

提高波纹管式制冷器稳定性的设计

韩蓬磊, 李 勉

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:针对波纹管式自调节流制冷器普遍存在稳定性差的问题,通过对此类制冷器最核心的部件——波纹管自调机构的受力分析,对制冷器的预留位移量这个核心参数进行优化设计,增强了制冷器的自调能力,从设计上避免制冷器不自调或流量变化现象的发生,改善了长期困扰自调式制冷器的间歇性喷液现象,提高了制冷器的稳定性,并通过实验得到了论证。

关键词:波纹管;稳定性;自调;制冷器;预留位移

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.010

Design of the stability of self-regulated cryocooler with bellows

HAN Peng-lei, LI Mian

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

Abstract: Aiming at the problem of poor stability of self-regulated cryocooler with bellows, through the force analysis of self-regulated structure of bellows, the reserved displacement is optimally designed which is the core components of the self-regulated cryocooler with bellows. Self-regulation ability of the cryocooler is enhanced. Mis-function of self-regulating and flow rate changing of the cryocooler are avoided by design. The phenomenon of intermittent hydrojet of the self-regulated cryocooler is improved. The stability of this cryocooler is improved observably, which is verified through experiments.

Key words: bellows; stability; self-regulating; cryocooler; reserved displacement

1 引言

波纹管式自调节流制冷器目前在红外探测器中的应用已较为广泛。然而,此类制冷器普遍存在稳定性差的问题,这主要表现在两个方面:一是存放或是使用一段时间以后流量在一定程度上会发生变化;二是制冷器到达低温以后会出现间歇性喷液现象,即阀针关闭以后会突然打开,使得制冷器流量突然增大,导致探测器的二极管电压突然降低。而红外探测器恰恰对稳定性的要求特别高,所以这就对此类制冷器在红外探测器中的应用带来了一定的隐患。造成这种现象的主要原因包括,波纹管的材料、制作工艺、使用不当以及设计上的问题^[1],通过设计上的优化可以在一定程度上减弱甚至是避免波纹管自身对制冷器稳定性的影响。而制冷器的众多设计参数中,波纹管

与传动杆焊接时的预留位移量是最核心的参数,对制冷器稳定性地提高起着至关重要的作用。

2 波纹管制冷器自调机构

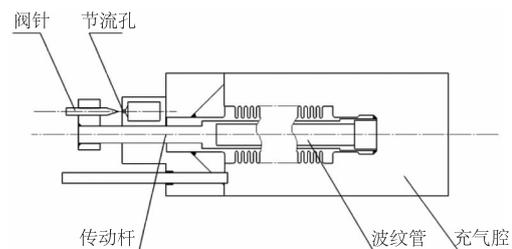


图1 波纹管制冷器自调机构示意图

作者简介:韩蓬磊(1986-),男,本科,工程师,主要从事快启动式制冷器,双工质制冷器以及波纹管自调式制冷器的研究。E-mail: 368374355@qq.com

收稿日期:2013-08-21; **修订日期:**2013-09-01

在波纹管制冷器的制作过程中,波纹管与传动杆焊接时有一定的预留位移(如图2所示),然后向波纹管所在的充气腔内充入一定量的高压气体,使波纹管压缩,此时制冷器的阀针相对节流孔处于打开状态。制冷器启动后,从节流孔喷出液氮,充气腔内的压力迅速降低,从而使波纹管拉伸,带动传动杆及阀针下移,针尖伸入节流孔内,使节流孔变小甚至关闭从而控制了出液量,实现了对气体流量的自动调节^[2-3]。

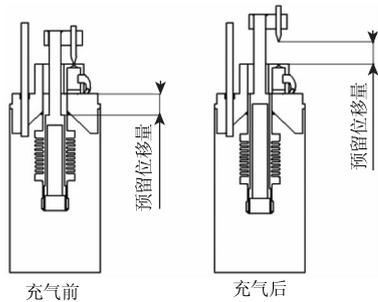


图2 充气前后预留位移表征示意图

从波纹管制冷器的自调机理不难看出,制冷器的制作过程中波纹管与传动杆焊接时的预留位移量对制冷器最终的自调性能有着直接的影响。

3 预留位移量的设计

3.1 预留位移量的初步确定

3.1.1 波纹管自调机构受力分析

波纹管自调式制冷器的调节机构受力分析示意图如图3所示。

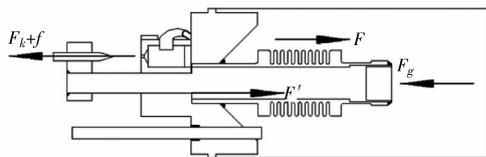


图3 自调机构启动过程受力分析示意图

图中, F 为波纹管释放的弹力; F' 为阀体对传动杆的反作用力; F_g 为充气腔内气体对波纹管的作用力; F_k 为节流孔喷出气流对阀针的作用力; f 为自调过程中的摩擦力。

