

文章编号: 1674-8190(2024)04-027-12

吸气预冷发动机预冷换热芯体仿生结构设计 发展趋势与展望

王晓放¹, 董永林¹, 蒋顺林¹, 张志刚², 鲁业明¹

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116024)

(2. 北京动力机械研究所, 北京 110000)

摘要: 现有超高声速飞行器预冷组合循环发动机空气预冷器内部一般由多组微细管束组成, 工作过程中存在流致振动大、加工要求高等问题, 因此, 有必要对预冷器换热芯体进行改型设计, 并对其开展进一步的流动换热研究。本文首先分析了基于仿生分形的预冷器换热芯体改型需求; 然后梳理了仿蜂巢分形、树状分形与生物表面混合结构在新型预冷芯体强化换热上的应用, 以及仿生物体凹凸表面结构、疏水结构在降低预冷芯体内通道表面流阻、抑制结霜上的应用, 给出了3种可适用于空天领域的“筒状”仿生预冷换热芯体设计案例; 最后总结并展望了仿生微通道换热结构与预冷器换热芯体设计结合的发展前景。

关键词: 预冷器; 换热结构; 仿生分形; 强化传热; 流动减阻

中图分类号: V235.21; V231.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.04

Development trends and prospects of biomimetic structure design for precooled heat exchange cores of aspirated precooled engines

WANG Xiaofang¹, DONG Yonglin¹, JIANG Shunlin¹, ZHANG Zhigang², LU Yeming¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 110000, China)

Abstract: The air precoolers of existing pre-cooled combined cycle engines for hypersonic aircraft are generally composed of multiple sets of micro tube bundles, and there are problems such as high flow induced vibration and high processing requirements during the working process. Therefore, it is necessary to redesign the heat exchange core of the precooler and conduct further flow heat transfer research on it. The modification demand of precooler heat exchange core based on biomimetic fractals is analyzed, and its applications of honeycomb-like fractals, tree-like fractals, and mixed structures on biological surfaces are sorted out, so as to the biomimetic concave-convex surface structures and hydrophobic structures applied to reduce surface flow resistance and suppress frosting. Three design examples of “cylindrical” biomimetic precooling heat exchange cores are given, which can be applied to the aerospace field. The development prospects of combining biomimetic microchannel heat exchange structures with precooler heat exchange core design are looked forward.

Key words: precooler; heat exchange structure; biomimetic fractal; enhanced heat transfer; flow resistance reduction

收稿日期: 2023-05-21; 修回日期: 2023-10-10

基金项目: JW 基础加强项目(2021-JCJQ-JJ-0227); 中国航天基金会空天动力公益专项基金项目(KDJJ20230102001); 辽宁省应用基础研究计划(2023JH2/101600031); 国家自然科学基金(52005073)

通信作者: 鲁业明(1991-), 男, 博士, 副教授。E-mail: luyeming@dlut.edu.cn

引用格式: 王晓放, 董永林, 蒋顺林, 等. 吸气预冷发动机预冷换热芯体仿生结构设计发展趋势与展望[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 27-38.
WANG Xiaofang, DONG Yonglin, JIANG Shunlin, et al. Development trends and prospects of biomimetic structure design for precooled heat exchange cores of aspirated precooled engines[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 27-38. (in Chinese)

0 引言

轻质高效预冷换热是航空发动机高速涡轮的核心技术。超高声速飞行器是指飞行马赫数大于 5 的飞行器,具有快速响应、大航程等特点^[1],其所需的预冷组合循环发动机通过多种部件的协同工作,可以实现飞行器工作性能的提升,能够更好适用于所需飞行工况。

为了实现超高声速飞行器性能的优化,传统的涡轮发动机需要通过优化压气机部件或改善部件来流工况以获得较大的增压比,进而提高发动机的动力性能^[2]。发动机进气道出口、压气机入口处 1 000 K 以上空气总温,会极大制约压气机增压比的提高,同时,进气道附近由于高温空气导致的超高壁温,也会导致发动机的材料趋于温度耐受极限,产生热防护等问题^[3]。因此,通过在压气机前增设预冷器来降低来流空气的总温,对提高飞行器动力系统整体性能非常重要。

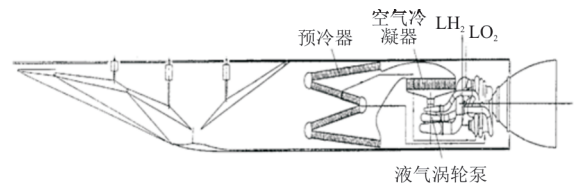
近年来,对于吸气预冷发动机预冷器部件的研究主要集中在预冷芯体传热特性、预冷器与发动机整体循环参数适配和预冷芯体管状结构抑制结霜等方面,针对预冷器换热芯体改型设计的研究较少。本文参考目前的主流微结构仿生换热器的设计方法,首先分析预冷器换热芯体的研究现状和其与仿生微通道换热结构、仿生凹凸表面等结构相结合的设计可行性,然后基于该需求进一步给出几种设计案例,最后讨论新型预冷换热芯体结构设计和性能研究可以开展的方向,以期在今后同类预冷器换热结构的开发设计提供思路。

1 吸气预冷发动机预冷部件研究现状与仿生结构设计方法

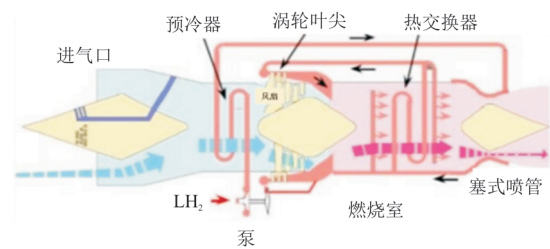
1.1 吸气预冷发动机预冷部件研究现状

吸气预冷发动机作为预冷组合循环动力发动机的典型结构之一,可以同时用于航空飞行器的动力推进系统和载人航天飞行器的第一级助推器^[4]。吸气预冷发动机国外发展时间较早,代表性的结构有 20 世纪 60 年代初美国的液化空气循环发动机 LACE 方案^[5],20 世纪 80 年代初俄罗斯的深冷空气涡轮发动机 ATRDC^[6],日本的吸气式涡轮冲压膨胀循环发动机 ATREX^[7],英国的协同吸气式火箭发动机 SABRE^[8],2001 年美国的射流预

冷 MIPCC 方案^[8]等,如图 1 所示。国内目前组合循环发动机的研究仍然处于起步阶段,虽然已经研制出了预冷空气涡轮火箭 PATR 动力系统^[9],但本质上仍是火箭发动机与冲压发动机的结合。



(a) 美国 LACE 方案^[5]



(b) 日本 ATREX 发动机循环构型^[8]

图 1 吸气预冷发动机的几种结构

Fig. 1 Several structures of aspirated pre cooled engines

对于英国 REL 公司提出的协同吸气式火箭发动机 (SABRE),其预冷器部件是一种大功率、高紧凑度微通道换热器^[8],是我国目前研制自有超高声速飞行器预冷器部件的关键参考^[10]。

