

〈制冷技术〉

## 记忆合金制冷器自调机构的设计

韩蓬磊, 聂雪莲

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 介绍了记忆合金在低温下发生形变的原理及其在节流制冷器中的应用, 针对以螺旋弹簧形状记忆合金材料为自调元件的节流制冷器, 对其实现自调的条件、影响自调时间以及自调后稳定流量的参数进行了论述, 并阐述了记忆合金自调型节流制冷器自调时间与探测器到达工作温度时间之间的关系。

**关键词:** 记忆合金; 节流制冷器; 自调时间; 稳定流量

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)07-0679-05

## Design of Self-Regulating Mechanism for Shape Memory Alloy Joule-Thomson Cooler

HAN Penglei, NIE Xuelian

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

**Abstract:** The principle of operation of a shape memory alloy (SMA) and its application to a Joule-Thomson(J-T) cooler is introduced. For a J-T cooler whose self-regulating element is an SMA spring, the condition for self-regulation as well as the factors that affect the time of self-regulation and stable flow after self-regulation are discussed. The relationship between the time duration of self-regulation for the SMA J-T cooler, and the time of the detector to reach operating temperature is described.

**Key words:** SMA, J-T cooler, time of self-regulating, stable flow

### 0 引言

现代武器系统中, 常见使用红外探测器来探测、跟踪目标, 通过捕捉目标的红外辐射能量来锁定目标或精确成像。非制冷型红外探测器在精确成像能力方面尚有不足, 多用于民用产品领域, 军用领域尤其是精确制导和航天领域大都采用制冷型红外探测器。目前, 主流的制冷方式有节流制冷器、斯特林制冷机和脉管制冷机几大类, 前者多用于精确制导武器系统, 后两者多用于航天系统。伴随着制导型武器装备快速响应和小型化的发展趋势, 为节流制冷器提供高压气源的弹上气瓶体积越来越小, 自调型节流制冷器的发展就越来越受到重视。主流自调型节流制冷器根据自调元件不同可以分为波纹管自调型、记忆合金自调型。近年来, 由于记忆合金自调型节流制冷器结构简单, 制作成本低等优点, 逐步得到了业界的认可和重视。

### 1 记忆合金在节流制冷器中的应用

通过专用测试系统, 将形状记忆合金材料浸没在液氮中, 记录记忆合金在冷却过程中的电阻率, 当记忆合金发生马氏体相变的时候电阻率会随之发生突变<sup>[1]</sup>, 突变的那个点即为马氏体相变温度  $M_s$  点, 如图 1 所示<sup>[3]</sup>。 $M_s$  点在 100 K 附近的低温形状记忆合金可以应用于节流制冷器<sup>[2]</sup>, 利用其在低温下表现出来的形状记忆效应实现对制冷器针阀机构开度的控制, 从而达到调节制冷器流量的目的。

采用记忆合金调节的制冷器典型结构如图 2、3、4 所示。

法国 Air Liquide 公司于 20 世纪 90 年代研发了蝶形记忆合金垫圈作为自调元件的制冷器并得到应用。图 2 是采用此垫圈的扁平结构的制冷器<sup>[4]</sup>, 它是由记忆合金垫圈、针阀调节机构、主动弹簧等结构组成, 当制冷器达到记忆合金垫圈相变温度点时, 垫圈收缩主动弹簧驱动阀针下移, 部分关闭节流孔, 达到控制

流量的目的。此款产品的优势在于结构简单、运动部件少、造价较低，但缺点同样明显，由于记忆合金垫圈离节流孔位置太近，探测器芯片尚未被冷却到深低温区时，记忆合金垫圈已经完成收缩<sup>[5]</sup>，导致制冷器流量减小制冷功率降低，探测器到达深低温区的时间相对较长。

