

# 超高参数火箭煤油在小通道圆管内的流动换热特性

刘朝晖<sup>1</sup>, 陈雪娇<sup>2</sup>, 蒋榕培<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 北京航天试验技术研究所 航天绿色推进剂研究与应用北京市重点实验室, 北京 100074)

**摘要:** 火箭煤油再生冷却过程具有高压、高温、高热流密度和高质量流速等特点。在超高参数条件下, 采用低电压大电流电加热方法模拟火箭发动机推力室壁面热环境, 在高温合金钢  $\phi 2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  圆管内研究了火箭煤油的流动换热特性。参数范围为压力 25 ~ 65 MPa, 质量流速 8 500 ~ 51 000 kg/(m<sup>2</sup> · s), 流体温度常温为 ~500 °C, 热流密度最高为 35 MW/m<sup>2</sup>。研究表明: 在所测试条件下, 火箭煤油在小通道圆管内处于单相液态强制对流换热机制; 换热性能主要受到流体温度和质量流速的影响; 流体温度增加, 换热系数增加; 质量流速增加, 换热系数增加; 压力在 25 ~ 65 MPa 范围内对换热性能无显著影响; 热流密度增加, 内壁温显著增加, 但热流密度变化对换热系数无显著影响; 受入口强化换热效应的影响, 换热系数增加, 热流密度越高, 入口效应越明显。超高参数尤其是超高压条件下的火箭煤油换热特性, 为火箭煤油再生冷却技术应用提供参考。

**关键词:** 再生冷却; 火箭煤油; 流动换热; 超高参数; 小通道; 高热流密度

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0114-08

## Convective heat transfer characteristics of rocket kerosene in circular mini-tubes at ultra-high parameter conditions

LIU Zhaohui<sup>1</sup>, CHEN Xuejiao<sup>2</sup>, JIANG Rongpei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Beijing Key Laboratory of Research and Application for Aerospace Green Propellants,

Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The regenerative cooling process using rocket kerosene has the specifications of high pressure, high temperature, high heat flux and high mass flow rate. Under the condition of ultra-high parameters, the low-voltage and high-current electrical heating method was used to simulate the thermal environment of the thrust chamber in the rocket engine, and the heat transfer characteristics of rocket kerosene are

收稿日期: 2024-05-24 修回日期: 2024-07-12

基金项目: 国家重点研发计划

作者简介: 刘朝晖(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为汽液两相流与沸腾换热和热物性测量。

引用格式: 刘朝晖, 陈雪娇, 蒋榕培. 超高参数火箭煤油在小通道圆管内的流动换热特性[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 114-121.

LIU Z H, CHEN X J, JIANG R P, et al. Convective heat transfer characteristics of rocket kerosene in circular mini-tubes at ultra-high parameter conditions[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 114-121.

studied in the high-temperature alloy steel  $\phi 2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  round tube. The parameter ranges are of pressure 25 – 65 MPa, mass flow rate 8 500 ~ 51 000 kg/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), fluid temperature up to ~ 500 °C and heat flux up to 35 MW/ $\text{m}^2$ . The results indicate that under the tested conditions, the rocket kerosene is in a single-phase liquid forced convection heat transfer mechanism. The heat transfer performance is mainly affected by the fluid temperature and mass flow rate. As the fluid temperature increased, the heat transfer coefficient increases. As the mass flow rate increased, the heat transfer coefficient increases. The pressure in the range of 25 – 65 MPa has no significant effect on the heat transfer performance. With the increase of heat flux, the inner wall temperature increases significantly, but the variation of heat flux has no significant effect on the heat transfer coefficient. Under the influence of the heat transfer enhance effect at the inlet, the heat transfer coefficient increases, and the higher the heat flux, the more obvious the inlet effect is. The heat transfer characteristics of rocket kerosene under ultra-high parameters, especially under ultra-high pressure conditions, provide a reference for the application of regenerative cooling technology in the rocket engine.

