文章编号：1672-8785(2021)03-0025-06

波纹管 J-T 制冷器的可靠性改进研究

刘志勇　杨继飞

（华北光电技术研究所，北京　100015）

摘　要：作为红外探测器组件的重要组成部分，波纹管 J-T 制冷器得到了广泛应用。在振动环境下长期使用时，作为自主调节元件的波纹管会出现流量异常、无法实现自调等故障。为了提高制冷器在长期振动环境中的可靠性，更改了制冷器结构，并创新性地使用了加装膜片弹簧与聚四氟乙烯导环的两点支撑结构。该结构对制冷器的弹性运动部件具有可靠的径向支撑，明显提高了制冷器的抗振性能，并在实践中取得了很好的效果。此外，本文中的设计研究也为将来提高波纹管 J-T 制冷器的抗振性能提供了思路。

关键词：自调 J-T 制冷器；波纹管；振动

中图分类号：TB69　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2021.03.005

Research on Reliability Improvement of Bellows J-T Cooler

LIU Zhi-yong，YANG Ji-fei

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

Abstract: As the important part of infrared detector component, bellows J-T coolers have been widely used. When used in the long-term vibration environment, the bellows as the self-control element will suffer from abnormal flow rate and failure of self-control. In order to improve the reliability of the cooler in the long-term vibration environment, the structure of the cooler is changed in this paper. The two-point support structure with diaphragm spring and PTFE guide ring is innovatively used which has a reliable radial support for the elastic moving parts of the cooler. It significantly improves the anti-vibration performance of the cooler, and has achieved good effect in practice. In addition, the research on the design in this paper also provides ideas for improving the anti-vibration performance of bellows J-T coolers in the future.

Key words: self-control J-T cooler; bellows; vibration

0 引言

作为一种成熟可靠的 J-T 自调型制冷器，波纹管制冷器被广泛应用于红外焦平面探测器组件。然而在实际使用中，该制冷器内部采用的悬臂梁结构(见图 1)在受到振动冲击时不能获得沿制冷器径向的支撑。在长期振动环境

收稿日期：2020-09-28

作者简介：刘志勇(1988-)，北京人，工程师，主要研究方向为低温制冷以及制冷器、制冷机的研制和测试。E-mail：617811552@qq.com

中，存在由疲劳造成裂缝，进而导致制冷器失效的风险。为此，本文对制冷器的结构设计进行改进。

1 现有制冷器结构

J-T 制冷器主要用于对红外探测器进行制冷，从而保证探测器工作在稳定的超低温环境中。它利用焦耳-汤姆逊原理(当高压气体的体积突然膨胀时，其温度会相应下降，甚至产生液化)来制冷[1]。J-T 制冷器依据不同的外形可以分为柱形、塔形和平板式三种；依据不同的气流控制方式可以分为自调式和开放式[2]。波纹管制冷器属于柱形自调式制冷器。

波纹管制冷器的性能要求如下：自调时间小于等于 120 s，最大流量小于等于 26 g/min，自调流量小于等于 4 g/min。在现有设计中，传动杆只有一端与弹性零件(波纹管)通过焊接相连，其余部分(包括承载了阀针架、阀针的部分)均为悬空状态。因此，波纹管形成了悬臂梁结构。

现有制冷器结构中的波纹管是柔性零件，且只有图 1 所示的焊点，进而形成悬臂梁结构[3]。此设计中，由波纹管弹性带动传动杆、阀针架和阀针在轴向上运动，以调节阀体上节流孔的开闭，从而实现自调制冷功能。它不具有径向固定结构。在受到振动冲击(技术要求为随机振动 6g×1 h/方向)时[4]，由于频繁的摆动，焊点处会引起疲劳并产生裂缝，导致制冷器漏气失效。同时传动杆随波纹管一起摆动，引起阀针与节流孔剧烈摩擦，进而导致节流流量异常甚至无法关闭节流孔。因此，该结构存在风险。

2 添加径向支撑的改进结构

基于改动量最小的原则，本方案为传动杆提供有效的径向支撑，同时保证制冷器的工作状态不受影响。经过反复的设计与更改，形成了本文中的设计(见图 2)。

该设计采用膜片弹簧与波纹管尾部定位的两点支撑结构。改进结构的主要变动如下：将现有的增强环拆分为增强环与环盖两部分，并在中间增加膜片弹簧以支撑传动杆的一端；在现有外壳中心处开口，增加导环结构，从而支撑传动杆的另一端。

