

文章编号: 1000-8055(2022)10-2272-14

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220074

航空发动机超轻高效换热器的的发展与应用展望

邓宏武¹, 李利昂¹, 杨家旺², 姜会庆², 王俊伟³

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

3. 陕西益信伟创智能科技有限公司, 西安 710119)

摘 要: 基于航空领域对换热器的特定设计需求, 调研分析国内外相关资料, 结合工程实践经验, 归纳总结了提高换热器性能的主要方法—基于强化传热的性能优化方法和基于交叉学科的换热器种类探索技术。总结当前各种典型强化传热手段的分支分布后, 认为基于结构的强化传热仍然是当前研究的主要方向之一, 并介绍了一些热点、新型的强化传热结构。在新型换热器种类探索中提出了智能换热器和化学反应换热器的概念, 为多工况换热和高热流换热提供解决方案, 其中前者的强化传热比率可达 2。对航空换热器设计中产生的部分新概念(评价指标/均混流/运行质量)进行了分析探索, 补充完善了换热器的设计体系, 并在最后对换热器在航空发动机方向的应用前景进行了展望。

关 键 词: 换热器; 强化传热; 交叉学科; 评价指标; 均混流; 运行质量

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Development and application prospect of light and high efficiency heat exchanger in aviation and aerospace

DENG Hongwu¹, LI Li'ang¹, YANG Jiawang², JIANG Huiqing², WANG Junwei³

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

3. Shaanxi EHCC Intelligent Technology Company Limited, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the specific design requirements of heat exchanger in aviation and aerospace field, existing data were investigated and analyzed. Combined with the engineering practice, the main methods to improve the performance of heat exchanger, including performance optimization method and the interdisciplinary exploration of new types of heat exchangers, were introduced. The branch and distribution of current research on various heat transfer enhancement were summarized. Structure-based enhanced heat transfer was still taken as one of the main research directions, and some novel structures were introduced. In the exploration of new types of heat exchangers, the concepts of smart heat exchanger and chemical reaction heat exchanger were introduced, elaborating the design of heat exchange under multiple working conditions and high heat flow. Among them, the heat transfer enhancement coefficient of the smart heat exchangers can reach up to 2. Some new concepts, including evaluation indicator, uniform-mixed flow and operating weight produced in the design of heat exchanger, were analyzed and explored,

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 先进航空动力创新工作站(HKCX2020-02-017)

作者简介: 邓宏武(1973—), 男, 副教授、博士生导师, 博士, 从事航空发动机传热研究。

通信作者: 李利昂(1995—), 男, 博士生, 从事航空发动机先进换热器研究。E-mail: sparkle@buaa.edu.cn

引用格式: 邓宏武, 李利昂, 杨家旺, 等. 航空发动机超轻高效换热器的发展与应用展望[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2272-2285. DENG Hongwu, LI Li'ang, YANG Jiawang, et al. Development and application prospect of light and high efficiency heat exchanger in aviation and aerospace[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2272-2285.

which can supplement and improve the design system. Finally, the application prospect of heat exchanger in aviation and aerospace was presented.

Keywords: heat exchanger; heat transfer enhancement; interdisciplinary; evaluation parameters; uniform-mixed flow; operating weight

换热器是用于冷热流体间热量交换的设备,在化工、运输、能源动力、电子产品等领域得到了广泛的应用^[1]。尤其是在航空领域,随着对更高/更快梦想的不断追求,换热器也随着人类对天空的探索,不断调整自身的设计极限^[2]。以现代工业文明的皇冠航空发动机为例,其是《中国制造 2025》的重要组成部分、典型的大国重器。航空发动机不断追求高转速(10 000 r/min 以上)、高温(2 000 K)、高推重比和高可靠性^[3],苛刻的使用环境对换热器提出了更高的使用要求。换热器首先要保证发动机的正常工作,其次是本身的良好运转,并在此基础上要追求尺寸小、质量轻以及最大的换热量。所以在换热器设计时,应从结构、材料、运行以及工艺等方面考虑,分析评估航空发动机用换热器的特定需求:

1) 轻质

换热器作为航空发动机的主要部件之一,首先要求其质量轻、体积小、结构紧凑;

2) 高效

在完整的飞行包线内,满足所有设计的传热性能要求,并且耐高温高压、交变载荷,阻力可控;

3) 高可靠性

在所有可能出现的负荷及外部条件下,换热器都能可靠地工作并达到发动机工作要求;

4) 易维护性

换热器在系统中布置合理,便于安装、拆卸和监测。

航空发动机对换热器的特殊需求造成了设计的矛盾和困难。在流动传热需求方面,由于发动机在不同状态下面临多种不同介质流量、温度工况的换热工况,因此需要针对其中最严苛工况给出满足换热能力的设计,并且该设计在各个运行条件下的流动阻力或压降不能超过设计值。在质量体积方面,发动机内部的空间有限,又要考虑推重比等关键性能参数,因此出于减重和整体几何方面的限制,换热器的质量和体积也受到严格限制。与此同时在强度可靠性方面,换热器还要满足强度方面的诸多要求,例如耐压要求、加速度与冲击条件要求、振动要求和循环要求等。其

中传热的强化通常会伴随着流阻的上升,强度方面的要求使得换热器的内部固体几何、芯体外侧、进出口壁厚上升从而提升了质量。与此同时,加工工艺约束也限制了性能的提升。可见,传热高与阻力可控、耐高温高压可靠性高与轻量化,这些是互相制约的指标。为了满足上述复杂的航空发动机传热需求,在总览当前强化传热研究的基础上,应该在性能优化(强化传热)和种类探索(新型、新概念多学科交叉换热器)两方面进一步开展深入研究。

1 强化传热研究总览

换热器是典型流体力学和传热学在工业产品上的应用。从理论上分析,换热器的性能优化主要就是对传热的强化。由传热学基本公式 $Q=hA\Delta T$ 可知强化传热的手段一般有三种,即提升传热温差、增加传热面积、提高总传热系数^[4]。然而对于一款确定工况的换热器,除了采用冷热流体逆流、错流布置方案来提升传热温差,几乎没有其他方式可以改变温差;因此增大传热面积和传热系数是主要的强化传热原理。

下面先就强化传热进行探讨。在了解强化传热整体研究图景后,利于深入探究航空发动机换热器中实用的强化传热方式。从介质组成的角度分析,可以把强化传热分为固体强化和流体强化两种,固体强化主要是增大表面积和从结构角度强化扰动,流体强化主要增加流体热物性(例如纳米流体)、流体温差和流动速度等。从实现方法的角度分析,以前的研究者一般将强化传热分成主动强化和被动强化^[5-6]。被动手段指产品成形后不能根据工况主动调整的手段,通常仅依靠固定泵送功率换热。在被动强化传热中,又包含两种主要方式——表面传热系数的增强和热导率的增强。表面传热系数的增强可以通过微观的表面特性改变而获得,也可通过宏观的扰流结构和延伸表面改变而获得。在热导率增强领域,无论是流体或是固体热导率的增强,都能获得更佳的传热性能。主动手段指能够根据不同工况进行强化传热调整的手段,其内又分为两类——需要外

部能源输入的手段和智能结构。外部能源输入的手段包含机械(运动)辅助、射流、电场磁场作用等多种方式。智能结构方式则无需额外的外部能源消耗和控制。经过文献调研、结合工程经验,在图 1 中总结了当前的强化传热主要研究分支和热点领域,给出了强化传热手段的研究图谱。必须强调的是,航空发动机换热器的安全性极其重

要,所以不能通过急剧减小流体通道的方法来增加换热器面积,也难以借助复杂的主动手段从而大幅提升换热器性能。在采取适当的通道水力直径的基础上,应该采用拓扑优化、仿生结构设计等方法增加通道内的传热系数,从而大幅提高换热器传热能力。下面简要介绍几种典型强化传热手段的概况。

