

〈制冷技术〉

HOT 器件用旋转式斯特林制冷机研究进展

赵文丽, 李昊岚, 孙 皓, 黄 伟, 李仁智, 环 健, 陈 军, 张应旭, 徐睿驹
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 随着碲镉汞 (mercury cadmium telluride, MCT) 材料制备工艺的改进和提升, 芯片组件的暗电流得到一定程度的抑制, 红外探测器芯片组工作温度上升成为发展趋势。高工作温度 (high operation temperature) 器件的发展推动着小型低温斯特林制冷机向更小尺寸 (size)、更小重量 (weight)、更低功耗 (power)、更低成本 (price)、更好性能 (performance) 的方向发展。本文介绍了 HOT 器件用斯特林制冷机的 SWaP3 设计理念, 薄壁管短冷指、高效小尺寸控制器、综合热管理、可靠性预测等设计技术, 总结了近年国内外 HOT 器件用旋转式斯特林制冷机的研制进展。
关键词: 红外探测器; HOT 器件; 低温制冷机
中图分类号: TB651 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)02-0195-07

Overview of Micro-Rotary Stirling Cryocoolers for
HOT IR detectors

ZHAO Wenli, LI Haolan, SUN Hao, HUANG Wei, LI Renzhi, HUAN Jian, CHEN Jun, ZHANG Yingxu,
XU Ruiju
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: With the improvement and promotion of the Mercury Cadmium Telluride (MCT) material preparation process, the dark current of the FPA is suppressed to a certain extent, and an increase in the operating temperature of IR detectors has become a development trend. The development of high-operating-temperature IR detectors promotes the development of micro-Stirling cryocoolers to reduce the size, weight, power consumption, and cost, and promote their performance. The SWaP3 design concept of Stirling cryocoolers for HOT IR detectors is presented. Design techniques such as thin-walled tube short cold fingers, high-efficiency small-size controllers, comprehensive thermal management, reliability prediction, and the recent domestic and foreign development status of Stirling cryocoolers for HOT IR detectors are summarized.
Key words: infrared detector, HOT, cryocoolers

0 引言

高性能制冷型红外探测器的工作温度在 77 K 附近, 配置旋转式、直线型小型低温斯特林制冷机以提供低温工作环境, 已广泛用于军事的多维信息获取及战场态势感知技术, 如反装甲 (坦克) 武器制导、防空武器制导、舰载火控、前视红外成像系统、红外搜索与跟踪系统、红外对抗系统、红外制导导弹等^[1-3]。对红外探测器组件而言, 工作温度不影响接收信号的截止波长、量子效率等, 但会对热生载流子浓度造成影响, 通过新工艺或新结构控制热生载流子的流动可以实现探测器工作温度的提高。随着碲镉汞 (mercury cadmium

telluride, MCT) 材料制备工艺的改进和提升, 红外探测器芯片组的暗电流得到一定程度的抑制, 工作温度有上升的趋势^[4-5], 文献中有 95 K、120 K、140 K、150 K、175 K、200 K、210 K、250 K 等报道^[1], 统称为 HOT (high operation temperature) 红外探测器。HOT 红外探测器配置的低温制冷机尺寸、体积、重量都明显减小, 显著提高了制冷机的热力学效率, 可使用带可调增压器的数字控制器实现低于 2 W DC 的低输入功率, 实现快速冷却, 适用于微型无人机、手持热像仪、手持夜视镜的陀螺稳定有效载荷等设备。第三代 MCT 焦平面阵列要求的目标工作温度是 190~300 K, 且性能达到 77 K 时的指标。探测器芯片对制冷需求降低的趋势,

收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2021-12-17.
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: 孙皓 (1979-), 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 低温斯特林制冷机的研发与生产。E-mail: 652700@sina.com。

推动了尺寸更小、重量更轻、效率更高、成本更低的微型斯特林制冷机的研制与发展^[6-8]。本文阐述了 HOT 器件用的微型斯特林制冷机的设计技术,综述了目前国内外针对 HOT 红外探测器研制的微型旋转式斯特林制冷机的发展,涵盖以色列 RICOR、法国 Thales Cryogenics、高德红外等研制单位的产品。

