

3D 打印矩形粗糙通道内火箭煤油流动换热特性 试验方法研究

刘朝晖¹, 彭乐钦², 李沛奇¹, 杨宝娥², 王玫²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安航天动力研究所航天液体动力全国重点实验室, 710100, 西安)

摘要: 为探究 3D 打印再生冷却通道在液体火箭发动机推力室中的替代应用特性, 研制了具有不同内表面粗糙度的正弦波纹结构 3D 打印 304 不锈钢矩形通道。内截面名义尺寸为 $2.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$, 设计粗糙度分别为 6.3 、 25.0 、 $100.0\text{ }\mu\text{m}$, 实际粗糙度 Ra 分别为 11.88 、 12.70 、 $17.53\text{ }\mu\text{m}$, 通过将高温电阻率法和像素法相结合获得了 3D 打印通道的实际内径和壁厚, 修正了火箭煤油流动换热的内壁温和热流密度, 建立了 3D 打印粗糙通道内火箭煤油流动换热特性试验研究方法。试验参数如下: 压力处于 $15\sim 20\text{ MPa}$ 范围、质量流速在 $12\ 450\sim 24\ 900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间、热流密度为 $5\sim 15\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、流体温度为 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究表明: 火箭煤油流动换热特性受到热流密度、流体温度和质量流速的影响; 流体温度处于 $50\sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 换热系数增加约 $25\%\sim 33\%$; 热流密度处于 $5.0\sim 15.0\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围内, 换热系数增加了 8.3% ; 质量流速为 $12\ 450\sim 24\ 900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内, 换热系数增加了 60.2% 。粗糙度增加对火箭煤油流动换热起到强化作用, 粗糙度从 $11.88\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $17.53\text{ }\mu\text{m}$ 时, 换热强化幅度超过 20% 以上。该研究可为 3D 打印通道在火箭发动机推力室中的替代应用提供参考。

关键词: 3D 打印; 矩形通道; 流动换热; 粗糙度; 火箭煤油

中图分类号: V19 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501005 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0047-10

Experimental Research on Flow and Heat Transfer Characteristics of Rocket Kerosene in 3D Printed Rectangular Rough Channels

LIU Zhaohui¹, PENG Leqin², LI Peiqi¹, YANG Baoc², WANG Mei²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, 710100 Xi'an, China)

Abstract: To investigate the alternative application characteristics of 3D printed regenerative-cooling channels in the thrust chamber of liquid rocket engines, 3D printed stainless steel 304 rectangular minichannels with sinusoidal wave internal surface structures and varying roughness levels are developed. These minichannels feature a cross-sectional dimension of $2.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$, with specified roughness values of 6.3 , 25.0 , and $100.0\text{ }\mu\text{m}$, while the measured actual roughness (Ra) values are 11.88 , 12.70 , and $17.53\text{ }\mu\text{m}$, respectively. By utilizing a combination of the high-temperature resistivity method and pixel method, the actual inner diameters and wall thicknesses of three types of 3D printed channels are acquired. This process corrects the internal wall

temperature and heat flux density associated with the flow of rocket kerosene. Subsequently, an experimental research method is developed to investigate the heat transfer characteristics of rocket kerosene within 3D printed rough channels. Experimental parameters include a pressure range of 15—20 MPa, mass flow rates between 12 450 and 24 900 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, heat flux densities from 5 to 15 $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$, and fluid temperatures from ambient to -150°C . The research indicates that the heat transfer characteristics of rocket kerosene flow are influenced by heat flux density, fluid temperature, and mass flow rate. The heat transfer coefficient increases by approximately 25%—33% for fluid temperatures ranging from 50 to 135°C . With heat flux densities varying from 5.0 to $15.0 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$, the heat transfer coefficient increases by 8.3%. Additionally, for mass flow rates within the range of 12 450—24 900 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the heat transfer coefficient shows a significant increase of 60.2%. Enhancing roughness improves the heat transfer of rocket kerosene flow, with an increase in roughness from 11.88 μm to 17.53 μm resulting in over a 20% enhancement in heat transfer.

Keywords: 3D printing; rectangle channel; heat transfer; roughness; rocket kerosene

近年来,增材制造技术在火箭发动机领域得到了广泛的应用^[1-2]。增材制造一体成型的加工优势和成本优势,很好地契合了未来航班化航天运输系统的发展需求^[3]。天龙二号遥一运载火箭是我国首款采用3D打印高压补燃火箭发动机的运载火箭^[4]。开展增材制造技术在火箭发动机关键部件上的应用研究,对促进增材制造技术和火箭发动机技术的迭代发展具有重要意义。液体火箭发动机燃烧室壁面热环境非常苛刻,通常采用再生冷却技术进行主动热防护^[5-6]。火箭煤油同时作为推进剂和冷却剂,在进入燃烧室燃烧之前,流经冷却通道对燃烧室壁面进行冷却。通道内径尺寸一般处于1.0 mm量级^[6]。

火箭煤油一般是由多种碳氢化合物组成的混合物,其临界压力为2.5 MPa,临界温度为 404°C ^[7-8]。再生冷却通道中火箭煤油的压力一般大于10 MPa^[9],远高于临界压力。火箭煤油在冷却通道内的质量流速达到 $8\,500\sim 50\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,冷却通道的热流密度可达到 $50 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[5]。因此,火箭煤油在再生冷却通道内的流动换热过程,属于超临界压力下、小通道内、高质量流速和高热流密度条件下的流动换热问题^[6]。