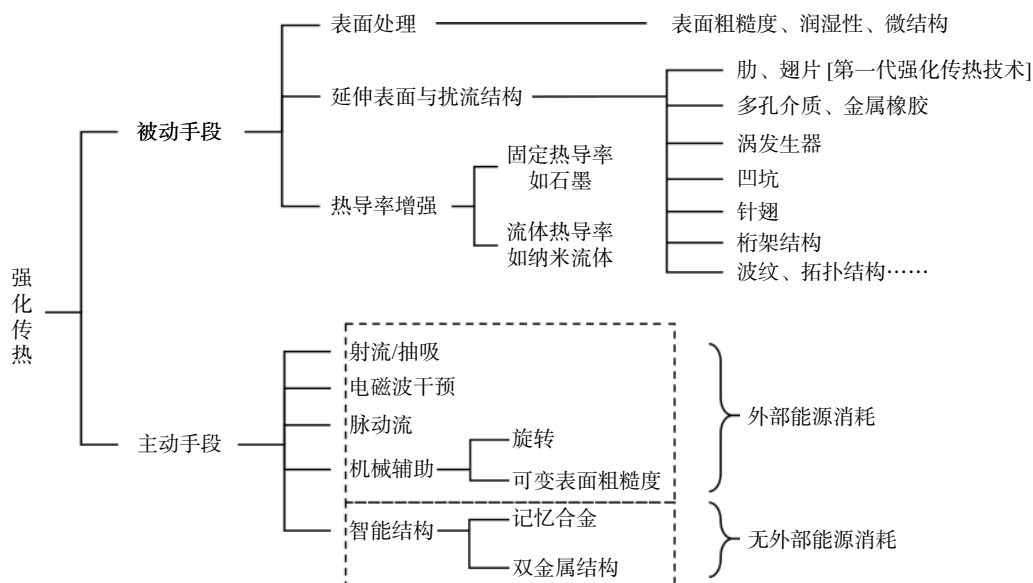


图 1 强化传热手段研究图谱

Fig. 1 Atlas of heat transfer enhancement methods

在固体热导率增强方面,典型的例子是石墨换热器/反应器,利用其优良的导热系数强化传热。此时考虑更多的是利用石墨作为固体材料避免与腐蚀性介质发生反应。在航空发动机中,换热器所用材料严重受固体材料特性制约,石墨材料的脆性使其暂时难以应用在航空发动机中。纳米流体相关研究虽然是近十年来的热点^[7],但其也有应用上的局限性。尤其在航空发动机的换热器中,添加剂的使用造成的潜在沉淀、分离^[8-9]是值得研究的问题。在涡发生器强化传热领域,相关研究从被报道^[10-11]以来一直在持续推进^[12]。主要得益于涡发生器性能优度因子高、便于制造等优点,其在管翅式换热器中获得了很成熟的应用。其流阻提升较低,但强化传热比率也相对较低。这一特点使涡发生器在换热器的原始结构传热水平较低时(例如平板通道)能有效强化传热性能。但对于航空发动机所需要的高热流密度传热,涡发生器的应用就受到制约。因此涡发生器在航空发动机换热器中的应用还需要进一步探索。其中较有前途的方式是采用一些复合结构例如交错肋通

道^[13-14]来作为涡发生器的变形,从而同时增加传热表面和提升流体侧传热系数。采用多孔介质进行^[15]填充,或采用三维结构也是增加传热系数的有效方式。例如近期成为研究热点的一种三维结构:最小三周期曲面结构^[16]方案,该结构在航空发动机换热器中的应用和综合评价正在被进一步试验验证。机械辅助强化传热的典型则是涡轮叶片内冷通道的旋转传热研究,具体可参考本课题组的相关成果^[17]。机械辅助强化传热与主动控制流体流动的抽吸、脉动流场干预传热^[6]相似,在换热器设计中难以有效地运用和实现。因此从目前的文献来看,航空发动机换热器的性能优化仍然以被动强化手段、结构优化为主。这方面的研究将在性能优化部分介绍。

在上述研究以外,智能自适应强化传热作为一种独特的主动手段需要额外关注。“智能结构”一词见于材料和结构领域的研究中,通常指“结构中集成智能材料作为传感器和(或)驱动器,使结构除了具有承载、传力、连接等功能外,还具有感知自身状态(温度、压力、速度等)、改变自身性

质(刚度、阻尼、形状等)等功能,以更好地适应外界环境的变化,实现预定功能的一类结构”^[18]。这一概念直到近期才逐渐被引入强化传热的研究中,同时由于相应研究的稀少和分散,目前这一方向没有一个统一的名词来分类,研究者多直接采用材料名称来命名自己的研究,或在标题中增加自适应等词汇。这一强化传热手段具备显著的优势,如表 1 所示,改变了传统主动强化传热必然依靠额外能源输入的定义,并有可能在未来发展成为其中重要的一类。本文认为用一个约定的词汇例如智能传热,来便于归类此种研究是有必要

表 1 强化传热手段对比

强化传热手段特性	传统主动强化手段	被动强化手段	智能结构
额外动力源	需要	不需要	不需要
系统复杂度	高	低	低
多工况传热调整能力	有	无	有
局部传热调整	有	无	有
工质要求	高	低	低

的。采用智能结构制作的换热器可称为“智能换热器”,具体见智能换热器概念一节。

2 性能优化

在近期研究中,被动强化传热中的延伸表面和扰流结构占有很大的比重,如图 2 所示。除备受关注的结构凹坑(dimple)、涡发生器(vortex generators, VG)、拓扑结构(topological structure)以外,还有很多针对不同结构例如针翅(Pin-fin)、肋(rib)、桁架(lattice)、弯曲通道(wavy channel)进行优化的研究。下面针对部分强化传热结构给出一些具体的典型例子以作参考。Dai 等^[19]针对弯曲微通道的流动和传热进行了数值模拟和 PIV(particle image velocimetry)研究,其发现波纹微通道由于具有二次流和涡旋流动,使得传热显著高于传统直通道。图 3(a)为其 5 种通道试件照片。Yang 等^[20]利用 CFD 及 PIV 技术对 5 种针翅结构的传热进行了研究,其中圆形针翅如图 3(b)所示,其发现六边形针翅截面在传热和压降方面优于圆形针翅,圆形针翅又优于三角形针翅。

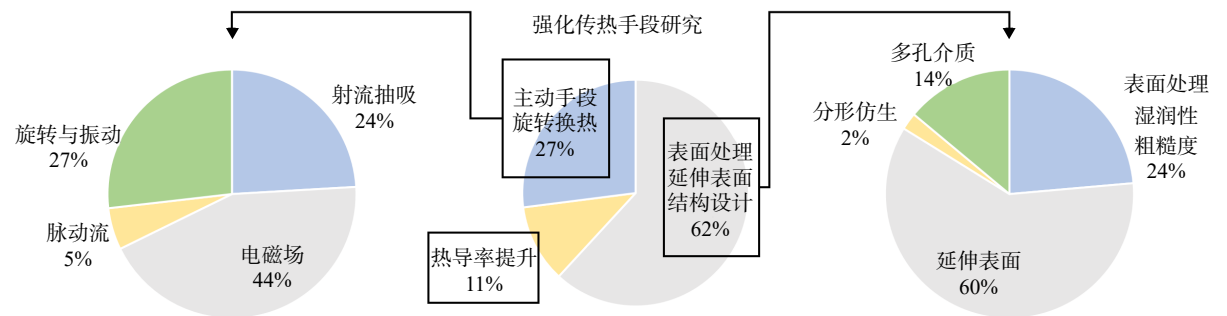


图 2 2010 年以来各种强化传热手段研究占比

Fig. 2 Research distribution of heat transfer enhancement methods since 2010

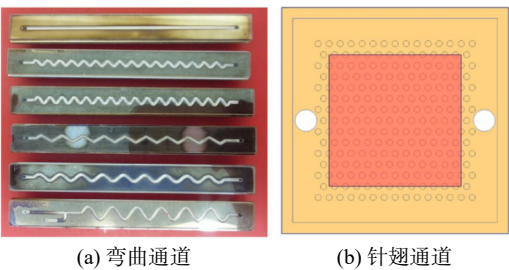


图 3 Dai 和 Yang 等^[19-20]研究的扰流结构

Fig. 3 Turbulence structure by Dai and Yang et al^[19-20]

