

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于回热器效能与阻力特性的空间逆布雷顿制冷机性能优化

张子欣¹, 陈良^{1,2}, 陈双涛^{1,2}, 侯予^{1,2}(¹ 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; ² 深低温技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着空间任务的发展, 数十瓦级的大冷量空间逆布雷顿低温制冷机需求日益迫切, 其关键部件的高效设计仍面临诸多挑战。低温回热器作为核心部件, 直接决定系统的制冷性能, 同时占据系统的主要重量。因此, 深入研究回热器性能对系统的影响并实现高效紧凑设计, 对推动空间制冷技术发展具有重要意义。本文针对 70 W@70 K 空间逆布雷顿制冷机的回热器开展研究, 定量分析了回热器性能对制冷系统特性的影响。研究表明, 回热器的换热和流动性能对系统冷量输出存在显著影响。基于此, 本文提出了一种采用高密度微肋结构的高效低温回热器设计方案, 该结构具有优异的紧凑性, 比表面积超过 4400 m²/m³。低温测试实验结果表明, 所提出的高效回热器具有优异的换热和流动性能, 换热效率达 96.7%–97.4%。通过与制冷机常用的紧凑型板翅式换热器方案综合对比分析发现, 本文提出的微肋结构回热器实现了 82% 的体积缩减和 64% 的重量减轻; 在相同的体积条件下, 高效微肋回热器的换热–流动综合性能大幅提升, 性能评价准则 (Performance Evaluation Criteria, 简称 PEC) 高于 2.9。最后, 本文系统分析了微肋结构参数对回热器换热、流动性能及系统制冷量的影响, 为高效回热器的优化设计提供了理论指导。

关键词: 逆布雷顿低温制冷机; 空间制冷; 印刷电路板式换热器; 换热; 微通道; 实验验证

中图分类号: TK 172

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Optimization design of space reverse Brayton cryocooler based on recuperator effectiveness and flow resistance characteristics

ZHANG Zixin¹, CHEN Liang^{1,2}, CHEN Shuangtao^{1,2}, HOU Yu^{1,2}

(¹ School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ² MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: With the development of space missions, the demand for cryogenic high-capacity space reverse Brayton cryocoolers in the tens of watts range has become increasingly urgent, while the efficient design of their key components still faces numerous challenges. As a core component, the cryogenic recuperator directly determines the refrigeration performance of the system while accounting for a major portion of the system's weight. Therefore, in-depth research on the impact of recuperator performance on the system and achieving efficient and compact design is of great significance for advancing space refrigeration technology. The recuperator solutions for a 70 W@70 K space reverse Brayton cryocooler are investigated, with quantitative analysis of their performance impact on the cryocooler system. Results reveal that the thermal-hydraulic characteristics of the recuperator significantly influence the system's cooling capacity output. Therefore, a high-performance cryogenic recuperator design

收稿日期: 2026-02-23 修回日期: 2026-03-26

通信作者: 陈良 (1984—), 男, 博士, 教授, liangchen@mail.xjtu.edu.cn

第一作者: 张子欣 (1999—), 女, 博士研究生, zhangzx_xjtu@163.com

引用本文: 张子欣, 陈良, 陈双涛, 侯予. 基于回热器效能与阻力特性的空间逆布雷顿制冷机性能优化[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–9

Citation: ZHANG Zixin, CHEN Liang, CHEN Shuangtao, HOU Yu. Optimization design of space reverse Brayton cryocooler based on recuperator effectiveness and flow resistance characteristics[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–9

featuring high-density micro-pin-fin structures is proposed. The proposed design achieves exceptional compactness with a specific surface area exceeding $4400 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Cryogenic experimental validation demonstrates superior performance, with heat transfer effectiveness ranging from 96.7%–97.4%. Through comprehensive comparative analysis with existing solutions, the proposed micro-pin-fin recuperator achieves 82% volume reduction and 64% weight savings compared to the compact plate-fin heat exchangers widely used in cryocoolers. Under identical volume constraints, it exhibits significantly enhanced thermal-hydraulic performance with a Performance Evaluation Criterion (PEC) exceeding 2.9. Furthermore, the influence of micro-pin-fin structural parameters on both recuperator performance and system cooling capacity is systematically analyzed, providing guidance for design optimization.

Keywords: reverse Brayton cryocooler; space cryocooler; printed circuit heat exchanger; heat transfer; microchannels; experimental validation

引 言

随着深空探测和低温推进剂在轨储存等空间任务的不断发展,大冷量空间制冷技术需求日益迫切^[1,2]。空间逆布雷顿制冷机凭借大冷量、微振动、高可靠性等优势,已成为满足 4.2 K 至 300 K 大规模制冷需求的关键解决方案^[3,4]。逆布雷顿制冷机通过高速透平机械的近等熵过程实现制冷效果,应用范围涵盖食品工业^[5,6]、低温液化装置^[7–10]、航天领域^[11–13]、航空领域^[14,15]、超导系统^[16–21]以及核聚变工程^[22,23]。制冷机的效率挑战随着制冷输出温度的降低而愈发显著。在 4.2 K 输出温度下,每瓦制冷量所需功率是 120.0 K 时的 500 倍^[24]。这种显著的功率需求增加凸显了发展高效制冷机的重要性。在逆布雷顿制冷机中,回热器作为回收膨胀制冷效果的关键部件,显著影响制冷输出温度和制冷量,必须实现高效设计。然而,高效换热器往往需要较大的传热面积,这使其成为逆布雷顿制冷机中体积最大、重量最重的部件。同时,与地面系统不同,航天应用对逆布雷顿制冷机的设计在能耗和体积方面都提出了严格限制。因此,回热器面临着同时实现高紧凑度和卓越效率的技术挑战。