**Keywords:** regenerative cooling; rocket kerosene; heat transfer; ultra-high parameter; mini-channel; high heat flux

## 0 引言

相同推力下,燃烧室压力越高,推力室的比冲越高<sup>[1-2]</sup>。提高推力室压力是液体火箭发动机追求高性能的重要方法<sup>[3]</sup>。推力室喉部热流密度与燃烧室压力的 0.8 次方成正比<sup>[4]</sup>。推力室压力为 25.8 MPa,其喉部热流密度达 41.5 MW/ $\text{m}^2$ <sup>[4]</sup>。未经冷却的推力室壁温超过 3 000 K<sup>[4]</sup>。以火箭煤油为冷却介质,在发动机壁面微小通道内对流换热的再生冷却方式,可以有效降低推力室壁面温度,是液体火箭发动机重要的热防护技术<sup>[5]</sup>。

火箭燃烧室内压力一般大于 10 MPa<sup>[6]</sup>,随着我国重型火箭中大推力液氧煤油火箭发动机的不断发展,煤油在冷却通道中的压力也在不断提升。火箭煤油是多组分有机化合物组成的混合物,临界压力和临界温度分别约 2.5 MPa、677 K<sup>[7]</sup>。火箭煤油的再生冷却过程是一个小通道内、超临界压力、高热流和高质量流速条件下的流动换热问题<sup>[8]</sup>。

国外学者<sup>[9-10]</sup>采用导热加热方式,研制了一种高热流的煤油流动换热装置,热流密度达 41.5 MW/ $\text{m}^2$ ,压力可达 31 MPa,采用该装置研究了 RP-2 的流动换热特性。电加热管由于简单高效,研究火箭煤油的流动换热特性时,应用更加广泛。Liang 等<sup>[11]</sup>在 2.2 mm  $\times$  0.25 mm 的不锈钢圆管内获得了甲烷、丙烷和火箭煤油的流动换热关联式,参数覆盖范围:压

力 0.5 ~ 30 MPa,流速 2 ~ 106 m/s,流体温度 288 ~ 893 K。文献[12-14]研究了火箭煤油流动换热,发现超临界煤油在传热过程中存在两次传热强化,第一次传热强化对应壁温约 700 °C(压力 15 MPa),换热机理为拟沸腾传热强化,第二次传热强化对应壁温约 1 100 °C,推测由近壁面发生高温高压化学反应引起。Yan 等<sup>[15]</sup>在压力 10 ~ 25 MPa、最高热流 33.6 MW/ $\text{m}^2$  条件下,探究了压力、流速和入口温度对火箭煤油传热性能的影响,试验努塞尔数与胡志宏等<sup>[12]</sup>的结果偏差小于 20%。火箭煤油流动换热研究还包括人为粗糙度的影响<sup>[16]</sup>和添加减阻剂的影响<sup>[17-18]</sup>等。

上述文献中火箭煤油流动换热试验压力一般不超过 30 MPa,本文建立了 70 MPa 等级火箭煤油电加热流动换热试验台,研究了高热流和高质量流速条件下火箭煤油在小通道内的流动换热特性。

## 1 实验系统

### 1.1 试验系统与方法

压力 70 MPa 等级火箭煤油流动换热试验系统及试验段示意图如图 1 所示。

煤油从油箱中流出,经过滤器等进入高压柱塞泵,泵出口设旁路系统。泵出口主路煤油经过质量流量计后,依次流经预热段和试验段。预热段和试验段管道采用低电压大电流交流电加热,进出口设置压力和温度传感器。