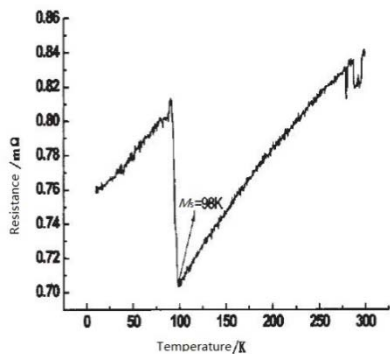


图1 记忆合金电阻值与温度关系曲线图

Fig.1 Memory alloy resistance value and temperature relation curve diagram

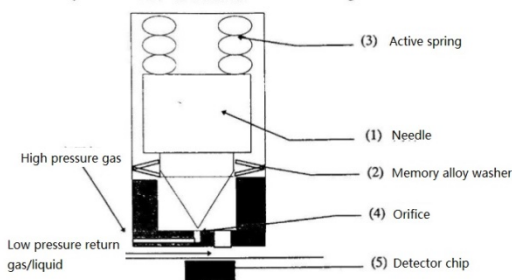


图2 扁平结构针阀控制机构示意图

Fig.2 Flat structure needle valve control mechanism diagram

为了进一步缩短制冷时间，Air Liquide 公司又研发了一种圆柱形制冷器，图3是采用此垫圈的圆柱形制冷器<sup>[6]</sup>，通过支架连接阀针与记忆合金垫圈，使该垫圈远离节流孔，探测器芯片优先到达深低温区后，记忆合金垫圈再收缩调节制冷器流量。

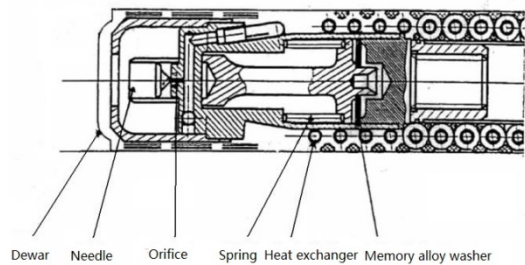


图3 圆柱结构针阀控制机构示意图

Fig.3 Cylinder structure needle valve control mechanism diagram

图4为另一种结构的记忆合金自调型节流制冷器

针阀控制机构简图，该自调机构所采用的记忆合金为螺旋弹簧状，率先由俄罗斯采用并装备应用<sup>[7]</sup>。装配时，主动弹簧被压缩，针阀处于开启状态，当节流降温至低于记忆合金  $M_s$  点时，记忆合金弹簧主动收缩，主动弹簧推动针阀机构关闭，从而实现制冷器流量自调的功能。

本文中主要针对该结构的记忆合金自调型节流制冷器展开研究。

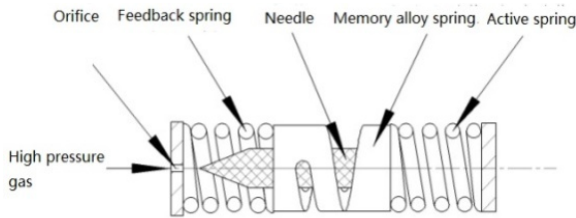


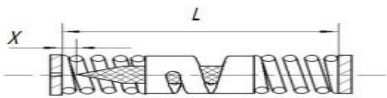
图4 螺旋记忆合金弹簧针阀控制机构示意图

Fig.4 Screw memory alloy spring needle valve control mechanism diagram

2 记忆合金自调型节流制冷器自调机构的设计

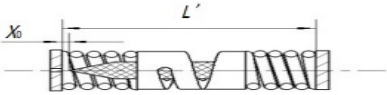
制冷器自调机构装配时，将阀针依次自由穿过记忆合金弹簧、补偿块和平衡弹簧，阀针尾部则与主动弹簧相连，此时自调机构总长为  $L$ ，阀针与节流孔间有一个原始距离  $X$ ，如图5(a)所示；装配调试时，用外力挤压主动弹簧，阀针尾部被主动弹簧压紧，阀针向节流孔方向移动，此时主动、平衡弹簧均被压缩，阀针的位移量与平衡弹簧的压缩量  $\Delta L_2$  相同，装配完成后阀针尖端与节流孔预留了一个初始距离  $X_0$ ，如图5(b)所示。

