

文章编号:1673-887X(2026)06-0038-03

空气源热泵烟草烘干节能研究

栾庆坤

(中集冷链研究院有限公司, 山东 青岛 266300)

摘要 为提升烟草烘烤节能水平,对比研究了开式、闭式、半开式空气源热泵在烟叶烘烤中的应用效果。经理论计算与实地测试,半开式机组依托余热回收与动态排湿协同作用,单位干烟叶耗电量最低,节能优势显著。研究结果可为烟草烘干热泵设备选型与推广应用提供依据。

关键词 空气源热泵;烟叶烘烤;余热回收;汽化潜热

中图分类号 TK11

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.013

Research on the Energy Saving of Air Source Heat Pump for Tobacco Drying

Luan Qingkun

(CIMC Cold Chain Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266300, Shandong, China)

Abstract: To enhance the energy-saving level of tobacco drying, an in-depth comparative study was conducted on the application effects of open-type, closed-type, and semi-open-type air-source heat pumped in tobacco drying. Through theoretical calculations and field tests, it was found that the semi-open-type unit, relying on the synergy of heat recovery from waste heat and dynamic moisture removal, had the lowest power consumption for drying dry tobacco leaves, demonstrating significant energy-saving advantages. The research results could provide a basis for the selection and promotion of tobacco drying heat pump equipment.

Key words: air source heat pump; flue-cured tobacco; waste heat recovery; latent heat of vaporization

我国是世界上最大的烟草生产国和消费国,烟叶烘烤是烟草加工产业链中的关键工序,传统烘烤模式能耗偏高,在当前“双碳”发展背景下,推进烟叶烘烤节能降碳、提质增效已成为行业发展的重要方向^[1-2]。空气源热泵凭借能效高、清洁环保等优势,逐步替代传统热源,广泛应用于烟草烘干领域。

目前业内主流空气源热泵烤烟设备分为开式、闭式、半开式3种类型,三类机组在气流组织、除湿方式、余热利用形式上存在明显差异^[3]。现有研究多聚焦单一热泵机型的运行优化,针对不同机型适配烟叶分段烘烤工艺的机理、能耗差异缺少系统性对比分析,生产端也存在设备选型盲目、运行策略不合理等问题^[4-6]。

基于此,本文结合烟叶变黄、定色、干筋的三段五步烘烤工艺,对三类空气源热泵机组的工作原理、热负荷进行理论核算,并开展现场对比试验,分析不同设备的能耗特征与节能机制,筛选适配烟草烘烤的最优机型,为密集烤房热泵系统的工程应用与节能优化提供理论支撑和实践依据。

1 烟草烤房烟叶烤制工艺

烤烟普遍采用三段五步烘烤工艺,整体分为变黄、定色、干筋三大阶段,细分为6个温控时段。通常遵循三段五步式烘烤曲线,为加强密集烤房的研究与建设,国家烟草局也制定了《密集式烤房建设技术规范(Q/GDYY 019—2011)》。变黄阶段烤房内干球温度控制在32~42℃,湿球温度控制在32~39℃,通常以烟叶基本变黄为标准开始升温进入下一烘烤阶段。定色阶段烤房内的干球温度控制在45~54℃,湿球温度控制在37~39℃,通常以叶片全干为标准开始升温进入干筋期。干筋期烤房内的干球温度控制在56~70℃,湿球温度控制在39~42℃,烤至烟筋全干。

2 常用空气源热泵烤烟设备原理介绍

2.1 开式空气源热泵设备原理

开式空气源热泵干燥机组以热泵加热空气,产生热风实现烟叶的加热与排湿。此类设备在烟草烤房的

收稿日期 2025-11-26

作者简介 栾庆坤(1988-),男,山东济南人,工程师,研究方向为供热通风与空调工程。

应用中,利用热泵对烤房及烟叶加热,风道引入新风至烤房,利用正压进行排热排湿,维持平衡。

2.2 闭式空气源热泵设备原理

闭式机组依靠制冷除湿,并利用冷凝热对空气二次加热。配置除湿蒸发器、升温蒸发器、冷凝器,需要开启多种模式参与控制。

2.3 半开式空气源热泵设备原理

半开式机组兼具开式、闭式机组功能,可根据工况切换运行模式。配置除湿蒸发器、升温蒸发器、冷凝器、排湿口,需要开启多种模式参与控制。需要控制风道新风的引入,利用正压进行排热排湿,维持平衡。

3 不同类型空气源热泵设备烤制烟叶理论

结合三类热泵工作机理,核算并对比其烤烟热负荷。

3.1 开式空气源热泵设备烤制烟叶理论分析

以市场上2仓3台的烤房为依据,对开式模式下空气源热泵的烤烟负荷进行核算,核算情况见表1。分析以上模式:利用空气源热泵的开式模式制取热量,将烤房及烟叶升温,利用排湿风口排出烟叶析出的水分,同时利用烤房内外压差补充等量新风。在此过程中热泵机组需要提供物料升温、水分汽化、新风负荷进入所需

