

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0120

超临界压力碳氢燃料在增材制造通道中 流动传热的实验研究

蔡磊¹, 肖颖², 韩怀志^{1,*}, 于瑞天¹, 罗文¹

(1. 四川大学 化学工程学院, 成都 610065; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 燃烧试验研究部, 绵阳 621022)

摘 要: 针对超临界压力正癸烷在增材制造 (AM) 粗糙通道与机械加工光滑通道中的流动和传热性能差异进行对比实验研究。采用粗糙度仪获得 AM 通道和光滑通道的表面平均粗糙度分别为 $11\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。考察不同系统压力 (3 MPa、5 MPa 和 7 MPa) 和壁面热流密度 (0.29 MW/m^2 、 0.32 MW/m^2 和 0.35 MW/m^2) 工况下, 2 种通道摩擦系数 f 和努塞尔特数 Nu 在不同流量下的变化规律。结果表明: 在选定的流量范围内, AM 通道的 f 和 Nu 皆大于光滑通道, AM 通道的 f 是光滑通道的 2.8~3.5 倍, Nu 是光滑通道的 1.7~2.3 倍; 增大系统压力会使 AM 通道的 f 降低, 但却使光滑通道增加, 而 Nu 在 AM 和光滑通道皆降低; 随着壁面热流密度增加, AM 通道的 f 和 Nu 皆降低, 而光滑通道皆增加; 粗糙通道具有很好的综合传热性能, 并且在小流量时效果更好, 其综合传热系数为 1.2~1.5; 提出超临界碳氢燃料在增材制造通道中 Nu 和 f 的关联式。

关 键 词: 粗糙度; 增材制造; 流动阻力; 换热特性; 实验研究

中图分类号: V231.1; TK172

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)03-0881-11

各国都在竭力发展空天动力技术, 目标是不断提高飞行器速度, 但带来的问题是飞行器将承受极端的高温工作环境, 这对其寿命和性能形成了威胁^[1]。为解决这个问题, 研究人员积极研究和开发各种创新技术。再生冷却技术是其中之一, 该技术借助超临界碳氢燃料作为冷却剂, 设计了诸多复杂的冷却结构^[2-3], 以有效地降低热端部件的温度。而这些复杂的冷却结构, 对制造业提出了先进且智能的需求。近年来, 增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术在空天动力领域中迅速发展, 并逐渐成为促进空天动力装备制造性能提升的重要手段^[4]。将 AM 技术应用到高速飞行器中, 可为空天动力领域带来更加高效、节能和可靠的解决方案。

主动冷却技术一般使用超临界碳氢燃料, 它比

传统燃料更加高效环保, 并且具有高温高压下的优越性能, 可以有效提高飞行器的速度和推力。然而, 超临界碳氢燃料在燃烧过程中会产生大量的高温气体, 从而给飞行器的零部件造成过高的热负荷, 因此, 探索碳氢燃料的流动传热特性至关重要。Pu 等^[5]探究了航空煤油 RP-3 在超临界压力下层流和湍流之间的摩擦系数 f 与努塞尔特数 Nu ; Zhao 等^[6]研究了超临界压力下煤油的热传导行为, 提出 2 个修正式, 可以提高预测传热行为的精确性。此外, RP-3 是一种混合燃料, 过高的温度会使其出现堵塞通道现象; 而正癸烷是 RP-3 航空煤油链烷烃中最具代表性的组分, 重要理化特性参数都与实际航空煤油非常相近。因此, 正癸烷能够还原实际航空煤油的物理与化学过程。黄世璋等^[7]建

收稿日期: 2023-03-10; 录用日期: 2023-04-04; 网络出版时间: 2023-05-05 08:41

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230504.1814.002

基金项目: 国家自然科学基金 (T2441001); 四川省燃气轮机燃烧工程技术研究中心专项基金 (JMRH-0000-2024-00001)

* 通信作者. E-mail: hanhz@scu.edu.cn

引用格式: 蔡磊, 肖颖, 韩怀志, 等. 超临界压力碳氢燃料在增材制造通道中流动传热的实验研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (3): 881-891. CAI L, XIAO Y, HAN H Z, et al. Experimental study on flow and heat transfer of hydrocarbon fuels in additive manufacturing channels at supercritical pressure [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (3): 881-891 (in Chinese).

立了一套模拟超临界正癸烷传热现象的算法。阮波^[8]模拟了正癸烷的对流传热与裂解反应,发现正癸烷裂解吸热会起到冷却作用。张磊等^[9]研究了多种工况下超临界正癸烷的传热特性,并获得了相应的传热关联式。超临界碳氢燃料在冷却通道中的流动传热特性已有一定规律认识,利用 AM 技术能够更好地适配飞行器热防护需求,使其具备更好的性能表现。

AM 技术通过逐层堆积材料来制造零部件,其可以制造出精细的零件。而对于航空发动机而言,增材制造技术可以制造出更加复杂的一体化零部件,避免了需要进行焊接和铆接等装配工序,解决了连接件受热膨胀不一导致的密封问题。这项技术可以制造传统加工技术难以生产的复杂产品。Cormier 等^[10]借助 AM 技术设计了几种高度的圆锥紧凑阵列散热器。Huttunen 等^[11]借助 AM 技术设计了由拓扑优化的散热器,明显地降低了热阻。Alteneiji 等^[12]运用 AM 技术制造了基于数学理论得到的最小曲面紧凑型换热器,实现了从数值计算到实验测试的突破。这些研究表明 AM 技术突破了传统机械加工在流动换热中的局限性。需要注意的是,在技术水平限制下,AM 制件的表面粗糙多数不可避免,对表面品质的控制是这项技术当前的研究重点之一。在增材制造过程中,就尺寸误差和表面粗糙度而言,建造方向对零件品质有很大影响^[13]。由于材料的添加是逐层进行的,一般需要使用大量热量将材料熔化或烧结在一起,当材料颗粒的尺寸与建造层的厚度相同时,颗粒将填补连续层之间的空隙,从而影响实际表面粗糙度^[14]。而且,复杂的零件不易进行后处理,确保表面光滑是一项挑战^[15]。

从流动的角度来讲,一些研究表明粗糙度会增加流体扰动,从而促进热量传递。Shen 等^[16]研究水在矩形通道中的流动传热,发现摩阻系数和努塞尔特数与传统理论存在显著差异,他认为这是由粗糙度引起的;Huang 等^[17]也发现实验结果与理论的不一致。周红秀等^[18]研究了表面粗糙度对流动的影响,发现粗糙度可以使壁面附近的流体湍动能增