火箭煤油在再生冷却通道内的流动换热特性研究多在机加工金属通道内开展。胡志宏等^[10-12]研究了高参数火箭煤油的流动换热特性,在压力为15 MPa、热流密度为 $55 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的条件下,获得了高参数火箭煤油流动换热关联式。罗毓珊等^[13]研究了方形粗糙通道内火箭煤油的流动换热及结焦特性,通道材料为铬青铜。Wang等^[14]研究了矩形和圆形人为粗糙铜管内煤油的流动换热特性。Zhao等^[15]研究了不锈钢管内火箭煤油的流动换热特性。高中华等^[16]研究了高参数火箭煤油在高温

合金钢管内的流动换热特性。宋晨阳^[17]研究了煤基煤油、石油基煤油和高能煤油在高温合金钢管内的流动换热特性。Giovanetti等^[18]研究了火箭煤油的流动换热及结焦特性,试验通道为双层复合金属管,内层为不锈钢,外层为镍铬铁合金 Inconel 600。Linne等^[19]在电加热管内对超临界 JP-7 在高热流密度条件下的传热能力和热稳定性进行了实验研究,并拟合了换热关联式。罗玉宏等^[20]研究了添加减阻剂的火箭煤油流动阻力与换热特性,试验段为不锈钢圆管。张赞坚等^[21]探索了减阻剂在高参数火箭煤油中的减阻效果和传热弱化效果。火箭煤油在宽广温度和压力范围的热物性测量^[22-26]可为再生冷却特性研究提供参考。

3D打印一体成型与机加工一次成型这两种加工方式有所不同,这导致它们加工出的通道微结构存在差异。为探究3D打印通道内火箭煤油的再生冷却效果,本文采用3D打印技术加工了具有3种不同粗糙度的矩形小通道,开展了高参数火箭煤油的流动换热特性的相关研究,可为3D打印技术在火箭发动机再生冷却通道上的应用提供参考。

1 试验系统及试验方法

1.1 试验系统

火箭煤油流动换热试验系统如图1所示。火箭煤油从燃料箱流出,经过滤器等进入高压柱塞泵,柱塞泵设置有稳压罐以稳定系统压力;通过变频器控制电机转速调节流量,煤油通过德国 Rheonik 质量流量计后依次流经预热段和试验段;预热段和试验段均采用低电压大电流交流电源加热;从试验段流出的燃料进入蛇形管套管式冷凝换热器,冷却后经背压阀排至废液箱,背压阀用来调节系统压力。

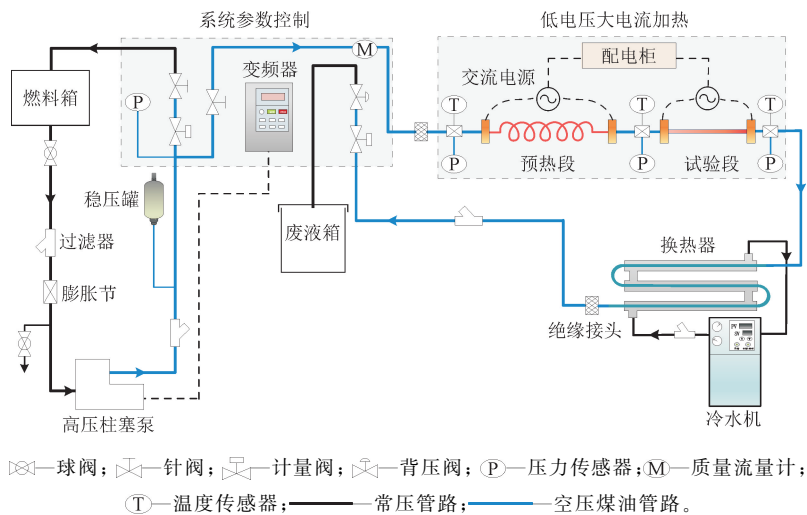


图 1 火箭煤油流动换热试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system for heat transfer of rocket kerosene

1.2 3D 打印矩形粗糙通道试验段

3D 打印矩形通道材料为 06Cr19Ni10,内截面设计尺寸为 2.0 mm×2.0 mm,设计壁厚为 1.0 mm。3 种具有不同内表面粗糙度的 3D 打印矩形通道如图 2 所示,设计粗糙度分别为 6.3、25.0 和 100.0 μm。为方便矩形通道与电加热极板连接,在通道两端各设置了 10 mm 长的圆形外截面端部(内截面为矩形、外截面为圆形)。中间矩形通道部分(内、外截面均为矩形)为设计的有效加热长度 120 mm,圆形外截面端部可直接与极板焊接。



图 2 粗糙度不同的 3D 打印矩形通道照片

Fig. 2 Photos of 3D printed rectangle channel with different roughness

3D 打印通道的外表面为光滑表面,粗糙通道的

内表面设计为沿着轴向的正弦波纹理结构,且正弦波的周期 b 等于波峰波谷垂直距离 $2e$,如图 3 所示。通过正弦波纹理结构的 3D 打印,构建不同的内表面粗糙度,如表 1 所示。其中 1 号为光管,内表面不设置正弦波纹理结构;2、3 号为内表面粗糙管。光管的名义粗糙度为 6.3 μm,两种粗糙管的内表面的设计粗糙度分别为 25.0、100.0 μm。

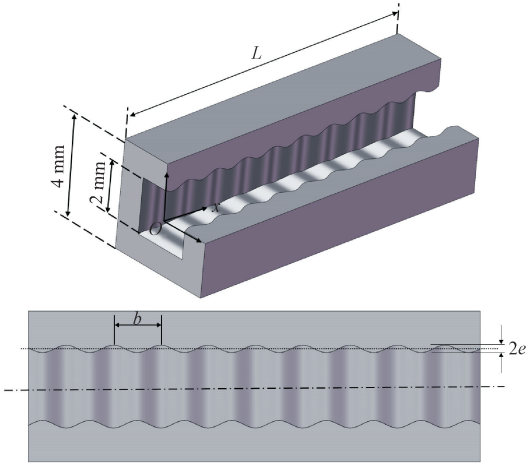


图 3 带有正弦粗糙度的通道三维模型示意图

Fig. 3 Diagram of 3D model of the rectangle channel with sinuoidal wave internal surface structure