根据 Chen Y M 等^[11]、李帅等^[12]、魏鑫^[13]、李晨沛等^[14]、Chang H L 等^[15]的研究,目前主流的针对预冷器芯体采用的计算与实验方案,主要基于 SABRE 发动机预冷器模型,如图 2 所示。

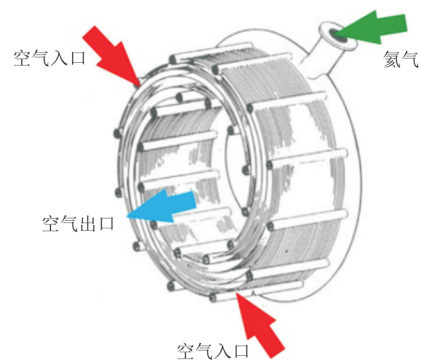


图 2 SABRE 发动机预冷器部件结构^[15]

Fig. 2 SABRE engine precooler components^[15]

SABRE 发动机预冷器可看作微细管换热器的一种,其结构由多组预冷片构成,每组预冷片包含多根错排排列的微细螺旋管,进出口分别与氦

气进气集管、出气集管相连。氦气从进气集管流经预冷片中微细管,从出气集管流出;高温空气从预冷器环外流入,横掠多组弧形预冷片中的微细管外壁,最终从预冷器内环流出。目前对该种预冷器结构的主流换热分析方式为简化逆流换热计算与修正^[4]。

对于SABRE发动机的预冷器换热结构,已有的研究主要分为两个方向。一个方向是针对其微细管束主体结构的特点,改变不同的出入口气体温度、燃料类型、燃油流量、管排数和管间距等参数,对其换热过程进行计算,进而得到管内外的气体压力损失系数、空气温降、热功率等换热参数,该方向中刘银龙等^[4]、Chen Y M等^[11]、Wei H等^[16]进行了研究;另一方向是对预冷器和压气机等部件的工作匹配特性进行研究,估算发动机吸气模式下的各部件参数,进而计算整体的循环特性,该方向由Zhang J Q等^[17]、Dong P C等^[18]、邹正平等^[19]、姚尧等^[20]进行了研究。

目前对预冷器的研究主要为上述的两个方向,而对于其芯体内部结构的设计和变革研究仍处于起步阶段^[15]。本文主要讨论的是仿生分形换热结构在预冷器总体积和质量受限、需求换热功率大、热响应速度要求极高条件下的应用。换热设计区域位于“筒状”区域,如图3所示。

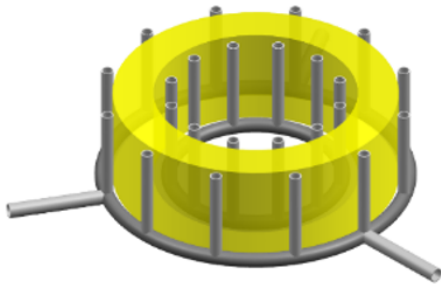


图3 预冷器换热芯体“筒状”设计区域

Fig. 3 Design area of precooler heat exchange core

1.2 预冷换热芯体仿生结构设计方法

1) 仿生学简介及其工程应用

种类繁多的生物在严酷的自然生存环境中,经长期的不断进化,形体大小、身体颜色以及性能会不断完善,由于逐渐适应生存环境的变化,从而生存和发展^[21-22]。根据进化论的观点,各种生物应该以最优或接近最优的结构来面对自身的生存环境^[23]。各种仿生设计思想与技术经过不断的发

展,形成了一个较为完善的学科,即仿生学^[24]。

在仿生学的研究和工程应用上,国内外都有较快的发展。国际上,美国针对仿生机器人的研究非常广泛^[25],英国、日本的仿生材料、仿生机械等行业也发展迅速^[26-27],我国在仿生机器人等领域的研究具有国际先进水平^[28]。

2) 高性能仿生预冷换热结构的设计方法

在预冷器部件所处的高温高压工况环境下,预冷器芯体流阻损失和换热功率的要求都高于传统换热结构所能达到的性能极限。传统的管壳式、板翅式、板式等类型换热器的增强换热方法目前已有较多的研究^[29-31],紧凑度大多集中在 $700\sim 1\,300\text{ m}^2/\text{m}^3$ 范围内^[32-33],该指标很难满足组合循环动力发动机预冷器结构更紧凑、换热功率更高、构件密度更大、在高温高压及空间受限环境中工作的特殊换热要求。目前为了实现换热紧凑度较大的换热目标,研究者一般采用微通道换热结构设计高温高压环境下的换热芯体,而微通道换热结构一般可以分为集成式微通道换热设计、点阵夹芯主动冷却微通道换热设计和印刷电路板微通道换热器设计等,换热紧凑度一般都可以达到 $1\,000\sim 3\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ 以上^[34-36]。对于仿生分形结构,由于其具有在高温高压流动环境下传热传质能力强、换热紧凑度高和构件密度小等特性^[37-38],应用于上述换热结构设计,具有较为广阔的前景。因此,将仿生分形微通道换热结构应用到预冷器的换热芯体设计中,是有较大的可能设计出符合预冷器特殊流动约束要求和流动匹配特性的换热芯体构型的。

对于目前研究较多的SABRE发动机,其预冷器简化结构可以用仿树状分形的概念进行解释^[39]。

SABRE发动机预冷器中的冷端氦气先流入总入流集管(如图2所示),继而流入圆形环路,然后分流到和微细管连接的进气集管中,随后再次分流到多束微细螺旋管中与空气进行换热,换热结束后汇总于出气集管,再从多个出气集管汇流至圆形环路,最后从总出流集管流出^[15],简化示意图参如图4所示。该种结构属于树状仿生分形结构特征在预冷器中的一种应用,可以实现降低预冷器空气侧流阻的效果。

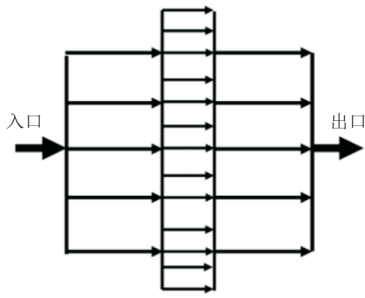


图4 SABRE发动机预冷器模型中的仿树状分形流动简化

Fig. 4 Simulated tree fractal flow simplification in the SABRE engine precooler model

由于提高换热器换热性能的原理不同,一般将仿生分形换热结构的设计方法分为强化传热结构和表面传热减阻结构两种^[21]。对于强化传热结构,可将其分为仿蜂巢分形结构与树状分形结构^[40]、仿生物表面混合结构^[41-42]等;对于表面传热流阻结构,可将其分为仿生物体表面凹凸结构减阻结构^[43]、仿鱼鳞表面结构减阻结构^[44]等。