$$X_0=X-\Delta L_2 \tag{1}$$



(a) 自调机构装配完成前示意图

(a) Schematic diagram of self-regulating mechanism before completion of assembly



(b) 自调机构装配完成后示意图

(b) Schematic diagram of self-regulating mechanism after completion of assembly

图5 制冷器自调机构装配前后对比示意图

Fig.5 Self-regulating mechanism before and after assembly comparison diagram

本文中叙述的针阀自调机构的工作过程可以简单描述为:控制针阀开度的阀针与弹簧机构相对固定,可以随弹簧机构的运动在一定范围内动作。向制冷器通入高压气,前阀处于开启状态,制冷工质节流制冷,当温度到达  $M_s$  点时,记忆合金弹簧发生马氏体相变开始收缩,主动弹簧和平衡弹簧伸长,直到达到新的平衡状态。在此过程中阀针随主动弹簧一起动作,节流阀的开度减小<sup>[8]</sup>,直至阀针将节流孔部分关闭,制冷器流量和制冷功率趋于稳定,完成自调。

上述制冷器自调过程可以分解为3个部分:第一部分,自调驱动力克服运动阻力,驱动阀针靠近节流孔,自调过程开始;第二部分,阀针开始进入节流孔,制冷器流量开始下降;第三部分,阀针将节流孔部分关闭,制冷器流量和制冷功率趋于稳定,自调过程结束。

## 2.1 记忆合金自调型节流制冷器自调机构设计的关键参数

### 2.1.1 自调机构生效的条件

制冷器自调机构受力分析图,如图6所示。若将阀针、记忆合金弹簧以及补偿块统称为阀针部件,制冷器通气工作尚未自调时,与装配完成时的初始状态相比,主动弹簧和平衡弹簧长度变化不大,阀针部件受力分析可简化如下:

$$F_1 = F_2 + F_0 \quad (2)$$

式中:  $F_1$  为主动弹簧对阀针部件施加的作用力;  $F_2$  为平衡弹簧对阀针部件施加的作用力;  $F_0$  为制冷工质阻碍阀针部件运动的力。

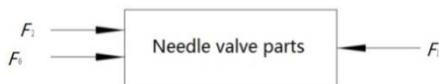


图6 制冷器自调机构受力分析图

Fig.6 Force analysis diagram of self-regulating mechanism diagram

当记忆合金弹簧温度到达  $M_s$  点开始收缩后,平衡弹簧对阀针部件的压力几乎为零,此时制冷器自调机构能够实现自调的临界条件为:主动弹簧驱动阀针向节流孔方向移动的驱动力要足以克服制冷工质对阀针部件施加的运动阻力,可以得到自调机构生效的临界条件为:

$$\Delta L_1 > F_0 / \theta_1 \quad (3)$$

式中:  $\Delta L_1$  为主动弹簧压缩量;  $\theta_1$  为主动弹簧弹性系数;  $F_0$  是由制冷工质的工作压力以及节流孔大小共同决定,制冷器主动弹簧压缩量  $\Delta L_1$  设计时,要保证主动弹簧的自调驱动力  $F_1$  大于节流孔中喷出的制冷工质的压力  $F_0$ ,才能使制冷器开始自调动作。

### 2.1.2 制冷器流量自调的条件

实际工作过程中,平衡弹簧始终处于压缩状态,会对阀针部件施加一个阻碍阀针运动的力。在制冷器开始通气工作后即满足:

$$F_1 - \Delta x_1 \times \theta_1 = F_2 - \Delta x_2 \times \theta_2 + F_0 \quad (4)$$

$$\Delta x_1 + \Delta x_2 = \Delta L_0 \quad (5)$$

假设平衡弹簧始终不受力,即  $F_2 = 0$ ,  $\Delta x_2 = 0$ , 阀针位移量即主动弹簧伸长量  $\Delta x_1$  能够达到理论最大值  $\Delta L_0$ , 若要实现制冷器自调后流量减小,宏观上需满足阀针能够进入节流孔,边界条件是阀针理论最大位移量要大于阀针与节流孔之间的预置距离。同时,主动、平衡弹簧压缩量之和,即为制冷器自调机构装配时外力挤压主动弹簧尾部移动的距离,可以得到:

$$L - L' > X + F_0 / \theta_1 \quad (6)$$

由此可见,若要使制冷器自调后流量减小,阀针与节流孔间的预置距离  $X_0$  不能超过记忆合金弹簧低温下的收缩量  $\Delta L_0$ , 目前国内制备的记忆合金弹簧最大收缩量普遍在 1 mm 左右<sup>[9]</sup>。同时,阀针能够进入节流孔,设计时主动弹簧尾部压紧的长度要大于阀针与节流孔装配的初始距离  $X$ 。

