

带有喷射器的热泵冷冻干燥装置设计与性能分析^{*}

许树学 马国远 刘挺 周峰

【摘要】 设计了一种带有喷射器的热泵冷冻干燥装置。将结构简单、两相流工况适应性好的喷射器引入到热泵中,形成2个温度不同的蒸发器,分别用于冷冻室以及干燥环节回收热量。整个机组结构紧凑,喷射器回收了部分节流损失,提高了压缩机吸气压力,实现了冷冻-干燥联合的目的,并使得能量消耗降低10%~15%。

关键词: 热泵 喷射器 冷冻干燥

中图分类号: TB4 **文献标识码:** A

引言

近几年来,热泵冷冻干燥技术发展很快。热泵的应用范围也由早期的木材加工扩展到食品加工、茶叶烘干、蔬菜脱水、鱼类干燥、药物及生物制品的灭菌与干燥、污泥处理、化工原料及肥料干燥等诸多领域^[1-2]。

喷射器结构简单,无运动部件,能够在相对高压力的驱动下形成低压及低温。本文将喷射器引入热泵机组中,用于冷冻室,同时协同其他换热器完成对物料的冷冻和干燥工艺。

1 工作原理

系统由压缩机、喷射器、2个蒸发器、冷凝器及节流装置等组成,如图1所示。工作原理如下:流出压缩机的高温高压气态制冷剂经冷凝器风冷放热。流出蒸发器1的制冷剂经闪发器闪发后分为2股,一股为喷射器的工作流体,另一股经节流阀2二次

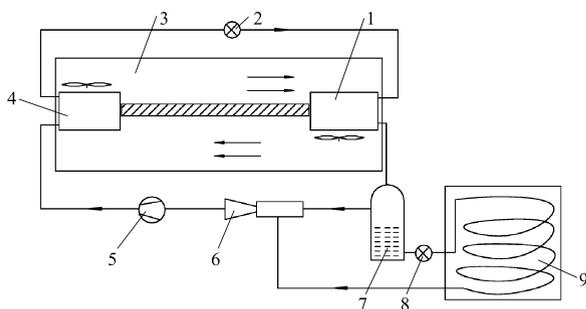


图1 热泵冷冻干燥装置示意图

1. 蒸发器1 2. 节流阀1 3. 干燥室 4. 冷凝器 5. 压缩机
6. 喷射器 7. 闪发器 8. 节流阀2 9. 蒸发器2(冷冻室)

节流后进入蒸发器2,吸热并制造出冷冻室后,被工作流体吸引、压缩进入压缩机。在干燥区域,冷凝器提供热风用来干燥含有少量水分的物料,吸湿后的空气通过同样置于干燥室内的蒸发器1吸热回收空气中的热量并除去其中的水分。干燥空气闭合循环,不受外界干扰,也不对环境造成冷热污染。

机组所涉及的热泵循环及 $p-h$ 图如图2、3所示(p 表示压力, h 表示焓值)。

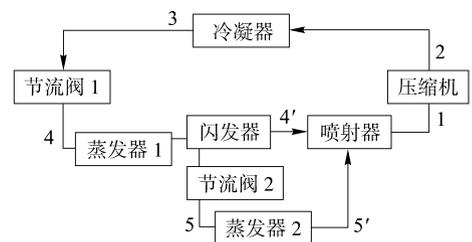


图2 热泵循环图

2 各部件的设计

研究表明,在氟利昂类制冷剂中,制冷剂 R12 喷射性能好于其他制冷剂^[3]。以 225 W 冰箱用 R12 全封闭活塞压缩机为

例进行设计,压缩机制冷性能系数 COP 取 2;冷冻室中蒸发器的负荷与干燥室内蒸发器负荷共 450 W,冷凝器负荷 675 W。

2.1 蒸发器与冷凝器

蒸发器与冷凝器负荷设计时要考虑冷冻室内负荷与干燥室内换热器负荷的协调,保证机组连续生

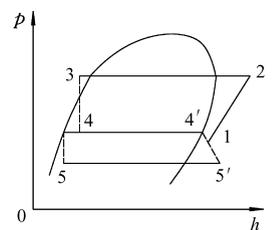


图3 $p-h$ 图

收稿日期: 2007-12-24

^{*} 北京工业大学第五届研究生科技基金重点资助项目(项目编号: YKJ2006065)