Raja 等^[21]对微通道内由于交错斜切槽产生二次流进而强化传热的程度进行了数值模拟研究,切槽结构如图 4(a)所示,其发现引入弧结构后,

在其结构参数变化范围内压降最多减少约 5%,并证明了减小斜角、增大槽宽、减小槽间距均能提升传热效率。同时其分析了斜槽内的流动,并解释其强化传热机理为切槽流动破坏了边界层。Mohammed 等^[22]针对曲线通道的振幅/通道周期长参数进行了数值研究,通道结构如图 4(b)所示,并得出了振幅加大摩擦因数增大的结论。

Chai 等^[23]指出打断边界层和诱导主流分离是两种常见的强化微通道传热手段。其提出两种周期性扩张流道——扇形和三角形扩张区,如图 5(a)所示,并对其低雷诺数流动下的压降和传热特性进行比对。Abdul 等^[24]对于扭曲矩形截面

正弦波纹通道的传热进行了数值模拟,通道结构如图 5(b)所示,发现其比普通正弦波纹通道拥有更强的传热性能,对流动结构的分析表明,流体流动不对称和混合增强是强化传热的原因。

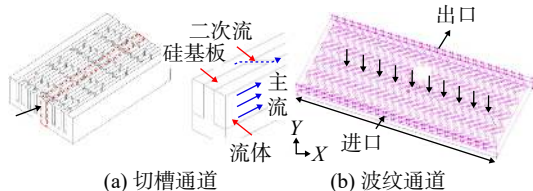


图 4 Raja 和 Mohammed 等^[21-22]研究的扰流结构

Fig. 4 Turbulence structure by Raja and Mohammed et al^[21-22]

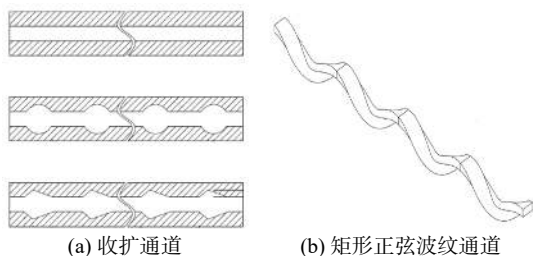


图 5 Chai 和 Abdul 等^[23-24]研究的扰流结构

Fig. 5 Turbulence structure by Chai and Abdul et al^[23-24]

Son 等^[25]研究了一种典型桁架结构(金字塔形)在低雷诺数下的孔隙度对于流动传热性能的影响,并认为其相对于金属泡沫结构呈现出更低的压降和更高的结构完整性。Yan 等^[26]以试验和流固耦合的数值方式研究了如图 6 所示“X 型桁架”的流动传热效果,并认为该结构在相似的孔隙率下,其比表面积的提升是强化传热的主要原因。图中 X 、 Y 、 Z 为坐标轴的三个方向。其给出了多种典型的桁架结构示意图可供参考。

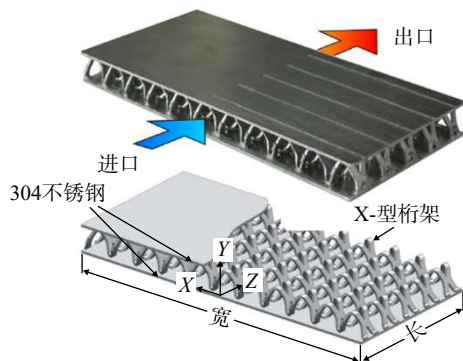


图 6 桁架结构^[25](X 型)

Fig. 6 X-type metallic lattice core^[25]

从以上被动强化传热的设计、优化研究中可以看出,调整现有结构的各种几何特性、增添各种新型结构、增加延伸表面都具备优化潜力。对

于要求高效、稳定、可靠的高端换热器,需要尽量以最低压损代价实现最高的传热,而周期性的扰动、边界层破坏是高效的方式。

3 种类探索(多学科交叉)

现有的换热器设计优化技术基本局限在流动传热领域,但是随着换热器的载体向着高空、高速、多工况、复杂环境条件的发展,现有的流动传热技术手段已经难以满足多变量和复杂环境的需求。引用其他学科,例如引入材料科学开展基于智能材料的智能换热器研究就可以满足不同工况的传热需求,引入化学科学开展化学换热器的研究就可以满足瞬时大热流的恶劣环境传热需求。

3.1 智能换热器

在航空发动机中,显著的变工况工作循环引发了设计上新的问题:传热过程受到多工况下要求传热能力和流阻相匹配的限制。空气动力学、结构和热力学等各种系统强耦合,这导致在不同的飞行条件下需要不同的热交换。为了解决燃料和润滑油之间的传热问题,热交换器通常设计为满足传热要求的上限。然而,这会导致其他条件下的流动阻力过大。当传热需求较低时,油温下降致使黏度上升,且换热器导致滑油过冷,将会加剧这一矛盾。

一些专利展示了换热器应对变工况的设计方法和换热系统的集成化趋势,如图 7 所示。普通的旁通阀门被较早开发并应用于汽车的滑油换热器中,例如 Long Manufacturing 和 Dana 公司分别于 2003 年和 2011 年给出了汽车机油散热器的活门专利,活门由弹簧构造,用以控制不同工况下机油流路的切换。航空发动机单位诸如 SNECMA 等公司则开发了旁通阀门、SACOC(表面空气冷却滑油换热器, surface air cooled oil cooler)来解决航空发动机中的变工况问题。旁通阀门允许低温下的滑油直接旁通,避免其进入燃油滑油换热器;对于 SACOC 设计,当传热需求较低例如冷态启动时,滑油仅与燃油换热;当处于巡航等状态时,滑油流经外涵的 SACOC,由外涵空气提供足够的冷量。为使换热系统减重,一些专利中给出了换热器的集成化设计方法。GE 公司(general electric company)在 2015 年提出了采用记忆合金制造的航空发动机燃滑油换热器活门。汉盛公司在 2017 年提出了在飞机上应用的一体化紧凑换热器方案,令活门等流量分配控制单元的体积最小

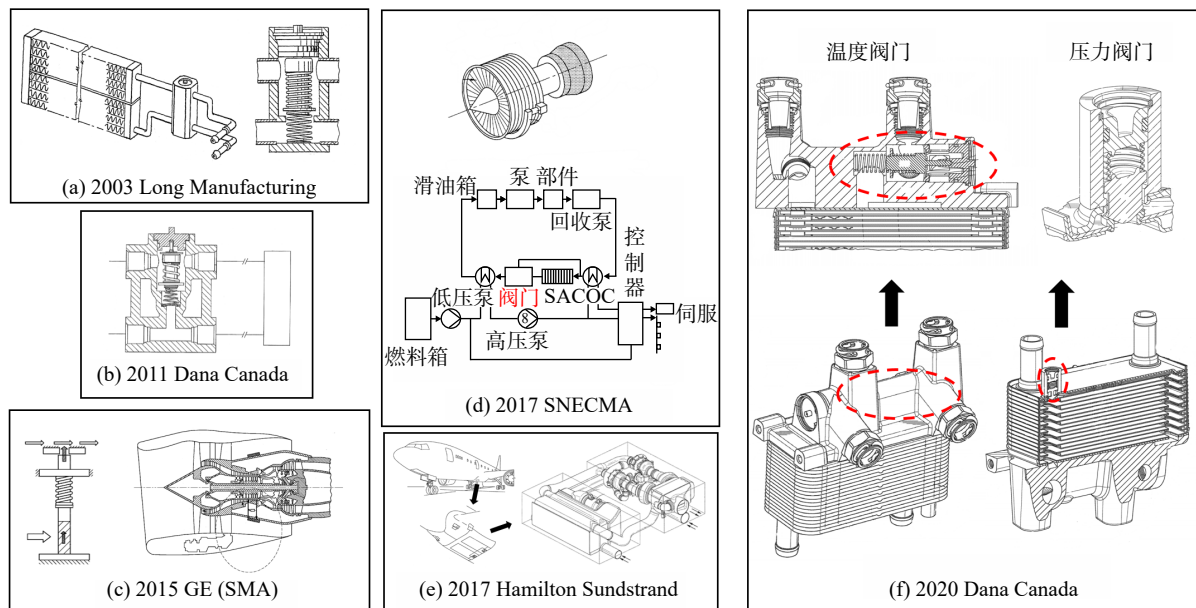


图 7 已有专利中的换热器多工况响应问题和集成化趋势

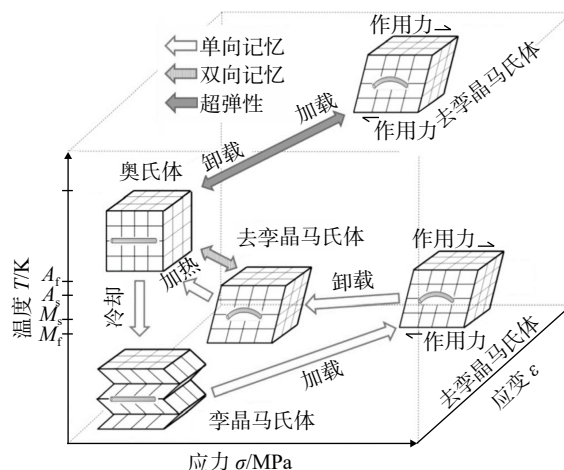
Fig. 7 Integration trend and multi-condition response of heat exchanger in existing patents