与现有设计相比，新结构的外观并未产生明显变化。阀体、阀针、阀针固定架、密封焊接的位置以及套筒外壳、波纹管等零件均未发生变化。

如图 3 所示，膜片弹簧采用圆形开槽薄片结构。传动杆从膜片弹簧中心穿过，并与之焊接；弹簧圆形边缘与增强环焊接。通过该方式对传动杆的一端进行径向固定。薄片开槽结构

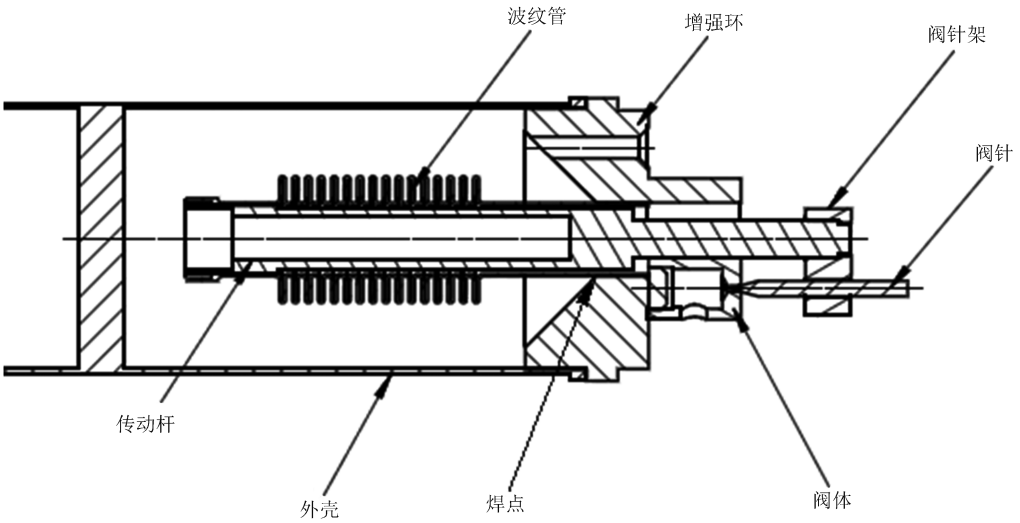


图 1 现有制冷器结构

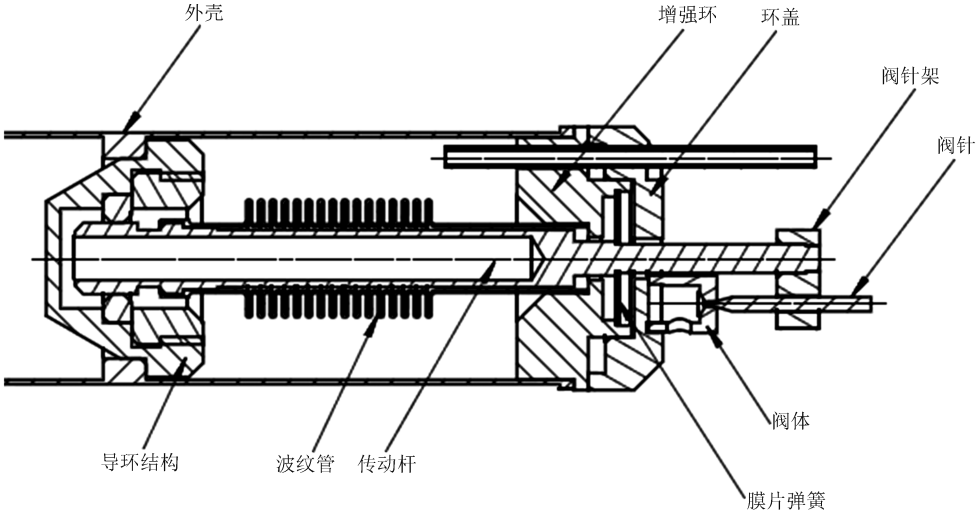


图 2 改进的制冷器结构

表 1 新结构制冷器的测试结果

制冷器编号	自调时间/s	最大流量/(g/min)	自调流量/(g/min)
001	110	22.4	1.6
002	98	21.7	1.9
003	90	20.2	1.9
004	90	22.6	2.0
005	108	23.6	2.1

