

工作研究

## R404A/R744 复叠制冷机组设计探讨

胡泳波

上海美乐柯制冷设备有限公司 (上海 200083)

**摘要** 通过对 R404A/R744 复叠制冷机组的设计匹配计算,探讨了复叠制冷系统中 CO<sub>2</sub> 作为低温级制冷剂的应用问题。

**关键词** R404A R744 复叠式 设计

**中图分类号** TB 651

随着 R404A/R23 复叠制冷机组在能源、化工、医药等工业领域的应用逐渐广泛,同时对自然工质 CO<sub>2</sub> (R744) 作为制冷剂的系统研究逐渐深入,使 R404A/R744 复叠制冷机组在商业冷冻领域的实际应用成为现实。图 1 显示复叠制冷系统由高温级和低温级两部分组成,高温级使用中温制冷剂,低温级使用低温制冷剂,各自成为一个使用单一制冷剂的制冷系统,两系统之间由冷凝蒸发器衔接。中温制冷剂在冷凝蒸发器中蒸发,带走低温级的低温制冷剂热量,再经过高温级循环,在冷凝器中将热量传递给环境介质。低温制冷剂在冷凝蒸发器中冷凝,再经过低温级循环,在蒸发器中蒸发吸热,被冷却介质取冷量,获得所需要的低温。

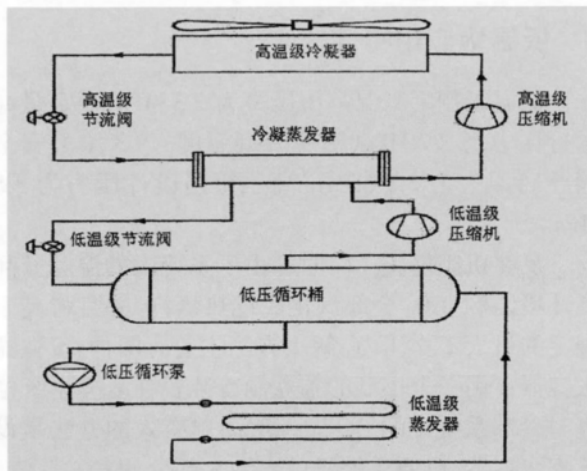
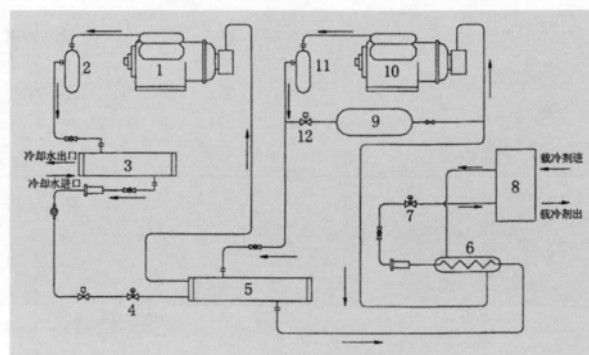


图 1 商业冷冻领域复叠制冷系统示意图

## 1 机组系统简介

如图 2 所示,高温级和低温级压缩机为半封闭活塞压缩机,高温级冷凝器、冷凝蒸发器与低温级回

热器为壳管式换热器,低温级蒸发器为板式换热器。低温级设置膨胀容器,膨胀容器高压入口设置恒压阀,低压出口设置调节阀。



1. 高温级压缩机 2. 高温级油分离器 3. 高温级冷凝器
4. 高温级节流阀 5. 冷凝蒸发器 6. 低温级回热器
7. 低温级节流阀 8. 低温级蒸发器 9. 膨胀容器
10. 低温级压缩机 11. 低温级油分离器 12. 恒压阀

图 2 复叠制冷机组系统图

## 2 制冷剂与冷冻油

高温级采用 R404A 作为制冷剂,低温级采用 R744 作为制冷剂,其物性参数见表 1。CO<sub>2</sub> 三相图如图 3 所示。可以看到 CO<sub>2</sub> 的两个特点:

### (1) 三相点压力与温度

三相点压力为 0.527 MPa,是大气压的 5 倍多,因此在常压下 CO<sub>2</sub> 只存在固相和气相,而不存在液相,也就是我们熟悉的干冰升华与凝华。

三相点温度为 -56.558 °C,因此其蒸发温度不得低于 -50 °C,否则必须考虑系统冰堵问题。

### (2) 临界温度

临界温度为 30.978 °C,使用水或空气冷却,不

作者简介:胡泳波 男 1970 年生 工程师 主要从事工业冷水机组与热泵机组、冷冻冷藏制冷设备的研发设计

表 1 R404A和 R744 的物性参数表

项目	R404A	R744
成分与分子式	R125/R143a/R134a(44 : 52 : 4)近共沸混合物	CO <sub>2</sub>
标准沸点 (0.1013 MPa)/°C	-46.222(滑移 0.78)	-78.4
三相点温度 /°C	-	-56.558
三相点压力 /MPa	-	0.527
临界温度 /°C	72.046	30.978
临界压力 /MPa	3.7289	7.3773
ODP	0	0
GWP	3900	1
绝热指数	1.125	1.30
制冷效果	114.15 kJ/kg	133.23 kJ/kg
(蒸发温度 -15 °C、 冷凝温度 30 °C)	2126 kJ/m <sup>3</sup>	7930 kJ/m <sup>3</sup>
安全分类	A1	A1

