

复合印刷电路板式预冷器的热力设计与优化

徐东君¹, 廉洁¹, 南向谊², 马元², 王秋旺¹, 马挺¹

(1. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:空气预冷器作为预冷组合循环发动机的关键部件之一,能够在极短的时间内对来流的高温空气进行冷却,预冷器的性能对预冷组合循环发动机的运行性能具有重要影响。因此,研制耐高温高压、高效紧凑且轻质的预冷器对预冷组合循环发动机的工程应用具有重要意义。针对一种复合印刷电路板预冷器,在 5 Ma 飞行工况和换热功率为 422 MW 时对其展开热力设计,并结合遗传算法对复合印刷电路板换热器进行结构优化。计算结果表明,优化后的复合印刷电路板换热器的体积功率比传统印刷电路板换热器的体积功率提高了 93% ,比毛细管预冷器的体积功率提高了 243% 。

关键词:预冷发动机;预冷器;复合印刷电路板式换热器;分段热力设计方法;遗传算法

中图分类号:V236 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)06-0059-10

Thermal design and optimization of hybrid printed circuit precooler

XU Dongjun¹, LIAN Jie¹, NAN Xiangyi², MA Yuan², WANG Qiuwang¹, MA Ting¹

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: As one of the key components in the precooling combined engine, the air precooler can cool the incoming high-temperature air at a very short time. The performance of the precooler has significant effect on the operating performance of the precooling engine. Therefore, the development of high temperature and high pressure resistant, efficient, compact and lightweight precooler is of great significance for the engineering application of the precooled engine. In this paper, a hybrid printed circuit heat exchanger is proposed. Under the operating condition at Mach 5 and the heat transfer rate of 422 MW , the thermal design is carried out, and the structure of the hybrid printed circuit heat exchanger is optimized combined with Genetic Algorithm. The calculation results show that the volume power of the optimized hybrid printed circuit heat exchanger is increased by 93% compared with that of the conventional printed circuit heat exchanger, and is increased by 243% compared with capillary tube precooler.

Keywords: precooling combined engine; precooler; hybrid printed circuit heat exchanger; segmented thermal design method; genetic algorithm

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2021-09-11

基金项目:国家自然科学基金(52022080)

作者简介:徐东君(1997—),男,博士研究生,研究领域为高温高压传热与强化。

通信作者:马挺(1985—),男,博士,教授,研究领域为高温高压传热与强化。

0 引言

随着人类社会逐渐向信息化和智能化方向的快速发展,世界各国也都越来越重视对空天领域的探索。相较于传统的航空发动机,预冷组合循环发动机以其优越的综合性能被认为是目前最具应用前景的推进系统之一,能够在临近空间内实现 5 Ma 的高超声速飞行^[1-2]。作为预冷组合循环发动机的关键部件,先进的高性能预冷器是研制预冷组合循环发动机的关键。对于英国的 SABRE 发动机而言,如图 1 所示^[3],在马赫数为 5 的飞行条件下,预冷器需要将质量流量为 400 kg/s 的高温空气在 0.01 s 的时间内从 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷却到 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热功率能够高达 400 MW ^[4]。

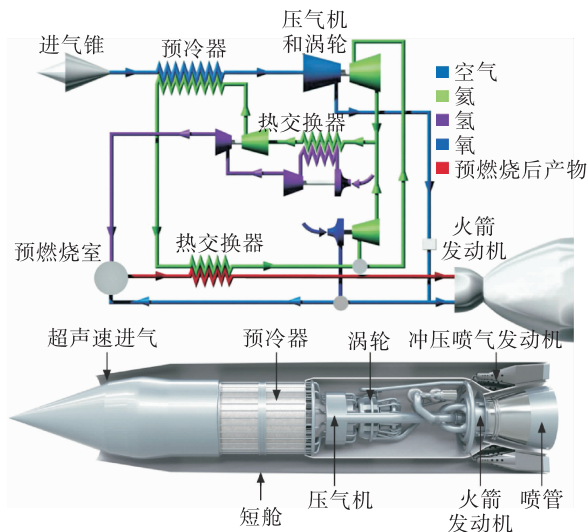


图 1 佩刀发动机系统原理图

Fig. 1 Schematic of SABRE system

常用的换热器结构形式主要包括管壳式、管翅式、板式以及微细通道等形式。相较于传统的换热器,印刷电路板换热器的结构更加紧凑、换热效率更高、质量更轻,在高温高压及空间受限的环境中具有很好的适用性^[5-6]。印刷电路板换热器主要应用于高温气冷堆、超临界二氧化碳布雷顿循环系统等。近年来,国内外学者对于印刷电路板换热器在流动换热性能方面进行了大量的研究。Pidaparti 等通过实验方法对非连续型印刷电路板换热器在超临界二氧化碳循环中的流动传热特性进行了研究,分别拟合了摩擦阻力系数 f 和努塞尔数 Nu 的计算