假设背压为1bar,制冷器启动的后半阶段,充气腔内压力降低,波纹管伸长,传动杆带动阀针下移,针尖伸入节流孔内,使节流孔变小甚至关闭。在制冷器低温稳定以后,存在如下关系式,即:

$$F = F_g + F_k + f \quad (1)$$

式中:

$$F = K \int_{H-H'}^{30} x dx \quad (2)$$

$$F_g = \int (p-1) S dp \quad (3)$$

式中, H 为阀针相对节流孔的初始开度; H' 为低温稳

定后阀针相对节流孔的开度,接近 $5 \mu\text{m}$ 。

以上各式中, F_k 与 f 的值较难确定,从严格意义上讲, F_k 的值应为阀针锥面与柱面部分,压差分布的曲面积分以及气流对阀座的作用力之和。表示为:

$$F_k = \iint p_k S \quad (4)$$

这里作如下简化:假定节流孔被完全关闭,则气体对阀针的作用力近似为管道内气体对节流口的内压力,可视为 F_k 的最大值。表示为:

$$F_{kmax} = p_1 S' \quad (5)$$

式中, p_1 为节流前气体压强; S' 为节流口截面积。

而 f 的随机性较大,但是实际情况下,如果装配时能够严格控制工艺过程, f 的相对量级也会较低,可以忽略不计。

3.1.2 预留位移量的初步确定

从式(1)可以看出,如果传动杆与波纹管焊接时预留位移量较小,在制冷器工作过程中,式(1)中左边项始终小于右边项,也就是说波纹管的最大弹力不足以抵消启动过程中充气腔内气体压力以及气流对阀针的作用力,就会出现无法自调或是自调后稳定流量较大的现象,无法满足使用要求,即:

$$K \cdot X_0 \leq F_g + F_k + f \quad (6)$$

为了便于定量计算,在这里取极限情况进行分析,即制冷器已喷出大量液氮。此时,充气腔内气体已被充分冷却,充气腔内气体基本处于饱和状态,气体参数符合饱和和气体状态方程,气体的饱和蒸汽压 p 与温度呈一一对应关系。气体对阀针的作用力取最大值 F_{kmax} ,忽略摩擦力 f 。式(6)可简化为:

$$K \cdot X_0 \leq F_g + F_{kmax} \quad (7)$$

所以,为了保证波纹管自调机构的正常工作,要满足以下关系式,即:

$$K \cdot X_0 > (p-1)S + p_1 S' \quad (8)$$

波纹管的预留位移量需满足:

$$X_0 > \frac{(p-1)S + p_1 S'}{K} \quad (9)$$

3.2 优化预留位移以提高制冷器的稳定性

虽然满足式(9)的要求,制冷器便可以自调,但是自调式制冷器还普遍存在存放或是使用一段时间以后流量发生变化和间歇性喷液现象,原因之一就是波纹管的力平衡关系发生变化。要解决这一问题,可以在制冷器的设计中预留一定的预紧力,当受

力关系发生变化时,仅仅改变了平衡后预紧力的大小,而阀针位移未发生变化,从而实现制冷器流量的稳定。

同时,由于预紧力的引入,波纹管调节机构的力学平衡关系也发生了相应的变化,需要对预留位移量的设计参数做进一步地讨论,将式(1)变形为:

$$F_k + f = F - F_g \quad (10)$$

欲使制冷器流量稳定,可使式(10)等号右边项大于左边项,也就是说令自调驱动力大于自调阻力,那么两者之差即为预紧力 T ,可表示为:

$$T = F - F_g - (F_k + f) \quad (11)$$

假设设计时即预存相当于针阀开度变化 Δ 的预紧力,则当波纹管或者其他因素引起自调机构受力关系发生变化时,相当于仅仅改变了系统平衡时剩余预紧力的大小,而针阀的开度未发生改变,从而维持了流量的稳定,即式(11)演化为:

$$F - F_g - (F_k + f) > T_{\min} \quad (12)$$

式中:

$$T_{\min} = K \cdot \Delta \quad (13)$$

其中, Δ 的大小可以参考波纹管的残余变形量来确定。

结合以上各式,式(12)可展开为:

$$K \cdot [X_0 - (H - H')] - (p - 1)S - p_1 S' > K \cdot \Delta \quad (14)$$

由此可得,预留位移量应满足:

$$X_0 > \frac{(p - 1)S + p_1 S'}{K} + (H - H') + \Delta \quad (15)$$

从设计角度讲,只要实际的预留位移量满足上式的制冷器,均可以认为制冷器具有较好的自调性能以及流量的稳定性。同时,应考虑波纹管自身的性能限制,预留位移量不能大于波纹管的公称位移(一般在1 mm以内),否则波纹管有可能会失效,丧失自调能力。

