

G-M 低温制冷机的研究进展

陶杰^{1,2}, 周志坡^{1,2}, 何韩军^{1,2}, 朱良友^{1,2}, 李奥^{1,2*}, 董文庆^{1,2}

(1. 中船鹏力(南京)超低温技术有限公司, 南京 211106;

2. 江苏省超低温技术及应用重点实验室, 南京 211106)

摘要: 为满足高温超导、低温物理等领域不断发展的需求, 大冷量、轻量化、极低温 G-M(Gifford-McMahon) 制冷机正在不断进步。总结了蓄冷材料及优化回热器结构对 G-M 制冷机性能的提升, 归纳了液氦、液氢及液氮温区 G-M 制冷机的最新进展, 旨在为相关研究者开发优化 G-M 低温制冷机提供参考。

关键词: G-M 低温制冷机; 蓄冷材料; 回热器; 轻量化; 大冷量; 极低温

中图分类号: TB651

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2025)01-0088-10

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2025.01.011

Recent Development of G-M Cryocooler

TAO Jie^{1,2}, ZHOU Zhipo^{1,2}, HE Hanjun^{1,2}, ZHU Liangyou^{1,2}, LI Ao^{1,2*}, DONG Wenqing^{1,2}

(1. CSSC PRIDE (Nanjing) Cryogenic Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Key Laboratory of

Ultra-low Temperature Technology and Application in Jiangsu, Nanjing 211106, China)

Abstract: The G-M cryocooler, also known as the Gifford-McMahon cycle cryocooler, has been invented for more than half a century. It is based on the principle of adiabatic gas expansion and continuous Simon expansion refrigeration through valve gas supply. Its working process mainly includes four steps: isochoric pressure rise, isobaric expansion, isochoric pressure drop, and isobaric compression, to finally achieve the refrigeration effect. Compared with other refrigeration equipment, G-M cryocoolers are simple in structure, easy to operate, highly reliable and have a long service life. These features make them widely used in the fields of cryogenic physics, cryogenic medicine, high temperature superconductivity, semiconductors and industrial gases, etc. To meet the growing demand in high-temperature superconductivity, cryogenic physics, and other fields, ultra-low temperature G-M cryocoolers with light weight and large-cooling capacity are continuously making technical progress. These cryocoolers are not only more compact in design and higher in efficiency, but also perform excellently in various cryogenic applications, meeting the diverse needs of scientific research and industrial applications. In order to provide a reference for relevant researchers to optimize and develop G-M cryocoolers, this paper reviews the latest development of G-M cryocoolers at liquid helium, liquid hydrogen and liquid nitrogen temperatures based on the optimization of regenerator materials and regenerator structures that affect the performance of G-M cryocoolers. This work mainly focuses on how to improve the performance and efficiency of G-M cryocoolers at different cryogenic temperatures by improving the regenerator design and material selection. By optimising the secondary regenerator and displacer stroke lengths, the cooling capacity of the cryocooler in the vertical direction has been improved and the performance degradation in horizontal operation has been reduced. These research results not only promote the development of G-M cryocooler technology, but also provide technical support for a wider range of cryogenic applications in the future.

Key words: G-M cryocooler; regenerator material; regenerator; light weight; large-cooling capacity; ultra-low temperature

0 引言

1959年, Gifford等^[1-2]研制了第一台 G-M 制冷

机, 相比于其他制冷设备, G-M 低温制冷机具有结构简单、操作方便、可靠性高及工作寿命长等显著优点, 因此被广泛应用于低温物理、低温医疗、高

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0721300)

作者简介: 陶杰, 助理工程师, 主要从事小型低温制冷机研究。E-mail: taojie@724pride.com

通信作者: 李奥, 博士, 主要从事制冷工程。E-mail: liao@724pride.com

温超导、半导体及工业气体等领域。

磁共振成像(MRI)是现代医学临床诊断最重要的利器之一,其原理是利用带材低温下的超导现象进而产生高磁场,对病变部位进行成像分析,传统 MRI 通常采用液氮浸泡冷却超导磁体方式,因此需要定期补充液氮,成本高,维护复杂。目前,随着 G-M 制冷机技术的进步,低场强 MRI 已经可以采用液氮温区 G-M 制冷机对蒸发液氮再冷凝或直接进行冷却,实现液氮零蒸发^[3]或无液氮^[4]磁共振成像,极大程度降低设备使用成本,但对于更大场强的磁共振设备,则需要进一步提升 G-M 制冷机制冷量及抗磁能力。电力损耗是电力输配中困扰全世界的难题,即使作为全球超高压输电技术领跑者的我国,每年在电力输配中的损耗也高达 6.5% (国家不同损耗不同,有甚者高达 30%~40%),而采用高温超导电缆则可以有效解决上述问题。据中船鹏力(南京)超低温技术有限公司联合南方电网报道,其于 2021 年通过研发全国产化大冷量液氮温区 G-M 制冷机^[5-6],成功建设了国内第一条 10 kV 三相同轴高温超导交流电缆,其输电能力强于常规 110 kV 电缆,同时电力损耗仅为原有 1/4~1/5,但目前该超导电缆的低温装置仍采用高达 28 台 G-M 制冷机作为冷源,系统较为复杂,故继续开发更大制冷量 G-M 制冷机是十分必要的。超导单光子探测器(SSPD)被广泛用于生物检测、红外探测等领域^[7-8],其显著特点是体积小,工作温度越低探测精度越高,而目前轻量化、极低温 G-M 制冷机开发进度较为缓慢,在一定程度上影响了 SSPD 的发展。

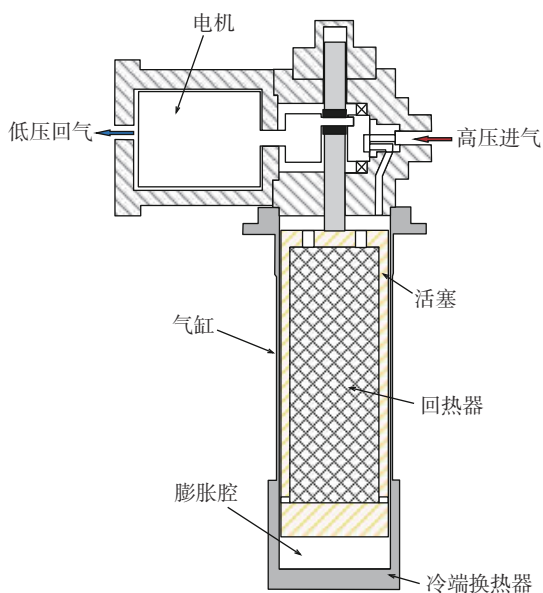


图 1 单级 G-M 制冷机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of G-M cryocooler structure

