

航空航天冷却微通道 制造技术及应用*

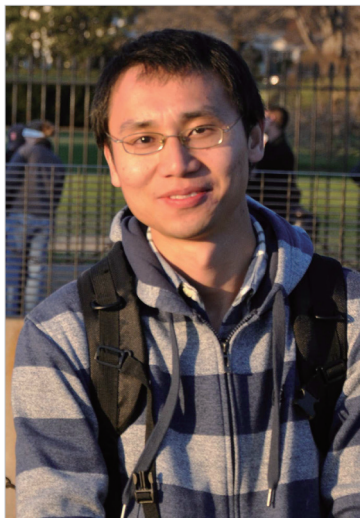
邓大祥^{1,2}, 陈小龙¹, 谢炎林¹, 黄青松¹

(1. 厦门大学机电工程系, 厦门 361005;
2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

[摘要] 微通道换热器具有高传热性能、结构紧凑、质量轻、体积小、易于一体化封装等特点,是解决航空航天发动机散热冷却难题的理想选择。首先介绍了微通道的主要制造技术,对其制造原理及特点进行了分析比较;然后介绍了微通道冷却技术在航空航天领域中的应用,主要分析了其在燃烧室壁面冷却、预冷器系统以及涡轮叶片冷却等方面的应用,并对微通道冷却技术运用于航空领域所面临的挑战进行了展望。

关键词: 航空发动机; 微通道; 冷却; 加工

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.016



邓大祥

厦门大学机电工程系副教授,主要从事功能结构微细制造、高效散热系统设计与制备、燃烧动力系统先进冷却等方面的研究。上银机械优秀博士论文铜奖获得者,SCI、EI 收录论文 40 余篇。

随着现代航空航天动力系统向高推重比、高飞行马赫数等方向发展,发动机承受的热负荷剧增。为了保证发动机的可靠性和寿命,发展高效快速的主动冷却技术至关重要。微通道换热器被认为是解决发动机散热冷却难题的理想选择^[1],其由核心散热单元——微通道结构组成,通过内部流过的冷却工质以强迫对流的方式实现热量的迅速散失。微通道换热器具有高比表面积、高传热性能、易于一体化封装、结构紧凑、质量轻、体积小等显著优点。

随着微通道换热器在航空航天、电子、光电、化工等领域的应用推广,微通道加工技术引起了研究界和工业界的广泛关注。当前,微通道主要采用刻蚀、LIGA 加工、特种加工、微细切削加工、烧结加工、3D 打印等技术实现其制备成形。根据微通道基底的不同材料,如铜铝金属^[2-3]、聚合物^[4-5]、陶瓷^[5-6]以及半导体硅^[7-8],采用不同微通道加工技

术。本文在分析各加工技术的特点以及研究现状基础上,对微通道冷却技术在航空航天领域的应用进行分析与展望。

微通道加工技术

1 刻蚀

刻蚀是一种通过溶液、反应离子或者其他方式来剥离、去除材料的加工技术。刻蚀技术可分为湿法刻蚀(Wet Etching)和干法刻蚀(Dry Etching),其工艺流程如图 1 所示^[9]。湿法刻蚀分为各向同性刻蚀和各向异性刻蚀,区别主要有:(1)腐蚀速率。各向异性刻蚀腐蚀速率要比各向同性刻蚀慢,约为 $1 \mu\text{m}/\text{min}$ ^[10]。(2)工件形状的控制。各向同性刻蚀缺乏对工件形状的控制,在微细加工生产中难以达到技术要求。与湿法化学蚀刻相比,干法刻蚀则是利用等离子体进行薄膜刻蚀技术^[11]。干法刻蚀具有很多优点,如对微结构几何形状的限制减少,结构分辨率提高,材

* 基金项目: 国家自然科学基金(51405407); 流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-201504)。

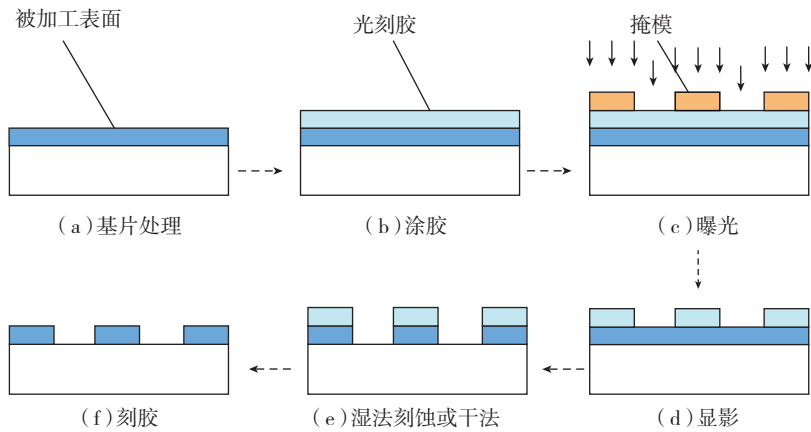


图1 化学刻蚀工艺流程图
Fig.1 Schematic of chemical etching process

质选择范围扩宽等。以低压反应离子刻蚀技术(RIE)的边壁钝化技术为例,可以实现高深宽比微通道的加工。Dwivedi等^[12]利用RIE技术在85℃蚀刻出深宽比达20.5的矩形微通道,如图2所示。虽然RIE能够实现高深宽比的微结构加工,但是同时会污染相关的表面、影响底部位移损伤以及容易存在RIE草地现象^[13]。总体而言,刻蚀法制备微通道方法简单,操作容易,适合于对大面积硅基微通道的刻蚀和大规模生产。