关联式^[7]。Shin 等分别通过实验和数值模拟的方法对流动工质为气液两相氮的印刷电路板换热器的热工水力特性进行了研究^[8]。Marchionni 等通过数值模拟的方法对印刷电路板换热器在超临界二氧化碳系统进行瞬态分析,从而能够进一步评测其在整体传热性能方面的潜力和局限性^[9]。Kim 等通过改变工质的入口温度及压力,对 $350 < Re < 1\,200$ 层流区域中的印刷电路板换热器进行了热工水力分析^[10]。Baek 等研究了轴向导热对印刷电路板换热器效率的影响,通过减小通道之间的导热固体厚度,降低轴向导热效应,从而改善了换热效率^[11]。Saeed 等研究了 Z 字型印刷电路板换热器的热工水力特性,并拟合了超临界二氧化碳和水作为换热工质时的流动传热经验关联式^[12]。Aneesh 等通过数值模拟的方法对印刷电路板换热器进行简化建模,并和文献结果进行了验证^[13]。为了进一步提高印刷电路板换热器的流动传热性能,Cui 等对 NA-CA0020 翼型结构进行了数值研究^[14]。Baik 等通过数值模拟的方法研究了波纹通道结构的印刷电路板换热器,分析了通道幅度和周期对传热性能的影响^[15]。Aneesh 等研究了 3 种不同波纹通道结构印刷电路板换热器的流动传热特性,结果表明梯形波纹通道的传热性能最好^[16]。Saeed 等通过区域优化的方法,在不降低计算准确性的情况下缩短印刷电路板换热器的优化时间,进一步将优化结果用于评估印刷电路板换热器的热工水力特性^[17]。Yang 等对窄截面波纹通道印刷电路板换热器传热特性的影响进行了研究^[18]。

然而,国内外尚未见到将印刷电路板换热器应用于预冷器的公开报道,开展印刷电路板换热器在极端工况条件下的流动传热及强度特性研究,对于将其用作预冷器具有重要的指导意义。

1 复合印刷电路板换热器的热力设计及优化方法

预冷器作为预冷循环系统中的重要部件,通过将来流的高温空气冷却后输送到压气机中,可以有效地提高压气机的压缩效率,从而进一步提升预冷组合循环发动机的性能。由于预冷循环系统的空间有限,因此如何能够使预冷器在受限的空间中正常工作,并且尽可能减小其体积和质量,对于整个

系统的优化设计至关重要。对于特定的预冷循环工况而言,通过传统的手段来增大传热温差的方法就不适用了。为此,本团队提出了一种新型的复合印刷电路板换热器,其在结构设计上分别采用微细圆孔流道和平直翅片的结构形式。对于预冷器的设计工况而言,微细通道的圆孔流道适合高压小流量的工质,而平直翅片流道则适合低压大流量的工质,从而能够在强化传热的基础上使换热芯体结构更加紧凑。通过引入遗传算法,可以进一步对特定的目标函数如换热芯体的体积、质量等进行优化设计,从而满足其在实际应用场合的使用。

1.1 复合印刷电路板换热器的结构设计

目前,国内外常用的印刷电路板换热器芯体冷热两侧均采用半圆形的流道,通过逆流的方式进行热量交换。但是由于化学蚀刻工艺的限制以及结构强度等要求,冷、热两侧的半圆形流动通道不能太小,板不能太薄,且相邻通道之间的突起支撑结构不能太细,这就会使得印刷电路板换热器的质量往往偏大。对于高超声速飞行器而言,预冷器的质量是衡量其性能的一个重要指标,质量过大不仅会对飞行器的性能产生影响,还会增加额外的功耗。因此,有必要对印刷电路板换热器的结构进行改良,使其能够在保持原有优势的基础上进一步实现减重。

复合印刷电路板换热器是在印刷电路板换热器基础之上发展出来的,而预冷器的实际使用工况通常一侧为高压小流量的工质,而另一侧为低压大流量的工质。通过将圆形微细通道和板翅通道相结合形成的复合换热通道可以很好地适用于这一工况,换热器芯体结构如图2所示。由于圆形微细通道具有较强的承压能力,因此采用微细通道的结构形式与超薄翅片进行组合,在提高其结构强度可靠性的基础上能够大幅度地减轻其质量,使得复合印刷电路板换热器可以在满足换热要求的情况下,相较于传统的印刷电路板换热器更加轻质高效,更适用于预冷组合循环发动机中。

高温空气通过平直翅片通道直接流进流出,高温空气侧的板片结构如图3所示。低温氦气侧则采用侧进侧出的流动方式,分为入口段、逆流换热段及出口段,入口段与逆流段相连的流道采用一个大