加。对粗糙度在流动传热方面的研究已有一定规律。Liu 等^[19]研究发现, f 与 Nu 随表面粗糙度的增加而增加;Yuan 等^[20]的实验表明,粗糙的通道和宏观通道在流动方面表现不同, f 随粗糙度增加而明显增加;李虹杨和郑赞^[21]的研究发现湍流时粗糙度对壁面温度分布影响大,当粗糙度达到一定值时还会影响流态转变。文献 [22-23] 的研究中也发现了同样的现象。这些关于粗糙度的研究已有一定规律,即给通道引入粗糙度,既会带来传热的增强也会带来额外的流动损失。而计算机仿真模拟可以帮助解释实验现象。鲁聪达等^[24]研究了具有不同形状的随机粗糙度壁面,结果表明流体在近壁面区域和主流区的流速差异较大,近壁面区域流动分离现象明显。Rovenskaya^[25]的模拟发现粗糙元附近会出现明显的涡流,在粗糙峰处阻力损失增加;Rawool 等^[26]的模拟表明,粗糙峰会导致流体分离,从而增加阻力损失。这些针对粗糙表面研究得到的规律,有助于去探索增材制造的粗糙表面的流动传热特性。

目前,有关 AM 制件粗糙表面流动和传热性能的研究较少,针对一般粗糙表面的实验研究多数围绕水或空气常规流体展开。然而,AM 制件的表面粗糙度与机加工表面的结构差别较大,且超临界压力碳氢燃料物性异于常规流体。本项目拟针对超临界压力正癸烷在 AM 粗糙通道与机械加工光滑通道中的流动和传热性能差异进行对比实验研究,获得增材制造通道的流动和传热特性,为燃料主动冷却技术在 AM 通道中的工程应用提供设计依据。

1 实验方法

1.1 实验系统

本文实验装置在四川大学燃烧动力学中心江安校区实验室建成。实验系统如图 1 所示。

氮气瓶用于在实验开始前清理系统;调节背压阀设置目标压力来控制整个系统;使用高压恒流柱塞泵输送一定体积分量的正癸烷,质量流量计获取质量流量数值;正癸烷进入预热段受电源加热升温,调整电源功率使其流入测试段时温度达到目标

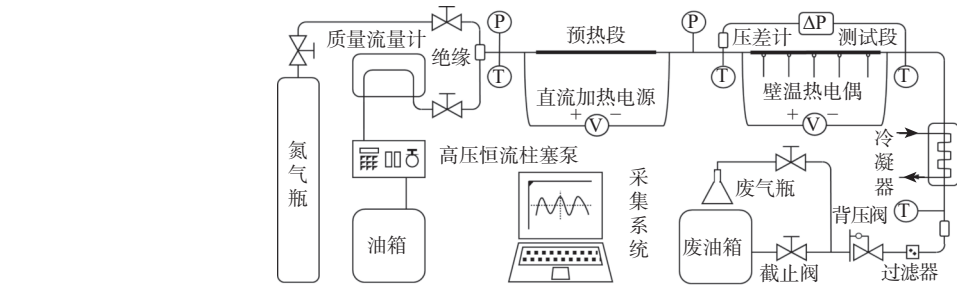


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

值;测试段的电源作为热边界提供热流量目标值;最后,高温正癸烷流入冷凝器降温,接着流入过滤器,最终流入废油箱。

1.2 测试段与测点布置

测试段如图 2 所示,由测试通道、直流电源、k 型热电偶和压差计组成。

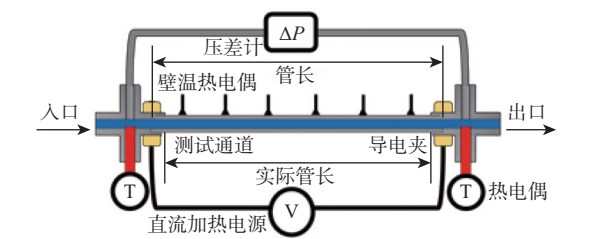


图 2 测试段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test section

2 种测试通道皆为内径为 2 mm、外径为 3 mm 和长度为 200 mm 的圆管。

为获得 2 种通道的传热性能差异,需要获得测试通道的壁面温度。在测试段的实际长度为 170 mm,内均匀布置 6 个测传感,位置分别为 24.3, 48.6, 72.8, 97.1, 121.4, 145.7 mm。

1.3 测量及数据采集系统

实验中需要对测试段进出口压力和温度、测试段压力差、测试段壁面温度等数据实施监测并采集。

流量泵使用前需要校准,测量一定时间内流出的正癸烷体积来标定校准,同时称量质量用以校准流量计;使用 k 型热电偶测量温度,铠装热电偶测量通道内流体温度,热电偶丝焊接在壁面上测量壁面温度,利用加热的方法来校准热电偶,特别是针对壁面热电偶的校准需要反复调试,以确保其数据可靠;使用 HONEYWELL 的 STA725/72S 压差变送器连接测试段两端来测量压力差 Δp ;实验中各测量数据通过电信号导入 HIOKI 的 LR8450 数据采集仪及 U8552 模块,再接入电脑中配套的 LOGGER UTILITY 软件,可以实现实时监测各数据并采集。

壁面粗糙度由 TR200 表面粗糙度仪测量获得,其主要由测量探针获取粗糙度。测量方法示意如图 3 所示。为测量通道内壁面粗糙度,对通道一端切削一部分,以便测量探针可以触及内壁。如图 3(b)所示,设定探针在粗糙表面滑动 5 mm 进行采样,2 种通道分别测量 3 次并取平均值。结果表明:AM 通道的表面平均粗糙度为 11 μm ,光滑通道的表面平均粗糙度为 3 μm 。

1.4 实验工况及参数定义

1.4.1 实验工况

对 2 种通道改变质量流量、系统压力和加热功率,三组系统压力与两组加热功率,每个变换对应

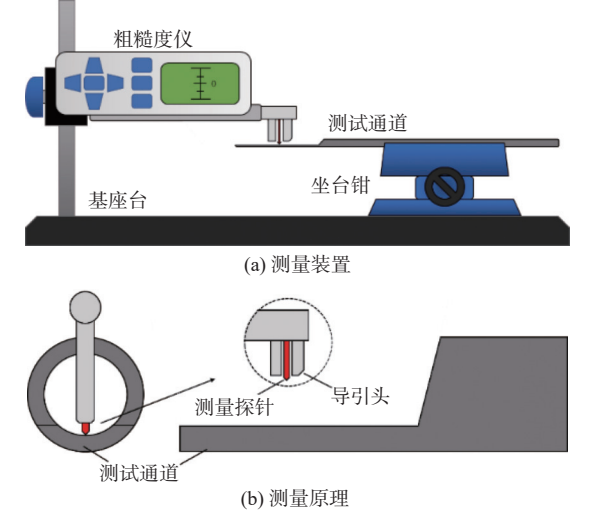


图 3 粗糙度测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring roughness

一组流量变换,共计 $2 \times 5 \times 5 = 50$ 组。具体参数如下:入口温度 T 设定值为 150 $^{\circ}\text{C}$;2 种通道粗糙度分别为 11 μm 和 3 μm ;质量流速 m 选为 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0 g/s;系统压力 p 选取为 3, 5, 7 MPa;壁面热流密度 q 设置为 0.29, 0.32, 0.35 MW/m^2 。