本文全面调研了国内外 G-M 制冷机的研究进展,总结了采取的主要关键技术措施,旨在为相关研究者开发优化 G-M 低温制冷机提供参考。

1 G-M 制冷机介绍

图 1 是单级 G-M 制冷机结构示意图,主要由电机、气缸、活塞、回热器、冷端换热器等组成。具体工作过程如下:在进气阶段,高压气体经回热器换热后进入膨胀腔,活塞随之向上移动至指定位置,待膨胀腔充满高压气体后,进气结束,旋转阀随即将气体通道切换至低压回路,膨胀腔内高压气体随即向低压回路膨胀,再次与回热器换热后流出制冷机,同时通过冷端换热器将冷量传递至被冷却物体。随后,活塞会向气缸底部靠近,将膨胀腔内的残余氦气排尽,一个制冷循环结束,正是不断重复上述高、低压的切换以进行连续西蒙膨胀,回热器不断积累冷量,G-M 制冷机产生了持续的制冷效应。

2 G-M 制冷机的研究进展

2.1 高效低温回热器

G-M 制冷机产生持续制冷效应的关键是回热器在每个制冷循环中冷量的充分积累,这说明了高效回热器是制冷机性能优越的前提条件。对于 G-M 制冷机来说,如何提高回热器效率是提升其性能首先面对的难题,目前采用的主要手段是优化蓄冷材料和回热器结构,以提高回热器效率。

2.1.1 蓄冷材料

众所周知,当氦气温度降至 15 K 以下时,其体积比热容会迅速增大;而不锈钢、铅等材料的体积比热容则表现出相反的趋势,因此低温下上述材料作为回热器蓄冷材料时无法与氦气充分换热,即回热器会出现热饱和现象,导致回热器在低温区的效率大幅度下降,从而制约了 G-M 制冷机向更低温区的发展。受蓄冷材料性能的影响,20 世纪 80 年代以前,三级 G-M 制冷机也只能获取 6.5 K^[9]的最低制冷温度。20 世纪 80 年代,基于 Er 和 Ni 等稀土类化合物被成功应用于回热器中^[10-12],此时, G-M 制冷机已经可以到达液氮温区,但由于该类稀土化合物抗磁性能比较差,故在磁共振等高磁场领域使用受限。20 世纪 90 年代以后,反铁磁材料 HoCu₂^[13]、陶瓷材料 GdAlO₃(GAP)^[14]和 Gd₂O₂S(GOS)^[15-17]陆续被应用,其中, GOS 在 4.2 K 温区拥有较大比热容^[18]的同时也拥有优异的抗磁性等优势^[19],目前已经成为高磁场下液氮温区制冷机的首选蓄冷材料,但是当温度高于 6 K 后, GOS

的比热容会迅速下降,进而导致回热器效率下降,因此对于液氦温区的制冷机来说,根据回热器轴向温度分布混填其他蓄冷材料是提高回热器效率的必要手段^[18]。上述部分材料的比热容如图 2 所示。

在原有蓄冷材料的基础上,通过添加镀层提高材料的比热容也可以有效改善回热器的性能。

Xu 等^[20-21]为提高青铜丝网的比热容,在青铜丝网上分别进行了镀锡和镀锌,实验结果显示,采用镀锡青铜丝网的制冷机,制冷性能在 30 K/40 K 分别提升了 90% 和 14%;采用镀锌青铜丝网的制

冷机,制冷性能在 30 K/40 K 分别提升了 60% 和 11%,可见,采用镀锡磷青铜的效果要明显好于镀锌;镀锌和镀锡的青铜丝网如图 3 所示。冯荃春等^[22]发现磷青铜镀锡时,容易出现镀层不均匀情况,这会使得丝网孔径大幅减少,进而造成制冷机制冷量下降,故冯荃春等针对磷青铜镀锡工艺进行了优化,使得镀锡层可以均匀包裹在磷青铜丝网表面,保证了制冷机的可靠性。Waldauf 等^[23]为改善制冷机的性能,将回热器冷端部分青铜丝网换成镀铅磷青铜丝网,制冷机最低温度达到 17 K,获得了 120 W@74 K 的制冷量,镀铅磷青铜丝网如图 4 所示。

