

加热型热泵干燥系统温湿度控制能力探讨

Study on temperature and humidity control ability of heating type heat pump drying system

吴耀森 龚丽 刘清化 刘军 龙成树

WU Yao-sen GONG Li LIU Qing-hua LIU Jun LONG Cheng-shu

(广东省现代农业装备研究所, 广东 广州 510630)

(Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou, Guangdong 510630, China)

摘要:从空气调节的角度分析推导加热型热泵干燥系统的热湿平衡,把有效控制干燥温湿度的能力定义为控制能力。结合热泵原理解释控制能力与干燥温湿度、环境温湿度和物料量之间的关系,定性分析各因素的影响,得到判定加热型热泵干燥系统控制能力的条件,并指出可判断范围与不可判断范围。在理论分析的基础上,对秋季持续低温高湿运行难以短期改变的现象进行解答。

关键词:加热型;热泵干燥系统;控制能力;热湿平衡

Abstract: In this paper, the heat and moisture balance of heating type heat pump drying system (HHPDS) is analyzed from the point of view of air conditioning. The ability that to effectively control the drying temperature and humidity is defined as the control capability. The relationship between the control capability and the drying temperature and humidity, the temperature and humidity of the environment and the amount of material is explained based on the principle of heat pump. Through the qualitative analysis of the influence of various factors, the conditions of determining the control ability of the HHPDS were obtained and it also pointed out the scope of judgment and the non judgment range. On the basis of theoretical analysis, the phenomenon, which the low temperature and high humidity is difficult to control in autumn is explained.

Keywords: heating type; heat pump drying system; control ability; heat and moisture balance

自 1980 年代开始,中国热泵干燥技术与装备的研究多以双冷源的热泵除湿干燥系统^[1-2]和双热源热泵除湿干燥

系统^[3-4]为主,以节能和干燥成品质量的优势与传统热风干燥技术并存^[5],在高端物料的应用取得市场优势,在谷物、水产和肉制品的干燥加工行业尤为突出^[6-7]。

随着能源价格、环保标准和劳动力成本的提高,单冷源加热型热泵干燥系统的市场迅速扩大,尤其是初级农产品干燥加工领域应用较广^[8-9]。譬如广东省现代农业装备研究所的基础型稻谷热泵干燥机 and 果蔬热泵干燥机^[10-11]、北京理化所的烟叶热泵干燥机等^[12],此类加热型热泵干燥设备均具有较显著的节能效果。然而,上述热泵干燥系统的干燥温湿度控制能力差、对环境空气的温湿度高度的依赖性,以及季节性和地域性的明显差异^[13-14],已造成加热型热泵干燥机应用的局限性,并带来了较大的使用困惑。

鉴于上述问题,结合干燥温湿度、环境温湿度和物料量 3 个主要因素分析加热型热泵干燥系统的控制性能,以期为加热型设备操作者解答疑惑,对使用商合理选择热泵干燥设备提供指导。

1 加热型热泵干燥系统简介

1.1 加热型热泵干燥系统空气流向分析

图 1(a)、(b)分别是加热型热泵干燥系统启动排湿前和排湿后空气流向图,图 2 为各空气状态点在焓湿图上的位置。图 2 中,空气 2 为设定温湿度控制值,空气的 1-2 过程,为空气流经物料前后的变化;当干燥温湿度到达点 2 后,有 2 种不同选择。

(1) 不开启排湿,进入 2-5-3(2、5 混和)-4 完成一次封闭式的干燥流程,再选择排湿与否。

(2) 开启排湿,空气经历 2-3'(2、0 混和)-5'-1'(2、5'混和)-2'完成一次排湿干燥流程。

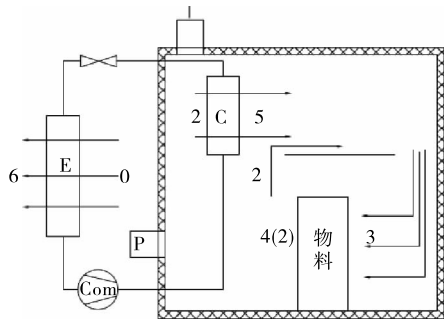
其中,点 3 是冷凝器出口空气 5 和回风 2 的混和,2 和 5 是等湿线,焓差 Δh_{52} 间接反映了“制热量/空气处理量”;点 3' 是环境空气 0 和回风 2 的混和,0、3' 和 2' 在同一直线上。

