

文章编号: 1672-8785(2021)05-0013-05

一种提高波纹管型自调式 J-T 制冷器 控温精度的设计及试验研究

马艳红¹ 龚志红²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 空装驻北京地区第七军事代表室, 北京 100086)

摘 要: 为提高波纹管型 J-T 制冷器的控温精度, 对阀针进行了优化设计。在阀针针尖部位开槽, 使其与制冷器阀体上的主节流孔形成双节流孔。制冷器开启后, 工质进入主节流孔, 节流降温; 制冷器自调后, 阀针完全堵住主节流孔, 稳定小流量从针槽喷出。通过试验确定了阀针开槽的合理尺寸范围。试验结果表明, 阀针开槽可以有效提高制冷器的控温精度。

关键词: J-T 制冷器; 阀针; 控温精度

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.05.003

Design and Experimental Research for Improving Temperature Control Precision of Bellows-type Self-regulating J-T Cooler

MA Yan-hong¹, GONG Zhi-hong²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. The Seventh Military Representative Office of the Air Force in Beijing, Beijing 100086, China)

Abstract: In order to improve the temperature control precision of the bellows-type J-T cooler, the needle design is optimized. The tip of the needle is grooved to form double throttled holes with the main throttled hole on the valve body of the cooler. The working medium enters the main throttled hole for throttling and cooling after the start. The hole is completely blocked by the needle after self-regulating of the cooler, and the steady small flow is ejected from the groove. The reasonable size of the groove is determined. The test results show that the groove on the tip of the needle can effectively improve the temperature control precision.

Key words: J-T cooler; needle; temperature control precision

0 引言

近年来, 红外技术迅猛发展, 广泛应用于制导、红外成像、侦察告警、预警监视、中空远程防空等军事领域。由于具有结构紧凑、

体积小、质量轻、启动快等优点, J-T 制冷器广泛应用于红外系统, 其主要作用是冷却红外探测器, 提供低温工作环境, 降低噪声并提高灵敏度和分辨率。根据有无自调机构, J-T 制冷

收稿日期: 2020-11-19

作者简介: 马艳红(1982-), 女, 河南濮阳人, 高级工程师, 主要从事红外探测器 J-T 制冷器技术研究。
E-mail: 470594486@qq.com

器可分为直喷式和自调式两大类。首代红外探测器组件多用直喷式 J-T 制冷器，第二代焦平面探测器组件普遍采用自调式 J-T 制冷器。波纹管型自调式 J-T 制冷器技术相对成熟，应用最为广泛。该制冷器采用波纹管作为调节元件，根据被冷却组件的温度波动自动调节流量。

自调式 J-T 制冷器的控温精度对探测器组件的噪声指标影响较大，进而影响红外探测器的系统应用。由于波纹管型自调式 J-T 制冷器的工作模式，控温精度一般能保证在 3 K 以内，可以满足中波组件的应用要求。而长波组件则一般要求控温精度在 0.2 K 以内。这对常规波纹管型 J-T 制冷器来说很难实现。根据波纹管型 J-T 制冷器的工作原理和工作模式，提出了一种提高控温精度的设计。即在不改变 J-T 制冷器主体设计和工艺参数的基础上，只在阀针锥面处开槽，使其与制冷器阀体上的主节流孔形成双节流孔；制冷器自调后，阀针完全堵住主节流孔，稳定小流量从针槽喷出。制冷器实现流量稳定的工作模式，从而提高制冷器的控温精度。

1 波纹管型 J-T 制冷器的工作原理

J-T 制冷器是一种依靠节流效应进行降温的制冷器，主要由节流孔和热交换管组成。图 1 为一种简单的波纹管型 J-T 制冷器的结构示意图。该制冷器的工作原理如下：高压常温气体从进气口进入制冷器的内部，经热交换管的毛细管到达节流孔；根据焦耳-汤姆逊效应原理，

经过节流孔后气体体积迅速膨胀，压力急剧降低，温度大幅下降，从而冷却探测器芯片；回流气体通过热交换器外部翅片间隙排出，同时冷却毛细管内进气和制冷器的充气腔；充气腔内的压力降低，波纹管作伸长运动，带动传动机构移动，使阀针关闭节流孔，从而降低制冷器的流量。当温度升高时，充气腔内的气体压力相应升高，波纹管压缩，阀针打开节流孔；如此反复，实现了制冷器对气体流量的自动自调。