### 2.1.3 影响自调后稳定流量大小及自调时间的参数

#### 1) 影响自调后稳定流量大小的参数

制冷器流量变化与制冷器自调的关系曲线如图7所示,该数据曲线测试时采用的是华北光电技术研究所自制的微型节流制冷器综合测试系统,该测试系统能同时采集探测器测温二极管电压(单位:V)及制冷器工作流量(单位:L/min)并经计算机软件分析后输出测试数据曲线,图8为该测试系统原理方框图。

图7中,当制冷器通气工作后流量曲线以近似抛物线的规律开始攀升,起始阶段气体流量较大,对探测器进行快速制冷,节流前制冷工质压力越高,制冷器峰值流量越大。当探测器到达约 80 K 低温后,通过热传递后记忆合金弹簧到达  $M_s$  点开始收缩,流量达到最大值。初始被压缩的主动、平衡弹簧开始伸长,其中主动弹簧驱动阀针向节流孔移动。伴随记忆合金弹簧逐渐收缩制冷器流量曲线缓慢下降,直到阀针将节流孔部分关闭为止,制冷器流量降低到稳定工作流量水平,此时节流孔至阀针的距离为  $X'$ ,这也是表征制冷器自调后稳定流量大小最主要的参数。

制冷器自调完成后制冷工质对自调机构的作用力很小,可以忽略不计,假设  $\theta_1 = n \cdot \theta_2$ , 自调完成后节流孔至阀针距离  $X'$  满足如下关系式:

$$X' = \frac{1}{n+1} \Delta L_0 - X + \Delta L_2 \quad (7)$$

从公式(7)可以看出,影响自调后制冷器稳定流量大小的主要参数——阀针至节流孔的距离  $X'$  是由记

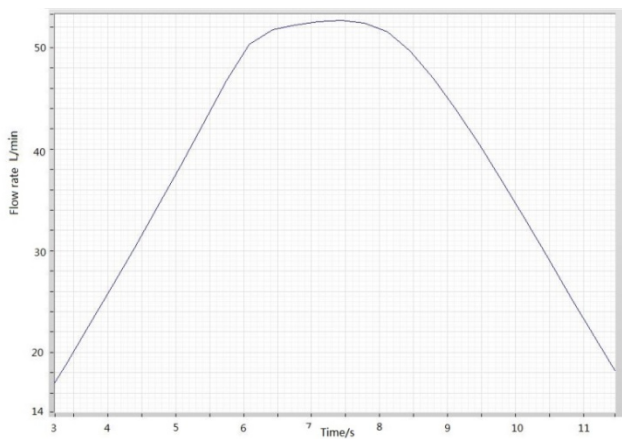


图7 流量与制冷器自调关系曲线图

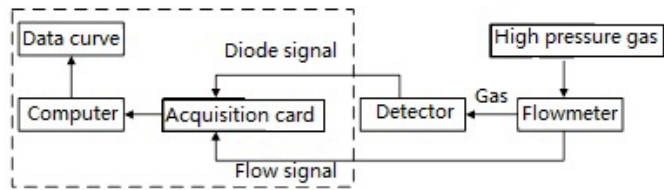


图8 测试系统工作原理方框图

忆合金弹簧的形变量  $\Delta L_0$ 、阀针与节流孔初始距离  $X$ 、平衡弹簧的压缩量  $\Delta L_2$  以及主动、平衡弹簧的弹性系数比共同决定的。