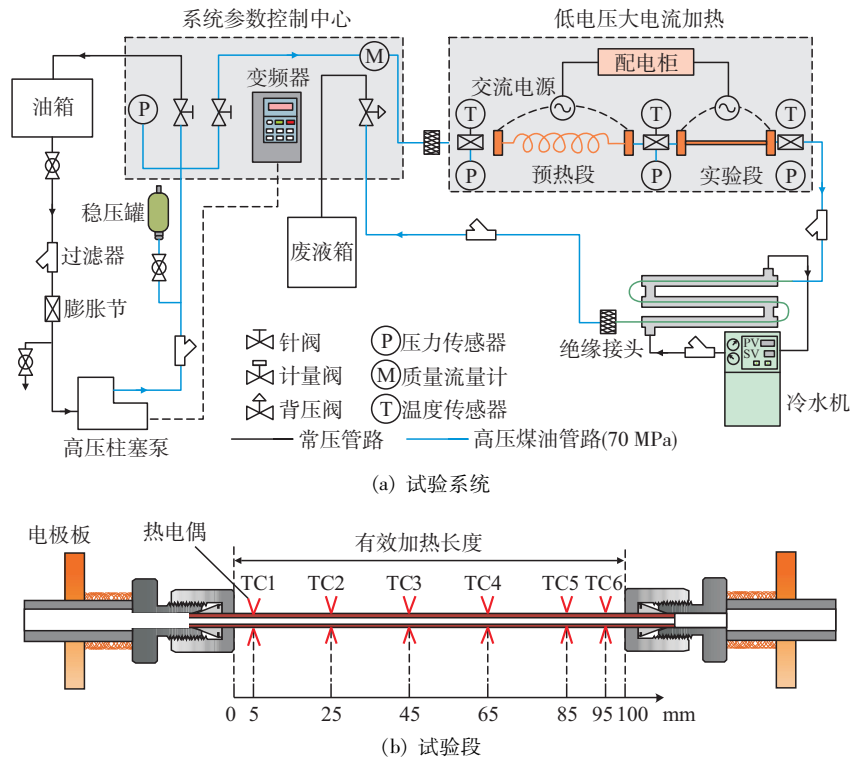


图 1 压力 70 MPa 等级火箭煤油流动换热试验系统及试验段示意图

Fig. 1 Schematic of flow heat transfer experimental system and test section for rocket kerosene at pressure up to 70 MPa

试验段流出的高温煤油经过套管式换热器冷却到常温,再经过背压阀后流入废液箱。试验段入口流体温度通过改变预热段加热功率控制,压力是通过背压阀控制。质量流量通过连接柱塞泵电机的变频器控制。系统压力最高 70 MPa,质量流量 0 ~ 7.5 kg/min。

试验段为水平布置的  $\phi 2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  高温合金管,总长 122 mm,有效加热长度 100 mm。试验段沿轴向共布置 6 个测温截面,每个截面在外壁面上、下侧点焊  $\phi 2 \text{ mm}$  的 K 型热电偶,如图 1(b) 所示。试验段进出口流体温度和压力分别采用 K 型铠装热电偶和压力传感器测量。加热电压和电流采用真有效值电压变送器和电流互感器、真有效值电流变送器测量。试验参数范围:试验段入口压力 25 ~ 65 MPa;质量流速 8 500 ~ 51 000 kg/(m<sup>2</sup> · s);热流密度最大 30 MW/m<sup>2</sup>;试验段出口流体温度最高 500 °C。

## 1.2 数据处理

由能量守恒定律,采用式(1)计算试验段有效加热热流密度。

$$q_{\text{eff},x} = \frac{UI}{\pi dL} - q_{\text{loss},x} \quad (1)$$

式中: $U$  为加热电压; $I$  为加热电流; $d$  为管道内径; $L$  为有效加热长度; $q_{\text{loss},x}$  为散热热流。

散热热流包括管道外壁面散热损失、电极板和出口管路散热损失,在试验前分别通过干烧法和热平衡法进行标定。

假设管外壁绝热且忽略轴向导热,由圆柱坐标下有内热源的一维导热方程得到内壁温的计算公式为

$$T_{\text{wi},x} = T_{\text{wo},x} - \frac{q_{\text{eff},x}d}{2k} \left( \frac{D^2}{D^2 - d^2} \ln \frac{D}{d} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

