

# 压缩空气冷冻干燥系统工作过程热力计算及实验验证

黄 虎

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

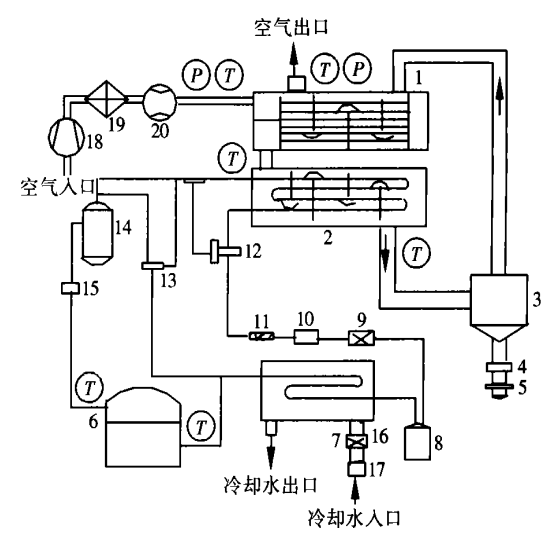
[摘要] 对压缩空气冷冻干燥系统工作过程进行了热力计算, 并对按计算结果设计的压缩空气冷冻干燥系统进行了实验, 实验结果与计算的一致性很好, 说明该热力计算方法可用于实际系统设计和设计方案分析。  
[关键词] 压缩空气, 冷冻干燥, 热力计算  
[中图分类号] TU831.5; TK11<sup>+</sup>2, [文献标识码] A, [文章编号] 1672- 1292- (2004)01- 0005- 03

压缩空气作为重要的动力源, 广泛地应用于机械、石化、轻纺、电力、食品、医药和国防等领域。不同的应用对压缩空气气源质量的要求不同, 文献[1]对压缩空气质量划分了不同的等级, 压缩空气中的含水量则是压缩空气质量的重要评价指标。压缩空气冷冻干燥系统采用冷却的方法除去压缩空气中的水分有着运行成本低和可靠性高的特点, 是压力露点 2℃以上的压缩空气使用场合的首选设备。本文对压缩空气冷冻干燥系统的工作过程进行了热力计算, 并就以热力计算为基础设计的实际设备进行了实验, 从而验证了热力计算的正确性。

## 1 压缩空气冷冻干燥系统的工作流程

压缩空气冷冻干燥系统的工作原理是通过降低被干燥气体的温度, 使压缩空气中的水分析出, 从而达到使压缩气体干燥的目的。按图 1 所示的压缩空气冷冻干燥系统的工作流程, 可将压缩空气冷冻干燥系统的工作分成两个系统流程: 压缩空气流程和制冷剂流程。

压缩空气流程为: 进入冷干机的被干燥压缩空气, 先进入预冷器, 在预冷器中与出蒸发器的已干燥低温冷空气进行热交换, 其焓、温度及含湿量下降, 出预冷器的被干燥压缩空气的压力露点已经降低, 但还未达到干燥的要求。被干燥气体继续进入蒸发器, 在蒸发器中与制冷剂进行热交换, 温度继续降低, 在蒸发器出口, 其温度达到所要求的压力露点, 出蒸发器的气水混合物进入汽液分离器, 在汽液分离器中分离出析出的水分, 干空气再进入预冷器, 并与进冷干机的热空气进行热交换, 使其温度升高后, 排出冷干机。若在预冷器与蒸发器之间



- 1. 预冷器; 2. 蒸发器; 3. 汽液分离器; 4. 排水防堵过滤器
- 5. 自动排水阀; 6. 制冷压缩机; 7. 冷凝器; 8. 储液器; 9. 电磁阀
- 10. 干燥过滤器; 11. 示液镜; 12. 热力膨胀阀; 13. 热气旁通阀
- 14. 气液分离器; 15. 气体过滤器; 16. 水量调节器; 17. 水过滤器
- 18. 空气压缩机; 19. 后冷却器; 20. 流量计