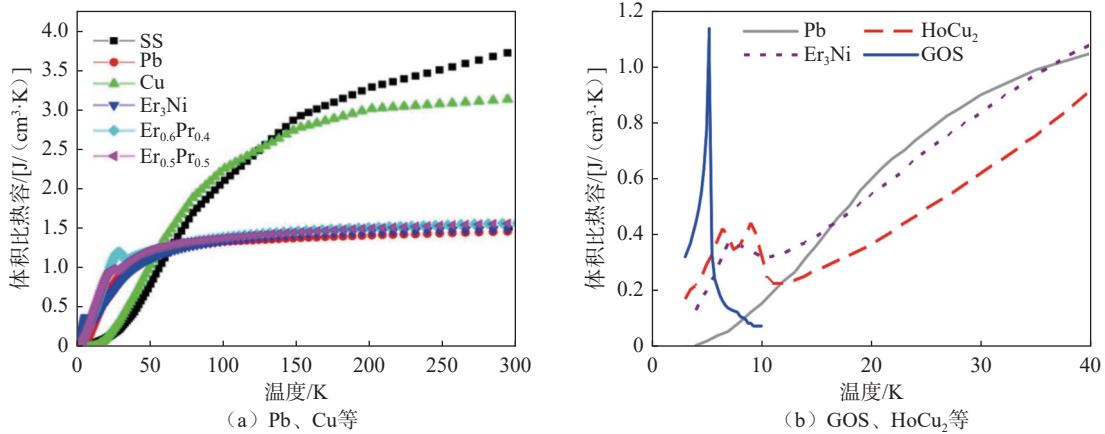


图 2 不同材料的比热容

Fig. 2 Specific heat capacity of different materials

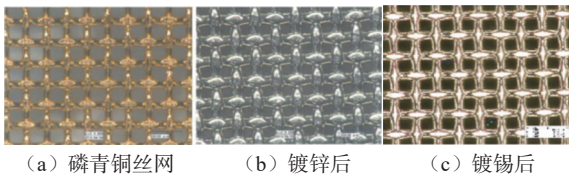


图 3 镀锌和镀锡的磷青铜丝网

Fig. 3 Galvanized and tinned bronze wire mesh

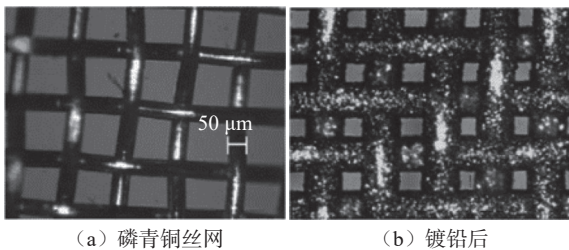


图 4 镀铅磷青铜丝网

Fig. 4 Lead-plated bronze wire mesh

Nam 等^[24]使用平行丝型丝网代替层叠筛网型丝网,使得回热器内部压降损失大幅度减少,但平

行丝型丝网会带来更大的轴向导热。实验结果显示,若采用分段填充平行丝型丝网可有效降低轴向导热,使得平行丝型回热器整体性能优于层叠筛网型回热器。平行丝型结构如图 5 所示。

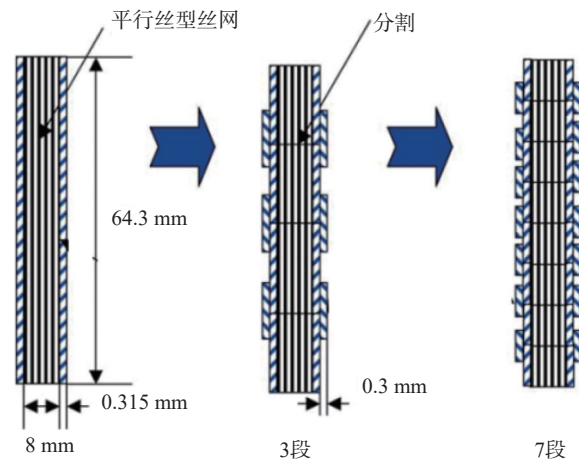


图 5 平行丝型丝网布置方式

Fig. 5 Arrangement of parallel filament type wire mesh

2.1.2 回热器结构

通过改变回热器内部结构可以有效改善回热器径向温度分布均匀性, 进而提高回热器效率。

Takashi 等^[25]研究了回热器内不同位置放置整流丝网对 G-M 制冷机性能的影响, 实验结果表明, 回热器内等间距放置三个整流丝网的效果要优于仅在回热器两端放置整流丝网, 性能提升约 30%。Hao 等^[26-27]在 Takashi 的基础上, 通过改变整流丝网的分布方式, 如图 6 所示, 进一步提高了制冷机的性能, 同时还发现, 在回热器热端放置整流丝网的效果要优于放置在冷端。

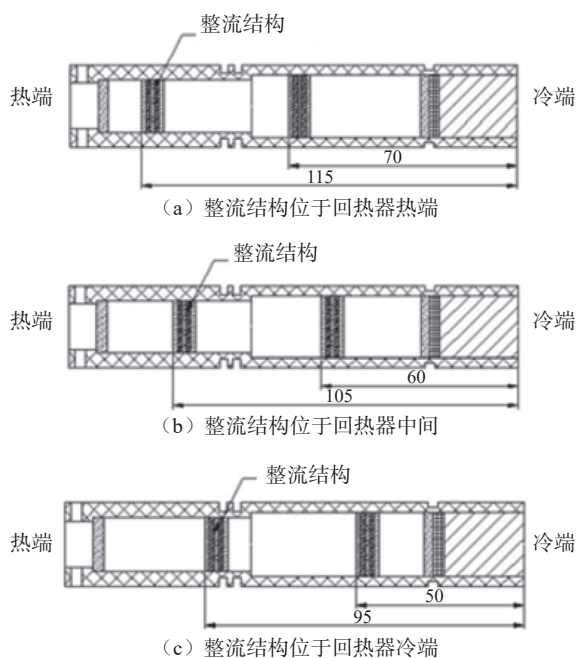


图 6 Hao 整流丝网的布置方式

Fig. 6 Arrangement of Hao's rectifier screen

Masuyama 等^[28]设计了由 Pb、HoCu₂ 和 GOS 分层填充的回热器, 并在 Pb 层内嵌了一根不锈钢管以改善回热器内的非均匀性流动, 实验结果表明, 这种内嵌不锈钢管的回热器性能相比于未内嵌不锈钢管回热器得到明显提升, 制冷机一、二级分别获得 64.9 W@50 K 和 1.67 W@4.2 K 的制冷量。在此基础上, Masuyama 等^[29]又研究将不锈钢管分别内嵌至 HoCu₂ 和 GOS 层, 实验结果表明, 上述两种情况下的制冷机性能均不如将不锈钢管内嵌至 Pb 层。图 7 为不锈钢管的具体布置方式。

上述研究结果表明, 回热器内置整流结构可以有效改善制冷机性能, 但当制冷机制冷温度较低时, 回热器冷端不宜放置过多的整流丝网或导流

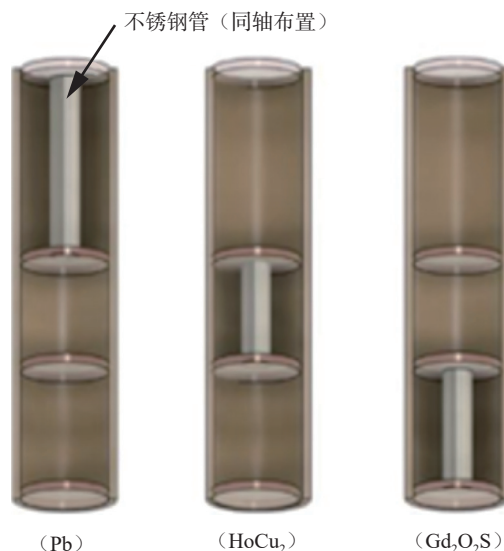


图 7 不锈钢管分别内嵌于 Pb、HoCu₂ 和 GOS 层
Fig. 7 Stainless steel tubes embedded with Pb, HoCu₂ and GOS layers, respectively

