

〈制冷技术〉

冷端测温位置对制冷机性能表现的影响

赵文丽, 孙皓, 李仁智, 李昊岚, 徐安波, 环健, 张凯, 乔勇

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 机械制冷机是提供红外载荷工作所需低温环境的主要设备, 在运行过程中, 制冷机冷腔温度会低于测温二极管处的温度, 该温差与二极管测温位置及其造成的传热热阻有关。本文先从理论上分析了二极管测温位置及其造成的传热热阻差异对冷腔实际温度的影响, 并进行了实验验证, 再进一步通过理论推导与实验测试研究了制冷机冷腔的实际温度对制冷机性能表现的影响, 指出了在使用模拟杜瓦进行制冷机性能测试的过程中, 应注意以下几个问题: ①测温二极管与制冷机冷腔存在固有温差。温差越大, 制冷机冷腔的实际温度越低, 制冷机与杜瓦的性能总体表现越差。②测温二极管与制冷机冷腔的温差大小受杜瓦组件热阻的影响。热阻越大, 该温差越大, 制冷机冷腔实际温度越低。③测温二极管焊接位置会影响杜瓦组件的热阻大小, 从而影响制冷机冷腔的实际温度。测试杜瓦设计时应充分考虑二极管测温位置的设置, 避免模拟失真影响对制冷机性能的评估。

关键词: 红外探测器; 制冷机; 杜瓦组件热阻; 测温二极管

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)09-1087-05

Influence of Temperature Measuring Position at the Cold End on Cryocooler Performance

ZHAO Wenli, SUN Hao, LI Renzhi, LI Haolan, XU Anbo, HUAN Jian, ZHANG Kai, QIAO Yong
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: A mechanical cryocooler is the main equipment used to provide the low-temperature environment required for an infrared detector. The temperature of the cold chamber is lower than that of the IRFPA as measured by the diode. The temperature difference is related to the temperature measurement position of the diode and heat transfer resistance. In this study, the influence of the diode position and difference in the heat transfer resistance on the actual temperature of the cold chamber is theoretically analyzed and experimentally verified. The influence of the actual temperature of the cryocooler cold chamber on its performance is further examined via theoretical derivation and experimental testing. During the testing of the performance of the cryocooler with the Dewar test, the following points should be considered. (1) An inherent temperature difference exists between the position of the diode and the cold chamber of the cryocooler. The greater the temperature difference, the lower the actual temperature of the cold chamber, and the worse the performance of the cryocooler and test Dewar. (2) The temperature difference between the diode and cold chamber of the cryocooler is affected by the thermal resistance of the Dewar module. The greater the thermal resistance, the greater the temperature difference and the lower the actual temperature of the cryocooler chamber. (3) The position of the diode affects the thermal resistance between the diode and cold chamber, thus affecting the temperature of the cold chamber of the cryocooler. The position of the diode should be fully considered in the design of the Dewar test to avoid the influence of simulation distortion on the evaluation of the cryocooler performance.

Key words: infrared detector, cryocooler, heat transfer resistance of the IDDA, diode

收稿日期: 2022-11-26; 修订日期: 2023-03-09。

作者简介: 赵文丽 (1994-), 工程师, 主要研究方向: 旋转式斯特林低温制冷机的研发与生产。E-mail: zwl106@outlook.com。

通信作者: 李昊岚 (1990-), 高级工程师, 主要研究方向: 低温斯特林制冷机的研发与生产。E-mail: senyanlan@163.com。

0 引言

斯特林制冷机通过控制电路对冷端温度进行闭环调控，通过安装在杜瓦组件基板上的测温二极管采集并反馈基板的温度，由 PID 控制器对制冷机的工作状态进行调控，将基板处温度稳定在一定区间以内，给探测器芯片组件提供低温工作环境^[1-2]。我们通常把基板上采集的温度作为制冷机的冷端温度，来评估制冷机的性能表现。但实际上，在制冷机冷腔到基板之间，还有一些结构件，导致冷腔的温度与基板处温度有一定温差，而冷腔的温度才是制冷机实际的冷端温度 T_c 。在实际工程中，我们发现有一些型号的制冷机，在耦合模拟杜瓦时性能表现普遍优于工程杜瓦，降温时间和稳态功耗均更小，可能由于直接把测温二极管处的温度作为制冷机冷端温度进行性能评估，由此造成的对制冷机性能评估的偏差被忽略了。因此，本课题意在通过理论分析结合实验验证，对该问题进行研究。首先通过理论分析论述了制冷机冷腔与基板处的固有温差及其传热学原理，再通过实验测试证实了温差的存在，预测了该温差的存在对制冷机性能表现的影响，最后对制冷机性能进行了实验测试，验证了我们的理论分析及对制冷机性能表现的预测。