图 1 压缩空气冷冻干燥机工作流程及温度压力测点示意图

增加一个汽液分离器, 使在预冷器中析出的水分得以分离, 则效果更好。

制冷剂流程为: 压缩机排出的高温、高压制冷剂气体进入冷凝器, 放出热量, 冷凝为液体, 出冷凝器的液态制冷剂通过节流机构降压、降温而成为低温的汽液二相状态进入蒸发器。在蒸发器中与被干燥空气进行热交换而汽化, 过热气体出蒸发器后, 进入压缩机进行下一个循环。

## 2 压缩空气冷冻干燥系统工作过程的热力计算

压缩空气冷冻干燥系统的热力计算是整个系统设计计算的基础, 热力计算的目的是在已知条件

下,确定压缩空气冷冻干燥系统预冷器热负荷,蒸发器热负荷,冷凝器热负荷及被处理气体在各相关键点的状态.一般进行压缩空气冷冻干燥系统热力计算的已知条件为:

- (1) 被处理空气压力/Pa;
- (2) 被处理空气在标准下的体积流量/(Nm<sup>3</sup>/min);
- (3) 被处理空气进入冷干机的相对湿度/%;
- (4) 被处理空气进入冷干机的温度/℃;
- (5) 被处理空气需处理到的压力露点/℃.

压缩空气冷冻干燥机的热力计算分为两个部分:第一部分为压缩空气处理过程的热力计算,其目的是确定压缩空气冷冻干燥机中预冷器的负荷;第二部分是制冷系统的热力计算,这是在第一部分的基础上进一步确定压缩空气冷冻干燥机的冷凝器负荷,及压缩机的压缩功率等.

2.1 压缩空气处理过程的热力计算

图 2 所示为压缩空气冷冻干燥机压缩空气处理过程的示意图.

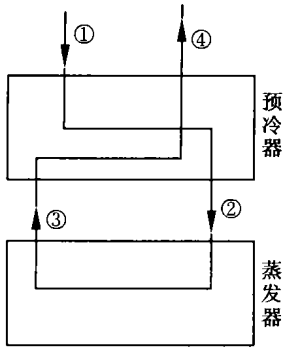


图 2 压缩空气处理过程示意图

- 压缩空气处理过程热力计算的步骤为:
- (1) 确定被处理空气的质量流量  $\dot{m}$
- $$\dot{m} = \frac{\rho Q_N}{60} \tag{1}$$
- (2) 计算冷干机进口压缩空气的焓  $h_1$  kJ/(kg.干)

在已知进入冷干机的压缩空气状态  $p_1$ 、 $t_1$ 、 $\phi_1$  的条件下,可由文献[2] 计算:

- $$h_1 = f(p_1, t_1, \phi_1) \tag{2}$$
- (3) 计算被处理空气出蒸发器的焓  $h_3$  kJ/(kg.干)

在计算  $h_3$  时,取  $p_3 = p_1$ ,“3”点状态的压缩空气的相对湿度为 100% .

- (4) 计算压缩空气冷干机预冷器负荷  $Q_y$  及蒸发器负荷  $Q_z$

$$Q_y + Q_z = \dot{m} (h_1 - h_3) \tag{3}$$

$$\frac{Q_y}{Q_z} = \varepsilon \tag{4}$$

式中:  $\varepsilon$  为预冷器与蒸发器的能量分配比.  $\varepsilon$  值取大,预冷器回收的冷量大,可减小蒸发器负荷及压缩机容量,但代来的问题是预冷器造价高及系统的变工况适应性差,一般  $\varepsilon$  的最大值为 1.