1 HOT 器件用制冷机的设计理念

HOT 器件用小型低温斯特林制冷机的设计遵循 SWaP3 准则,SWaP3 是 1999 年由唐纳德·里高等人提出的高性能、低成本的思想基础上发展而来,即更小的尺寸 (Size)、更小的重量 (Weight)、更低的功耗 (Power)、更低的成本 (Price)、更好的性能 (Performance)^[8],主要的性能指标包括制冷量、功耗和降温时间。

用于 HOT 器件的微型旋转式斯特林制冷机由于工作温度升高,制冷机热力学效率提升,对制冷量的需求相对降低。制冷机的制冷系数 COP (coefficient of performance) 定义为制冷量 Q_c 与净输入功 Q_e 之比,如下式(1):

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{T_c}{T_a - T_c} \quad (1)$$

式中: T_c 为器件工作温度; T_a 为循环最高温度,通常为环境温度。可见,同等条件下,器件工作温度 T_c 从 77 K 提高到 150 K,制冷机效率会提高接近 3 倍。

制冷机的整体效率不仅取决于斯特林循环的效率,还取决于其他子系统,其效率由热循环效率、机械效率、电机效率、控制器效率组成,如下式(2):

$$\eta_{\text{cooler}} = \eta_{\text{cycle}} \times \eta_{\text{machine}} \times \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{CDE}} \quad (2)$$

器件的工作温度升高以后,斯特林循环的制冷系数和蓄冷器填料的比热容会有所提升,故热力学循环的效率 η_{cycle} 会随之提升;冷头温度升高,其漏热损失会降低,沿杜瓦轴向的温度梯度减小,轴向导热损失、穿梭损失等热损失都会降低,制冷机的效率 η_{cooler} 会整体提升。

2 HOT 器件用制冷机设计技术

在上述设计理念指导下,相比于常规液氮温区制冷机,除了制冷量需求降低引起的压缩副尺寸减小等变化以外,当前 HOT 器件用斯特林制冷机技术的发展有以下几个重要的方面。

2.1 薄壁管短冷指设计技术

HOT 器件用制冷机通常匹配专门的冷指,通过对冷指材料、几何形状和制造工艺进行优化,以减小冷指的尺寸、壁厚及冷端厚度,在保证冷指刚度的同时

减少其漏热。常规冷指与短冷指的主要差异包括:①冷指长度不同,HOT 器件用制冷机通常匹配短冷指;②冷指壁厚不同,冷指漏热主要来源是杜瓦瓶与外界环境的热传导、热对流和热辐射。与冷指进行匹配的杜瓦瓶内部抽真空,对流换热导致的热损失忽略不计,抛光冷指外表面可大量减少热辐射,因此主要漏热来源于热传导。传导漏热与杜瓦材料导热系数和材料厚度有关。薄壁管中的导热传热率为式(3):

$$Q = \frac{KA(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} \quad (3)$$

式中: K 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; A 为横截面积, m^2 ; T_{Hot} 为制冷机热端温度, K ; T_{Cold} 为制冷机冷端温度, K ; L 为长度, m 。冷指管的传热方程为式(4):

$$Q = K\pi(R^2 - r^2) \frac{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} = K\pi(R^2 - (R - r)^2) \frac{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} = K\pi(2Rt - t^2) \frac{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} \quad (4)$$

式中: R 是管的外径; r 是管的内径; t 是管的厚度,由于厚度远小于半径,可以简写为式(5):

$$Q = 2K\pi Rt \frac{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} \quad (5)$$

从式(7)中我们可以看到传热速率 Q 是厚度 t 的线性函数,因此减小厚度会降低整个冷指管的传导散热。如图 1 所示为 RICOR 公司不同材料及壁厚的冷指在 95 K 工作温度时的漏热大小^[9],可见管壁厚度增加会导致漏热增加。图 2 为 RICOR 公司 HOT 器件用冷指漏热随壁厚变化及 RICOR 公司冷指壁厚的设计范围^[10]。对于冷指的设计,在尺寸要求占主导地位的应用中,可缩短冷指及对蓄冷器进行优化,在功耗要求占主导地位的应用中,冷指壁厚可从 80~100 μm 的范围减小到 50~60 μm 。