表 1 3D 打印通道结构、尺寸及内表面粗糙度

Table 1 Dimension and internal surface roughness of the 3D printed channels

序号	设计粗糙度/μm	正弦波结构尺寸/μm	算术平均粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	均方根粗糙度 $Rq/\mu\text{m}$
1	6.3		11.88	14.80
2	25.0	$e=25, b=50$	12.70	16.04
3	100.0	$e=100, b=200$	17.53	21.97

采用表面结构轮廓法评定 3D 打印矩形通道内表面粗糙度,测量仪器为英国泰勒霍普森公司的非

球面测量仪,型号为 PGI 3D,精度可达 0.029 μm。测量结果表明,实际粗糙度与设计粗糙度存在较大

偏差,其中最小粗糙度大于设计值,且最大粗糙度远小于设计值,显然这是由于 3D 打印加工方法及加工精度不足所致。

3 种粗糙管的内表面显微镜放大照片如图 4 所示,随着设计粗糙度增加,实际粗糙度显著增加,由图 4 能明显看出管内粗糙度的差别。3 种管道的内

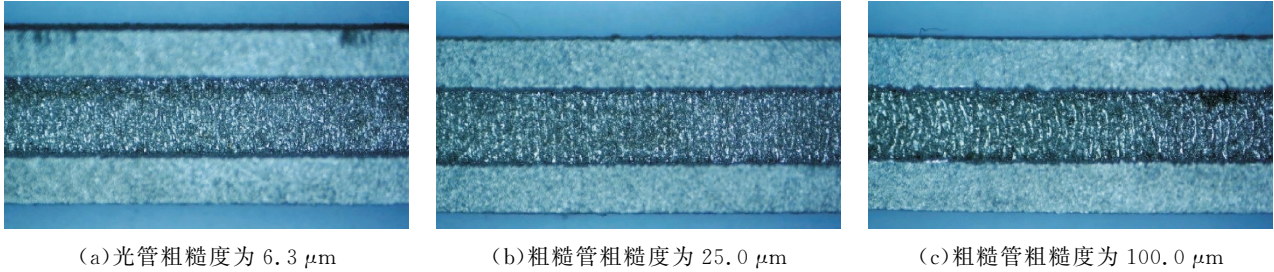


图 4 3D 打印矩形通道内表面的显微镜拍摄照片

Fig. 4 Photos of the internal surface of the 3D printed rectangle channel

3D 打印矩形通道电加热试验段结构如图 5 所示,极板上打圆孔,3D 矩形通道的两端插入极板焊接。中间的矩形通道部分长度为 120 mm,由于焊接方式的影响,矩形通道实际的有效电加热长度略小于 120 mm。试验段沿轴向布置 $C_1 \sim C_6$ 共 6 个测温截面,每个测温截面在矩形通道外表面的上壁面和下壁面各点焊一根直径为 0.2 mm 的 Omega K 型热电偶,用于外壁温测量。

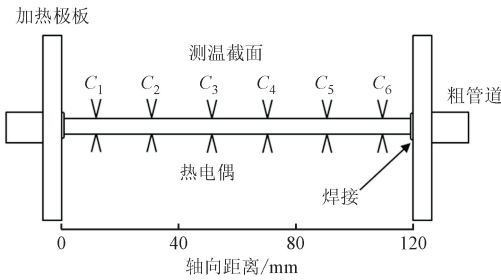


图 5 3D 打印矩形通道试验段结构及热电偶布置示意图
Fig. 5 Diagram of the test section of the 3D printed rectangle channel and the distribution of the thermal couples

1.3 数据处理

假设矩形通道周向热流密度均匀分布,采用一维稳态有内热源导热方程,如下式

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\varphi}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

式中: φ 为内热源强度; λ 为通道壁面的导热系数。

通过测量获得的外壁温 T_{wo} 计算内壁温 T_{wi} 。试验通道外壁包裹保温性能良好的耐高温保温棉,外壁面当成绝热边界条件,表达式如下

$$\begin{cases} T = T_{wo}, x = a \\ \frac{dT}{dx} = 0, x = a \end{cases} \quad (2)$$

表面粗糙度绝对值差异达到了约 48%,相对粗糙度范围为 0.005 9~0.008 8,超过了 0.5%。查询水的莫迪图可知,当雷诺数处于 $10^4 \sim 10^5$ 范围内(本文试验的雷诺数范围),该相对粗糙度处于水力光滑管和水力粗糙管的中间区域,流动换热同时受到雷诺数和相对粗糙度的影响。

式中:矩形通道外截面边长为 $2a$, a 是常数。

对以上方程进行离散求解:对矩形通道沿壁厚方向分别进行 10、20、50 等分,采用迭代计算特定工况下矩形通道的内壁温,在热流密度为 $5.0 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、外壁温为 300°C 时,计算得出截面温度 T_w 分布如图 6 所示, $x=1.0$ 表示外壁面, $x=0$ 表示内壁面。

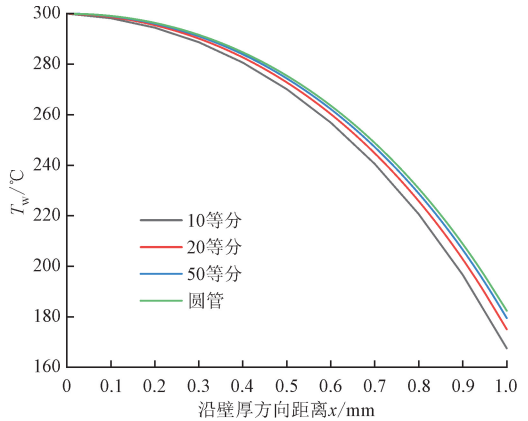


图 6 不同等分矩形通道和圆管的截面温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of the rectangle and circular channel

