

S 型泡沫金属管翅式换热器的设计与实验研究

赵红柳¹, 孙明瑞¹, 姜楠², 刘卫国¹, 闫广涵¹, 宋永臣¹, 赵佳飞¹

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为解决航空发动机部件热防护以及热管理问题, 针对 CCA (cooled cooling air) 技术, 采用高孔隙率泡沫金属替代传统管翅式换热器金属翅片, 设计一种轻质、高效、紧凑的小尺寸 S 型泡沫金属管翅式换热器。换热器芯体为 3D 打印的钛合金制作, 重 129 g, 由 S 型管束以及泡沫金属翅片组成, 翅片安装在管束直管段处。流动传热实验模拟航空发动机机匣外部的空-油换热器, 冷侧为水, 热侧为高温空气, 测定两侧流体的流量、进出口温度及压力。结果表明: 泡沫金属作为换热器的翅片, 传热系数增大 43.94%、换热量提升 21.7%、综合换热性能增加 25.43%, 功重比平均提升 17.26%, 可达 14.61 kW/kg。这说明泡沫金属能够提升换热器的整体性能, 可用于未来航空发动机相似结构换热器的设计。

关 键 词: 航空发动机热管理; 管翅式换热器; 泡沫金属; 流动传热; 换热性能

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Design and experimental study of S-type foam metal tube-fin heat exchanger

ZHAO Hongliu¹, SUN Mingrui¹, JIANG Nan², LIU Weiguo¹, YAN Guanghan¹,
SONG Yongchen¹, ZHAO Jiafei¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to solve the problem of thermal protection and thermal management of aero-engine components, for CCA (cooled cooling air) technology, high-porosity foam metal was used to replace the metal fins of traditional tube-fin heat exchangers, and a lightweight, efficient, and small size S-type foam metal tube-fin heat exchanger was designed. The heat exchanger core made of 3D printed titanium alloy, with weight of 129 g, was composed of S-shaped tube bundles and foamed metal fins. The fins were installed at the straight pipe section of the tube bundle. The flow heat transfer experiment simulated the air-oil heat exchanger outside the casing of an aero engine, with water on the cold side and high temperature air on the hot side. The flow rate, inlet and outlet temperature and pressure of the fluid on both sides were measured. The results showed that: for the fin of the heat exchanger, the heat transfer coefficient increased by 43.94%, the heat transfer increased by 21.7%, the comprehensive heat transfer

收稿日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(51622603, 51806028, 51806027, U19B2005); 国家科技重大专项(2017-III-0005-0029);

2020 年度南京航空航天大学重点实验室开发课题(CEPE2020016)

作者简介: 赵红柳(1997—), 女, 硕士生, 主要从事航空发动机换热器研究。

通信作者: 赵佳飞(1980—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 从事多孔介质强化换热基础理论与应用技术研究。E-mail: jfzhao@dlut.edu.cn

引用格式: 赵红柳, 孙明瑞, 姜楠, 等. S 型泡沫金属管翅式换热器的设计与实验研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 840-849. ZHAO Hongliu, SUN Mingrui, JIANG Nan, et al. Design and experimental study of S-type foam metal tube-fin heat exchanger[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 840-849.

performance increased by 25.43%, and the power-to-weight ratio increased by 17.26% on average, reaching 14.61 kW/kg. This showed that the metal foam can improve the overall performance of the heat exchanger and can be used in the design of heat exchangers with similar structures for future aero-engines.

Keywords: aero-engine thermal management; tube-fin heat exchanger; foam metal; flow heat transfer; heat transfer performance

翅片管壳式换热器由翅片与圆管组成,广泛应用于车辆、工程机械、空调制冷、航空航天等领域,具有换热面积大、传热效率高等特点^[1]。但现有管翅式换热器都存在体积过大、翅片质量过高等问题,并不符合于航空发动机换热器轻质、小尺寸以及高可靠性的要求^[2-4]。

换热器在航空发动机上主要应用方向是冷却空气,所以也被称为空气冷却器^[5]。在航空发动机上安装空气冷却器,降低冷却空气的自身温度,从而提高冷却空气的品质,被称为 CCA(cooled cooling air)技术^[6],是目前针对航空发动机部件热防护以及系统热管理问题的有效技术手段。而解决热管理这个瓶颈问题,有利于提升航空发动机的推质比,进而实现飞行器的高马赫数飞行^[7]。

航空发动机对换热器的要求较高,应考虑结构、能耗、可靠性、运行以及工艺等各个方面,关键技术问题是如何控制换热器的质量和体积,而满足此条件的多孔介质和微小尺度仿生换热器已经开始应用于航空发动机^[6-8]。泡沫金属多孔介质具有轻质、比表面积大、孔隙率高和孔隙尺度小等优点,根据航空发动机外机匣的空间大小,将泡沫金属取代传统管翅式换热器的翅片,研制一种轻质、高效、紧凑、小型的泡沫金属管翅式换热器,以期改善航空发动机性能,提高冷却空气优异程度以及热能利用率。

在 21 世纪初, Bhattacharya 等^[9]模拟泡沫金属内部结构模型,才得到泡沫金属的有效导热系数和渗透率等一些热物性参数。至此之后,学者们开始对泡沫金属的换热做研究。大连理工大学孙明瑞、赵佳飞、Hu 等^[10-14]在高速表面传热情况下对不同孔隙率的泡沫金属进行孔隙尺度研究比较,研究结果表明:压降和传热系数对孔隙更加敏感,但泡沫金属的比表面积显著影响传热性能;进而对优化后的开尔文胞体进行模拟,优化泡沫金属内部孔隙结构,提出椭球开尔文胞体结构。得到模拟结果:当椭球长轴与短轴比达到 2.0 时,泡沫金属的综合换热性能较柱状模型提高 63.0%。Rashidi 等^[15]对均匀泡沫金属中圆柱体的流场和传热进行数值模拟研究,结果表明:具有高渗透