尺寸流道对应多个小尺寸流道的布置方式,来改善流量分配的不均匀性,出口段与逆流段相连的部分也采用同样的布置方式,低温氦气侧的板片结构如图4所示。冷侧工质入口段与出口段分别通过封头装置进行流量的汇集。冷热侧的通道采用微细通道的结构形式,并采用薄壁结构的板材,使换热器整体更加轻质。相较于传统的真空扩散焊及化学蚀刻等工艺,3D打印技术可以对复杂结构进行加工,具有更高的精度和灵活性,因此有望应用于该结构的制造。

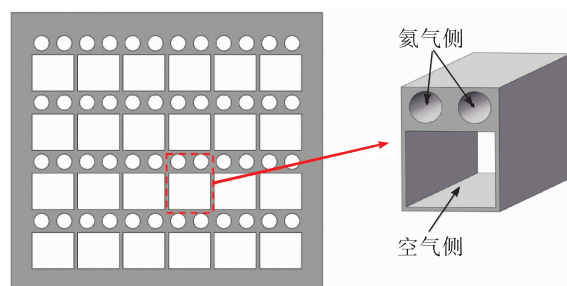


图2 复合印刷电路板换热器芯体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hybrid printed circuit heat exchanger core



图3 高温空气侧换热板结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heat transfer plate used for high temperature air

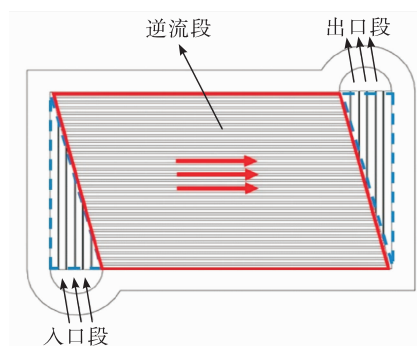


图4 低温氦气侧换热板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heat transfer plate used for low temperature helium

参照 SABRE 发动机中预冷器的结构,为了能够复合印刷电路板换热器更合理地应用到预冷组合循环发动机上,可以将整个换热芯体结构通过模块化的方法分成多个换热单元进行布局,其模块化设计方案如图 5 所示。氦气侧的总流量通过环形管道均匀地分配到每个换热单元模块中,经过热交换后的氦气再通过下一个环形集气管道流向下一阶段。而空气侧则采用直进直出的流动方式,一方面能够尽可能减小压力损失,另一方面经过每个换热单元模块进行冷却后的高温空气可以直接流入压气机中。该结构相对于传统的板式换热器结构,更适合应用在预冷循环系统的腔体之中,能够更加合理地优化利用预冷循环系统的空间。

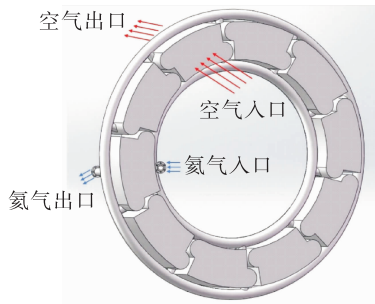


图 5 基于复合印刷电路板换热器的预冷器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of precooler based on hybrid printed circuit heat exchangers

1.2 复合印刷电路板换热器的分段热力设计方法

对于预冷器的设计工况而言,氦气在超临界点附近的物性参数会发生剧烈变化,而高温高速空气从 1 000 °C 高温被低温氦气冷却至 0 °C 以下,空气物性也随之发生剧烈变化。因此,在预冷器的热力设计过程中,不能将氦气和空气物性参数作为常数来考虑。采用了分段式热力设计方法,按照低温氦气侧的温差进行分段设计,尽量减小每一段的温度变化,从而能够减小因流体物性变化所造成的设计误差。本文参考 SABRE3 预冷器的工作条件开展热力设计,设计工况如表 1 所示^[19-20]。

表 1 SABRE-3 预冷器的设计工况参数

Tab. 1 Design parameters of SABRE-3 precooler

参数		值
空气侧	质量流量/(kg · s ⁻¹)	366
	入口温度/K	1 200
	出口温度/K	133
	入口压力/MPa	0.18
	允许压损/%	30
氦气侧	质量流量/(kg · s ⁻¹)	95
	入口温度/K	94.08
	出口温度/K	950
	入口压力/MPa	19.2
	允许压损/%	5
换热量	热功率/MW	422

1.2.1 分段热力设计方法及传热阻力经验关联式

采用分段热力设计方法计算复合型印刷电路板换热器的换热和阻力特性时,根据氦气的进出口温度差对换热芯体单元进行分段处理,由于每一段的温差很小,工质在小温差范围内的物性变化不大,因此可以将氦气的物性参数近似为常数来计算,取每段进出口的平均温度来作为其定性温度。由均分低温氦气的温差来计算每段的换热量,从而确定空气侧每段的出口温度。将每一段的出口温度和压力作为下一步计算的入口条件,并且分别计算出每段的局部传热系数、换热量以及压降。最后,当换热量达到额定换热量时计算终止。本文所采用的设计方法流程如图 6 所示。