管, 这主要是因为相比于冷端蓄冷材料(如 HoCu₂、GOS 等), 低温下整流结构(通常采用磷青铜或不锈钢丝网制造)的比热容较低, 当放置过多整流结构时, 相比于气体层流化带来的换热均匀性收益, 回热器冷端有效换热热量下降更为明显, 致使回热器效率呈现下降趋势。

2.2 液氮温区 G-M 制冷机

自液氮温区磁性蓄冷材料发现以来, 结构较为简单的两级 G-M 制冷机就已经可以涉足液氮温区, 但两级 G-M 制冷机存在冷量较小、抗磁性能较差等问题, 目前常采用优化制冷机内部参数及回热器蓄冷材料以提高 G-M 制冷机制冷能力及抗磁性。

2.2.1 内部参数优化

Nezuka 等^[30]基于现有 4 K G-M 制冷机开发了一台高压 4 K G-M 制冷机, 用以研究充气压力对制冷机性能的影响。实验结果表明, 提高充气压力, 在制冷机无负荷时, 会导致制冷机最低温度上升; 若制冷机存在负荷, 则有助于提高制冷机效率; 究其原因主要是提高压力致使整机在低温下热损失增大, 故最低温度上升; 而当冷头具有负荷时, 提高压力带来的制冷量增量大于压力提升带来的热损失增量, 故整机效率提高, 实验结果如表 1^[30]所列。

Morie 等^[31]研究了充气压力、蓄冷材料填充量对 G-M 制冷机性能的影响。实验结果显示, 制冷机一级制冷性能对充气压力比较敏感, 压力越高, 一级制冷性能越好; 制冷机二级性能受限于回热器效率,

可以通过增加磁性蓄冷材料来提高二级性能。充气压力及蓄冷材料填充量对制冷机影响如图 8 所示。

表 1 Nezuka 等的高压 G-M 制冷机 (4 MPa)
Tab. 1 Nezuka's high pressure G-M cryocooler (4 MPa)

热负载/W	卡诺效率/%		效率增幅/%
	高压 G-M 制冷机 (4 MPa)	原 G-M 制冷机	
3	1.98	1.72	15
6	3.71	2.79	33
9	4.79	3.41	40
12	5.58	3.73	50
20	7.04	3.39	107

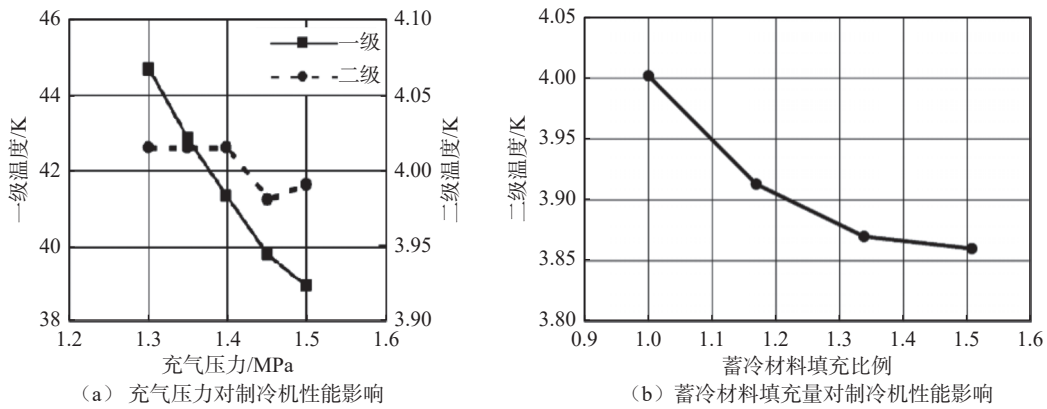


图 8 充气压力和蓄冷材料填充量对制冷机性能的影响

Fig. 8 Influence of charging pressure and filling volume of refrigerant storage material on the cryocooler

Hao 等^[32]在现有 G-M 制冷机的基础上,通过优化回热器填料以及充气压力等参数,使得该 G-M 制冷机的二级制冷量从 0.8 W@4.2 K 提升至 1.2 W@4.2 K。2015 年, Hao 等^[33]又研究了活塞行程及运行

转速等参数对制冷机性能的影响,实验结果表明,当活塞行程由 12.7 mm 增加至 25.4 mm,转速为 30 r/min 时,二级制冷量进一步增加至 1.5 W@4.2 K,优化后的 G-M 制冷机及测试曲线如图 9 所示。

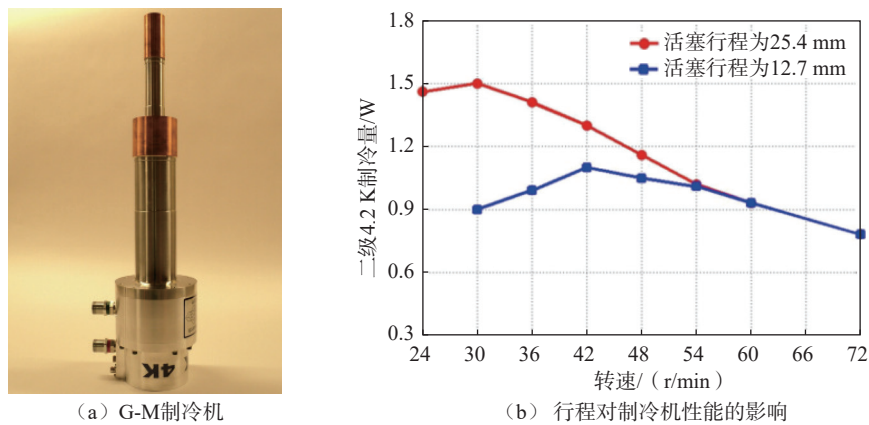


图 9 Hao 研制的 G-M 制冷机

Fig. 9 Hao's G-M cryocooler

Bao 等^[8]为满足市场对轻量化超低温制冷机的需求,在现有 G-M 制冷机的基础上,通过优化回

热器填料及活塞行程, 研制了一款更加小型轻量化的 G-M 制冷机, 相比于原制冷机, 该制冷机的高度降低 26%, 二级最低制冷温度达到 2.1 K, 在一级加载 1 W@44.4 K 的情况下, 二级可获得 20 mW@2.23 K 的制冷量, 优化后的结构如图 10 所示。