国外对高效低温换热器的研究开展较早^[12]。传统的板翅式换热器受限于其冲压工艺,无法同时满足空间回热器的严苛要求。微管换热器^[25–28]和槽板式换热器^[29–33]两种新型设计方案被认为是空间回热器的重要技术路线,测试换热效率可达 95.6%–99.3%。槽板式换热器以数百片槽板组装而成的芯体结构作为核心传热区域。Nellis 等^[29]为哈勃太空望远镜的近红外线照相机和多目标分光仪(Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer,简称

为 NICMOS)研制了 7 W@70 K 逆布雷顿制冷机用铜质槽板式换热器,实现了 99.2% 的换热效率。Hill 等^[31]基于 NICMOS 制冷机回热器技术,为 35 K/85 K 两级逆布雷顿制冷机开发了硅质槽板式换热器。该回热器采用高导热率单晶硅槽板与低导热率垫片堆叠的结构,实现了 95%–97.6% 的换热效率,同时板片数量减少了 49%。Onufrena 等^[32,34]基于空间远程制冷系统需求,采用 330 层堆叠铜网的紧凑换热器,在氦工况下实现了 94.5% (51 K–290 K) 的测试换热效率,并通过增材制造技术进一步减少了换热器中的轴向传导和热阻。微管换热器是空间回热器技术的另一重要解决方案,Cragin 等^[28]为美国航空航天局的零蒸发储存和氢液化系统开发了 19 W@20 K 逆布雷顿制冷机,系统回热器采用了五个长度为 1016 mm 的微管换热器串联模块。Deserranno 等^[26]对包含 6600 余根微管的换热器进行了测试,结果表明微管换热器的换热效率达到 98.7%–99.3%。Tanchon 等^[35]为欧空局地球观测卫星研 40 K 逆布雷顿制冷机,采用直径 0.5 mm 的不锈钢微管换热器,测试换热效率达 95.6%。然而,回热器的性能和紧凑性仍需要进一步提升,同时国内在相关方面研究较少。

本研究针对空间 70 W@70 K 逆布雷顿制冷机提出了一种新型高效紧凑低温印刷电路板式换热器,并基于逆布雷顿制冷机对回热器的换热性能和阻力特性展开优化设计。本文基于空间逆布雷顿制冷机热力学模型,系统分析了回热器对制冷机性能的影响机理,对紧凑板翅式换热器、印刷电路板式换热器等多种回热器方案对制冷机性能的影响展开分析,提出了具有高效、高紧凑性的低温印刷电路板式换热器方案并进行了低温试验验证,为空

间制冷机提供了新型高效回热器的解决方案。

1 逆布雷顿制冷机分析实验材料和方法

1.1 逆布雷顿制冷机模型

本文研究的高效低温回热器应用于 70 W@70 K 氦气空间逆布雷顿制冷机,工作温区为环境温度至 70 K。空间 70 W@70 K 逆布雷顿制冷系统及其 T-s 图如图 1 所示。

逆布雷顿循环主要由三个关键过程组成:压缩、回热和膨胀。在压缩过程(图 1 中 1-3)中,单级离心式压缩机对氦气进行增压并驱动其循环,压缩产生的热量经后冷器排出。高压氦气随后进入回热器(3-4),与返回的低压氦气换热实现预冷。预冷后的高压氦气进入离心式膨胀机的膨胀(4-5),产生制冷效果。膨胀后的低压氦气在冷负载处(5-6)提供 70 K 的制冷量。完成制冷输出后,氦气返回至回热器冷侧,将剩余冷量传递给高压侧气流后完成循环(6-1)。在逆布雷顿循环中,回热器作为核心部件,其性能直接影响整个制冷机的效率和制冷量。高效的回热可充分回收低压氦气携带的冷量,从而显著提升系统整体性能。

1.2 回热器流动及热力性能对逆布雷顿制冷机影响

回热器的换热效率和压降特性直接影响制冷机的制冷量和效率。换热效率(η)是衡量回热器热性能的关键参数,定义为实际换热量与理想换热量之比。对于本文研究的回热器,换热效率定义为:

$$\eta = 1 - \frac{T_{h,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = 1 - \frac{T_4 - T_6}{T_3 - T_6} \quad (1)$$

图 2 展示了回热器换热效率对高效逆布雷顿制冷机制冷量的影响。首先,回热器换热效率对制冷机的输出冷量具有显著影响,二者呈现出明显的线性相关特性。当回热器换热效率从 97.8% 提升至 98.8% 时,虽然仅提高 1.0%,但在功率输入和其他部件效率保持不变的条件下,制冷机在 70 K 温区的制冷量从 70.1 W 增加到 111.2 W,显著提升了 58.6%。制冷量随换热效率显著提升的原因在于高效回热器能够有效降低膨胀机入口温度,从而增强膨胀制冷效应。同时,高效逆布雷顿制冷机对回热器性能提出了严格要求。如图 2 所示,即使回热器换热效率达到 96.5%,已属于较高的换热效率水平,系统在 70 K 温区仍无法产生有效制冷量。这是由于回热器出口的温度偏高,导致膨胀机无法实现 70 K 温区的有效制冷。上述分析表明,回热器换热效率是影响空间逆布雷顿制冷机的冷量输出的关键因素。