性和高导热性的泡沫金属可以改善热工性能。上海交通大学孙硕^[16],对填充泡沫金属的蒸发器换热管内 R410A-油混合物进行研究,测定其流动沸腾的换热系数与压降,开发出两者的预测关联式。Huisseune 等^[17]运用热量非平衡模型对填充泡沫金属的换热器进行研究,并与同一条件下的翅片管换热器对比,结果表明:在进口质量流量相同时,泡沫金属管换热器的换热效率要好于翅片管换热器。毛绍林等^[18]研究了泡沫金属换热器内流体力学和传热的相互关系,模拟结果表明:在壁传热系数和压降达到设计目标的情况下,泡沫金属孔隙率有一个最佳选择,泡沫金属热交换器的换热性能可以在最优条件下取代传统的紧密型换热器。Dai、Nawaz、Park 等^[19]基于柱-柱的模拟方法,将开孔泡沫铝作为钎焊铝热交换器百叶翅片的替代品,开发出一个模型来比较扁平管、蛇形百叶翅式换热器和扁平管金属泡沫换热器。Huisseune 等^[17]采用由 Darcy-Forchheimer-Brinkman 流动模型和热非平衡能量模型组成的宏观模型对泡沫金属换热器进行二维模拟,对泡沫金属换热器、裸管束、现有传统百叶窗翅片换热器的性能进行比较,结果表明,在风机功率相同的情况下,泡沫换热器的换热速率比裸管束高 6 倍。

国内外学者的研究表明,将泡沫金属应用在换热器中,可以增大换热器换热效率。但文献中仅仅将泡沫金属简单填充在换热器中,并没有替代关键部件。由此,本文将泡沫金属完全取代管翅式换热器翅片,对传统管翅式换热器进行结构、流动传热、安全可靠性能、实验验证等设计,在无特性模拟系统工作环境下,模拟航空发动机机匣外部的空-油换热器,对此轻质、小尺寸、结构紧凑的泡沫金属管翅式换热器进行流动传热特性分析实验,得到泡沫金属多孔介质对传统换热器的传热性能提升效果。

1 换热器设计

实验中换热器内流动工质为气-液,冷侧为水,热侧为空气,两种流体交叉式流动,第一种流体水在管束内流动,第二种流体空气在换热器壳体

内流动的同时,充分在泡沫金属翅片的微孔隙结构内流动^[20]。

为了避免换热器薄壁侧在运行高温高压流体时出现开裂现象,采用 3D 打印技术制作换热器芯体,再用传统焊接工艺对换热器整机加工,焊接壳体并封装芯体,样机实物如图 1 所示。

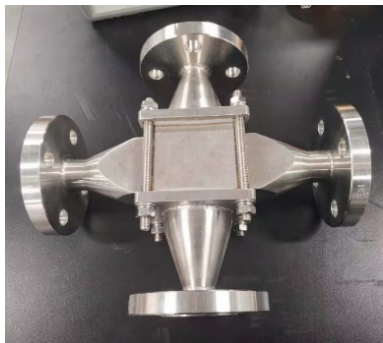


图 1 封装后的换热器

Fig. 1 Packaged heat exchanger

3D 打印技术研究和产品加工在航空发动机的复杂部件应用十分广泛^[21],本文中的泡沫金属翅片与换热管尺寸较小,孔隙结构复杂,因此采用 3D 打印的方式加工制作。3D 打印换热器芯体,省去繁琐的焊接工艺,保证换热器整体密闭性;3D 打印泡沫金属翅片与换热管,增加两者的接触面积,减小接触热阻,有利于强化换热。

1.1 S 型泡沫金属管壳式换热器设计

本文 S 型泡沫金属管翅式换热器是对传统管翅式换热器的优化设计,以换热器运行参数和流体性质作为参考依据,采用 3D 打印的开尔文胞体结构泡沫金属^[14]代替传统换热器不锈钢翅片,换热器三维结构如图 2 所示,开尔文胞体结构如图 3 所示。

钢管外径 $d_{\text{out}}=4$ mm,壁厚 1 mm,泡沫金属翅片厚度 3 mm^[22],两根直管段间距设计为 $2.5d_{\text{out}}$,

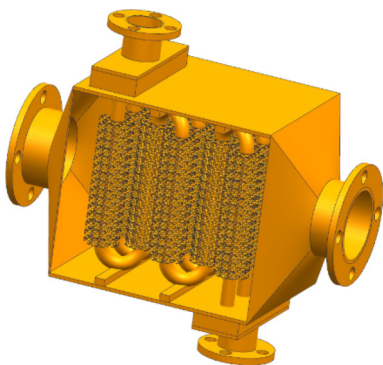


图 2 S 型泡沫金属管壳式换热器结构

Fig. 2 S-type foam metal shell and tube heat exchanger structure

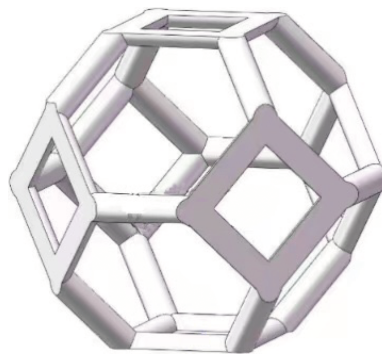


图 3 开尔文胞体多孔介质结构^[10, 12]

Fig. 3 The Kelvin cell porous media structure^[10, 12]