2 仿生强化换热结构应用于预冷换热芯体设计

不同类型的仿生强化换热结构可以起到不同的增强传热效果,三维仿蜂巢分形结构的几何特性可以增加流体扰动、增强换热;仿树状分形结构可以在有限空间内实现低流阻情况下获得较好的换热效果;仿生物表面混合结构可以通过表面改性的方式实现强化表面传热过程。上述多种仿生结构都可以在预冷器芯体设计上应用。

2.1 仿蜂巢分形结构

蜂巢分形结构具有比强度和比刚度高、重量轻、内部换热面积大等优点^[45],在航空航天、医疗等领域中具有重要作用^[46]。蜂巢分形结构的六棱柱单胞结构一般呈周期性排布,可看作点阵夹芯主动冷却微通道换热结构的一种^[36]。

在化学热反应和储能系统设计领域,仿蜂巢结构具有特殊的传热和储热性能。Bhouri等^[47]利用蜂窝结构开发了一种换热器(如图5所示),研究了配备金属蜂窝结构作为热交换器的丙酸盐存储系统的性能,验证了蜂窝材料的高传热效果;Afzal等^[48]对配备了基于六边形蜂窝铝的传热增强材料(HTE)的金属氢化物储氢系统进行了设计,分析

了高紧凑度微蜂巢结构对增强换热的效果。

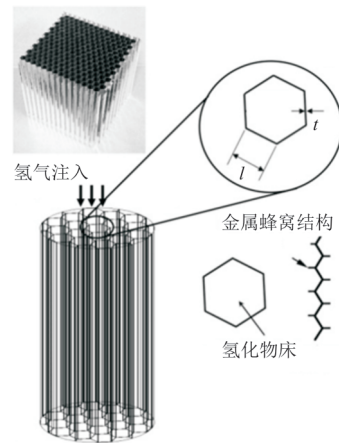


图5 蜂巢分形结构在储能系统换热器上的应用^[47]

Fig. 5 Application of honeycomb fractal heat transfer structure in energy storage design^[47]

在工业换热结构设计领域,仿蜂巢结构对于换热的影响主要通过二维密排实现。Guo Z S等^[49]通过计算分析蜂窝板的等效导热系数,研究了实心功能纸蜂窝板的传热机理,给出了较合适的工业应用单层蜂窝板厚度范围;罗遥远^[50]公开了一种基于仿生的紧凑型类蜂巢分形结构换热器芯体,如图6所示,该换热芯体换热表面均为一次换热表面,单位重量的换热量高,耐压强度高。

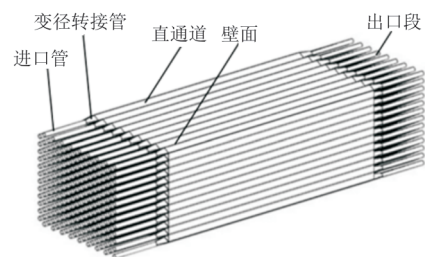


图6 蜂巢分形结构在工业领域的应用^[50]

Fig. 6 Application of honeycomb fractal heat transfer structure in industry^[50]

在航空动力装置的换热设计领域,最新一代涡轮气膜冷却技术中仿蜂巢分形结构应用较为广泛。在航空涡轮叶片的冷却技术方面,早期的大涵道比涡扇发动机的宽弦风扇叶片内部采用蜂窝式夹层填充以增强换热^[51],王楠^[52]基于仿蜂巢分形结构特点,提出了应用于涡轮叶片壳侧的蜂巢分形式冷却结构(如图7所示),并通过数值分析证明该结构能够强化涡轮叶片气膜冷却并降低流阻。

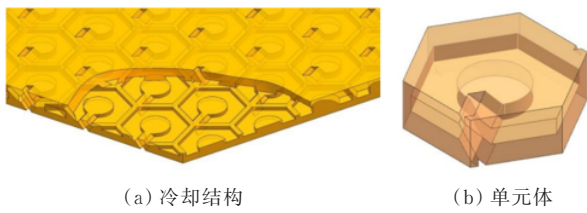


图 7 涡轮叶片蜂巢式冷却结构及单元体^[52]
Fig. 7 Turbine blade honeycomb cooling structure and unit body^[52]

在电子器件微结构换热设计领域, Zhao D 等^[53]提出了一种基于液冷的棱柱形锂电子电池热管理系统, 并设计了一种带有蜂窝流道的液体冷却板, 说明了蜂巢通道可以提高电池模块的温度均匀性; 李锦峰等^[54]针对高热流密度的电子设备散热问题, 设计了一种具有仿蜂巢蒸汽通道的复合吸液芯结构(如图 8 所示), 通过数值与实验验证了该结构的强化换热特性。

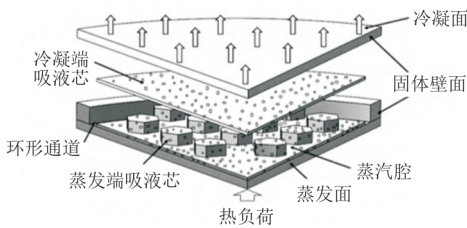


图 8 蜂巢分形换热结构在电子微结构上的应用^[54]
Fig. 8 Application of honeycomb fractal heat transfer structure in electronic microstructure^[54]

对仿蜂巢分形结构的强化换热特性进行总结, 可以构造出多种可应用于预冷换热芯体的新结构。一种设计结构举例如图 9 所示, 该结构将蜂巢平面密排的特性应用于预冷器芯体的“筒状”结构中。

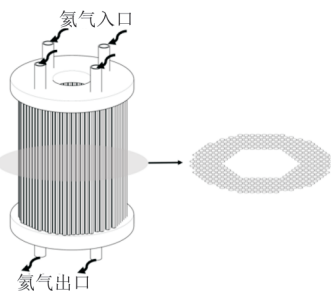


图 9 一种基于仿蜂巢二维平面密排结构的预冷换热芯体结构设计例
Fig. 9 An example of the structural design of a pre-cooled heat exchange core based on a two-dimensional planar closely arranged structure mimicking a honeycomb

截面为六边形的直微细管, 管内流通过由一侧入流集管分流而来的冷流体, 微细管外部流通热空气, 这种结构可以有效实现外部来流高温空气的快速温降。

2.2 仿树状分形结构

分形理论被广泛用于研究由树干/树冠形线、叶脉分布和生物神经网络等结构而受启发得到的仿生分形树状结构上。参考仿生树状分形结构对预冷芯体换热结构进行设计, 有助于设计出换热较强、流动阻力较小的换热装置^[55]。

在仿树状分形设计的传热传质理论研究上, Tarasov^[56]提出了传热方程的推广式, 从稳态热流计算角度描述了分形流动的换热特征; Chen W J 等^[57]将参数化建模方法与分形通道相结合, 构建了 Y 形、V 形和 T 形分形通道的统一参数模型(如图 10 所示), 揭示了分形通道类型对通道换热性能的影响情况, 并得出了 V 形通道峰值温度和温差最低的结论。