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFD0400902-2)

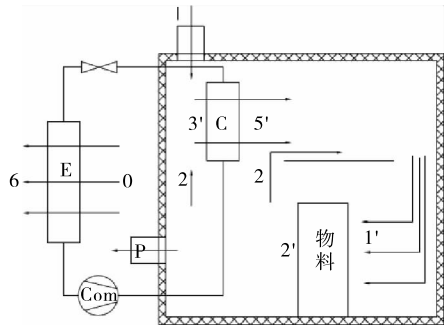
作者简介:吴耀森,男,广东省现代农业装备研究所教授级高级工程师,硕士。

通信作者:刘清化(1966—),男,广东省现代农业装备研究所教授级高级工程师,学士。E-mail: scutwys@163.com

收稿日期:2017-04-05



(a) 排湿前



(b) 排湿后

E. 蒸发器 C. 冷凝器 I. 新风口 P. 排湿口 0. 环境空气 2、4、2'. 回风空气 3、1'. 送风空气 3'. 混和空气 5、5'. 冷凝器出口空气 6. 蒸发器出口空气

图1 加热型热泵干燥系统空气流向示意图

Figure 1 Schematic diagram of HHPDS air flow system

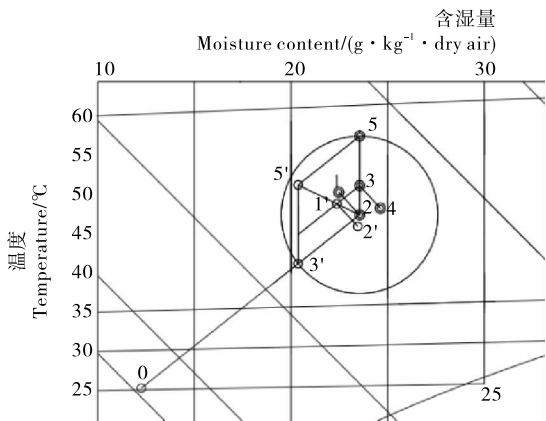


图2 加热型热泵干燥系统排湿状态变化

Figure 2 Exhaust moisture changes of HHPDS

1.2 维持干燥系统稳定的条件

当焓差值 $\Delta h_{23'} > \Delta h_{52}$, 使干燥系统的总焓降大于制热量, 排湿处于正常设计工况状态。当排湿关闭后, 干燥系统至少应具有恢复到排湿前状态的能力, 那么应满足式(1)和(2)的关系, 否则系统会进入后述的各种状态。

$$M_2 \times h_2 - m \times (h_2 - h_0) + Q = M_2 \times h_2, \quad (1)$$

$$M_2 \times d_2 - m \times (d_2 - d_0) + \Delta D = M_2 \times d_2, \quad (2)$$

式中:

M_2, m ——排湿前干燥系统的空气总质量、排湿换气的质量, kg;

Q ——干燥系统制热总量, kJ;

ΔD ——物料在干燥系统内部析出的水分, g。

由式(1)和(2)可知, 要恢复排湿前后状态一致的条件为 $Q/\Delta D = (h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 。 (3)

2 干燥系统控制能力的基本条件

对控制能力作如下表述: 加热型热泵干燥系统可满足干燥温度比设定温度高、干燥湿度比设定湿度低的能力, 当有一项不符合时, 认为干燥系统失去控制能力。

结合图2和式(3)可知, 判定干燥系统在某一时刻是否具有温湿度控制能力, 应当满足以下条件:

(1) 干燥系统内部空气含水量大于环境空气含水量。

(2) 干燥系统内部空气温度高于环境空气温度。

(3) 干燥系统的制热量 Q 与物料析出水分 ΔD 的比值, 满足式(4)。

$$Q/\Delta D \geq (h_2 - h_0)/(d_2 - d_0). \quad (4)$$

对应式(3), 当满足式(4)时表示干燥系统具备温湿度控制能力。

式(3)和(4)表明, 控制能力不仅与干燥系统制热量 Q 、环境温湿度和干燥温湿度有关, 还与物料析出水分 ΔD 有关。换言之, 环境温湿度变化、干燥温湿度变化、物料析出水分速率的变化都会影响干燥系统的控制能力。