2 波纹管型 J-T 制冷器的工作模式

自调式 J-T 制冷器可随被冷却组件的温度波动而自动响应，并可实现制冷温度、制冷流量及制冷功率的自动调节。从宏观上看，自调式 J-T 制冷器的工作过程分为两个阶段：波纹管自调前与波纹管自调后。在第一阶段，大流量高压气体经过热交换管和节流孔后发生等焓膨胀，低压降温回流气体由杜瓦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。波纹管自调后，流量降低，制冷器处于相对稳定的工作状态。在制冷工质的液态温度下，制冷器以略高于实际需要的有效负载就能稳定工作。制冷器的工作模式如图 2 所示。其中， Q 为制冷器的流量， W 为制冷功率， t 为时间， W_0 为需要有效负载。图 2 表明，制冷器自调后存在两种模式：流量稳定式和自适应调节式。前一种模式下，节流孔持续有液态工质喷出。后

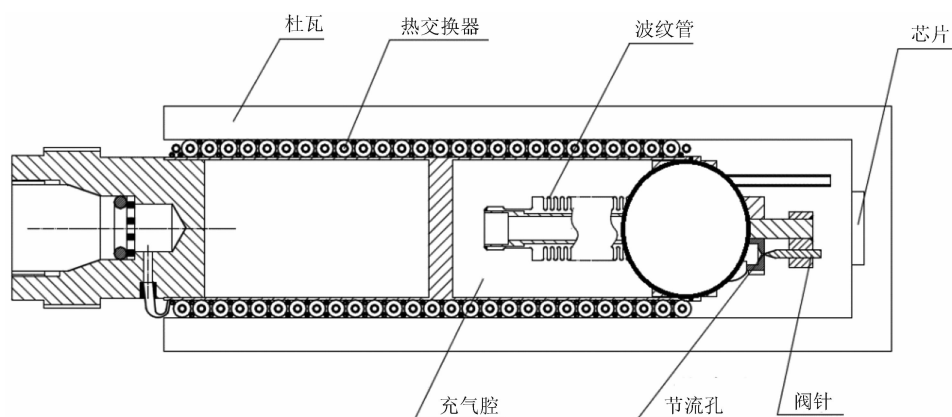


图 1 波纹管型 J-T 制冷器简图

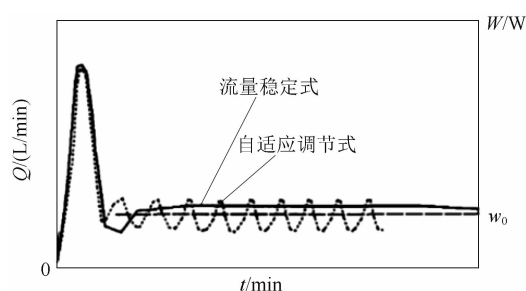


图 2 J-T 制冷器工作模式的示意图

一种模式下, 制冷器的自调机构需根据负载温度变化进行调节。流量稳定式制冷器的控温精度高, 自适应调节式制冷器的温度波动大, 控温精度低。

3 提高控温稳定性的设计

为了提高制冷器的工作可靠性, 一般要求制冷器阀针与节流孔同轴装配。制冷器自调后, 阀针会完全关闭节流孔, 此时制冷器的工作模式为自适应调节式, 存在小幅温度波动。相关经验表明, 若阀针与节流孔装配不同轴, 自调后阀针与节流孔之间会存在缝隙, 节流孔有小流量持续喷出。制冷器的控温精度优于自适应调节模式, 但是阀针与节流孔的装配同轴度差会降低制冷器的工作可靠性。在振动或冲击等极端环境下, 阀针易从节流孔振出而造成卡滞, 有时还会出现针尖断裂故障。

制冷器阀针与节流孔同轴装配且自调后有小流量持续喷出是提高制冷器控温精度的思路之一。不改变 J-T 制冷器的主体设计和工艺参数, 而只在阀针锥面处开槽(针槽见图 3)。制冷器自调后阀针完全关闭节流孔, 持续小流量从针槽喷出, 可实现制冷器自调后流量稳定的工作模式。

4 试验验证

采用直径为 0.5 mm 的阀针, 并将槽深设计为 $2\ \mu\text{m}$ 。加工槽宽分别为 $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $3.5\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $5.5\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 的一批开槽阀针。开槽阀针使用激光切割方式进行加工。由于针尖是锥面且槽尺寸较小, 在针尖上开槽难度较大, 很

