

方形小通道内高参数下煤油传热与阻力特性

罗毓珊¹, 王海军¹, 陈听宽¹, 陈建华², 吴海波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. 航天推进技术研究院十一所, 710100, 西安)

摘要: 对外边长为 4.6 mm 的方形小通道光滑管及底部带有不同强化表面的 5 根粗糙管试件在高温流密度、高流速、超临界压力条件下进行了煤油的传热、阻力、结焦特性的试验与分析研究, 获得了煤油的传热、阻力与结焦特性及主要影响因素; 分析了方形粗糙表面强化传热机理及不同粗糙度对煤油传热、阻力与结焦特性的影响, 并与相同尺寸方光管的试验结果进行了比较。比较结果表明: 5 根粗糙管的传热系数为光管的 1.4~1.9 倍, 阻力系数为 1.3~3.8 倍, 2# 粗糙管的综合效果最好; 在相同条件下, 粗糙管的平均壁温明显低于光管; 增加管壁粗糙度不仅增强了煤油的换热能力, 而且可明显提高结焦发生时的壁面热负荷, 使结焦现象大为改善。研究结果对火箭发动机的热防护技术具有重要意义。

关键词: 方形小通道; 高参数; 煤油; 传热与阻力特性; 结焦

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0265-04

Investigation to Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Kerosene under High Parameter in Square Small Channel

LUO Yushan¹, WANG Haijun¹, CHEN Tingkuan¹, CHEN Jianhua², WU Haibo²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The 11th Research Institute, Academy of Space Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Experimental and analytic investigations to heat transfer, pressure drop and coke characteristics of kerosene are carried out in a square smooth small channel and 5 square small channels with different rough surface at the bottom under conditions of high heat flux, high flow rate and supercritical pressure. The characteristics of heat transfer, pressure drop and coke of kerosene and its main influence factors are revealed, and the enhanced heat transfer mechanism of rough surface and the influence of different roughness are analyzed. A comparison with smooth channel with the same size shows that the heat transfer coefficient of rough surface channel is 1.4-1.9 times of smooth channel, the friction factors is 1.3-3.8 times, and the average wall temperature of rough surface channel is markedly lower than that of smooth channel under the same conditions, thus rough surface enables to enhance the heat transfer ability of kerosene, as well as the coke heat flux.

Keywords: square small channel; high parameter; kerosene; heat transfer and pressure drop characteristics; coke

现代大推力液体火箭推力室的压力和温度很高, 发动机燃烧室燃气温度高达 3 000 °C 以上。发动机喷管, 特别是喷管喉部, 燃气流量强度最大, 壁温最高, 为使发动机安全工作, 必须进行有效冷却。因

此, 采取强化传热措施, 提高煤油的传热系数, 是高效冷却的重要研究内容。另外, 在运载火箭技术的发展中, 希望发动机在发射过程中可重复多次使用。为此, 高效传热及热防护技术成为发动机重复使用中

的关键技术之一^[1-4].

本文以火箭发动机再生冷却剂及燃料——煤油为介质,对其在高热流密度、高质量流速、高压以及方形小通道光滑和粗糙管内的传热特性进行研究,确定超临界压力下各种强化传热结构对煤油传热、阻力与结焦特性的影响,研究工作对火箭发动机的热防护技术具有重要的意义.

1 试验系统与参数

试验介质为加氢处理煤油,其临界压力为 2.495 MPa,临界温度为 404.352 °C^[5].

试件为铬青铜方形小通道光管及粗糙管,外边长 4.6 mm,粗糙管底部具有不同尺寸的凸凹台,以强化换热.本次试验进行了光管及 5 种不同底部粗糙度试件的研究,其中 1#~3# 试件的粗糙元高度 h 相等,节距 s 不等, s 由小到大对应的试件号依次为 1#、2#、3#;2#、4# 试件的 h 不等, s 相等,2# 试件的 h 大于 4# 试件;5# 试件的 h 与 s 均大于 1#~4# 试件.试件总长 350 mm,试验段长 150 mm,直接通过低电压大电流加热,获得焦耳热.沿试验段长度按粗糙度凹、凸面共划分 14 个截面,每个截面分别在顶侧底面各布置 1 支测温热电偶,其编号按截面顺序依次排列,例如 t_{11} 、 t_{12} 、 t_{13} 分别表示第一截面顶、侧、底面的温度测点,其余截面依次类推,以检测管壁温度并计算流体与管壁间的换热系数.试件结构如图 1 所示.试验参数为:

压力 p 为 5、10、15、22 MPa;

热流密度 q 为 0.8~35 MW/m²;

流速 v 为 15、30、60 m/s;

工质入口温度 T_m 为 20、70、150、200 °C.