许树学 北京工业大学环境与能源工程学院 博士生, 100124 北京市

马国远 北京工业大学环境与能源工程学院 教授 博士生导师

刘挺 中国家用电器研究院 教授级高级工程师 博士, 100053 北京市

周峰 北京工业大学环境与能源工程学院 博士生

产。机组的工作状态为高压 0.80 MPa, 冷凝温度 33 ℃; 冷冻段低压 0.13 MPa, 蒸发温度 -23 ℃; 干燥除湿段低压 0.26 MPa, 蒸发温度 -5 ℃。同时考虑冷冻室及干燥室、水箱的漏热问题, 按照文献[4]提供的方法, 设计出的 3 个换热器的结构形式及功率分配如表 1 所示。

表 1 换热器的功率分配

部件	结构形式	功率/W
干燥室内冷凝器	翅片管式	675
干燥室内蒸发器 1	翅片管式	300
冷冻室内蒸发器 2	盘管式	150

2.2 喷射器

喷射器的设计较为复杂, 有一套专门的理论针对喷射器的设计[5]。气体动力函数法应用较成熟, 它针对给定参数的工作流体、引射流体和压缩流体, 通过假设循环确定可达喷射系数(或出口压力), 并以此为基础确定喷射器的主要截面积比, 再通过流量确定最终尺寸。

蒸发器 1、2 制冷剂流量分别为

$$m_1 = \frac{q_1}{r_1} = \frac{300 \times 10^{-3}}{351.5 - 200} = 1.98 \text{ g/s}$$

$$m_2 = \frac{q_2}{r_2} = \frac{150 \times 10^{-3}}{341.0 - 177.2} = 0.92 \text{ g/s}$$

式中 q_1, q_2 ——蒸发器 1、2 的换热量

r_1, r_2 ——蒸发器 1、2 中单位质量工质的放热量

喷射器喷射系数

$$u = \frac{m_2}{m_1 - m_2} = \frac{0.92}{1.98 - 0.92} = 0.87$$

工作流体压力 $p_p = 0.26 \text{ MPa}$, 引射流体压力 $p_H = 0.13 \text{ MPa}$ 。

因 $\frac{p_p}{p_H} > \frac{1}{\nu_{cr}} = 1.78$

式中 ν_{cr} ——工作流体的临界压比

故喷嘴的形状应是缩放型的, 工作流体通过喷嘴后速度变为超声速, 同时压力达到引射流体的压力, 吸引引射流体。根据模拟计算得出喷射器的可达出口压力 $p_C = 0.14 \text{ MPa}$, 并由此可设计喷射器的各主要截面积比, 再根据流量确定喷射器几何尺寸。

将喷射器引入到装置中, 主要是为了回收工质的压力能, 提高压缩机的吸气压力。由热泵的工作原理可知, 蒸发温度越高, 机组的性能系数越大。引入喷射器后使得系统的吸气压力饱和温度提升 2 ℃, 压缩机功耗降低 10% ~ 15%。

3 机组运行性能

以饱和含水粉丝的脱水过程为例进行机组性能分析。粉丝在 -18 ℃ 下冷冻脱水[6], 27 ℃ 左右风温下干燥。初始含水率(干基)为 1.5, 冷冻负荷为 502.5 kJ/kg。冷冻室每小时可冷冻 1.07 kg 绝干粉丝, 经冷冻脱水并热水洗后的潮湿粉丝含水率(干基)下降为 0.5。1.07 kg 绝干粉丝所需干燥负荷为 1 284 kJ。干燥室内冷凝器 1 每小时可提供热量约为 2 430 kJ, 可满足 1 284 kJ 的干燥负荷。

干燥室为封闭系统, 与外界无质量交换, 空气循环使用。考虑开箱取放物料及热泄露, 冷凝器的负荷要稍高于蒸发器 1。干燥过程如图 4 所示。

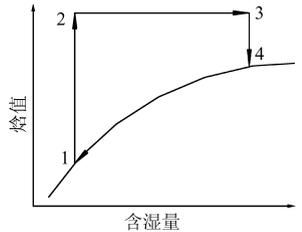


图 4 干燥过程示意图

干燥室内循环空气各部分状态参数如下。出蒸发器 1 的空气为低温饱和状态。状态参数为: 温度 $t_1 = 0 \text{ ℃}$, 含湿量 $d_1 = 2.3 \text{ g/kg}$, 相对湿度 $\varphi = 100\%$, 焓值 $i_1 = 0 \text{ kJ/kg}$ 。经冷凝器后含湿量不变, 相对湿度下降, 并具有了吸湿能力。状态参数为: 温度 $t_2 = 27 \text{ ℃}$, 含湿量 $d_2 = d_1 = 2.3 \text{ g/kg}$, 相对湿度 $\varphi = 10\%$, 焓值 $i_2 = 12 \text{ kJ/kg}$ 。干燥过程理想上为等焓过程。空气将热量传递给粉丝中的水分, 水分蒸发的同时空气含湿量增加, 其状态参数变为: 温度 $t_3 = 12 \text{ ℃}$, 含湿量 $d_3 = 8.2 \text{ g/kg}$, 焓值 $i_3 = 12 \text{ kJ/kg}$ 。状态 3 的空气经蒸发器 1 后放热, 并沿着相对湿度 $\varphi = 100\%$ 的曲线脱除其中的水分, 完成一个循环过程。

