

文章编号:1001-5078(2007)01-0053-03

喷射式 J-T 制冷器的研制

杨家艾, 刘刚, 胡颖涛
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:研制了一种喷射式的 J-T 制冷器, 与传统的 J-T 制冷器进行了不同压力下的制冷温度的比较研究, 结果显示, 在不同工作压力下, 喷射式 J-T 制冷器能保持更低和更稳定的制冷温度。

关键词:喷射式 J-T 制冷器; 工作过程; 制冷温度

中图分类号: TB61⁺4 **文献标识码:** A

Development of Spray J-T Cooler

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

Abstract: A spray J-T cooler has been developed. A comparison research with traditional J-T cooler shows that the spray J-T cooler has lower cool temperature and more stable cool temperature under varied work pressure.

Key words: spray J-T cooler; work progress; cool temperature

1 喷射式 J-T 制冷器研制背景

J-T 制冷器以其结构紧凑、振动小、故障率低等优点广泛应用于各类红外系统的冷却。目前广泛使用的传统形式的 J-T 制冷器, 其制冷工质都参与了回流换热, 由于回流气的流动阻力的影响, 制冷工质的蒸发压力一般会数倍于大气压力, 因而制冷工质的蒸发温度(制冷温度)要高于其在一个大气压下的蒸发温度; 另外, 制冷器的蒸发压力也会随工作压力的变化而变化, 导致制冷温度会随工作压力的变化而有较大的改变。众所周知, 红外器件的性能与其工作温度是密切相关的, 如光导 InSb 在 80K 时的探测率约为 4.5×10^{10} Jones, 而在 100K 时约为 1.5×10^{10} Jones, 工作温度从 80K 升到 100K 时光导 InSb 探测率降为原来的 1/3。

为适应某些红外系统的特殊需要, 我们研制了一种新型的有预冷的喷射式 J-T 制冷器。这种喷射式制冷器采用了独特的分级节流的结构, 制冷工质的蒸发是在大气背景下进行, 由于喷射式制冷器的这种特殊的工作方式, 制冷器的制冷温度基本上只与制冷器使用的制冷工质有关, 工作压力的变化只会引起启动时间及制冷功率的变化, 而制冷温度能

保持在相对稳定的值, 这样从制冷温度方面确保了红外器件性能的稳定。

2 J-T 制冷原理分析及喷射式 J-T 制冷器设计思路

J-T 制冷器是利用实际气体等焓节流产生温度变化而制成的制冷器。对于 J-T 制冷器常用的制冷工质, 常温下一次节流是不可能液化的, 如 40MPa 的 N_2 其温度需要在约 172.5K 以下节流才能液化。为了在常温下能使制冷工质液化, 最常用的就是利用逆流热交换器(这也是常用的 J-T 制冷器的主要部件)来获得稳定持续的制冷。J-T 制冷器的工作流程示意图如图 1 所示, 其 T-S 示意图如图 2 所示。在起动阶段, 由高压入口进入的状态为 0 的高压气体工质, 流经逆流热交换器等焓节流后, 温度下降 Δt_1 , 成为状态为 2' 的低压气体工质, 工质状态 2' 流经逆流热交换器, 去冷却高压工质, 这样状态 2' 的低压气体回热后成为状态 4 而排出逆流热交换器; 于是状态为 0 的高压气体工质被冷却到较低的温

作者简介:杨家艾(1968-), 男, 高级工程师, 毕业于西安交通大学, 现在华北光电技术研究所从事红外制冷研究, 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:2006-04-19; **修订日期:**2006-06-29

度,成为状态 $1'$ 的气体,节流后成为比 $2'$ 温度更低的 $2''$,同理, $2''$ 的工质流经换热器去冷却高压进气的工质,使高压工质节流前温度降低。通过这样的循环,制冷器的高压工质逐渐被冷却到 $1c$ (此点对于40MPa的氮气温度约为172.5K),其节流后的状态为 3 ,此时制冷器开始有液相产生。高压工质继续被冷却,到达点 1 后,高低压工质热交换达到平衡,制冷器达到稳定工作状态,此时节流后的状态 2 在两相区,具备了稳定的制冷功率。平衡后的工作过程在T-S图上是过程 $0-1-2-3-4$ 。