相对压降反映了回热器的流动阻力特性,定义为:

$$\Delta P/P = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

图 3 展示了回热器的相对压降对逆布雷顿制冷机制冷量的影响。在功率输入和其他部件效率保持不变的条件下,系统制冷量随相对压降增加呈线性递减趋势。当相对压降从 3.6% 增至 6.7% 时,系统输出冷量降低了 21.1%,从 85.5 W 降至 67.5 W。同时,制冷系统对回热器的流动性能提出严苛要求。当相对压降达到 18.1% 时,系统在 70 K 温区无法产生有效制冷量。这是因为过高的压降导致膨胀机入口压力显著下降,严重影响了膨胀制冷效果。上述结果表明,回热器优良的流动性能对逆布雷顿制冷机的高效运行至关重要。

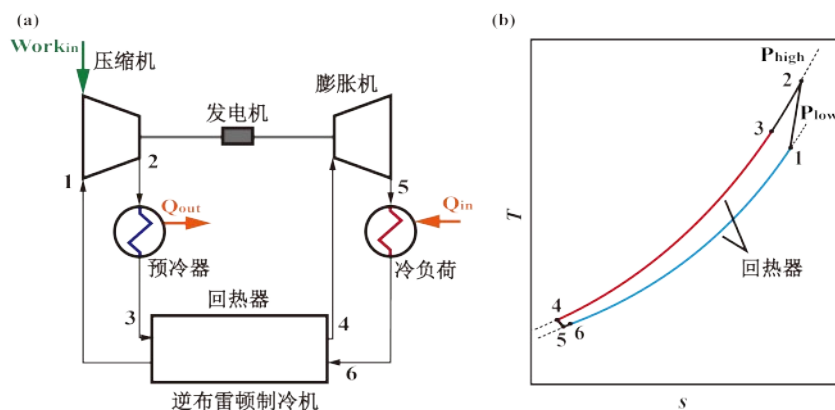


图 1 逆布雷顿制冷机及 T-s 图

Fig.1 Reverse Brayton cycle and T-s diagram

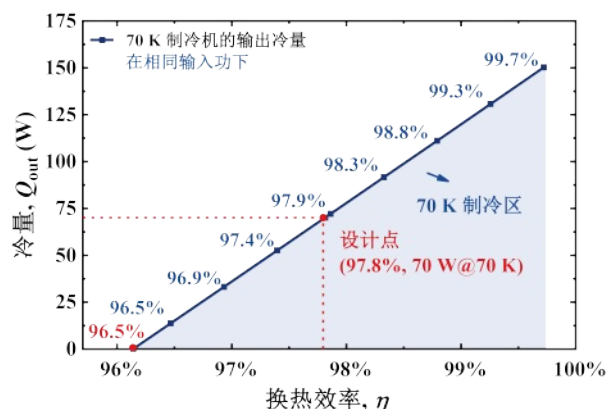


图2 回热器换热性能对逆布雷顿制冷系统的影响

Fig.2 The impact of recuperator's thermal performance on the cooling capacity output of Brayton cryocooler

1.3 高效印刷电路板式换热器方案及设计模型

本研究提出的高效低温印刷电路板式换热器(Printed Circuit Heat Exchanger, 简称为PCHE)在传统PCHE中引入微肋强化换热结构,实现了紧凑性和换热-流动性能的显著提升。PCHE采用金属蚀刻技术加工精密的微尺度强化传热结构和流动通道,并通过扩散焊接技术实现无钎料连接,焊接强度可达母材水平。高效低温印刷电路板式换热器芯体部分由200片双面蚀刻板交替叠置组成,包含A、B两种板型各100片。A型板的下表面与B型板的上表面对接形成冷侧流道,反向配置则构成热侧

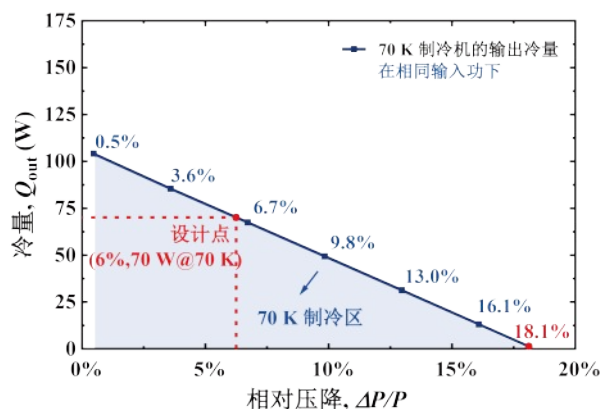


图3 回热器流动性能对逆布雷顿制冷系统的影响

Fig.3 The impact of recuperator's flow performance on the cooling capacity output of Brayton cryocooler

流道,从而实现冷热流体通道的交替分布。在性能高效化设计方面,不同于传统PCHE的常见强化换热结构和厚壁设计,本设计采用高密度微肋阵列结合薄间壁设计。高密度排布微肋阵列(114 cm^{-2})配合0.35 mm的流道高度和0.15 mm的薄壁设计,实现了0.46 mm的小水力直径和 $4435 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的高比表面积,其水力直径已达到微管换热器水平($D_h < 0.5 \text{ mm}$)。肋片结构采用圆形翅片结构以获得优异的综合传热性能,并通过非连续流道设计优化流体分布均匀性。