每排换热管间距 $3d_{\text{out}}$,一定的间距使换热器结构更加紧凑。每一排换热管以“S”蛇形方式排列,材料为 304 不锈钢,换热管起点汇集在入口处,端点汇集在出口处。

Mohammadpour-Ghadikolaie 等^[23]在均匀空气横流作用下,对包裹泡沫金属的恒温管进行表面传热数值研究时发现,与完全包覆泡沫金属的换热管相比,部分包裹泡沫金属的换热管,不仅可以减少管质量和材料使用,传热率还可以增加至少 20%;并且,“S”管弯折处会存在挤压变形现象,影响泡沫金属内部流体换热。因此,将泡沫金属翅片布置在每一部分换热管的直管段处,有益于流体的换热。

1.2 S 型管束管壳式换热器设计

为了研究 S 型泡沫金属换热器相对于传统管式换热器的优势,同时制作尺寸与材料完全相同的 S 型管束管壳式换热器,即光管式换热器,如图 4 所示。光管式换热器不加装翅片是由于金属 3D 打印时间过长,非支撑部件会造成应力集中,导致结构变形、打印失败,而 3D 打印存在孔隙的泡沫金属不会出现此类问题。

另外,与光管对比,可以更准确获得泡沫金属

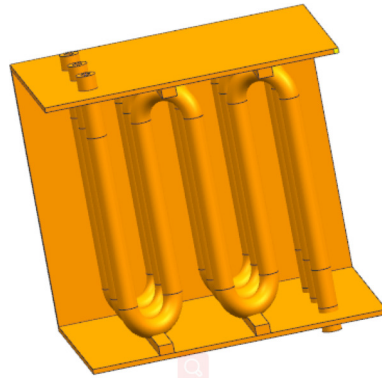
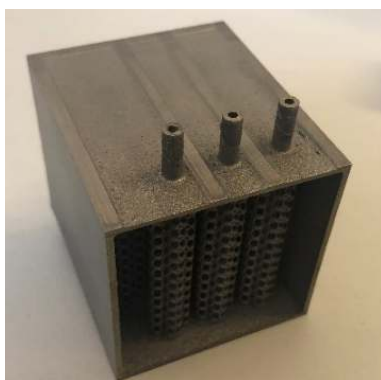


图 4 S 型管束管壳式换热器结构

Fig. 4 S-type shell and tube heat exchanger structure

作为翅片时的翅片效率,从而为泡沫金属换热器的设计提供数据支撑。同时,与最原始的光管比较,可以定量分析泡沫金属多孔介质强化换热的优势,为下一步研究明确研究方向。只有定量比较,实验与模拟相结合,能够更好的寻找优化设计方向,为进一步研究做准备。

S型泡沫金属管翅式换热器芯体如图5(a)所示,长×宽×高为59.18 mm×52.6 mm×51.01 mm,质量为129 g; S型管束管壳式换热器芯体如图5(b)所示,长×宽×高为59 mm×52 mm×51 mm,质量为103 g。两种换热器封装后长×宽×高均为255 mm×230 mm×80 mm,如图1所示。



(a) S型泡沫金属管翅式换热器芯体



(b) S型管束管壳式换热器芯体

图5 两种管壳式换热器芯体

Fig. 5 Two shell and tube heat exchanger cores

2 实验系统及参数设定

实验在大连理工大学能源与动力学院海洋能源利用与节能教育部重点实验室完成,设备全部由自行搭建流动传热实验台提供,实验台主要由空气系统、油路/水路系统、实验段、数据采集系统4部分组成,本次实验模拟航空发动机机匣外部的空-油换热器,无特性模拟系统工作环境。

如图6所示,空气系统指实验气体管路通道,主要包括空压机、储气罐、过滤器、干燥机、油水分离器、实验连接段和管路。整个管路均采用304不锈钢管,管道内径为65 mm,空气系统由90 kW空压机和100 kW电加热器为主体组成,可实现流量62~328 g/s,1 MPa气源供给,在最高流量下可将空气加热到最高533 K。

油/水路系统指实验液体管路通道,换热介质可在油水间选择,主要包括磁翻板液位计、导热油导料泵、导热油泵、循环水泵、气液分离罐、电加热器、水油换热器和管道,整个管路均采用304不锈钢管材质。本文实验使用简易水路系统,冷水机型号选择朕大IC1850,简易水路装置原理图如图7所示,可实现水最大流量30 L/min,1.6 MPa水压,最大流量下最高温度为363 K。

根据沈阳航空发动机研究所提供数据信息,现在航空发动机油气比为1:5左右,普遍集中于200 g/s:1 000 g/s,实验验证中,可按比例变化。本实验流动换热实验台流量精准控制范围位于100~150 g/s之间,与水路流量配合选定,由实验台实验能力以及换热器在发动机外机匣情况,选中126 g/s作为空气质量流量,实验中保证水-空气质量流量比保持在0.2附近,选择两组流量参数,水侧进口温度不变,改变空气进口温度,共计8组实验,实验具体参数如表1所示。