难保证阀针针槽符合设计值。图 4 为开槽阀针的实物图。因此, 在针槽加工后对针槽尺寸进行精准测量。装入制冷器后, 通过对制冷器的控温精度进行测试, 可以验证开槽阀针对控温精度的影响。

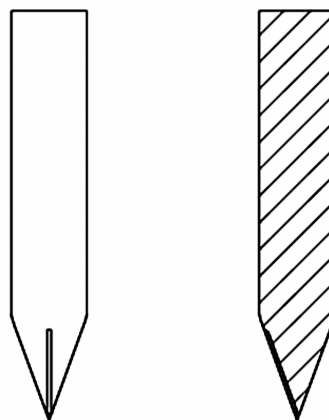


图 3 阀针开槽的示意图



图 4 开槽阀针的实物图

图 5 和图 6 所示为两支制冷器分别装入不同阀针进行控温精度测试的对比情况。其中, 阀针与节流孔的装配倾角不超过 3° 。测试条件为常温环境下 40 MPa 恒压氮气, 测试组件为 320×256 元 HgCdTe 中波红外焦平面组件。开槽阀针的针槽尺寸见表 1。

由图 5 和图 6 可以看出, 制冷器使用开槽阀针时的控温精度明显提高。其中使用阀针 2、阀针 3、阀针 4 的制冷器的控温精度在 1.5 mV (约 0.1 K) 以内, 完全可以满足长波组件的应用需求。

表1 开槽阀针的尺寸数据

阀针	开槽尺寸
阀针 1	槽宽 $3.8\ \mu\text{m}$ 、槽深 $2\ \mu\text{m}$
阀针 2	槽宽 $4.1\ \mu\text{m}$ 、槽深 $2\ \mu\text{m}$
阀针 3	槽宽 $5.2\ \mu\text{m}$ 、槽深 $2\ \mu\text{m}$
阀针 4	槽宽 $4.6\ \mu\text{m}$ 、槽深 $2\ \mu\text{m}$