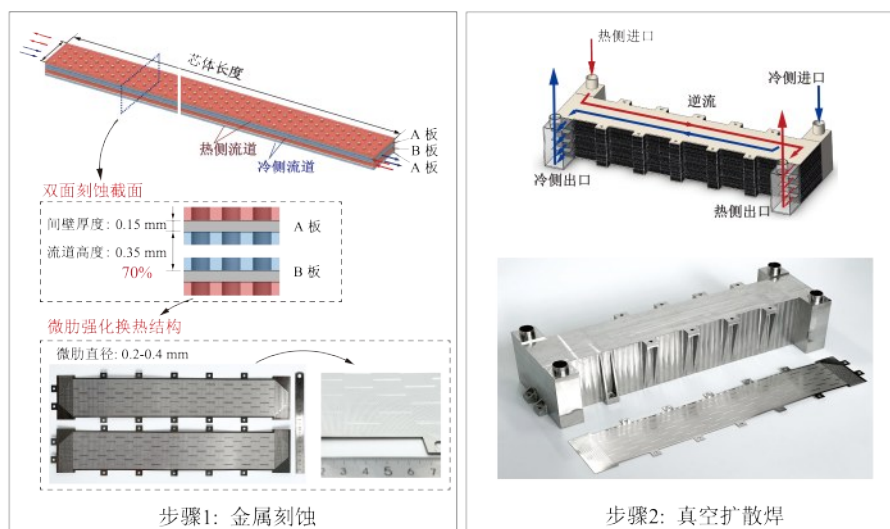


图4 高效低温印刷电路板式换热器设计

Fig.4 The proposed high efficiency printed circuit heat exchangers

为实现高效印刷电路板式换热器的优化设计并评估其他回热器方案,本文建立了两股逆流低温换热数值模型,如图5所示。在数值模型中,计算域沿流动方向离散为多个控制单元。采用有限体积

法对控制方程进行离散和求解。流体区域采用节点中心格式,固体区域采用单元中心格式。同时,数值模型充分考虑了低温条件下的特殊传热特性,包括大温度梯度下的轴向导热效应及流体和固体