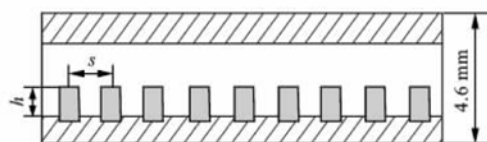


图 1 试件结构示意图

2 试验结果与分析

2.1 超临界压力下煤油传热特性的影响因素

2.1.1 流速的影响 在一定压力下,流体比热达到最大值时所对应的流体温度被称为拟临界温度,煤油的拟临界温度随压力的升高而升高,且高于临界

温度.当内壁温度 T_{wi} 小于拟临界温度时,超临界压力下的煤油处于单相对流传热区段,此时随热流密度增大,换热系数增大不多,换热的增强主要取决于质量流速的提高.图 2 示出了当压力为 22 MPa、进口温度为 20 °C 时不同流速下煤油的传热特性曲线.从图中可见:在相同的热流密度下,随流速增大,内壁温明显减小,换热增强;随流速增大,壁温随热流密度增大而升高的曲线斜率减小,更为平坦,换句话说,传热明显增强,且单调增大.

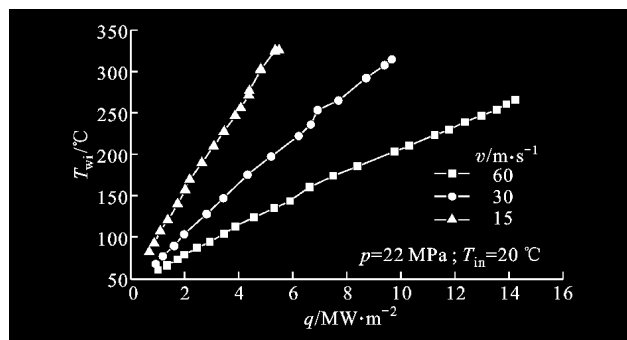


图 2 不同流速下煤油的传热特性曲线

2.1.2 入口初温的影响 随着煤油入口温度的增大,煤油的传热呈现出强化趋势,如图 3 所示.从图中可见,当工质入口温度由 20 °C 提高到 70 °C 时,换热系数 k 变化不太明显,但当工质入口温度提高到 150、200 °C 时,换热系数明显升高.这是因为随温度升高,煤油的黏度下降,当温度由 20 °C 升高到 200 °C 时,黏度仅为 20 °C 时的 1/5~1/6,而煤油的传热系数与黏度的 0.4 次幂成反比,故高的进口温度,将导致传热系数增大.

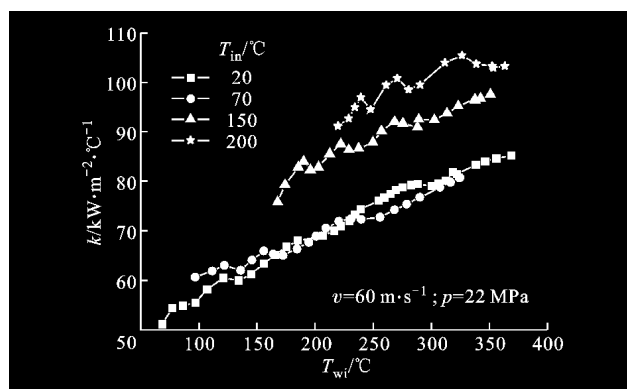


图 3 入口温度对煤油传热特性的影响

2.1.3 压力的影响 改变工质入口压力对传热的影响很小.这是因为试验压力远远大于临界压力,处于超临界状态,而在超临界压力下,煤油为单相介质,物性变化较之亚临界及近临界压力时小得多,故由压力变化对传热带来的影响也大大减小.

