干球温度通过加热压缩机的启停控制系统冷凝器放热,湿球温度通过除湿压缩机启停控制室内蒸发器除湿。

1.4 测定项目

1.4.1 运行特征 试验测量压缩机吸气、排气温度。

1.4.2 烘烤成本 设定烟叶样品,记录鲜烟质量、干烟质量,从而计算整炉鲜烟质量、干烟质量和鲜干比。记录热泵系统烤房用电量,生物质颗粒烤房生物质颗粒消耗量及耗电量。

1.5 性能指标

双压缩机密闭式热泵子系统运行压焓(图 3)中理想循环为 1'-2'-4'-5'-1',实际循环为 1-2-4-5-1。其中实际循环 1-2 为制冷剂经压缩机等熵压缩过程;2-4 为制冷剂经冷凝器等压放热过程;4-5 为制冷剂经膨胀阀等焓节流过程;5-1 为制冷剂经室内蒸发器或室外换热器等压吸热过程。

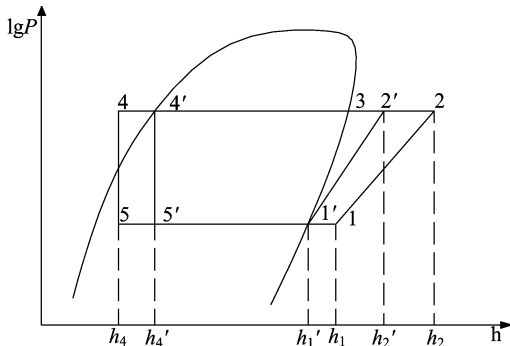


图3 子系统运行压焓

1.5.1 热泵系统制热量 制热量 Q 指系统运行时冷凝器产生的热负荷,由公式(1)确定。

$$Q = m_r (h_2 - h_4) \quad (1)$$

式中: m_r 为制冷剂的质量流量,kg/s; h_2 为制冷剂气体从压缩机排出进入冷凝器的焓值,kJ/(kg·h); h_4

为制冷剂离开冷凝器时的焓值,kJ/kg。

1.5.2 压缩机耗功及等熵效率 压缩机理论耗功 W_{ysj} 是指制冷剂在压缩机内等熵压缩消耗功率,由公式(2)确定。

$$W_{ysj} = m_r (h_2 - h_1) \quad (2)$$

式中: h_1 为制冷剂进入压缩机的焓值,kJ/kg。

其中压缩机等熵效率 η_{ds} 由公式(3)^[19] 确定。

$$\eta_{ds} = 0.874 - 0.0135 \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

式中: p_2 为压缩机排气压力,Pa; p_1 为压缩机吸气压力,Pa。

1.5.3 性能系数 表征热泵性能的参数为制热系数(简称 COP),定义为热泵制取的热量与消耗的能量之比^[20],双压缩机密闭式热泵烤烟子系统的性能系数 COP 由公式(4)确定。

$$COP = \frac{Q}{W_{th}} \quad (4)$$

式中: W_{th} 为密闭式热泵烤烟系统总功率,kW。 W_{th} 由公式(5)确定。

$$W_{th} = W_{ysj} + W_{fj} \quad (5)$$

式中: W_{fj} 为密闭式热泵系统风机消耗功率,kW。

1.5.4 除湿能耗比 除湿能耗比(SMER)是反映系统综合性能的重要指标,定义为热泵系统除去烟叶中的水分质量与消耗电能之比,由公式(6)确定。

$$SMER = \frac{M_w}{W_e} \quad (6)$$

式中: M_w 为从烟叶中除去的总水分质量,kg; W_e 为双压缩机密闭式热泵烤烟系统总电耗,kW·h。

2 结果与分析

为研究双压缩机密闭式热泵烤烟系统性能,试验选取 10 个稳温阶段(表 1),测试压缩机运行特征,并使用软件 SOLKANE refrigerants 对系统进行性能分析。

2.1 压缩机运行特性分析

不同阶段 2 台压缩机的吸气、排气温度变化见图 4。随着烟叶烘烤所需干球温度的升高,2 台压缩机的排气温度整体上呈上升趋势。第 10 阶段,烘烤要求干球温度为 67℃ 时,1#、2#压缩机排气温度分别达到 78.2、79.0℃。整个过程 2#压缩机排气温度均高于 1#压缩机排气温度;第 5 阶段处于定色期,烟叶失水速率较大,系统除湿速率要求较大,导致 2#压缩机排气温度上升,同时 1#压缩机的排气温

表 1 各阶段干球、湿球温度

阶段	干球温度 (℃)	湿球温度 (℃)
1	33.0	34.0
2	35.0	34.0
3	38.0	36.0
4	42.0	34.5
5	46.0	34.5
6	50.0	35.0
7	54.0	35.0
8	58.0	35.5
9	62.0	36.0
10	67.0	37.0