3 控制能力的变化趋势

3.1 首次达到干燥温度或湿度的变化趋势

假设某一时段, 环境温湿度保持不变, 在干燥系统运行前, 干燥仓温湿度处于A点或A₁点(分别在线02的两边), 当所有加热装置均处于运行状态, 热泵干燥系统的温湿度刚到达温度 $t = t_2$ 或含水量 $d = d_2$ 时, 干燥温湿度分别为图3所示, 直线的斜度不代表整个温升过程, 仅代表温度 $t = t_2$ 或含水量 $d = d_2$ 时的变化趋势, 即 $Q/\Delta D$, 其中, 线段AC//02、线段A₁C₁//02, 即其热湿比相等, 也是能否保持控制能力的临界条件。

根据式(4)知, 有5个变化趋势在该时刻符合要求, 对干燥温湿度具有控制能力, 分别为AB、AC、A₁B₁、A₁2和A₁C₁。但后续的运行, 任何时候仍需满足式(4), 换言之, 首次达到干燥温度或湿度时, 无法判断上述5个趋势的后续运行是否具备控制能力。

3.2 物料析水量与控制能力变化趋势分析

物料干燥的水分变化经历3个阶段, 分别为升速干燥、恒速干燥和减速干燥阶段。对于前述5个可能具备控制能力的运行趋势, 对应图3, 有如下判断:

(1) 升速干燥阶段, ΔD 增加, AB、A₁B₁ 和 A₁2 的制热量变化极微, 运行趋势是否满足式(4), 无法判断, AC、A₁C₁ 不满足。

(2) 恒速干燥阶段, ΔD 不变, AB、A₁B₁、AC、和 A₁2 的制热量变化极微, 运行趋势满足式(4), A₁C₁ 不满足。

(3) 降速干燥阶段, ΔD 减少, AB、A₁B₁、AC、和 A₁2 的制热量变化极微, 运行趋势满足式(4), A₁C₁ 无法判断。

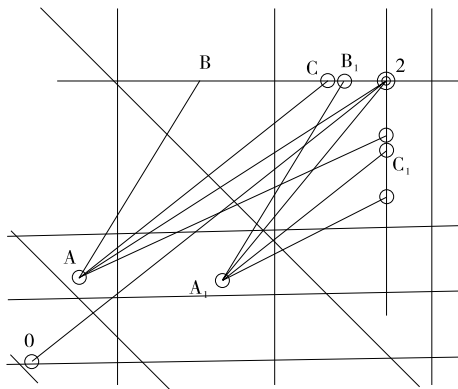


图 3 不同温湿度下加热型热泵干燥系统空气状态变化

Figure 3 Air condition changes of HHPDS under different temperature and humidity

上述可知,不管曲线的趋势如何,在升速干燥阶段,都无法判断干燥系统是否具有控制能力,只有在恒速和降速阶段才能判断。在应用操作上,当温度保持不变,相对湿度减少或不变时,才能有效判断干燥系统的控制能力。

3.3 温湿度对控制能力影响趋势分析

假设某一时段,环境温湿度保持不变,结合图 3 和式(4),干燥温湿度 2 的变化,对控制能力的影响有如下判断,如图 4 所示,区域的箭头代表趋势的增强和减弱,无箭头的区域表示无法简单判断区域,必须通过计算才能判断。

- (1) 干燥温度升高,含湿量在线 02 左方时,制热量 Q 减少且 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 增加,控制能力减弱。
- (2) 干燥温度升高,含湿量在线 02 右方时,制热量 Q 和 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 同时减少,无法直观判断控制能力变化。
- (3) 干燥温度降低,含湿量在线 02 左方时,制热量 Q 和 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 同时增加,无法直观判断控制能力变化。
- (4) 干燥温度降低,含湿量在线 02 右方时,制热量 Q 增加且 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 减少,控制能力增强。

3.4 环境温湿度与控制能力变化趋势

假设某一时段,干燥温湿度保持不变,结合图 3 和式(4),环境空气状态 0 的变化,对控制能力的影响有如下判断,见图 5。

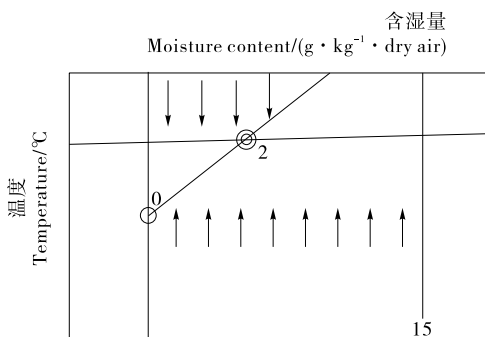


图 4 干燥温湿度对控制能力的影响

Figure 4 Effect of drying temperature and humidity on control capability

(1) 环境空气温度升高,含湿量在线 02 左方时,制热量 Q 增加且 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 减少,控制能力增强。