的热量。系统净排水量与烟叶总失水量基本匹配。

3.2 闭式空气源热泵除湿干燥机组烤制烟叶理论分析

以市场上2仓3台的烤房为依据,对闭式无排湿模式下空气源热泵的烤烟负荷进行核算,核算情况见表2。分析以上模式:利用空气源热泵的闭式模式将烤房及烟叶升温,除湿的同时回收水分的潜热。以烤房为模型,闭式制热模式运行时蒸发器及冷凝器都在烤房内部循环,在此过程中由于热泵本身有电功率的存在,大于烤房本身所需的升温负荷,需要开启制冷模式降温抵消电功率。总的除湿量为闭式制热除湿与制冷除湿的总和。

3.3 半开式空气源热泵干燥机组烤制烟叶理论分析

以市场上2仓3台的烤房为依据,对半开式模式下空气源热泵的烤烟负荷进行核算,核算情况见表3。分析以上模式:利用空气源热泵的闭式模式将烤房及烟叶升温,除湿的同时回收水分的潜热。以烤房为模型,闭式制热模式运行时蒸发器及冷凝器都在烤房内部循环,在此过程中由于热泵本身有电功率的存在,大于烤房本身所需的升温负荷,通过排湿排热来抵消电功率。总的除湿量为闭式制热除湿与排湿量的总和。

表1 开式空气源热泵烤烟热量表
Tab.1 Open-type air-source heat pump for curing tobacco heat analysis

指标	参数	指标	参数	指标	参数
鲜烟质量/kg	5 000	排气密度/(kg·m ⁻³)	1.1	新风风量/(m ³ ·h ⁻¹)	1 850
干烟质量/kg	750	排湿时间/h	85	新风密度/(kg·m ⁻³)	1.15
温差/K	40	排风含湿/(kg·kg ⁻¹)	0.04	新风时间/h	85
升温负荷/kJ	700 000	排水量/kg	6 054	新风负荷/kJ	3 616 750
失水量/kg	4 250	新风含湿/(kg·kg ⁻¹)	0.01	新风水分/kg	1 808
潜热负荷/kJ	10 200 000	新排风温差/K	20	净排水量/kg	4 245
排湿风量/(m ³ ·h ⁻¹)	1 850	新风比热/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	1.005	总负荷/kJ	14 515 200

注:取烟叶平均比热为3.5 kJ/(kg·K);水分汽化潜热2 400 kJ/kg;下表同。

表2 闭式空气源热泵烤烟热量表
Tab.2 Closed-type air-source heat pump for curing tobacco heat

项目	鲜烟质量/kg	干烟质量/kg	烟叶比热/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	温差/K	升温负荷/kJ	失水量/kg	潜热负荷/kJ
参数	5 000	750	3.5	40	700 000	4 250	10 200 000
项目	闭式排水量/kg	潜热负荷1/kJ	机组电功负荷/kJ	闭式制热量/kJ	制冷除湿量/kg	制冷潜热负荷/kJ	制冷显热负荷/kJ
参数	3 400	8 160 000	2 692 800	10 852 800	850	2 040 012	1 836 000

表3 半开式空气源热泵烤烟热量表
Tab.3 Half-open type air-source heat pump for curing tobacco heat

指标	参数	指标	参数	指标	参数
鲜烟质量/kg	5 000	潜热负荷1/kJ	7 440 000	新排风温差/K	20
干烟质量/kg	750	机组电功负荷/kJ	2 455 200	新风比热/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	1.005
烟叶比热/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	3.5	闭式制热量/kJ	9 895 200	新排风量(m ³ /h)	1 100
温差1/K	40	排气密度/(kg·m ⁻³)	1.1	新风密度/(kg·m ⁻³)	1.15
升温负荷/kJ	700 000	排湿时间/h	40	新风时间/h	40
失水量/kg	4 250	排风含湿/(kg·kg ⁻¹)	0.04	新风负荷/kJ	1 518 000
潜热负荷/kJ	10 200 000	排水量/kg	1 694	新风水分/kg	506
闭式排水量/kg	3 100	新风含湿/(kg·kg ⁻¹)	0.01	净排水量/kg	4 245

4 不同类型空气源热泵设备烤制烟叶试验对比

4.1 开式空气源热泵设备烤烟试验分析

开式模式下空气源热泵在2仓3台烤房的烤烟测试数据见表4。在开式模式下试验得出1 kg干烟叶的耗电量在2.15 kW·h。

表4 开式空气源热泵烤烟试验数据表
Tab.4 Open-type air-source heat pump tobacco curing test data

项目	鲜烟质量/kg	干烟质量/kg	开式热泵能效	耗电/(kW·h)	单位干烟耗电/[(kW·h)·kg ⁻¹]
参数	5 050	755	2.5	1 623	2.15