4 讨论

(1) 待热泵机组运行稳定后, 将需冷冻及已冷冻脱水待热风干燥的物料同时分别放入冷冻室及干燥室内(因过程为连续进行), 继续运行 1 h, 压缩机风机耗电 0.25 kW·h, 可得干燥粉丝 1.07 kg。通过调节风机的转速控制干燥速度, 进而保证产品质量; 调节节流阀 2 的开度, 可得到不同的冷冻温度。

(2) 由于喷射器的压缩作用, 产生同样蒸发温度, 会降低压缩机的压缩比, 从而降低压缩机功耗, 同时使整个机组更加紧凑。

(3) 实际生产中, 可与室外环境配合以降低能量消耗。如外界环境温度较低时, 冷冻的负荷可更多地由环境负担; 气温较高时, 干燥部分则可以在自然条件下先干燥一段时间再放入干燥室内干燥。

(下转第 210 页)

为了考察神经元自适应 PSD 和 FCMAC 控制器相结合的复合控制器的抗干扰能力,系统跟踪幅值为 3 mm、频率为 1 Hz 的方波信号,并在系统运行到 0.2~0.25 s 之间时,在液压缸上加 1 000 N 的干扰力,仿真结果如图 5 所示。基于神经元自适应 PSD 和 FCMAC 控制器相结合的复合控制器与其它两种控制方法相比,在出现外界扰动时系统输出的信号波动较小,可知此控制方法抗未知干扰的能力较强,具有很好的鲁棒性。

5 结束语

针对六自由度并联平台液压伺服系统的跟踪控制,将系统的动态误差和给定信号量作为 FCMAC

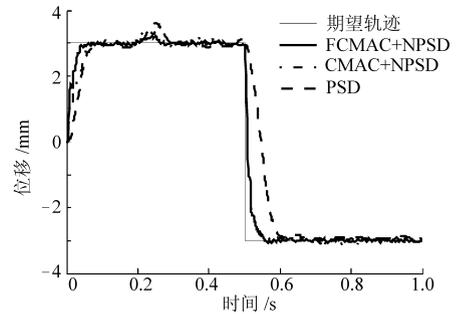


图 5 外加扰动时方波轨迹跟踪曲线

的激励信号,并与神经元自适应 PSD 控制器相结合构成复合控制,用来逼近并联平台的逆动力学模型。仿真结果表明,此控制方法具有良好的跟踪性能,并且具有较强的抗外力扰动能力和自适应能力。

参 考 文 献

- 1 马长林. 电液伺服系统的单神经元 PSD 控制研究[J]. 机床与液压, 2006(3):195~196.
- 2 戴群亮,贾贻发,王家■. 挖掘机器人轨迹的模糊 CMAC 神经网络控制[J]. 高技术通信, 2006, 14(6):377~380.
- 3 付明玉,林孝工,王宏键. 蒸气发生器单神经元自适应 PSD 自适应控制策略研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 23(5):522~525.
- 4 翟传润,战兴群,张炎华. 六自由度并联平台特性分析及其电液位置伺服系统的 CMAC 神经网络控制[J]. 中国工程科学, 2001, 3(10):36~40.
- 5 Commuri S, Lewis F L. CMAC neural networks for control of nonlinear dynamical system: structure, stability and passivity [J]. Automatica, 1997, 33(4):635~641.
- 6 孙炜,王耀南. 模糊 CMAC 及其在机器人轨迹跟踪控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1):38~42.
- 7 李辉. 一种自适应 CMAC 神经网络控制器的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9):2 233~2 235.
- 8 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.

(上接第 226 页)

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 石启龙,薛长湖,赵亚,等. 热泵变温干燥对竹黄鱼干燥特性及色泽的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4):83~86.
- 3 Sun D W. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants[J]. Energy Conversion Management, 1999, 40:873~884.
- 4 吴业正. 制冷原理及设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1997.
- 5 索科洛夫 E Я, 津格尔 H M. 喷射器[M]. 黄秋云,译. 北京:科学出版社, 1977:1~95.
- 6 杜连起,刘文合. 粉丝生产新技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.