1 制冷机冷腔的实际温度

制冷机冷端温度的高低，会有两个方面的影响。一方面是制冷机自身，冷腔温度越低，制冷机负载增大、循环效率降低、制冷量越小；另一方面，冷腔温度越低，杜瓦漏热会越大，制冷机负载越大。二者作用叠加起来使得制冷机的性能表现变差^[3-4]。

如图1所示为探测器内部结构示意图,冷头为制冷机冷量输出位置,其内部膨胀腔即为冷腔,测温二极管的安装平台“基板”与冷头之间通过过渡块、基板等结构相连^[5]。一般来说,红外探测器规定的工作温度是指基板处的温度,也就是测温二极管安装的位置,意味着制冷机调控温度的过程中采集的也是基板的温度 T_0 ,典型温度为液氮温度 77 K。在实际过程中,由于过渡块、底片以及各个接触界面的存在,冷腔与测温二极管之间存在一定的热阻^[6]。式(1)为热阻的定义式,由该式可知,在热流量一定的情况下,两个面之间的热阻越大,其传热稳定后的温差越大。对于控温点为 T_0 的制冷机,控温稳定后,杜瓦组件热阻 R 越大,制冷机冷腔实际温度 T_c 越低^[7]。可见,同样性能和控温点的制冷机,匹配不同的杜瓦组件运行起来,其冷腔的温度有可能各不相同,性能表现会有差异。下文中我们通过实验测量了制冷机冷腔与基板之

间的固有温差及二极管测温位置对温差大小的影响。

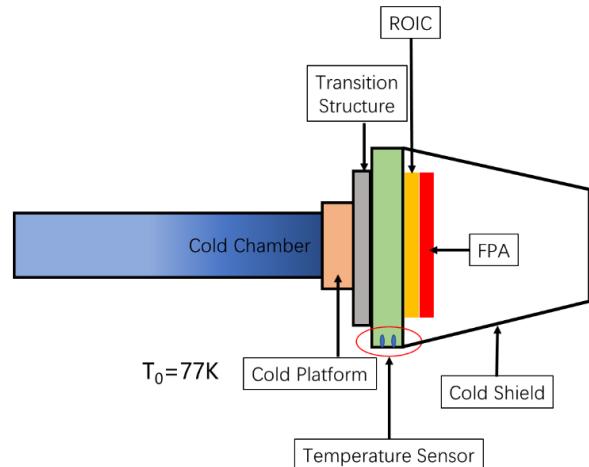


图 1 探测器内部结构的示意图

Fig.1 Structure of infrared detector

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_0 - T_c}{Q_s} \quad (1)$$

式中: Q_s 为控温稳定之后界面上的热流量。

2 二极管测温位置及热阻对冷腔温度的影响

把测温二极管分别焊在动态杜瓦底片上和热质量块上，测量传热温差大小的差异^[8]。焊接位置如图 2(a)、图 2(b)所示，图 2(a)为测温二极管粘在动态杜瓦内管底片上，下文简称 A 结构，图 2(b)为测温二极管焊接在动态杜瓦热质量块上，下文简称 B 结构。分别各取 5 个结构 A/结构 B 的测试杜瓦，形成两组实验样品，测试冷腔与二极管的传热温差，实验中在动态杜瓦冷指管内灌满液氮，待温度稳定后读取测温二极管的示数，可得到传热稳定后冷腔与二极管测温处的温差，结果如表 1 所示，可见，杜瓦结构有差异时，冷腔到测温二极管之间的温差也有差异，且结构 B 的温差均大于结构 A 的温差。由此，我们可以得出推论：