式中: $T_{\text{wo},x}$  为管道外径温度; $k$  为管壁导热系数,定性温度取当地内外壁温平均值; $D$  为管道外径。

实验前先标定得到燃料的热沉公式  $Q_m = f(T_b)$ ,然后由热沉值可反推得到管内各截面处的局部流体温度  $T_{\text{b},x}$ ,计算式为

$$T_{\text{b},x} = f^{-1} \left[ \frac{Q_{\text{eff},x}}{m} + Q_m(T_{\text{in}}) \right] \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{eff},x} = \int_0^x \pi dq_{\text{eff}} dx$  为从入口到截面  $x$  处管道的有效加热功率; $m$  为质量流量。

局部换热系数由牛顿冷却公式计算得到,即

$$h_x = \frac{q_{\text{eff},x}}{T_{\text{wi},x} - T_{\text{b},x}} \quad (4)$$

通过不确定度分析,得到实验中各项测量参数的不确定度,如表 1 所示。

表 1 试验参数不确定度

Tab. 1 Uncertainties of experimental parameters

参数	标准不确定度/%
流体温度	0.375
内壁温	1.300
压力	0.040
质量流量	0.150
电压	1.200
电流	3.890
热流密度	4.190
换热系数	6.520

2 结果与讨论

在恒定的入口压力和质量流速下,火箭煤油流动换热的试验过程分两个阶段:①升热流密度阶段;②恒热流密度、升入口流体温度。升热流阶段中,试验段入口保持常温,逐步升高试验段热流密度,直到热流密度升到预定值。升入口流体温度阶段中,保持试验段热流密度不变,逐渐升高预热段加热功率,提高试验段入口流体温度,从而获得恒热流密度、不同流体温度条件下火箭煤油的流动换热特性。

2.1 换热特性沿轴向变化趋势

火箭煤油流动换热壁温受到热流密度和流体温度的影响。图 2(a)中热流密度从 2.1 MW/m<sup>2</sup> 逐渐增加到 20.2 MW/m<sup>2</sup>,壁温持续大幅增加,从约 200 ℃增加到 750 ℃以上。热流密度对壁温产生显著影响。热流密度增加的同时,流体温度也增加。图 2(b)中,试验段的热流密度不变,提高预热段热流密度,使试验段的入口流体温度从 33.0 ℃逐渐增加到 332.9 ℃。从图 2 可知:流体温度逐渐增加,壁温也有逐渐增加的趋势,只是在入口流体温度增加的初期,试验段入口区域壁温在逐渐降低,而试验段出口区域壁温没有增加或者增加较为缓慢。

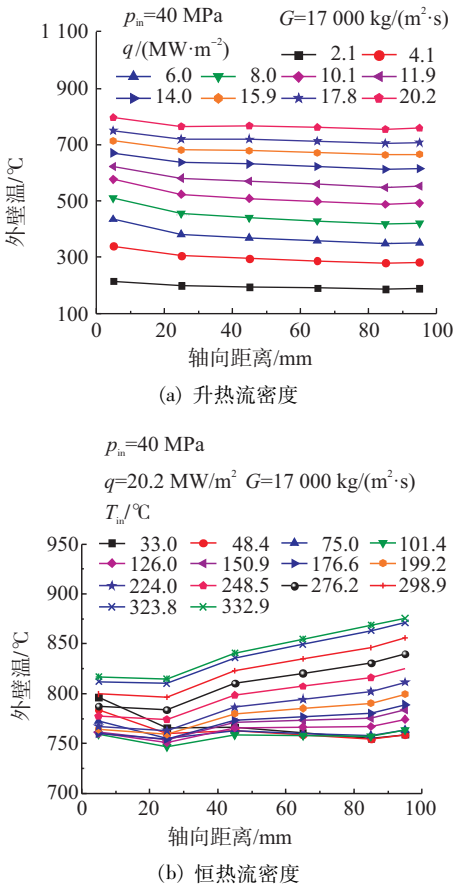


图 2 升热流和恒热流过程中外壁温沿轴向变化趋势  
Fig. 2 Profiles of external wall temperature during increasing heat flux and constant heat flux processes