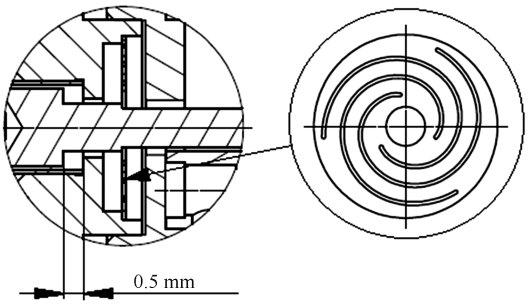


图 3 膜片弹簧结构

使得传动杆在膜片弹簧的径向上得到支撑，同时在轴向上可进行无摩擦的弹性运动，从而起到支撑作用。

在增强环与波纹管连接处设置的台阶具有两种功能：一是用于波纹管安装时的轴向定位；二是用于限制传动杆的轴向运动。即在充气腔中充气，待传动杆沿轴向外移 0.5 mm 的距离后阻止其继续外移，由此获得预紧压力，从而保证实现制冷器的自调功能。

如图 4 所示，波纹管的另一端由悬臂结构改为导环支撑结构。在原有外壳中部开孔，并

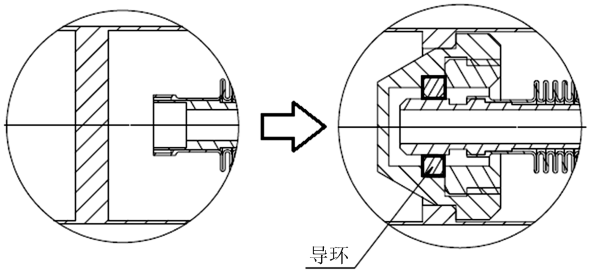


图 4 悬臂结构与导环结构

嵌入导环(由聚四氟乙烯制成的环形零件，与不锈钢传动杆之间采用滑动配合方式)。然后将波纹管插入导环，并在此处通过滑动配合方式实现对波纹管的支撑。

经过工艺实施，将首批零件制成了 5 支加装径向支撑结构的改进型制冷器，并对其性能进行了测试(结果见表 1)。可以看出，它们的性能达标，能够满足使用要求。

3 结构设计验证

3.1 参与对象

从采用现有结构的合格制冷器中随机选出

表 2 参试制冷器

结构类别	编号
现有结构	1806044、1806017、1802041、1805030 和 1801046
新结构	001、002、003、004 和 005

表 3 振前测试结果

制冷器编号	自调时间/s	最大流量/(g/min)	自调流量/(g/min)
1806044	103	24.37	3.5
1806017	99	25.04	3.4
1802041	97	24.85	3.3
1805030	101	23.96	2.1
1801046	88	24.71	3.2
001	110	22.4	1.6
002	98	21.7	1.9
003	90	20.2	1.9
004	90	22.6	2.0
005	108	23.6	2.1

表 4 振动 10 h 后的测试结果

制冷器编号	自调时间/s	最大流量/(g/min)	自调流量/(g/min)
1806044	115	25.44	3.6
1806017	98	26.32	3.1
1802041	104	22.51	6.2
1805030	118	24.74	2.2
1801046	97	25.82	2.9
001	102	23.6	1.6
002	99	22.0	2.1
003	108	24.1	1.8
004	96	23.1	2.2
005	101	22.9	2.6