(2) 环境空气温度升高,含湿量在线 02 右方时,制热量 Q 和 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 同时增加,无法直观判断控制能力变化。

(3) 环境空气温度降低,含湿量在线 02 左方时,制热量 Q 和 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 同时减少,无法直观判断控制能力变化。

(4) 环境空气温度降低,含湿量在线 02 右方时,制热量 Q 减少且 $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0)$ 增加,控制能力减弱。

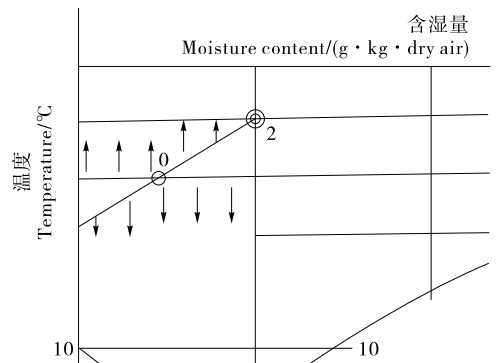


图 5 环境温湿度对控制能力的影响

Figure 5 Effect of ambient temperature and on humidity on control capability

4 应用现象的分析

应用情况表明,秋冬季节,加热型热泵干燥系统的温升幅度及温升速率远不如夏季,湿度却远超夏季,形成低温高湿的局面,而且在一段较长的时间内,既无法有效提高干燥温度也无法通过排湿降低湿度,只能维持低温高湿运行。

式(3)表明,环境温湿度、干燥温湿度、物料析出水分速率与干燥系统的控制能力有一个平衡点,当其中一个参数发生变化时,控制能力的平衡点将发生变化。环境温度下降,导致物料温度和蒸发温度下降,一台设计技术参数既定的热泵系统,若保持冷凝温度不变,蒸发温度下降幅度约为环境温度下降的 50% (在不结冰的情况下,结冰后下降更明显),秋冬季节与夏季的环境温度相差 15~25 °C,蒸发温度下降 7.5~12.5 °C,相应地,制热量下降 20%~40%。

干燥系统将发生两大变化:温升速率降低,控制能力的平衡点往湿度增大的方向移动。后述以一款丹佛斯涡旋压缩机为例,假设一个合理的状态,简述控制能力的变化程度,本文不作理论计算以便增加操作者的直观印象。

假设,夏季环境温湿度 30 °C、65%,压缩机运行冷凝温度和蒸发温度为 70 °C 和 15 °C,制热量为 37.77 kW;当冬季环境气温 15 °C、50%时,保持冷凝温度 70 °C 不变,蒸发温度约 0 °C (不同设备差异不大),此时制热量为 25.14 kW,制热量为夏季的 66.56%。采用上述参数为依据,对保持干燥温湿度不变和保持物料析出水分速率不变的两种情况对控制能力作举例分析。

4.1 干燥温湿度保持不变

当不考虑温升速度和库体热损失时,以干燥温湿度 55℃、30%为控制目标,根据式(3),可得夏季去水能力:

$\Delta D_1 = 37.77/4.716 = 8.084 \text{ g/s}$,把 ΔD_1 作为物料析出水分速率的基准值。

同一热泵干燥系统,冬季去水能力:

$\Delta D_2 = 25.14/4.269 = 5.889 \text{ g/s}$,是夏季去水能力的 72.8%,由此可知,当考虑温升速度和库体热损失时,冬季的物料量,不会超过夏季的 72.8%。

4.2 物料析出水分速率保持不变

若夏季和冬季的物料量相同,可简单认为物料析出水分速率均为 $\Delta D_1 = 8.084 \text{ g/s}$,根据式(3),每一个温度均对应一个湿度,均可作为平衡点。冬季环境气温 15℃、50%时, $(h_2 - h_0)/(d_2 - d_0) = 25.14/8.084 = 3.110 \text{ kJ/g}$,经计算得到不同干燥温湿度 2 的控制能力平衡状态点,数据列于表 1,为了简单表述,省略了其它温度对应的相对湿度。