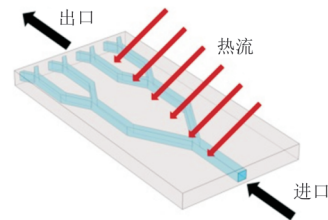
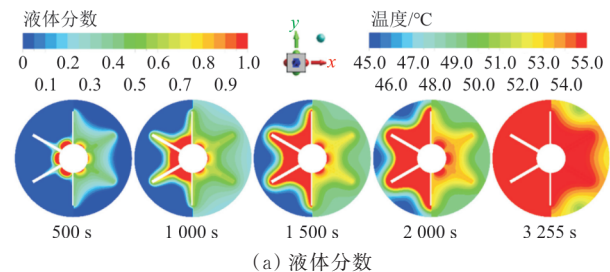


图 10 矩形板上构建的一种分形模型^[57]
Fig. 10 A fractal model constructed on a rectangular plate^[57]

在仿树状分形设计的工业换热应用上, 仿树状分形结构常用于强化传热。Shi S 等^[58]研究了树状分形翅片作为延伸面在换热结构中的传热强化效果, 并与传统矩形翅片进行了比较验证, 如图 11 所示; Yin B F 等^[59]在甲醇重整反应流道设计过程中引入了分形网络结构, 探讨了分形反应通道参数对甲醇重整反应器换热性能的提升情况。



(a) 液体分数

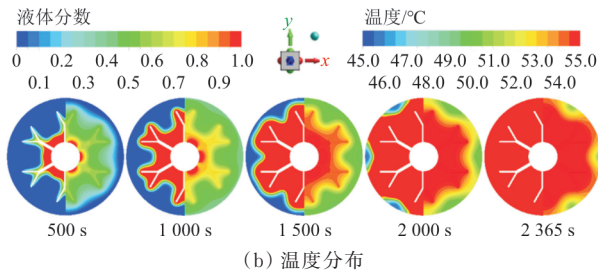


图 11 矩形和分形翅片 LHEs 充电过程中液体分数和温度分布对比^[58]

Fig. 11 Liquid fraction and temperature distribution for the rectangular and fractal fins LHEs in charging process^[58]

在仿树状分形设计的微通道换热器研究上, Zhang G H 等^[60]采用分形理论对矩形通道中截断肋的传热强化、流动特性进行了实验测试和数值研究,验证了采用分形理论设计的七种截头肋箱都能在很大程度上提高整体热性能,如图 12 所示; Wang H L 等^[61]使用遗传算法优化了分形微通道的几何结构,解释了康托尔分形挡板结构的存在加强了局部传热的机理;韩宾^[62]基于哺乳动物肺结构,设计了具有分形特征、结构紧凑,抗破坏强度高、工作降压降低的换热器。

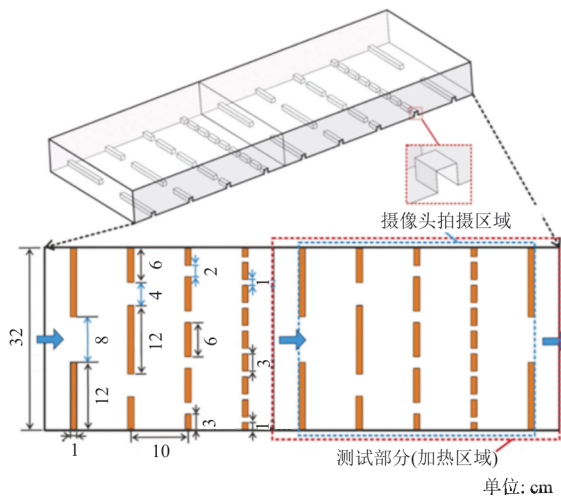


图 12 树状分形结构在微通道换热上的研究^[60]

Fig. 12 Research on heat transfer in microchannels with tree fractal structure^[60]

在预冷器芯体设计中,目前仿树状分形结构的应用主要体现在类似于 SABRE 发动机预冷器的流道分形数量上,具体形式如图 2~图 3 所示。

2.3 仿生物表面混合结构

仿生物表面混合结构在强化传热上主要应用于滴状冷凝和薄膜冷凝等相变传热过程,一般通

过换热表面微尺度改性的方式实现流经固体表面的空气快速冷却,进而强化换热。

应用于强化相变传热过程的仿生物表面混合结构的开发研究目前也较为广泛。Hou Y M 等^[63]设计了一种具有高润湿度的仿生混合表面,该表面优化后混合表面传热系数可以提高 63% 左右; Park 等^[64]开发了一种基于纳米比亚沙漠甲虫、仙人掌和猪笼草表面结构的合成表面以强化冷凝过程,解释了相变传热和表面凸曲率的关系,如图 13 所示。

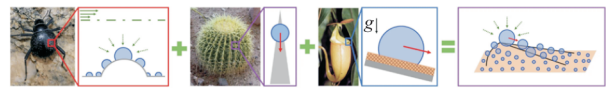


图 13 基于多种生物体表开发的强化相变换热结构^[64]

Fig. 13 Enhanced phase-change heat transfer structure developed based on multiple biological surfaces^[64]

对于仿生物体表面强化传热,借鉴其表面改性的特点,对预冷器内通道表面结构进行改进,提高内流道换热接触面积并增强扰动,可以增强微细管束预冷芯体的换热能力。结合上述仿生强化换热特点,同样可以设计得到多种新型预冷结构。一种将预冷器传统螺旋管结构更改为仿蛇形的多层微细管束径向偏置预冷结构,如图 14 所示,该结构可以实现冷流体更长时间的滞流,进而实现每根换热微细单管传热系数的提高。

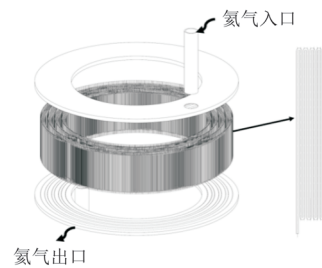


图 14 一种通过延长管路实现高传热系数的微细管预冷芯体设计例^[65]

Fig. 14 Design example of a micro tube pre-cooled core with high heat transfer coefficient achieved by extending pipelines^[65]

根据上述分析,对仿生强化换热结构在预冷器换热芯体设计的应用方式进行归纳,仿蜂巢分形结构和仿叶脉、肺泡等树状分形结构在流动强化换热或减阻等多个方面都有较好的性能,可以实现换热结构的换热功率、传热系数等性能指标的增加,可以较好满足预冷器高性能换热芯体结

构改型设计要求;仿生物表面混合结构主要应用于增强换热表面相变传热过程,其通过表面改性实现扰流增强,强化流经固体表面热空气的冷却,进而提高微细管束预冷器内部芯体的换热能力。