以逆流为例,考虑到氦气物性的变化,按照预冷器氦气进出口温度的温差,将复合印刷电路板换热器划分为 N 段,按照每段的进出口进行节点的划分,则一共有 $N+1$ 个节点,如图 7 所示。对于节点 i 而言,空气进出口温度分别为 $T_{h,i+1}$ 和 $T_{h,i}$,氦气的进出口温度为 $T_{c,i}$ 和 $T_{c,i+1}$ 。

假设每一段高温空气所释放的热量全部被低温氦气所吸收,则每一段的换热量 Q_i 存在如下关系

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{K_i \Delta T_{m,i}} \quad (1)$$

式中: A 为总换热面积, m²; A_i 为第 i 段的换热面积, m²; $\Delta T_{m,i}$ 为第 i 段的对数平均温差, K; K_i 为第 i 段

的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

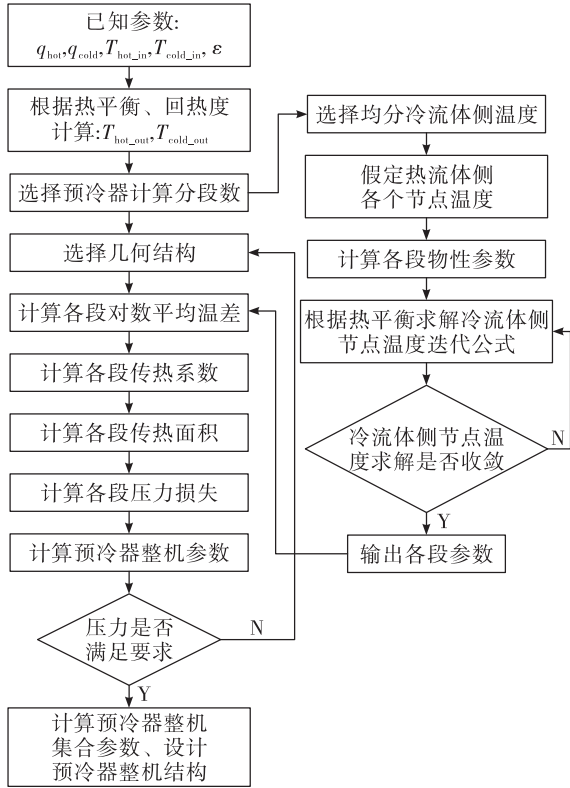


图6 预冷器分段热力设计流程图

Fig. 6 Flow chart of pre-cooler's segmented thermal design

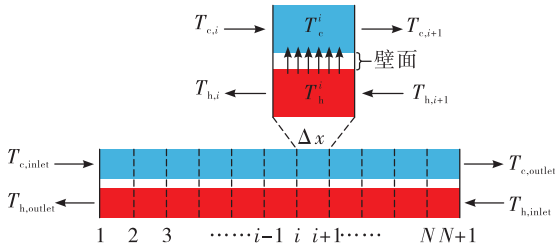


图7 分段热力设计方法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of segmented thermal design method

$$Nu = \frac{(f_d/8)(Re - 1000)Pr}{1.07 + (900/Re) - [0.63/(1 + 10Pr)] + 12.7(f_d/8)1/2(Pr^{2/3} - 1)}$$

$$f_d = (1.82 \lg Re - 1.64) - 2 \quad (7)$$

式中: Nu 为努塞尔数; f_d 为达西阻力系数; Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数。

高温空气侧板翅通道所采用的传热和阻力关联式如下^[22]

$$\ln j = 0.103109 (\ln Re)^2 - 1.91091 (\ln Re) + 3.211$$

$$\ln f = 0.106566 (\ln Re)^2 - 2.12158 (\ln Re) + 5.82505 \quad (8)$$

$$Q_i = q_{m,h}(H_{h,i+1} - H_{h,i}) = q_{m,c}(H_{c,i+1} - H_{c,i}) \quad (2)$$

式中: Q_i 为第 i 段的换热量, W ; $q_{m,h}$ 为热侧的质量流量, kg/s ; $H_{h,i+1}$ 为第 i 段热侧进口的比焓值, J/kg ; $H_{h,i}$ 为第 i 段热侧出口的比焓值, J/kg ; $q_{m,c}$ 为冷侧的质量流量, kg/s ; $H_{c,i}$ 为第 i 段冷侧进口的比焓值, J/kg ; $H_{c,i+1}$ 为第 i 段冷侧出口的比焓值, J/kg 。

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (3)$$

式中: ΔT_{\max} 为最大换热温差, K ; ΔT_{\min} 为最小换热温差, K 。

$$\frac{1}{K_i A_i} = \frac{1}{h_{h,i} A_{h,i}} + \frac{\Delta d_i}{\lambda_{w,i} A_{w,i}} + \frac{1}{h_{c,i} A_{c,i}} \quad (4)$$