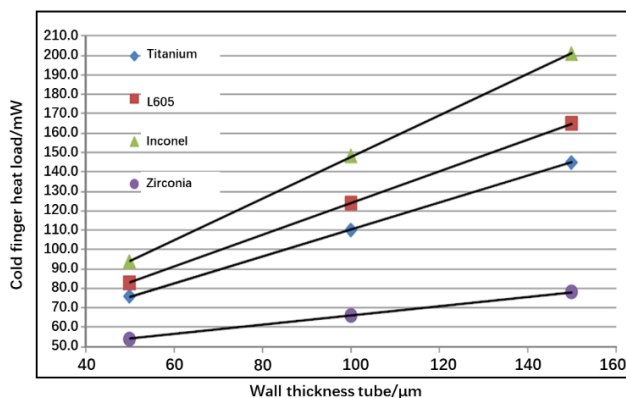


图1 不同材料的冷指管从 300 K 到 95 K 的热负载大小

Fig.1 Cold finger heat load from 300 K to 95 K derived from different tube materials

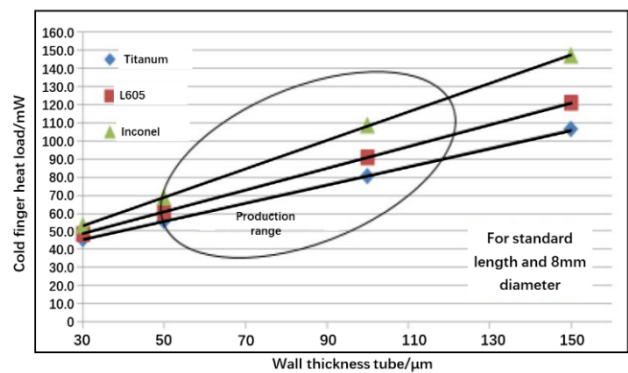


图 2 不同材料的冷指管从 300 K 到 150 K 的热负载大小
Fig.2 Cold finger heat load from 300 K to 150 K derived from different tube materials

2.2 高效小尺寸控制器技术

与常规控制器相比, HOT 器件用小型紧凑制冷机匹配的高效轻质控制器, 应具有更小的尺寸重量, 更高的控温精度以及更高的效率. HOT 器件制冷机配置

的控制器, 在以下几个方面取得了一定进展: ①控制器采用双 PCB (printed circuit board) 构, 以减小外部尺寸; ②采用数字化控制器, 控制精度和效率都有所提升, 同时减小了驱动控制电路的尺寸与重量。③以“电压控制电路”原理控制电机, 从而实现转速的电机调控, 能一定程度上改善 PWM (pulse width modulation) 波调制对控制器效率的影响, 提高控制器的效率。④比起常规制冷机控制器, 驱动电压范围更宽泛。同时, 用于 HOT 器件的制冷机配置的控制器还有以下提升方向: 无传感器调控方案或 ADUC 处理器控制无刷直流电机的有传感器调控方案; 用户自主可控温点等^[1]。常规液氮温区制冷机配置的控制器、RICOR 在 2019 年报道的用于 HOT 器件的 K580 制冷机^[11]所用控制器及 HOT 器件用制冷机控制器设计指标如表 1 所示, 可以看到 RICOR 控制器效率的提升和尺寸重量的减小。

表 1 HOT 器件用制冷机控制器主要特性

Table 1 Main characteristics of the cryocooler controller of HOT detector

Cryocooler	Traditional controller	RICOR K580	HOT controller
Controller type	Digital/Analog	Digital	Digital
Efficiency	80%	>80%	>90%
Input Voltage	12–24 V	4–16 V	Work with a wide operation voltage
Temperature drift	±0.6 K	±0.2 K	>±0.1 K
Temperature stability	±3 K	±0.1 K	>±0.2 K
Weight	120 g	30 g	<30 g

2.3 制冷机综合热管理技术

制冷机是集成度较高的机电产品, 同时内部含有压缩机进行热力学循环, 导致机体发热较明显。制冷机的表面温度会直接影响其性能, 系统的热管理对于低温制冷机的功耗和冷却能力至关重要。优化热力学过程、改进热管理, 是提高温度环境适应性的重要措施^[2]。制冷机的主要发热源为压缩机部件、电机部件、控制器部件。压缩机部件发热源于热力学循环中压缩过程产热及冷指端换热, 电机部件发热来源于绕阻焦耳热, 控制器部件发热源于电子元器件发热。不加散热夹具时, 散热面主要集中在制冷机安装基准面 (约占 40%)、压缩机缸盖 (约占 30%)、电机表面 (约占 30%), 一般要求机体表面温度不高于环境温度 10℃。HOT 器件用制冷机由于功耗更低, 散热要求更低一些, 设计应充分考虑散热条件, 全温区内机体表面温度与环境温度的温差越小越有利于制冷机性能的释放。考虑到制冷机散热设计中由于机体与环境温差较小, 同时整体内部空间相对密闭, 辐射散热与对流散热作用都较弱, 设计过程应充分强化制冷机几个主要散热面