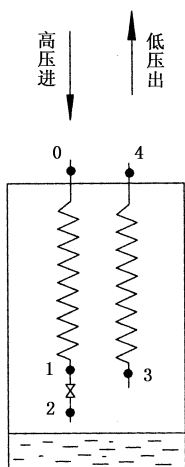


图1 J-T制冷器工作流程简图

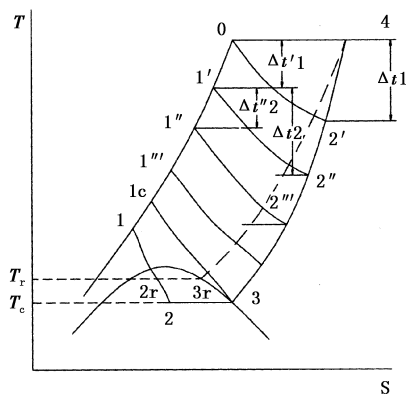


图2 J-T制冷器包括起阶段T-S图

从J-T制冷器的流程分析可以看出,当制冷器达到热平衡后,制冷器的制冷温度为 T_c 。理想状况下,T-S图上的线 $3-4$ (即节流后的低压工质流过逆流热交换器直到排到大气环境中的过程)是等压线,制冷工质的蒸发压力(点 3 的压力)等于大气环境压力(点 4 压力)。而在实际的J-T制冷器中,蒸发后的低压气态工质流经狭窄的翅片缝隙,这个过程的流动阻力不能忽略,而且流阻产生的压降是较大的,实际的工作过程在T-S图上应该是 $0-1-2r-3r-4$,这样工质的实际蒸发温度为 T_r 。显然,由于流动阻力的存在,节流后的制冷工质压力总

是大于当地大气压力,制冷温度总是高于当地大气压下该工质的蒸发温度。特别是由于微型化的需要,为追求更大的比表面积,毛细管外的翅片都尽可能排列得紧密,引起回流气体的流动阻力很大,导致实际的制冷温度 T_r 高出理论制冷温度 T_c 很多。另外,流动阻力是随气体流量的增加而增加的,因此,如果提高制冷器的工作压力,制冷器的流量会相应增加,引起流动阻力的增加,其结果是制冷器的实际制冷温度 T_r 升高。表1是一支J-T制冷器在不同工作压力下的制冷温度、蒸发压力的测试值。从这些数据可以看出,在氮气为制冷工质时,J-T制冷器的实际制冷温度高于理论值77K至少十几K,且制冷温度随工作压力的升高而升高。

通过以上的分析,我们知道,J-T制冷器制冷温度高于理论值且会由于工作压力的波动而波动,其主要原因是由于回流侧存在的流动阻力,引起制冷工质的蒸发压力高于环境压力。这给我们设计新型制冷器的启示是:如果制冷工质不参加回流,直接在大气压力下蒸发,这样制冷器的制冷温度就基本上会维持在当地气压下的蒸发温度,制冷温度也不会因为工作压力引起的流量波动而波动。依据这一思路,我们设计了喷射式J-T制冷器。

表1 J-T制冷器在传统工作方式下不同压力的制冷温度、蒸发压力测试数据

工作压力 (N_2)/MPa	制冷温度 /K	蒸发压力 (表压)/MPa
10	91.07	0.335
12	93.16	0.414
15	95.04	0.492
18	97.46	0.605
20	97.8	0.620
22	98.3	0.645
25	99.6	0.710
28	100.5	0.760
30	101.1	0.795
32	101.6	0.825
35	102.1	0.860

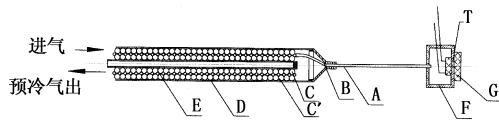
3 喷射式J-T制冷器的工作方式

喷射式J-T制冷器的采用两级节流制冷,如图3所示,工作过程的T-S图示于图4。其中毛细管C、C'是预冷级的毛细管,毛细管B是制冷级的毛细管。其工作过程是:高压气体由气体进口处同时进入制冷器的毛细管B、C、C',被回流气体预冷(T-S图中的过程 $1-2$),C、C'中的气体在制冷器的锥头部分节流(T-S图中的过程 $2-2'$),节流后成为温度

为 T_M 的气液混合物,它使 B 中的制冷工质得到充分预冷(T-S 图中的过程 2-3), 返流回热后排出(T-S 图中的过程 4-6), 而经过充分预冷后的 B 中的制冷工质则通过喷嘴 A, 节流后喷射到贮液器 F 中, 其中的液体在贮液器 F 中进行蒸发(T-S 图中的过程 3'-5-6), 冷却贮液器上的红外芯片 G。

从 T-S 图中可以清楚地看出, 此喷射式 J-T 制冷器是两级节流的制冷器, 毛细管 C、C' 中的气体节流后因为要通过逆流热交换器的低压侧, 它的节流后气压较高, 节流后的温度为 T_M , 而毛细管 B 中的气体被温度为 T_M 预冷级工质充分预冷后节流到更低的压力, 节流后的温度为 T_C 。