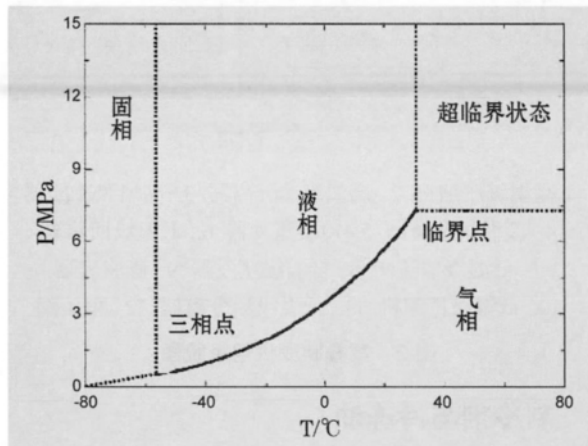


图 3 CO<sub>2</sub>三相图

易变为液体，故一般 CO<sub>2</sub> 制冷循环应用均为跨临界循环，而在复叠制冷系统中，CO<sub>2</sub> 为传统的亚临界循环。CO<sub>2</sub> 压缩机的相关研究资料表明，大部分 CO<sub>2</sub> 压缩机都采用 POE(多元醇酯)基合成油，也有推荐使用 PAG(聚烷撑二醇)基合成油，由于 CO<sub>2</sub> 是化学性质不活跃的气体，所以常规的润滑油完全适用于 CO<sub>2</sub> 压缩机，但这需要长期的试验才能确定，尤其是在长期使用过程中对蒸发器换热的影响。

### 3 机组主要性能参数

根据迈勒普拉萨特公式，低温复叠机组的中间温度(低温级冷凝温度)：

$$T_m = (T_c \cdot T_e)^{0.5} - 0.5\Delta T + 0.125\Delta T^2 / (T_c \cdot T_e)^{0.5}$$

$\Delta T$ ——冷凝蒸发器传热温差 K；

$T_c$ ——冷凝温度 K；

$T_e$ ——蒸发温度 K。

取  $\Delta T=5K$ ， $T_c=40+273.15=313.15 K$ ， $T_e=-50+273.15=223.15 K$ 。

计算  $T_m=261.86 K=-11.29 °C$ 。

综合考虑制冷剂特性，取  $T_m=-15 °C$ 。

复叠制冷机组工况见表 2。

表 2 复叠制冷机组工况表

计算工况	高级级(R404A)	低级级(R744)
冷凝温度 /°C	40	-15
过冷度 /°C	2	8.5
蒸发温度 /°C	-20	-50
过热度 /°C	10	20
吸气压力 /MPa	0.310	0.684
排气压力 /MPa	1.830	2.293
压比	5.912	3.354

根据表 2 工况，通过理论计算，复叠制冷机组制冷量为 18.8 kW，冷凝热量为 39.9 kW，低温级压缩机消耗功率 5.832 kW，高级级压缩机消耗功率 13.8 kW，具体数值见图 4。

### 4 低温级应用特性

低温级额定工况高压压力为 2.3 MPa，设定最高运行压力为 2.7 MPa(对应冷凝温度 -9.3 °C)，安全阀开启压力为 3.1 MPa，高压管路设计压力为 3.5 MPa。