3 仿生流动减阻结构应用于预冷换热芯体设计

仿生流动减阻结构一般通过研究自然界动植物表面形态,设计与之相似的非光滑表面,以获得其减阻特性^[21]。

3.1 仿鱼鳞结构

鱼类作为仿生学的重要研究对象,其优良的水下运动能力可以对降流阻换热结构设计有较大帮助^[66],对于鲨鱼皮表面,减阻效率达到 12% 以上,如图 15 所示。

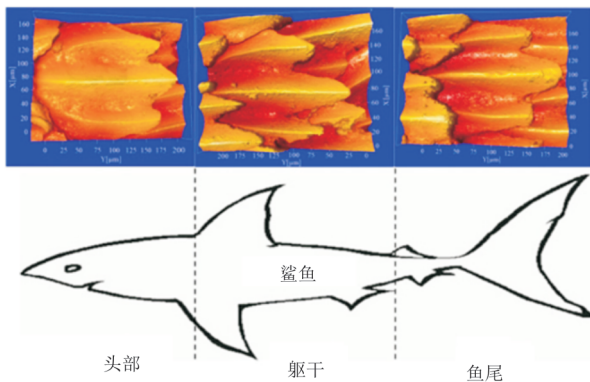
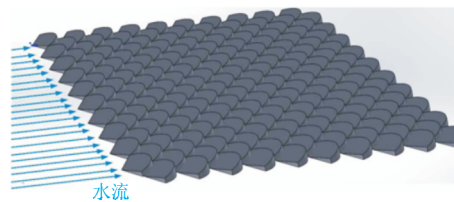
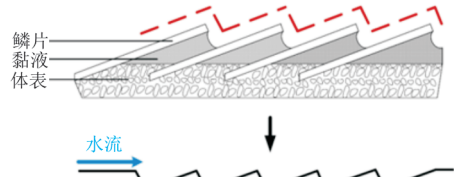


图 15 鲨鱼表面的鳞片结构^[66]
Fig. 15 Scale structure of shark surface^[66]

仿鱼鳞结构应用于促进换热表面减阻十分常见,并一般伴随强化换热过程。张忠彬^[67]通过分析鱼鳞结构的排布特点和形态特征,获得了不同结构的仿生结构(如图 16 所示),并对其减阻机理进行了实验和数值分析,实验结果符合表面减阻的预期;郭丁彰等^[68]基于鲨鱼皮结构和球凸结构,提出了一种带劈缝的球凸形微通道结构单元,研究表明该结构具有良好的节能减阻性能;Dey 等^[69]对微通道底面新型鱼鳞仿生结构强化传热的流体流动和传热特性进行了研究,结果表明,与普通微通道相比,类似鱼鳞的生物激励表面采用小倾斜角度可以减小表面流动阻力,但大的倾斜角度会在强化表面传热的同时增大一部分可接受的压降。



(a) 鱼鳞体表鳞片三维模型



(b) 鱼类体表剖面示意图及斜沟槽仿生鱼鳞模型提取

图 16 仿鱼鳞结构在换热表面上促进减阻的应用^[67]
Fig. 16 Application of fish scale structure on heat exchange surface to promote drag reduction^[67]

3.2 仿生物体表面凹凸结构和疏水结构

生物体的身体表面一般是凹凸面,流经的流体通常会产生二次流,与主流进行掺混,对流经流体表面流动阻力产生影响。生活在土壤中的粪甲虫、陆地的蛇类等物种,体表一般都有凹凸结构^[43],用于减少移动行进中受到的表面阻力,如图 17 所示。荷叶表面是典型的疏水结构,它的表层为凸起的分层微纳米复合结构,这种多层结构可以使气液接触取代部分固液接触,减小液珠表面流动阻力,进而减少液珠附着^[70]。

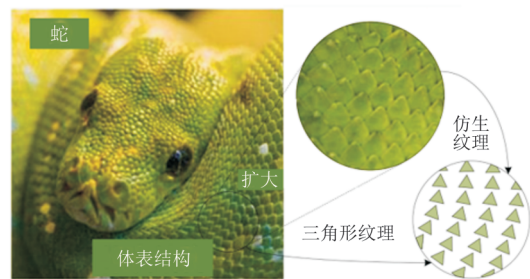


图 17 蛇类身体表面的凹凸结构^[43]

Fig. 17 The concave and convex structures on the body surface of snakes^[43]

适当的仿生物体表面凹凸结构常用于工业领域表面减阻优化。Palanivendhan 等^[71]提出了一种利用仿生物体表面凹凸结构改善商用车表面空气动力学参数的模型,该模型减小了商用车工作过程中的压力损失;Xu M H 等^[72]对仿生物体表面凹凸结构的凹坑通道的纵横比、凹坑深度和凹坑间距等几何参数进行了设定和分析,如图 18 所示,结

果表明,凹凸的表面降低了壁面附近速度梯度,进而减小了流阻。

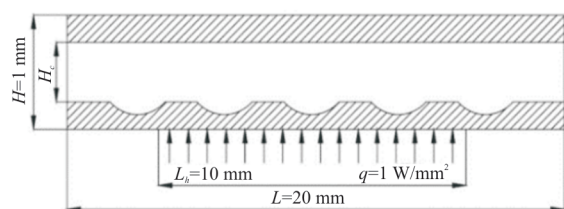


图 18 微通道上的凹槽设计^[72]

Fig. 18 Groove design on microchannel^[72]

某些仿生物体表面疏水结构具有降低流阻的特点,也常用于工业领域。Chen S H等^[73]结合微槽骨架和超疏水纳米涂层,得到了优化的微槽结构,这种结构被证明不仅具有更低的压降热阻,而且可以动态释放更多的裸露位置进行能量交换;Zhang Q等^[74]对不同样品疏水表面结构进行减阻机理研究,发现特定的样品可以较稳定产生密封气膜,减小流动阻力,进而减少表面液滴附着。

对上述仿鱼鳞体表结构和仿生物体表面凹凸结构减阻机理进行归纳,可以提取生物体表面凹凸的结构特征,将预冷器换热芯体设计为具有凹凸不平通道的微通道换热结构,以实现在强化换热的同时,降低流动阻力;对疏水表面减阻方式进行分析,可以通过对预冷器内流体流经的通道表面施加疏水结构,抑制来流空气相变液珠的聚集,进一步抑制结霜。归纳后重新构建的一种

仿生物体表面凹凸结构设计的预冷器芯体,高温空气流经预冷器时,通过控制流道每层层间凹槽相对高度,可以控制流动阻力和换热性能,预冷器整体结构和任一截面上的流体流经方式如图 19 所示。

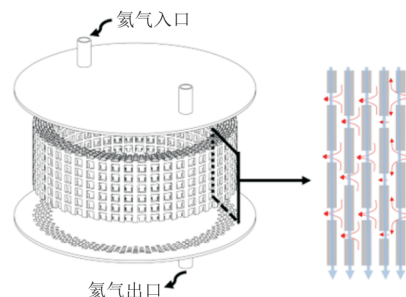


图 19 仿生物体凹凸表面结构设计的预冷换热器及其截面流道

Fig. 19 Precooler heat exchanger with concave-convex surface structure design mimicking biological body and its cross-sectional flow channel

