

文章编号:1001-5078(2007)08-0750-03

## 喷射式 J-T 制冷器的流量比研究

杨家艾, 胡颖涛, 刘 刚  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:**通过对喷射式 J-T 制冷器的热力分析, 推导出了制冷器预冷级与制冷级的流量比的理论最小值, 可为此类制冷器的设计提供参考。用实例说明了制冷器流量比在制冷器设计中的重要作用。

**关键词:**喷射式 J-T 制冷器; 流量比

**中图分类号:** TB61<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A

## Study of the Spray J-T Cooler's Flowrate Ratio

YANG Jia-ai, HU Ying-tao, LIU Gang  
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the thermodynamic process of the spray J-T cooler, the theoretical minimum ratio of the cooler's flowrate has been derived. The minimum ratio of cooler's flowrate can be guidance in the design of that type cooler. Some instances show that it is useful for the ratio of the cooler's flowrate in the design of that type cooler.

**Key words:** spray J-T cooler; ratio of flowrate

### 1 引 言

利用 J-T 原理制成的制冷器以其结构紧凑、故障率低、造价低廉等优点广泛应用于红外制导装置的冷却。具有预冷的喷射式 J-T 制冷器比传统的 J-T 制冷器具有更低且更稳定的制冷温度, 另外由于喷射式制冷器与红外器件是分开布置的, 制冷器传递给红外器件的机械振动会更小, 因此在某些场合喷射式 J-T 制冷器比传统 J-T 制冷器更有优势。喷射式 J-T 制冷器是一种有预冷的两级节流制冷器, 其中制冷级的制冷工质是不参加返流的, 工质的预冷工作全部由预冷级的工质来承担。由于喷射式节流制冷器的这一工作特点, 要求它的预冷级与制冷级具有合理的流量比, 以确保制冷器的正常工作。

### 2 喷射式 J-T 制冷器的工作原理

喷射式节流制冷器的结构如图 1 所示, T-S 图

如图 2 所示。压力为  $P_0$ , 温度为  $T_0$  的状态为 0 的高压制冷工质(通常为氩、氮)从制冷器的进气端并联进入制冷器的毛细管 B, C, C', 被毛细管外的回流气体预冷后, 成为状态为 1 的工质, 此时, 毛细管 C, C' 中流量为  $m_p$  的工质在制冷器的锥头部分内节流, 节流后的气液混合物的压力和温度分别为  $P_M$  和  $T_M$ , 它使毛细管 B 中的制冷工质在锥头内得到充分预冷, 预冷 B 中流量为  $m_c$  的工质后, C, C' 的制冷工质  $m_p$  流过毛细管与外壳之间的夹层, 去冷却毛细管 C, C', B 中的高压来流气体, 回热后从制冷器后部排出; 而制冷毛细管 B 中经过充分预冷后的状态为 2 的制冷工质  $m_c$  则经过喷嘴 A, 从制冷器的喷口节流后成为压力和温度分别为  $P_e$  和  $T_e$  的气液混合物, 喷射到需要冷却的红外芯片上。