二极管焊接位置导致的传热温差的差异，其背后的传热学原理实际上是热阻差异。上述 A、B 结构的杜瓦组件，A 结构制冷机冷腔与测温二极管之间的热阻可简化为如图 3(a)所示的示意图，B 结构冷腔与测温二极管之间的热阻可简化为如图 3(b)所示的示意图。令结构 A 的热阻为 R_1 ，结构 B 的热阻为 R_2 ，根据串联热阻叠加原理， R_1 、 R_2 的热阻组成如式(2)、(3)所示：

$$R_1 \equiv R_{\text{cold, platform}} \quad (2)$$

$$R_2 \equiv R_{\text{heat block}} + R_{\text{glue}} + R_{\text{cold platform}} \quad (3)$$

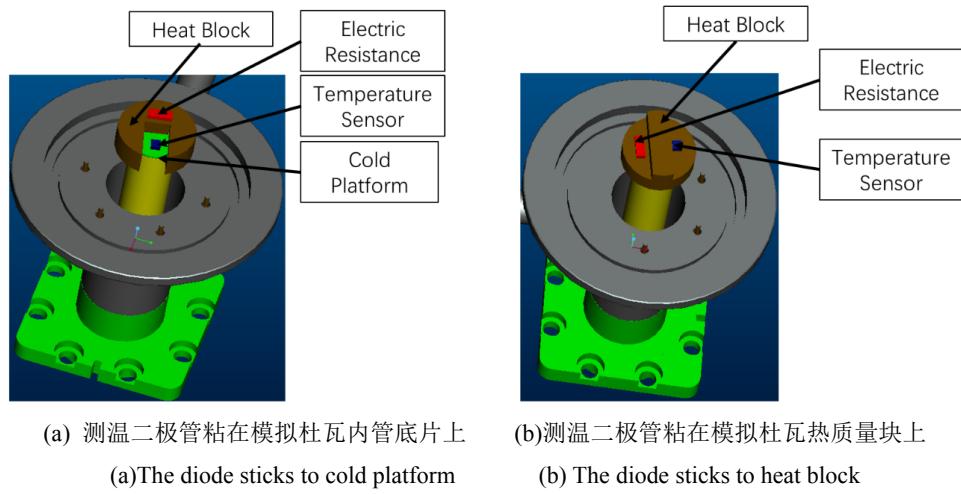


图2 测试杜瓦结构示意图

Fig.2 Structure of test Dewar

表1 制冷机冷腔与测温二极管的温差测试结果

Table 1 Test results of temperature difference between cold chamber and diode

Number of sample	1#	2#	3#	4#	5#
Temperature difference of A	1.76	1.60	1.81	1.81	2.19
Temperature difference of B	1.88	1.63	1.94	1.81	2.25

Note: Temperature difference=Temperature of diode -

Temperature of cold chamber;

Diode: Calibration accuracy 0.01 mV@50~300 K

Electric Resistance: 100 Ω 0.1%@77 K

显然 R_2 要大于 R_1 。同时, 根据工程经验数据, 对组成 A、B 结构的热阻进行计算, 结果如表 2 所示, 当 T_0 取同一个值时, 传热稳定后, 根据式(1), $T_2 < T_1$ 。由此, 可以进一步得出结论: ①二极管测温位置不同时, 制冷机冷腔与测温二极管之间的热阻有差异, A 结构制冷机冷腔与测温二极管之间的热阻小于 B 结构。②对于同一台制冷机, 控温稳定后, 杜瓦组件热阻 R 越大, 制冷机冷腔实际温度 T_c 越低。