物性参数随温度的显著变化。通过数值模型求解,能够准确预测回热器在实际运行条件下的换热性

能和压力损失,为优化设计提供可靠的理论依据。

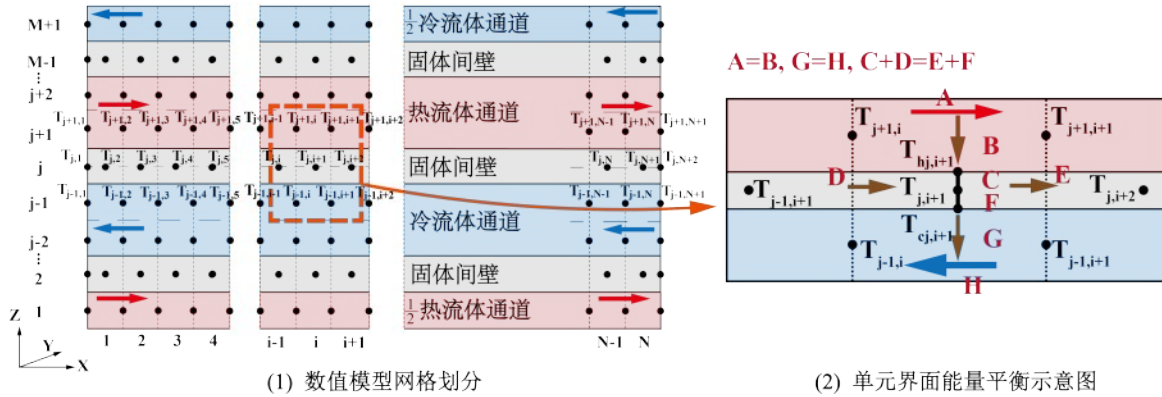


图5 低温逆流换热数值模型

Fig.5 The numerical model of cryogenic counter-flow heat exchanger

1.4 高效印刷电路板式换热器低温测试实验台

为验证高效PCHE的性能,搭建了80 K低温测试平台,用于评估PCHE的传热和流动性能。测试样品采用缩比设计,保持换热板结构相同,板片数

量减少为50层,样件整体尺寸为514 mm×166 mm×27 mm,实验装置如图6所示。换热效率和压降的最大测量不确定度分别为4.5%和9.2%。

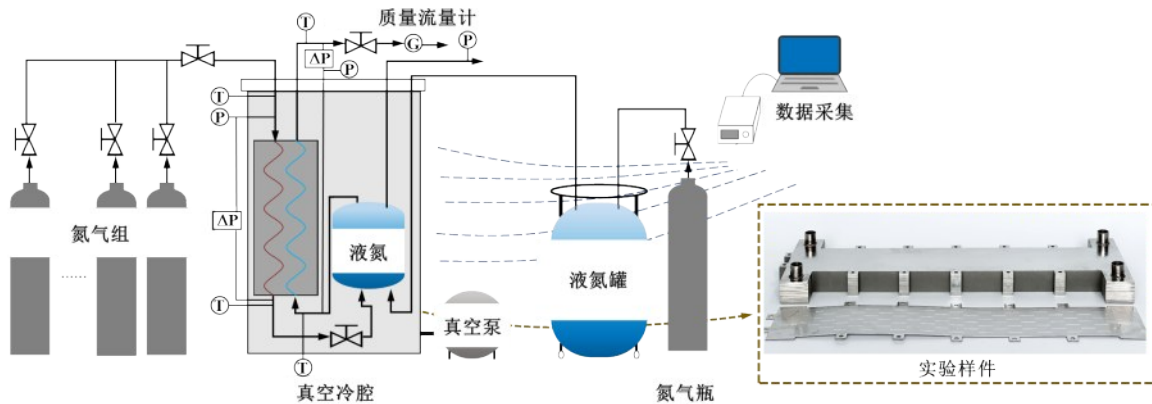


图6 低温逆流换热器测试平台及样件

Fig.6 Experimental setup and cryogenic PCHE testing specimen

2 高效紧凑低温印刷电路板式换热器优化设计

2.1 回热器测试结果

低温PCHE的性能测试结果如图7所示。实验结果显示,低温PCHE在传热和流动性能方面表现优异。在测试条件下,所提出的低温高效PCHE实现了96.7%~97.4%的换热效率,热端和冷端的压降分别为2.7~3.2 kPa和3.3~4.1 kPa。实验研究了热侧入口温度(288 K~321 K)对低温PCHE性能的影响,结果如图7所示。随着热侧入口温度升高,换热

温差增大,换热效率相应提升,同时压降也有所增加。例如,当热侧进口温度从306 K升至321 K时,换热效率从96.9%提升至97.4%,总压降从6.5 kPa增加到7.3 kPa。这是因为,温度升高增大了冷热侧温差,强化了传热过程,提高了换热效率;同时,高热流体温度使得流体平均密度略微减小,使压降略有上升。

2.2 回热器方案对比

将所提出的低温高效PCHE与传统板翅式换热器(Plate-fin Heat Exchanger, 简称为PFHE)进行对比,结果如图7所示。在相同的尺寸下,低温印刷电

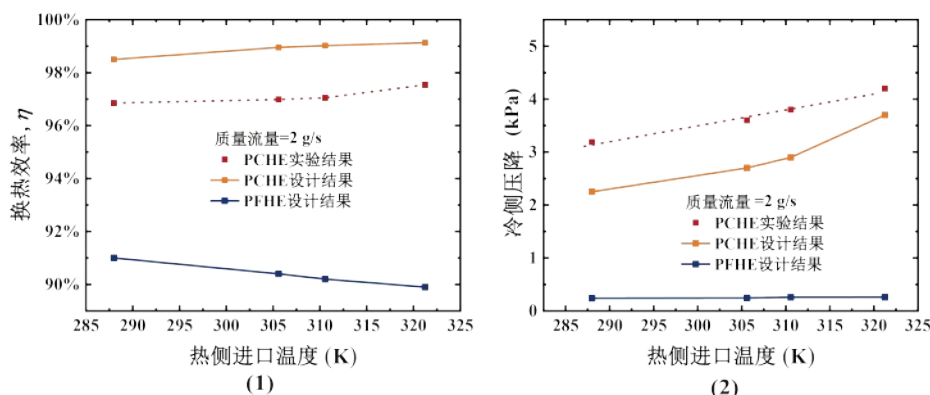


图7 低温印刷电路板式换热器与紧凑板翅式换热器的流动及换热性能

Fig.7 Thermal and flow performance of proposed cryogenic PCHE and PFHE

路板式换热器始终保持优越的热性能,其换热效率比板翅式换热器高14.5%–22.0%。这种优异性能得益于低温印刷电路板式换热器中的高密度强化传热结构和更高的比表面积。传统板翅式换热器需要更大的传热面积和芯体体积才能满足逆布雷顿制冷机的性能要求。在流动性能方面,紧凑式板翅式换热器的压降低于低温印刷电路板式换热器。

为定量评估回热器方案的综合性能,引入综合性能评价准则(Performance Evaluation Criteria,简称PEC)对相同尺寸的低温印刷电路板式换热器和板翅式换热器进行性能对比,结果如图8所示。PEC综合考虑了换热器的换热和流动性能,用于评价相对于参考换热器的性能增强($PEC > 1$)或减弱($PEC < 1$)。PEC定义为:

$$PEC = \frac{(Nu/Nu_0)}{(ff_0)^{1/3}} \quad (3)$$

式中, Nu 和 f 分别是低温印刷电路板式换热器的努塞尔数和摩擦因子, Nu_0 和 f_0 分别是相同尺寸板翅式换热器(翅片高度9.5 mm)在相同质量流量下的努塞尔数和摩擦因子。

如图8所示,所提出的低温印刷电路板式换热器的PEC值介于2.9–7.4之间,始终大于1,表明其综合性能显著优于紧凑式板翅式换热器。这种优越的综合性能表明微肋的传热强化效果补偿了其带来的额外流动阻力损失。同时,低温印刷电路板式换热器的PEC随质量流量增加呈下降趋势。这种下降揭示了压降随质量流量的增加速率超过了换热效能的提升。具体而言,当0.3 mm印刷电路板式换热器的质量流量从14 g/s增加到29 g/s时,总压降大幅增加约114.7%(从6.8 kPa到14.6 kPa),而换热效率几乎保持不变(98.7%到98.8%),导致PEC从