与光学平台之间的热传导进行散热, 条件允许时增加热沉强化散热。RICOR 为满足高环境温度及机载战斗机的严酷振动水平开发了 K544 旋转集成式斯特林制冷机, 并在制冷机层面强化了散热设计, 主要包含 3 个方面: ①电机和压缩机外壳之间要有足够的热耦合; ②PCB 内部设计专门散热路径; ③冷指法兰和低温制冷机安装表面之间要有足够的热耦合。该机型可在 102℃环境温度、95 K 工作温度下输出 1.3 W 的制冷量, 温度环境适应性提升显著^[12]。

2.4 可靠性预测

旋转式低温制冷机主要故障机制是运动部件的机械磨损, 影响制冷机内部机械部件磨损的一个重要因素制冷机的转速, 转速直接影响活塞/气缸部件的线速度和制冷机中不同轴承的转速, 从而直接影响这些部件的磨损^[13]。旋转制冷机常规的寿命终止模式是磨损导致的轴承故障^[14], 消除或减缓磨损可以提高制冷机可靠性。常规旋转制冷机活塞耐磨技术是依靠镀层对活塞实施保护。DLC 和 TiN 硬质镀层微观结构致密, 硬度高、摩擦系数低, 可以较好地保护活塞, 提

高耐磨寿命^[2]。

关于制冷机可靠性的预测, RICOR 报道过他们的一般预测方法^[15], 此后没有太大变化。预测模型是一个乘法模型, 在规定工作条件下给定制冷机的实际 MTTF (mean time to failure) (θ_{PR}) 是通过将来自寿命测试或现场数据的基线 MTTF 值 (θ_b) 乘以一系列转换因子 (π) 得到的。这些因素量化了基线 MTTF 从参考条件到实际运行条件对环境变换的修正^[9]。预测模型为式(6):

$$\theta_{PR} = \theta_b \pi_E \pi_T \pi_{S1} \pi_{S2} \dots \quad (6)$$

式中: θ_{PR} 为预测 MTTF; θ_b 为基线 MTTF; π_E 为环境因子; π_T 为环境温度因子; π_{Si} 为应力 i 转换因子, 工作应力转换因子包括制冷机工质压力 P 和工作频率 H , 它由热负载和 FPA 温度等参数得出, 故:

$$\theta_{PR} = \theta_b \pi_E \pi_T \pi_P \pi_H \quad (7)$$

因子 π_P 、 π_H 根据逆幂律计算如式(8):

$$\pi_P = \left(\frac{P_b}{P_{PR}} \right)^2, \pi_H = \left(\frac{H_b}{H_{PR}} \right)^2 \quad (8)$$

式中: b 和 PR 分别代表参考点和实际工作点的工作条件。RICOR 通过加速寿命实验的测试结果, 对 K580 的基线寿命进行了预测^[11]。

Thales 也做了大量寿命测试、可靠性分析来提高制冷机的可靠性, Thales 的可靠性研究建立了能够计算制冷机 MTTF 的表达式如式(9)^[16]:

$$MTTF_{base_RM} = \left(\frac{RPM_{A20}}{RPM_{20^\circ C}} \right)^{1.5} MTTF_{A20 \text{ test Weibull}} \quad (9)$$