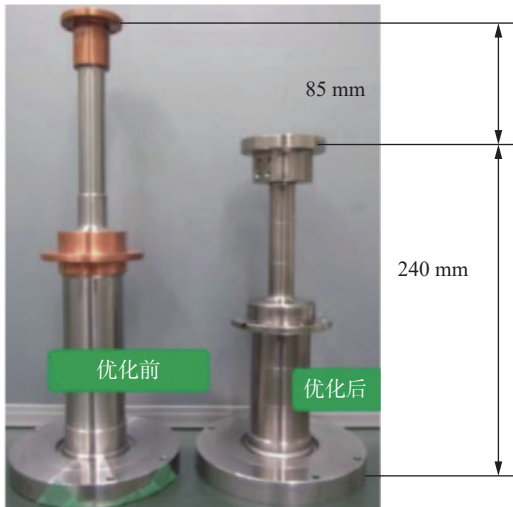


图 10 优化前、后制冷机高度对比

Fig. 10 Comparison of cryocooler height before and after optimization

Chao 等^[34]为解决 4.2 K 大冷量 G-M 制冷机水平放置性能会大幅下降的难题, 在现行商用 KDE420 型 G-M 制冷机的基础上, 通过优化回热器结构、填料比例、活塞行程及增加防倾斜弹簧等措施, 使得水平放置 G-M 制冷机的制冷能力由 1.75 W@4.2 K 提升至 2.3 W@4.2 K, 同时相对垂直放置的情况, 制冷机制冷量的衰减由 0.85 W 大幅降至 0.28 W, 目前该制冷机已经运行超过 570 h, 制冷性能稳定, 优化前、后的活塞结构如图 11 所示。

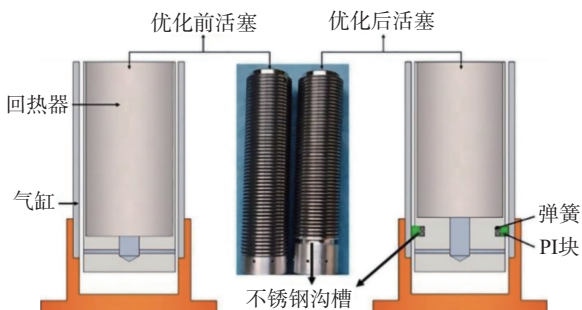


图 11 优化前、后的活塞

Fig. 11 Displacer before and after optimization

何韩军等^[35]基于现有 1.75 W@4.2 K G-M 制冷机, 通过优化二级回热器填料比例及内部结构等, 使得新开发制冷机制冷量由 1.75 W 提升至

2.32 W@4.2 K; 同时, 何韩军等又研究了不同运行角度对制冷机性能的影响, 结果如图 12 所示, 可见, 各角度下水平运行效率最低, 但降低幅度不高于 5%, 说明 G-M 制冷机可适用于各种角度工况。

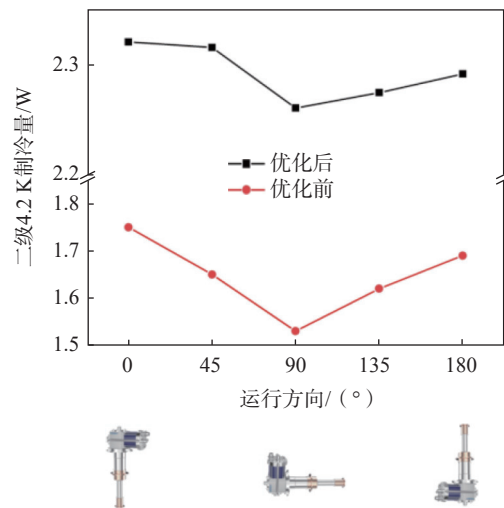


图 12 不同运行角度下制冷机性能比较

Fig. 12 Comparison of cryocooler performance at different operating angles

2.2.2 磁场强度影响

李兰凯等^[36]基于超导磁体对 4 K G-M 制冷机的需求, 研究了磁场强度对 4 K G-M 制冷机性能的影响。结果表明, 采用铁屏蔽罩罩住电机, 可以在一定程度上降低磁场对电机永磁体的影响, 进而延长制冷机寿命, 带电机屏蔽罩的超导磁体系统如图 13 所示。

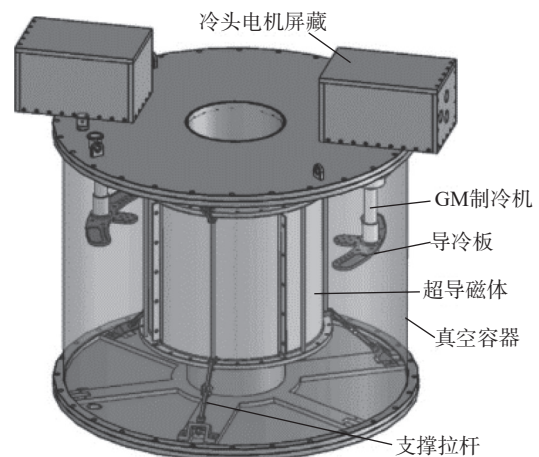


图 13 带电机屏蔽罩的超导磁体系统

Fig. 13 Superconducting magnet system with motor shields

Morie 等^[19]为满足 MRI 系统对抗磁制冷机的需求, 将含有 HoCu₂ 和 GOS 的制冷机置于 2 T 的

轴向磁场下进行了实验研究, 结果表明, 当轴向磁场强度大于 0.8 T 后, 仅填充 HoCu_2 的制冷机性能会出现大幅衰减, 而采用 HoCu_2 和 GOS 混填的制冷机在 0~2 T 范围内, 制冷机性能衰减微弱, 图 14 和图 15 分别是 MRI 系统中冷头的布置和轴向磁场对冷头性能的影响。