4.9降至3.6。此外,微肋直径对低温PCHE的综合性能也有显著影响。在相同跨径比条件下,小直径微肋设计可获得更高的PEC值,如图8所示。

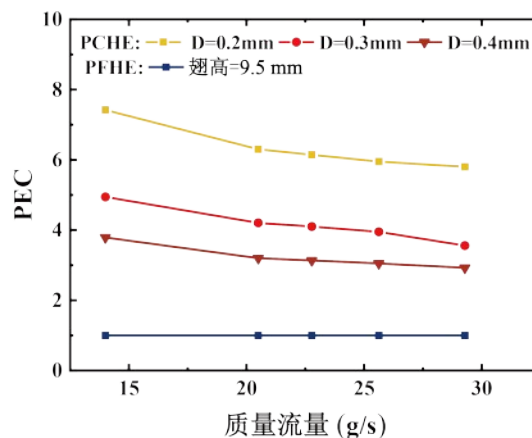


图8 低温印刷电路板式换热器与紧凑板翅式换热器的综合性能对比

Fig.8 Comparative analysis of proposed cryogenic PCHE and PFHE

如图9所示,在相同换热效率(97.8%)条件下,所提出的低温印刷电路板式换热器在质量和体积方面均显著优于紧凑式板翅式换热器。研究表明,回热器可占系统总质量的31.5%–58.2%,凸显了轻量化回热器设计的重要性。其次,对于不同回热器方案,在体积方面所提出的低温PCHE设计实现了82%的体积减小,紧凑式板翅式换热器需要0.027 m³的芯体体积,而低温印刷电路板式换热器仅需0.0048 m³。在质量方面,低温PCHE芯体质量为12.6 kg,相比于紧凑式板翅式换热器的34.9 kg减少了64%。低温PCHE在体积和质量方面的显著改进归因于其高度紧凑化设计。其水力直径仅为0.46

mm,相比板翅式换热器的1.8 mm减小74%,从而实现了优异的轻质化和小型化。

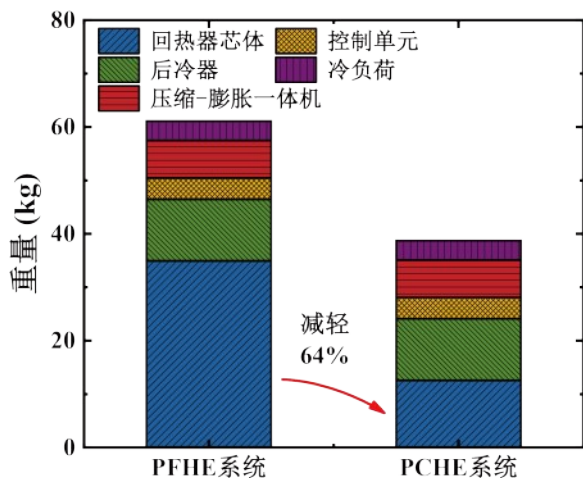


图9 低温印刷电路板式换热器与紧凑板翅式换热器的重量对比

Fig.9 Weight analysis of proposed cryogenic PCHE and PFHE

2.3 低温印刷电路板换热器设计优化

图10展示了微肋直径(0.2–0.4 mm)和质量通量(5–12 kg/(m²·s))对低温印刷电路板式换热器(PCHE)传热效率和压降的影响。随着质量通量的增加,低温PCHE换热效率提高,但流动性能恶化。传热性能的提升与质量通量增加时雷诺数和努塞尔数的增加相关,压降的增大主要源于流速升高。如图10(a)所示,换热效率随质量通量的增长趋势呈

现两个阶段。在质量通量低于8 kg/(m²·s)阶段,0.3 mm微肋PCHE的换热效率迅速从97.9%提升至98.9%;然而,随着质量通量的继续增长,换热效率趋于平稳。这是由于,高质量通量强化了对流换热,但同时降低了肋片效率和有效换热面积,限制了传热性能的进一步提升。质量通量对PCHE性能的影响直接体现在70 K低温制冷机的输出制冷量上,如图11所示。虽然流动损失随质量通量的增加而增大,但传热性能的改善起主导作用,使制冷量显著提升。以微肋直径0.3 mm的PCHE为例,当质量通量从5 kg/(m²·s)增加到10.5 kg/(m²·s)时,制冷机输出制冷量从22.8 W提升至83.0 W。

微肋直径对低温高效回热器的性能也有明显影响。如图10所示,在保持跨径比不变的条件下,减小微肋直径可提高热效率,且压降变化相对较小。虽然随着直径减小,努塞尔数降低,但传热面积的增加补偿了这一不利影响。例如,将直径从0.4 mm减小到0.2 mm,传热面积增加了16.1%。微肋直径对PCHE流动换热性能的影响也同样体现在了70 K低温制冷机的输出制冷量上,如图11所示。随着直径的减小,流动和换热性能均得到改善,使得制冷机制冷量输出明显增加。在质量通量为10.5 kg/(m²·s)时,当微肋直径从0.4 mm减小到0.2 mm,制冷机输出制冷量从17.7 W升高至24.4 W,显著提升37.9%。

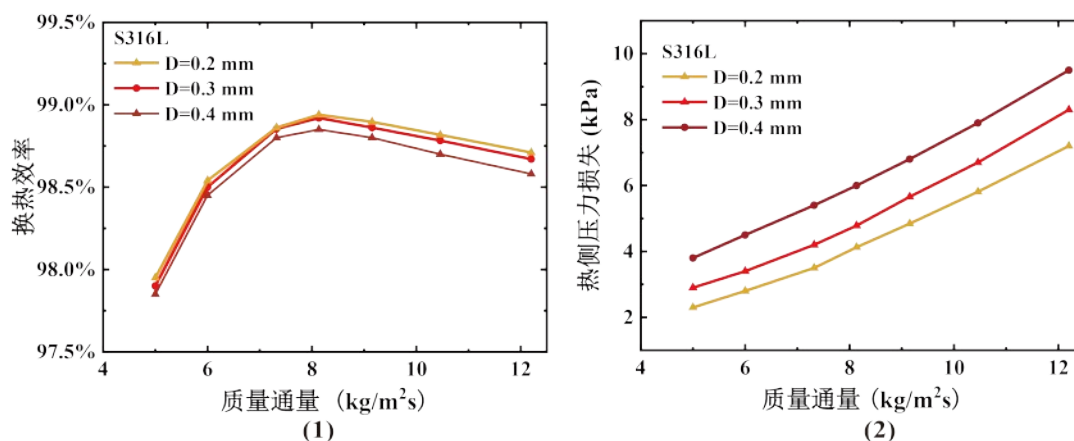


图10 低温印刷电路板式换热器在不同质量通量和微肋直径下的换热及流动性能

Fig.10 Comparison of cryogenic PCHE performance under different mass flux and fin diameters