式中: $h_{h,i}$ 为第 i 段热侧的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $A_{h,i}$ 为第 i 段热侧的换热面积, m^2 ; Δd_i 为第 i 段冷热通道壁厚, m ; $\lambda_{w,i}$ 为第 i 段固体材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; $A_{w,i}$ 为第 i 段的导热面积, m^2 ; $h_{c,i}$ 为第 i 段冷侧的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $A_{c,i}$ 为第 i 段冷侧的换热面积, m^2 。

$$h = \frac{Nu \lambda}{D_h} \quad (5)$$

式中: λ 为流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$; D_h 为水力直径, m 。

低温氦气侧印刷电路板通道采用 Adams 等基于 Gnielinski 关系式提出的修正传热关联式^[21], 如下:

当 $Re < 2300$ 时

$$Nu = 4.089$$

$$f_d = 4 \times 15.767/Re \quad (6)$$

当 $Re \geq 2300$ 时

式中: f 为范宁阻力系数; j 为传热因子, 适用范围为 $400 < Re < 10000$ 。

预冷器芯体两侧的阻力损失为

$$\Delta p_{\text{core}} = f_d \frac{l}{D_h} \frac{u^2 \rho}{2} \quad (9)$$

式中: l 为通道长度, m ; u 为流体流速, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

1.2.2 分段热力设计的无关性考核

为了能够有效地保证分段热力设计结果的准确性,同时节省计算所需的资源,选择合适的分段数对于分段热力设计至关重要。对于复合型印刷电路板换热器的分段热力设计而言,不同的分段数对换热芯体的长度有着显著的影响,当分段数为100时,换热器芯体的长度基本趋于稳定,如图8所示。因此在本文的热力设计中,选取100段来作为分段热力设计的段数。

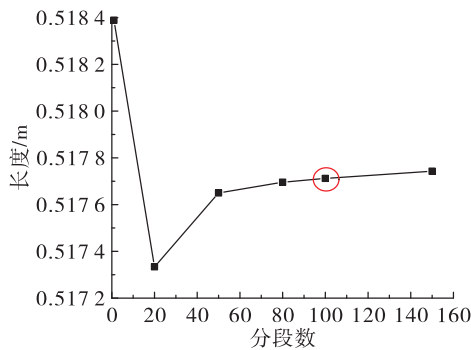


图8 分段数与芯体长度的关系
Fig.8 Relationship between the number of segments and the length of the core

结合前文所提到的 SABRE 预冷器的设计工况,对单模块复合印刷电路板换热器的结构参数进行热力设计,使其能够满足所需换热量及冷热侧压力损失的要求,结构参数如表2所示,芯体单元几何结构如图9所示。

表2 复合印刷电路板换热器单模块的热力设计结果
Tab.2 Thermal design results of single module in hybrid printed circuit heat exchanger

结构参数	数值
空气侧翅片间距 l/mm	0.5
空气侧翅片高度 h/mm	5.0
空气侧翅片厚度 δ/mm	0.1
空气侧通道总数 m_h	340 000
氮气侧通道直径 d/mm	0.2
氮气侧相邻通道截距 l_p/mm	0.3
氮气侧板厚 δ_p/mm	0.6
氮气侧总通道数 m_c	170 000

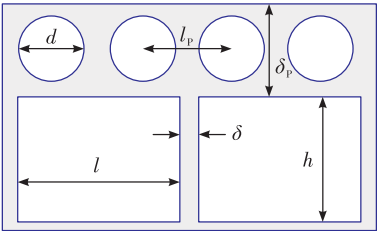


图9 芯体几何结构示意图
Fig.9 Schematic diagram of core geometry

1.3 复合印刷电路板换热器的优化设计方法

为了对复合印刷电路板换热器的性能参数进一步优化,编写了基于遗传算法的热力优化设计程序。通过对换热器的设计变量、约束条件以及目标函数3大内容的确定,从而能够建立优化求解问题的数学模型。通过分析可知,复合印刷电路板换热器的独立变量包括氮气侧通道直径 d 、空气侧翅片间距 l 、翅片高度 h 、翅片厚度 δ 、冷通道数 m_c 以及热通道数 m_h 。在复合印刷电路板换热器的优化设计过程中,还需要给定各种约束条件,主要包括结构约束条件和运行约束条件,均为非线性约束。将这6个独立变量作为优化设计参数,其几何结构的约束条件如表3所示。

表3 几何结构的约束条件
Tab.3 Geometric constraints

参数	变化范围	精度
翅片间距/mm	1 ~ 5	0.01
翅片厚度/mm	0.1 ~ 1	0.01
翅片高度/mm	1 ~ 5	0.01
通道直径/mm	0.1 ~ 2	0.01
热侧通道数量 m_h	10 000 ~ 10 000 000	1
冷侧通道数量 m_c	10 000 ~ 10 000 000	1