2) 影响自调时间的参数

制冷器的自调时间是指从打开高压气源开始，制冷器的流量逐渐攀升到峰值流量后又逐渐降低到稳定工作流量的全过程所需的时长，如图7所示。记忆合金制冷器的自调时间由两部分组成，第一部分为探测器降至约100 K温区及经过热传递记忆合金弹簧到达相变温度点所需的时间，该时间和探测器结构设计相关，受杜瓦热质量及传热效率影响，对于一代InSb红外探测器组件来说，受气源压力高低的影响，这部分时间一般在10 s左右，焦平面组件会相应延长；第二部分为记忆合金弹簧收缩，主动弹簧驱动阀针关闭节流孔所需的时间，由阀针与节流孔的预置距离决定， $X_0$  越大需要记忆合金弹簧收缩量  $\Delta L_0$  越大，这部分时间通常在10 s以内。因此，可以认为记忆合金自调型节流制冷器的自调时间普遍能够达到20 s以内，相比波纹管自调型节流制冷器优势较为明显。

3 记忆合金自调型节流制冷器自调时间与探测器到温时间的关系

应用记忆合金自调型节流制冷器的红外探测器组件的典型结构主要分为探测器芯片、绝热套、制冷器、前置放大器等部件，如图9所示。

制冷器主要利用高压氮气的节流效应，将高压氮气转化成液氮用来给探测器芯片提供合适的工作温

度。制冷器在图10(a)中①所示位置开始大量出液，持续为探测器提供较大的冷量，同时记忆合金也被迅速冷却，直到图10(a)中②所示位置记忆合金弹簧充分收缩，主动弹簧推动阀针进入节流孔，减小气流喷口面积的大小，降低气体流量，从而实现制冷器流量自动调节的目的。

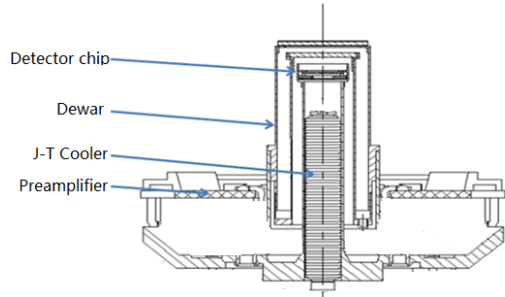


图9 探测器结构示意图

Fig.9 Structure diagram of detector

对图10(a)、10(b)中自调时间长短不同(4 s、21.5 s)的两个样品制冷器进行了测试，观测自调时间与测温二极管电压的关系。从理论上说，温度达到100 K(1.020 V)时InSb探测器就能够开始工作，但是只有当探测器温度达到深低温区时，探测器组件才能稳定成像。由图可见，无论制冷器自调与否，探测器在15 s以内均能开始工作，当制冷器完成自调后探测器温度方能达到深低温区77 K，制冷器自调时间越长探测器温度到达深低温区的速度就会越慢。现代武器系统中对探测器快速启动的要求越来越高，因此，在记忆合金制冷器设计时要在保证制冷量的同时尽量缩短制冷器的自调时间，以满足今后武器系统发展的需求。



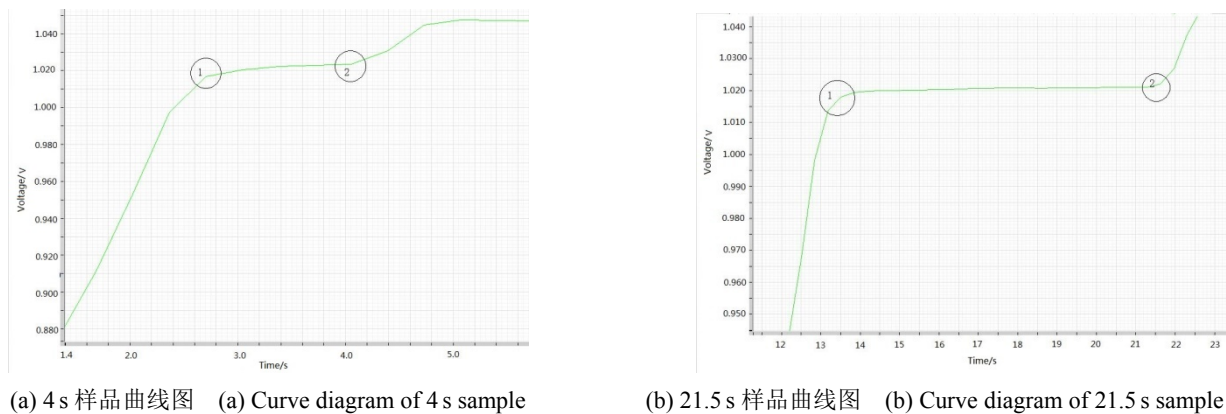


图 10 两支样品自调时间与测温二极管电压关系曲线图

Fig.10 Self-regulating time of two samples and the diode voltage of temperature measurement relation curve diagram