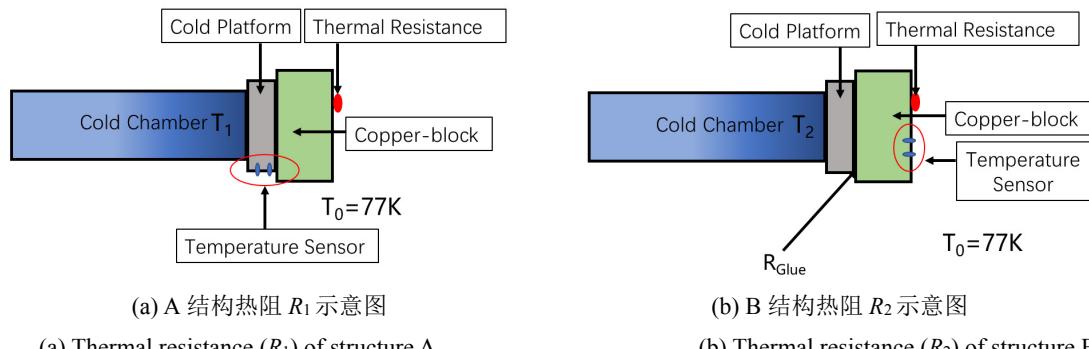


图3 A 结构与 B 结构的热阻示意图

Fig.3 Thermal resistance of structure A and B

表2 动态杜瓦各结构件热阻计算

Table 2 Thermal resistance of test Dewar

	Thermal conductivity / (W/m·K)	Thickness / mm	Area / mm ²	Thermal resistance / (K/W)
Cold platform	13.81	1.50	63.62	1.71
Glue 1	0.89	0.05	78.54	0.72
Heat block	386.00	2.90	201.06	0.04

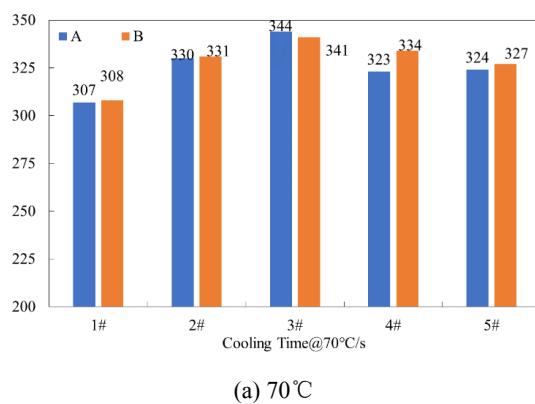
至此, 证实了二极管测温位置及杜瓦组件的热阻大小这两个因素对制冷机冷腔与测温二极管之间的温差的影响趋势。根据上述的分析, B 结构的杜瓦组件热阻更大, 制冷机冷腔的实际温度更低, 可以预测, 同一台制冷机分别配 A、B 结构的杜瓦组件进行性能测试, 配 A 结构杜瓦组件时制冷机的性能表现更好。下一章中, 将通过实验对该预测进行验证。

3 制冷机的性能表现

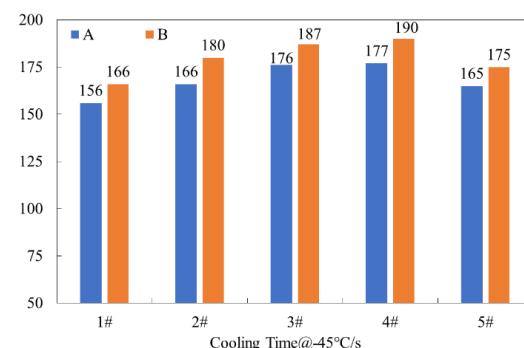
通过上述理论分析,可以预测在相同工况下,制冷机匹配A结构时的性能表现要优于匹配B结构时的性能表现^[3]。对此,取5只制冷机分别匹配上一章实验中所使用1#~5#号A结构状态和B结构状态的动态杜瓦,为保证环境温度,在温箱内对制冷机的性能进行测试。

制冷机在不同环境温度下的降温时间如图4所示,可以看见,制冷机匹配B结构杜瓦组件时,制冷机的降温时间总体更长,3号试样在70℃时降温时间出现反差,该数据点是由实验所用的制冷机及动态杜瓦在不同温区的性能差异引发的,属于不影响总体规律的正常的实验误差。控温功耗测试结果如图5、图6所示,可以看见,在制冷机负载状态和非负载状态下,制冷机匹配B结构杜瓦组件时的控温功耗总体均更大,3号试样在-45℃时功耗出现反差,数据点是由实验所用的制冷机及动态杜瓦在不同温区的性能差异引发的,属于不影响总体规律的正常的实验误差。制冷机性能测试结果与我们预测的结果一致,由于B结构杜瓦组件的热阻更大,基板与制冷机冷腔的温差较大,在同样的77K控温点条件下,制冷机匹配B结构时,冷腔的实际温度更低,性能表现更差。