化。2020 年, Dana 公司提出了应用温度和压力阀门的换热器集成化设计方案。从这些实例中不难发现, 应对变工况问题的旁通阀门和相关管路仍然占据了较大体积, 且增加了换热系统的复杂度。

为解决这一问题, 前文已经提出了智能结构强化传热的概念。利用智能结构特性进行针对性设计、采用智能结构制造的换热器即为智能换热器。智能换热器因含有智能材料, 能根据实际工况(外界刺激)主动变形以调节自身性能, 做出响应。因此其可以替代传统换热器系统中的温度和压力活门, 从而在安全、体积、质量等方面大幅提高换热器性能。

在智能结构强化传热方面, 记忆合金(shape memory alloy, SMA)是典型的研究对象, 其变形原理如图 8 所示。图中 M_s 、 M_f 分别代表马氏体相变开始和终止温度, A_s 、 A_f 分别代表奥氏体相变开始与终止温度。自记忆合金在 1932 年被发现以来^[27], 其在生物医药(例如牙齿矫形)和航天致动器中的应用已经十分广泛^[28-29]。但是利用智能结构进行强化传热却少见报道。由于记忆合金对温度具有明显的响应, 相较于形状记忆聚合物^[30-32]、陶瓷等材料又具备优良的材料属性, 因此具备在航空领域中应用的前景。利用智能结构参与传热的研究最先是其作为换热器装配辅助^[33-35]、流量控制元件^[36]的方式开始。随着人们对材料的掌握, 逐渐向间接参与传热控制发展, 例如可以利用记忆合金作为动作器, 自动控制管式换热

器中的纽带插入物的深度, 从而调节传热^[37], 或是作为热管温控开关自动控制热管^[38-39], 降低宇航系统的质量和复杂性。2005 年 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的一篇研究中考察了涡轮部件里使用智能材料主动控制涡轮叶片间隙的方案^[40]。同时, 现在已经有航空发动机换热器项目采用记忆合金作为温控开关来控制流路阀门, 实现间接的智能传热调整。

图 8 记忆合金变形原理^[28]Fig. 8 Deformation principle of SMA^[28]

智能结构直接参与传热的较早研究见于法国斯奈克玛(即 SNECMA)公司的一篇专利^[41], 其将记忆合金用于涡轮部件主动冷却, 如图 9 所示。英国研究者 Aris 等^[42]开始了在换热器中制备记

忆合金强化传热装置的加工尝试,如图 10 所示。马来西亚研究者与英国研究者 Aris 合作,在管翅式换热器中尝试应用智能材料制造 VG(vortex generators),最终实现了多种翘起角度的变化从而改变了传热性能^[43]。但其实现的整体流动阻力和强化传热控制程度都较弱,在 20% 以下。中科院工热所开创了记忆合金应用于池沸腾传热研究的先例^[44],设计的结构通过变形能较早的转变沸腾状态,成功降低了壁面温度。西班牙和加拿大的团队则在热沉中进行了智能材料主动调节传热的试验,并指出其能显著降低壁面温差、优化温度不均匀性^[45]。

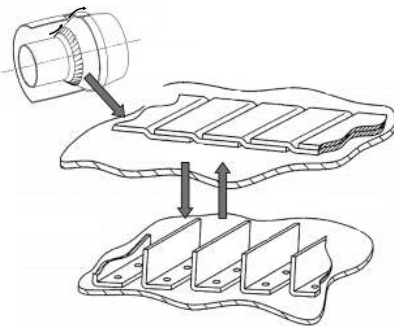


图 9 涡轮部件应用智能材料改变传热^[41]

Fig. 9 Application of smart materials in turbine components^[41]

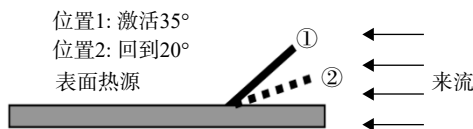


图 10 在换热器中布置智能结构^[42]

Fig. 10 An arrangement of smart structure in heat exchanger^[42]

本课题组对智能结构强化传热进行的初步研究表明,其具有巨大的传热控制潜力。在图 11 中,利用雷诺数 Re 和 j (Colburn factor) 因子给出了不同状态下芯体结构的传热特性线。可以看出,利用双金属和记忆合金设计的芯体结构都可以随温度进行换热主动控制,但双金属结构的控制范围小于记忆合金结构。利用记忆合金制作的芯体在不同流体温度工况下,强化传热比率可以达到 2。

从已有文献中不难发现,采用记忆合金作为智能材料,其结构温度特性会产生一个滞回曲线,这是由于其在不同相下产生转变的温度不同,如图 12 所示。图中 T_{Mf} 、 T_{Ms} 、 T_{As} 、 T_{Af} 对应前述马氏体相变开始、终止,奥氏体相变开始、终止四个关键的相变温度点。这样就影响了强化传热的相应

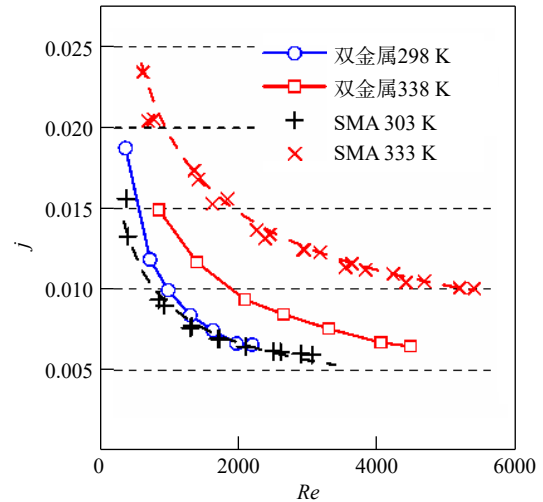


图 11 本课题组对智能传热结构的研究

Fig. 11 Investigation on smart heat transfer structure by our team

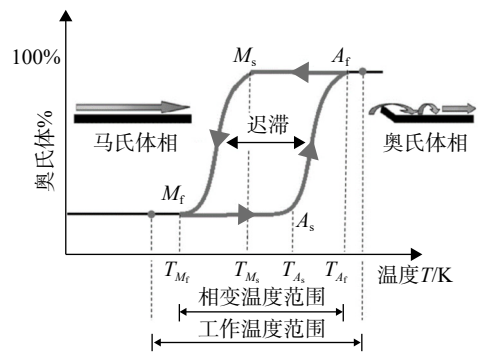


图 12 记忆合金的滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curve of SMA

准确性,增加了设计难度。同时,由于各类记忆合金的工作环境温度范围要求较为苛刻,如图 13 所示,超过一定温度记忆合金就会失效,这在加工和使用上带来了极大的不便,加上其前期训练周期长^[46-47]、成本较高、可靠性不易保证等因素,制约了其在换热器中的应用。如果能利用高温记忆合金或可编程形状记忆结构^[48](简单的例子如双金属片,复杂的方案可以是诸如多态形状记忆合金^[49])的方式突破这种问题,将给换热器的设计带来巨大的变革。多金属材料利用不同材料的线胀系数不同而产生变形,其变形幅度一般小于记忆合金,但其也可以在换热器内构成线圈、扰流片、VG 等多种结构形式的智能结构,为自适应传热提供新的解决方案。在换热器领域,智能结构这一内涵下的相关研究还十分匮乏,充满机遇和挑战,以多金属结构、可编程材料或记忆合金为代表的智能结构强化传热具有作为未来强化