图 14 MRI 系统轴向磁场下的冷头

Fig. 14 Cold head in the axial magnetic field of the MRI system

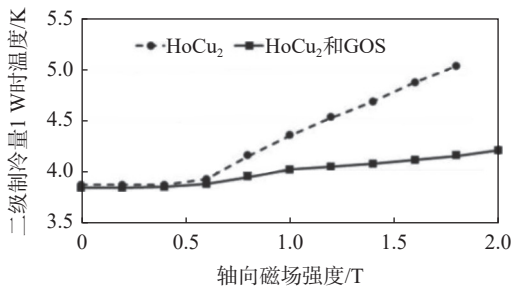


图 15 轴向场强对冷头的影响

Fig. 15 Effect of different field strengths on the cold head

Morie 等^[37]在之前^[19]的研究基础上, 进一步增大了磁场强度, 实验结果表明, 采用 HoCu_2 /GOS 混填回热器的制冷机, 在 0~3 T 范围内, 二级制冷量温度仅由 1.25 W@3.8 K 衰减至 1.25 W@4.2 K, 衰减幅度较小。

上述研究说明, 通过优化制冷机内部参数可以在一定程度上提升液氢温区制冷机的性能, 但提升幅度有限; 对于水平用较大冷量液氢温区 G-M 制冷机, 会存在冷量衰减问题, 可以通过优化回热器结构及防倾斜措施实现衰减幅度降低; 同时, 回热器冷端仅填充 HoCu_2 的 G-M 制冷机性能受到磁场强度的影响较大, 当磁场强度不大于 3 T 时, 可以通过将回热器冷端部分 HoCu_2 更换成 GOS 来

改善制冷机性能; 更高冷量、更高磁场下的 4.2 K 温区蓄冷材料, 目前有待开发; 对于电机部分, 可以通过增加铁屏蔽罩的方式降低高磁场对电机的不良影响。

2.3 液氢温区 G-M 制冷机

液氢温区 G-M 制冷机一般为单级形式, 回热器主要采用磷青铜和铅丸等作为填料, 但目前单台液氢温区 G-M 制冷机冷量仍偏小, 同时, 受限于越来越严苛的环保要求, 液氢温区回热器采用最广泛的铅丸被越来越多的国家禁止使用, 这在一定程度上降低了液氢 G-M 制冷机的发展速度。目前, 主要通过优化制冷机结构参数及回热器填料比例以提高液氢温区 G-M 制冷机制冷能力。

Yamada 等^[38]为减少制冷机中铅丸使用量, 以减少对环境的危害, 采用铋取代铅填入至回热器冷端, 如图 16 所示, 然而铋的比热容在 20~30 K 温区明显低于铅丸, 这就会导致更换填料后制冷机效率出现下降, 为克服上述制冷机性能的下降, Yamada 等对填料比例及气缸和活塞之间的间隙进行了优化, 优化后制冷机获得 85 W@30 K 的制冷量。

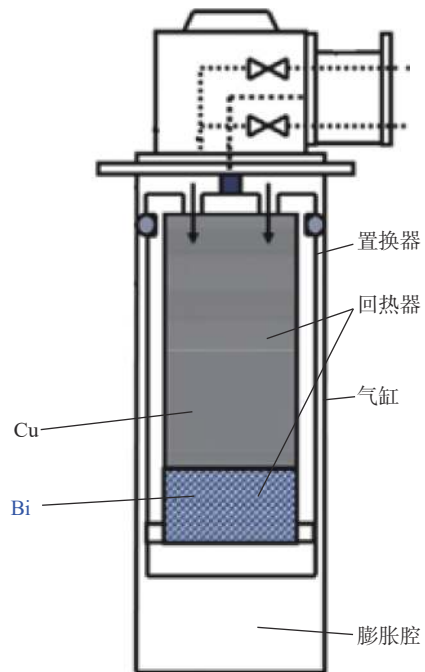


图 16 铋取代铅后的制冷机示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the cryocooler after Bi replacement of Pb

Gandla 等^[39]为满足 HTS、液氢系统等对 30 K 温区大冷量制冷机的需求, 在现有 80 K 温区 G-M 制冷机的基础上, 通过优化活塞行程、回热器结构

及填料等,获得 18 K 的最低制冷温度,在 20 K 和 30 K 分别获得 100 W 和 200 W 的制冷量。

Wang 等^[40]为满足超导设备对 20~30 K 温区大冷量制冷机的需求,基于现有气动型 G-M 制冷机,通过优化旋转阀尺寸、运转时序及增大回热器长度,使得该制冷机的制冷量由 75 W@25 K 提高至 106 W@25 K。后续为进一步提高单级 G-M 制冷机制冷量,Wang 等^[41]又研制了一款采用磷青铜丝网和铅球混合填充回热器的大冷量单级 G-M 制冷机,并对旋转阀进行了改造,如图 17 所示。实验结果表明,该制冷机的最低制冷温度降低至 12.2 K,在 30 K 可以获得冷量由 204 W 提升至 208 W。

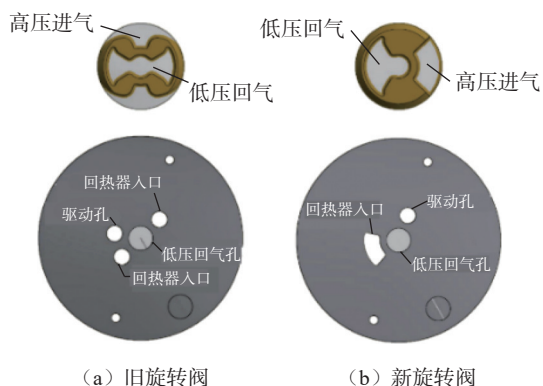


图 17 新、旧阀门组结构比较

Fig. 17 Comparison of new and old valve group structures

周志坡等^[42]基于大冷量 G-M 制冷机对高效回热器的需求,利用 REGEN3.3 对回热器进行了数值优化,并进行了实验验证。结果表明,实验与仿真结果在数值变化趋势上保持一致,即利用 REGEN3.3 来指导大冷量回热器的研究是可行的;同时,采用磷青铜丝网和铅丸复合填充回热器的单级 G-M 制冷机最低温度达到 9.7 K,在 20 K 获得了 92.6 W 的制冷量,这是目前国内报道的 20 K 温区最大制冷量的商用单级 G-M 制冷机。

2.4 液氮温区 G-M 制冷机

液氮温区 G-M 制冷机和液氢温区类似,一般也采用单级形式,回热器内填料主要为磷青铜和铅丸等,但相比于液氢温区 G-M 制冷机,液氮温区 G-M 制冷机存在冷端冷量输出困难问题,即对于液氮温区 G-M 制冷机来说,在优化提升制冷机性能的同时,如何增大冷端换热器换热效率也需要重点考虑。目前,常采用优化回热器结构及增大冷端换热器换热面积以提高液氮温区 G-M 制冷机的制冷能力。