1.4.2 计算参数

实验涉及摩阻系数 f 、努塞尔特数 Nu 和综合传热系数 η 。计算定义如下。

摩阻系数计算式为

$$f = \frac{d}{l} \cdot \frac{2\Delta p}{\rho u^2} \tag{1}$$

式中: d 为通道内径; l 为通道长度; Δp 为通道压力差; ρ 为工质密度; u 为流速, 计算式为

$$u = \frac{4m}{1\,000\rho\pi d^2} \tag{2}$$

其中: m 为质量流量。

努塞尔特数 Nu 计算式为

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \tag{3}$$

式中: λ 为工质导热系数; h 为换热系数, 计算式为

$$h = \frac{Q - Q_{\text{loss}}}{\pi d(T_w - T_f)} \tag{4}$$

其中: Q 为总热通量; Q_{loss} 为热通量损失; T_w 为平均壁面温度; T_f 为流体平均温度。

综合传热系数 η 计算式为

$$\eta = \frac{(Nu_r/Nu_s)}{(f_r/f_s)^{1/3}} \tag{5}$$

式中: Nu_r 为粗糙通道努塞尔特数; Nu_s 为光滑通道努塞尔特数; f_r 为粗糙通道摩阻系数; f_s 为光滑通道摩阻系数。

1.5 测量误差分析

1.5.1 直接测量误差

实验仪器本身存在的精度、灵敏度等方面的误差会对实验结果产生一定的影响。对于直接测量获得的参数,其相对误差计算式为

$$\varepsilon(d_a)=\frac{\delta(d_a)}{d_a} \tag{6}$$

式中: d_a 为测量的真实值; $\delta(d_a)$ 为真实值与测量值之差; $\varepsilon(d_a)$ 为测量误差。

直接测量的数据有电压、电流、压力差、压力、温度及质量流量。经计算后各参数误差如表 1 所示。

表 1 直接测量误差
Table 1 Direct measurement error

仪器	直接测量参数	误差/%
直流电源	电压 <i>U</i>	2.82
	电流 <i>I</i>	1.64
压差计	压力差 <i>Δp</i>	1.16
压力传感器	压力 <i>p</i>	0.25
温度传感器	温度 <i>T</i>	0.4
流量计	质量流量 <i>m</i>	0.62

1.5.2 间接测量误差

实验操作中的不规范或不准确的操作,如读数不准、取样不精确等会导致实验误差。这些间接测量误差由误差传递理论计算获得。参数 D 分别由测量值 $d_{a1}, d_{a2}, \cdots, d_{an}$ 获得, D 的误差 δ 可由式 (7) 计算获得。而本实验主要考察摩阻系数 f 与努塞尔特数 Nu 。

$$\delta(D)=\sqrt{\sum_{i=1}^n\left[\frac{\partial D}{\partial d_{ai}}\delta(d_{ai})\right]^2} \tag{7}$$

实验中的各种物性参数皆由流体温度 T_f 与压力 p 决定,由 REFPROP 程序计算获得。

努塞尔特数 Nu 由对流换热系数 h 和物性热导率 k 决定:

$$\varepsilon(Nu)=\sqrt{\varepsilon(h)^2+\varepsilon(k)^2} \tag{8}$$

摩阻系数 f 由压力差 Δp 、流速 u 和物性密度 ρ 决定:

$$\varepsilon(f)=\sqrt{\varepsilon(\Delta p)^2+\varepsilon(\rho)^2+\varepsilon(u)^2} \tag{9}$$

流速由质量流量 m 和物性密度 ρ 决定:

$$\varepsilon(u)=\sqrt{\varepsilon(m)^2+\varepsilon(\rho)^2} \tag{10}$$

内壁温度 T_i 由热量 Q 与外壁温度 T_o 通过导热微分方程计算获得:

$$\varepsilon(T_i)=\sqrt{\varepsilon(U)^2+\varepsilon(I)^2+\varepsilon(T_o)^2} \tag{11}$$

对流换热系数 h 由热量 Q 、内壁温度 T_i 和流体

温度 T_f 决定:

$$\varepsilon(h)=\sqrt{\varepsilon(Q)^2+\varepsilon(Q_{\text{loss}})^2+\varepsilon(T_i)^2+\varepsilon(T_f)^2} \tag{12}$$

经计算各误差如表 2 所示。

表 2 间接测量误差
Table 2 Indirect measurement error

间接测量参数	误差/%
物性	0.47
流速	0.77
内壁温度 <i>T_i</i>	3.28
对流换热系数 <i>h</i>	6.72
摩阻系数 <i>f</i>	1.46
努塞尔特数 <i>Nu</i>	6.73