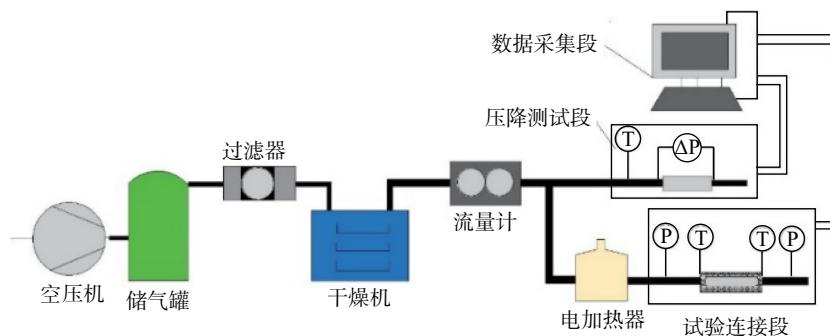


图6 空气路实验装置

Fig. 6 Air circuit experimental device

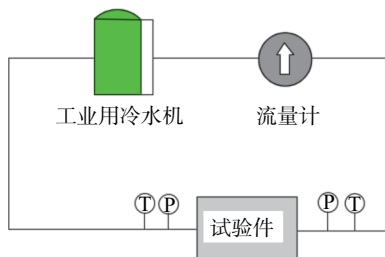


图 7 简易水路系统装置

Fig. 7 Simple waterway system device

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

质量流量/(g/s)	水侧温度/K	空气侧温度/K
水质量流量为 16.7, 空气质量流量为 84	289	363
		393
		423
		453
水质量流量为 25, 空气质量流量为 126	289	363
		393
		423
		453

实验中,直接测得的物理量有:水进出口的温度、压力、压差;水的流量;空气进出口的温度、压力、压差;空气流量,采用的测量装置具体参数如表 2 所示。

表 2 测量装置

Table 2 Measuring device

测量装置	品牌	型号	测量范围	精度
压力传感器	OMEGA	PX409-150AUSBH	0~1.03 MPa	±0.08%
流量计	美国 SIERRA	640S-NAA-L06-M0-EN2-P2-V4-DD-CRWE-0-SFC15.0525X		±0.5%
热电偶	沃施莱格	I 级精度的 K 型热电偶	273~1 573 K	±273.5 K
数据采集仪	安捷伦	34972A		

3 S 型泡沫金属管翅式换热器流动传热特性实验结果分析

3.1 温度及流量对换热器功率的影响规律

如图 8 所示, q_w 为水质量流量, q_a 为空气质量流量, 每组实验中的两种换热器水侧进出口温差均随着空气进口温度的增大而增大, 在同样温度及入口边界条件下, 泡沫金属管翅式换热器, 其

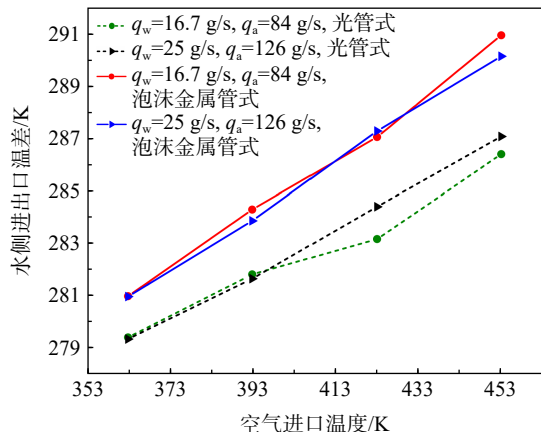


图 8 水侧进出口温差随空气进口温度的变化

Fig. 8 Temperature difference between the inlet and outlet of the water side changes with the temperature of the air inlet

水侧进出口温差明显大于不含泡沫金属的光管式换热器。这表明:泡沫金属管式换热器较光管式换热器具有更好的换热效果。

在相同的流量条件下,空气在换热器壳体内流动时充分在泡沫金属翅片的孔隙结构中流动,增大二次换热面积与扰动,破坏管外侧边界层的连续发展,增强换热;空气在 S 形排列的换热管外穿梭流动时,湍流扰动增强,减小管外热阻;流体在 S 型管内弯曲流动会产生离心力,使垂直主流方向产生二次环流,增强径向的壁面与主流之间的能量输运^[24]。

3.2 泡沫金属对换热器传热系数的影响

对于管壳式换热器,换热管两侧的传热面积不等,在换热器系列化标准中,传热面积均指换热管的外表面积,若 d_1 、 d_2 、 d_m 分别为管外径、内径和平均直径,可推导得换热器传热系数 K 的计算公式

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + R_a + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{d_1}{d_m} + R_b \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

式中 α_1 、 α_2 分别为换热管外和管内的对流传热系数; R_a 、 R_b 分别为管外侧和管内侧表面上的污垢热阻; δ 为管壁厚度, λ 为管壁材料的导热系数。

根据热阻计算公式^[25], 式(2)、式(3)所示,可得到管壁处热阻与对流传热热阻及水侧热阻。

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{\delta}{\lambda} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{0.023 \frac{\lambda_1}{d_2} Re^{0.8} Pr^{0.3}} \quad (3)$$

其中 λ_1 为流体导热系数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

本文泡沫金属材料选用 3D 打印的钛合金, 可查得其导热系数 λ 为 $24.26 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 则管壁热阻 $R_1 = 1/\alpha_1 = \delta/\lambda = 0.002/23.5 = 8.24 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, 即管壁热阻为 $8.241 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。

本文主要涉及湍流流动下的热传递问题, 且是无相变的管内湍流传热。实验值 $Re = 1 \times 10^5$, $Pr = 1.5$, 管内流体水的导热系数 $\lambda_1 = 4.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 则可算得水在管内对流传热系数 $\alpha_2 = 551968 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 而热阻 $1/\alpha_2 = 1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。

本文中实验件未产生污垢热阻, 故污垢热阻值为 $0 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。并且, 管壁热阻 $8.24 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, 在标准管壳式换热管壁导热热阻数量级范围 $10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 内, 而水侧热阻 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 则远小于标准管壳式换热器对流传热热阻 $10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。因此, 由以上数据可计算出各个工况下的换热器传热系数 K 。