由图 6 可知,随着等分节点数增加,温度分布更趋向于相同直径下的圆形通道(外径为 4 mm、内径为 2 mm 的圆形截面通道)。当等分数足够多,矩形通道的内壁温与圆形通道内壁温相同。这是由于当内热源强度一定的条件下,假设热流密度沿周向均匀分布,那么圆形和矩形通道沿着径向的热流密度都呈线性分布,所以矩形管中心点处内壁温与圆管相同。因此,当矩形通道壁厚与内截面边长相当时,可采用圆管的一维稳态有内热源方程计算内壁温;

而当矩形通道壁厚远小于内截面边长时,可采用无限大平板的一维稳态有内热源方程计算内壁温。

为了计算方便,本文采用圆形通道的内壁温计算公式如下

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{d_{in}}{2} \frac{q_1}{\lambda_1} \left(\frac{d_{out}^2}{d_{out}^2 - d_{in}^2} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

式中: d_{in} 为试验段内截面边长; d_{out} 为试验段外截面边长; q_1 为当地有效加热热流密度。 λ_1 为当地管壁导热系数, 直接采用不锈钢的导热系数 (GB/T 20878—2007), 表达式如下

$$\lambda_1 = 15.0 + 0.013(T_{wo} + T_{wi})/2 \quad (4)$$

导热系数与温度呈线性变化。

q_1 表达式如下

$$q_1 = \frac{UI}{\pi d_{in} L} - \frac{Q_w + Q_{jb}}{\pi d_{in} L} \quad (5)$$

式中: U 为试验段加热电压; I 为试验段加热电流; L 为试验段加热长度; Q_w 为管壁散热; Q_{jb} 为加热电极板散热。 Q_w 采用干烧法标定, 是外壁温的函数。 Q_{jb} 采用热平衡法标定, 已知焓值的流体流过试验段, 流体吸热热量是加热功率与散热损失的差值。管壁散热和极板散热之和不超过加热量的 2%。

试验段各测温点处的对流换热系数表达式如下

$$h = \frac{q_1}{T_{wi} - T_b} \quad (6)$$

式中: T_b 为流体温度, 可通过燃料热沉与流体温度对应关系计算获得。

1.4 不确定度

流体温度的测量采用美国欧米茄出厂的 K 型铠装热电偶, 不确定度为 1.1℃。通过计算得到实验中各测量参数及测量结果的不确定度, 如表 2 所示。

表 2 试验参数的不确定度

Table 2 The uncertainties of the experimental parameters

试验参数	标准不确定度
内壁温	1.3%
压力	0.1%
质量流量	0.2%
电压	0.5%
电流	0.5%
热流密度	1.6%
换热系数	6.5%

2 试验结果与讨论

火箭煤油流动换热特性研究采用恒热流密度试验方法, 即将试验段热流密度升高到预定值并保持

不变, 然后逐步提高试验段入口流体温度, 实现恒热流密度、不同流体温度条件下的火箭煤油流动换热性能测试。

2.1 3D 打印通道的材料特性

2.1.1 3D 打印通道的电阻率

通过给 3D 打印通道两端施加电压, 给通道加热, 并测量电流, 可获得通道在不同温度下的电阻。如图 7 所示, 按名义壁厚 1.0 mm 计算了 3D 打印通道的电阻率 ρ 。从图 7 可知: ①3D 打印通道的电阻率显著大于 304 不锈钢材料的理论电阻率 ρ_T , ρ_T 表达式如下

$$\rho_T = 76.3165 \times 10^{-8} \times (1 + 5.802 \times 10^{-4} T) \quad (7)$$

随着温度增加, 电阻率偏差增加, 温度范围为 150~450℃, 偏差范围约在 7.2%~15.6%; ②不同粗糙度的矩形通道电阻率计算值显著不同, 且电阻率差值达到 $0.05 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$, 偏差约为 5%。

3D 打印通道的电阻率高于不锈钢机加工材料的电阻率, 这归因于 3D 打印材料的微结构特性。3D 打印材料是通过激光溶解金属粉末, 逐层堆积而成, 在加工的过程中, 存在材料成型时的温度不均和时间先后问题; 而机加工材料属于一次成型, 加工过程中材料可视为在均匀温度下由液态金属同时凝固而成。这使得 3D 打印材料的孔隙率或疏松程度高于机加工材料, 导致电阻率增加。并且随着温度增加, 材料膨胀的影响导致 3D 打印通道的电阻率的增速快于机加工材料。

2.1.2 3D 打印通道的实际壁厚

如图 7 所示, 导致不同粗糙度矩形通道电阻率差异的可能原因, 主要包括粗糙度差异和壁厚差异。

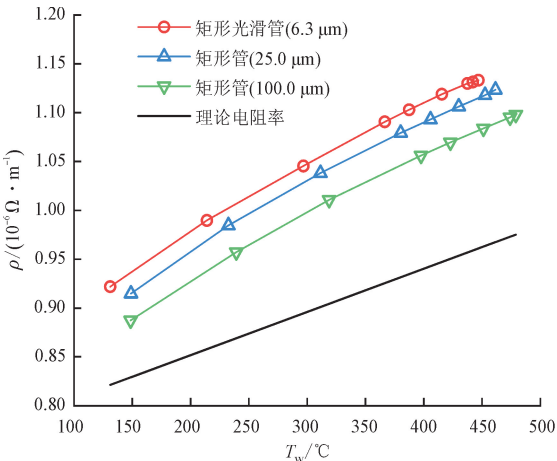


图 7 矩形通道电阻率测量结果随温度的变化趋势 (按名义壁厚)