$MTTF_{base_RM}$ 为制冷机在典型条件(标准工作温度为 77K, 环境温度为 20℃)下的基线 MTTF, $MTTF_{A20 \text{ test Weibull}}$ 是 Thales 在 A20 剖面测得的加速寿命试验的结果, RPM_{A20} 是 Thales 的制冷机在 A20 加速寿命测试中制冷机的转速, $RPM_{20^\circ C}$ 是典型条件下制冷机的转速。Thales 的研究表明^[13], HOT 器件用制冷机工作温度从 110K 到 150K 时, 制冷机的负载整体降低, 转速会降低约 30%。在 110K 制冷温度和 +20℃ 环境温度下, 若制冷温度升高导致转速降低 30%, 则对制冷机可靠性的影响可由式(10)计算:

$$MTTF_{base_RM \text{ HOT}} = \left(\frac{RPM_{A20}}{0.7 * RPM_{20^\circ C}} \right)^{1.5} MTTF_{A20 \text{ test Weibull}} \quad (10)$$

$$= 1.7 * MTTF_{base_RM}$$

可见, 制冷温度的升高对制冷机的可靠性有重要影响。制冷机转速降低 30% 时(相当于制冷温度从 110 K 到 150 K), 预计制冷机的 MTTF 可增加 70%。

3 国内外 HOT 器件用旋转式斯特林制冷机

旋转式斯特林制冷机由旋转电机驱动, 具有结构紧凑、效率高、启动快等特点, 但是整机结构较复杂、振动噪音较大, 尤其是运动部件的相互磨损、制冷工质的污染和泄漏使得制冷机的工作寿命受到一定的限制。传统用于红外探测器的旋转式斯特林制冷机工作温度在 70~80 K, 重量多在 250~1000 g 范围。用于 HOT 器件的微型旋转式斯特林制冷机主要设计改进为: ①使用更高效率和性能的控制电机; ②冷指材料、结构改进以减小冷指尺寸和热损失; ③降低充气压力。典型结构与性能参数为: ①重量在 200 g 以下; ②室温下稳态功耗低于 2 W; ③降温时间在 3 min 以内; ④工作电压在 6~7 V; ⑤控制器效率提高到 90% 以上; ⑥ MTTF > 15000 h。以色列 RICOR、法国 Thales 等公司都在持续不断地做微型旋转式斯特林制冷机的研制。

以色列 RICOR 公司 2012 年在 SPIE 报道的 K562S 型旋转式斯特林制冷机的改型, 将冷指长度由原来的 45 mm 降低到 22.5 mm, 工作温度在 130~150 K, 充气压力从 20 Bar 降至 16 Bar, 该制冷机在 23℃ 环境温度 150 K 工作温度, 热负载为 160 mW 时稳态功耗为 1.9 W。如图 3、图 4 为 RICOR 公司 K562S short & K562S 斯特林制冷机及其外型尺寸图。K562S short 制冷机的质量能做到 135 g。若对功耗要求较高, 冷指壁厚还可从 80~100 μm 降到 50~60 μm ^[9-10]。RICOR 另外的产品 K563 型旋转式斯特林制冷机工作温度从 77 K 升至 130~150 K 之后, 充气压力从 18 Bar 降低至 6~8 Bar, 室温下稳态功耗在 1.55~1.64 W^[9]。RICOR 将常规 77 K 工作的常规旋转式斯特林制冷机 K561 工作温度从 77 K 升至 150~200 K, 充气压力从 20 Bar 降低至 10 Bar, 在 23℃ 环境温度@200 K 控温点, 测得稳态功耗低于 1.2 W^[9]。在功耗、质量等方面均有了较大的提升。RICOR 公司 2015 年报道的 K562SI 是为 HOT 探测器设计的旋转整体式低温制冷机, 它基于 K562 作了如下改进: ①更高效率和性能的新型电机; ②冷指更薄更短, 以减小漏热。改进之后, 热负载为 190 mW 时, 在 140 K 时的功耗低于 2.5 W; 降温时间少于 3 min 30 s; 71℃ 环境温度@150 K 控温点时的总制冷量为 500 mW, 重量低于 185 g, 如图 5、图 6 所示^[17]。RICOR 公司开发的 K580 型旋转集成式制冷机^[11,18], 如图 7 所示。RICOR 对其进行了较多性能测试及寿命测试, 在 150 K 控温点、150 mW 热负载、23℃ 环境温度下控温功耗约 1.5 W, 150 J 热负载下降温时间约 3 min,