复合印刷电路板换热器在设计工况下运行时,高温空气和低温氮气在进行热量交换时会产生一定的阻力损失,而预冷器对空气侧和氮气侧的阻力损失有着非常严格的要求。因此,空气侧和氮气侧的总压损失系数必须低于相关设计要求,并将其作为运行约束条件来进行优化,有

$$\sigma_h = \frac{\Delta p_h}{p_h} < 0.3 \tag{10}$$

式中: σ_h 为空气侧总压损失系数; Δp_h 为空气侧压

降,MPa; p_h 为空气侧运行压力,MPa。

$$\sigma_c = \frac{\Delta p_c}{p_c} < 0.05$$

(11)

式中 σ_c 为氦气侧总压损失系数。

在满足相应运行工况条件的前提下,将复合印刷电路板换热器的体积作为目标函数。复合印刷电路板换热器的传热过程主要通过平直翅片通道与圆形微细通道之间冷热流体的对流换热来完成,所以翅片的几何结构尺寸是影响复合印刷电路板换热器传热和阻力性能的重要因素。目标函数表示为

$$V = f(S, t, H, d, m_c, m_h)$$

(12)

式中 V 为换热器芯体体积, m^3 。

在遗传算法中,适应度函数一方面反映了个体对于环境的适应能力,另一方面也能优化出适应度最高的个体。本文的最优化过程是基于约束条件下的全局最小值问题的求解,为了能够减小计算成本同时获得较高的计算精度,种群数大小 M 取 200,终止代数 T 取 500。

2 复合印刷电路板换热器优化设计

结果及讨论

采用上述热力优化设计程序,对单模块复合印刷电路板换热器进行优化设计,单模块的结构参数优化前后结果对比如表 4 所示,优化后氦气侧的通道直径为 0.15 mm,板厚为 0.23 mm,空气侧翅片间距为 0.36 mm,高度为 1.5 mm,板厚为 0.1 mm。在单模块换热器满足换热量及相应压力损失的情况下,优化后的紧凑度可达 $5\,904\text{ m}^2/\text{m}^3$,相较于优化前提高了 64.2%。

复合印刷电路板换热器与传统印刷电路板换

热器及 SABRE 所采用的毛细管预冷器的性能对比如表 5 所示,优化前的复合印刷电路板换热器与传统印刷电路板换热器的体积基本相同,而质量大幅减小。在体积功率方面,传统印刷电路板换热器和优化前的复合型印刷电路板换热器相较于毛细管预冷器提高近 80%,优化后的复合型印刷电路板换热器相较于传统印刷电路板换热器提高了 93%,相较于毛细管预冷器则提高了 243%。在紧凑度方面,传统印刷电路板换热器和优化前的复合型印刷电路板换热器相差不大,优化前的复合印刷电路板换热器相较于 SABRE 预冷器提高了 177.7%,而优化后则提高了 356%。在质量功率方面,传统印刷电路板换热器的质量最大,质量功率最小,毛细管的质量最小,质量功率最大,优化前的复合型印刷电路板换热器仅为毛细管预冷器的 42%,而优化后则提高到了 67.3%。

表 4 复合型印刷电路板换热器结构参数优化前后对比

Tab. 4 Comparison of structural parameters before and after optimization for hybrid printed circuit heat exchanger

结构参数	优化前设计结果	优化后设计结果
空气侧翅片间距/mm	0.5	0.36
空气侧翅片高度/mm	5.0	1.5
空气侧通道当量直径/mm	0.909	0.58
空气侧翅片厚度/mm	0.1	0.1
氦气侧通道直径/mm	0.2	0.15
氦气侧板厚/mm	0.6	0.23
氦气侧通道当量直径/mm	0.2	0.15
紧凑度/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	3 596	5 904

表 5 不同类型预冷器的性能对比

Tab. 5 Performance comparison of different types of precoolers

设计参数	毛细管预冷器 ^[3]	传统印刷电路板 换热器	优化前复合印刷电路板 换热器	优化后复合印刷电路板 换热器
体积/ m^3	8.34	4.83	4.75	2.52
体积功率/ $(\text{MW} \cdot \text{m}^{-3})$	49	87	89	168
紧凑度/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	1 295	3 405	3 596	5 904
质量/kg	3 713	31 224	9 200	5 712
质量功率/ $(\text{MW} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.11	0.014	0.046	0.074

复合印刷电路板换热器优化前后空气侧和氦气侧的沿程温度变化如图 10 所示,通过比较优化前后空气侧和氦气侧的沿程温度分布情况可以看出,优化后空气侧和氦气侧的沿程温度梯度比优化前的温度梯度变化更加明显,优化后的换热芯体在长度上有了明显的减小,从而使得在满足相同换热功率的条件下温降幅度在沿程方向的变化更大。优化后空气和氦气的温差也相较于优化前更小,两侧温差整体上也呈现出更加均匀的分布,既能够得到更加有效的优化换热效果,又能够避免在大温差条件下进行流动换热而对换热器结构强度产生影响。