2.2 不同试件传热与阻力特性的分析与比较

2.2.1 传热特性及比较 本次试验对煤油在方光管及5种粗糙方管内的传热结果进行了归一化公式拟合,以利相互比较.图4给出了5种粗糙管与相同尺寸光管间归一化传热特性的比较曲线,从图中可见,增加管壁粗糙度,传热明显增强,在相同的雷诺数 Re 下所有粗糙管的传热努塞尔数 Nu 均高于光管.这是因为凹凸不平的粗糙表面在近壁边界层产生涡系结构,涡系的发展加强了流体近壁区的湍流程度,减薄了流体近壁区边界层的厚度,从而强化了对流换热.

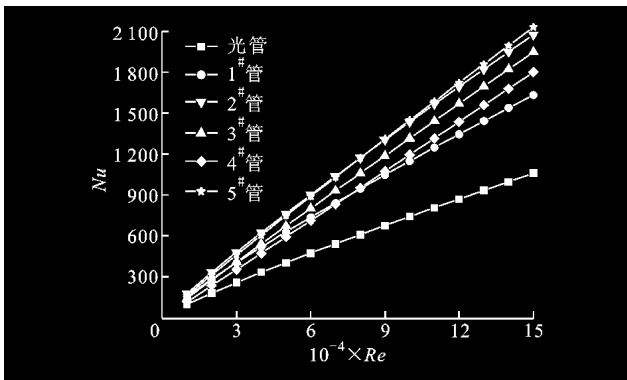


图4 不同粗糙度管与光管传热特性比较

表1给出了平均强化传热倍率值,不同粗糙度结构尺寸其强化传热效果不尽相同,其中2#和5#管的传热效果最好,与光管相比,在相同条件下传热可增强近2倍左右,3#管的传热效果其次,平均强化倍数为1.64,而1#和4#管的强化倍数约为1.5,1#管在低雷诺数下略强于4#管,在高雷诺数下弱于4#管.

从表1中还可看出:在 h 相等、 s 不等的1#、2#、3#管中, s 居中者效果最好, s 最大者次之, s 最小者的传热效果反而最差;在 s 相等、 h 不等的2#、4#管中, h 大者效果更好.从表中还可看到,3#和4#管的 s 与 h 的比值相同,都是10,但传热结果相差较大.本文的试验结果表明, s 与 h 的比值与强化传热效果间的规律不强.文献[6]中以此值作为衡量

表1 不同粗糙元参数下各试件平均强化传热与阻力系数倍率比较

试件号	s	h	$s \cdot h^{-1}$	平均强化传热倍率	平均阻力系数倍率
1	小	中(1#、2#、3#相等)	6.25	1.56	2.14
2	中(2#、4#相等)	中(1#、2#、3#相等)	7.50	1.88	1.98
3	大	中(1#、2#、3#相等)	10.00	1.64	1.91
4	中(2#、4#相等)	小	10.00	1.44	1.32
5	最大	大	14.30	1.83	3.80

强化传热效果的定性尺寸,由于本次试验样本数不多,尚无法得此结论.

2.2.2 壁温特性 煤油的壁温特性是火箭发动机热防护效果的直接反映.

图5给出了光管与粗糙管在相同压力、流速以及热负荷下壁温 T_w 沿管长 L 的分布比较.从图中可见:壁温沿管长略有下降;相同压力、流速下,对同一试件,随热负荷增大,壁温升高;在相同热负荷下,粗糙管的壁温明显低于光管,其差值达到了 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,说明粗糙表面的强化换热作用有利于降低壁温,提高发动机热防护效果.从图中还可见,光管底、顶面的壁温相差不大,而粗糙管底面壁温明显低于顶面壁温,这是因为粗糙表面的扰流作用对底部更直接、更强烈.试验结果还表明,当 $v \leq 30\text{ m/s}$ 时,粗糙管底、顶壁温的特性均如此,但当 $v = 60\text{ m/s}$ 时,该特征弱化,即底、顶壁温的差值不十分明显,此现象表明粗糙表面对低流速下试件的强化传热影响更显著.