2 LIGA

LIGA技术最早起源于德国,是基于X射线光刻的MEMS加工技术,主要包括光刻、电铸制模和注模复制3个工艺步骤^[14],具体的工艺流程

包括:X射线曝光—显影—电铸—脱模—充模—剥模。LIGA加工技术最大的特点是能加工高深宽比、结构侧壁光滑且平行度偏差在亚微米范围内的微通道结构。Kupka等^[15]利用LIGA在光学透镜上加工孔20μm,孔深600μm的深孔微通道;Yu等^[16]利用UV-LIGA技术在镍板上加工微通道冷却板,加工通道宽度为20μm、深宽比高达3.6的微通道结构,如图3(a)所示;此外,还利用UV-LIGA技术在电镀铜基体上加工宽度为15μm、深宽比高达5的微通道结构,如图3(b)所示。Pang等^[17]使用UV-LIGA两层电铸工艺在玻璃基板制作出辐射同心状的微通道。

虽然LIGA技术具有优越的高深宽比加工能力,但是由于同步辐射光源不容易获得,增加了生产成本,因此产生了准LIGA技术,即以激光

刻蚀技术、深反应离子刻蚀技术、厚胶紫外光刻技术等取代X射线光刻的深度微加工,虽然不能够完全达到LIGA技术的总体质量水平,但是也能够实现一定程度的高深宽比结构^[18]。

3 激光加工

激光加工利用激光产生的高能量实现去除材料,属于非接触式加工,具有加工效率高、加工范围广等优点。利用激光加工制备微通道,受到了广泛的关注。Suriano等^[19]采用激光加工出V形与梯形两种微通道,并与微细铣削加工的微通道进行了比较,发现激光加工出的表面更加粗糙。Prakash等^[20]在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基板上,采用CO₂激光加工制备出了V形微通道,并系统研究了激光加工参数对微通道结构参数、热影响区的作用规律。本文作者^[21]采用脉冲激光器,在SiC陶瓷基体上激光加工出梯形与V形微通道,并探究了不同的激光参数对微通道表面结构的影响(图4)。相比于其他微通道加工技术,激光加工在加工效率、加工灵活性等方面具有优势,且可实现复杂微通道的三维加工,但同时面临着加工尺寸难以精确控制等问题。此外,在加工微孔尤其是在加工涡轮叶片气膜孔方面,传统的激光加工存在气膜孔端口堆积熔瘤以及磨粒难去除的问题。采用飞秒激光加工技术和激光水射流复合加工^[22],能够加工出高精度、高深径比

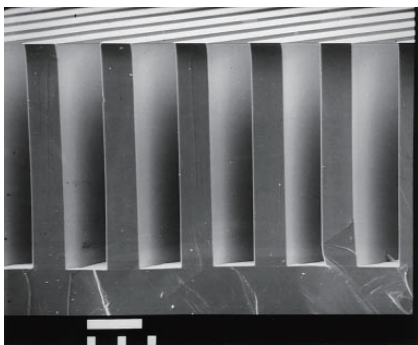
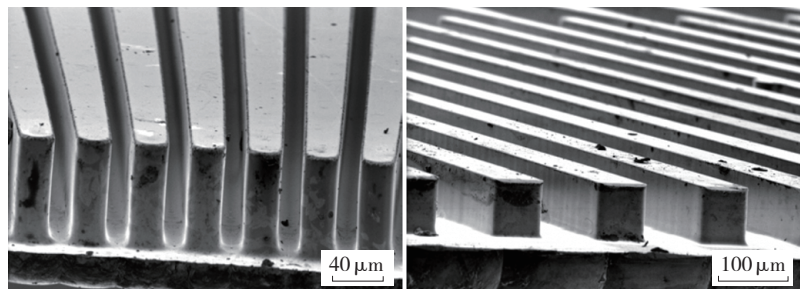


图2 RIE技术制备的深宽比为20.5的矩形微通道

Fig.2 Fabrication of rectangular microchannel with an aspect ratio of 20.5 by RIE technology



(a)深宽比为3.6的镍微通道 (b)深宽比为5的铜微通道

图3 LIGA技术加工的微通道

Fig.3 Microchannels processed by LIGA technology

的微孔,在涡轮叶片气膜孔加工方面具有广泛的应用前景。

4 电火花加工

电火花加工(EDM)利用电极脉冲放电的电蚀作用实现材料的去除,是微通道加工的重要技术之一。与其他微通道加工方法相比,电火花加工能加工高硬度材料、耐高温合金等难加工材料,具有加工效率高、成本低、易加工复杂形状结构等特点,可以制备出高深宽比微通道。Murali等^[23]利用电火花线切割加工200 μm 宽和长20mm的微通道,其深宽比高达7.95。本文作者^[24]采用微细电火花线切割方法,加工出了半封闭式的特殊倒“ Ω ”形的内凹槽微通道结构

(图5),并将其与相同线切割加工的传统矩形微通道进行性能对比,试验发现该新型内凹槽微通道在强化沸腾传热、减小压降及抑制沸腾非稳定性方面具有较明显的优势。目前,电火花加工主要用于加工可导电的金属材料,但是材料去除率不高,并且存在放电过程的复杂性、随机性、加工精度较差等问题^[25]。因此,深入研究电火花成型加工工艺理论和控制理论,实现智能控制技术与电火花成型加工技术的有机结合,是电火花加工微通道的发展方向。

5 微细切削

微细切削加工技术是微通道加工中较为成熟的制造技术之一,具有

加工精度高、效率高等优点^[26]。普通的车、铣、钻孔和冲压等加工方法均可以应用于微加工,而数控机床的应用则大大提高了微通道加工效率和加工精度。Jang等^[27]利用微细铣削的方法,在铝基体上加工出平行矩形微通道,微通道的宽度、深度分别为200 μm 和1.4mm,翅片厚度为200 μm ,深宽比达到7,如图6所示。

