

# 影响自调式 J-T 制冷器启动时间的因素

马艳红

(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘要:**在芯片和杜瓦结构确定后,对自调式 J-T 制冷器的研究是研制快启动焦平面红外探测器的重要工作。实验研究了热交换管长度、气源压力、流量对制冷器启动时间的影响。通过对实验结果的分析,阐述了回流阻力和自调机构受力对制冷器工作过程的影响,加深了制冷过程的理解,实验结论对研制快启动制冷器有一定帮助。

**关键词:**J-T;快启动;热交换管;压力;流量;回流阻力

**中图分类号:**TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.03.007

## Factors influencing the starting time of self-adjusting J-T cooler

MA Yan-hong

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** When the chip and the structure of dewar are determined, the research of the self-adjusting J-T cooler is the most important work for the quick-start IR FPA. The influence of the heat exchange tube, the pressure and the flow on the J-T cooler starting time is studied. The effect of back flow drag and self-adjusting mechanism force on the working process are described. The understanding on working process is deepened by analyzing the experimental results. The study is helpful for the development of quick-start J-T cooler.

**Key words:** J-T; quick-start; heat exchanger tube; pressure; flow; back flow drag

### 1 引言

J-T 制冷器以其结构紧凑、体积小、质量轻、启动快等优点,已广泛应用于红外系统。根据有无自调机构,J-T 制冷器可分为快启动式和自调式两大类,快启动式即为直喷型制冷器,多用于单元红外探测器组件,通常要求制冷系统的启动时间为 3~5 s。对于以 InSb 和 HgCdTe 为基础的第二代红外焦平面探测器组件,直喷型的快启动制冷器与自调式制冷器相比,不仅达不到更低的温度,而且达到同等温度所耗费的时间更长。因此,第二代焦平面探测器组件普遍采用自调式制冷器。自调式制冷器通常采用波纹管作为调节元件,根据被冷却组件温度的波动自动调节流量。

目前,国内波纹管型自调式 J-T 制冷器技术基本成熟,可以进行小批量生产。以中波 320×256 HgCdTe 红外焦平面探测器组件为例,80 K 时,制冷

器常温启动时间可以保证在 40 s 以内。随着国内武器装备水平的快速发展,整机用户对红外探测器组件的指标要求越来越高。其中,对制冷器启动时间的要求达到:常温启动时间 <25 s(80 K),高温启动时间 <30 s(80 K)。因此,对自调式 J-T 制冷器启动时间的研究已迫在眉睫。

### 2 波纹管型自调式制冷器工作过程

如图 1 所示,波纹管型 J-T 制冷器主要由热交换管、节流机构、传动机构等部件组成。其工作过程包括三个阶段:

第一阶段:波纹管自调前。此阶段属于强制对流换热,高压气体经过热交换管在节流孔中发生等熵膨胀得到低压低温的气体,低压降温气体由杜瓦

**作者简介:**马艳红(1982-),女,硕士,主要从事碲镉汞采用自调式 J-T 制冷器生产和研发工作。E-mail:yhma319@gmail.com

**收稿日期:**2012-08-06;**修订日期:**2012-08-27

冷指与热交换管的空隙穿过,将热交换管中的高压气体冷却,如此循环降温对热负载进行冷却。

第二阶段:波纹管自调中。当喷口出现液态工质时,充气腔内气体迅速降温,压力降低,带动传动机构对节流孔出气量进行调节。这个阶段属于瞬态过程,理论上比较复杂,而实际意义不大,可不予考虑。

第三阶段:波纹管自调后。自调后流量降低,制冷器工作处于稳定状态,冷指内积蓄液态工质,对芯片的降温属于热传导方式。

我们主要关注工作过程的第一阶段和第三阶段,第一阶段降温较快,降温时间与温度的关系基本成线性关系;第三阶段降温时间较慢。

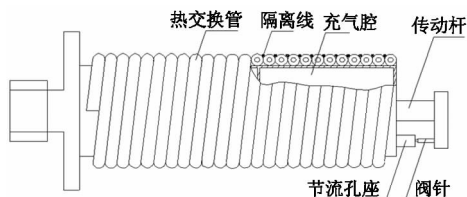


图1 波纹管型自调式 J-T 制冷器

### 3 启动时间影响因素分析

当芯片与杜瓦条件确定后,单独对制冷器进行改进是工作的重点。本文仅对热交换管长度、压强、流量三个因素进行实验研究,通过分析实验现象加深对制冷过程的了解。

测试用组件为中波  $320 \times 256$  HgCdTe 红外焦平面正式组件,测试过程中记录测温二极管电压值,80 K 对应的测温二极管电压值为 1.053 V,测温二极管安装位置如图 2 所示。实验工质采用氮气,工作环境为常温  $20^\circ\text{C}$ ,进行对比实验的组件相同。