壁面温度沿轴向的变化趋势较为复杂,在图 2 中,无论是升热流密度还是恒热流密度试验中,热流密度沿轴向几乎是恒定的,受壁面热损失的影响,热流密度沿轴向会有微小差异,但热损失带来的热流密度沿轴向的差异可忽略不计。从图 2 可知:①入口流体温度低于 101.4 ℃条件下,虽然流体温度沿着轴向逐渐增加,但壁温沿轴向逐渐降低;②入口流体温度大于 101.4 ℃条件下,壁温沿轴向逐渐增加。从下文的分析可知,壁温沿轴向的变化趋势改变,并不意味着换热机制的变化,而是受到换热系数大小变化影响所致。

如图 3 所示,换热系数受到热流密度和流体温度的影响。随着热流密度和流体温度增加,换热系数均匀地逐渐增加。因此,图 2(b)中壁温的特殊变化趋势并无换热规律的改变,而仅仅是换热系数增加所致。无论壁温沿着轴向是降低还是增加,换热

系数沿着轴向都是逐渐增加的,即换热系数随流体温度的增加而增加。换热系数随流体温度的变化趋势主要受到雷诺数的影响。流体温度增加,黏度降低,雷诺数增加,换热系数增加。

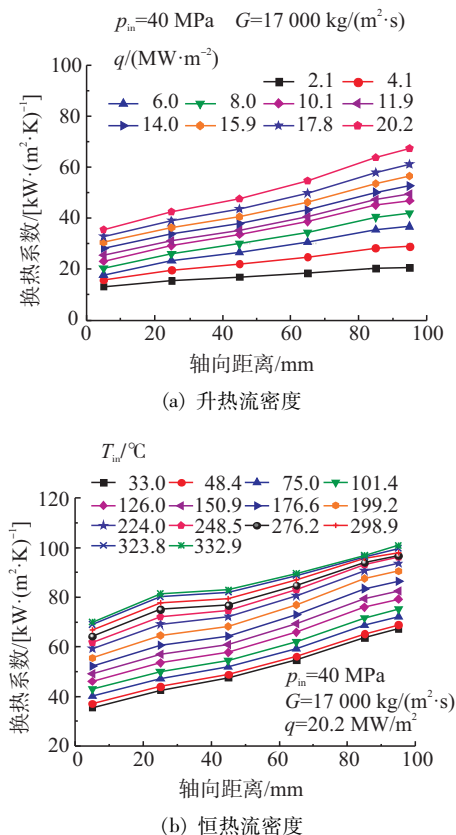


图3 升热流和恒热流过程中换热系数沿轴向变化趋势

Fig. 3 Profiles of heat transfer coefficient during increasing heat flux and constant heat flux processes

## 2.2 热流密度对换热性能的影响

在相同的轴向位置处,热流密度增加,流体温度也会增加。为了单独分析热流密度和流体温度的影响,图4给出了以流体温度为横坐标,随热流密度增加,通道各截面处内壁温和换热系数的变化趋势。

从图4可知:①随着流体温度增加,换热系数逐渐增加,且换热系数的变化趋势与热流密度无关,除试验段入口的两个热电偶处。第一个和第二个热电偶处,热流密度大于10 MW/m<sup>2</sup>后,换热系数开始逐渐偏离换热曲线。受到入口效应的影响,换热系数大于相同流体温度的其他截面换热系数。热

流密度越大,入口效应带来的换热系数增强越明显。②内壁温沿着轴向逐渐降低,在入口第一个热电偶处壁温最高,但从换热系数结果看,入口存在强化换热。由此可知,如果没有入口强化换热效果,入口热电偶处的壁温将更高。