4 实验结果

4.1 制冷器正向设计论证实验

为了验证以上的参数设计理论,取波纹管的截面积 S 为 4.5 mm^2 ,节流孔面积 S' 为 0.03 mm^2 ,工艺参数 H 为 0.15 mm , Δ 参考波纹管的残余变形量为 0.05 mm ,调节器漏气速率 Q 为 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,充气腔总容积为 700 mm^3 ,设计寿命为15年,同时充气工质为氮气。则由式(9)可求出预留位移 X_0 应该大于 0.29 mm ,再结合式(15),修正后的 X_0 应该大于 0.49 mm ,在进气压力为 20 MPa 下做如下论证实验。

(1)按照不同的预留位移量和充气压力,制作4只制冷器,如表1所示。

表1 制冷器相关参数

制冷器编号	01	02	03	04
预留位移/mm	0.6	0.6	0.25	0.4

(2)将01~04这四只制冷器,分别进行测试,结果如表2所示。

表2 制冷器测试结果

制冷器编号	01	02	03	04
自调情况及时间/s	110	125	不自调	145
自调后流量 L/min	4.1	3.4		大于8

结合表1和表2可以看出,只要制冷器的预留位移量满足式(15)的要求,就能具备较好的自调能力;相反,制冷器的自调能力会明显不足。所以,按照本文的指导选择合理的预留位移,是保证制冷器最终自调性能的关键。

4.2 问题制冷器的处理论证实验

为了使出现问题的03、04两只制冷器能够正常自调,满足使用要求,根据本文的指导,可以增大制冷器的预留位移。但是从图2中可看到,波纹管与传动杆焊接面被封死在充气腔内部,所以在正式的制冷器产品中,预留位移是无法调整的。在此,为了达到实验的目的,采取非常规手段,将阀体的位置上移 0.3 mm ,以这种方式来增大制冷器的预留位移量。将处理过的03、04两只制冷器重新进行测试,测试结果如表3所示。

表3 处理过的制冷器测试数据

制冷器编号	03	04
自调时间/s	118	135
自调后流量 L/min	4.50	4.20

从测试结果看,预留位移量增大 0.3 mm 后,相应制冷器的不自调现象得到明显改善。证明了合理的预留位移是决定制冷器自调能力的关键因素,与4.1中的实验结果相互呼应。

4.3 改善制冷器间歇性喷液现象的论证实验

目前波纹管式自调制冷器的设计中,普遍没有考虑预紧力的存在,只是以式(9)为指导。那么,根据实验4.1中的条件可以得到,预留位移量 X_0 只需大于 0.29 mm 。那么,对比04与01这两只制冷器在自调完成并到达低温后的二极管电压随时间的变化曲线(如图4所示)可以看出,04号制冷器对应二极管的电压波动较大。这是由于制冷器的流量忽大忽小,存在间歇性喷液的现象,导致了二极管的温度

不稳定而造成了电压的波动。01号制冷器则是由于预留位移的设计时预紧力的存在,使得制冷器流量较为稳定,没有出现间歇性喷液的现象,从而使探测器的稳定性也得到提高。

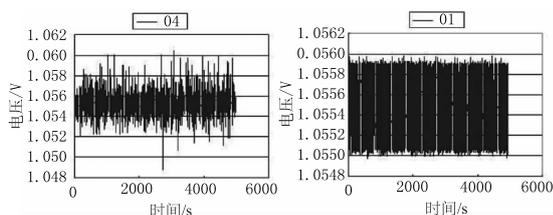


图4 二极管电压随时间的变化曲线图

5 结论

波纹管式自调节节流制冷器普遍存在的稳定性较差的问题,可以从设计上得到很好地改善。制冷器自调能力的强弱,取决于设计时预留位移量的大小。通过对波纹管自调机构中预留位移这个核心参数的优化设计,可以使波纹管式自调节节流制冷器的稳定性得到显著提高,在保证长时间使用或存放后流量稳定性的同时,间歇性喷液现象也得到了明显地改善,本文对实际参数的选取具有重要的指导性意义。

参考文献:

- [1] SUN Weiguo, HUANG shuian, et al. Air to air missile photo detectors design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 152 - 156. (in Chinese)
孙维国, 黄水安, 等. 空空导弹光电探测器设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 152 - 156.
- [2] Alain Cottureau, Marc David. New development in small cryocoolers[J]. Proc. SPIE, 1996, 2744: 272 - 275.
- [3] LIU Gang. Joule-thomson cryocooler technology[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 413 - 416. (in Chinese)
刘刚. 节流微制冷器技术[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 413 - 416.
- [4] 郑德馨, 袁秀玲. 低温工质热物理性质表和图[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 20 - 21.
- [5] Yao Qinghua. Application research of tapered self-regulated J-T cryocooler[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 1004 - 1006. (in Chinese)
姚青华. 锥形自调式节流制冷器的应用研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 1004 - 1006.