综上所述,仿生流动减阻结构在预冷换热芯体设计应用展望方面,仿鱼鳞表面、生物表面凹凸结构都可以应用于预冷器内部芯体设计,以实现流动减阻;利用疏水性较强的仿生微结构表面对预冷器内部进行表面改性,也可以减少来流空气液化液珠流动聚集,实现结霜抑制,降低流阻。

对仿生强化换热结构与仿生流动降阻结构在预冷器换热芯体设计应用前景进行总结,如表 1 所示。

表 1 不同仿生预冷换热芯体设计方式总结
Table 1 Summary of different bionic heat transfer processes

目标	仿生方法	设计优点	预冷芯体设计方向	预冷器芯体应用实例
强化传热	仿蜂巢分形结构	1) 换热结构紧凑度高、结构强度高 2) 三维结构易于变形,填充设计适应性强	1) 预冷换热芯体的内部整体结构设计和重构 2) 强化整体预冷芯体换热能力	图 9
	仿树状分形结构	1) 传热性能较好,压力损失小 2) 结构多样,易于变形,设计适应性强		图 2,图 4
	仿生物体表面混合结构	1) 适用大热流密度、大温差换热器 2) 可以实现相变换热,大幅提高换热表面对流系数	1) 改进预冷换热芯体通道表面结构 2) 增强表面扰流强化预冷芯体换热	图 14
降低流阻	仿鱼鳞结构 仿生物体表面凹凸结构及疏水结构	1) 换热表面流阻低 2) 可以加速仿生表面液珠聚集和流动以减小流阻	1) 改进预冷芯体表面扰流情况,降低空气流动阻力,抑制来流空气在通道中结霜 2) 可迁移到点阵式微通道预冷结构设计	图 19

4 研究展望

除本文分析中构建的设计案例外,目前已有较多的科研单位提出了新型的吸气预冷发动机预冷器核心部件设计方法,并对结构进行了公开^[75-76]。仿生强化传热结构的种类多样且易于进行表面改性,将其和预冷芯体所需的“筒状”环形换热结构相结合,具有广阔的应用前景;仿生减阻结构的设计可以应用在构型改进和表面改性方面,其表面凹凸结构对于点阵式微通道换热芯体设计具有较强的借鉴性,也是未来航空动力装置轻质高效换热设计的重要研究方向。

基于上述对仿生换热结构设计研究进展的分析,在航空动力装置预冷换热部件的强化高效传热设计和降低流动阻力设计两个方面,提出如下四方面展望。

1) 针对航空发动机高速发展带来的预冷器换热芯体设计需求,研究其换热芯体在应用仿蜂巢结构/树状分形结构和仿生物表面混合结构等多个强化换热方式后的传热性能改善情况,应用仿鳞片结构和仿生物体表面凹凸结构设计思想所得到的微通道预冷换热结构减阻传热性能,以及应用仿生物体表面疏水结构所得预冷器芯体通道表面减阻和抑制结霜性能,提出全流程化的仿生预冷换热结构设计方法。

2) 对预冷器芯体强化传热和降低流阻中的仿生分形结构开发和内通道表面改性两个方面进行宏观—微观的跨尺度结合,研究降低新型仿生分形预冷结构的加工复杂度,提高其在工程上的应用价值。

3) 将上述仿生设计过程进一步与仿生学结合,明确优化参数和指标,建立可以较为准确表征仿生结构特点与预冷芯体换热效果关系的传热性能分析方法。

4) 根据实际需求,开发基于拓扑优化、构型理论等方法的仿生换热结构构型设计流程,拓展新的预冷换热结构设计方法。

5 结束语

本文分析了超高声速飞行器预冷组合循环动力发动机预冷器换热芯体结构和仿生换热结构相结合设计的需求,分析了仿生换热结构在预冷芯体上应用的可行性,并给出了3组参考的设计

案例。

未来基于仿生原理和分形流动模型,对微尺度、高流通面积、低流阻、大温差的新型仿生预冷芯体微通道换热结构进行传热机制分析和优化设计,可以提高预冷器部件的整体性能和可靠性,对超高声速飞行器的研发意义重大。

相信在不久的将来,我国在预冷器高效传热结构方面的研究会更加完整,我国超高声速飞行器设计行业也会迎来更广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 陈浩宇,王彬文,宋巧治,等. 高超声速飞行器热颤振研究现状与展望[J]. 航空工程进展, 2021, 13(1): 9-27.
CHEN Haoyu, WANG Binwen, SONG Qiaozhi, et al. Research progress and prospect of thermal flutter of hypersonic vehicles[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 13(1): 19-27. (in Chinese)
- [2] VERSTRAETE D, HENDRICK P. Hydrogen fueled precooled airbreathing engines for hypersonic aircraft and spaceplanes[C]// International Symposium on Air Breathing Engines. US: IEEE, 2011: 1-9.
- [3] 罗佳茂,杨顺华,母忠强,等. 预冷型组合循环发动机技术[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 190-207.
LUO Jiamao, YANG Shunhua, MU Zhongqiang, et al. Technology analysis of pre-cooled combined-cycle engine[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(1): 190-207. (in Chinese)
- [4] 刘银龙,徐国强,付衍琛,等. 高超声速发动机碳氢燃料预冷器换热特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 208-217.
LIU Yinlong, XU Guoqiang, FU Yanchen, et al. Heat transfer characteristics of a hydrocarbon fuel precooler for hypersonic engines[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(1): 208-217. (in Chinese)
- [5] VARVILL R, BOND A. A comparison of propulsion concepts for SSTO reusable launchers[J]. Journal of British Interplanetary Society, 2003, 56(3/4): 108-117.
- [6] WANG Z G, WANG Y, ZHANG J Q, et al. Overview of the key technologies of combined cycle engine precooling systems and the advanced applications of micro-channel heat transfer[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 39: 31-39.
- [7] SATO T, TANATSUGU N, NARUO Y. et al. Development study on ATREX engine[J]. Acta Astronautica, 2000, 47(11): 799-808.
- [8] DAI J, ZUO Q R. Key technologies for thermodynamic cycle of precooled engines: a review[J]. Acta Astronautica, 2020, 177: 299-312.
- [9] 张蒙正,南向谊,刘典多. 预冷空气涡轮火箭组合动力系统原理与实现途径[J]. 火箭推进, 2016, 42(1): 6-12.
ZHANG Mengzheng, NAN Xiangyi, LIU Dianduo. Princi-