Fig. 7 Profiles of the electrical resistance with temperature for the rectangle channels (calculated by named wall thickness)

粗糙度的差异会使通道沿着轴向不同截面处的截面积发生变化,从而增加电阻。表 1 给出了矩形通道的粗糙度测量结果,依据不同通道的粗糙度构建模型后,所获得的电阻变化率约为 0.017%,远小于 5%。这表明粗糙度差异不是导致电阻率计算值产生差异的主要原因。

从表 1 可知,3D 打印通道的内表面实际粗糙度远小于设计粗糙度。由于 3D 打印所采用的正弦波纹理结构粗糙度加工方式,使得设计粗糙度越大的

通道,其最小内径越小。但实际粗糙度远小于设计粗糙度,这可能是正弦波波峰之间的凹槽被填满所致。实际上,相当于增加了通道的壁厚。设计粗糙度越大,壁厚增加越大,按名义壁厚 1.0 mm 计算获得的电阻率越小,这与图 7 的结果是一致的。

如图 4 所示,通过对显微镜放大拍摄的照片进行像素分析(像素法),基于游标卡尺测量得到通道的外截面边长(约 4.008 mm),可获得矩形通道的内截面边长,测量结果如表 3 所示。

表 3 3D 打印通道的实际壁厚测量结果

Table 3 Results of the practical wall thickness for the 3D printed channels

序号	设计粗糙度/ μm	内截面边长/mm		内截面边长 偏差/ μm	壁厚增加/ μm
		像素法	电阻率法		
1	6.3	1.994	1.994 [*]		
2	25.0	1.916	1.924	8	37
4	100.0	1.857	1.854	3	70

注: * 表示第一行的内截面边长是参照像素法的测量结果。

如图 8 所示,以光管为基准,通过调整壁厚使矩形通道的电阻率一致(即电阻率法),也可获得 3D 打印通道的实际壁厚和内截面边长,结果如表 3 所示,像素法和电阻率法所获得的内截面边长偏差较小。采用两种方法测量结果的平均值,计算矩形通道粗糙管相对于矩形通道光管的壁厚增加值,分别为 37、70 μm 。壁厚增加值与设计粗糙度变化趋势一致。

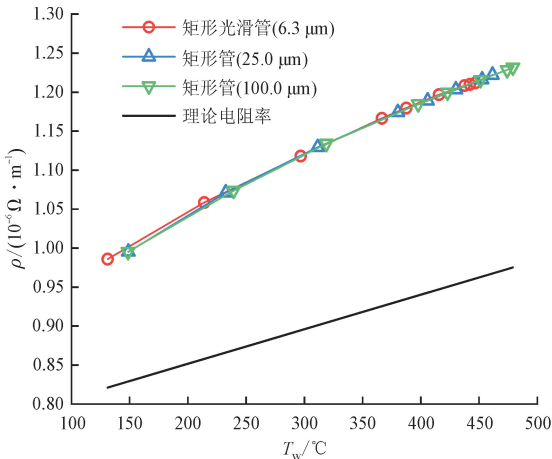


图 8 矩形通道电阻率测量结果随温度的变化趋势(调整壁厚后)

Fig. 8 Profiles of the electrical resistance with temperature for the rectangle channels (calculated by adjusted wall thickness)

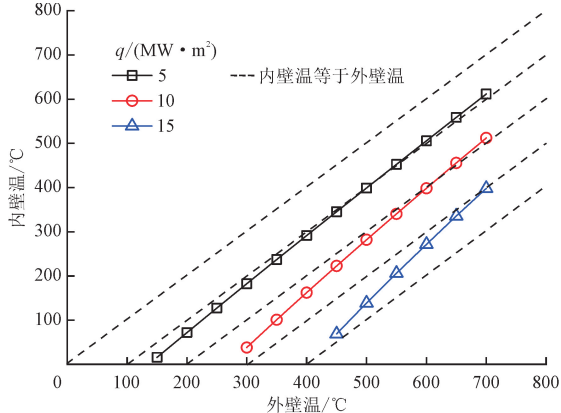
2.1.3 壁厚变化对换热系数计算的影响

本文换热试验的热流密度范围为 5.0~15.0 MW/m^2 。如图 9(a)所示,在壁厚为 1.0 mm、外径为 4.0 mm 的不锈钢圆通道内,在不同的热流密

度条件下,外壁温在 100~700 $^{\circ}\text{C}$ 范围内变化,内、外壁温差达到 100~400 $^{\circ}\text{C}$ 。

换热通道壁厚变化对换热系数计算产生 3 方面的影响:①考虑壁厚变化对内壁温计算的影响,在给定的外壁温条件下,壁厚越大,导热距离增加,内壁温越低;②当外径保持不变,壁厚增加,那么内径减小,使得在相同的加热功率下内表面的热流密度增加,根据内壁温计算式(3),内壁温计算值降低;③壁厚增加导致热流密度计算值增加。根据牛顿冷却公式,即换热系数计算式(6),内壁温降低或者热流密度增加,将导致换热系数增加。

如图 9(b)所示,外径不变,壁厚增加 50 μm ,不考虑壁厚增加对热流密度变化的影响时,内壁温降低 3.0~17.0 $^{\circ}\text{C}$;考虑壁厚增加对热流密度变化的影响时,内、外壁温差进一步扩大,内壁温降低 8.0~45.8 $^{\circ}\text{C}$ 。从以上分析可知,壁厚变化对内壁温的计算值产生显著影响,且必须同时考虑壁厚变化对热流密度变化的影响。