2 实验结果与分析

2.1 系统压力对流动和传热性能的影响

2.1.1 流动性能对比分析

壁面热流密度 q 为 0.29 MW/m² 时,不同系统压力下光滑和粗糙通道的压降 Δp 如图 4 所示。2 种通道的压力损失皆随着流量的增加而增加,光滑通

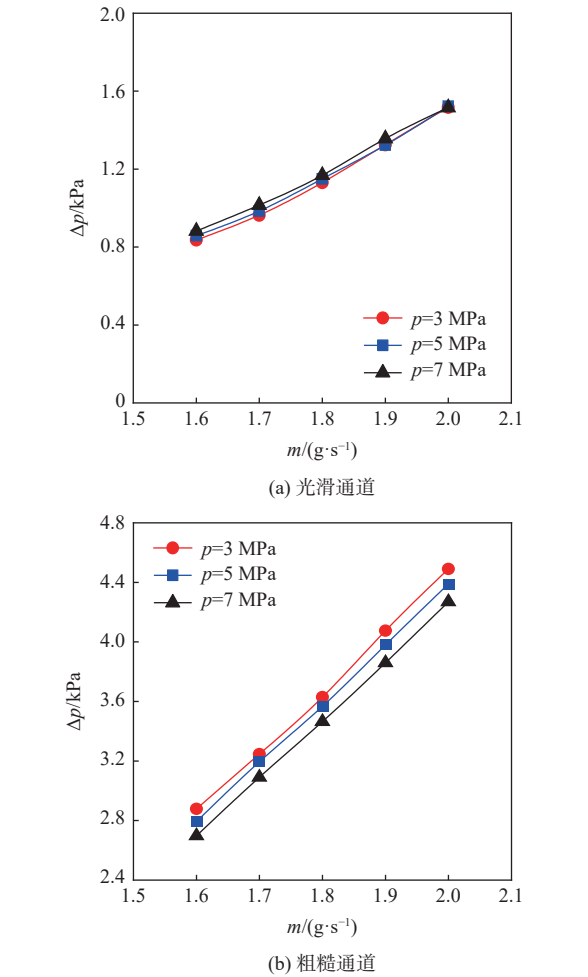


图 4 不同系统压力下的 Δp
Fig. 4 Δp at various system pressure

道压力损失增加了 0.7 kPa, 而粗糙通道则增加了 1.6 kPa。粗糙通道的压力损失相比于光滑通道整体要高出 195%~205%。随着系统压力的增大, 光滑通道的阻力损失略有增加(最大提高 0.03 kPa), 而粗糙通道明显减小(最大减小 0.1 kPa)。光滑通道内摩擦和阻力还不够大, 增加系统压力会让摩擦阻力明显增加, 流动损失也会增加, 但光滑壁面对流体分子的扰动较小, 故其增加得不够明显。而在粗糙通道内, 虽然增加系统压力让流体黏性增加, 但流体撞击在高低不平的粗糙峰上会在一定程度抵消摩擦阻力, 从而减小流动损失。

壁面热流密度 q 为 0.29 MW/m^2 时, 不同系统压力下光滑和粗糙通道的摩阻系数 f 如图 5 所示。2 种通道的摩阻系数皆随流量增加而增加, 随着流量的增加, 光滑通道的摩阻系数 f_s 增加(最大增加 0.005), 粗糙通道的 f_r 增加较小(最小增加 0.003)。粗糙通道相比于光滑通道整体要高出 172%~231%。随着系统压力的增加, 粗糙通道的 f_r 最大降低了 2.6%, 而光滑通道的 f_s 规律与其压力损失 Δp 相似。摩擦阻力会随流量增大而增加, 而系统压力升高会引起密度升高, 根据质量守恒方程, 流速会相

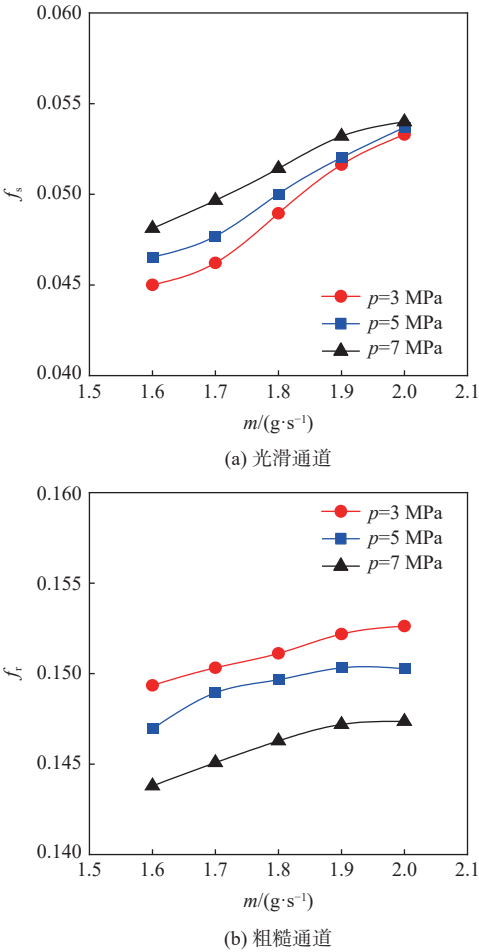


图 5 不同系统压力下的摩擦系数

应的降低, 因此, 不同系统压力之间 f 的差距将会增大而清晰。

2.1.2 传热性能对比分析

壁面热流密度 q 为 0.29 MW/m^2 时, 不同系统压力下光滑和粗糙通道的平均壁温 T_w 如图 6 所示。随着流量增加, 2 种通道的平均壁温降低, 粗糙通道的平均壁温 T_r 降低了 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而光滑通道的降低了 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。流量为 1.6 g/s 时, 2 种通道平均壁温相差 $83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在粗糙通道的边界层内, 过高的粗糙峰形成了固体导热捷径, 会更直接传递主流区的热量, 并且流体在粗糙峰表面上的冲击也会促进热量传递。流量为 2.0 g/s 时, 2 种通道平均壁温差缩小到 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粗糙通道的平均壁温 T_r 相比光滑通道整体要降低 $8\%\sim 25\%$, 表明粗糙表面的冷却效果随流量的增大而变弱。这是因为随流量增加, 热量传递随之增多, 光滑通道仍有很大潜力来改善传热效果; 流量变化初始粗糙通道本身就已增强传热而降低了壁温, 随着流量提高, 粗糙通道冷却效果的提升便不再明显。随着系统压力提高, 光滑通道的平均壁温 T_s 增加明显(最大增加 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$), 粗糙通道的

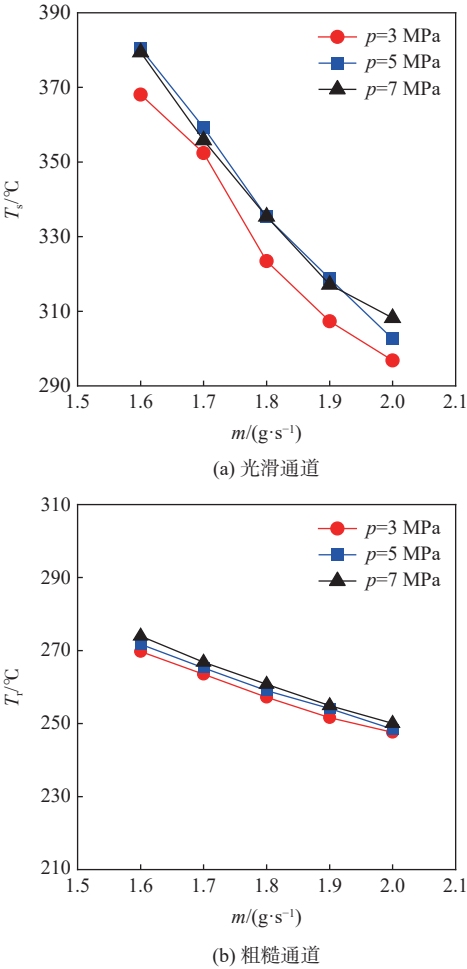


图 6 不同系统压力下的平均壁温

Fig. 5 Friction factor f change at various system pressure

Fig. 6 Average wall temperature at various system pressure

几乎不变(最大增加 4 ℃)。这是因为压力提高导致正癸烷黏性增加,阻碍光滑通道内流体的流动,从而降低传热效果,故壁温会增加;粗糙通道亦是如此。但不同系统压力间差距变化并不大,这也是由于其提升潜力不足而造成的。