注:第 1 阶段 2#压缩机不运行。

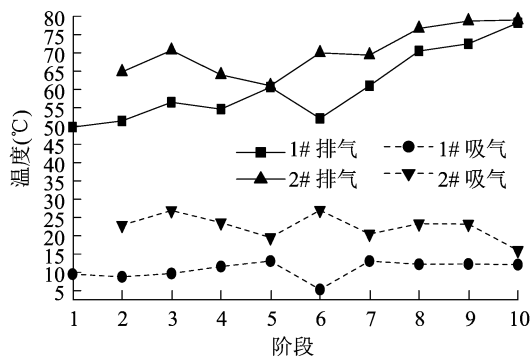


图 4 不同阶段压缩机吸气、排气温度

度降低。不同阶段 2 台压缩机吸气温度变化范围较小,整体上 1#压缩机吸气温度低于 2#压缩机,2 台压缩机在不同阶段的平均吸气温度分别为 1#压缩机 10.77℃,2#压缩机 22.54℃。

不同阶段 2 台压缩机压比及等熵效率见图 5。随着烘烤温度的升高,压缩机的压比整体上呈上升趋势,且加热子系统 1#压缩机压比相较于除湿子系统 2#压缩机压比较高,这是因为 1#压缩机排气、吸气温度差大于 2#压缩机排气、吸气温度差;整个烘烤过程,1#压缩机压比最大值为 4.88,处于第 10 阶段,2#压缩机压比最大值为 3.59,处于第 9 阶段。此外,1#压缩机等熵效率平均值为 0.826,2#压缩机等熵效率平均值为 0.833,均较高,这得益于 2 个压缩机压比均较低。

2.2 系统性能特性分析

烘烤过程系统制热量、压缩功和系统瞬时性能系数见图 6、图 7。从图 6 可看出,系统制热量与压缩功变化趋势相同,均随烘烤温度升高而上升。从

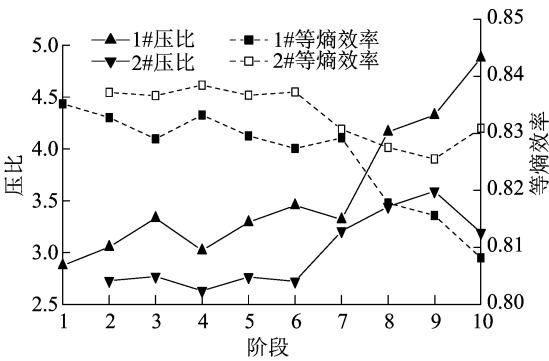


图 5 不同阶段压缩机压比及等熵效率

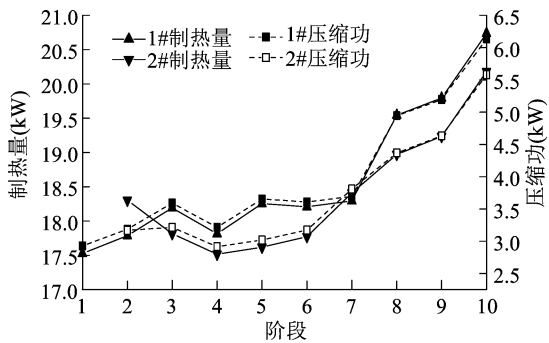


图 6 不同阶段制热量及压缩功

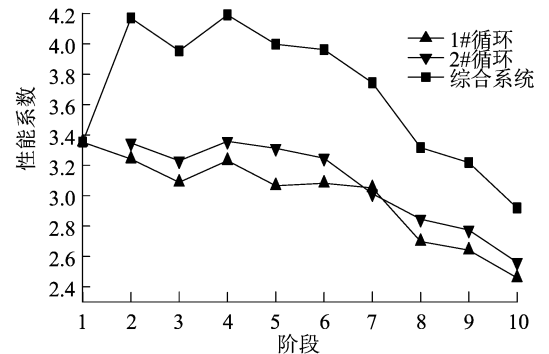


图 7 不同阶段性能系数

图 7 可看出,除湿子系统(2#循环)COP 大于加热子系统(1#循环),除湿子系统 COP 平均值为 3.08,加热子系统 COP 平均值为 2.99,综合系统 COP 平均值为 3.68。在第 4 阶段烘烤要求干球温度为 42℃时,整个系统瞬时性能系数最大,达 4.19。

2.3 经济性比较

双压缩机密闭式热泵烤烟系统和生物质颗粒烤房烘烤的基本情况和烘烤成本见表 2,红花大金元中部叶干烟烘烤成本为双压缩机密闭式热泵系统烤房 1.30 元/kg,生物质颗粒烤房 2.87 元/kg。干烟烘烤成本,双压缩机密闭式热泵系统烤房比生物质颗粒烤房低 54.70%。且双压缩机密闭式热泵

烤房消耗清洁能源电能,烘烤过程中不会产生对大气环境不利的有害气体,自动化控制高,节省了大量的人工成本。表明密闭式热泵烤房在环保节能、减工降本方面具有明显效果,在烟叶烘烤领域具有经济优势。

从表 2 可以看出,双压缩机密闭式热泵烘烤系统的除湿能耗比(SMER)为 2.41 kg/(kW·h),表示平均消耗 1 kW·h 电能够从烟叶中去除 2.41 kg 水分,系统节能优势明显。