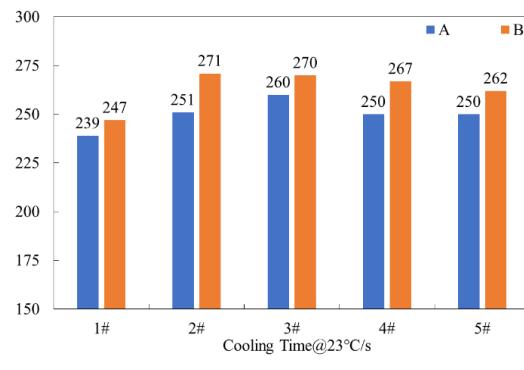
由此可见,在探测器组件上对制冷机的性能进行评价的过程中,虽然控温点都设置为77K,但制冷机实际面临的负载并不一定是一样的,甚至可能会有负载差异很大的情况,导致制冷机性能表现差异很大。由此可以得出两点工程应用建议:制冷机在探测器组件上性能表现差时,应该更进一步定位深层次原因,是制冷机本身性能不足还是热阻因素造成冷腔实际温度过低;在使用动态杜瓦对一台制冷机的性能进行评估时,有必要剥离杜瓦热阻的差异及二极管测温位置差异带来的评估偏差。



(a) 70℃



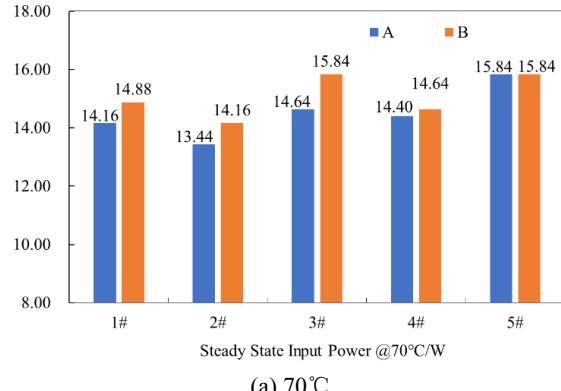
(b) -45℃



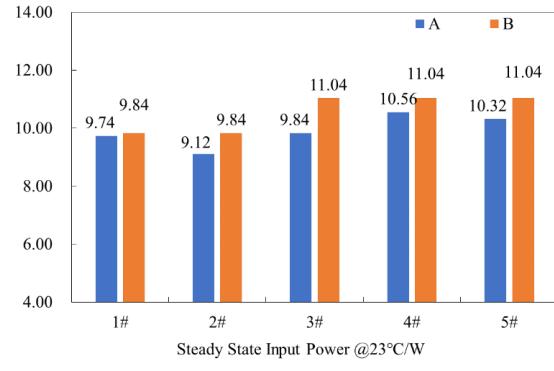
(c) 23℃

图4 制冷机降温时间对比

Fig.4 Comparison of cooling time of cooler



(a) 70℃



(b) 23℃

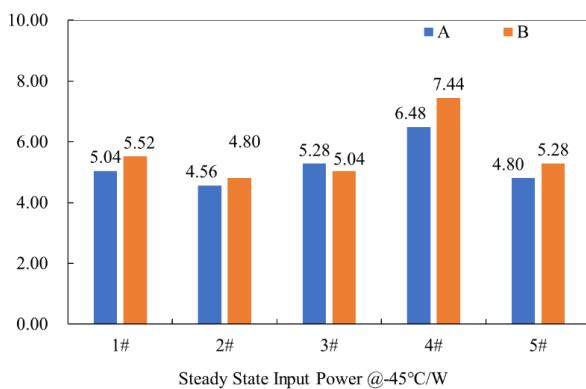
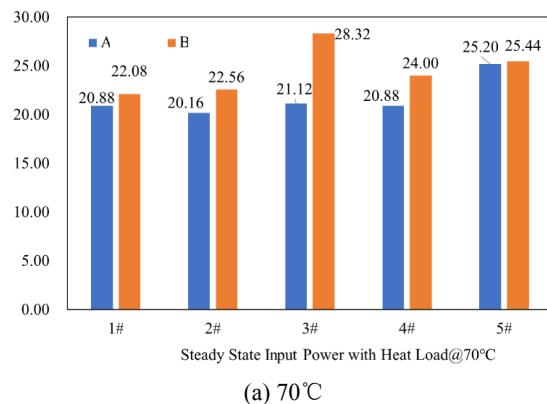
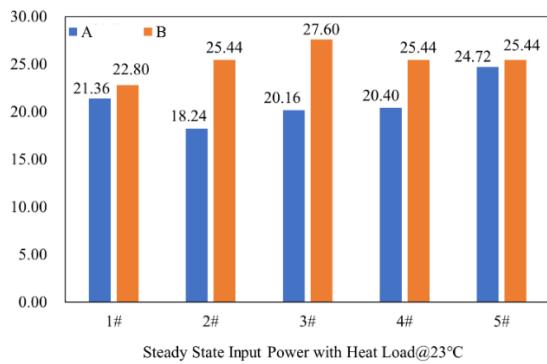