热流密度变化对换热的影响,主要体现在流体温度上。热流密度增加,壁温增加,但在相同的流体温度下,换热系数几乎不变。

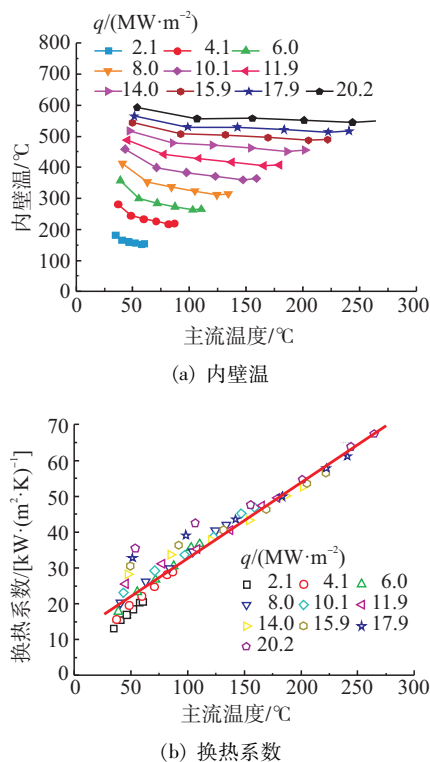


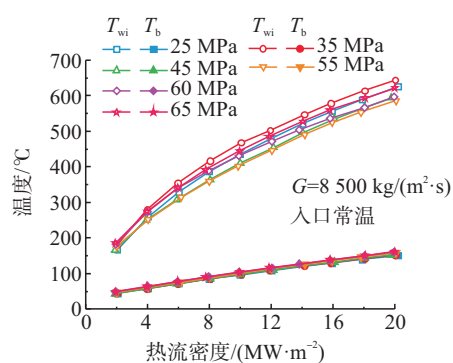
图4 升热流过程中换热特性随热流密度的变化趋势

Fig. 4 Profiles of heat transfer for different heat fluxes during increasing heat flux processes

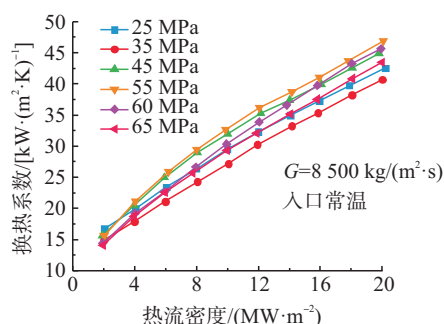
## 2.3 压力对换热特性的影响

火箭煤油在超高压下主要为单相液态强制对流换热。图5给出了升热流过程中,不同压力下(25~65 MPa)试验段的换热曲线随热流密度的变化趋势。从图5可知:不同压力下主流温度的变化曲线基本重合,内壁温变化趋势相同,但不同压力下的内壁温存在偏差。在相同热流密度下,壁温偏差在±30 °C范围内,而对应换热系数的偏差在±3 kW/(m<sup>2</sup>·K)范围内,约10%。





(a) 内壁温



(b) 换热系数

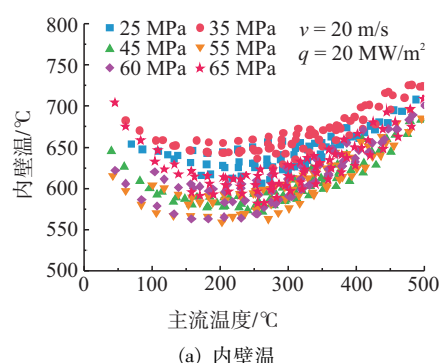
图 5 升热流密度过程中压力对换热特性的影响

Fig. 5 Effect of pressure on heat transfer characteristics during increasing heat flux processes