在 71℃环境温度、150 K 控温点下的最大制冷量为 600 mW^[11]。Thales 公司针对 HOT 器件开发了 RM1 制冷机, 如图 8 所示, 其性能测试结果显示, 在常温下, 工作温度每上升 20 K, 制冷机的降温时间加快约 15%, 稳态输入功耗约降低 15%^[13]。武汉高德红外公司基于 RS046 旋转集成式斯特林制冷机开发的 RS046H 旋转分置式斯特林制冷机, 适配 $\phi 6.4$ mm 的冷指, 可在 -45℃~+85℃的环境温度范围下工作, 比起其他公司的 HOT 器件用制冷机, 环境适应性有所提升, 能在 100 K 控温点@20℃环境温度下输出 400 mW 冷量。表 2 对比了几种用于 HOT 器件的旋转式斯特林制冷机的主要参数。



图 3 K562S short & K562S 制冷机
Fig.3 K562S short & K562S cryocooler and controller image

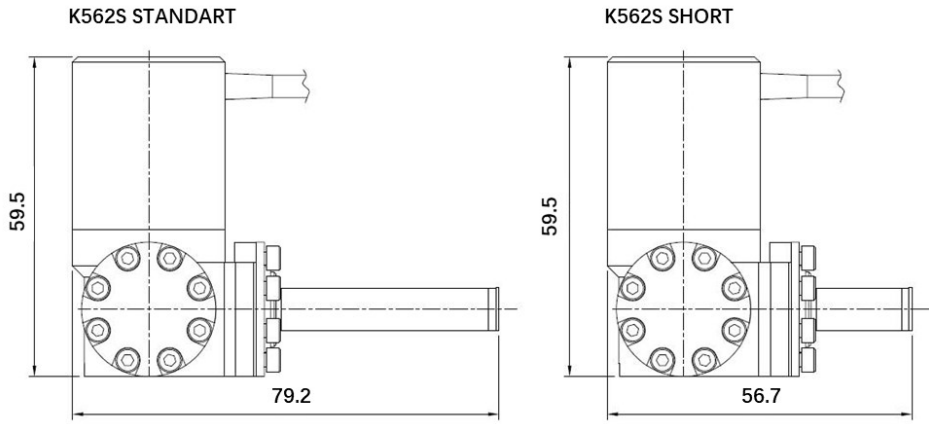


图 4 K562S short & K562S 制冷机外形图
Fig.4 K562S short and K562S cryocooler profile

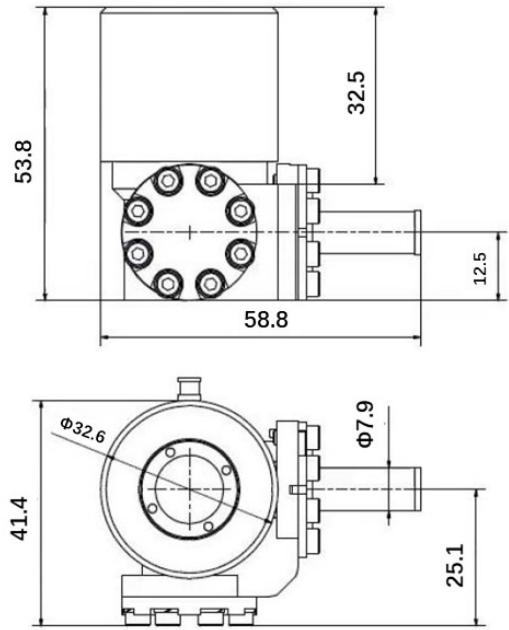


图 5 K562SI 制冷机外形图
Fig. 5 K562SI cryocooler profile



图 6 K562SI 制冷机实物
Fig. 6 K562SI cryocooler and controller image

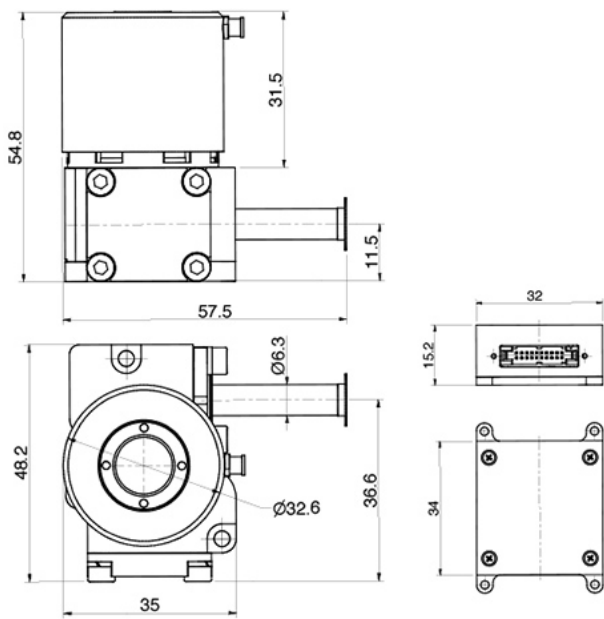


图 7 K580 制冷机外形图
Fig.7 K580 cryocooler profile

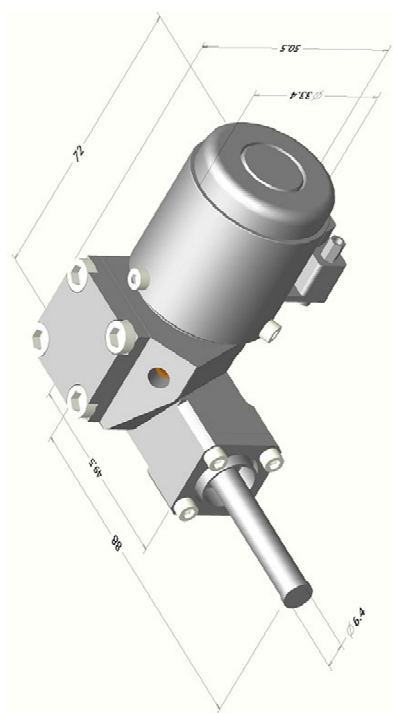


图 8 RM1 制冷机外形图
Fig. 8 RM1 cryocooler profile

表 2 HOT 器件用旋转式斯特林制冷机

Table 2 Micro-rotary Stirling cryocoolers for high operating temperature applications			
	RICOR K562S SHORT	RICOR K562S	RICOR K562SI