Raj等^[28]分别采用微细线切割和微细铣削加工铜微通道,获得的微通道如图7所示,由此得出了采用微细铣削的微通道表面比微细线切割表面更加光滑。微细切削加工微通

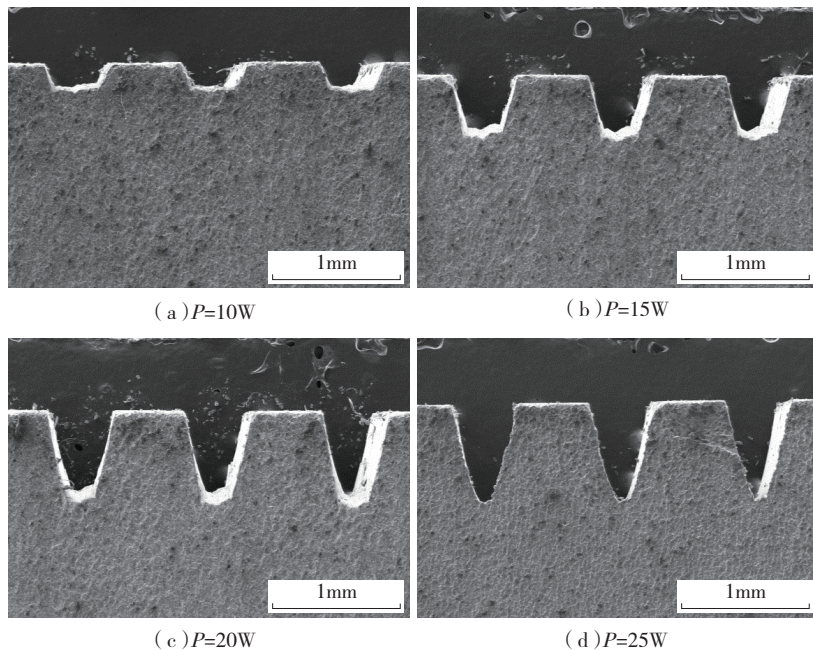


图4 不同功率激光加工SiC微通道截面轮廓
Fig.4 SiC microchannels fabricated by laser process

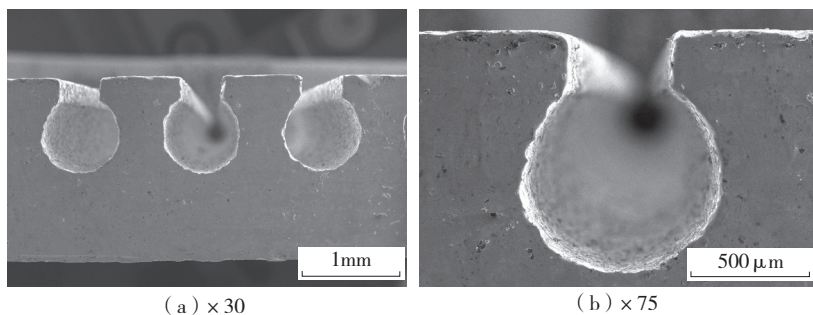


图5 电火花线切割加工的内凹槽微通道
Fig.5 Reentrant microchannels processed by WEDM method

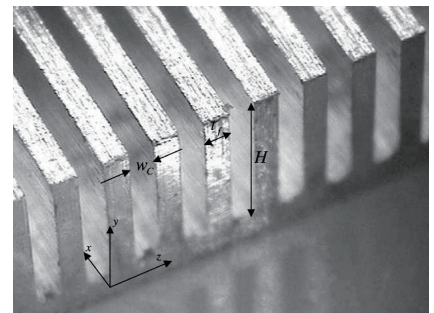
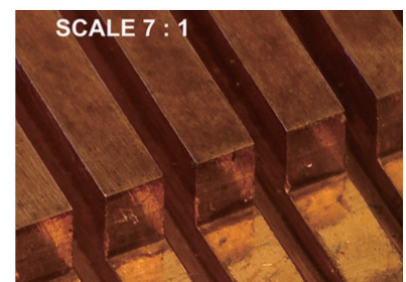


图6 微细铣削加工的矩形微通道
Fig.6 Rectangular microchannels processed by micro-milling method



(a) 微细铣削



(b) 微细线切割

图7 不同加工方法得到的微通道
Fig.7 Microchannels obtained by different processing methods

道方法虽然在设备成本、加工精度方面具有优势,但是也存在易出现切削残留毛刺、微细铣刀易磨损、断刀等问题。刀具的磨损会对微细切削加工过程产生极大影响,严重影响加工表面质量,增大切削力甚至导致刀具断裂^[29]。如何提高微细切削刀具的刚度、解决微通道微细切削过程中的毛刺问题,成为亟需解决的关键问题和发展方向。

6 烧结成形

烧结成形是利用粉末颗粒间的冶金结合、实现结构的制备成形。由于烧结成形得到的是多孔基微通道,具有换热面积大、传热系数好、沸腾换热性能高等优点,特别适合于高流密度下的散热,受到了广泛的关注。图8为Cora等^[30]采用烧结铜球形粉末得到的V型微通道结构。本文作者^[31]采用特殊的凸台模具,通过粉末烧结方式,制备出Ω形内凹槽多孔微通道,显著增大了换热面积,并获得了明显的强化沸腾传热性能。值得注意的是,烧结成形制备的多孔微通道会带来流动阻力增大、渗透性能变差等问题,需要在传热性能与驱动泵功两方面进行平衡考虑。

7 3D打印技术

3D打印技术基于增材制造来实现材料成形,具有成形速度快、材料利用率高、生产周期短与数字化程度高等优点,近年来成为微通道换热器研究的热点。尹恩怀等^[32]利用3D打印技术成型铝合金微通道液冷冷板,制备的微通道液冷冷板流道的最小流道宽为0.5mm。Lade等^[33]利用不同3D打印技术(熔融沉积、立体平板印刷、选择性激光烧结、喷射成型),制备出了不同形状的微通道,如图10所示,并对其毛细流动性能进行了对比。与其他3种打印方法相比,通过选择性激光烧结加工得到微通道表面存在多孔结构,粗糙度更大,能够增大比表面积。在实际应用方面,3D打印技术也已应用于发动