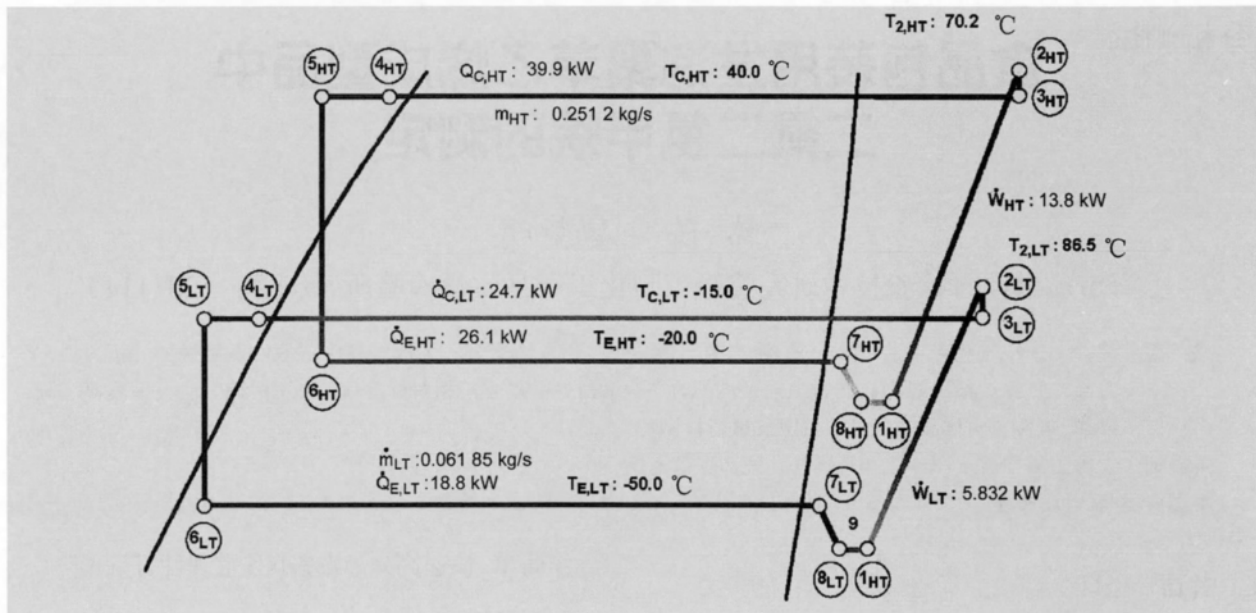
复叠机组停止运转时，由于系统内的温度升高到环境温度，CO<sub>2</sub> 全部汽化成过热蒸汽，并且将高于规定的最大工作压力。解决方法主要有两种：设置膨胀容器；用一个小型的独立制冷装置在复叠系统停机时冷却系统中的 CO<sub>2</sub>。一般简单有效的办法是设置膨胀容器，以便在停机后容纳大部分的 CO<sub>2</sub> 蒸汽。

膨胀容器的容积可按如下方法计算：

$$V_p = (G_d v_p - V_d) \frac{v_d}{v_d - v_p}$$

$V_d$ ——不计膨胀容器容积时低温部分的制冷系统总容积 m<sup>3</sup>；

$v_p$ ——环境温度、平衡压力下低温系统制冷剂气体比容 m<sup>3</sup>/kg；



6<sub>LT</sub>-7<sub>LT</sub>:低温级蒸发过程;7<sub>LT</sub>-3<sub>LT</sub>:低温级压缩过程;3<sub>LT</sub>-5<sub>LT</sub>:低温级冷凝过程;5<sub>LT</sub>-6<sub>LT</sub>:低温级节流过程;  
6<sub>HT</sub>-7<sub>HT</sub>:高温级蒸发过程;7<sub>HT</sub>-3<sub>HT</sub>:高温级压缩过程;3<sub>HT</sub>-5<sub>HT</sub>:高温级冷凝过程;5<sub>HT</sub>-6<sub>HT</sub>:高温级节流过程;  
Q:换热量与功率,kW;T:温度,°C;m:质量流量,kg/s

图 4 复叠制冷机组 T-S 图

$\nu_d$ ——环境温度、吸气压力下低温系统制冷剂气体比容  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$G_d$ ——不计膨胀容器容积时低温系统制冷剂充注量  $\text{kg}$ 。

机组环境温度定为  $35\text{ }^\circ\text{C}$ ，对应饱和压力为  $7.4\text{ MPa}$ ，停机平衡压力定为  $2.3\text{ MPa}$ ，恒压阀设定压力为  $2.7\text{ MPa}$ 。

不计膨胀容器容积时，本机组总容积为  $0.158\text{ m}^3$ ，制冷剂充注量为  $36\text{ kg}$ ，查得  $\nu_d$  为  $0.8249\text{ m}^3/\text{kg}$ ， $\nu_p$  为  $0.0225\text{ m}^3/\text{kg}$ ，则膨胀容器为  $0.67\text{ m}^3$ 。

由于  $\text{CO}_2$  的三相点压力高于安全阀排放背压——大气压力，排放过程中可能会形成固体  $\text{CO}_2$ ，而发生独特的冰堵现象，可能会影响安全阀的正常工作。解决方案主要有两种：安全阀内局部加热防冻，高低压旁通和低压侧超压排放相结合。本机组设置膨胀容器，可以采用第二种方法避免安全阀冰堵。

## 5 结语

复叠机组在商业冷冻领域的实际应用，还必须全面综合考虑系统回油、冷量调节、启动特性、化霜流程以及材料选用等一系列问题，进行设计优化以提高系统可靠性与经济性，通过进一步的深入研究，节能环保的自然工质复叠机组必将具有美好的发展前景。

参考文献：

- [1] ASHRAE Handbook- Fundamentals[M]. 2009.
- [2] ASHRAE Handbook- Refrigeration[M]. 2010.
- [3] 陈光明, 陈国邦. 制冷与低温原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 郭庆堂. 实用制冷工程设计手册[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1994.
- [5] 丁国良, 黄冬平. 二氧化碳制冷技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

收稿日期 2013 年 3 月

# Design of R404A/R744 Cascade Refrigeration Unit

Hu Yongbo

**Abstract:** Through design and matching computation of the R404A/R744 cascade refrigeration unit, discusses the application problems of  $\text{CO}_2$  as cryogenic refrigerant in the cascade refrigeration system.

**Key words:** R404A; R744; Cascade; Design