朱建民等^[43]基于理论计算,在采用磷青铜和铅丸复合填充回热器的情况下,单级 G-M 制冷机获得 19.2 K 的最低制冷温度,在 30 K 和 77 K 可以分别获得 38.8 W 和 119.5 W 的制冷量。

Wang 等^[44]基于现有 G-M 制冷机,通过重新设计回热器、换热器等部件,使得该单级 G-M 制冷机的最低温度由 26.6 K 降至 23.4 K,制冷量由 615 W@80 K 提升至 701 W@80 K。

中船鹏力(南京)超低温联合深圳供电局^[5]为满足高温超导输电线路对大冷量 G-M 制冷机的需求,基于 REGEN3.3 软件对 70 K 温区回热器进行模拟优化,获得采用 150 目磷青铜丝网填充回热器的填充方案,随后的实验结果表明,采用该回热器的单级 G-M 制冷机可以获得的最低制冷温度为 23.5 K,在 70 K 可以获得 243 W 的制冷量。2021 年,两个单位在现有冷端换热器的基础上^[6],通过在冷端换热器上增加凸台的方式,进一步增大了冷端换热器与气体工质的换热面积,使得制冷机的制冷量进一步提升至 265 W@70 K。优化后的冷端换热器结构如图 18 所示。

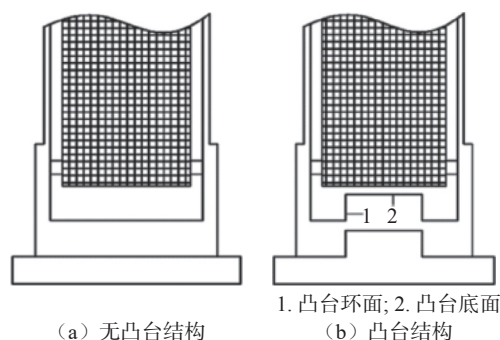


图 18 凸台式冷端换热器

Fig. 18 Cold-end heat exchanger of cambered table type

3 总结

为满足高温超导、低温医疗、低温物理等领域对低温环境越发苛刻的需求,国内外学者竞相优化 G-M 制冷机性能,取得了颇为丰厚的研究成果:

(1) 目前蓄冷材料主要由普通蓄冷材料(如铜、不锈钢)、基于 Er 和 Ni 的稀土类材料、钛铜以及陶瓷材料(如 GAP、GOS)等组成,已经可以很好满足大多数场景下制冷机对蓄冷材料的要求,但更高磁场下(>3 T)现有蓄冷材料仍会受到高磁场的影响,导致材料比热容下降,制冷机效率降低,故后续需要继续开发更大比热容、更抗磁的蓄冷材料,以

满足大冷量、高磁场 G-M 制冷机的需求。

(2) 在回热器两端和内部放置整流丝网或导流管可以有效改善回热器径向温度分布的均匀性, 进而提高制冷机的效率; 但应当注意, 当制冷机制冷温度较低时, 回热器冷端放置的整流丝网或导流管不宜过多, 否则可能会导致回热器效率下降。

(3) 液氦温区制冷机正在向更低温, 更抗磁以及更大冷量发展, 诸如 20 mW@2.23 K 的紧凑型 G-M 制冷机、3 T 磁场下 1.25 W@4.2 K 的高抗磁 G-M 制冷机以及 2.5 W@4.2 K 的大冷量 G-M 制冷机都已经成熟, 后续需要继续探究 G-M 制冷机的运行机理, 进一步优化液氦温区制冷机在各个方面的表现, 以满足高端科研领域(如 SSPD 等)需求。

(4) 液氢、液氮温区的 G-M 制冷机正在通过优化制冷机相关结构及运行参数, 在进一步提高制冷能力的同时, 减少铅丸的使用, 以避免对环境的危害; 对于大冷量液氮温区 G-M 制冷机, 在性能优化的基础上, 必须合理优化冷端换热器换热效率, 才可以有效提高大冷量制冷机的制冷能力。

参考文献:

- [1] GIFFORD W E, MCMAHON H O. A new low temperature gas expansion cycle, Part 1[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1960, 5: 354–367.
- [2] GIFFORD W E, MCMAHON H O. A new low temperature gas expansion cycle, Part 2[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1960, 5: 368–372.
- [3] SUMAN N, SIDDIQUEE A N, KAR S. Thermal shield of the zero-boil-off cryostat for a 1.5 T magnetic resonance imaging magnet[J]. *Cryogenics*, 2021, 116: 103301.
- [4] O'REILLY T, WEBB A. Deconstructing and reconstructing MRI hardware[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2019, 306: 134–138.
- [5] 王哲, 胡子珩, 章彬等. 250 W@70 K 单级 G-M 制冷机回热器优化及实验研究 [J]. *真空与低温*, 2021, 27(6): 557–563.
- [6] 胡子珩, 王哲, 章彬等. 大冷量单级 G-M 制冷机冷端换热器结构研究 [J]. *真空与低温*, 2021, 27(4): 385–389.
- [7] TAKEUCHI N, YAMASHITA T, MIYAJIMA S, et al. Demonstration of a superconducting nanowire single-photon detector using adiabatic quantum-flux-parametron logic in a 0.1 W Gifford-McMahon cryocooler[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 1–4.
- [8] BAO Q, TSUCHIYA A, XU M, et al. Experimental investigation of compact 2 K GM cryocoolers[J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 428–433.
- [9] STUART R W, COHEN B M, HARTWIG W H. Operation and application of a three-stage closed-cycle regenerative refrigerator in the 6.5 K region[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1995, 15: 428–435.
- [10] SAHASHI M, TOKAI Y, KURIYAMA T, et al. New magnetic material R3T system with extremely large heat capacities used as heat regenerators[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1990, 35: 1175–1182.
- [11] LI R, OGAWA M, HASHIMOTO T. Magnetic intermetallic compounds for cryogenic regenerator[J]. *Cryogenics*, 1990, 30(6): 521–526.
- [12] NAKAGAWA T, MIYAUCHI T, SHIRAIISHI T, et al. Size and composition optimization of $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ regenerators for 4 K-GM cryocoolers[J]. *Cryocoolers*, 2016, 19: 313–317.
- [13] BISCHOF J, DIVIŠ M, SVOBODA P, et al. The specific heat of HoCu_2 in magnetic fields[J]. *Physica Status Solidi*, 1989, 114(2): K229–K231.
- [14] NUMAZAWA T, ARAI O, SATO A, et al. New regenerator material for sub-4 K cryocoolers [M]//*Cryocoolers11*: Boston, MA: Springer, 2002: 465–473.
- [15] NUMAZAWA T, YANAGITANI T, NOZAWA H, et al. A new ceramic magnetic regenerator material for 4 K cryocoolers [M]//*Cryocoolers12*: Boston, MA: Springer, 2003: 473–481.
- [16] MATSUMOTO K, NUMAZAWA T, URA Y, et al. Thermal and magnetic properties of regenerator material $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 897(1): 012010.
- [17] IKEYA Y, LI R, NUMAZAWA T. Improvement of 4 K GM cooling performance with a new regenerator material [M]//*Cryocoolers12*: Boston, MA: Springer, 2003: 403–410.
- [18] MASUYAMA S, FUKUDA Y, IMAZU T, et al. Characteristics of a 4 K Gifford–McMahon cryocooler using the $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ regenerator material[J]. *Cryogenics*, 2011, 51(6): 337–340.
- [19] MORIE T, SHIRAIISHI T, XU M. Experimental investigation of cooling capacity of 4 K GM cryocoolers in magnetic fields[J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 474–478.
- [20] XU M Y, MORIE T, TSUCHIYA A. Development of tin-plated regenerator material[C]//26th International Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference, 2017.

