

# 二氧化碳热泵干燥技术

曾宪阳, 马一太, 李敏霞

**摘要:**介绍了二氧化碳热泵干燥的基本原理,并指出其优点。结合二氧化碳热泵干燥机的应用实例,表明其节能潜力为53%和65%,最后指出二氧化碳热泵干燥技术的发展方向。

**关键词:**干燥;二氧化碳热泵干燥;制冷工质

**中图分类号:**TK1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-7205(2005)03-0044-03

**Technology of Heat Pump Drying with Carbon Dioxide //**

ZENG Xian-yang, MA Yi-tai, LI Min-xia

**Abstract:** This paper introduces the basic principle of heat pump drying with carbon dioxide and points out its advantages. The application instance of the heat pump dryer with carbon dioxide shows that its energy saving potential is 53% and 65%. Finally, this paper points out the directions of the technology of heat pump drying with carbon dioxide.

**Keywords:** drying; heat pump drying with carbon dioxide; refrigerant

## 0 前言

干燥是工农业生产中广泛使用的一种加工工艺。在发达国家,干燥能耗占到国家工业能耗的7%~15%<sup>[1]</sup>。在我国,一般干燥过程的能耗约占整个加工过程总能耗的10%<sup>[2]</sup>。因此,自20世纪70年代初石油危机以来,世界各国均对干燥加工的节能技术展开了广泛而深入的研究,热泵干燥就是在这种背景下产生的一种新型节能干燥技术。

热泵系统的运行离不开制冷工质,但目前广泛应用的氯氟烃类(CFCs)人工合成制冷工质对臭氧层有破坏作用并且产生温室效应,国际上正在逐渐淘汰CFCs,寻找高效、绿色环保的制冷工质已成为当前国际社会共同关注的问题。CO<sub>2</sub>作为自然工质,对环境无害,具有良好的安全性和化学稳定性<sup>[3]</sup>。因此,研究以自然工质CO<sub>2</sub>为制冷工质的CO<sub>2</sub>热泵干燥技术,完全符合节能和环保的社会发展趋势,具有广阔的发展前景。

## 1 CO<sub>2</sub> 热泵干燥的基本原理

热泵干燥系统的形式较多,按照干燥介质(空气)的循环情况可分为开路式、部分乏气循环式和闭路式三种<sup>[4]</sup>,从节能的角度出发,目前大多采用闭路式热泵干燥系统。

图1是CO<sub>2</sub>热泵干燥系统示意图,由制冷系统和空气循环系统组成。制冷系统由压缩机、气体冷却器、节流装置(膨胀阀)、蒸发器和气液分离器等组成。CO<sub>2</sub>气体经压缩机压缩后在气体冷却器冷凝放热,经膨胀阀节流变成液态,温度降低,然后在蒸发器吸热蒸发,进入气液分离器分离后,CO<sub>2</sub>气体被吸入压缩机完成制冷循环。空气循环系统由风机和干燥室等组成。进入蒸发器的高湿热空气被冷凝去湿,变成低湿空气进入气体冷却器被加热成干热空气,由风机吹入干燥室,带走被干燥物料的水分后成为湿热空气进入蒸发器,完成空气循环。因此,制冷系统用于干燥介质

后,应制订相应的评价标准,使评价有统一的评价尺度。评价标准应按照国家或地方政府对农业机械化装备结构的要求,结合当地的实际情况和管理实践经验,制订出合理、可行的标准。

### 参考文献:

- [1] 隗志才.公路运输技术经济学[M].北京:人民交通出版社,1998:100-107.
- [2] 韦本辉.广西农业现状及发展战略和对策[J].广西农业科学,2000,(4):210-215.
- [3] 杜宽期.广西产业结构优化与政府职能转换[J].广西社会科

学,2002,(2):100-102.

- [4] 王耿.从农业结构调整看农业机械的发展趋势[J].南方农机,2000,(5):4-5.
- [5] 黄大明,周清,严省益.农业机械安全管理的模糊综合评价方法[J].农机化研究,2004(4):41-44.