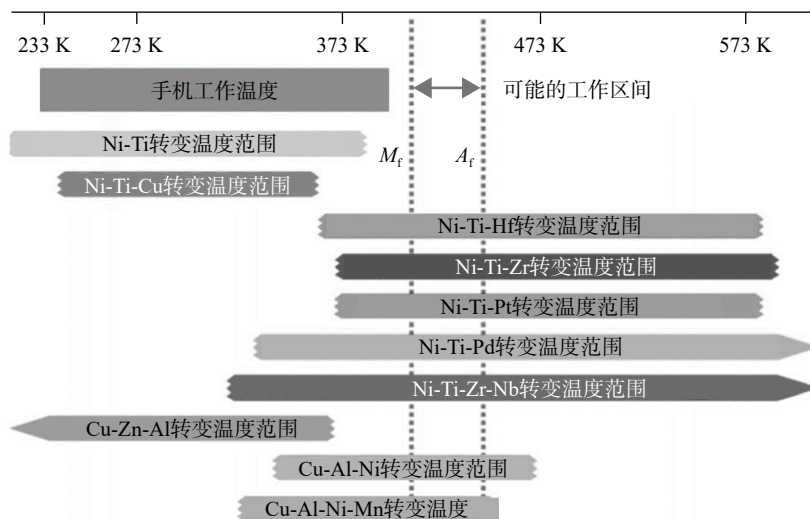


图 13 不同类型记忆合金的使用温度范围

Fig. 13 Application temperature range of different types of SMA

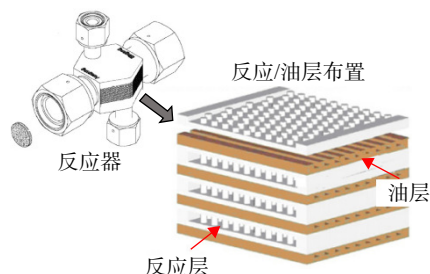
传热研究热点的潜力。

3.2 化学反应换热器

在航空发动机中,采用自身携带的流体力工质(例如航空煤油)或者来自压气机的压缩空气作为冷源进行换热是实用的做法。例如在高超声速飞行器发动机中,可利用液氢进行进气预冷,随后再参与燃烧^[50]。在该领域,主要关注大温差大压差条件下的考虑变物性条件的超高功重比(可达 101 kW/kg)换热器设计,印刷电路板式换热器、高温合金毛细管换热器加工工艺和结霜抑制方法等问题。如果存在一种航空燃料的化学制备过程简单可控且是吸热反应,这一过程就为发动机的传热过程提供了新的冷源。具体来说,当面临短时或超高热流问题时,可以利用化工原料的吸热反应(例如催化下的裂化反应)为滑油或空气降温,同时生成参与后续燃烧的工质。若换热器的传热机理中包含工质的化学反应,则称其为化学反应换热器。化学反应换热器与传统换热器最大的区别在于它采用化学热沉这一独特的冷源,其主要优势在于:①化学反应传热速率相对更高;②化学反应进行时接近于等温过程,流向温度分布均匀,不存在“冷热点”问题。

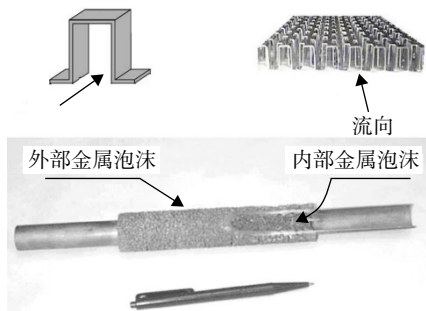
德国默克公司是第一家采用微混合器合成金属有机物的化工公司^[51]。美国 Chart 公司在 1998 年为 Marbond 反应-换热器申请了专利,其由一系列板层叠而成,使用扩散焊技术进行组装,并采用蚀刻技术形成槽道^[52]。德国的 Jankie 等采用爆炸性气体混合物(氢气+氧气)在微反应-换热器中进行反应,其完全转化成水而未发生爆炸、泄露

等事故,验证了微结构反应-换热器更易控、更安全的特性。进入 21 世纪,开始出现了以板式换热器为基础的反应-换热器^[53],之后微结构反应-换热器逐渐成为研究的主流方向,例如挪威的研究团队在微型固定床反应-换热器中合成甲醇^[54],如图 14 所示,在较低的接触时间下实现了较高的转化率,传热传质得到强化。

图 14 微反应换热器结构示意图^[54]Fig. 14 Structural diagram of micro reaction heat exchanger^[54]

传统强化传热手段如肋片、泡沫金属等也适用于反应换热器,如图 15 所示,但也要考虑反应-换热器中特有的混合强度和停留时间分布等问题。Ferrouillat 等^[55]发现肋片能显著增强全局传热系数,进而提高反应转化率和产率;Ismahilov 等^[56]制作了一种管式反应-换热器,在管内壁和外壁都填充了泡沫金属以增大接触面积。Ferrouillat 等^[57]认为泡沫金属能更好地产生混合效应,由于其各向同性的几何形状会产生均匀混合的流动,并且其具有较大的比表面积,作为催化剂的载体收获更好的效果,但同时其压降也较大。

目前多数研究表明化学反应换热器具有微小

图 15 化学反应换热器中的肋片结构和泡沫金属^[55-57]Fig. 15 Fin structure and metal foam in chemical reaction heat exchanger^[55-57]

结构、高强度传热、反应易控、传热与反应耦合等特性。化学反应换热器这样前沿的技术概念随着相关领域研究的进展,在未来可能会辅助解决航空领域复杂、狭小、冷源匮乏环境中特殊的传热问题。

4 值得探索的新概念

4.1 “均混流换热器”的概念

发掘换热器发展的深层逻辑和趋势对未来的研究有益。上文中提及延伸表面和扰流结构是强化传热的主要手段,但多数研究都集中于提升特定的结构内的传热,例如平板通道、矩形通道、圆形管道,这是因为早期换热器的结构相对固化,管翅式换热器、板式、板翅式换热器成为了微小通道换热器中不可或缺的分支。因此,很多研究者针对弯曲通道、周期收扩通道、平板通道内布置 dimple、管翅换热器中布置 VG 等结构进行强化传热研究,并发现周期性的扰动、纵向涡旋等因素能以较小的压降代价明显而持续地提升传热。可以发现,优化后的换热器芯体大多具备以下结构特性:首先内部流体互联互通,其次流体在其内不断被结构扰动、改变流动方向和状态,从而令流体均匀混合,并实现强化传热的目的。早期板翅式换热器中的结构发展也印证了这一规律特性。板翅式换热器中的翅片最初是分割流道的结构,后来又产生了叉排波纹状翅片,这样的翅片使得单层芯体内的流体完全互通,并且周期性地切断边界层,使得传热大幅强化。现将这种结构命名为“均混流结构”,并将这种结构构成的换热器称为“均混流换热器”。

进一步地,可以将其拓展为“二维均混流换热器”和“三维均混流换热器”两个概念,前者指换热器内可以按照一个方向分为多层,每一个单元

层内流体被均匀混合和不断扰动,典型例子即为波纹板式换热器,多孔介质填充的板式换热器芯体也可以视为二维均混流结构的一种特殊形式。三维均混流换热器指流体从进口至出口完全均匀混合,整个三维空间内流体没有明显的分层的换热器。需要注意的是,传统管壳式换热器的壳程虽然是三维流动,但是难以做到均混流传热,因为其形式阻力的存在和结构相对粗放,特别是垂直流向的挡板结构,使得流体的均匀流动受限,产生诸多的低速回流区,如图 16 所示,从而降低了整体效能。图中符号 v 表示速度值。三维均混流换热器目前较罕见,并且需要更先进的加工手段例如金属 3D 打印^[2]来生产,但是一些如图 17 所示的新型换热器和三重周期最小曲面换热器结构^[16]已经开始受到广泛关注。同时航空发动机换热器的制造技术更新,即应用增材制造技术 (additive manufacturing, AM) 实现换热器加工也是近期换热器研究的趋势。