- [21] XU M Y, MORIE T, TSUCHIYA A. Development of zinc-plated regenerator material[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [22] 冯蓓春, 艾青, 杜希阳, 等. 一种适用于制冷机的冷芯及一级活塞: CN217031656U[P]. 2022-07-22.
- [23] WALDAUF A, T. KÖTTIG, MOLDENHAUER S, et al. Improved cooling power by means of a regenerator made from lead wire mesh[M]//Cryocoolers 13: Boston, MA: Springer, 2005: 389-394.
- [24] NAM K, JEONG S. Development of parallel wire regenerator for cryocoolers[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(4): 278-287.
- [25] TAKASHI I, MASASHI N, KOUKI N, et al. Development of 2W class 4K Gifford-McMahon cycle cryocooler[C]//Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference, 1997.
- [26] HAO X H, JU Y L. Experimental study on the low temperature regenerator packed with rectification meshes[J]. *Cryogenics*, 2010(6/7): 390-396.
- [27] HAO X, JU Y. Experimental investigations and improvements for the 10 K G-M refrigerator[J]. *American Institute of Physics*, 2012, 1434(1): 683-689.
- [28] MASUYAMA S, NUMAZAWA T. Characteristics of a 1.6 W Gifford-McMahon cryocooler with a double pipe regenerator[C]//Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference (CEC) 2017, 2017.
- [29] MASUYAMA S, MATSUMOTO K, NUMAZAWA T. Improvement of 4 K cooling power by coaxial pipe regenerator for a Gifford-McMahon cryocooler[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1857: 012007.
- [30] NEZUKA H, NAKAGOME H, OTA M, et al. Effect of the charged pressure on GM cryocooler performance[M]//Cryocoolers 16: Boston, MA: Springer, 2011: 71-76.
- [31] MORIE T, XU M Y. Experimental investigation of high-efficiency 4 K GM cryocoolers[M]//Cryocoolers 17: Boston, MA: Springer, 2012: 247-251.
- [32] HAO X H, YAO S H. Experimental investigation of 4.2 K high efficiency G-M refrigerators[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1573(1): 1157-1161.
- [33] HAO X H, YAO S H, SCHILLING T. Design and experimental investigation of the high efficiency 1.5 W/4.2 K pneumatic-drive GM cryocooler[J]. *Cryogenics*, 2015, 70: 28-33.
- [34] CHAO W, LI R Z, ZHAO Q Y, et al. A high capacity GM cryocooler working at liquid helium temperatures for horizontal operation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122765.
- [35] 何韩军, 朱良友, 周志坡, 等. 2.3 W@4.2 K 高效 G-M 制冷机研究 [C]//全国低温工程大会, 北京: 中国制冷学会低温专业委员会, 2023.
- [36] 李兰凯, 赵保志, 戴银明, 等. 磁场对传导冷却超导磁体系统制冷机的影响 [J]. *低温物理学报*, 2012, 34(3): 194-199.
- [37] MORIE T, SHIRAIISHI T, MIZUNO Y, et al. Improvement of cooling capacity of 4 K GM cryocooler in magnetic fields [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 502(1): 012036.
- [38] YAMADA K. Development of a large cooling capacity single stage GM cryocooler[J]. *Cryogenics*, 2014, 63: 110-113.
- [39] GANDLA S K, XU M, DUNN S. Development of a high capacity single stage GM cryocooler at 30K range[J]. *Cryogenics*, 2023, 132: 103664.
- [40] WANG C, GIFFORD P E. Performance improvement of a single stage GM cryocooler at 25 K [C]//Cryogenic Engineering Conference, 2008.
- [41] WANG C, HANRAHAN T, COSCO J. A large single-stage GM cryocooler for operating temperatures of 13-30 K[C]//Proceedings of 20th International Cryocooler Conference, Burlington Vermont, USA, 2018.
- [42] 周志坡, 何韩军, 朱良友, 等. 高温超导用 10 K 单级 G-M 制冷机性能研究 [J]. *低温工程*, 2023(5): 69-74.
- [43] 朱建民, 施骏业, 陈江平, 等. 40 W/30 K 大冷量单级 G-M 制冷机的研制及性能测试 [J]. *制冷技术*, 2015, 35(4): 33-36.
- [44] WANG C, OLESH A, COSCO J. Performance improvement of a large capacity GM cryocooler[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 278: 012166.

(责任编辑: 杨建斌)

引文信息: 陶杰, 周志坡, 何韩军, 等. G-M 低温制冷机的研究进展[J]. *真空与低温*, 2025, 31(1): 88-97.

TAO J, ZHOU Z P, HE H J, et al. Recent development of G-M cryocooler[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2025, 31(1): 88-97.