**作者简介:** 杨家艾(1968-), 男, 高级工程师, 毕业于西安交通大学制冷与低温技术专业, 现从事红外制冷研究。中国制冷学会低温专业委员会委员、北京市制冷学会理事。

**收稿日期:** 2006-05-20; **修订日期:** 2007-02-06

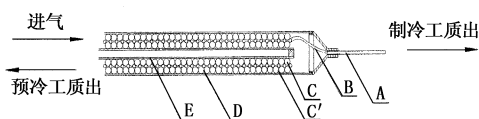


图1 喷射式节流制冷器结构示意图

A-喷嘴;B-制冷毛细管;C,C'-预冷毛细管;D-外壳;E-芯管

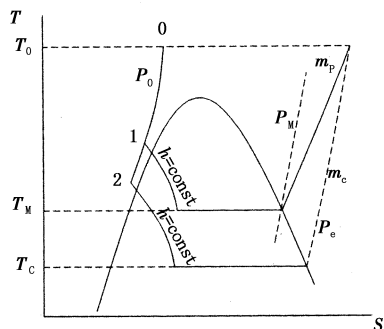


图2 制冷过程的T-S图

### 3 理论推导及计算

参考以上对制冷器工作原理的描述,制冷器的热力流程图示于图3。

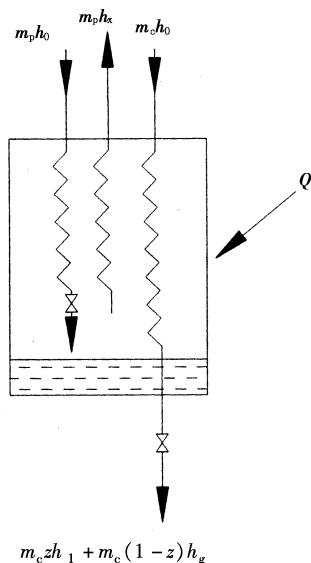


图3 制冷器热力流程图

分析制冷器的热力流程图,在稳定流动时,根据能量守恒,有如下能量关系式:

$$m_p h_0 + m_c h_0 = m_p h_x + (m_c z h_1 + m_c (1-z) h_g) - Q \quad (1)$$

式中,  $h_0$  为入口处高压气体比焓;  $h_x$  为回流(预冷级)工质出口比焓;  $h_1$  为饱和液态制冷工质比焓;  $h_g$  为饱和气态制冷工质比焓;  $m_p$  为预冷级工质流量;  $m_c$  为制冷级工质流量;  $z$  为制冷级工质的液化率;  $Q$  为漏热及不完全换热功率。

式(1)经变换得:

$$m_c z (h_g - h_1) = m_p (h_x - h_0) - m_c (h_0 - h_g) - Q \quad (2)$$

由于喷射式制冷器在制冷时只利用了液态工质的气化潜热,蒸发后的气体直接排空而不再起制冷作用,所以喷射式制冷器的制冷功率为:

$$q = m_c z (h_g - h_1) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),得:

$$q = m_p (h_x - h_0) - m_c (h_0 - h_g) - Q \quad (4)$$

从式(4)可以看出,式(2)、式(3)中出现的两个参数——液化率  $z$ , 饱和液态制冷工质比焓  $h_1$  已消去,这样给制冷器的设计带来了极大的方便。在制冷器的设计中,由红外芯片等需要制冷的结构件提出功率需求,通过估算漏热等损失  $Q$ ,就可以计算出制冷器的  $m_p$  和  $m_c$  的关系。

为了便于分析,假设制冷器工作在理想状况下,没有漏热及不完全换热功率,即  $Q = 0$ ,此时式(4)简化为:

$$q = m_p (h_x - h_0) - m_c (h_0 - h_g) \quad (5)$$

制冷器设计时对制冷器的最低要求是其制冷功率大于0,即:

$$q = m_p (h_x - h_0) - m_c (h_0 - h_g) > 0$$

变换后得:

$$\frac{m_p}{m_c} > \frac{(h_0 - h_g)}{(h_x - h_0)} \quad (6)$$

式(6)就是制冷器的理论最小流量比计算式。

下面计算几个有用的最小流量比:

若制冷器以氮气为工质,进气参数为 30MPa, 300K, 完全回热后的预冷级出口参数为 0.101325 MPa, 300K, 制冷器的工作温度为 77K, 工作背压为 0.101325 MPa, 此时工质的比焓<sup>[2]</sup>分别为:

$$h_0(30\text{MPa}, 300\text{K}) = 7639.2\text{J/mol}$$

$$h_g(0.101325\text{MPa}, 77\text{K}) = 2148.3\text{J/mol}$$

$$h_x(0.101325\text{MPa}, 300\text{K}) = 8716.6\text{J/mol}$$

$$\text{代入式(6), 得 } \frac{m_p}{m_c} > 5.1$$

同理改变制冷器的进气压力, 分别以 10MPa, 15MPa, 20MPa, 25MPa, 40MPa 等的进气焓值<sup>[2]</sup>代入式(6), 计算出的最小流量比与氩气<sup>[3]</sup>为制冷工质在相应压力和进气温度下计算出的最小流量比列于表1。

表1 制冷器在不同进气压力下的理论最小流量比

| 理论最小流量比<br>工质种类 | 进气压力/MPa |      |      |      |      |      |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|
|                 | 40       | 30   | 25   | 20   | 15   | 10   |
| N <sub>2</sub>  | 4.9      | 5.1  | 5.4  | 6.1  | 7.3  | 10.2 |
| Ar              | 1.36     | 1.65 | 1.95 | 2.46 | 3.38 | 5.34 |