滑油的导热系数为 $0.14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 普朗特数为 160, 则滑油在管内表面传热系数 $\alpha_2 = 73800 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 热阻 $1/\alpha_2 = 1.36 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, 标准管壳式换热器对流传热热阻数量级范围 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 内。因此, 本式对滑油也同样适用。

实验温度不在高温范围内, 不考虑辐射换热对整体换热效果的影响。泡沫金属侧的实际换热面积及翅片效率较难获得, 同时, 经计算水侧热阻和管壁处的热阻很小, 则换热器传热系数计算可采用式(4)。表面积选择一次换热面积值, 数据处理计算公式及参数选择在《传热学》^[26] 中均有提到。

$$K = \frac{\phi}{A\Delta T_m} \quad (4)$$

其中 A 为换热器一次换热面积, 0.00951731 m^2 , 实际换热量 ϕ 可从式(5)计算 Q 得出, ΔT_m 为对数平均温差, K 。

$$\phi = Q = c_{p,w} m \Delta T \quad (5)$$

$c_{p,w}$ 为水的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; m 为水的质量, kg ; ΔT 为水进出口温差, K 。

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (6)$$

$\Delta T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\min}$ 分别为换热器入口冷热流体温差和出口冷热流体温差两者中之大者和小者, 此

式在顺流、逆流中都适用。

如图9所示, 两种换热器在不同流量条件下, 换热器换热系数随温度的变化规律。如理论一样, K 值随温度的变化几乎没有很大影响, 而随着速度的增大而增大。

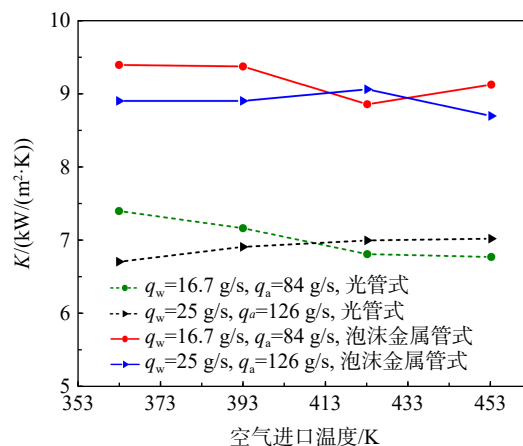


图9 换热器传热系数随空气进口温度的变化

Fig. 9 Heat transfer coefficient changes with the air inlet temperature

对于两种换热器, S型泡沫金属管翅式换热器的传热系数远远高于光管式换热器, 增大 43.94%, 说明: 泡沫金属翅片的存在可以明显增大换热器的传热系数, 最终提升换热器的换热能力。

泡沫金属的孔隙排布增大内部的比表面积和节点数目, 从而使单位体积内的换热面积增加并且节点的扰动增加。水与空气的换热性能相差较大, 且水的换热性能远大于空气, 在管外侧安装泡沫金属翅, 减小其内流动空气的换热热阻, 增大二次传热面积, 而水在管内流动仍然保持较小的换热热阻, 从而达到泡沫金属管翅式换热器整体增强传热的目的^[27]。

3.3 泡沫金属对压降及换热量的影响规律

如图10所示, 管式换热器在水质量流量为 25 g/s , 空气质量流量为 126 g/s , 空气进口温度 453 K 时的压降及换热量规律。泡沫金属管式换热器比光管式换热器的换热量增大 21.7%、压降增大 46.45%。其他几组数据, 均有同样的增大趋势, 换热量增大的同时, 压降也同样增大。

泡沫金属翅片的存在增加了换热量, 而压降的产生是多种因素的综合作用: 泡沫金属翅片的安装位置、角度、厚度以及自身的孔隙率、孔隙度等都会产生压降; 流体与壁面间的速度梯度、

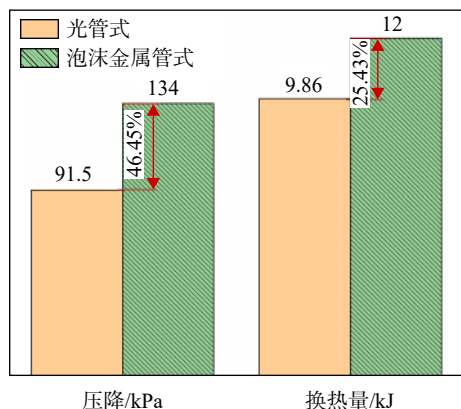


图 10 空气进口温度为 453 K, $q_w=25$ g/s, $q_a=126$ g/s, 两种管式换热器的压降与换热量的变化规律

Fig. 10 Air inlet temperature is 453 K, $q_w=25$ g/s, $q_a=126$ g/s, the pressure drop and heat exchange rate changes of the two tube heat exchangers

管内水螺旋流动时与壁面的摩擦、空气在壳体内的分流等,同时会产生流阻。

降低压降的方法有待进一步深入研究,但压降和换热量是评价换热器综合性能的两个重要指标,一个优异的换热器往往具有更低的压降以及更好的换热性能,较大的换热量往往是以增大压降牺牲来换取的^[28]。因此,换热器的整体性能提升效果,需要分析换热器综合性能及功率质量比提升幅度。

3.4 换热器的综合换热性能与功率质量比分析

换热器的性能由若干个参数组成,包括换热性能、流动性能、质量以及结构强度等,本文重点讨论泡沫金属侧即空气侧换热性能及流动性能。

在换热器整体换热中,参与换热、产生压降的流体主要在芯体中,壳体主要作用是封装芯体。因此,在计算换热器功率质量比时,采用芯体质量作为换热器质量进行功率质量比计算。

在评价换热器综合性能时,根据功耗和速度三次方成正比的关系,定性判断在泵固定条件下换热器的换热能力增加是否大于阻力增加。本文中的换热器压降较大,则需判断换热能力增加量是否大于压降增加量,因此,采用 $j/f^{1/3}$ 作为综合性能评价指标。