(a)壁厚为 1.0 mm

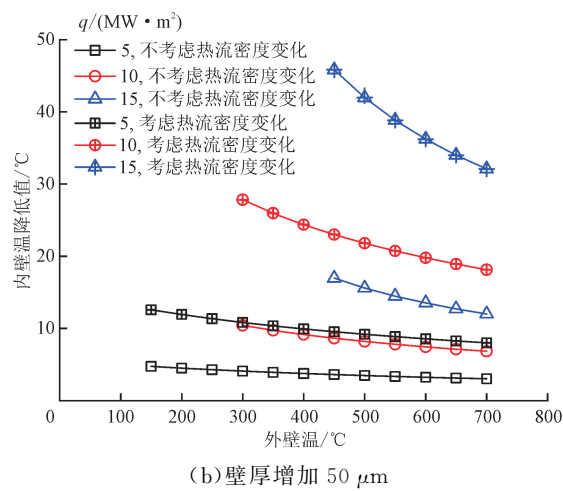


图 9 壁厚为 1.0 mm 和增加 50 μm 通道的内外壁温分布规律
Fig. 9 Profiles of the internal and external wall temperature for channels with wall thickness of 1.0 mm

2.2 粗糙管的强化换热效果分析

2.2.1 换热特性曲线

如图 10 所示,给出了入口压力为 15 MPa、质量流速为 16 600 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、热流密度为 5 MW/m^2 条件下,火箭煤油在不同粗糙度通道内的换热特性曲线。

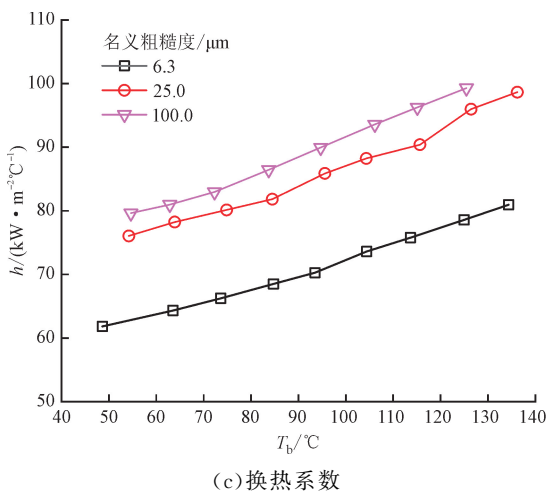
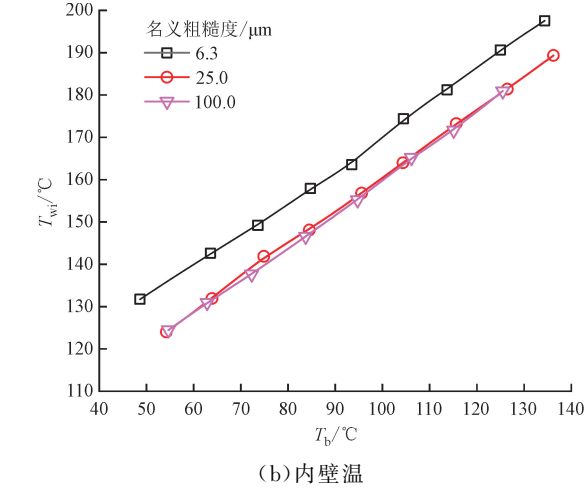
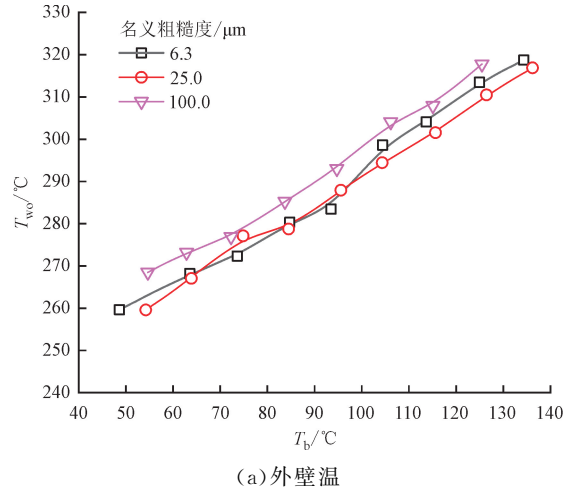


图 10 不同粗糙度下的换热特性曲线
Fig. 10 Profiles of heat transfer for the rectangle channels with different roughness

从图 10 可知,随着流体温度增加,外壁温、内壁温和换热系数都有逐渐增加的趋势。随着粗糙度的增加,火箭煤油的换热系数增加,流动换热得到强化。

外壁温的表现与换热系数的表现并不一致:粗糙度越大,外壁温越高,这是因为不同粗糙度通道的壁厚不一致所致,前文已对不同粗糙度通道的壁厚进行了细致的分析。粗糙度越大的通道,壁厚越厚,内、外壁温差越大。对比不同粗糙度的外壁温与内壁温分布趋势即可看出。

另外,内壁温分布趋势图上,设计粗糙度 25.0 μm 与 100.0 μm 两个通道的内壁温几乎重合,但 100.0 μm 通道的换热系数更大。这是因为 100.0 μm 通道内径更小,对应的实际热流密度更大。

从换热系数曲线可知,粗糙度越高,换热系数越大。同时,流体温度从 50 $^{\circ}\text{C}$ 增加到约 135 $^{\circ}\text{C}$,换热系数增加了约 25%~33%。

2.2.2 热流密度的影响

为了获得不同热流密度下粗糙度增加对换热特性的影响,单独提取了流体温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的换热系数进行对比。如图 11 所示,在入口压力为 15 MPa、质量流速为 16 600 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下热流密度增加,换热系数缓慢增加。