3 结论

本研究针对70 W@70 K空间逆布雷顿制冷系统,提出了一种新型低温印刷电路板式换热器,并

对比分析了不同回热器方案,开展了低温试验验证和优化设计,主要结论如下:

(1)回热器的换热-流动-质量特性对逆布雷顿制冷机具有显著影响。换热效率提高1%可使逆布

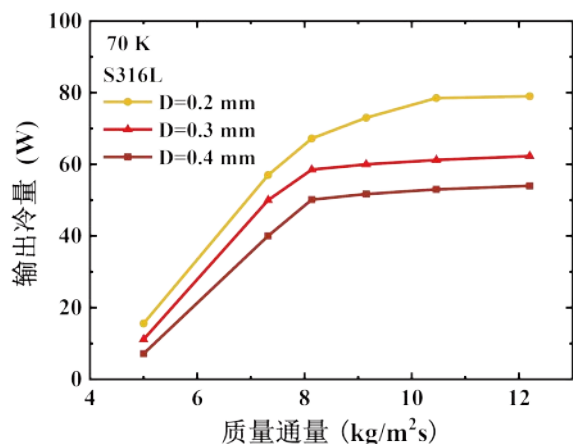


图11 低温印刷电路板式换热器在不同质量通量和微肋直径下制冷机的70 K输出制冷量

Fig.11 70K cooling capacity of Brayton cryocoolers with various mass flux and fin diameters

雷顿制冷机在70 K的制冷量提升58.6%;相对压降低3.1%可使制冷量提升26.7%。在质量方面,回热器占制冷机总质量的比例可达31.5%–58.2%。

(2)提出的高密度(114 cm^{-2})微肋低温高效印刷电路板式换热器通过实验验证,具有优异的换热和流动性能。所提出的低温高效PCHE实现了96.7%–97.4%的换热效率,热端和冷端的压降分别为2.7–3.2 kPa和3.3–4.1 kPa。

(3)与板翅式换热器相比,所提出的低温PCHE在相同尺寸下PEC达2.9–7.4,综合性能显著提升。在相等换热效率的条件下,低温PCHE相比板翅式换热器体积和质量分别减少82%和64%,展现出卓越的紧凑性和轻质性。

(4)相同跨径比下,微肋直径越小,PCHE的流动和换热性能越好,制冷机70 K制冷量输出越大。当微肋直径从0.4 mm减小到0.2 mm时,制冷机输出制冷量提升34%–115%。

本研究为空间逆布雷顿制冷机提供了一种高性能、高紧凑性的新型回热器设计方案,对推动空间低温制冷技术的发展具有重要意义。后续将进一步开展集成微肋高效回热器的制冷机系统性能测试,并通过结构参数优化和流动特性改进等措施持续提升换热及流动性能,以充分发挥微肋高效回热器在空间低温制冷技术中的潜力。

参考文献

[1] Hou Y, Zhao H L, Chen C Z, et al. Developments in reverse Brayton cycle cryocooler in China[J]. *Cryogenics*, 2006, **46**(5): 403–407.[LinkOut]

[2] Rosenbush F M. ECS schemes for all electric airliners[J]. *SAE Technical Paper Series*, 1982, **1**: 820870.[LinkOut]

[3] Ahmed M M, Ehsan M M. Design and off-design performance analysis of a zigzag channelled precooler for indirect cooling system of supercritical CO_2 recompression cycle incorporated with a flow-bypass system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **226**: 120321.[LinkOut]

[4] Zhang Z X, Chen L, Lv H Y, et al. Experimental and numerical investigation of a high-effectiveness cryogenic PCHE for space 80 K Brayton cryocooler[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, **176**: 26–39.[LinkOut]

[5] Biglia A, Comba L, Fabrizio E, et al. Reversed Brayton cycle for food freezing at very low temperatures: Energy performance and optimisation[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, **81**: 82–95.[LinkOut]

[6] Biglia A, Bilardo M, Comba L, et al. Performance analysis of a nitrogen-based Brayton cryocooler prototype[J]. *Energy*, 2024, **290**: 130095.[LinkOut]

[7] 李文, 陈叔平, 朱鸣, 等. 微重力下低温液氮贮箱热力学特性[J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(4): 694–702.

Li W, Chen S P, Zhu M, et al. Thermodynamic characteristics of cryogenic liquid krypton tank in microgravity[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 694–702.[维普]

[8] Chang H M, Chung M J, Kim M J, et al. Thermodynamic design of methane liquefaction system based on reversed-Brayton cycle[J]. *Cryogenics*, 2009, **49**(6): 226–234.[LinkOut]

[9] Chang H M, Ryu K N, Baik J H. Thermodynamic design of hydrogen liquefaction systems with helium or neon Brayton refrigerator[J]. *Cryogenics*, 2018, **91**: 68–76.[LinkOut]

[10] Cardella U, Decker L, Klein H. Economically viable large-scale hydrogen liquefaction[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, **171**: 012013.[LinkOut]

[11] Swift W L, Dolan F X, Zagarola M V. The NICMOS cooling system – 5 years of successful on-orbit operation[C]//ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC. Melville, NY: American Institute of Physics, 2008: 799–806.