其中 j 因子表征无量纲表面的传热系数,科尔本对局部努塞尔数的公式进行了修正,提出了修正雷诺比拟,又称为 Chilton-Colburn 比拟, j 因子^[28]的表达式如式(7)所示:

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} \quad (7)$$

其中

$$Nu = \frac{hl}{v} \quad (8)$$

h 为空气侧换热系数; l 为特征长度, m; 可测量实验件得到。

$$Re = \frac{ul}{v} \quad (9)$$

u 为来流速度, m/s; v 为运动黏度, m^2/s 。

$$Pr = \frac{\mu c_{p,a}}{\lambda_a} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (10)$$

式中 μ 为动力黏度, $N \cdot s/m^2$; $c_{p,a}$ 为空气比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; λ_a 为空气导热系数, $W/(m \cdot K)$; α 代表热扩散率。

压降的大小是决定换热器换热性能的关键因素,以无量纲数的形式表征压降的大小可以解决不同换热器间压降损失的评价标准问题,选用 f 因子^[26]表示换热器单侧流体的压降程度,表达式如式(11)所示:

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{2d_h}{\rho u^2} \quad (11)$$

其中 ΔP 为流体压降, Pa, ΔL 为流动长度, m, ρ 为流体密度, kg/m^3 , μ 为流体的动力黏度, $N \cdot s/m^2$ 。 d_h 为水力直径,作为特征长度,物理意义是流道 4 倍的截面面积与湿周的比值

$$d_h = \frac{4A_c}{P_s} \quad (12)$$

式中 A_c 为槽道流动截面面积,即换热管横截面积, m^2 , P_s 为润湿周长,即槽道壁与流体接触面的长度, m。

两种换热器等泵功下的综合换热性能如图 11 所示,可以看出,含有泡沫金属换热器的空气侧综合换热性能要优于不含泡沫金属换热器,这表明:与光管式换热器相比较,泡沫金属作为换热器翅片,压降损失所换来的强化换热效果较为显著,换热器整体换热性能得到增强。

如图 12 所示,两种换热器在温度分别为 423、453 K,水质量流量 25 g/s,空气质量流量 126 g/s 时,单位质量功率的对比。在 $T=423$ K 时,功率提升 17.26%, $T=453$ K 时,提升 6.73%。可以看出:不同温度下,泡沫金属管翅式换热器单位质量功率相较于光管式换热器单位质量功率均有提升,对换热器的优化设计得到很好的效果。

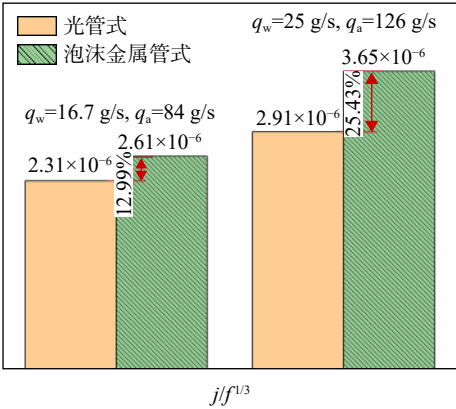


图 11 不同换热器等泵功下综合换热性能对比
Fig. 11 Comparison of comprehensive heat transfer performance under different heat exchangers and other pump power

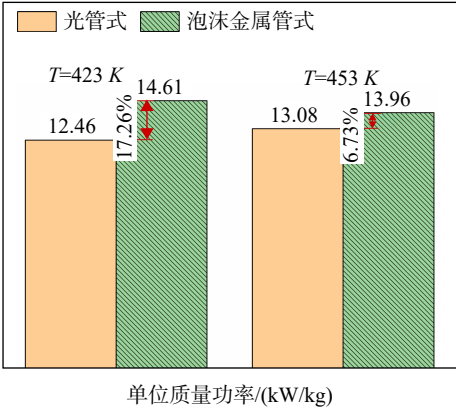


图 12 不同换热器单位质量功率对比
Fig. 12 Comparison of unit mass power of different heat exchangers

3.5 S 型泡沫金属管壳式换热器与相似换热器性能对比分析

航空发动机冷却系统换热器正处于研发阶段,并没有一个标准的具体指标,而传统换热器性能指标又不适用于航空发动机。但可以根据各个冷却技术所需换热器的特性,以此来设计换热器的极限工作环境以及工况。在《临近空间飞行器推进系统预冷器关键技术》^[29]文献中提到航空发动机中换热器的几种典型应用形式,以及各类换热器的极限工作环境,如表 3、表 4 所示。

本文的研究背景是在 CCA(cooled cooling air)技术的基础上,在航空发动机外涵道出安装换热器,改善来流空气的品质,对换热部件进行冷却,对热防护系统起到降温、保护的作用,进而提升航空发动的性能。

表 3 各类换热器极限工作环境
Table 3 Limit operating condition of different heat exchangers

换热器类型	最大压力/MPa	最大温度/K	效率/%
板式	4	673	>85
板翅式	12	923	>90
螺旋式	3	673	>90
管翅式	20	473	>90
管式(正常)	3.1	1 023	>85
管式(微翅)	10	1 003	>95
微通道式	50	1 273	>97

表 4 各类换热器所需设计特性
Table 4 Design requirements of different heat exchangers

特性	回热器	间冷器	CCA
传热系数	很高	很高	高
质量流量	很高	很高	高
传热效率	很高	中	低
操作压力	高	中	非常高
工作温度	高	中	非常高
传热温差	高	中	低
适合形式	管式、一次表面	管翅式、一次表面	管式