机涡轮叶片冷却微通道的制备^[34],如图11所示。

3D打印在快速发展的同时,也存在加工成本高、设备昂贵以及加工材料受限等问题,在微通道换热器中的应用还有待于技术进步。

微通道冷却技术在航空航天中的应用

现有航空发动机气膜、发汗等冷却技术已无法满足对高性能、高飞行马赫数发动机的要求。美国开展的“高效节能发动机E3研究计划”、“发动机热端部件技术HOST计划”以及“综合高性能涡轮发动机技术IHPDET计划”均提出了高温升、低空气冷却量的航空发动机燃烧室新型先进高效冷却技术的探索。微通道冷却技术因其高传热性能、结构紧凑、质量轻、体积小等优点,应用于航空航天发动机具有显著的优势,吸引了航空航天领域的广泛关注。目前,随着加工技术的不断发展,微通道冷却技术已在发动机燃烧室壁面冷却、高超声速飞行器预冷器系统、涡轮叶片散热冷却等方面获得了应用,为保证发动机的可靠工作与正常

飞行起到了至关重要的作用。下面对微通道冷却技术在航空航天中的应用进行分析。

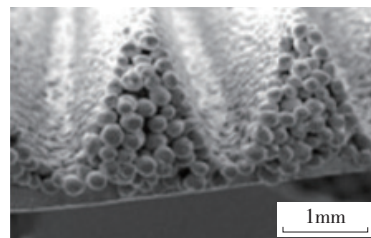


图8 烧结成形制备的V型微通道
Fig.8 Sintered V-shaped microchannels

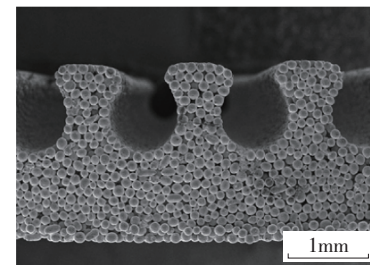
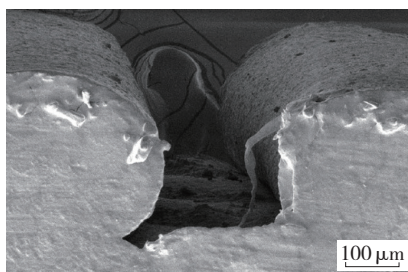
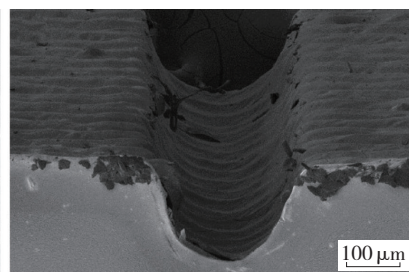


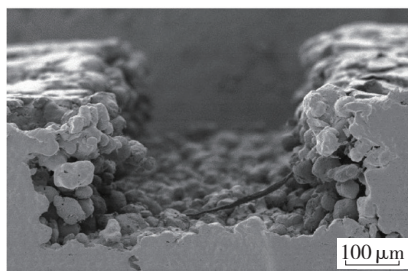
图9 烧结成形制备的内凹槽多孔微通道
Fig.9 Sintered porous reentrant microchannels



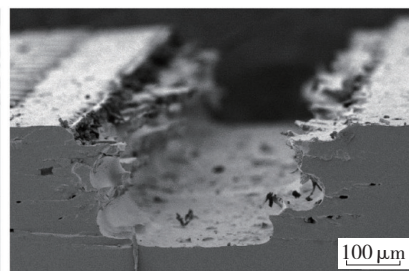
(a) 熔融沉积



(b) 立体平板印刷



(c) 选择性激光烧结



(d) 喷射成型

图10 不同3D打印方法制备的微通道

Fig.10 Microchannels prepared by different 3D printing methods

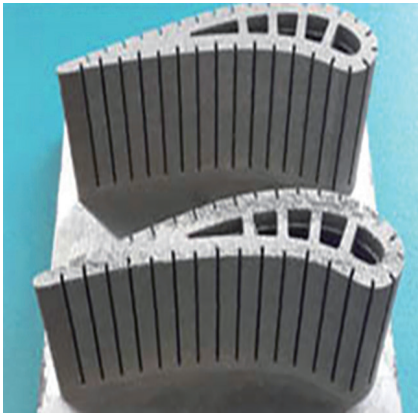


图11 3D打印制备的涡轮叶片冷却微通道
Fig.11 Turbine blade cooling microchannels fabricated by 3D printing

1 微通道冷却技术在燃烧室壁面的应用

提高燃烧室冷却性能,减少冷却用气是航空发动机发展的方向。采用微通道冷却技术,可以有效降低燃烧室壁面的温度,同时还可以将微通道吸收的热量用来进行燃油预热,从而实现再生冷却。美国与法国合作进行了先进复合材料燃烧室计划(AC3P),设计了带微型通道换热的复合材料主动冷却系统^[35],在一定程度上解决极端条件下冷却性能的问题,其中微通道的宽度为0.2mm,长度为5mm。Zhang等^[36]研究基于微通道换热的超燃冲压发动机再生冷却系统,其中正方形微通道长宽为1.2mm,微通道流动的工质为液氢,液氢流过微通道时对内壁进行对流冷却,自身受热后经喷注器进入燃烧室,使得通过壁面传出的热量又回到燃烧,得以“再生”,如图12所示。

现代液态火箭发动机推力室燃气温度高达3000~4000K,压力可达20MPa以上,喷管出口燃气马赫数可达6,喉道热流密度最大可达160MW/m²,再生层板冷却技术是解决推力室过热最有效方式,其基本原理就是层板之间形成宽度<1mm,长度2~5mm,壁厚0.3mm的微通道,液态推进剂作为冷却剂,通过微通道换热冷却推力室的壁面^[37]。图13为

火箭发动机微通道冷却的示意图^[38]。

除此之外,微型飞行器作为未来战场上的重要侦察和攻击武器,其微型动力系统燃烧室壁面也面临着严峻的散热冷却难题。利用微通道冷却的高效换热,可以实现微型动力系统的有效热防护。MIT微推进系统课题组对二元液体推进剂微型火箭发动机的微型微通道换热进行了设计和研究^[39],研究结果发现,采用该结构的微通道能够实现高效换热,图14所示为采用刻蚀技术得到的MIT微型火箭发动机的微通道结构。Miotti等^[40]将微型动力系统喷嘴和燃烧室制成一个部件,并通过喷嘴之间形成的间隙实现微通道冷却,同时在喷嘴喉部设计额外的散热片,以