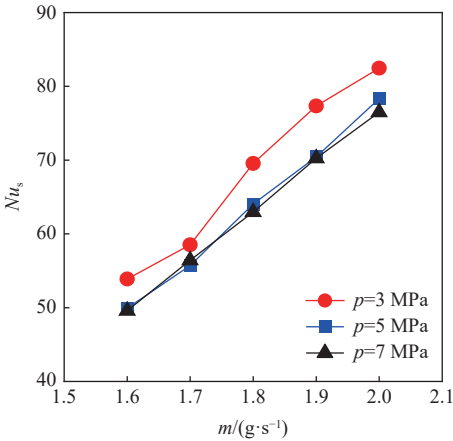
壁面热流密度 q 为 0.29 MW/m² 时,不同压力下光滑和粗糙通道的努塞尔特数 Nu 如图 7 所示。2 通道的努塞尔特数 Nu 数随流量增长, Nu_t 最大增加了 28, Nu_s 最大增加了 15, 增长趋势相差不大。同摩阻系数的表现一样,粗糙表面带来明显的换热强化,粗糙通道的努塞尔特数 Nu_t 相比光滑通道的 Nu_s 整体要高出 115%~146%。随着系统压力提高,粗糙通道的努塞尔特数 Nu_t 降低(最大降低 4.7),光滑通道的 Nu_s 也是如此(最大降低 7)。光滑通道内流动损失随系统压力增加,流体与壁面之间的热量传递便会增强,这样壁面温度上升,导致通道内的流体温度也会上升,而这 2 种之间的差距并没有明显增大,因此 Nu_s 在不同系统压力之间的差距没有拉开。而在粗糙通道内,首先,流动损失随系统压力增大而减小,这是不利于流体与壁面之间进行热

量传递的。其次,系统压力增加还会导致流体的黏性和密度增加,近壁面处的涡流便会消耗更多时间来脱离粗糙壁面,这也是不利于传热的。另外,流体温度上升还会使其导热率降低,在这些影响的作用之下,粗糙通道的传热效果会随系统压力变化的明显效果会比光滑通道的变化更明显。

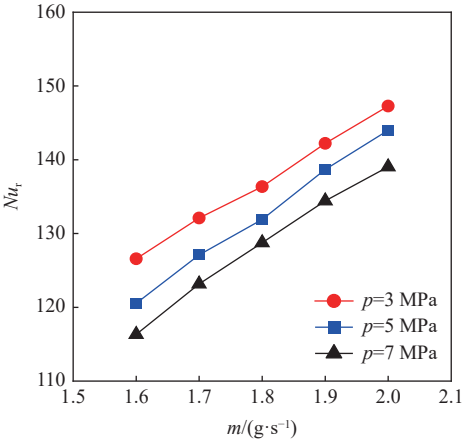
2.2 壁面热流密度对流动和传热性能的影响

2.2.1 流动性能对比分析

压力为 3 MPa 时,不同壁面热流密度下光滑和粗糙通道的压力损失如图 8 所示。在 1.6 g/s 小流量时,光滑通道不同加热功率率间的压力损失几乎一致。随着热流密度提高,光滑通道的总压力损失减小(最大增加 0.13 kPa),而粗糙通道的总压力增加(最大增加 0.1 kPa),这是因为粗糙通道中额外增加的沿程阻力损失集中在壁面附近,粗糙通道本就比光滑通道的沿程阻力损失大,增大热流密度会让壁面温度提升,但会抑制这部分沿程压力的损失;而光滑通道的沿程阻力损失处于初步形成阶段,温度提升促使光滑通道的这部分阻力损失进一步增大。光滑通道内壁面粗糙度较小,在增加热流密度的情况下,导致了流体内部的温度上升,从而流体



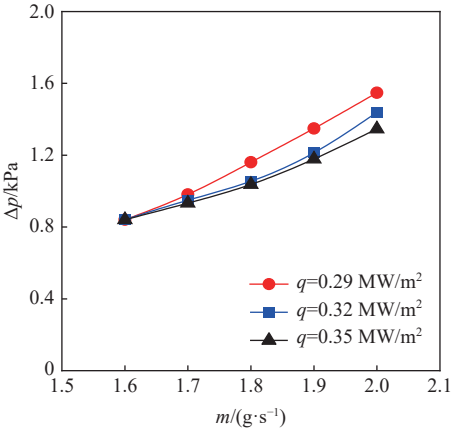
(a) 光滑通道



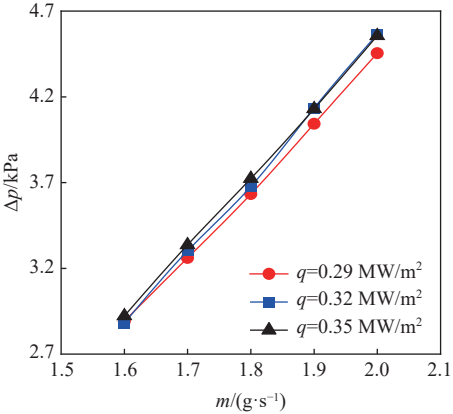
(b) 粗糙通道

图 7 不同系统压力下的 Nu

Fig. 7 Nu at various system pressure



(a) 光滑通道



(b) 粗糙通道

图 8 不同热流密度下的 Δp

Fig. 8 Δp at various heat flux densities

黏性减小,削弱了随流量增大的阻力。因此,光滑通道的损失减少,流动阻力降低。粗糙通道内流体分子与管道表面的摩擦阻力是主要的阻力,壁面热流密度影响流体与管道表面的温度差和热传递强度,虽然温度上升会使黏性减小,但流体与粗糙壁面的阻力仍有增加,粗糙通道内部流动已足够复杂,增加壁面热流密度对流动影响不大。

压力为 3 MPa 时,不同壁面热流密度下光滑和粗糙通道的摩阻系数如图 9 所示。摩阻系数 f 与压力差 Δp 成正比,随着热流密度增加,光滑通道的摩阻系数 f_s 降低明显(平均减小 5%),而粗糙通道摩阻系数 f_r 增加幅度较弱(最大增加 2%)。光滑通道不同系统压力之间 f_s 的差距比粗糙通道的明显。流体温度升高导致流体黏性和密度降低,光滑壁面对流体的摩擦作用小,摩阻系数明显下降。而粗糙通道内,流体温度升高导致其黏性降低,会使流体微团受壁面摩擦作用减小,摩阻系数便会轻微增加。