文中第 3.1 节~第 3.4 节对 S 型泡沫金属管式换热器流动传热特性分析可知,含有泡沫金属的管翅式换热器,其综合性能大幅度提升,符合 CCA 技术的设计特性。如表 5 所示,各个研究机构及高校针对航空发动机换热器所做的创新性研究,表中展示了 3D 打印换热器、紧凑型换热器、泡沫金属多孔介质翅片圆管和通道的实验工况以及换热指标。可以看出,本研究显而易见的性能提升效果,在类似工况条件下,热侧空气的换热系数较高,换热器的功率质量比以及换热量与其他类型的换热器以及通道相比较,都具有明显的优势。

如图 13 所示,在相似流量条件下,不同换热器的传热系数对比,S 型泡沫金属的 K 值远大于其他类型的换热器以及多孔介质通道,表明本文的开尔文胞体结构泡沫金属替代换热器的金翅片,对其换热效率提升效果非常有益。总体来讲,本文对于航空发动机 CCA 技术中轻质、高效的小尺寸换热器所做的研究,是值得借鉴的。

表 5 各类航发换热器工况及换热性能对比

Table 5 Comparison of working conditions and heat tasfer performance of various aviation heat exchangers

换热器类型	体积参数/ mm	冷-热 侧介质	热侧进口 温度/K	热侧进口 压力/MPa	热侧质量流量/ (kg/s)	热侧进出口 温差/K	表面传热 系数/(W/(m ² ·K))	换热性能 评价指标
3D 打印 S 型泡沫 金属管壳换热器	59×52×51	水-空气	363~453	0.3	0.126	286~300	950	功率质量比 14.61 kW/kg
3D 打印类多孔 换热器	460×400×500	水-空气	343	0.1	20 m/s	303	500~800	换热量 200~500 kW
3D 打印一次 表面换热器	74×54×100	空气-空气	333~373	0.34~1.4	0.008~0.02	363	200~550	换热能效 0.5~0.8
螺旋管紧凑式 换热器	370×276×138	空气-空气	833	0.24	0.05	461	122~336	功率质量比 4.9 kW/kg
细管蛇形管紧 凑式换热器	291×60×80	燃油-空气	433	1	0.10~0.18	588.42	360	功率质量比 15.48 kW/kg
堆积泡沫金属翅片	101×18×5	水-空气	273~333	5×10 ⁻⁴	0.000 5~0.002	288~323	300~500	
填充多孔介质 环形冷却通道	40×1×50	冷却剂-空气	<473	0.14~1.68	30~150	283~319	20	

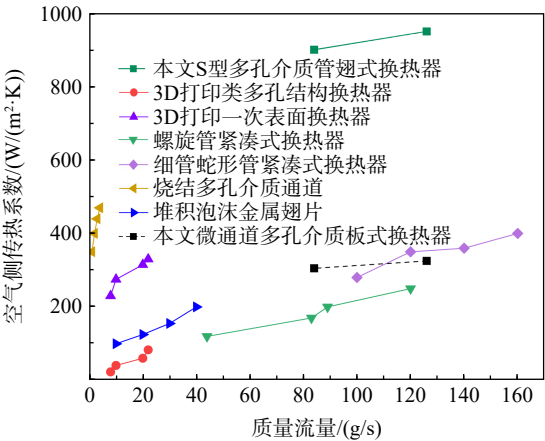


图 13 相似质量流量条件,不同换热器空气侧传热系数
Fig. 13 Different heat exchangers air-side heat transfer coefficients under similar mass flow condition

4 结 论

本文模拟航空发动机机匣外部的空-油换热器,采用泡沫金属取代传统管翅式换热器翅片结构,设计一种轻质、高效、紧凑的小尺寸 S 型泡沫金属管翅式换热器。在不同工况条件下,进行流动传热特性分析实验,得出以下结论:

- 1) 在同等入口边界条件下,泡沫金属管翅式换热器其水侧进出口温差明显大于不含泡沫金属的光管式换热器,并且换热器的传热系数明显增大,达到 43.94%: 表明泡沫金属管翅式换热器相对于光管式,换热器换热效率显著提升。
- 2) 泡沫金属翅片在换热管上的安装位置、角度、厚度以及泡沫金属自身的物理性质会影响换热器压降的大小,相关研究值得进一步深入讨论

与分析,使本研究中换热器达到更高的综合换热性能。

3) 在两种质量流量的工况条件下,虽然压降的增大幅度为其换热量增大幅度的两倍左右,但泡沫金属管翅式换热器的综合换热性能以及功率质量比都要明显优于光管式换热器。其中 $jf^{1/3}$ 可提升 25.43%,功率质量比可达 14.61 kW/kg。这说明:将泡沫金属替代管翅式换热器的传统翅片,能够增大换热器整体换热性能,对传统管翅式换热器的改进效果显而易见。

4) 在相似流量条件下,S 型泡沫金属换热器的传热系数远大于其他类型的换热器以及多孔介质通道,表明将泡沫金属轻质、比表面积大、孔隙率高和孔隙尺度小等优点运用在管翅式换热器中,有利于解决传统换热器体积大、质量高等不适用于航空发动机冷却器的缺陷,从而为航空发动机热管理问题提供解决方案。

参考文献:

[1] 史美中,王中铮.热交换器原理与设计 [M]. 南京:东南大学出版社,2014.

[2] SAIDI A, SUNDÉN B, ERIKSSON D. Intercoolers in gas turbine systems and combi-processes for production of electricity[C]//Proceedings of the Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. Munich: ASME Turbo Expo, 2000, 11-15.