便充分冷却喷嘴,实现了高效散热。Cho等^[41]研制了一种基于微通道蒸发冷却的微型热机动力系统,并证实了在恒定热源温度为60℃时,该微型热机可正常燃烧做功。

2 微通道冷却技术在预冷器系统中的应用

预冷器作为发动机热力循环中的关键组件,能够实现高温空气的高效率、快速深冷,从而使得温度降低到航空发动机正常工作的温度,其常采用微通道换热器增强其冷却性能。目前,英国的Sabre、日本的Atrex以及S-engine发动机均采用了预冷器结构^[42],如图15所示。

预冷器是Sabre最重要的部件,主要利用微通道换热原理来实现来

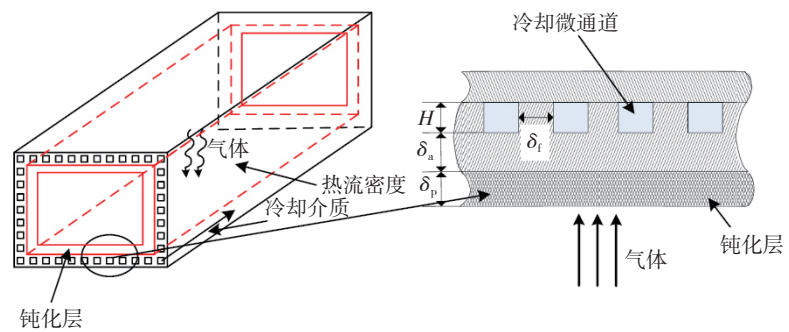
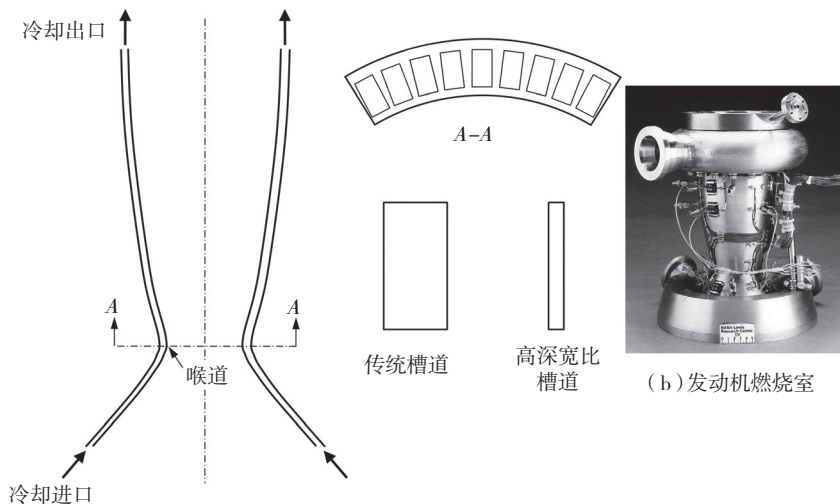


图12 超燃冲压发动机微通道冷却
Fig.12 Schematic of microchannel cooling for scramjet engine



(a) 火箭发动机冷却微通道

图13 火箭发动机微通道冷却及通道截面
Fig13 Microchannel cooling for rocket engine

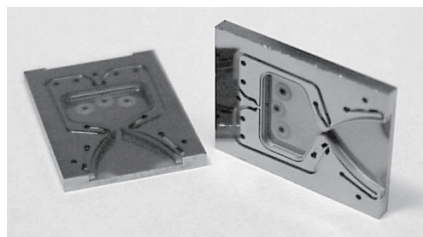


图14 MIT微型火箭发动机的微通道结构
Fig.14 Microchannel structure of MIT micro rocket engine

流高温气体与微通道内低温液体的热量交换。目前,预冷器的研究主要集中在以下两个方面:

(1) 预冷器结构设计及制造。图 16 为国际合作计划 Skylon^[43] 于 2005 年研究制造了全尺寸涡轮预冷器模块,该预冷器模块由 460 根微换热管组成,每根换热管的具体参数为:管外径 0.98mm,管壁厚 40 μm,长度 2.2m。微换热管与集液环通过焊接实现连通。此外,为了能够强化换热, Nacke 等^[44] 设计一种横流微通道空气-燃料热交换器模块与径向涡轮发动机热交换器中堆叠模块进行对比,得出横流微通道空气-燃料热交换器模块能够增大传热面积,它的非连续交错翅片有利于提高其传热系数,如图 17 所示。

(2) 不同预冷介质对预冷器性能影响。日本 Atrex 发动机也是采用 LH2 燃料作为冷质,同时提出了通过安装在进气道后的空气或者氢预冷器将进口空气冷却^[45]。李敬等^[46] 以 LH2、LH4 和煤油燃料作为冷质研究预冷空气涡轮火箭发动机的性能,通过建立热力循环模型得到采用预冷 LH2 的发动机的飞行速度和比冲的增幅最大。

3 微通道冷却技术在涡轮叶片中的应用

目前,先进航空涡轮发动机的涡轮进口燃气温度达 1800~2050K,已接近涡轮叶片材料的耐温极限,必须采用冷却技术对涡轮叶片进行有效冷却。涡轮叶片冷却主要是在叶片内部加工出微通道,并采用气膜与冲

击等冷却方式^[47],通过微通道内的气流与叶片实现快速、高效冷却,图 18 为典型涡轮叶片冷却结构。目前,涡轮叶片的冷却技术主要有层板冷却和复合冷却技术。层板冷却基本原理是在通道制备绕流柱构成微通