将图 11 中相同热流密度下的数据点求平均值得到:热流密度从约 5 MW/m^2 增加到约 15 MW/m^2 ,换热系数从 83.6 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 增加到 90.6 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$,增加了约 8.3%。随着粗糙度增加,不同热流密度下的换热系数均有所增加。矩形光管的平均换热系数

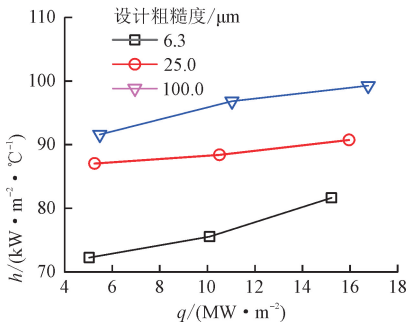


图 11 不同热流密度下的换热性能对比

Fig. 11 Comparison of heat transfer performance at different heat fluxes

为 $76.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 而设计粗糙度为 $100.0 \text{ }\mu\text{m}$ 通道的平均换热系数为 $95.9 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 换热系数增加了 25.4% 。

2.2.3 质量流速的影响

在入口压力为 15 MPa 、热流密度为 $5.0 \text{ MW}/\text{m}^2$ 、流体温度为 100°C 条件下的换热性能进行对比, 结果如图 12 所示。冷态流速增加, 换热系数大幅增加。在热流密度为 $5 \text{ MW}/\text{m}^2$ 条件下, 从不同粗糙度的平均值来看, 冷态流速 v 从 15 m/s 增加到 30 m/s , 换热系数的平均值从 $70.7 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 增加到 $113.2 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 增加幅度为 60.2% 。在所有冷态流速下, 随着设计粗糙度增加, 换热系数显著增加。矩形光管的平均换热系数为 $82.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 而设计粗糙度为 $100.0 \text{ }\mu\text{m}$ 的矩形通道内的平均换热系数为 $99.8 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 增加幅度为 21.1% 。

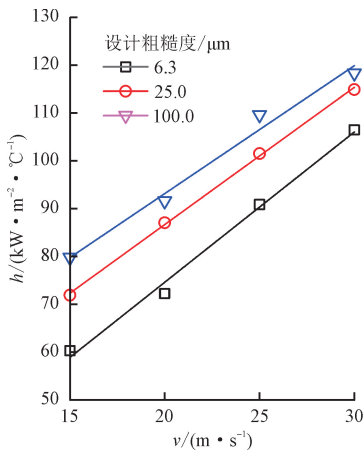


图 12 不同冷态流速下的换热性能对比

Fig. 12 Comparison of heat transfer performance at different mass fluxes

3 结 论

3D 打印技术在复杂部件的一体成型上具有突

出优势, 但与传统机加工技术的一次成型相比, 3D 打印部件的微结构与机加工存在差异。为了探究 3D 打印技术在具有高热流密度、高温高压, 尤其是高内外壁面温度梯度条件下再生冷却通道上的替代应用特性, 本文开展了 3D 打印矩形粗糙通道内火箭煤油的流动换热特性试验方法研究, 得到以下结论。

(1) 与机加工相比, 3D 打印 304 不锈钢通道具有更大的电阻率, 且随着温度增加电阻率偏差增加。温度从 150°C 增加到 450°C , 电阻率偏差约在 $7.2\% \sim 15.6\%$ 之间。

(2) 3D 打印加工不同粗糙度通道而产生的壁厚变化, 是火箭煤油换热系数处理过程中需考虑的关键因素。壁厚增加将导致内、外壁面温差增加, 内壁温降低, 换热系数计算值增加。

(3) 火箭煤油流动换热特性受到热流密度、流体温度和质量流速的影响。流体温度增加, 壁温和换热系数显著增加; 热流密度增加, 换热系数增加较小; 质量流速增加, 换热系数大幅增加。冷态流速从 15 m/s 增加到 30 m/s , 换热系数增加 60.2% 。

(4) 粗糙度增加对火箭煤油流动换热起到强化作用。粗糙度从 $11.88 \text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $17.53 \text{ }\mu\text{m}$, 换热强化 20% 以上。

参考文献:

- [1] 时光辉, 武文华, 陶然, 等. 增材制造技术在飞行器结构上的应用需求分析 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(11): 74-84.
SHI Guanghui, WU Wenhua, TAO Ran, et al. Application requirement analysis of additive manufacturing technology in aircraft structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(11): 74-84.
- [2] BROOMBY H, TRIFONI E. Design, manufacturing and cold flow testing of a liquid rocket engine 3D printed pintle injector [C]//AIAA SCITECH 2024 Forum. Reston, VA, USA: AIAA, 2024: AIAA 2024-1214.
- [3] 包为民, 汪小卫, 董晓琳. 航班化航天运输系统对动力的发展需求与技术挑战 [J]. 火箭推进, 2021, 47(4): 1-5.
BAO Weimin, WANG Xiaowei, DONG Xiaolin. Development demands and challenges of propulsion technology for space transportation system in airline-flight-mode [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(4): 1-5.
- [4] 新华网. 天龙二号遥一运载火箭首飞成功 [EB/OL]. (2023-04-03) [2024-04-08]. <http://www.news.cn/>