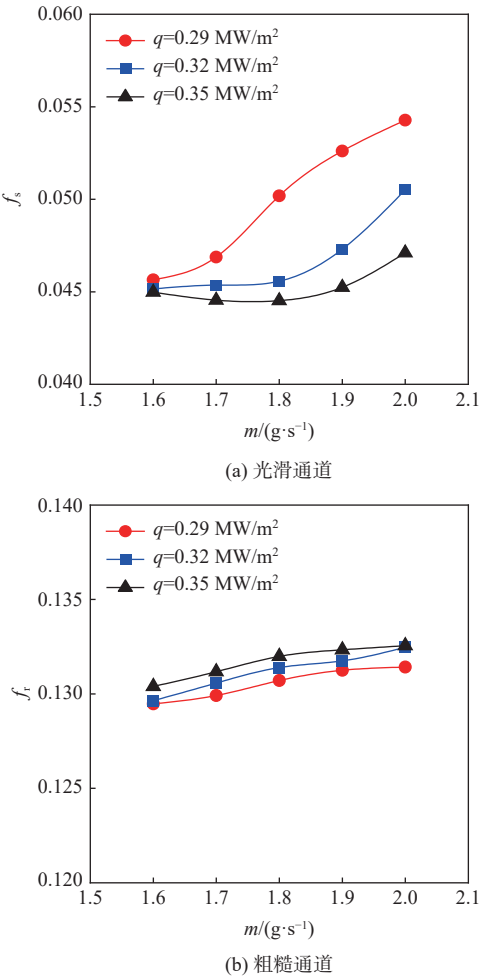


图 9 不同热流密度下的摩阻系数

Fig. 9 Friction factor at various heat flux densities

2.2.2 传热性能对比分析

压力为 3 MPa 时,不同壁面热流密度下光滑和

粗糙通道的平均壁温 T 如图 10 所示。随着热流密度提高,两通道的平均壁温 T 有规律地增加,光滑通道最大增加了 45 $^{\circ}\text{C}$,而粗糙通道的最大增加 5 $^{\circ}\text{C}$ 。这是因为粗糙通道相比光滑通道本就强化了热量传递。首先,粗糙通道内崎岖不平的粗糙峰直接接触到主流区的流体强化了热量传递;其次,流体冲撞粗糙峰之后会增加热流密度,粗糙壁面则会传递更多热量给流体,使壁面得到冷却从而温度上升较慢。而光滑通道内,壁面与流体之间的热量传递没有粗糙通道的多,故其壁面温度随热流密度增加有明显增加。

压力为 3 MPa 时,不同壁面热流密度下的光滑和粗糙通道的努塞尔特数 Nu 如图 11 所示。随着热流密度增加,光滑通道的 Nu_s 最大增加 13,而粗糙通道的 Nu_r 最大增加 5.3。而热流密度对 Nu 的影响同其对壁温的影响相似, Nu_r 在各流量下随热流密度增加的步调相差无几。这是因为光滑通道与流体之间的传热由边界层内的纯流体导热主宰,与粗糙通道内边界层含有粗糙峰固体导热的效果相差很大。并且,壁面热流密度增加致使壁面附近流

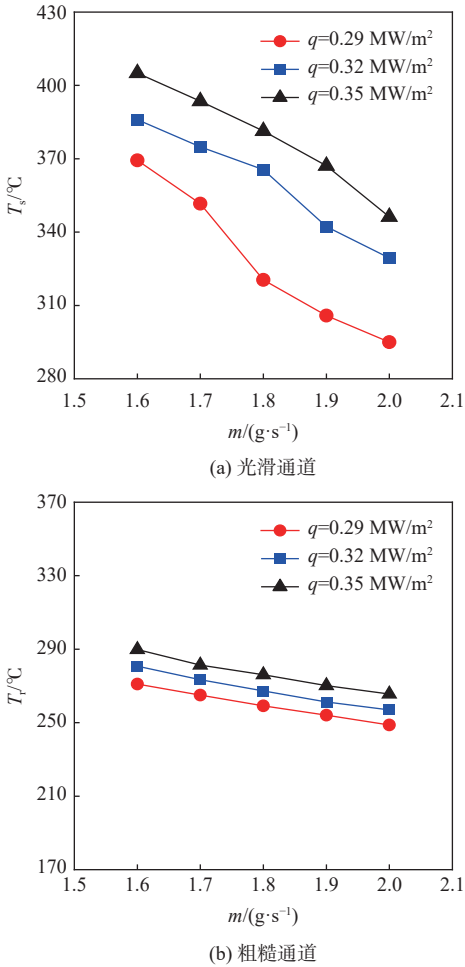
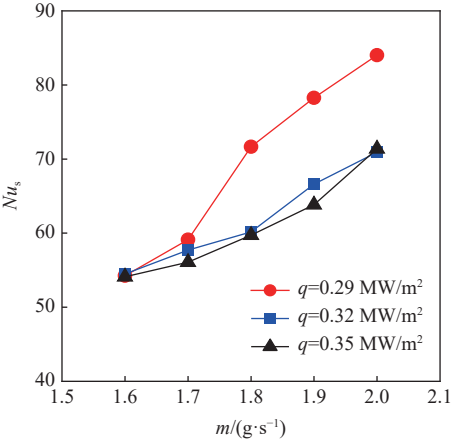
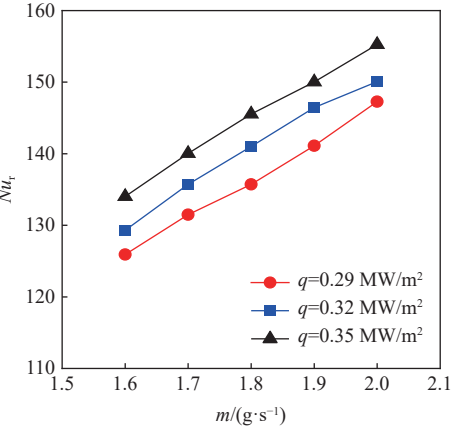