从表1可以看出,在氩气为制冷工质时,流量比可以有较低的值,而在氮气为制冷工质时,需要较大的预冷与制冷工质流量比。

实际上,由于制冷器的制冷功率最终是由制冷级的流量决定的,制冷功率越大就需要更大的制冷级流量,因而越大的流量比说明制冷器的总流量要更大。众所周知,在常规的节流制冷器中,Ar作为制冷工质比N<sub>2</sub>具有更大的制冷能力,同样的制冷量N<sub>2</sub>比Ar有更大的流量需求,通过以上的计算可知,在喷射式制冷器中也符合同样的规律。

表1是常温下制冷器理论流量比的最小要求,在红外系统中,常常要求确保制冷器在较恶劣的条件下(如高于70℃即343K的工作环境)正常工作。若考虑高温工作环境,如在343K的工作环境中,通过计算可知,30MPa N<sub>2</sub>所需的理论最小流量比为9.4,10MPa N<sub>2</sub>所需的理论最小流量比为19.3。

以上的计算过程还没有考虑到制冷器的漏热及不完全热交换等热损失,而且在实际设计中,制冷器必须要有一定的制冷功率,考虑以上因素后,工程实际中的制冷器的流量比是大于以上的计算值的。在工程应用中,一般要求制冷器当压力降为接近10MPa时也能有一定的制冷功率,因此设计当氮气作为制冷工质时,制冷器的实际流量比取值为15~20或更高。

#### 4 几个实例

(1)某一制冷器在30MPa,300K氮气时的流量为 $m_p = 66.7\text{L/min}$ , $m_c = 7.5\text{L/min}$ ,流量比为 $m_p/m_c = 8.9$ ,在30MPa时出液量不大,压力为15MPa已不见有明显的液氮喷出,即其最低维持压力约为15MPa。从表1可知,理论状态下,流量比为8.9时的氮气的最低维持压力在(10~15)MPa之间,比值8.9是15MPa时的理论最小流量比的1.2倍。若考虑热损失,理论和实际值有很好的对应。

此制冷器由于流量比设计值过小,已小于10MPa时的理论最小值,低压维持压力较高,制冷器在高压30MPa时的制冷量也不大,在红外系统中是不适用的。

(2)另设计了一支制冷器,30MPa,300K氮气时的流量为 $m_p = 114\text{L/min}$ , $m_c = 6\text{L/min}$ ,流量比 $m_p/m_c = 19$ ,在30MPa时出液量很大,实测压力为约10MPa才不见明显液氮喷出,此最低维持压力下的流量比约为理论值的1.86倍,考虑热损失后是合理的。与前一支制冷器相比,此制冷器有较大的制冷功率和较低的维持压力,能满足红外系统工作的需要。对比前一支制冷器,30MPa时,虽然本支制冷器的 $m_c = 6\text{L/min}$ ,小于前一支制冷器的7.5L/min,但由于本支制冷器的流量比比前一支大,本支制冷器具有更大的制冷功率,也就是说,制冷功率不完全由制冷级的流量决定,也决定于制冷器的流量比。

#### 5 总结

对喷射式J-T制冷器的工作原理进行了介绍,通过热力分析,推导了此类预冷型节流制冷器的理论最小流量比,为制冷器的设计提供了有益参考。用实例说明了制冷器流量比在制冷器设计中的重要作用。

实际的制冷器流量比有很多影响的因素,且同一支制冷器的流量分布由于制冷器的压力变化和工作进程的不同是一个变化的过程,因此在实际的设计中应该依据实验最终确定制冷器的结构参数。

#### 参考文献:

- [1] 陈国邦,等.最新低温制冷技术[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [2] Richard T Jacobsen, Richard B Stewart, Majid Jahangiri. Thermodynamic properties of Nitrogen from the freezing line to 2000K at pressures to 1000MPa[J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1986, 15(2): 735-909.
- [3] Richard B Stewart, Richard T Jacobsen. Thermodynamic properties of Argon from the triple point to 1200K with pressures to 1000MPa[J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1989, 18(2): 639-789.
- [4] 郑大振,等.分布节流装置研制及其流量确定[J].低温与超导, 1987, 15(2): 1-8.