从工作过程可以看出, 用于冷却红外芯片的制冷级的制冷工质在与外界直接相通的贮液器中节流、蒸发, 其工作的低压为当地的环境气压, 蒸发温度 T_C (即制冷温度) 能接近当地气压下的最低值。而预冷级节流后压力会随着工作压力的变化而变化, 即 T_M 会上下波动, 过程线 2'-4 会上下平移。但由于制冷级工质始终在大气环境中节流, 因而 T_M 的波动不会引起制冷级工作温度 T_C 的改变(过程线 3'-5 不会移动)。



A-喷嘴; B-制冷毛细管; C、C'-预冷毛细管; D-外壳; E-芯管; F-贮液器; G-红外芯片; T-温度传感器及引线

图3 喷射式 J-T 制冷器与红外器件工作示意图

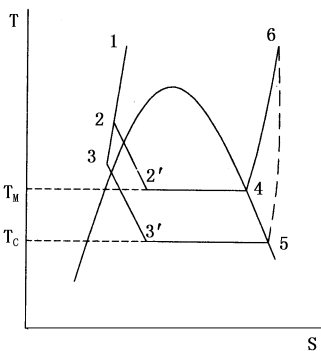


图4 喷射式 J-T 制冷器工作过程 S-T 图

4 试验结果及分析

在以喷射式 J-T 制冷器冷却的红外系统中, 我们在贮液器内加装了一个测温元件 T 及其引出线, 如图 3 所示。在 N_2 为工质的条件下, 对喷射式 J-T 制冷器, 从工作压力 12 ~ 35MPa 分为若干点进行了制冷温度的测试, 测试结果列于表 2, 其变化趋势曲线与传统型 J-T 制冷器的温度变化趋势曲线绘于图 5。

从测试结果可以看出, 喷射式 J-T 制冷器在不

同的工作压力下, 制冷温度有较好的稳定性, 大都在 78K 附近, 与一个大气压下氮气的饱和蒸汽温度相近。这说明喷射式 J-T 制冷器的制冷级节流后的工作压力是接近环境压力的。其中在 12MPa 时工作温度比其它压力下的温度高, 偏差较大, 不是因为制冷工质的蒸发压力高, 而是由于此时制冷器的制冷功率已小于负载功率, 不足以将负载温度冷却到制冷温度。

表2 喷射式 J-T 制冷器在不同工作压力下的制冷温度

工作压力 (N_2)/MPa	35	32	30	28	25	22	20	18	15	12
制冷温度/K	79.1	79.1	77.7	77.7	77.5	77.7	77.0	77.5	77.5	81.7

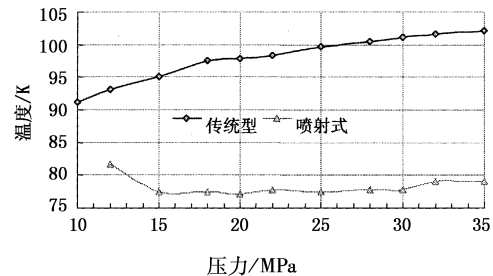


图5 制冷器工作压力与制冷温度关系图

从图 5 的温度变化趋势图中还可以看出, 传统型 J-T 制冷器的温度曲线是随工作压力的升高单调升高的, 且曲线整体位于喷射式 J-T 制冷器温度曲线的上方, 表明同一工作压力下传统型 J-T 制冷器的工作温度总是高于喷射式 J-T 制冷器, 其在 15MPa 时已有 17.5K 的差别, 在 35MPa 时的差值达 23K。

5 结论

通过分析 J-T 制冷器的工作原理, 研制了具有独特结构的两级喷射式 J-T 制冷器。通过实验数据的分析我们知道, 喷射式 J-T 制冷器的工作温度基本上不会因工作压力的改变而变化, 且能基本维持在当地气压下该工质的饱和蒸汽温度。而传统 J-T 制冷器工作时的制冷温度要大大高于当地气压下的制冷工质的饱和蒸汽温度, 且制冷温度随工作压力的变化会有较大变化。所以, 在对制冷温度有特殊要求的场所, 喷射式 J-T 制冷器比传统 J-T 制冷器有显而易见的优势。事实上, 在工程应用中, 使用喷射式 J-T 制冷器的红外系统在不同工作压力下有非常稳定的工作特性。

参考文献:

[1] 杨臣华, 梅遂生, 林钧挺. 激光与红外技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
 [2] 陈国邦, 等. 最新低温制冷技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.