- (5) 计算压缩空气冷干机被处理空气的出口状态

被压缩空气出蒸发器时的含湿量  $d_3$  为压力  $p_3$ ,温度为  $t_3$  时饱和状态下气体含湿量,即:

$$d_3 = 0.622 \frac{p_{q, b(3)}}{p_1 - p_{q, b(3)}} \tag{5}$$

假设蒸发器中除去的水分在汽液分离器中得到全部分离,则出冷干机的被处理压缩空气的含湿量  $d_4$  为:

$$d_4 = d_3 \tag{6}$$

根据能量平衡原理,进入冷干机预冷器的热气流在预冷器中放出的热量应等于出蒸发器的冷气流在预冷器中获得的热量,则有:

$$h_1 - h_2 = h_4 - h_3 \tag{7}$$

所以 
$$h_4 = h_1 - h_2 + h_3 \tag{8}$$

式中: 
$$h_2 = h_1 - \frac{Q_y}{\dot{m}} \tag{9}$$

在假设  $p_4 = p_1$  的条件下,可通过迭代求得被处理压缩空气出冷干机的温度  $t_4$ ,进而与(5) 式的计算类似,求得被处理压缩空气出冷干机的饱和含湿量  $d_4$ ,则出冷干机的被处理空气的相对湿度  $\phi_4$  为:

$$\phi_4 = \frac{d_4}{d_{b(\phi_4)}} \times 100\% \tag{9}$$

2.2 压缩空气冷干机制冷系统热力计算

图 3 为压缩空气冷干机制冷系统工作过程的压焓示意图.

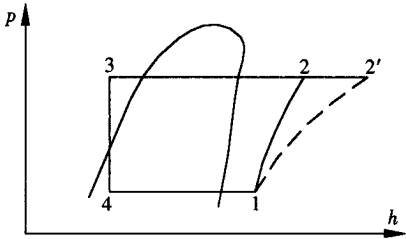


图 3 压缩空气冷干机制冷系统工作的压焓图

制冷系统热力计算的步骤如下:

- (1) 确定蒸发温度  $t_e$
- $t_e$  与被处理压缩空气压力露点  $t_p$  的关系

为:

$t_e = t_p - \Delta t$  (10)

$\Delta t$  一般取 2~ 5℃,  $\Delta t$  取得小, 蒸发温度高, 蒸发器换热面积大, 反之, 蒸发温度偏低, 则蒸发器换热面积小.

(2) 确定冷凝温度  $t_k$

$t_k = t - \Delta t$  (11)

式中:  $t$  为环境温度和进水温度, 当冷凝器采用风冷时,  $\Delta t$  一般取 15℃, 当冷凝器采用水冷时,  $\Delta t$  一般取 8~ 10℃.

(3) 确定制冷压缩机吸气温度  $t_1$

为防止制冷压缩机吸气带液, 一般制冷压缩机的吸气有一定过热度, 过热度一般取 5℃, 则

$t_1 = t_e + 5.$  (12)

(4) 确定制冷系统的过冷温度  $t_3$

为保证热力膨胀阀工作稳定及增加单位制冷工质的制冷量, 一般在冷凝器出口需有一定的过冷度  $\Delta t_g$ ,  $\Delta t_g$  一般以 5~ 8℃ 为宜, 则过冷温度为:

$t_3 = t_k - \Delta t_g.$  (13)

(5) 确定单位质量制冷量  $q_m$

可根据文献[3] 确定制冷压缩机进口的焓  $h_1$  (kJ/kg):

$h_1 = f(p_1, t_1)$  (14)

式中:  $p_1$  为蒸发温度  $t_e$  对应的饱和蒸汽压力, 由文献[3] 可进一步根据过冷温度  $t_3$  求得  $h_3$ :

$h_3 = f(t_3).$  (15)

(6) 求制冷系统制冷剂质量流量  $\dot{m}_r$

制冷系统制冷剂质量流量  $\dot{m}_r$  为:

$\dot{m}_r = \frac{Q_z}{h_1 - h_3}$  (16)

(7) 求制冷压缩机排气状态

在已知压缩机吸气状态( $p_1, t_1$ ) 的条件下, 按绝热压缩过程, 可求得绝热压缩条件下压缩机的排气状态  $t_2, h_2$ . 设压缩机的指示效率为  $\eta_i$ , 则压缩机排气的实际状态出口焓  $h'_2$  为:

$h'_2 = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_i}$  (17)

压缩机的指示功率  $N_i$  可用经验公式计算<sup>[4]</sup>:

$N_i = 1 - 0.6 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{-0.3} \right].$  (18)

(8) 制冷压缩机压缩功率与输入功率

制冷压缩机压缩功率  $W_i$  为:

$W_i = \dot{m}_r (h'_2 - h_1)$  (19)

设  $\eta_m$  为制冷压缩机机械效率, 则制冷压缩机的轴功率  $W_z$  为:

$W_z = \frac{W_i}{\eta_m}$  (20)

$\eta_m$  一般为 0.75~ 0.85.