- tech/20230403/5ecb922649834aaea2756b710786ef76/c.html.
- [5] COOK R T, QUENTMEYER R J. Advanced cooling techniques for high-pressure, hydrocarbon-fueled rocket engines [C]//16th Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1980: AIAA 1980-1266.
- [6] PIZZARELLI M, NASUTI F, ONOFRI M. Analysis of curved-cooling-channel flow and heat transfer in rocket engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(5): 1045-1053.
- [7] HUBER M L, LEMMON E W, OTT L S, et al. Preliminary surrogate mixture models for the thermophysical properties of rocket propellants RP-1 and RP-2 [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(6): 3083-3088.
- [8] LIANG Keming, YANG Baoe, ZHANG Zhongli. Investigation of heat transfer and coking characteristics of hydrocarbon fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(5): 789-796.
- [9] BATES R W, EDWARDS T, MEYER M L. Heat transfer and deposition behavior of hydrocarbon rocket fuels [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2003: AIAA 2003-123.
- [10] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 1999, 33(9): 62-65.
- HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(9): 62-65.
- [11] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性 [J]. *化工学报*, 2002, 53(2): 134-138.
- HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer to kerosene at supercritical pressure in small-diameter tube with large heat flux [J]. *CIESC Journal*, 2002, 53(2): 134-138.
- [12] 胡志宏. 火箭发动机特种煤油传热特性的实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [13] 罗毓珊, 王海军, 陈听宽, 等. 方形小通道内高参数下煤油传热与阻力特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(3): 265-268.
- LUO Yushan, WANG Haijun, CHEN Tingkuan, et al. Investigation to heat transfer and pressure drop characteristics of kerosene under high parameter in square small channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(3): 265-268.
- [14] WANG Haijun, LUO Yushan, GU Hongfang, et al. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of kerosene at supercritical pressure in square and circular tube with artificial roughness [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 42: 16-24.
- [15] ZHAO Wenzhe, SONG Zichen, LI Hongzhi, 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.
- [16] 高中华, 兰海平, 潘辉, 等. 小通道内高参数火箭煤油流动传热特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(1): 108-115.
- GAO Zhonghua, LAN Haiping, PAN Hui, et al. Investigation on the flow and heat transfer characteristics of rocket kerosene in small channel with high parameter [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(1): 108-115.
- [17] 宋晨阳. 高参数火箭煤油的流动换热特性及热稳定性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2022.
- [18] GIOVANETTI A J, SPADACCINI L J, SZETELA E J. Deposit formation and heat-transfer characteristics of hydrocarbon rocket fuels [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1985, 22(5): 574-580.
- [19] LINNE D L, MEYER M L, EDWARDS T, et al. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel [C]//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 1997: AIAA 1997-3041.
- [20] 罗玉宏, 游岳, 蒋榕培, 等. 添加减阻剂的火箭煤油流阻与传热特性研究 [J]. *火箭推进*, 2018, 44(5): 66-70.
- LUO Yuhong, YOU Yue, JIANG Rongpei, et al. Study on flow resistance and heat transfer characteristics of rocket kerosene adding drag reducer [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(5): 66-70.
- [21] 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 129-134.
- ZHANG Zanjian, LIU Zhaohui, PAN Hui, et al. Flow and heat transfer characteristics of low-flow resistance rocket kerosene under supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 129-134.
- [22] ZHANG Jiaqing, YANG Chao, LIU Zhaohui, et al. Measurements and predictive models for the viscosity of coal-based kerosene at temperatures up to 673 K and pressures up to 40 MPa [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2022, 67(9): 2242-2256.

Biomedical Signal Processing and Control, 2024, 89: 105700.

[17] JIANG Xingxing, WANG Jun, SHEN Changqing, et al. An adaptive and efficient variational mode decomposition and its application for bearing fault diagnosis [J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(5): 2708-2725.

[18] RUDOLF P, KUBINA D, HUDEC M, et al. Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries [C]//EFM16-Experimental Fluid Mechanics 2016. Les Ulis, France: EDP Sciences, 2017: 02098.

[19] ANGELE K. Prediction of cavitation in orifice plates: a novel and simple rule-of-thumb [J]. Experimental and Computational Multiphase Flow, 2021, 3(1): 68-76.

[20] 张孝石. 水下航行体空化流动与压力脉动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[21] 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望 [J]. 力学进展, 2019, 49(1): 428-479.

JI Bin, CHENG Huaiyu, HUANG Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation [J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(1): 428-479.

[22] FENG Jianjun, ZHAO Nannan, ZHU Guojun, et al. Cavitation identification in a hydraulic bulb turbine based on vibration and pressure fluctuation measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 111042.

[23] ARNDT R E A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13: 273-326.

[24] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1995.

[25] FRANC J P, MICHEL J M. Fundamentals of cavitation [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2005.

(编辑 亢列梅)

(上接第 55 页)

[23] 张家庆, 蒋榕培, 史伟康, 等. 煤基/石油基火箭煤油高参数黏温特性与组分特性研究 [J]. 化工学报, 2023, 74(2): 653-665.

ZHANG Jiaqing, JIANG Rongpei, SHI Weikang, et al. Study on viscosity-temperature characteristics and component characteristics of rocket kerosene [J]. CIESC Journal, 2023, 74(2): 653-665.

[24] 张家庆, 刘朝晖, 李宇, 等. 碳氢燃料 JP-10 高温液态黏度测量和推算模型构建方法研究 [J]. 化工学报, 2022, 73(1): 153-161.

ZHANG Jiaqing, LIU Zhaohui, LI Yu, et al. Viscosity measurements and prediction model construction for liquid JP-10 at high-temperature conditions [J]. CIESC Journal, 2022, 73(1): 153-161.

[25] 张家庆. 高温高压空天动力燃料黏度实验和热物性替代模型理论研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2023.

[26] 李沛奇, 陈雪娇, 武博翔, 等. 高参数石油基和煤基火箭煤油射线法密度测量实验研究 [J]. 化工学报, 2024, 75(7): 2422-2432.

LI Peiqi, CHEN Xuejiao, WU Boxiang, et al. Experimental study on radiometric density measurements of petroleum-based and coal-based rocket kerosene at high-parameters [J]. CIESC Journal, 2024, 75(7): 2422-2432.

(编辑 武红江)