表 1 控制能力平衡点与干燥温湿度的关系

Table 1 The relationship between the balance of control ability and the drying temperature and humidity

平衡点	温度/℃	相对湿度/%
点 1	55.0	77.7
点 2	50.0	87.0
点 3	45.0	97.5
点 4	43.9	100.0

由表 1 可知,当冬季物料量保持不变时,干燥系统运行温湿度的平衡点将由夏季的 55℃、30%,变为冬季的 55℃、77.7%,当干燥系统温升能力不足,在到达恒速干燥阶段时(即 $\Delta D_1 = 8.084 \text{ g/s}$)仍未到达 55℃、77.7%,那么干燥温湿度将停留在表 1 的状态附近,出现 43.9℃、100%,45℃、97.5%,50℃、87%等温湿度,此时即为前述的:温升幅度及温升速率远不如夏季,湿度却远超夏季,形成低温高湿的局面,而且在一段较长的时间内,既无法有效提高干燥温度也无法通过排湿降低湿度,只能维持低温高湿运行。

5 结论

(1) 加热型热泵干燥系统的干燥温湿度控制能力受环境和物料量的影响较大,有效地操作该系统需要一定的经验和相关知识。

(2) 本文基于对操作人员的指导而撰写,没有进行系统的理论分析,未把物料温升过程的吸热和干燥箱的散热考虑在内,只是举例说明,该例子是极为普通的情况,并非极端情况。当冬季的环境温度为 -5~5℃,干燥温湿度为 65℃、20%时,加热型热泵干燥系统的温湿度控制能力和物料量不足夏季的 40%。

(3) 本文所述的可判断区不需操作人员具备专业知识即可判断,而无判断区域可以通过计算得出任意时刻的温湿

度控制平衡点,并在焓湿图画出连续的曲线(即表 1 数值的连续化),即可有效判断其控制能力。

参考文献

- [1] 刘圣春,李雪强,邹文思.带辅助冷凝器的封闭式热泵干燥系统理论分析[J].制冷与空调,2014(12):59-62,79.
- [2] 吴耀森,刘军,李浩权,等.小黄鱼热泵干燥工艺及设备选型分析[J].现代农业装备,2015(2):37-42.
- [3] 张力,胡传坤,高建民,等.太阳能与双热源热泵组合干燥落叶松[J].东北林业大学学报,2014(12):141-144.
- [4] 张璧光,赵忠信,高建民,等.高温双热源除湿与太阳能组合干燥技术的研究[J].北京林业大学学报,1997(3):57-63.
- [5] ZAFER Erbay, ARIF Hepbasli. Advanced exergoeconomic evaluation of a heat pump food dryer[J]. Biosystems Engineering, 2014, 124: 29-39.
- [6] 罗乔军,张进疆,何琳,等.空气源热泵谷物干燥的研究进展[J].食品与机械,2014,30(3):228-233.
- [7] 蒋小强,关志强,谢晶,等.水产品热泵干燥装置性能参数的理论分析[J].农业工程学报,2011,27(S1):373-376.
- [8] 张海红,何建国,贺晓光,等.果蔬热泵干燥装置的研制[J].食品与机械,2009,25(6):160-163.
- [9] 吕金虎,赵春芳,李金成.热泵干燥技术在农副产品加工中的应用与分析[J].农机化研究,2010(1):212-217.
- [10] 赵锡和,龙成树,张进疆,等.秋季稻谷热泵变风速干燥及干燥箱焓分析[J].食品与机械,2016,32(6):95-99.
- [11] 陈育辉,吴耀森,赵锡和,等.热泵稻谷干燥机的研制[J].粮油加工,2009(6):91-93.
- [12] 张振涛,杨鲁伟,董艳华,等.热泵除湿干燥技术应用展望[J].高科技与产业化,2014(5):70-73.
- [13] SEYFI Şevik. Experimental investigation of a new design solar heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products[J]. Solar Energy, 2014, 105: 190-205.
- [14] ANDREAS Gschwend, TOBIAS Menzi, STEPHEN Caskey, et al. Energy consumption of cold climate heat pumps in different climates-Comparison of single-stage and two-stage systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 193-206.