道,使得内部许多细小的通道吸收热量,然后从气膜孔流出。研究表明,层板冷却叶片前缘的最大冷却效果可达 0.749,其平均冷却效果与全覆盖气膜冷却结构相比提高 13.3%,层板冷却能够有效解决高热负荷涡轮叶片冷却问题^[48]。复合冷却技术是在涡轮叶片上同时将冲击冷却、肋壁强化换热和绕流柱强化换热等多种冷却技术结合起来,核心思想就是采用微通道换热器冷却技术来冷却涡轮叶片。刘存禄等^[49] 基于高负荷跨音速涡轮叶片采用复合冷却技术进行了试验研究,研究结果表明,涡轮叶片冷却温度达到 450℃左右,冷却效果大大增强。此外,为了确保涡轮导向叶片的有效冷却,郭文等^[50] 设计了复合冷却的导叶结构,采用双腔上、下同时进气的冷却结构形式,在



(a) 预冷器模块



(b) 预冷片

图15 预冷器结构及预冷片示意图
Fig.15 Precooler module and precooling piece

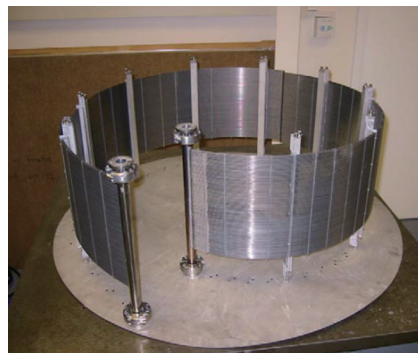
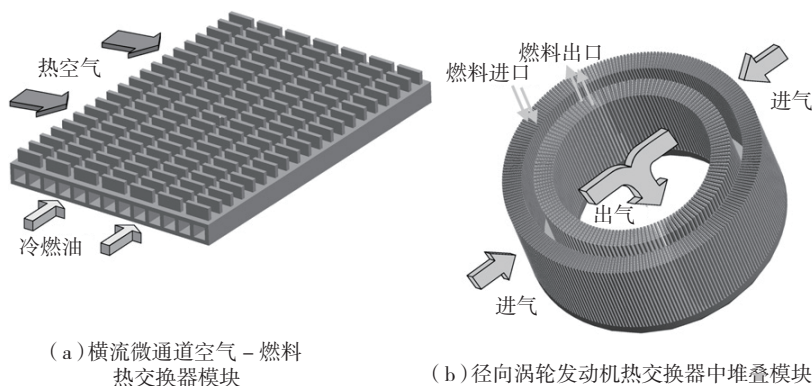


图16 全尺寸涡轮预冷器模块
Fig.16 Full-scale turbo pre-cooler module



(a) 横流微通道空气-燃料热交换器模块

(b) 径向涡轮发动机热交换器中堆叠模块

图17 微通道燃料换热

Fig.17 Microchannel fuel heat transfer

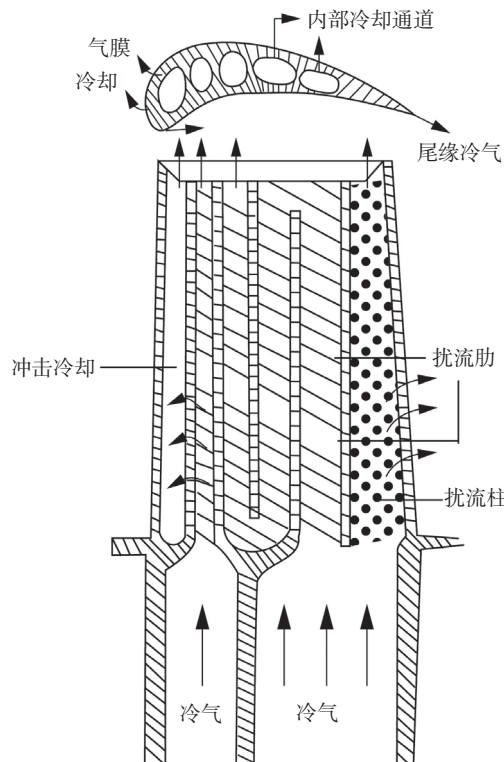


图18 典型涡轮叶片冷却结构
Fig.18 Cooling structure of turbine blade

叶片前缘和中部分别采用气膜喷淋结构和冲击对流-气膜复合强化冷却和气膜溢流增强效应冷却结构,研究表明,该设计能够实现有效冷却。游良平等^[51]建立涡轮叶片复合冷却试验测试平台,对叶片前缘进行射流冲击-气膜冷却试验,得到吹风比为1.0时,冷却效率最高。

结论

本文对航空航天冷却微通道制造技术进行了总结和综述,主要包括刻蚀、LIGA、激光、电火花、微细切削、烧结成形、3D打印技术等。刻蚀、LIGA加工可实现高深宽比微通道的加工,但其加工材料限于硅、聚合物材料。激光、电火花加工方法适用的材料范围更广,得到微通道表面相比刻蚀、LIGA、微细切削等微通道更为粗糙。烧结加工能够形成多孔表面结构,具有换热面积大、强化换热的优点;3D打印技术具有成形速度快、材料利用率高、生产周期短与数字化

程度高等特点,是未来微通道加工的主流方向,但是目前存在加工成本高、设备昂贵以及加工材料受限等局限。

微通道冷却技术应用于航空航天发动机,成为当今航空航天领域的研究热点。本文主要介绍了微通道冷却技术在3个方面的应用,包括发动机燃烧室壁面冷却、高超声速飞行器预冷器系统、涡轮叶片散热冷却。在航空航天微通道冷却技术快速发展的同时,也存在相应的挑战,主要有以下3个方面:

(1) 适合于航空航天复杂微通道结构的加工技术,还面临着制造工序复杂、制造成本偏高的情况,发展高效、低成本微通道制造技术并获得良好的换热性能成为今后发展的方向;

(2) 将微通道换热性能与燃烧性能耦合,解决在最小冷却气体量的前提下达到最大的冷却效果问题;

(3) 高超声速飞行条件下,微通

道内冷却工质高温、高压、微尺度流动传热的理论研究还远未处于成熟阶段,需要对其进一步探索,从而为指导航空航天微通道设计提供指导。

参考文献

[1] 汪元,王振国. 空气预冷发动机及微小通道流动传热研究综述[J]. 宇航学报, 2016, 37(1):11-20.
WANG Yuan, WANG Zhenguo. Study on flow and heat transfer of air pre-cooling engine and microchannel[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(1): 11-20.