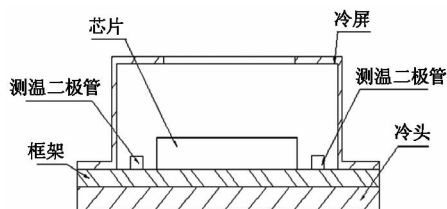


图2 测温二极管位置示意图

#### 3.1 热交换管长度对启动时间的影响

工程上,热交换管普遍采用带有紫铜散热片的不锈钢毛细管<sup>[1]</sup>,其长短直接影响制冷工质的换热和流动。

制作了两支制冷器,外形尺寸、节流机构、调节机构相同,热交换管长度分别为 400 mm,800 mm。从外形上看,400 mm 热交换管的制冷器后半段没有热交换管。测试了两支制冷器在 40 MPa 恒压条件下的降温时间,测试结果如图 3 所示。

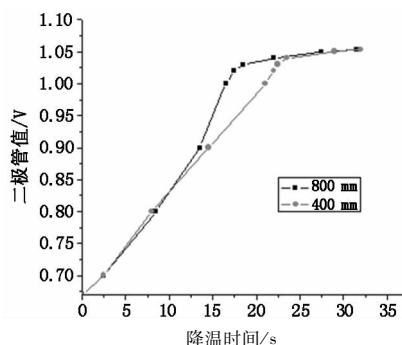


图3 热交换管长度对启动时间影响曲线

由图 3 可知:在 40 MPa 管道气条件下,制冷器在工作的第一阶段,800 mm 热交换管的制冷器比 400 mm 降温快,这说明增加热交换管长度,有利于加强气体的强制对流换热。但在制冷器工作的第三阶段,800 mm 长热交换管的制冷器降温速度逐渐减慢,与 400 mm 长热交换管的制冷器降温时间逐渐接近。经过分析认为:节流后的低压气体工质流经狭窄的热交换管翅片缝隙,这个过程的流动阻力不仅不能忽略,而且严重影响制冷器节流后的背压<sup>[2]</sup>。400 mm 长热交换管的回流阻力小于 800 mm 长热交换管,相应的背压降至大气压的速度较快,到达 77 K 的速度加快,因此出现了第三阶段的情况。

考核制冷器启动时间的指标是 80 K,因此总体看来,在 40 MPa 条件下,两支制冷器的启动时间相差不大。这个实验说明热交换管的翅片排列和绕制工艺不仅影响制冷器启动过程中的换热,也影响气体的回流,且回流阻力对制冷效果的影响更明显。

#### 3.2 气源压力对启动时间的影响

对比研究了同一支制冷器分别在 20 MPa、30 MPa、40 MPa 恒压条件下的常温启动时间,测试结果如图 4 所示。

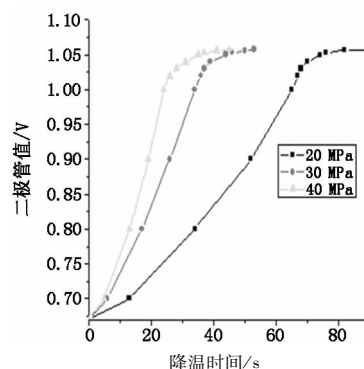


图4 20 MPa、30 MPa、40 MPa 不同压力对启动时间影响曲线

由图 4 可知:启动时间随着压力的增加而降低。当节流孔大小一定时,气体压力增加,流速增加,单位时间流过制冷器的流量增加,制冷器的制冷量必然增大,因此可以降低启动时间。

工作压力继续增大,出现了图 5 所示的情况。在制冷器工作的第一阶段,50 MPa 曲线与

40 MPa 曲线基本重合,在制冷器工作的第三阶段,使用 50 MPa 气压,制冷器无法降至 77 K。

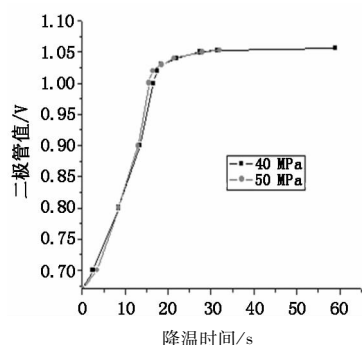


图5 高压对启动时间影响曲线

经过分析认为:制冷器热交换管翅片排列方式和绕制工艺确定后,制冷器的回流阻力基本为定值,随着压强的增加,单位时间内流过节流孔的工质流量增加,压强增大到一定值,再增大压强,会造成杜瓦冷指内背压增大,影响降温过程的“驱动力”,这种驱动力就是高压气体与节流后低压气流的压差。因此出现了图5所示制冷器工作在第一阶段的情况。50 MPa 时,出现在第三阶段的现象主要因为:制冷器自调机构受力改变<sup>[3]</sup>,无法带动阀针自调到位,制冷器出气量大,冷指内背压增大,氮气液化温度升高,无法降至常压下的液化温度 77 K。