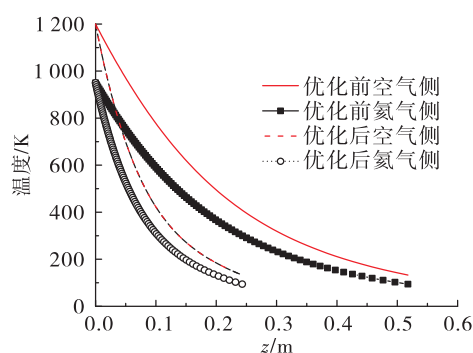


图 10 优化前后空气侧和氦气侧沿程温度的变化

Fig. 10 Temperature distribution along air-side and helium-side streamwise directions before and after optimization

复合印刷电路板换热器优化前后空气侧沿程压力的变化如图 11(a) 所示,优化前后沿程压力的变化趋势基本一致,整体压力变化呈现出先大幅度下降后趋于平缓的趋势,而优化后的沿程压力变化梯度要明显高于优化前的,且优化前后空气侧的压力损失主要集中在空气侧入口处的前半段。这是由于在入口段,空气处于高温高流速的状态,之后逐渐被低温氦气冷却,速度也逐渐下降,沿程的压力损失在入口段附近要明显高于出口处,而优化后的总压损失较优化前减小了 10% 左右。优化前空气侧的总压损失为 25%,而优化后的总压损失为 22%,都能满足预冷器对空气侧压损的要求。复合印刷电路板换热器优化前后氦气侧沿程压力的变化如图 11(b) 所示,相较于空气侧优化前后的对比,氦气侧在优化前后的压力损失变化要更加明显。优化前氦气侧的总压损失为 3.6%,而优化后的总压损失仅为 0.5%,氦气侧优化前后的总压损失相对较小,

都能满足预冷系统对氦气侧压损的要求。优化后氦气侧的沿程压力损失仅为优化前的 1/7,而优化后换热器芯体长度也仅为优化前的 1/2 左右,从而能够减少其沿程阻力损失。优化前氦气侧前半程的压力损失则与优化后氦气侧的总压损失相差不大,这也是由于低温氦气与高温空气在进行热量交换的同时,氦气的温度不断升高,黏度和流速也逐渐增大,从而增加了其沿程压力损失。

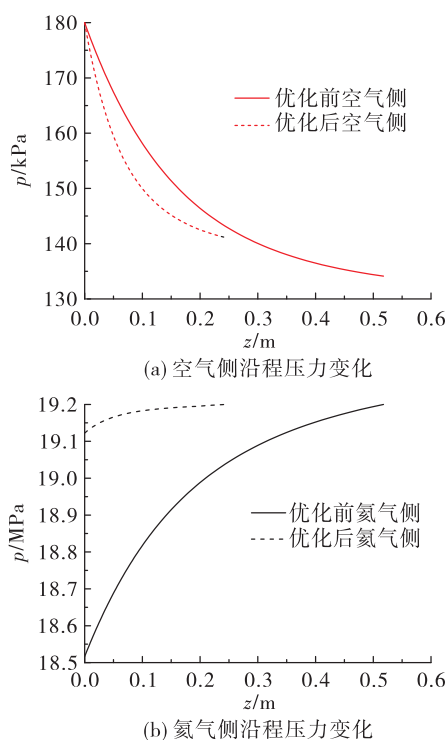


图 11 优化前后空气侧和氦气侧沿程压力的变化

Fig. 11 Pressure distribution along air-side and helium-side streamwise directions before and after optimization

3 结论

本文首先对基于复合印刷电路板换热器的预冷器结构特征进行阐述,然后通过分段热力设计方法对其进行了热力设计,在此基础上引入遗传算法对其进行进一步结构优化,该预冷器设计方法可适应于 SABRE、PATR 等预冷发动机的研发,主要结论如下。

1) 在本文分析条件下优化前的复合印刷电路板换热器与传统印刷电路板换热器体积基本相同,

在体积功率方面,传统印刷电路板换热器和优化前的复合印刷电路板换热器相较于毛细管预冷器提高近80%,优化后的复合型印刷电路板换热器相较于传统印刷电路板换热器提高了93%,相较于毛细管预冷器则提高了243%。在紧凑度方面,传统印刷电路板换热器和优化前的复合印刷电路板换热器相差不大,优化前的复合印刷电路板换热器相较于毛细管预冷器提高了177.7%,而优化后则提高了356%。在质量功率方面,传统印刷电路板换热器质量最大,质量功率最小;毛细管预冷器的质量最轻,质量功率最大;优化前的复合型印刷电路板换热器仅为毛细管预冷器的42%,而优化后则提高到了67.3%。