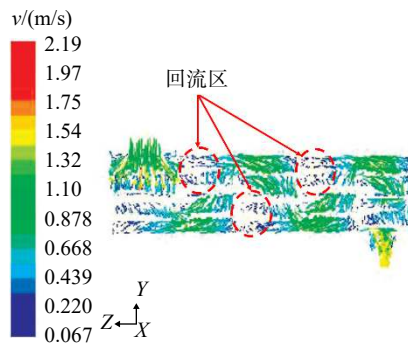


图 16 管壳式换热器内部速度场

Fig. 16 Internal velocity field of shell and tube heat exchanger



图 17 一种三维均混流结构

Fig. 17 A structure providing three-dimensional uniform mixed-flow

芯体内实现“均混流”能够提升换热器整体性能。均混流特征意味着阻力分布相对均匀,芯体内可以更快实现流体的再分配,进而更好的控制

芯体内的换热均匀性, 并且一定的均布阻力能降低芯体对入口条件的敏感度; 其次各股流体之间相互掺混, 能在重建边界层的基础之上周期性扰动流体, 从而大大强化整体传热性能; 最后这种类型的芯体由于持续扰动的存在能够有效地降低堵塞的可能性, 这对于航空领域的高可靠性换热器是十分必要的。目前, 在一些前沿换热器的研究中已经呈现出三维设计换热器的趋势, 并设计出了更复杂的三维均混流换热器。综上所述, 均混流换热器是一个目前研究较少且十分值得深入研究的课题。

4.2 “评价指标”的概念

一般换热器的优化和设计中多以换热量和紧凑度为其衡量指标。在化工等地面设备中, 对质量和阻力的要求相对不高。因为其换热系统置于地面上, 质量方面没有限制, 额外的泵功也可以由功率更高的泵送设备完成。在可靠性方面, 地面换热器的故障也便于即时维修。但是对于航空发动机中的换热器, 由于传热过程在飞行中完成, 所以需要发动机提供额外的动力保证换热器的工作, 换热器的质量也会直接影响到关键的推重比等参数。同时, 换热器的阻力会影响整个系统例如滑油燃油系统的阻力, 所以需要在整个流动传热系统中统一考虑。航空发动机的换热器在可靠性方面也有更严格的要求, 换热器的失效会直接导致发动机的关键故障。因此, 质量、阻力、可靠性也成为了主要的考虑因素。综上所述, 在航空发动机领域, 需要考虑换热器能量付出与获得的效能概念, 还需要考虑制造约束、质量约束、可靠性约束, 甚至需要在整机层面上进行多目标优化研究。

在能量付出与获得的方面, 已经有一些基于等流量、等压降和等泵功约束条件下的性能评价因子 PEC(performance evaluation factor)、TPF(thermal performance factor)被广泛应用。综合性能评价指标将传热所消耗的泵送能量纳入考量, 通过两者之间的关系来判断设计的优劣。考虑到质量时, 现代的航空换热器中多以单位质量传热量(也有人称之为功重比)作为衡量指标。一些研究者在此基础上, 还希望将可靠性引入换热器评价指标。基于可靠性和适航标准的评价指标可能会引起换热器设计方法的进一步改变。

4.3 “运行质量”的概念

从以前的管壳式换热器, 到如今的紧凑板式

换热器、微小通道管翅换热器, 换热器的体积逐渐减小, 而换热能力不断提升。对于航空换热器而言, 换热器必须具有最小的质量和体积, 因此其内部通道通常位于微小通道范围内。同时由于强度和加工方面的考量, 其通道间的隔板、换热器的壳体都不能过于薄弱, 因此换热器的固体体积实际上缩减有限, 所以换热器的固体体积占比较之于传统换热器更高。此时如果单纯从固体质量上来衡量换热器的紧凑程度并不全面。由于紧凑式换热器内的通道尺度大幅下降, 因此其内部所含的流体体积也随之减少; 而发动机换热器的循环系统例如滑油系统, 需要携带完全充满整个系统的工质, 所以换热器内部流体体积将能影响其总重。结合上述原因, 应当以换热器的整体质量, 即以“运行质量”评价换热器的紧凑程度。其为换热器内部流体质量与换热器本身固体质量之和。未来可能以“满足传热工况要求的最低运行质量”为目标来设计新的航空发动机换热器。

5 应用展望

换热器在世界著名航空发动机上有许多典型应用, 如俄罗斯 AL-31F 发动机上成功地采用了一种外涵空气冷却器来降低涡轮冷却气的温度, 如图 18 所示。该冷却器位于外涵通道内, 从燃烧室将高压高温气流引入外涵, 通过低温气流冲刷冷却降温, 该空气-空气换热器可以使冷却气体温度降低 150~200 K, 提升涡轮的可靠性。针对类似的结构, 清华大学^[58]和北京航空航天大学^[59]都有团队进行相关研究, 利用燃油为冷却气进行降温, 这一技术被称为 CCA(cooled cooling air, 冷却气冷却)技术。

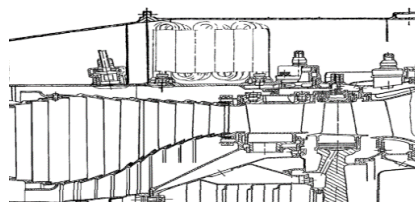


图 18 应用于 AL-31F 发动机的空气换热器

Fig. 18 Air heat exchanger for AL-31F engine

除了应用于航空发动机外涵作为冷却空气的预冷器之外, 换热器还可以作为发动机的中冷器^[60]和回热器以提高发动机热力循环效率。图 19 为德国发动机及涡轮机联盟弗里德希哈芬股份有限公司提出的中冷回热循环发动机概念示意图, 与

常规循环相比,该发动机增加了中冷环节和回热环节^[61]。航空发动机内涵空气经低压压气机压缩后,通过中冷器与外涵冷空气进行热交换,使得压缩后的空气温度降低,从而使高压压气机能够达到更高的压缩比和效率。高压压气机出口气流再与低压涡轮出口气流通过回热器进行热交换,有效利用了涡轮出口燃气余热,增加了进入燃烧室的空气的温度,在涡轮前温度不变的前提下可以减少燃烧室供油量,增大了发动机热效率,耗油率也相应降低。

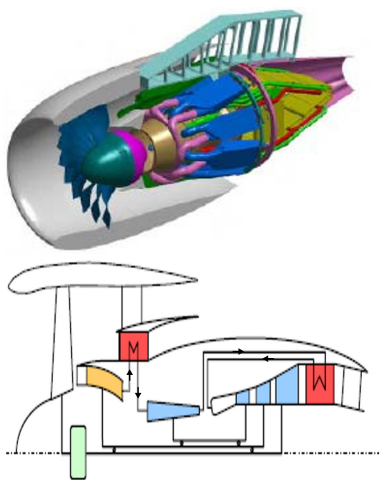


图 19 中冷回热循环发动机概念示意图

Fig. 19 Conceptual diagram of Intercooled engine

瑞典沃尔沃航空公司设计了一种用于民用航空发动机中的空气冷却器^[62],将高压压气机的出口引气引入燃气尾喷管处进行加热。该换热器采用八个正交流动的传热单元,换热单元中管道采用叉排排列的方式,结构和椭圆形管道如图 20 所示,这种设计增加有效传热面积的同时还使得热燃气冲刷管簇时的压力损失降低。这种换热器在高温下的传热能力较强,压气机出口空气温度提升可达到 200 K。

针对发动机的机油冷却,有采用空气进行冷却的方案。美国宾夕法尼亚大学^[63]利用增材制造设计了一款空气翅片换热器,并尝试添加了涡流发生器结构,如图 21 所示。西班牙的团队^[64]则采用数值计算优化了一款 SACOC(surface air cooled oil cooler)机油冷却器的形状,如图 22 所示。在这种换热器的优化中,首先要考虑的是满足质量和冷气侧压降的目标。