[3] YOSHIDA T. Cooling systems for ultra-high temperature turbines [J]. Heat Transfer in Gas Turbin Systems, 2010, 934: 194-205.

[4] PAPDOPOULOS T, PILIDIS P. Introduction of intercooling in a high bypass jet engine[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. Munich: ASME Turbo Expo, 2000: 115-117.

[5] 于霄,吕多,李洪莲,等.空气冷却器在航空发动机上的应用及流动传热试验分析技术研究[J]. 计测技术, 2017, 37(3):

- 34-38.
- YU Xiao, LÜ Duo, LI Honglian, et al. Application of air cooler in aero-engine and research on flow and heat transfer test analysis technology[J]. Measurement Technology, 2017, 37(3): 34-38. (in Chinese)
- [6] MIN J K, JI H J, MAN Y H, et al. High temperature heat exchanger studies for applications to gas turbines[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 46(2): 175-186.
- [7] 张涛, 孙冰. 某探测器上火箭发动机热防护仿真与设计[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1407-1411.
- ZHANG Tao, SUN Bing. Simulation and design of thermal protection for a rocket engine on a probe[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1407-1411. (in Chinese)
- [8] 于喜奎. 高超声速飞机热管理系统控制模型构建与仿真[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 741-751.
- YU Xikui. Construction and simulation of control model for thermal management system of hypersonic aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 741-751. (in Chinese)
- [9] BHATTACHARYA A, CALMIDI V V, MAHAJAN R L, et al. Thermophysical properties of high porosity metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031.
- [10] SUN Mingrui, HU Chengzhi, ZHANG Lunxiang, et al. Pore-scale simulation of forced convection heat transfer under turbulent conditions in open-cell metal foam [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389: 124427.1-124427.11.
- [11] SUN M, LI M, HU C, et al. Comparison of forced convective heat transfer between pillar and real foam structure under high Reynolds number[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116-130.
- [12] SUN Mingrui, YANG Lei, HU Chengzhi, et al. Simulation of forced convective heat transfer in Kelvin cells with optimized skeletons[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 165: 120637.1-120637.11.
- [13] ZHAO Jiafei, SUN Mingrui, ZHANG Lunxiang, et al. Forced convection heat transfer in porous structure: effect of morphology on pressure drop and heat transfer coefficient[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30: 363-393.
- [14] HU Chengzhi, SUN Mingrui, XIE Zhiyong, et al. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115845.1-115845.12.
- [15] RASHIDI S, TAMAYOL A, VALIPOUR M S, et al. Fluid flow and forced convection heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous ring[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2013, 63: 91-100.
- [16] 孙硕. 填充泡沫金属换热管内含油制冷剂流动沸腾换热与压降特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- SUN Shuo. Research on flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics of oil-bearing refrigerant in filled foamed metal heat exchange tube[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [17] HUISSEUNE H, DE SCHAMPHELEIRE S, AMEEL B, et al. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 1-9.
- [18] MAO S, LOVE N, LEANOS A, et al. Correlation studies of hydrodynamics and heat transfer in metal foam heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 104-108.
- [19] DAI Z, NAWAZ K, PARK Y, et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(1/2/3): 21-30.
- [20] 于霄, 吕多, 赵孟, 等. 3D打印技术在航空发动机换热器研制中的应用展望[J]. 航空制造技术, 2014, 466(22): 43-46.
- YU Xiao, LÜ Duo, ZHAO Meng, et al. Application prospect of 3D printing technology in the development of aero-engine heat exchanger[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014, 466(22): 43-46. (in Chinese)
- [21] 任勇翔, 于霄, 张筱喆, 等. 类多孔结构超轻高效换热器流动传热特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 449-455.
- REN Yongxiang, YU Xiao, ZHANG Xiaozhe, et al. Research on flow and heat transfer characteristics of ultra-light and high-efficiency heat exchanger with similar porous structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(4): 449-455. (in Chinese)
- [22] 李俊, 蒋彦龙, 周年勇. 交叉式多股流板翅式换热器数值研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1087-1096.
- LI Jun, JIANG Yanlong, ZHOU Nianrong. Numerical study of cross-flow plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1087-1096. (in Chinese)
- [23] MOHAMMADPOUR-GHADIKOLAIE M, SAFFAR-AVVAL M, MANSOORI Z, et al. Heat transfer investigation of a tube partially wrapped by metal porous layer as a potential novel tube for air cooled heat exchangers[J]. Journal of Heat Transfer, 2019, 141(1): 011802.1-011802.12.
- [24] 刘银龙, 付衍琛, 闻洁, 等. 螺旋管式空气-空气换热器的设计和实验研究[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集. 昆明: 推进技术, 2019, 25-28.
- [25] 曾全生. 换热器热阻分析[J]. 化工设计, 1998, 23: 31-35.
- ZENG Quansheng. Thermal resistance analysis of heat exchanger[J]. Chemical Engineering Design, 1998, 23: 31-35. (in Chinese)
- [26] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [27] 周飏. 管翅式换热器性能及结构综合优化的热设计方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- ZHOU Biao. Thermal design method for comprehensive optimization of performance and structure of tube-fin heat exchanger[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [28] 何雅玲, 陶文铨, 王煜, 等. 换热设备综合评价指标的研究进展[M]. 西安: 中国工程热物理学会(传热传质学), 2011.
- [29] 吕多, 陆海鹰, 周建军, 等. 临近空间飞行器推进系统预冷器关键技术[J]. 航空学报, 2016, 31(增刊): 119-126.
- LÜ Duo, LU Haiying, ZHOU Jianjun, et al. Key technology of pre-cooler for propulsion system of near-space vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 31(Suppl.): 119-126. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)