5 支，并将其与 5 支具有上述支撑结构的新型制冷器进行振动对比实验。表 2 列出了参与测试的制冷器编号。

3.2 实验条件

振动筛选采用随机振动方式。总量为 10g×30 h/方向(现有技术要求为 6g×1 h/方向)。振动平均分为 3 次，每次 10 h。

3.3 实验实施

在振动实验前，对参与实验的制冷器进行了性能测试。表 3 和表 4 分别列出了振动实验前和振动 10 h 后采用石英杜瓦的测试结果。

振动 10 h 后，编号为 1806017 和 1802041 的制冷器出现了流量超标现象。通过外观检查发现，所有制冷器均未出现结构破损和漏气现象。

振动 20 h 后，通过外观检查发现，10 支制冷器均未出现结构破损与漏气现象。

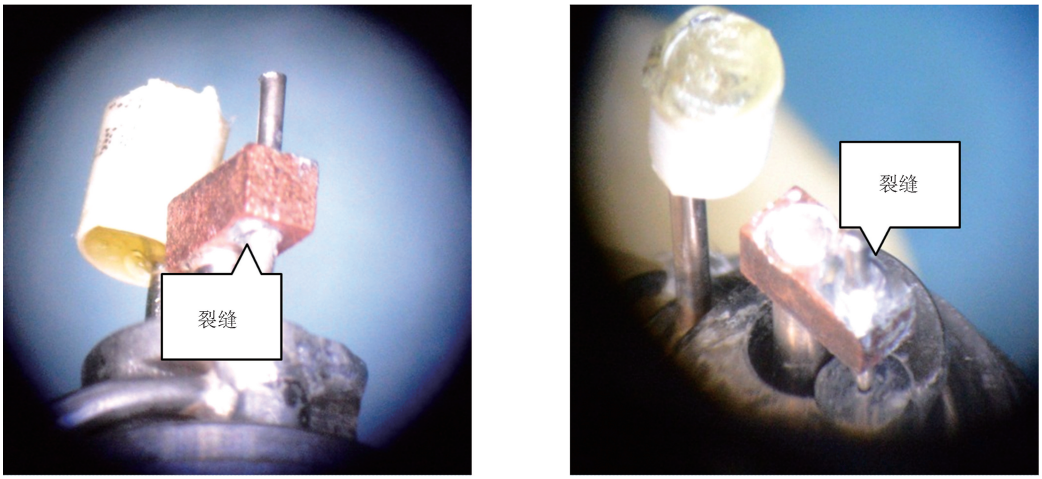
振动 30 h 后，部分参与实验的制冷器出现了焊点开裂现象(即阀针架与阀针的焊接处开裂)。随即采用石英杜瓦对全部测试样品进行性能测试。表 5 列出了振动 30 h 后的测试结果。

表 5 振动 30 h 后的测试结果

制冷器编号	自调时间/s	最大流量/(g/min)	自调流量/(g/min)
1806044	110	26.4	9.4
1806017	202	25.81	17.9
1802041	无法自调	27.67	26.5
1805030	102	27.72	4.5
1801046	121	28.64	2.7
001	109	24.63	1.8
002	127	25.60	3.0
003	101	23.52	2.4
004	91	24.05	3.2
005	119	26.71	2.1

表 6 30 h 振动对制冷器的影响

编号	1806044	1806017	1802041	1805030	1801046	001	002	003	004	005
结果	失效	失效	失效	失效	正常	正常	正常	正常	正常	正常
描述	流量超标	结构开裂	结构开裂	流量超标	—	—	—	—	—	—



(a)　　(b)

图 5 焊接处开裂：(a)编号为 1806017 的制冷器；(b)编号为 1802041 的制冷器

3.4 测试结果

表 6 列出了 30 h 振动对制冷器的影响结果。编号为 1806017 和 1802041 的采用现有结构的制冷器甚至出现了阀针与其支架焊点开裂的现象(见图 5)，使阀针与其支架脱离，导致传动杆无法带动阀针关闭节流孔，进而引起制冷器自调功能的失效和较为严重的结构破损。

4 失效分析

4.1 实验现象

通过增加振动强度(由目前技术要求的 6g×1 h 增至 10g×30 h)，验证了制冷器的结构强度，同时在振动 10 h 与 30 h 后对其进行了测试。实验结果表明，振动 10 h 后，两类制冷器均未出现异常；振动 30 h 后，振动对采用现有结构的制冷器均造成影响甚至导致制冷器失效，而新型制冷器未受到振动影响。