来稿日期:2004年12月10日

严省益 工程师 广西贺州市八步区农机校 542800

傅忠 实验师 广西大学机械工程学院 530004 南宁市

黄大明 副教授,硕导 广西大学机械工程学院

(空气) 在气体冷却器中加热和在蒸发器中降温除湿, 提高空气的吸湿能力; 空气循环系统提供空气流动的通道, 使空气在系统中循环流动, 完成对干燥物料的干燥除湿。图 2 是 CO<sub>2</sub> 热泵干燥系统温熵(T-h)图, 1-2-3-4-1 为 CO<sub>2</sub> 热泵循环过程, 5-6-7-5 为空气循环过程。

CO<sub>2</sub> 热泵系统的能量利用率可用 COP 来表示:

$$COP = \frac{\text{输出的有效热量}}{\text{输入的总能量}}$$

COP 反映了 CO<sub>2</sub> 热泵系统的性能, 但没有考虑整个干燥系统的能量利用情况。用于整个干燥系统的能量利用率的评价指标为单位除湿率 SMER:

$$SMER = \frac{\text{除水量}}{\text{干燥系统消耗的能量}} \text{ (kg/kWh)}$$

## 2 CO<sub>2</sub> 热泵干燥的优点

### 2.1 环境性能优良

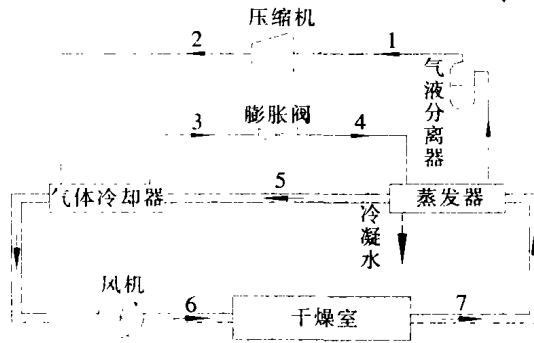


图 1 CO<sub>2</sub> 热泵干燥系统示意图

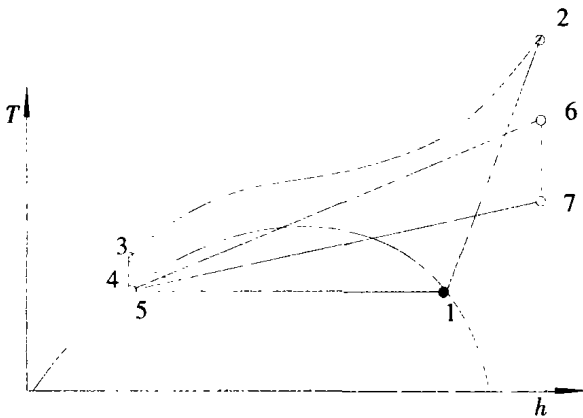


图 2 CO<sub>2</sub> 热泵干燥系统 T-h 示意图

二氧化碳热泵采用的制冷工质是自然工质 CO<sub>2</sub>, 其臭氧层破坏势 ODP=0, 温室效应势 GWP=1, 而目前热泵系统的制冷剂如 R12、R22 和替代工质 R134a 等, 其 GWP 值分别为 CO<sub>2</sub> 的 7100、1600 和 1200 倍<sup>[5]</sup>。因此, 对于闭路循环的 CO<sub>2</sub> 热泵干燥来说, 既不受外界气候条件的影响, 一年四季均能在同一条件下稳定运行, 又避免了废气的排出和制冷剂的泄漏对大气的