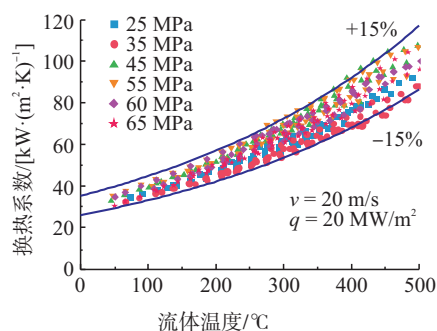
文献[19-20]报道了火箭煤油在高压下的密度和黏度测量结果。由于压力变化范围宽广,密度和黏度都受到压力的影响,压力越大密度越小,而黏度越大。且温度越高,压力对密度和黏度的影响越大。由于在以上文献的热物性测量和本文的流动换热研究中,火箭煤油都处于液相状态,压力对密度和黏度等热物性参数的影响是连续的。但图 5 的换热特性受压力的影响,并无明显的连续变化趋势,且不同压力下换热系数的偏差与换热系数的测量不确定相当。因此,这里可以将不同压力下换热系数的偏差视为测量偏差,压力对换热系数的影响并不显著。

图 6 给出了恒热流密度过程中,不同压力下(25 ~ 65 MPa)各截面处换热曲线随流体温度的变化趋势。从图 6 可知,不同压力下的内壁温和换热系数随流体温度的变化趋势基本一致。但不同压力下,火箭煤油的换热系数存在一定偏差。图 6 对应的内壁温曲线上不同压力下大约存在  $\pm 50$  °C 的偏差,换热系数曲线上存在约  $\pm 10$  kW/(m<sup>2</sup>·K) 的偏差,相对偏差约 15%。

图 6 与图 5 的内壁温和换热系数测量结果是一致的。随着压力增加,内壁温和换热系数并无明显的单调变化趋势。



(a) 内壁温



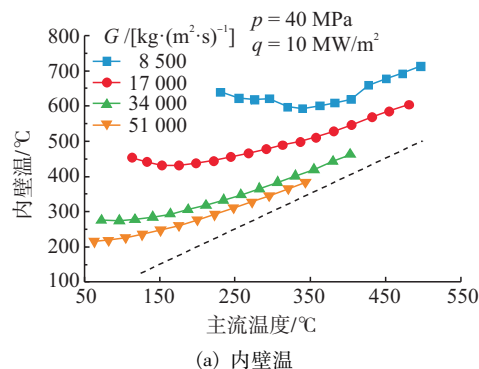
(b) 换热系数

图 6 恒热流密度过程中压力对换热特性的影响

Fig. 6 Effect of pressure on heat transfer characteristics during constant heat flux processes

## 2.4 质量流速对换热特性的影响

图 7 给出了压力 40 MPa 和热流密度 10 MW/m<sup>2</sup>、不同质量流速条件下换热曲线随主流温度的变化趋势。随着质量流速增加,试验段内壁温降低,对应的换热系数增加。质量流速增加,对换热起到强化作用。质量流速 34 000 kg/(m<sup>2</sup>·s) 和 51 000 kg/(m<sup>2</sup>·s) 时,内壁温与流体温度已非常接近,高流体温度下的换热温差只有约 50 °C,换热系数迅速增加。质量流速对换热系数的影响主要受到雷诺数的影响。质量流速越高,雷诺数越大,换热系数越大。



(a) 内壁温

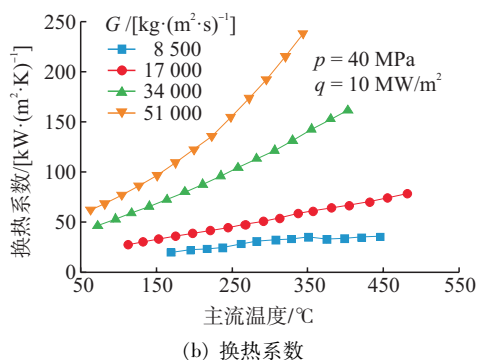


图7 质量流速对换热性能的影响

Fig.7 Effect of mass flux on heat transfer characteristics

### 3 结论

本文研究了超高参数(压力 25 ~ 65 MPa 和流体温度常温 ~ 500 °C)条件下火箭煤油在高温合金钢  $\phi 2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  圆管内的流动换热特性,得到以下结论。