4.2 失效与结果分析

4.2.1 失效统计

通过增加振动强度使两类制冷器失效，从而评估其抗振风险。结果表明，振动 30 h 后，现有型号制冷器出现焊点开裂与流量超标现象

而产生失效；新型制冷器均未受到振动影响。振动对制冷器的影响主要有以下两点：(1)阀针架与阀针焊接处开裂；(2)制冷器流量增大。

4.2.2 焊接处开裂分析

故障位置在图 6 中圈出，即阀针与其支架的焊接处。参与测试的全部制冷器均未出现波纹管焊接位置由疲劳导致的断裂漏气现象。

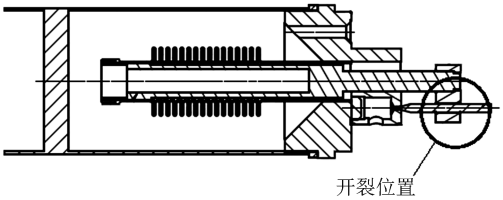


图 6 焊接开裂位置

针对此失效结果，本文认为，由于阀针处在插入阀体的状态，在此位置上形成一个支点，整个悬臂梁自调结构(包括波纹管、传动杆、阀针及其支架)在振动过程中以该支点摆动。在这个过程中，由于波纹管的柔性，与其连接的零件焊点由振动产生的应力形变与疲劳得以释放。而阀针与其支架之间的刚性连接则无法释放由摆动造成的转矩。因此，经过本次高强度振动后便出现了裂缝，导致制冷器失效。

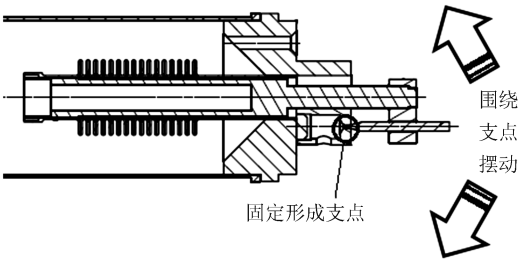


图 7 由摆动导致失效的示意图

如图 7 所示，制冷器传动结构形成以阀针针尖为支点的摆动结构。在受到振动冲击而偏离中正位置时，该结构(包括传动杆、波纹管、阀针支架以及阀针)全身会有扭矩负载，但阀针与其支架焊接处(开裂点)显然成为了应力集中区域而首先遭到破坏。

4.2.3 流量增大的分析

在分析焊点开裂时可知，制冷器的整个自调机构会以阀针插入阀体的部分为支点进行摆动。在非制冷的情况下，阀针与阀体虽然相互插入，但是互不接触。在振动过程中，阀针与阀体插入位置产生撞击，造成磨损。当制冷器再次工作时，该位置由于磨损引起的配合间隙增大，导致制冷器流量增大。

与目前采用悬臂梁结构的制冷器相比，加装径向支撑结构的新型制冷器受流量上升的影响更小。

5 结论

(1)通过实验验证可知，现有制冷器所采用的悬臂梁结构不存在波纹管焊点开裂漏气的隐患。更多的结构隐患来自以阀针和节流孔接触为支点而形成的摆动。它使阀针与其支架焊接处形成循环负载，从而造成疲劳破坏，最终导致制冷器失效。

(2)由于现有制冷器具有悬臂梁结构，在长时间振动环境中，会造成阀针与节流孔磨损，导致节流流量增大。若不改变这个趋势，制冷器便会因流量超标而无法交付使用。

(3)与现有制冷器相比，具有径向支撑结构的新型制冷器在抗振性能上有相当大的提升，特别在焊点抗循环应力疲劳与接触面磨损的改善方面尤为突出。但是其工艺更加复杂，会降低工艺性与品率等级。

本文介绍的自调型 J-T 制冷器加强结构依然存在诸多不足，并有大量的改进空间。在超负荷振动条件下，该结构也出现了流量增大的趋势。虽然这不会影响其使用性能，但是可以为不断优化制冷器的后续工作提供新的思路。

参考文献

[1] 牟宏山，陈静，乔育花. 快速制冷型红外焦平面成像制导系统设计 [J]. **红外与毫米波学报**，2016，**35**(3)：310-316.

[2] 吕长水. 快速 J-T 效应制冷器研发概况与趋势 [J]. **红外与激光工程**，2007，**36**(S2)：521-525.

[3] 刘刚. 节流微制冷器技术 [J]. **激光与红外**，2008，**38**(5)：413-416.

[4] 韩蓬磊，李勉. 提高波纹管式制冷器稳定性的设计 [J]. **激光与红外**，2014，**44**(4)：395-398.