环境污染, 环境性能优良。

### 2.2 节约能源

在常规的干燥系统中, 通常是将外界环境的空气经过加热器加热, 进入干燥室干燥物料后, 高温高湿的空气排至室外。应用 CO<sub>2</sub> 热泵干燥技术, 可以从干燥室排出的高温高湿空气中回收部分显热和潜热, 或者将湿空气除湿后供干燥系统循环使用, 避免了湿热空气排放所造成的热量损失, 节约能源。另外, CO<sub>2</sub> 热泵运行时气体冷却器的放热过程是个变温过程, 能够实现与冷却介质(空气)之间的良好温度匹配, 正好满足热泵干燥中梯级放热的要求, 减小了系统有效能损失, 提高了能源利用率。

### 2.3 干燥质量高

CO<sub>2</sub> 热泵干燥系统对温湿度的控制一方面通过安装先进的传感器和控制装置, 另一方面在结构设计上通过添加辅助冷凝器或外部换热器, 从而实现对干燥室温湿度的准确调节, 保证了物料的干燥质量, 特别适合于低温干燥。

### 2.4 系统结构紧凑

CO<sub>2</sub> 热泵系统运行时压力很高(4~10MPa), 使得其容积制冷量较高, 高的工作压力和超临界区运行, 使其流动和传热性能提高, 大大减小了压缩机与换热器的尺寸, 使整个系统非常紧凑。

## 3 实例分析

目前, 国内外对作为制冷工质的 CO<sub>2</sub> 研究大多集中在汽车空调和热泵热水器上, 对于 CO<sub>2</sub> 热泵干燥的研究不多, 公开的文献<sup>[6,7]</sup>只有德国 Essen 大学的 E.L. Schmidt 和 K.Klöcker 等对 CO<sub>2</sub> 热泵干燥的可行性进行了分析与讨论, 他们比较了两个分别采用 CO<sub>2</sub> 和 R134a 为制冷工质的热泵干燥系统, 结果表明采用 CO<sub>2</sub> 系统的 COP、SMER 以及有效能损失比采用 R134a 的系统好; 另外, E.L.Schmidt 和 K.Klöcker 等还研制了一台 CO<sub>2</sub> 热泵干燥机, 如图 3 所示。CO<sub>2</sub> 热泵干燥机由两部分组成, 即制冷循环和空气循环系统, 辅助冷凝器位于气体冷却器和节流阀之间, 空气经过风扇、气体冷却器、干燥机旋转滚筒和蒸发器完成干燥过程。为比较干燥效果, Schmidt 等用传统的电加热干燥机和两台不同功率的 CO<sub>2</sub> 压缩机进行对比实验。表 1 是压缩机的性能参数, 表 2 是典型参数和实验结果, 表中: 除湿率(MER)为单位时间内的除水量; 单位能耗(SEC)为除去 1kg 水的能耗; 节能潜力(ESP)为电加热干燥机与 CO<sub>2</sub> 热泵干燥机的能耗(包括压缩机和风机能耗)之差与电加热干燥机的能耗的比值。

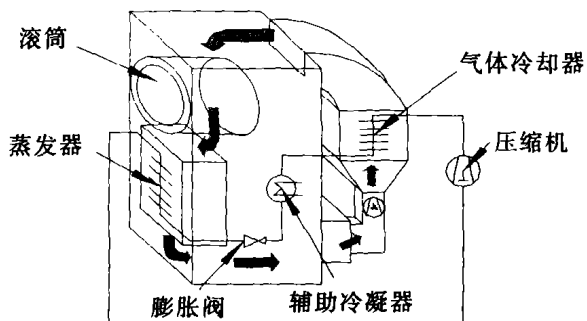
图3 CO<sub>2</sub>热泵干燥机

表1 压缩机的性能参数

名称	Bock(德国)	Dorin(意大利)
型号	FKX3*CO <sub>2</sub>	CD4.017S
类型	开式	半封闭式
缸数	2	2
行程(mm)	49	11
缸径(mm)	28	34
排量(m <sup>3</sup> /h)	1.8~5.4	1.7

表2 典型参数和实验结果

干燥系统	电加热干燥机	CO <sub>2</sub> 热泵干燥机	
压缩机	-	Bock	Dorin
致热量	12kW	16 kW	12 kW
空气入口温度	130℃	60℃	50℃
MER (kg/h)	9	12	5
SMER (kg/kWh)	0.72	1.54	2.05
SEC (kWh/kg)	1.39	0.65	0.49
ESP (%)	-	53	65