表 2 2 种烤房烘烤成本比较

项目	双压缩机密闭式 热泵系统烤房	生物质颗粒烤房
装烟竿数(竿)	481.00	466.00
鲜烟均质量(kg/竿)	8.23	7.95
鲜烟总质量(kg)	3 958.43	3 704.70
干烟质量(kg/竿)	1.01	0.96
鲜干比	8.14	8.26
烤后干烟总质量(kg)	486.32	448.51
脱水量(kg)	3 472.11	3 256.19
耗电量(kW·h)	1 443.00	265.00
燃料消耗量(kg)	—	1 113.98
干烟成本(元/kg)	1.30	2.87

注:电价为 0.438 元/(kW·h),生物质燃料单价为 1.05 元/kg。

3 结论

笔者对双压缩机密闭式热泵烤烟系统进行了性能分析研究,该系统具有加热及除湿功能。研究结果表明:(1)随着烘烤温度的升高,2 台压缩机排气温度整体上升,吸气温度整体趋于不变;1#压缩机压比最大值为 4.88,2#压缩机压比最大值为 3.59;1#压缩机等熵效率平均值为 0.826,2#压缩机等熵效率平均值为 0.833。(2)加热子系统 COP 平均值为 2.99,除湿子系统 COP 平均值为 3.08,综合系统 COP 平均值为 3.68,综合系统瞬时性能系数最大值为 4.19;整个烘烤过程的除湿能耗比(SMER)为 2.41,节能优势明显。(3)双压缩机密闭式热泵系统烘烤得到干烟的成本为 1.30 元/kg,而生物质颗粒烤房为 2.87 元/kg,该系统较生物质颗粒烤房节约成本54.70%,在烟叶烘烤领域具有较大经济竞争力。

参考文献:

[1] Kadete H. Energy conservation in tobacco curing[J]. Energy,1989, 14(7):415-420.

[2] 段绍米,罗会龙,刘海鹏. 烟叶密集烤房的研究应用进展与改进设计[J]. 江苏农业科学,2019,47(1):202-207.

[3] 陈坤杰,李娟玲,张瑞合. 热泵干燥技术的应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2000,31(3):109-111,105.

[4] 范沿沿,李建华,林智宗,等. 烟叶烘烤生物质燃烧机的设计与试验[J]. 江苏农业科学,2019,47(12):256-260.

[5] 胡小东,晏飞,邹聪明,等. 清洁能源在烤烟密集烤房中的应用研究进展[J]. 贵州农业科学,2017,45(5):132-138.

[6] 赵新帅,罗会龙,祁志敏. 生物质颗粒燃料密集烤房与燃煤型密集烤房性能对比研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019,44(2):69-74.

[7] 徐成龙,苏家恩,张聪辉,等. 不同能源类型密集烤房烘烤效果对比研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(2):264-266.

[8] Neslihan C, Hepbasli A. A review of heat pump drying: part1 - Systems, models and studies [J]. Energy Conversion and Management,2009,50(9):2180-2186.

[9] 陈东,谢继红. 热泵干燥装置[M]. 北京:化学工业出版社,2007.

[10] 孟智勇,宗胜杰,高彬彬,等. 热泵密集烤房不同烘烤工艺效果比较[J]. 江苏农业科学,2019,47(22):247-251.

[11] 宫长荣,潘建斌. 热泵型烟叶自控烘烤设备的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(1):155-158.

[12] 贺智谋,邱荣俊,廖成福,等. 空气能热泵烤房与传统密集烤房烟叶烘烤成本及质量对比研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(24):10033,10044.

[13] 王妮妮,王高杰,焦桂珍,等. 空气源热泵烤房与密集式烤房烤后烟叶质量对比[J]. 山西农业科学,2014,42(5):493-496.

[14] 孙晓军,杜传印,王兆群,等. 热泵型烟叶烤房的设计探究[J]. 中国烟草学报,2010,16(1):31-35.

[15] 彭宇,王刚,马莹,等. 热泵型太阳能密集烤房烘烤节能途径探讨[J]. 河南农业科学,2011,40(8):215-218.

[16] Bryan W, Maw J, Michael M. Heat pump dehumidification during the curing of flue-cured tobacco[C]. Nashville:The Proceedings of the 41st Tobacco Workers' Conference,2004.

[17] 李世军. 排湿热回收热泵烟叶烤房及其自动控制的研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(12):63-67.

[18] 汪伯军,江厚龙,许安定,等. 三段六步式烘烤工艺研究及应用初报[J]. 西南大学学报(自然科学版),2014,36(8):189-193.

[19] Yan G, Hu H, Yu J L. Performance evaluation on an internal auto-cascade refrigeration cycle with mixture refrigerant R290/R600a [J]. Applied Thermal Engineering,2015,75:994-1000.

[20] 胡连营. 地源热泵技术讲座(二)热泵循环与热泵机组[J]. 可再生能源,2008,26(2):114-116.