图 10 不同热流密度下的平均壁温

Fig. 10 Average wall temperature at various heat flux densities



(a) 光滑通道



(b) 粗糙通道

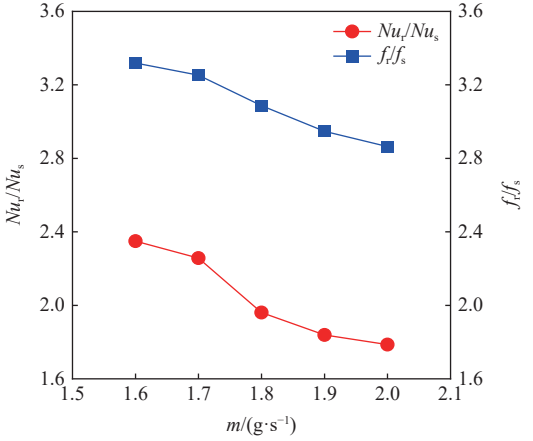
图 11 不同热流密度下的 Nu

Fig. 11 Nu at various heat flux densities

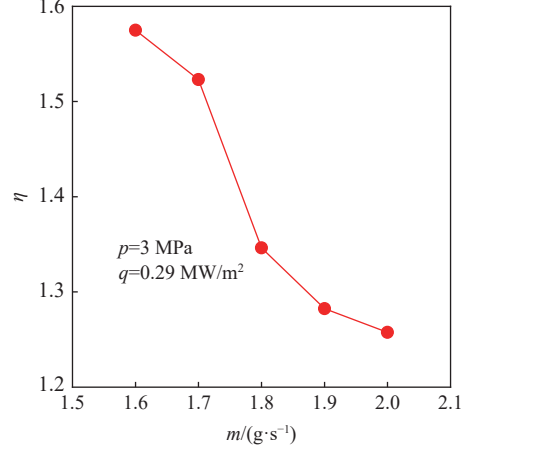
体密度降低,光滑通道内边界层内导热效率也会降低,因此,光滑通道的努塞尔特数随热流密度增加而减小。而在粗糙通道内,壁面热流密度的增加会通过粗糙峰直接与主流区的流体交换热量,并且,边界层内的流动比光滑通道的混乱得多,因为粗糙壁面会干扰流动,那些涡流与二次流会反复冲撞粗糙表面从而促进热量传递,流体温度上升导致其密度下降很有可能使冲撞更加活跃,传热效果便会随热流密度增加而增强。

2.3 综合效果

两通道摩阻系数 f 与努塞尔特数 Nu 的对比如图 12(a)所示。粗糙通道对比光滑通道虽然提高了 2.3 倍传热效果,但也带来了 3.3 倍的压力差。在流量变换初始粗糙通道这 2 种增强效果最为明显,但随着流量增加,光滑通道的提升空间比粗糙通道的大,故粗糙通道的强化作用随流量增加变弱了。图 12(b)表示粗糙通道的综合传热系数随流量变化,流量在 1.6 g/s 时,综合传热系数 η 为 1.57,随流量增大而降低到 1.26,这说明在选定的流量范围内由 AM 技术制造的粗糙通道的综合传热效果总是强于机加工光滑通道,特别是在小流量时的强化效



(a) 流动与传热



(b) 综合传热系数 η

图 12 综合传热效果对比

Fig. 12 Comparison of integrated heat transfer characteristics

果较为明显。

2.4 超临界正癸烷在 AM 通道内的摩阻系数与努塞尔特数经验关联式

本实验探究了系统压力与热流密度对 AM 通道与机械加工通道的流动和传热性能之间的关系。然而实际工况通常是复杂的,因为它受到多种因素的影响。为更好地理解实验数据并推导出有用的设计参考,需使用经验关联式来描述流动和传热性能与其他重要变量之间的关系,对于空天动力领域,则对热环境和动力亏损的评估更具有参考意义。因此,本研究对 AM 通道拟合了努塞尔特数和摩阻系数的经验关联式。

关于 AM 通道的努塞尔特数关联式为

$$Nu = 0.5558 \times Re_{in}^{0.8197} \times Pr^{-0.7668} \quad (13)$$

摩阻系数关联式为

$$f = 0.07573 \times Re_{in}^{0.1332} \times Pr^{-0.3250} \quad (14)$$

式中: Re_{in} 为通道入口雷诺数; Pr 为流体力质的普朗特数。

适用范围: AM 通道粗糙度 $Ra=11 \mu m$ 、 $3000 <$

$Re_{in} < 5\,000$ 、 $5 < Pr < 7$ 。

图 13 为超临界碳氢燃料在 AM 通道内努塞尔特数和摩阻系数的实验数值与预测值之间的差异, 预测值 Nu_{pre} 与实验值 Nu_{exp} 的差异在 5.2% 之内, 预测值 f_{pre} 与实验值 f_{exp} 的差异在 0.3% 之内。

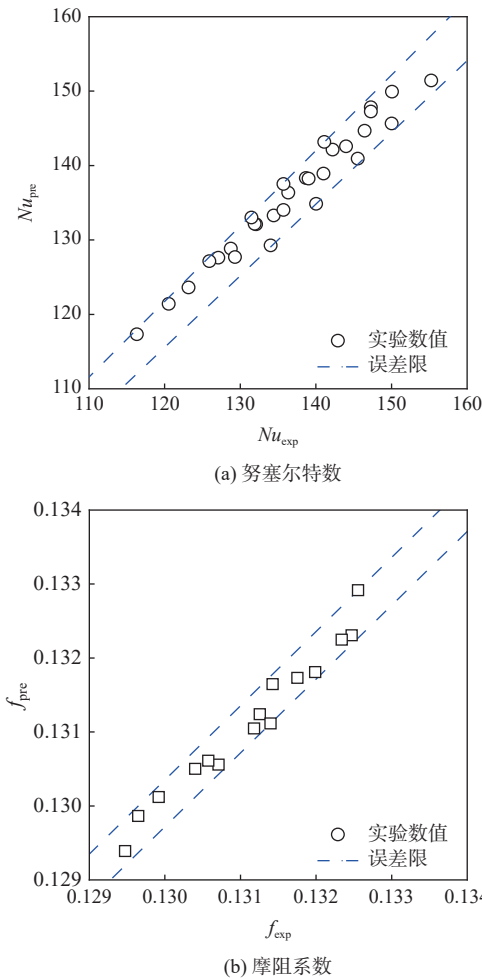


图 13 超临界正癸烷在 AM 通道中努塞尔特数和摩阻系数预测值与实验值对比

Fig. 13 The Nu and f in predicted of supercritical n-decane in the AM channel compared with experimental data

3 结 论

本文通过实验方法对比了超临界压力下正癸烷在 AM 粗糙通道与普通光滑通道中的流动换热对比, 得到了不同工况下 2 种通道的摩阻系数 f 与努塞尔特数 Nu , 对各工况下流动换热特性规律分析, 得到以下结论:

1) 与光滑通道相比, 粗糙通道的传热性能有所增强, 努塞尔特数 Nu 最多增加了 146%, 但带来额外沿程阻力损失, 摩阻系数 f 最多增加了 230%。粗糙通道的综合传热性能随着流量的增加而降低, 最高达到 1.57。

2) 随着系统压力增加, 可以显著减小粗糙通道

中的沿程损失, 摩阻系数 f 最多可降低 2.6%, Nu 值最多可降低 4.7%, 表明增加系统压力对粗糙通道的流动和传热性能可起到抑制作用。相比之下, 在光滑通道中增加系统压力会导致 f 增加。

3) 随着壁面热流密度增加, 粗糙通道的摩阻系数 f 增加幅度较弱 (最大增加 2%), Nu 最多提升 4%, 表明增加壁面热流密度对粗糙通道的流动和传热性能可起促进作用。

4) 针对 AM 通道的努塞尔特数和摩阻系数关联式进行了拟合。

参考文献 (References)

[1] NOURIN F N, AMANO R S. Review of gas turbine internal cooling improvement technology[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 143(8): 080801-080809.