1) 火箭煤油在小通道圆管内的流动换热性能主要受到流体温度和质量流速的影响。流体温度越高,换热系数越大;质量流速越大,换热系数越大;不同压力(25 ~ 65 MPa)对火箭煤油的换热性能无显著影响。

2) 热流密度对换热系数无显著影响。热流密度对换热性能的影响主要体现在流体温度的变化上。热流密度增加,内壁温显著增加,但在相同的流体温度下,换热系数几乎不变。

3) 入口效应对火箭煤油换热存在影响。受入口效应的影响,换热系数增加;且热流密度越大,入口效应越明显。

### 参考文献

- [1] 蔡国飙. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [2] KANDA T, MASUYA G, WAKAMATSU Y, et al. Effect of regenerative cooling on rocket engine specific impulse [J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(2): 286-288.
- [3] 侯瑞峰, 李龙飞, 陈建华, 等. 液体火箭发动机不同室压下冷却方案适用范围[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2797-2806.
- HOU R F, LI L F, CHEN J H, et al. Adaptability of cooling structure schemes of liquid propellant rocket en-

gine thrust chamber under different pressures [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2797-2806.

- [4] BATES R, EDWARDS J, MEYER M. Heat transfer and deposition behavior of hydrocarbon rocket fuels [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2003.
- [5] 陈锐达, 徐辉, 陈泓宇, 等. 1.5 tf 再生冷却液体火箭发动机关键技术与试验验证[J]. 火箭推进, 2023, 49(4): 17-25.
- CHEN R D, XU H, CHEN H Y, et al. Key technologies and test verification of 1.5 tf liquid rocket engine with regenerative cooling [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(4): 17-25.
- [6] MAAS E, IRVINE S, BATES R, et al. A high heat flux facility design for testing of advanced hydrocarbon fuel thermal stability [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2005.
- [7] LUO S B, XU D Q, SONG J W, et al. A review of regenerative cooling technologies for scramjets [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116754.
- [8] 颜建国. 高热流密度主动冷却通道内过冷水和碳氢燃料的流动传热特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2016.
- [9] BILLINGSLEY M. Thermal stability and heat transfer characteristics of RP-2 [C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2008.
- [10] HERNANDEZ L, PALACIOS R, ORTEGA D, et al. The effect of surface roughness on  $\text{LCH}_4$  boiling heat transfer performance of conventionally and additively manufactured rocket engine regenerative cooling channels [C]//AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Reston, Virginia: AIAA, 2019.
- [11] LIANG K M, YANG B E, ZHANG Z L. Investigation of heat transfer and coking characteristics of hydrocarbon fuels [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 789-796.
- [12] 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 Z H, CHEN T K, LUO Y S, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 62-65.
- [13] 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 Z H, CHEN T K, LUO Y S, et al. Heat transfer to kerosene at supercritical pressure in small-diameter tube with large heat flux [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2002, 53(2): 134-138.
- [14] 罗毓珊, 陈听宽, 胡志宏, 等. 高参数小管径内煤油的传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(4): 609-612.
- LUO Y S, CHEN T K, HU Z H, et al. Investigation on heat transfer characteristics for kerosene under high parameter and in small diameter tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(4): 609-612.
- [15] YAN J G, LIU S C, GUO P C, et al. Experiments on heat transfer of supercritical pressure kerosene in mini tube under ultra-high heat fluxes [J]. Energies, 2020, 13(5): 1229.
- [16] WANG H J, LUO Y S, GU H F, 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.
- [17] 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 Y H, YOU Y, JIANG R P, 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.
- [18] 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 Z J, LIU Z H, PAN H, 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.
- [19] 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 J Q, JIANG R P, SHI W K, et al. Study on viscosity-temperature characteristics and component characteristics of rocket kerosene [J]. CIESC Journal, 2023, 74(2): 653-665.
- [20] 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 P Q, CHEN X J, WU B X, 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.