图5 制冷机控温功耗对比
(c) -45°C

Fig.5 Comparison of steady state input power of cooler



(a) 70°C



(b) 23°C

图6 制冷机负载状态功耗对比

Fig.6 Comparison of power consumption of cooler with heat load

4 结论

综上，本文主要做了以下两方面的工作：分析了制冷机冷腔的实际工作温度，证实了制冷机冷腔温度与基板温度存在固有温差及其影响因素；对匹配结构不同的杜瓦组件的制冷机进行性能测试，证实了该温差对制冷机性能表现的影响。

得到以下结论：①测温二极管与制冷机冷腔存在固有温差。在测温二极管检测到的温度一定的情况下，该温差越大，制冷机冷腔的实际温度将越低，制

冷效率降低，同时杜瓦漏热增大，叠加造成制冷机负载增大，制冷机与杜瓦的性能总体表现均越差。②测温二极管与制冷机冷腔的温差大小受杜瓦组件热阻的影响。热阻越大，该温差越大，制冷机冷腔实际温度越低。③测温二极管焊接位置会影响杜瓦组件的热阻大小，从而影响制冷机冷腔的实际温度。动态杜瓦设计时应充分考虑二极管测温位置的设置，避免模拟失真影响对制冷机性能的评估。

参考文献：

- 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010, 127. CHEN Guobang, TANG Ke. *Principle of Small Cryogenic Refrigerator*[M]. Beijing: Science Press, 2010, 127.
- 边绍雄. 小型低温制冷机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 72. BIAN Shaoxiong. *Small Cryogenic Refrigerator*[M]. Beijing: China Machine Press, 1983: 72.
- 陶文铨. 传热学[M]. 5版, 北京: 高等教育出版社, 2019. TAO Wenquan. *Heat Transfer*[M]. 5th ed., Beijing: Higher Education Press, 2019.
- Veprik Alex, Shlomovich Baruch, Tuito Avi. Multi-slope, warm-up calorimetry of integrated dewar-detector assemblies[C]//*Proceedings of SPIE-The international Society for Optical Engineering*, 2015: 9451.
- 王镇. 红外焦平面组件低温封装截面热阻研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2020. WANG Zhen. Research on Interface Thermal Resistance of Cryogenic Packaging for Infrared Focal Plane Assembly[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- 张磊, 王冠, 付志凯. 红外探测器杜瓦的小型化设计方法[J]. 红外, 2020, 41(9): 15-19. ZHANG Lei, WANG Guan, FU Zhikai. North Compact Design Method of Infrared Detector Dewar[J]. *Infrared*, 2020, 41(9): 15-19.
- 徐海峰, 罗高桥, 李泽昊. 红外冷光学用杜瓦静态真空维持及其漏热分析[J]. 低温与超导, 2020, 48(6): 26-42. XU Haifeng, LUO Gaoqiao, LI Zehao. Analysis on the static vacuum maintenance and heat leakage mechanism of the dewar used in infrared cold optical system[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2020, 48(6): 26-42.
- 张亚平, 杨秀华, 何胤, 等. 高温工作型红外探测器杜瓦漏热分析与测试[J]. 真空, 2019, 56(3): 60-65. ZHANG Yaping, YANG Xiuhua, HE Yin. High-temperature working infrared detector Dewar heat load test technology[J]. *Vacuum*, 2019, 56(3): 60-65.