4.2 闭式空气源热泵干燥机组烤烟试验分析

在闭式无排湿模式下空气源热泵在2仓3台烤房的烤烟测试数据见表5。在闭式无排湿模式下试验得出1 kg干烟叶的耗电量在1.91 kW·h。

表5 闭式空气源热泵烤烟试验数据表
Tab.5 Closed-type air-source heat pump test data for curing tobacco

项目	鲜烟质量/kg	干烟质量/kg	制冷能效	制冷功耗/(kW·h)
参数	5 080	760	2.5	440
项目	闭式制热能效	闭式功耗/(kW·h)	总耗电/(kW·h)	单位干烟耗电/[(kW·h)·kg ⁻¹]
参数	3	1 010	1 451	1.91

4.3 半开式空气源热泵干燥机组烤烟试验分析

在半开式模式下空气源热泵在2仓3台烤房的烤烟测试数据见表6。在半开式制热模式下试验得出1 kg干烟叶的耗电量在1.23 kW·h。

表6 半开式空气源热泵烤烟试验数据表
Tab.6 Test data of semi-open air-source heat pump for curing tobacco

项目	鲜烟质量/kg	干烟质量/kg	热泵能效	耗电/(kW·h)	单位干烟耗电/(kW·h·kg ⁻¹)
参数	5 090	765	3	941	1.23

综合以上分析,三杰克机组的实测耗电量与河南、云南产区现场应用数据基本吻合。

5 理论分析及试验结论分析

通过对烟叶烤制热值的分析得出:半开式空气源

热泵干燥机组在烟叶的烤制过程中,利用闭式循环回收烤房内水分的热量,同时开启新风引入,烤房正压排湿排热抵消机组电功率的余热,有效提升烘烤节能效果。

通过3种模式的试验对比,采用半开式制热模式可以较大幅度降低单位质量烟叶的烤制耗电量,实现优异的节能效果。在实际应用的过程中,需要根据烤房的大小、装烟量的多少、烟叶含水率及多段式的烤制曲线,适当调整匹配的机组参数及控制策略,贴近理论计算值,进一步提升节能效益。

6 结语

本文通过理论计算与现场试验,完成了开式、闭式、半开式空气源热泵在烟叶烘烤工况下的对比研究。结果显示:三类机组均能满足烟叶烘烤工艺要求,但能耗差异显著;开式机组新风负荷大、整体能效偏低;闭式机组余热回收效果较好但排湿灵活性不足;半开式机组可根据烘烤阶段需求切换运行模式,通过回收水汽潜热、动态排湿散热双重作用大幅降低能耗,是烟叶烘烤场景下综合节能性最优的设备。在实际生产应用中,可结合烤房规模、装烟量、烟叶初始含水率及分段烘烤曲线,对半开式热泵的运行参数、控制策略进行精细化调节,进一步缩小实际能耗与理论计算值的差距,最大化节能效益。

参考文献

[1] 姚曜.排热回收式热泵密集烤烟房节能性研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.

[2] 黄剑川.热泵干燥系统设计与性能优化[D].武汉:华中科技大学,2020.

[3] 杨立均,宫长荣.烤烟三段式烘烤操作技术[J].烟草科技,2003,7(7):46-48.

[4] 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.

[5] 郭仁宁,任常在,范华亮,等.变频回热式热泵烤烟房的研究[J].黑龙江农业科学,2012,9(3):139-142.

[6] 刘向伟,王世伟,李栓柱,等.热泵密集烤房节能应用分析[J].能源与环保,2022,44(7):169-173.

(上接第37页)

源头治理、激励约束、敏感时段管控、社会共治和项目全生命周期管理等方面给出优化路径。下一步,应更加重视运行维护与能力建设,推动数据口径统一与闭环管理固化为制度,逐步形成可复制、可推广的水源地协同治理经验,为重大工程长期安全运行提供更稳固的生态支撑。

参考文献

[1] 水利部科学技术委员会丹江口库区及其上游流域研究专家咨询组.丹江口库区及其上游流域水质安全保障建议[J].中国水利,2026(3):10-12,20.

[2] 李小根,董馨月,朱四新,等.南水北调中线工程水源区土地利用/覆被变化及其驱动力分析[J/OL].水资源保护,1-18(2026-01-20)[2026-02-22].https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20260822.006.

[3] 苏吉敏.基于多源供水与生态修复的水城河流域治理策略研究[J].黑龙江水利科技,2026,54(2):183-187.

[4] 何建刚,陈彦,李玉英,等.南水北调中线工程南阳段干渠浮游细菌群落春秋季特征及其组装过程[J].南阳师范学院学报,2025,24(3):72-81.

[5] 段西钰,吴凡.“两山论”在南水北调核心水源地的实践与价值转化路径研究:以南阳市为例[J].新西部,2026(1):170-174.