压缩空气冷冻干燥机使用的制冷压缩机大多为封闭式制冷压缩机, 设  $\eta_{mo}$  为制冷压缩机的电机效率, 则制冷压缩机的输入功率  $W$  为:

$W = \frac{W_z}{\eta_{mo}}$  (21)

$\eta_{mo}$  一般为 0.65~ 0.85.

(9) 求冷凝器热负荷  $Q_k$

制冷系统冷凝器热负荷  $Q_k$  为:

$Q_k = \dot{m}_r (h_2 - h_3).$  (22)

3 实验验证与结论

根据以上热力计算过程, 设计了 10 Nm<sup>3</sup>/h 空气量的压缩空气冷冻干燥系统, 并建立了如图 1 所示的实验台位, 设计结果与实验结果见表 1.

表 1 系统热力计算与实验结果对比表

项目	计算值	实验值
压缩空气流量/(Nm <sup>3</sup> /h)	10	10.12
压缩空气压力/Pa	800 000	822 000
压缩空气进气温度/℃	40	40.62
压缩空气排气温度/℃	28.03	27.7
预冷器热气流温降/℃	12.0	11.5
预冷器冷气流温升/℃	19.1	17.8
蒸发器热气流温降/℃	20.0	18.7
压缩机功率/kW	1.52	1.6
预冷器负荷/kW	3.84	3.68
蒸发器负荷/kW	5.09	4.88

由表 1 可看出, 理论的热力计算与实测结果吻合很好, 其理论计算结果可靠性高, 可以作为压缩空气冷冻干燥系统设计的依据.

[参考文献]

[1] GB/ 13277/T- 91 一般用压缩空气质量等级[S].  
[2] 赵荣义. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.  
[3] 陈德雄. 制冷工质热力性质计算[J]. 流体工程, 1988 (5): 51~ 57.  
[4] 陆亚俊, 马最良, 姚杨. 空调工程中的制冷技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.

(下转第 45 页)

5 结束语

目前, 采用网络技术进行招标投标已经成为一种趋势, 但是招标投标的种类、规模不同, 具体操作的内容和操作的方法也就不相同, 应根据招标投标的实际情况进行深入细致的分析研究, 适当考虑原来人工操作方式和管理模式进行设计, 就能得到一个实用高效的系统. 系统设计的目标就是最大限度

地方便和满足用户需要.

[ 参考文献]

[ 1] 肖永顺. Delphi 程序设计[ M] . 北京: 人民邮电出版社, 2000.  
[ 2] 杨峰. Delphi 编程指南[ M] . 北京: 人民邮电出版社, 2000.  
[ 3] 沈兆阳. Java 与 XML 数据库整合应用[ M] . 北京: 清华大学出版社, 2002.

The Realization and Design of the Bidding MIS  
of Mechanical and Electrical Equipment

Zheng Aqi, Gao Jie, Luan Lihua

( College of Mathematics and Computer Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, PRC)

**Abstract:** The bidding MIS of the mechanical and electrical equipment is developed by adopting Delphi 6. The paper introduces the structure, the design, the main functions as well as the safety of the system.

**Key words:** mechanical and electrical equipment, bidding, MIS

[ 责任编辑: 刘健]

( 上接第 7 页)

Thermodynamic Calculation and Experimental Demonstration  
for Compressed Air Refrigeration Dryer

Huang Hu

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, PRC)

**Abstract:** The thermodynamic calculation and experiment for compressed air refrigeration dryer is accomplished. The experimental results have been identical to the calculation results, proving that the method of thermodynamic calculation is useful for the design of compressed air refrigeration dryer.

**Key words:** compressed air, refrigeration dryer, thermodynamic calculation

[ 责任编辑: 刘健]