[2] SINGH J, ALEJANDRO M C, NIGAM K D P. Process intensification for compact and micro heat exchangers through innovative technologies: a Review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(31): 13819-13847.

[3] HASAN M I, RAGEB A A, YAGHOUBI M, et al. Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(8): 1607-1618.

[4] 刘洋, 周建平, 张晓天. 增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 83-91.

LIU Y, ZHOU J P, ZHANG X T. Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 83-91(in Chinese).

[5] PU H, LI S, DONG M, et al. Convective heat transfer and flow resistance characteristics of supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal rectangular mini-channel[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019(108): 39-53.

[6] ZHAO W, SONG Z, LI H, et al. Research on heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure in circular tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018(96): 507-515.

[7] 黄世璋, 阮波, 高效伟, 等. 超临界压力下碳氢燃料裂解与流动传热模拟的快速算法[J]. 航空学报, 2018, 39(4): 121650.

HUANG S Z, RUAN B, GAO X W, et al. A fast algorithm for simulating hydrocarbon fuel heat transfer with endothermic pyrolysis under supercritical pressures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 121650(in Chinese).

[8] 阮波. 超临界压力下正癸烷裂解吸热和对流传热现象的数值模拟研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.

RUAN B. A numerical simulation study on the endothermic cracking and convective heat transfer phenomena of n-decane under supercritical pressure[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013(in Chinses).

[9] 张磊, 乐嘉陵, 张若凌, 等. 超临界压力下湍流区碳氢燃料传热研究[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 225-229.

ZHANG L, LE J L, ZHANG R L, et al. Heat transfer of hydrocarbon fuel in turbulent flow region under supercritical pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(2): 225-229(in

Chinese).

[10] CORMIER Y, DUPUIS P, FARJAM A, et al. Additive manufacturing of pyramidal pin fins: Height and fin density effects under forced convection[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014(75): 235-244.

[11] HUTTUNEN E, NYKÄNEN M T, ALEXANDERSEN J. Material extrusion additive manufacturing and experimental testing of topology-optimised passive heat sinks using a thermally-conductive plastic filament[J]. *Additive Manufacturing*, 2022(59): 103123.

[12] ALTENEJI M, ALI M, KHAN K A, et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers[J]. *Energy Storage and Saving*, 2022, 1(3): 9.

[13] DELGADO J, CIURANA J, RODRÍGUEZ C A. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(5): 601-610.

[14] STRANO G, HAO L, EVERSON R M, et al. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(4): 589-597.

[15] TOWNSEND A, SENIN N, BLUNT L, et al. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review[J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 34-47.

[16] SHEN S, XU J L, ZHOU J J, et al. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(11): 1311-1325.

[17] HUANG K, WAN J W, CHEN C X, et al. Experimental investigation on friction factor in pipes with large roughness[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 50: 147-153.

[18] 周红秀, 张奥, 刘悦闻, 等. 壁面表面粗糙度对喷孔内空化流动特性的影响[J]. *内燃机与动力装置*, 2022, 39(2): 7-13.

ZHOU H X, ZHANG A, LIU Y W, et al. The effect of wall surface roughness on cavitation flow characteristics in nozzle[J]. *Internal Combustion Engine & PowerPlant*, 2022, 39(2): 7-13(in Chinese).

[19] LIU Y, XU G, SUN J, et al. Investigation of the roughness effect on flow behavior and heat transfer characteristics in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 83: 11-20.

[20] YUAN Y, TAO Z, LI H, et al. Experimental investigation of surface roughness effects on flow behavior and heat transfer characteristics for circular microchannels[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(6): 1575-1581.

[21] 李虹杨, 郑赞. 粗糙度对涡轮叶片流动转捩及传热特性的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(10): 2038-2047.

LI H Y, ZHENG Y. Effect of surface roughness on flow transition and heat transfer of turbine blade[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(10): 2038-2047(in Chinese).

[22] NATRAJAN V K, CHRISTENSEN K T. The impact of surface roughness on flow through a rectangular microchannel from the laminar to turbulent regimes[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2010(9): 95-121.

[23] 郝鹏飞, 姚朝晖, 何枫. 粗糙微管道内液体流动特性的实验研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 5.

HAO P F, YAO C H, HE F. Experimental study of flow characteristics in rough microchannels[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 5(in Chinese).

[24] 鲁聪达, 薛浩, 吴化平, 等. 随机粗糙微通道内部流动与传质特性[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(12): 7.

LU C D, XUE H, WU H P, et al. Flow and mass transfer characteristics in random roughness surface microchannels[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(12): 7(in Chinese).

[25] ROVENSKAYA O I. Numerical analysis of surface roughness effects on the Poiseuille flow caused by a small pressure drop[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 110: 817-826.

[26] RAWOOL A S, MITRA S K, KANDLIKAR S G. Numerical simulation of flow through microchannels with designed roughness[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2006, 2(3): 215-221.

Experimental study on flow and heat transfer of hydrocarbon fuels in additive manufacturing channels at supercritical pressure

CAI Lei¹, XIAO Ying², HAN Huaizhi^{1,*}, YU Ruitian¹, LUO Wen¹

(1. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621022, China)

Abstract: This article presents a comparative experimental study on the flow and heat transfer performance differences between additive manufacturing (AM) rough channels and machined smooth channels for supercritical pressure n-decane. Using a roughness gauge, the surface average roughness of the smooth channel and AM channel were determined to be 3 μm and 11 μm , respectively. The study investigated variations in the friction factor (f) and Nusselt number (Nu) of the two channels under different flow rates, system pressures (3 MPa, 5 MPa, and 7 MPa), and wall heat flux densities (0.29 MW/m², 0.32 MW/m², and 0.35 MW/m²). The results showed that, within the selected flow rate range, both f and Nu of the AM channel were higher than those of the smooth channel, with f being 2.8~3.5 times that of the smooth channel, and Nu being 1.7~2.3 times that of the smooth channel. Increasing the system pressure reduced f of the AM channel, but increased that of the smooth channel, while Nu decreased for both channels. As the wall heat flux density increased, both f and Nu of the AM channel decreased, while those of the smooth channel increased. The rough channel had a comprehensive heat transfer coefficient of 1.2~1.5, showing outstanding overall heat transfer performance and greater effectiveness at low flow rate. The correlations of the Nu and f of supercritical hydrocarbon fuel in additive manufacturing channel are proposed.

Keywords: roughness; additive manufacturing; friction loss; heat transfer characteristics; experimental study

Received: 2023-03-10; **Accepted:** 2023-04-04; **Published Online:** 2023-05-05 08:41

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230504.1814.002

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (T2441001); Special Fund of Sichuan Provincial Gas Turbine Combustion Engineering Technology Research Center (JMRH-0000-2024-00001)

* **Corresponding author.** E-mail: hanhz@scu.edu.cn