[12] Deserranno D, Zagarola M, Li X, et al. Optimization of a Brayton cryocooler for ZBO liquid hydrogen storage in space[J]. *Cryogenics*, 2014, **64**: 172–181.[LinkOut]

[13] Jedrich N, Zimbelman D, Swift W, et al. A mechanical cryogenic cooler for the Hubble Space Telescope[R]. Goddard Space Flight Center: NASA, 2002.

[14] Zhao H L, Hou Y, Zhu Y F, et al. Experimental study on the performance of an aircraft environmental control system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(16): 3284–3288. [LinkOut]

[15] Breedlove J J, Magari P J, Miller G W. Cryocooler for air liquefaction onboard large aircraft[C]//ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC. Melville, NY: American Institute of Physics, 2008: 838–845.

[16] Choi C H, Chang H S, Park D S, et al. Helium refrigeration system for the KSTAR[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, **81**(23/24): 2623–2631.[LinkOut]

[17] Briend P, Dauget P, Delcayre F, et al. Air liquide cryogenic system for the KSTAR device[M]//Proceedings of the Twentieth

- International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20). Amsterdam: Elsevier, 2005: 103–106.[LinkOut]
- [18] Chang H S, Baguer G M G, Cho K W, et al. Design issues of the distribution valve box of the KSTAR helium refrigerator[M]// Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20). Amsterdam: Elsevier, 2005: 43–46.
- [19] Kim Y S, Chang H S, Cho K W. Technical Requirement for the KSTAR Helium Refrigeration System [R]. Korea: KSTAR Helium Refrigeration System project internal release document, 2004.
- [20] Dhillon A K, Ghosh P. Performance characteristics map using exergy analysis of reverse Brayton cryocooler for HTS applications: Selection, Optimization, Design and Operational guidelines[J]. *Cryogenics*, 2020, **106**: 103024.[LinkOut]
- [21] Mito T, Sagara A, Imagawa S, et al. Applied superconductivity and cryogenic research activities in NIFS[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, **81**(20/21/22): 2389–2400.[LinkOut]
- [22] Hartwig J W, Kamotani Y. The static bubble point pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, **101**: 502–516.[LinkOut]
- [23] Clavel F, Alamir M, Bonnay P, et al. Multivariable control architecture for a cryogenic test facility under high pulsed loads: Model derivation, control design and experimental validation[J]. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(7): 1030–1039.[LinkOut]
- [24] Hartwig J W. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid nitrogen[J]. *Cryogenics*, 2016, **74**: 95–105. [LinkOut]
- [25] Anderson J E. Superfluid helium acquisition system development [J]. *Cryogenics*, 1989, **29**(5): 513–516.[LinkOut]
- [26] Deserranno D, Zagarola M, Craig D, et al. Performance testing of a high effectiveness recuperator for high capacity turbo-brayton cryocoolers[C]//Miller S D, Ross Jr R G. *Cryocoolers 19*. Boulder, CO: International Cryocooler Conference, Inc., 2016: 447–454.
- [27] Hansen S W, Sheth R B, Poynot J, et al. Continued Water-Based Phase Change Material Heat Exchanger Development[C]// Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue, Washington: International Conference on Environmental Systems, 2015.
- [28] Cragin K J, Zagarola M V. Development and testing of a high-capacity 20 K cryocooler[C]//Ross Jr R G, Raab J R, Miller S D. *Cryocoolers 22*. Boulder, CO: International Cryocooler Conference, Inc., 2022: 335–343.
- [29] Nellis G, Dolan F, McCormick J, et al. Reverse brayton cryocooler for NICMOS[M]//*Cryocoolers 10*. Boston, MA: Springer US, 2002: 431–438.[LinkOut]
- [30] Zagarola M V, Breedlove J F, McCormick J A, et al. Turbo-Brayton cryocooler technology for low-temperature space applications[J]. *IR Space Telescopes and Instruments*, 2003, **4850**: 1029.[LinkOut]
- [31] Hill R W, Izenson M G, Chen W, et al. A recuperative heat exchanger for space-borne turbo-Brayton cryocoolers[C]//Miller S D, Ross Jr R G. *Cryocoolers 14*. Boulder, CO: International Cryocooler Conference, Inc., 2007.
- [32] Onufrena A, Koettig T, Dorau T, et al. Cryogenic performance of a compact high-effectiveness mesh-based counter-flow heat exchanger[J]. *Cryogenics*, 2022, **125**: 103495.[LinkOut]
- [33] Zagarola M V, McCormick J A. High-capacity turbo-Brayton cryocoolers for space applications[J]. *Cryogenics*, 2006, **46**(2/3): 169–175.[LinkOut]
- [34] Onufrena A, Koettig T, Naydenov B, et al. Design and performance of a novel compact high-effectiveness transparent-wall counter-flow heat exchanger fabricated using additive manufacturing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, **218**: 124726.[LinkOut]
- [35] Tanchon J, Lacapere J, Rey J C, et al. A 40 K turbo-Brayton cryocooler for earth observation applications[C]//Miller S D, Ross Jr R G, Raab J R. *Cryocoolers 20*. Boulder, CO: International Cryocooler Conference, Inc., 2018.