- ples and realizing ways of combined power system for pre-cooling air turbo rocket [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2016, 42(1): 6-12. (in Chinese)
- [10] 张友法, 张文文, 郑日恒, 等. 高超声速组合发动机预冷器抗结霜涂层技术研究 [J]. *推进技术*, 2017, 38(2): 463-470.
ZHANG Youfa, ZHANG Wenwen, ZHENG Riheng, et al. Research of anti-frosting coating for pre-cooler of hypersonic combined propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 463-470. (in Chinese)
- [11] CHEN Y M, ZOU Z P, LIU H X, et al. Verification at Mach 4 heat conditions of an annular microtube-typed pre-cooler for hypersonic precooled engines [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117742.
- [12] 李帅, 马同玲, 刘洪涛, 等. SABRE 预冷器结构参数对其性能影响的数值分析 [J]. *推进技术*, 2022, 43(4): 257-264.
LI Shuai, MA Tongling, LIU Hongtao, et al. Numerical analysis of effects of pre-cooler structure parameter on its performance in SABRE [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4): 257-264. (in Chinese)
- [13] 魏鑫. 吸气预冷发动机热力循环及预冷器传热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WEI Xin. Study on thermal cycle of air-breathing precooling engine and heat transfer characteristics of pre-cooler [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [14] 李晨沛, 王跃社, 王海军, 等. 复合发动机预冷器换热特性研究 [J]. *工程热物理论*, 2017, 38(4): 811-816.
LI Chenpei, WANG Yueshe, WANG Haijun, et al. Numerical analysis of heat transfer in pre-cooler for hybrid air-breathing rocket engines [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(4): 811-816. (in Chinese)
- [15] CHANG H L, LIAN J, MA T, et al. Design and optimization of an annular air-hydrogen pre-cooler for advanced space launchers engines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 241: 114279.
- [16] WEI H, GUO X F, LI Z D, et al. Experimental investigation on effects of freestream humidity on the frosting and defrosting characteristics of microtube pre-cooler [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118104.
- [17] ZHANG J Q, WANG Z G, LI Q L. Thermodynamic efficiency analysis and cycle optimization of deeply precooled combined cycle engine in the air-breathing mode [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 138: 394-406.
- [18] DONG P C, TANG H L, CHEN M, et al. Overall performance design of paralleled heat release and compression system for hypersonic aeroengine [J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 36-46.
- [19] 邹正平, 王一帆, 杜鹏程, 等. 强预冷发动机新型热力循环布局及性能分析 [J]. *火箭推进*, 2021, 47(6): 62-75.
ZOU Zhengping, WANG Yifan, DU Pengcheng, et al. Thermodynamic performance analysis of a novel precooled airbreathing engine layout [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(6): 62-75. (in Chinese)
- [20] 姚尧, 王占学, 张晓博, 等. 液氢预冷吸气式发动机建模与循环特性分析 [J]. *推进技术*, 2022, 43(4): 26-36.
YAO Yao, WANG Zhanxue, ZHANG Xiaobo, et al. Modeling and cycle characteristics analysis of liquid hydrogen pre-cooled air-breathing engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4): 26-36. (in Chinese)
- [21] 李娟, 朱章钰, 翟昊, 等. 基于仿生学的强化传热与减阻技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(5): 2375-2388.
LI Juan, ZHU Zhangyu, ZHAI Hao, et al. Research progress on heat transfer enhancement and surface drag reduction techniques based on bionics [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(5): 2375-2388. (in Chinese)
- [22] 张春林, 赵自强. 仿生机械学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
ZHANG Chunlin, ZHAO Ziqiang. *Biomimetic mechanics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese)
- [23] 张永存. 多孔材料传热特性分析与散热结构优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
ZHANG Yongcun. Heat transfer performance of cellular materials and optimization of heat dissipation structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [24] 崔福斋, 郑传林. 仿生材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
CUI Fuzhai, ZHENG Chuanlin. *Biomimetic materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [25] ASBECK A T, KIM S, CUTKOSKY M R, et al. Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(12): 1165-1179.
- [26] JABRAN A, PEACH C, ZOU Z M, et al. Biomechanical comparison of screw-based zones of a spatial subchondral support plate for proximal humerus fractures [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2019, 233(3): 372-382.
- [27] MATSUNO F, SUENAFGA K. Control of redundant 3D snake robot based on kinematic model [C] // 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. US: IEEE, 2003: 2061-2066.
- [28] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 27-44.
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 27-44. (in Chinese)
- [29] KÜCÜK H. The effect of minichannels on the overall heat transfer coefficient and pressure drop of a shell and tube heat exchanger: experimental performance comparison [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 188: 108217.
- [30] XU P, WEN J, WANG S, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer performances of serrated and wavy fins in plate-fin heat exchanger for hydrogen liquefaction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023(2): 1-6.
- [31] GUNGOR S. Experimental comparison on energy consump-