气源压力实验说明当制冷器设计和制作工艺固定后,气源压力存在一个最佳值。在最佳压力之前提高供气压力,可以减少启动时间,供气压力高于最佳压力时,不但对启动时间没有贡献,制冷器还无法降至最低温。制冷器设计与工艺改变后应该找出制冷器的最佳使用压力,超过该压力,自调机构受力增大,容易损坏。

### 3.3 流量对启动时间的影响

从宏观上看,自调式 J-T 制冷器启动过程中的流量变化较大,在制冷器工作的第一阶段,流量迅速增大,存在一个最大流量值;在制冷器工作的第三阶段,流量迅速减小,并维持在一个平稳的小流量状态,以维持芯片到温后杜瓦的漏热。相同进气压力条件下,制冷器设计和制作工艺固定后,有一个固定的最大流量值,改变制冷器设计结构和制作工艺,可以改变最大流量值。

图6为最大流量值分别为 35 L/min, 88 L/min 的两支制冷器,40 MPa 恒压条件下,在制冷器工作的第一阶段的启动时间对比曲线。

由图6可知:气源压力相同的情况下,在制冷器工作的第一阶段,最大流量值为 88 L/min 的制冷器的启动时间明显快于最大流量值为 35 L/min 的制冷器,时间差大约为 10 s。经过分析认为:制冷器进

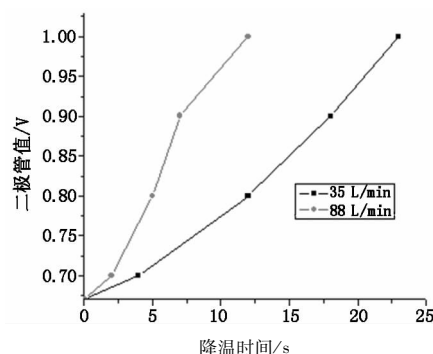


图6 流量对启动时间影响曲线

气流速相同,增大进气流量,在制冷器工作的第一阶段,带走的热量增加,可以大大减小降温时间。由于进气流量的增加,制冷器设计中重点考虑了自调机构的设计,以增加制冷器的可靠性。进气流量增加,回流气流量也相应增加,在设计上减少了回流阻力,使节流工质充分膨胀。

## 4 结 论

启动时间是考核焦平面红外探测器性能的重要指标,本文从实验方面研究了热交换管长度、气源压力、流量对启动时间的影响。从实验结果可知:①从探测器组件降温至 80 K 这个时间点看,40 MPa 时,400 mm 长热交换管和 800 mm 长热交换管对启动时间的贡献差别不大;②制冷器结构设计和制作工艺确定以后,存在一个最佳启动压力,在最佳压力之前提高供气压力,可以减少启动时间,供气压力高于最佳压力时,不但对启动时间没有贡献,制冷器还无法降至最低温;③在制冷器工作的第一阶段,增大进气流量可以明显提高启动时间。

通过对实验结果的分析可知:热交换管翅片排列方式和绕制工艺确定后,制冷器回流阻力基本确定,回流阻力严重影响制冷效果;当气流对阀针的作用力增大,自调机构无法自调到位时,制冷器将无法降至最低温。实验结果及分析对研制快启动制冷器有一定的帮助作用。

## 参考文献:

- [1] Bian Shaoxiong. Small hypothermia cryocoolers [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. (in Chinese)  
边绍雄. 小型低温制冷机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] Yang Jiaai. Development of spray J-T cooler [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 53-55. (in Chinese)  
杨家艾. 喷射式 J-T 制冷器的研制 [J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 53-55.
- [3] Wang Sanyu. Research on self-regulated cryocoolers with bellows [J]. Infrared Technology, 2006, 28(11): 651-654. (in Chinese)  
王三煜. 波纹管型自调式制冷器设计研究 [J]. 红外技术, 2006, 28(11): 651-654.