[2] DENG D, WAN W, TANG Y, et al. Experimental and numerical study of thermal enhancement in reentrant copper microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 656-670.

[3] FRIEDRICH C R, KANG S D. Micro heat exchangers fabricated by diamond machining[J]. Precision Engineering, 1994, 16(1): 56-59.

[4] BAO N, ZHANG Q, XU J J, et al. Fabrication of poly(dimethylsiloxane) microfluidic system based on masters directly printed with an office laser printer[J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1089(1-2): 270-275.

[5] PRAKASH S, KUMAR S. Fabrication of microchannels: A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(8): 0954405414535581.

[6] KEE R J, ALMAND B B, BLASI J M, et al. The design, fabrication, and evaluation of a ceramic counter-flow microchannel heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(11-12): 2004-2012.

[7] 甘云华,徐进良. 水和甲醇在硅基微通道中换热特性的实验研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(12): 1498-1503.
GAN Yunhua, XU Jinliang. Experimental study on heat transfer characteristics of water and methanol in silicon-based microchannels[J]. Advances in Natural Science, 2005, 15(12): 1498-1503.

[8] RITCHEY S N, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Local measurement of flow boiling heat transfer in an array of non-uniformly

- heated microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 206–216.
- [9] CHOI I, KIM Y, YI J. Fabrication of hierarchical micro/nanostructures via scanning probe lithography and wet chemical etching[J]. *Ultramicroscopy*, 2008, 108(10): 1205–1209.
- [10] WU H Y, CHENG P. Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(14): 2519–2525.
- [11] RANGELOW I W. Dry etching-based silicon micro-machining for MEMS [J]. *Vacuum*, 2001, 62(2–3): 279–291.
- [12] DWIVEDI V K, GOPAL R, AHMAD S. Fabrication of very smooth walls and bottoms of silicon microchannels for heat dissipation of semiconductor devices[J]. *Microelectronics Journal*, 2000, 31(6): 405–410.
- [13] 来五星, 廖广兰, 史铁林, 等. 反应离子刻蚀加工工艺技术的研究 [J]. *半导体技术*, 2006, 31(6): 414–417.
- LAI Wuxing, LIAO Guanglan, SHI Tielin, et al. Study of reaction ion etching processing technique[J]. *Semiconductor Technology*, 2006, 31(6): 414–417.
- [14] 徐春叶, 刘善喜. LIGA 工艺技术研究 [J]. *集成电路通讯*, 2005(1): 32–37.
- XU Chunye, LIU Shanxi. Study on LIGA technology[J]. *Editorial Communications*, 2005(1): 32–37.
- [15] KUPKA R K, BOUAMRANE F, CREMERS C, et al. Microfabrication: LIGA-X and applications[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 164(1–4): 97–110.
- [16] YU W, DESMULLIEZ M P Y, DRUFKE A, et al. High-aspect-ratio metal microchannel plates for microelectronic cooling applications[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2009, 20(2): 025004.
- [17] PANG A J, DESMULLIEZ M P Y, LEONARD M, et al. Design, manufacture and testing of a low-cost micro-channel cooling device[C]// *Proceedings of IEEE Electronics Packaging Technology Conference*. Shenzhen, 2004: 564–568.
- [18] 张永华, 丁桂甫, 彭军, 等. LIGA 相关技术及应用 [J]. *传感器技术*, 2003, 22(3): 60–64.
- ZHANG Yonghua, DING Guifu, PENG Jun, et al. Related technologies and applications of LIGA[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, 22(3): 60–64.
- [19] SURIANO R, KUZNETSOV A, EATON S M, et al. Femtosecond laser ablation of polymeric substrates for the fabrication of microfluidic channels[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(14): 6243–6250.
- [20] PRAKASH S, KUMAR S. Experimental investigations and analytical modeling of multi-pass CO₂ laser processing on PMMA[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 1–15.
- [21] DENG D, XIE Y, CHEN X, et al. Experimental study on laser micromilling of SiC microchannels[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, under review, 2017.
- [22] 杨立军, 孔宪俊, 王扬, 等. 激光微孔加工技术及应用 [J]. *航空制造技术*, 2016(19): 32–38.
- YANG Lijun, KONG Xianjun, WANG Yang, et al. Laser microporous processing technology and its application[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(19): 32–38.
- [23] MURALI M, YEO S H. A novel spark erosion technique for the fabrication of high aspect ratio micro-grooves[J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10: 628–632.
- [24] DENG D, WAN W, TANG Y, et al. Experimental investigations on flow boiling performance of reentrant and rectangular microchannels—A comparative study[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 82: 435–446.
- [25] 何建中. 电火花成型加工技术的应用与发展 [J]. *中国西部科技*, 2007(5): 20–21.
- HE Jianzhong. Application and development of EDM technology[J]. *West China Science and Technology*, 2007(5): 20–21.
- [26] 杨占凯, 董文满, 湛祖辉, 等. 微结构的精密微细铣削加工技术研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2011, 47(1): 8–10.
- YANG Zhankai, DONG Wenman, CHEN Zuhui, et al. Research on precision micro-milling microstructure technology[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(1): 8–10.
- [27] JANG S P, KIM S J, PAIK K W. Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet, using a micro-thermal sensor array[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2003, 105(2): 211–224.
- [28] RAJ E, LISIK Z, FIKS W. Influence of the manufacturing technology on microchannel structure efficiency[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2011, 176(4): 311–315.
- [29] 蒋放, 王西彬, 刘志兵. 微细切削的尺度效应研究 [J]. *工具技术*, 2004, 38(8): 6–9.
- JIANG Fang, WANG Xibin, LIU Zhibing. Study on scale effect of micro-cutting[J]. *Tool Technology*, 2004, 38(8): 6–9.
- [30] CORA O N, USTA Y, KOC M. Micro-manufacturing of micro-scale porous surface structures for enhanced heat transfer applications: an experimental process optimization study[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2009, 19(4): 045011.
- [31] DENG D, TANG Y, LIANG D, et al. Flow boiling characteristics in porous heat sink with reentrant microchannels[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 70(3): 463–477.
- [32] 尹恩怀, 安占军, 李超. 3D 打印成型微通道冷板 [J]. *科技视界*, 2016(11): 30.
- YIN Enhuai, AN Zhanjun, LI Chao. 3D printing of microchannel cold plate[J]. *Science and Technology Horizon*, 2016(11): 30.
- [33] LADE R K, HIPPCHEM E J, MACOSKO C W, et al. Dynamics of capillary-driven flow in 3D printed open microchannels[J]. *Langmuir*, 2017, 33: 2949–2964.
- [34] 深圳天顺达手板模型公司. 金属 3D 打印 [EB/OL]. [2015–11–21]. <http://www.tianshunda.net/show-23-179.html>.
- Shenzhen Tianshun Shouban Model Company. Metal 3D printing[EB/OL]. [2015–11–21]. <http://www.tianshunda.net/show-23-179.html>.
- [35] BOUQUET C, FISCHER R, LUC-BOUHALI A, et al. Fully ceramic composite heat exchanger qualification for advanced combustion chambers[C]// *AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and*