Cooling capacity	400 mW@150 K, 71℃	350 mW@110 K, 71℃	500 mW@150 K,71℃
Cooldown time	3.5 min@150 J,150 K	4 min@160 J,110K	3.5 min@150 J,150 K
Power operation	12 V	12 V	12 V
Input power	2.6 W@185 mW,150 K	3 W@200 mW, 110 K	2.5 W@200 mW,150 K
Maximum input power	12 W	14 W	11 W
Weight	215 g	215 g	215 g
MTTF	17000 h	12000 h	17000 h
Temperature range	-40℃-+71℃	-40℃-+71℃	-40℃-+71℃
	RICOR K580	THALES RM1	GUIDE INFRARED RS046H
Cooling capacity	600 mW@150 K, 71℃	420 mW@110 K, 20℃	>400 mW@100 K, 20℃
Cooldown time	3 min@150 J,150 K	4.5 min@110 J,110 K	<5min@110J@100K, 20℃
Power operation	4-16 V	12 V	24-32 V
Input power	1.5 W@150 mW,150K	2.9 W@100 mW,110K	<3.5 W@130 mW,100K
Maximum input power	10 W	10 W	<12 W
Weight	210 g	250 g	<260 g
MTTF	16000 h	24000 h	>10000 h
Temperature range	-40℃-+71℃	-40℃-+71℃	-45℃-+85℃

4 结论

本文主要阐述了 HOT 器件用旋转斯特林制冷机

的 SWaP3 设计理念、设计技术，总结了近年国内外 HOT 器件用斯特林制冷机开发的进展。HOT 器件用小型低温斯特林制冷机的设计应遵循 SWaP3 准则，

以 SWaP3 准则为指导发展薄壁管短冷指、高效小尺寸控制器、制冷机综合热管理、可靠性预测等设计技术。目前半导体理论体系基本上没有太多的变化,其工作温度需求的提升得益于材料器件制造工艺的提升。随着器件制造工艺的不断提升,在现有基础理论下探测器工作温度不断提高已经成为明确的发展方向,未来的制冷机市场也必将是 HOT 制冷机的市场。

参考文献:

- [1] CHEN Xiaoping, SUN Hao, NIE Xiliang, et al. Overview of micro-miniature stirling cryocoolers for high temperature applications[C]// *International Cryocooler Conference (ICC19)*, 2016: 115-120.
- [2] 孙皓, 陈晓屏, 乔勇. 小型斯特林制冷机的航空应用与发展趋势[J]. *红外技术*, 2015, **37**(11): 906-910.
- SUN Hao, CHEN Xiaoping, QIAO Yong. A review of micro stirling cooler for aero[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(11): 906-910.
- [3] 习中立, 陈军, 陈晓屏, 等. HOT 器件用自由活塞斯特林制冷机研究进展[J]. *真空与低温*, 2018, **24**(3): 151-156.
- XI Zhongli, CHEN Jun, CHEN Xiaoping, et al. Overview of free piston stirling cryocoolers for HOT detectors[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2018, **24**(3): 151-156.
- [4] 王忆锋, 刘萍. 论高工作温度碲镉汞红外探测器(下) [J]. *红外*, 2019, **35**(9): 7-13.
- WANG Yifeng, LIU Ping. On the high operating temperature mercury cadmium telluride infrared detector[J]. *Infrared*, 2019, **35**(9): 7-13.
- [5] 王忆锋, 刘萍. 论高工作温度碲镉汞红外探测器_上_王忆锋[J]. *红外*, 2019, **35**(9): 1-8.
- WANG Yifeng, LIU Ping. On the high operating temperature mercury cadmium telluride infrared detector[J]. *Infrared*, 2019, **35**(9): 1-8.
- [6] Riabzev S V, Radchenko D, Raf D, et al. Ricor's new development of HOT cryocoolers: compact cost-effective linear model[C] // *Proc of SPIE on Infrared Technology and Applications XLV*, 2019: **11002**: DOI:10.1117/12.2520842.
- [7] Nussberger M, Zehner S, Withopf A, et al. Update on AIM HOT cooler developments[C]// *Proc. SPIE on Infrared Technology and Applications XLV*, 2019: **11002**: DOI:10.1117/12.2520488.
- [8] 孙皓, 陈晓屏. HOT 微型斯特林制冷机技术分析[C] // *第三届全国新型光电探测技术及其应用研讨会会议论文集*, 2016: 115-119.
- SUN Hao, CHEN Xiaoping. Analysis of miniature Stirling cooler for high operating temperature application[C]// *Proceedings of the 3rd Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application*, 2016: 115-119.
- [9] Filis A, Bar haim Z, Havatzelet T, et al. Ricor's rotary cryocoolers development and optimization for HOT IR detectors [C] // *Proc. Of SPIE Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012: **8353**: DOI: 10.1117/12.923835.
- [10] Amiram katz Victor-Segal, Avishai-Filis. RICOR's cryocoolers development and optimization for HOT IR detectors[C]// *Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XL*, 2014, **9070**: DOI:10.1117/12.2050317.
- [11] David O B, Carmiel M, Segal V, et al. Ricor's advanced rotary cryocooler for HOT IR detectors[C]// *Proc. Of SPIE on Infrared Technology and Applications XLV*, 2019, **11002**: DOI: 10.1117/12.2517715
- [12] Nachman I, Riabzev S, Filis A, et al. Advanced Ricor cryocoolers for high-end IR missile warning systems and ruggedized platforms[C] // *Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XLI*, 2015, **9451**: DOI: 10.1117/12.2176019.
- [13] Jean Yves Martin, Jean Marc Cauquil, Tonny Benschop, et al. Thales cryogenics rotary cryocoolers for HOT applications[C] // *Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: DOI:10.1117/12.918587.
- [14] Pundak N, Porat Z, Barak M, et al. Field reliability of Ricor microcoolers [C]// *Proc. Of SPIE on Infrared Technology and Applications XXXV*, 2009, **7298**: DOI:10.1117/12.816262.
- [15] Zvi Porat, A Sne-Or, Nachman Pundak, et al. Reliability assessment procedure of cryocoolers[C]// *Proc of SPIE on Infrared Technology and Applications XXIV*, 1998, **3436**: DOI: 10.1117/12.328031.
- [16] Groep W, Weijden H, Leeuwen R V, et al. Update on MTTF figures for linear and rotary coolers of Thales cryogenics[C] // *Proc. SPIE on Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: DOI: 10.1117/12.918245.
- [17] Katz A, Bar Haim Z, Riabzev S, et al. Development and optimization progress with RICOR cryocoolers for HOT IR detectors[C] // *Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XLI*, 2015: **9451**: DOI: 10.1117/ 12.2176016.
- [18] Levin E, Katz A, Haim Z B, et al. RICOR cryocoolers for HOT IR detectors from development to optimization for industrialized production[C] // *Proc. of SPIE on Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR) II*, 2017, 10180: DOI: 10.1117/12.2262334.