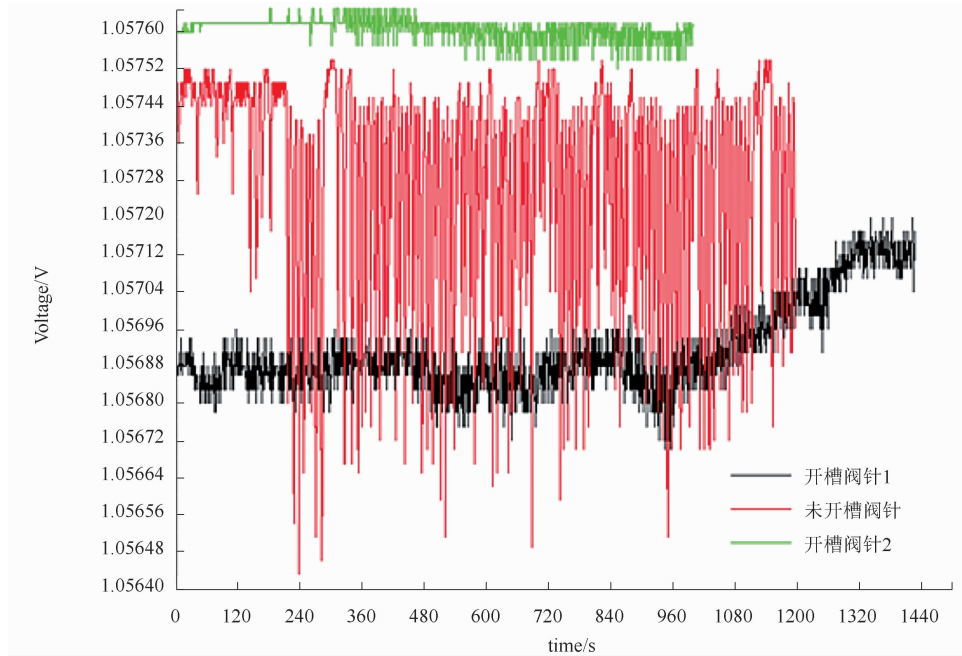


图5 两支开槽阀针与未开槽阀针制冷器的控温对比图

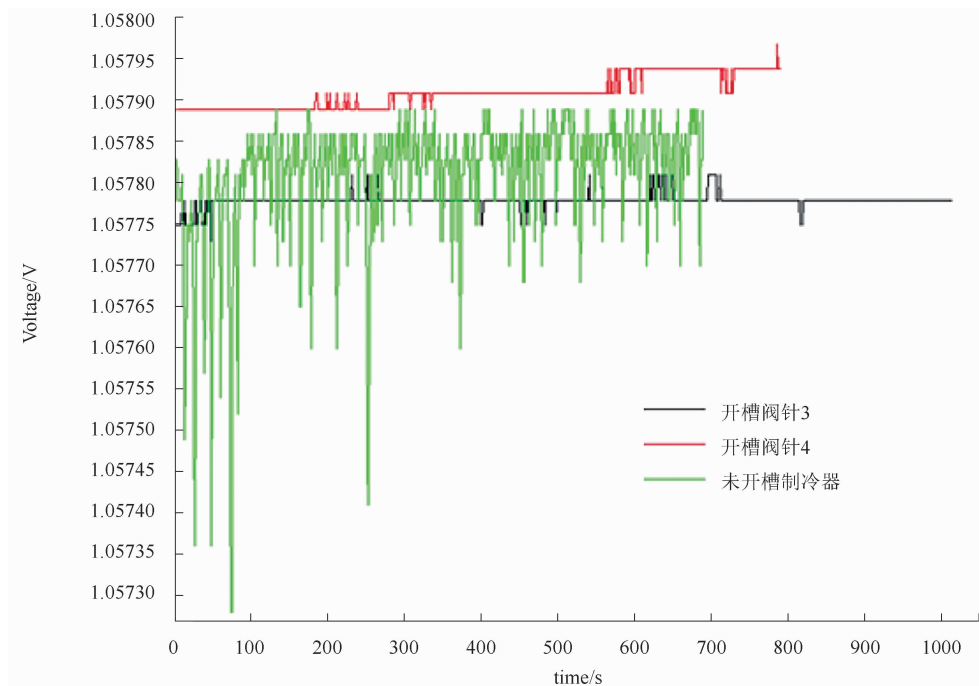


图6 两支开槽阀针与未开槽阀针制冷器的控温对比图

在试验中发现, 针槽尺寸不同, 制冷器的控温精度不同。针槽尺寸越大, 制冷器的控温精度越高。针槽太小对控温精度的贡献不大。若针槽过大, 制冷器的稳定流量会过大, 且耗气量大。由于使用 J-T 制冷器的红外探测器的气瓶容量有限, 制冷器的流量指标通常给定上限。通过稳定流量指标上限可以确定阀针针槽的最大尺寸。根据控温精度指标可以确定阀针针槽的下限尺寸。对于有控温精度要求的红外探测器组件项目, 通过确定阀针开槽尺寸的范围, 可以降低阀针加工成本和提高组件筛选的成品率。

5 总结

由于波纹管型 J-T 制冷器的工作模式, 控温精度一般在 3 K 以内, 可以满足一般中波组件的使用需求。对于长波组件, 控温精度要求极高。要将波纹管型 J-T 制冷器应用于长波组件, 必须提高控温精度。因此对阀针进行了优化设计。在阀针针尖部位开槽, 使其与制冷器阀体上的主节流孔形成双节流孔。制冷器开启后, 工质气体进入主节流孔, 节流降温。制冷器自调后, 阀针完全堵住主节流孔, 稳定小流

量从针槽喷出。通过试验确定了阀针开槽的尺寸。试验结果表明, 基于阀针开槽可以有效提高制冷器的控温精度。基于阀针开槽的双节流孔制冷器的控温精度可以满足长波组件的应用需求, 同时阀针开槽的设计思路可以应用于记忆合金等其他自调型 J-T 制冷器。

参考文献

- [1] 马艳红. 影响自调式 J-T 制冷器启动时间的因素 [J]. *激光与红外*, 2003, **43**(3): 258-260.
- [2] 孙维国. *空空导弹光电探测器设计* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 边绍雄. *小型低温制冷机* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 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.
- [5] Chien S B, Chen L T, Chou F C. A Study on the Transient Characteristics of a Self-regulating Joule-Thomson Cryocooler [J]. *Cryogenics*, 1996, **36**(12): 979-984.
- [6] Chien S B, Chen L T. Two-phase Coexistence Analysis of the Bellows Control Mechanism for a J-T Cryocooler [J]. *Cryogenics*, 1999, **39**(4): 359-365.