4 结束语

在记忆合金自调型节流制冷器的结构设计中,要根据产品气源压力合理设计节流孔尺寸和主动弹簧的弹性系数及压缩量,来实现制冷器的自调功能;需要同时满足主动弹簧尾部压紧的长度大于阀针与节流孔装配的初始距离,记忆合金弹簧的收缩量大于装配完成后阀针与节流孔的预置距离,阀针才能够进入节流孔,实现流量的自调;自调完成后制冷器的稳定流量主要取决于自调后阀针与节流孔的距离,设计时要综合考虑记忆合金弹簧的形变量、阀针与节流孔初始距离、平衡弹簧的压缩量以及主动、平衡弹簧的弹性系数比;制冷器的自调时间长短受阀针与节流孔预置距离大小的影响,不影响探测器的启动时间,但会对探测器的稳定工作时间产生影响。

参考文献:

[1] 李崇剑, 郑玉红, 万发荣, 等. Cu-Al-Mn 系低温形状记忆合金的微结构研究[J]. 有色金属, 2007, 59(4): 4-7.  
LI Chongjian, ZHENG Yuhong, WAN Farong, et al. Microstructure of Cu-Al-Mn Alloy with Shape Memory Effect at Low Temperature[J]. *Nonferrous Metals*, 2007, 59(4): 4-7.  
[2] 王三煜. 节流制冷器用记忆合金研究[J]. 低温技术, 2009, 37(5): 7-10.  
WANG Sanyu. Research on J-T cryocoolers made of SMA[J]. *Cryogenics and Super Conductivity*, 2009, 37(5): 7-10.  
[3] 莫露, 万发荣, 龙毅, 等. 低温形状记忆合金的相变温度变化[J]. 有色

金属工程, 2012, 2(1): 58-62.  
MO Lu, WAN Farong, YOU Yi, et al. Change of Phase Transformation Temperature of Low Temperature Shape Memory Alloy[J]. *Nonferrous Metals*, 2012, 2(1): 58-62.  
[4] 马跃学, 王娟, 梁惊涛, 等. 记忆合金自调节式高效微型节流制冷器机理研究[J]. 航空兵器, 2015(2): 38-41.  
MA Yuesue, WANG Juan, LIANG Jingtao, et al. Study on High-Efficiency Miniature JT Cryocooler Regulated by Shape Memory Alloy[J]. *Aero Weaponry*, 2015(2): 38-41.  
[5] Alain Coerttau. Low cost Joule-Thomson coolers[C]//SPIE, 1998, 3436: 783-785.  
[6] Jerome Guichard, Alain Cottureau, Dominique Chazot. Cryogenic characterization of low cost Joule-Thomson coolers[C]//SPIE, 2000, 4130: 501-503.  
[7] 徐庆松, 崔戈. 记忆合金在节流制冷器中的应用[J]. 激光与红外, 2014, 44(8): 846-849.  
XU Qingsong, CUI Ge. Application of shape memory alloy in J-T cryocoolers[J]. *Laser and Infrared*, 2014, 44(8): 846-849.  
[8] 王三煜. 记忆合金调节式制冷器研究[J]. 红外技术, 2007, 29(9): 528-535.  
WANG Sanyu. A Self-Regulated Cryocooler Made by SMA[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(9): 528-535.  
[9] 郑玉红, 李崇剑, 龙毅, 等. 低温 Cu-Al-Mn 形状记忆合金弹簧性能的研究[J]. 金属功能材料, 2007, 14(3): 1-5.  
ZHENG Yuhong, LI Chongjian, LONG Yi, et al. Research on Properties of Spring Made of Cu-Al-Mn Alloy with Shape Memory Effect at Low Temperature[J]. *Metallic Functional Materials*, 2007, 14(3): 1-5.