为配合换热器的设计和应用,相关制造加工工艺也在不断更迭。常见的换热器有基于螺栓连

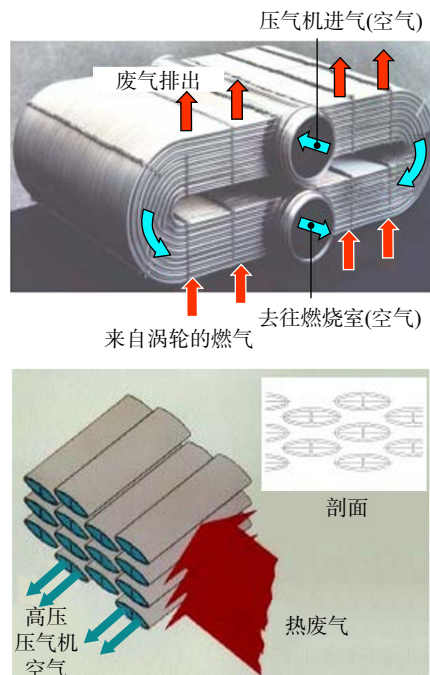
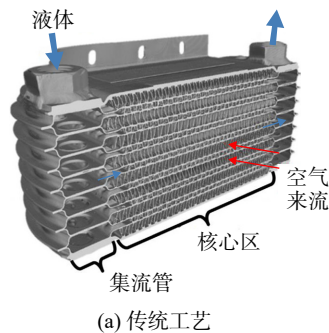
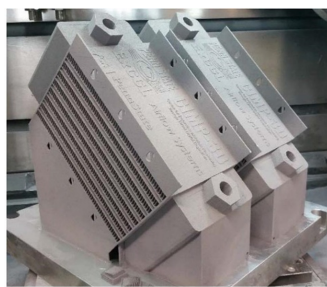


图 20 换热器单元结构与管道示意图

Fig. 20 Schematic diagram of heat exchanger unit and pipeline



(a) 传统工艺



(b) 增材制造

图 21 发动机机油冷却器

Fig. 21 Engine oil cooler

接的波纹板式换热器(原表面换热器)^[65]、基于钎焊工艺的板翅式换热器、管壳式和管式换热器。波纹板式换热器由于密封胶圈的存在和内部结构特性,导致其在高压、腐蚀环境下的应用受限;而普通的非紧凑式管壳式换热器的换热能力、功重比则较低。因此板翅式换热器、管式换热器在航

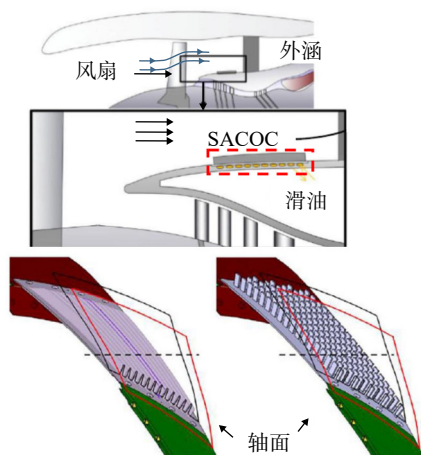


图 22 空气滑油冷却器示意图

Fig. 22 Schematic diagram of SACOC

空发动机中应用较多^[66]。在基于扩散焊工艺整体焊接的高耐压、高紧凑度印刷电路板式换热器开始应用时^[67], 部分研究者也开始探索在换热器中应用 3D 打印工艺, 以加工轻质复杂结构^[2], 并加工了正八面体桁架结构试验件^[68]。3D 打印工艺在换热器领域的应用有望配合均混流换热器设计进一步实现复杂结构、降低换热器运行质量、提升紧凑度和功重比。

6 结 论

本文针对航空发动机换热器进行了综述、概念探索和应用展望, 主要结论如下:

1) 根据对国内外相关研究文献的分析, 目前在强化传热领域的研究重点仍然是以被动手段中的延伸表面为主。相关方面的研究基础较多, 可以在此基础上进行学科交叉研究, 获得满足更高需求的新型换热器。

2) 分析了强化传热的机理, 提出了智能强化传热的新方向, 并选取部分延伸表面的研究进行了综述, 以寻找未来研究中的结合点。

3) 在多学科交叉方面, 提出了智能和化学反应强化传热的思路, 指出其是今后解决多工况传热、高热流传热的潜在手段, 其中智能结构的强化传热比率可达 2。

4) 针对航空发动机高效换热器的特殊应用场景, 提出了评价指标、运行质量、均混流换热器等新概念, 这些概念在相关领域应用可以更完善地辅助设计、优化、评价过程。

5) 结合最新的研究文献对航空发动机中的换热器进行了展望。

参考文献:

- [1] 兰州石油机械研究所. 换热器 [M]. 第2版. 北京: 中国石化出版社, 2013.
- [2] 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(22): 43-46.
YU Xiao, LÜ Duo, ZHAO Meng, et al. Application prospect of 3D printing technology on aeroengine heat exchanger development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(22): 43-46. (in Chinese)
- [3] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 高等教育出版社, 2006.
- [5] BERGLES A E. ExHFT for fourth generation heat transfer technology[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2): 335-344.
- [6] ALAM T, KIM M H. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 813-839.
- [7] KUMAR S, KUMAR A, DARSHAN K A, et al. A review of flow and heat transfer behaviour of nanofluids in micro channel heat sinks[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 8: 477-493.
- [8] SAJJID M U, ALI H M. Thermal conductivity of hybrid nanofluids: a critical review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 211-234.
- [9] LIANG G T, MUDAWAR I. Review of single-phase and two-phase nanofluid heat transfer in macro-channels and micro-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 324-354.
- [10] BISWAS G, CHATTOPADHYAY H. Heat transfer in a channel with built-in wing-type vortex generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(4): 803-814.
- [11] FIEBIG M, VALENCIA A, MITRA N K. Wing-type vortex generators for fin-and-tube heat exchangers[J]. J Experimental Thermal & Fluid Science, 1993, 7(4): 287-295.
- [12] AWAIS M, BHUIYAN A A. Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 5: 524-545.
- [13] DU Wei, LUO Lei, WANG Songtao, et al. Heat transfer and flow structure in a latticework duct with different sidewalls[J]. Journal of Heat Transfer, 2019, 141(12): 124501-124508.
- [14] BU Shi, YANG Lianfeng, QIU Hanghai, et al. Effect of sidewall slots and pin fins on the performance of latticework cooling channel for turbine blades[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 275-288.
- [15] RASHIDI S, KASHEFI M H, KIM K C, et al. Potentials of porous materials for energy management in heat exchangers—a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2019, 243: 206-232.
- [16] LI Weihong, YU Guopeng, YU Zhibin. Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO₂ cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115686.1-115686.11.
- [17] LI Hua, DENG Hongwu, BAI Lei, et al. Heat transfer in a rotating two-inlet wedge-shaped channel with pin-fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 163: 120380.1-120380.9.
- [18] 闫晓军, 张小勇. 形状记忆合金智能结构[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 4-5.
- [19] DAI Z, FLETCHER D F, HAYNES B S. Impact of tortuous geom-