2) 优化后的复合印刷电路板换热器在空气侧和氦气侧的沿程温度梯度变化比优化前更加明显,并且优化后空气侧和氦气侧的温差也更小。优化后氦气侧的沿程压力损失仅为优化前的14%,空气侧的沿程压力损失也较优化前减小了10%左右。

参考文献:

- [1] 朱岩,马元,张蒙正. 预冷空气涡轮火箭发动机氮循环系统的参数特性[J]. 航空动力学报,2018,33(8): 2016-2024.
- [2] 张蒙正,刘典多,马海波,等. PATR 发动机关键技术与性能提升途径初探[J]. 推进技术,2018,39(9): 1921-1927.
- [3] WEBBER H, BOND A, HEMPSELL M. Sensitivity of pre-cooled air-breathing engine performance to heat exchanger design parameters [C]//57th International Astronautical Congress. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [4] 董芑呈,唐海龙,陈敏. 高超声速预冷发动机总体性能研究[J]. 航空动力,2020(3): 23-26.
- [5] LI X, LE P R, DEWSON S J. Heat exchangers for the next generation of nuclear reactors [C]//Proceedings of ICAPP. Reno, Nevada: [s. n.], 2006.
- [6] BOWDERY T. LNG applications of diffusion bonded heat exchangers [C]//6th Topical Conference on Natural Gas Utilization. Orlando: [s. n.], 2006.
- [7] PIDAPARTI S R, ANDERSON M H, RANJAN D. Experimental investigation of thermal-hydraulic performance of discontinuous fin printed circuit heat exchangers for supercritical CO₂ power cycles [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 106: 119-129.
- [8] SHIN J H, YOON S H. Thermal and hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger using two-phase nitrogen [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168: 114802.
- [9] MARCHIONNI M, CHAI L, BIANCHI G, et al. Numerical modelling and transient analysis of a printed circuit heat exchanger used as recuperator for supercritical CO₂ heat to power conversion systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114190.
- [10] KIM I H, NO H C, LEE J I, et al. Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239 (11): 2399-2408.
- [11] BAEK S, KIM J H, JEONG S, et al. Development of highly effective cryogenic printed circuit heat exchanger (PCHE) with low axial conduction [J]. Cryogenics, 2012, 52 (7/8/9): 366-374.
- [12] SAEED M, BERROUK A S, SIDDIQUI M S, et al. Numerical investigation of thermal and hydraulic characteristics of sCO₂-water printed circuit heat exchangers with zigzag channels [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113375.
- [13] ANEESH A M, SHARMA A, SRIVASTAVA A, et al. Effects of wavy channel configurations on thermal-hydraulic characteristics of printed circuit heat exchanger (PCHE) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 304-315.
- [14] CUI X Y, GUO J F, HUAI X L, et al. Numerical study on novel airfoil fins for printed circuit heat exchanger using supercritical CO₂ [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 354-366.
- [15] BAIK Y J, JEON S, KIM B, et al. Heat transfer performance of wavy-channeled PCHEs and the effects of waviness factors [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 809-815.
- [16] ANEESH A M, SHARMA A, SRIVASTAVA A, et al. Effects of wavy channel configurations on thermal-hydraulic characteristics of printed circuit heat exchanger (PCHE) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 304-315.
- [17] SAEED M, KIM M H. Thermal and hydraulic performance of sCO₂ PCHE with different fin configurations [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 975-985.
- [18] YANG Y, LI H Z, YAO M Y, et al. Investigation on the effects of narrowed channel cross-sections on the heat trans-

- fer performance of a wavy-channeled PCHE [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 33-43.
- [19] BOND A, VARVILL R, SCOTT J, et al. SKYLON: A realistic single stage spaceplane [J]. Space Technology, 2003, 45: 158-161.
- [20] HEMPSELL M, BOND A, VARVILL R, et al. Progress on the SKYLON and SABRE development programme [C]//62nd International Astronautical Congress. Cape Town, South Africa: [s. n.], 2011.
- [21] ADAMS T M, ABDEL-KHALIK S I, JETER S M, et al. An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41 (6/7): 851-857.
- [22] 钱颂文. 换热器设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

~~~~~

(上接第 34 页)

- [46] 钟萍, 陈丽艳, 王颖. 国外高超声速技术焦点领域及相关设备改造综述 [J]. 飞航导弹, 2011 (10): 17-22.
- [47] WOODLING M. Restoration of the hypersonic tunnel facility at NASA Glenn Research Center, Plum Brook Station [C]//38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2000.
- [48] WOIKE M, WILLIS B. Mach 6 integrated systems testing for the Hypersonic Tunnel Facility [C]//21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2000.
- [49] FETTERHOFF T, BURFITT W. Overview of the advanced propulsion test technology hypersonic aero propulsion clean air testbed (HAPCAT) [C]//17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2011.
- [50] YATSUYANAGI N, CHINZEI N, MITANI T. Ramjet engine test facility (RJTF) in NAL-KRC [R]. AIAA-1998-1511.