- Technologies Conference. Capua, 2005, 1-6.
- [36] ZHANG C, QIN J, YANG Q, et al. Design and heat transfer characteristics analysis of combined active and passive thermal protection system for hydrogen fueled scramjet[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(1): 675-682.
- [37] 牛禄. 液体火箭发动机层板再生冷却技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- NIU Lu. Liquid rocket engine laminar regeneration cooling technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002.
- [38] MUDAWAR I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management[J]. ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5(2): 021012.
- [39] LONDON A P, AYON A A, EPSTEIN A H, et al. Microfabrication of a high pressure bipropellant rocket engine[J]. Sensors and Actuators A, 2001, 2997: 1-7.
- [40] MIOTTI P, TAJMAR M, SECO F, et al. Turbo pump fed micro-rocket engine[C]// WILSON A. Proceedings of the 4th International Spacecraft Propulsion Conference(ESA SP-555). China Laguna, 2004.
- [41] CHO J H, LIN C S, RICHRDS C D, et al. Demonstration of an external combustion micro-heat engine[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 3099-3105.
- [42] 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]. 工程热物理学报, 2017, 38(4): 811-816.
- LI Chenpei, WANG Yueshe, WANG Haijun, et al. Numerical analysis of heat transfer in precooler for hybrid airbreathing rocket engines[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(4): 811-816.
- [43] VARVILL R, BOND A. The SKYLO spaceplane progress to realisation[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2008, 61(10): 22-32.
- [44] NACKE R, NORTH CUTT B, MUDAWAR I. Theory and experimental validation of cross-flow micro-channel heat exchanger module with reference to high Mach aircraft gas turbine engines[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, 54(5-6): 1224-1235.
- [45] SATO T, KOBAYASHI H, TANATSUGU N, et al. Development study of the precooler of the atrex engine [C]//12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies. Norfolk, 2003: 1-8.
- [46] 李敬, 赵巍, 赵伟, 等. 换热器预冷的空气涡轮火箭性能分析研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(2): 302-307.
- LI Jing, ZHAO Wei, ZHAO Wei, et al. Performance study of air turbo rocket engine with precooler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(2): 302-307.
- [47] 卫海洋, 徐敏, 刘晓曦. 涡轮叶片冷却技术的发展及关键技术[J]. 飞航导弹, 2012(2): 18-21.
- WEI Haiyang, XU Min, LIU Xiaoxi. Development and key technology of turbine blade cooling technology[J]. Winged Missiles Journal, 2012(2): 18-21.
- [48] 朱强华, 吉洪湖, 郭瑞. 高热负荷涡轮叶片前缘层板冷却效果研究[C]// 中国航空科学技术大会. 北京, 2015.
- ZHU Qianghua, JI Honghu, GUO Rui. Study on cooling effect of front plate of high heat turbine blade[C]//China Aviation Science and Technology Conference. Beijing, 2015.
- [49] 刘存禄, 罗明俊, 邓化愚, 等. 高负荷跨音速复合气冷涡轮叶片的试验研究[J]. 航空动力学报, 1989(4): 351-356.
- LIU Cunlu, LUO Mingjun, DENG Huayu, et al. Experimental study on high load transonic composite air-cooled turbine blades [J]. Journal of Aerospace Power, 1989(4): 351-356.
- [50] 郭文, 吉洪湖, 蔡毅, 等. 复合式气冷涡轮导叶冷却设计与试验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 456-459.
- GUO Wen, JI Honghu, CAI Yi, et al. Design and experimental research of compound air-cooled turbine guide vane[J]. Journal of Aeronautics and Astronautics, 2005, 20(3): 456-459.
- [51] 游良平, 陶毓伽, 蔡军, 等. 涡轮叶片前缘复合冷却实验[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1618-1623.
- YOU Liangping, TAO Yujia, CAI Jun, et al. Experiment of composite cooling on leading edge of turbine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1618-1623.

通讯作者: 邓大祥, E-mail: dxdeng@xmu.edu.cn。

Fabrication and Application of Microchannels Heat Sinks in Aerospace Areas

DENG Daxiang^{1,2}, CHEN Xiaolong¹, XIE Yanlin¹, HUANG Qingsong¹

(1. Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[ABSTRACT] Microchannel heat sinks have features—high heat transfer performance, compact structure, lightweight, easy to integrate packaging and so on, which are ideal to solve the cooling problem of aerospace engine. In this review, the manufacturing methods of microchannels are firstly introduced, and the manufacturing mechanisms and characteristics are analyzed and compared. The applications of microchannel cooling technology in aerospace field are then presented such as the microchannel cooling in the combustion chamber wall, precooler and turbine blade. Finally, the challenges of the micro-channel cooling technology in the aerospace field are discussed.

Keywords: Aero-engine; Microchannel; Cooling; Manufacturing

(责编 海山)