- tion and heat transfer performance of corrugated H-type and L-type brazed plate heat exchangers[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 144: 106763.
- [32] 冉霜叶. 基于流动控制的高性能换热器设计与强化换热研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
RAN Shuangye. Design and study on heat transfer enhancement of high performance heat exchanger based on flow control[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021. (in Chinese)
- [33] 郑文琦. 板翅式和管翅式烟气换热器性能比较分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
ZHENG Wenqi. Performance comparative analysis of plate-fin and tube-fin flue gas heat exchangers[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [34] 陈悟. 集成式微通道换热器理论和实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
CHEN Wu. Theoretical and experimental study on integrated micro-channel heat exchanger [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [35] 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 exchangers [J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2019, 12(4): 64-68. (in Chinese)
- [36] 袁运飞, 廖俊, 宋佳文, 等. 点阵夹芯主动冷却结构发展现状与展望[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(6): 13-25.
YUAN Yunfei, LIAO Jun, SONG Jiawen, et al. Development status and prospect of lattice sandwich active cooling structure [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(6): 13-25. (in Chinese)
- [37] WANG Z, LI G, ZHANG Y, et al. Flow and heat transfer investigation of supercritical carbon dioxide in a novel biomimetic honeycomb fractal gas cooler of transcritical CO₂ heat pumps [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 37: 101533.
- [38] CHEN G, CHUKWUNENYE N, JONES G F, et al. Biomimetic structures by leaf vein growth mechanism for pool boiling heat transfer enhancements[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 155: 119699.
- [39] 张志刚. 一种轻质高效预冷器低流阻调控方法: CN 115638674A[P]. 2022-10-24.
ZHANG Zhigang. A low flow resistance control method for lightweight and efficient precooler: CN 115638674A [P]. 2022-10-24. (in Chinese)
- [40] ZHU Z Y, LI J, PENG H, et al. Nature-inspired structures applied in heat transfer enhancement and drag reduction[J]. *Micromachines*, 2021, 12(6): 656.
- [41] WANG X, ZENG J, YU X, et al. Superamphiphobic coatings with polymer-wrapped particles: enhancing water harvesting [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(10): 5426-5433.
- [42] LIN Y T, TING Y S, CHEN B Y, et al. Bionic shark skin replica and zwitterionic polymer brushes functionalized PD-MS membrane for anti-fouling and wound dressing applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 391: 125663.
- [43] WANG Z Q, FU Q, WOOD R J K, et al. Influence of bionic non-smooth surface texture on tribological characteristics of carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone under seawater lubrication [J]. *Tribology International*, 2020, 144: 106100.
- [44] DOMEL A G, SAADAT M, WEAVER J C, et al. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2018, 15: 1-11.
- [45] KODE J M, SHAIKH M, KANDASUBRAMANIAN B. Bionic prototyping of honeycomb patterned polymer composite and its engineering application [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, 57(17): 1828-1844.
- [46] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 227: 109393.
- [47] BHOURI M, GOTETTE J, HARDY B J, et al. Honeycomb metallic structure for improving heat exchange in hydrogen storage system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(11): 6723-6738.
- [48] AFZAL M, SHAEMA P. Design and computational analysis of a metal hydride hydrogen storage system with hexagonal honeycomb based heat transfer enhancements: part A [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(24): 13116-13130.
- [49] GUO Z S, XU Y, CHEN J X, et al. Heat transfer characteristics of straw-core paper honeycomb plates II: heat transfer mechanism with hot-above and cold-below conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117165.
- [50] 罗遥远. 基于仿生的紧凑型类蜂巢结构换热器芯体及换热器: CN 111207609A[P]. 2020-05-29.
LUO Yaoyuan. Compact honeycomb like heat exchanger core and heat exchanger based on bionics: CN 111207609A [P]. 2020-05-29. (in Chinese)
- [51] 张晟, 陈伟, 高德平. 铝蜂窝夹层结构抗冲击性能试验与数值研究[J]. *粘接*, 2022, 49(8): 142-145.
ZHANG Sheng, CHEN Wei, GAO Deping. Experimental and numerical study on impact resistance of aluminum honeycomb sandwich structure[J]. *Adhesion*, 2022, 49(8): 142-145. (in Chinese)
- [52] 王楠. 涡轮叶片蜂巢式冷却流动换热机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
WANG Nan. Study on flow and heat transfer mechanism of honeycomb-like cooling of turbine blade[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [53] ZHAO D, LEI Z G, AN C. Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 218: 119324.
- [54] 李锦峰, 遇言, 董健, 等. 仿蜂巢复合吸液芯均热板的热工水力性能[J]. *节能技术*, 2022, 40(3): 195-200, 289.
LI Jinfeng, YU Yan, DONG Jian, et al. Thermal-hydraulic performance of bionic honeycomb composite wick vapor

- chamber [J]. *Energy Conservation Technology*, 2022, 40 (3): 195-200, 289. (in Chinese)
- [55] 齐东旭. 分形及其计算机生成[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- QI Dongxu. Fractal and its computer generation[M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [56] TARASOV V E. Heat transfer in fractal materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 427-430.
- [57] CHEN W J, MEN Z C, LIU S T. Fast parameterized fractal modeling of active heat transfer channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118297.
- [58] SHI S, NIU J, WU Z, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer enhancement of vertical triplex tube heat exchanger with fractal fins for latent thermal energy storage [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 198: 123386.
- [59] YIN B F, CHEN Z L, XU S, et al. Effects of fractal network channel on heat and mass transfer in methanol steam reforming [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 82: 34810-34824.
- [60] ZHANG G H, SUNDEN B, XIE G N. Combined experimental and numerical investigations on heat transfer augmentation in truncated ribbed channels designed by adopting fractal theory [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 121: 105080.
- [61] WANG H L, CHEN X Y. Numerical simulation of heat transfer and flow of Al_2O_3 -water nanofluid in microchannel heat sink with cantor fractal structure based on genetic algorithm[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 46: 339927.
- [62] 韩宾. 面向增材制造的肺泡仿生超级换热器结构及其制备方法: CN 202110925587. 7[P]. 2021-08-12.
- HAN Bin. Structure and preparation method of alveolar bionic super heat exchanger for additive manufacturing: CN 202110925587. 7[P]. 2021-08-12. (in Chinese)
- [63] HOU Y M, YU M, CHEN X M, et al. Recurrent filmwise and dropwise condensation on a beetle mimetic surface[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(1): 71-81.
- [64] PARK K C, KIM P, GEINTHAL A, et al. Condensation on slippery asymmetric bumps [J]. *Nature*, 2016, 531: 78-82.
- [65] 鲁业明. 一种径向偏置排布的预冷器: CN 217002071U [P]. 2022-07-19.
- LU Yeming. A precooler with radial bias layout: CN 217002071U[P]. 2022-07-19. (in Chinese)
- [66] LUO Y H, SONG W, WANG X D. Water repellent/wetting characteristics of various bio-inspired morphologies and fluid drag reduction testing research[J]. *Micron*, 2016, 82: 9-16.
- [67] 张忠彬. 仿生鱼鳞微结构制造及其减阻性能研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- ZHANG Zhongbin. Research on manufacturing of bionic fish scale microstructure and drag reduction [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [68] 郭丁彰, 黄心悦, 李平. 布置带劈缝球凸结构微通道热沉内流动和换热特性[J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1526-1534.
- GUO Dingzhang, HUANG Xinyue, LI Ping. Flow structure and heat transfer characteristics of microchannel heat sinks with split protrusion [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1526-1534. (in Chinese)
- [69] DEY P, HEDAU G, SAHA S K. Experimental and numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a bio-inspired surface enriched microchannel[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 135: 44-60.
- [70] SUN J Y, BHUSHAN B. Nanomanufacturing of bio-inspired surfaces [J]. *Tribology International*, 2019, 129: 67-74.
- [71] PALANIVENDHAN M, CHANDRADASS J, SARAVANAN C, et al. Reduction in aerodynamic drag acting on a commercial vehicle by using a dimpled surface[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 7072-7078.
- [72] XU M H, LU H, GONG L, et al. Parametric numerical study of the flow and heat transfer in microchannel with dimples [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 76: 348-357.
- [73] CHEN S H, WANG R, WU F F, et al. Copper-based high-efficiency condensation heat transfer interface consisting of superhydrophobic hierarchical microgroove and nancone structure [J]. *Materials Today Physics*, 2021, 19: 100407.
- [74] ZHANG Q, WANG Y, QIN Z, et al. Study on surface fabrication and drag reduction performances of gradient hydrophobic aluminum alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109379.
- [75] 韩芳明. 一种用于航空发动机进气系统的预冷器核心: CN 116335829A [P]. 2023-06-27.
- HAN Fangming. A precooler core for aircraft engine intake system: CN 116335829A [P]. 2023-06-27. (in Chinese)
- [76] 龙西亭. 一种用于航空发动机的预冷器: CN 115597419B [P]. 2023-03-28.
- LONG Xiting. A precooler for aircraft engines: CN 115597419B [P]. 2023-03-28. (in Chinese)

(编辑: 丛艳娟)