由表2知,电加热干燥机的干燥室入口空气温度很高(130℃),而CO<sub>2</sub>热泵干燥机的只有50℃和60℃,因此,CO<sub>2</sub>热泵干燥机适于低温物品干燥,如热敏性物料、生物制品、食品和种子等。单位除湿率SMER反映了整个干燥系统的能量利用率,传统的热泵干燥装置在100℃时SMER值为1.0~4.0 kg/kWh,平均为2~2.5 kg/kWh<sup>[9]</sup>。该实验中,电加热干燥机的SMER只有0.72kg/kWh,明显低于热泵干燥机,而CO<sub>2</sub>热泵干燥机的SMER为1.54和2.05 kg/kWh,是电加热干燥机的2.2和2.8倍。电加热干燥机的单位能耗(SEC)为1.39 kWh/kg,而CO<sub>2</sub>热泵干燥机的单位能耗仅为前者的47%和35%,因此,其节能潜力(ESP)为53%和65%。

#### 4 展望

CO<sub>2</sub>热泵干燥技术是伴随着制冷技术的发展而形成的一种新的热泵干燥技术,由于采用自然工质CO<sub>2</sub>作为制冷剂,与其它热泵干燥技术相比,具有无可比拟的环保优势,与电加热等传统的干燥技术相比,

具有显著的节能效果。因此,在节能与环保日益成为社会发展的重大问题的前提下,节能环保的CO<sub>2</sub>热泵干燥技术必然具有良好的发展前景。目前,应该从以下几个方面推动这项技术的发展。

1) CO<sub>2</sub>热泵运行时为跨临界循环,不同于传统热泵的亚临界循环,目前对其循环与换热性能的研究还不成熟,应加强CO<sub>2</sub>跨临界循环机理的研究。

2) CO<sub>2</sub>热泵运行时压力非常高(4~10Mpa),传统的换热设备不适合CO<sub>2</sub>跨临界循环,应开发与CO<sub>2</sub>热泵循环相适应的压缩机和微通道换热器等换热设备。

3) 开发新型自动控制系统,提高CO<sub>2</sub>热泵干燥机干燥介质的控制精度,实现对干燥质量的在线和智能控制。

4) 对CO<sub>2</sub>热泵干燥系统包括制冷系统、空气循环系统和控制系统进行整体优化,提高系统的干燥质量和节能效果。

5) 开发多用途CO<sub>2</sub>热泵系统,根据生产实际,调整热泵系统的模块组合,从而使之具有干燥、空气调节、冷冻贮藏等多种功能。

#### 参考文献:

- [1] Zuhail Oktay, Arif Hepbasli. Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44:1193-1207.
- [2] 王以清. 节能环保型热泵干燥装置[J]. 能源工程, 2000, (5): 25-26.
- [3] 马一太, 魏东, 王景刚. 国内外自然工质研究现状与发展趋势[J]. 暖通空调, 2003, 33(1).
- [4] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 化学工业出版社, 1998.
- [5] 王侃宏. CO<sub>2</sub>跨临界循环的理论分析与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [6] E.L.Schmidt, K.Kl?cker, N.Flacke and F.Steimle. Applying the transcritical CO<sub>2</sub> process to a drying heat pump[J]. Int J Refrig, 1998, 21(3).
- [7] K.Klocker, E.L.Schmidt, F.Steimle. Carbon dioxide as a working fluid in drying heat pump[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, (24).
- [8] 高广春, 王剑锋, 冯仰浦. 热泵干燥机组性能研究进展[J]. 食品科学. 1995, (5).

来稿日期:2004年11月10日

曾宪阳 博士研究生 天津大学热能研究所 300072

天津市

马一太 教授, 博导 天津大学热能研究所

李敏霞 副教授 天津大学热能研究所