- etry on laminar flow heat transfer in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 83: 382-398.
- [20] YANG Dawei, WANG Yan, DING Guifu, et al. Numerical and experimental analysis of cooling performance of single-phase array microchannel heat sinks with different pin-fin configurations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1547-1556.
- [21] RAJA K N, SAIDUR R, GHAZALI N N N, et al. Numerical study of thermal enhancement in micro channel heat sink with secondary flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 216-223.
- [22] MOHAMMED H A, GUNNASEGARAN P, SHUAIB N H. Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38(1): 63-68.
- [23] CHAI Lei, XIA Guodong, WANG Liang, et al. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion - constriction cross-sections[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 62: 741-751.
- [24] ABDUL H F B, MITHUN K P M, ARAVIND G P, et al. Thermo hydraulic performance analysis of twisted sinusoidal wavy microchannels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 128: 124-136.
- [25] SON K N, WEIBEL J A, KUMARESAN V, et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 619-629.
- [26] YAN Hongbin, YANG Xiaohu, LU Tianjian, et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 1293-1304.
- [27] BUEHLER W J, GILFRICH J V, WILEY R C. Effect of Low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(5): 1475-1477.
- [28] MOHD J J, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. *Materials & Design* (1980-2015), 2014, 56: 1078-1113.
- [29] MORGAN N B. Medical shape memory alloy applications—the market and its products[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 378(1/2): 16-23.
- [30] 史玉升, 伍宏志, 闫春泽, 等. 4D打印——智能构件的增材制造技术[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(15): 15-39.
- SHI Yusheng, WU Hongzhi, YAN Chunze, et al. Four-dimensional printing—the additive manufacturing technology of intelligent components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(15): 15-39. (in Chinese)
- [31] 张雨萌, 李洁, 夏进军, 等. 4D打印技术: 工艺、材料及应用[J]. *材料导报*, 2021, 35(1): 1212-1223.
- ZHANG Yumeng, LI Jie, XIA Jinjun, et al. 4D printing: technologies, materials and applications [J]. *Material Reports*, 2021, 35(1): 1212-1223. (in Chinese)
- [32] 赵伟, 刘立武, 孙健, 等. 基于形状记忆聚合物复合材料航天航空可变形结构技术研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(4): 73-83.
- ZHAO Wei, LIU Liwu, SUN Jian, et al. Progress of aerospace deformable structures based on shape memory polymer composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2021, 51(4): 73-83. (in Chinese)
- [33] 何庸. 用于化工装置上的新材料: 使用形状记忆合金的换热器[J]. *石油化工应用*, 1994(4): 29-31.
- HE Yong. New materials for chemical plants: heat exchangers using shape memory alloys[J]. *Petrochemical Applications*, 1994(4): 29-31. (in Chinese)
- [34] 刘航, 冯立强, 刘兴江. 一种形状记忆合金折流板换热器及折流板制备方法: CN105387738A[P]. 2016-03-09.
- [35] 李耀中, 颜惠庚, 李弘, 等. 换热器的列管: CN102128553A[P]. 2011-07-20.
- [36] 马跃学, 王娟, 梁惊涛, 等. 记忆合金自调节式高效微型节流制冷器机理研究[J]. *航空兵器*, 2015(2): 38-41.
- MA Yuexue, WANG Juan, LIANG Jingtao, et al. Study on high-efficiency miniature JT cryocooler regulated by shape memory alloy [J]. *Aero Weaponry*, 2015(2): 38-41. (in Chinese)
- [37] KITO M, MORI K. Heat exchanger: US4691761[P]. 1987-09-08.
- [38] BENAFAN O, NOTARDONATO W U, MENEGHELLI B J, et al. Design and development of a shape memory alloy activated heat pipe-based thermal switch[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(10): 105017-105034.
- [39] SCHNEIDER D, LAUER M, VOIGT I, et al. Development and examination of switchable heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 857-865.
- [40] DECASTRO J A, MELCHER K J, NOEBE R D. System-level design of a shape memory alloy actuator for active clearance control in the high-pressure turbine[R]. AIAA 2005-3988, 2005.
- [41] MONS C M. Wall cooling device: US8561386B2[P]. 2013-10-22.
- [42] Aris M S, OWEN I, SUTCLIFFE C J. The application of shape memory alloy as vortex generators and flow control devices for enhanced convective heat transfer[R]. FEDSM2007-37080, 2007.
- [43] ARIS M S, MCGLLEN R, OWEN I, et al. An experimental investigation into the deployment of 3-D, finned wing and shape memory alloy vortex generators in a forced air convection heat pipe fin stack [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14/15): 2230-2240.
- [44] HAO W, WANG T, JIANG Y Y, et al. Pool boiling heat transfer on deformable structures made of shape-memory-alloys[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 236-247.
- [45] VILARRUBI M, MORELL G, ROSELL J, et al. Experimental characterization of a self-adaptive shape memory alloy cooling approach to regulate temperature under varying heat loads[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 632-640.
- [46] LAHOZ R, GRACIA V L, PUERTOLAS J A. Training of the two-way shape memory effect by bending in NiTi alloys[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 2002, 124(4): 397-401.
- [47] KUMAR P K, LAGOUDAS D C, ZANCA K J, et al. Thermomechanical characterization of high temperature SMA actuators[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6170: 617012.1-617012.7.
- [48] 洪伟. 3D打印可编程形状记忆负泊松比结构的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HONG Wei. Design and analysis of programming shape-memory negative-poisson-ratio structure based on 3D printing technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [49] KHAN M I, PEQUEGNAT A, ZHOU Y N. Multiple memory shape memory alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 15(5): 386-393.
- [50] 邹正平, 王一帆, 额日其太, 等. 高超声速强预冷航空发动机技术研究进展[J]. *航空发动机*, 2021, 47(4): 8-21.
- ZOU Zhengping, WANG Yifan, Eriqitai, et al. Research progress on hypersonic precooled airbreathing engine technology[J]. *Aero-*

- engine, 2021, 47(14): 8-21. (in Chinese)
- [51] EHRFELD W. Microreaction technology: industrial prospects IMRET 3: proceedings of the third international conference on microreaction technology[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2000.
- [52] WATTON B K, SYMONDS K T, SYMONDS S P. Heat exchanger and/or fluid mixing means: US6736201 B2[P]. 2004-05-18.
- [53] PRAT L, DEVATINE A, COGNET P, CABASSUD C, et al. Performance evaluation of a novel concept "open plate reactor" applied to highly exothermic reactions[J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, 28(9): 1028-1034.
- [54] DAVIJANY H B, HAYER F, PHAN K X, et al. Characteristics of an integrated micro packed bed reactor-heat exchanger for methanol synthesis from syngas[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 167(2-3): 496-503.
- [55] FERROUILLAT S, TOCHON P, VALLE D D, et al. Open loop thermal control of exothermal chemical reactions in multifunctional heat exchangers[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, 49(15/16): 2479-2490.
- [56] ISMAHILOV Z R, PUSHKAREV V V, PODYACHEVA O Y, et al. A catalytic heat-exchanging tubular reactor for combining of high temperature exothermic and endothermic reactions[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 82(1/3): 355-360.
- [57] FERROUILLAT S, TOCHON P, PEERHOSSAINI H. Micromixing enhancement by turbulence: Application to multifunctional heat exchangers[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45(8): 633-640.
- [58] GU L D, MIN J C. Airside thermal-hydraulic characteristics for tube bank heat exchangers used to cool compressor bleed air in an aero engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 939-947.
- [59] WEN Jie, HUANG Haoran, LI Haiwang, et al. Thermal and hydraulic performance of a compact plate finned tube air-fuel heat exchanger for aero-engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 920-928.
- [60] PAPADOPOULOS T, PILIDIS P. Introduction of intercooling in a high bypass jet engine[R]. ASME Paper 2000-GT-150, 2000.
- [61] YAKINTHOS K, MISSIRLIS D, PALIKARAS A, et al. Optimization of the design of recuperative heat exchangers in the exhaust nozzle of an aero engine[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(11): 2524-2541.
- [62] SAIDI A, SUNDÉN B, ERIKSSON D. Intercoolers in gas turbine systems and combi-processes for production of electricity[R]. ASME Paper 2000-GT-0234, 2000.
- [63] SALTZMAN D, BICHNEVICIUS M, LYNCH S, et al. Design and evaluation of an additively manufactured aircraft heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 254-263.
- [64] CHÁVEZ M M, GONZÁLEZ L M, VALERO E. Numerical optimization of the fin shape experiments of a heat conjugate problem surface air/oil heat exchanger (SACOC)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 182: 121971.1-121971.15.
- [65] 刘荫泽. 适用于航空发动机的一次表面换热器流动传热性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- LIU Mengze. Study on flow and heat transfer of primary surface heat exchanger for aeroengine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [66] 赵璧, 宣益民. 航空发动机间冷器及回热器发展研究综述[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 520934.1-520934.21.
- ZHAO Bi, XUAN Yimin. A review of research on intercoolers and recuperators in aero-engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 520934.1-520934.21. (in Chinese)
- [67] 张文毓. 印制电路板式换热器的研究与应用[J]. 上海电气技术, 2019, 12(4): 64-68.
- ZHANG Wenyu. Research and application of printed circuit board heat exchanger[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2019, 12(4): 64-68. (in Chinese)
- [68] 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. Flow and heat transfer characteristics of a ultra-lighted and efficient porous media heat exchanger[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 449-455. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)