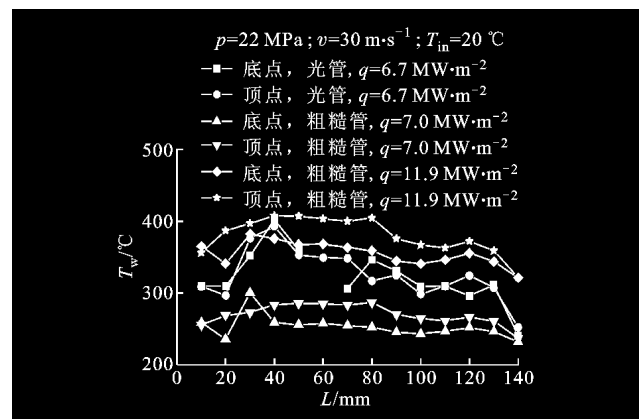


图5 粗糙管与光管的壁温特性比较

2.2.3 阻力特性及比较 在传热强化的基础上不过分增大试件阻力,对火箭发动机动力设备是极其重要的,故本文带粗糙度的强化试件仅在底部增加了粗糙度.图6和表1分别给出了5种粗糙底面试件与相同尺寸光管的阻力系数 f 及其比较.从中可见,传热效果最好的粗糙管之一5#管的阻力系数远

远高于其他粗糙管. 这说明 h 增高太多虽然传热增强的效果很明显, 但阻力的增大更为显著. 该管的平均阻力系数为光管的 3.8 倍, 而同样具有很好传热效果的 2[#] 管, 阻力系数增大并不太多, 其值为光管的 1.98 倍. 从图表中还可见, h 相同的 1[#]、2[#]、3[#] 管的阻力系数较接近, 且随 s 的增大略有下降, 而 s 相同的 2[#]、4[#] 管, h 仅相差了 0.1 mm, 但阻力相差却很明显, 这说明该值是影响阻力的最重要因素. 与传热结果类似, s 与 h 比值相等的 3[#] 和 4[#] 管, 其阻力系数相差也较大.

综合传热与阻力特性可以看出, 2[#] 管的综合效果最好, 不但具有较高的传热强化效果, 而且阻力增加不大.

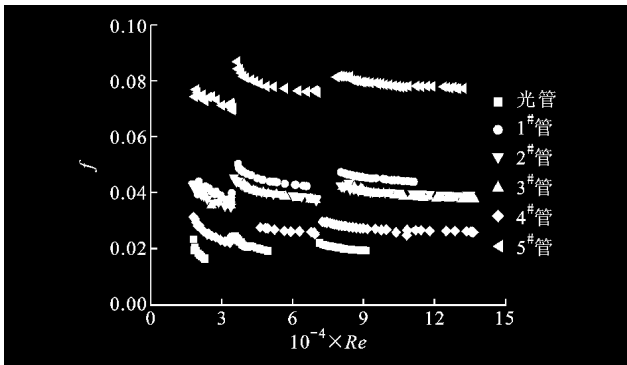


图6 粗糙管与光管的阻力特性比较

2.3 煤油的结焦特性

煤油结焦是因受热煤油产生碳沉积而引起的. 发生结焦会降低传热系数, 引起壁温升高, 严重时导致设备烧损. 图 7、8 分别给出了煤油在光管和粗糙管中不同流速下的结焦曲线. 从图中可见: 无论是光管或粗糙管, 本次试验工况中不同流速下明显出现结焦时的温度基本相同, 即管内壁温度达到 370 °C 左右; 结焦首先出现在试件出口附近截面, 如图 7 中的 14、13 截面; 结焦时壁面热阻增大, 壁温急剧上升, 上升速率最高时可达 6.75~13.1 °C/min, 如在第 130 min 后的 8 min 内, 壁温约上升了 105 °C, 壁温的急剧升高大大降低了传热效率. 低流速下结焦呈现单调特性, 较为稳定, 如图 7 中 30 m/s 的流速线; 高流速下结焦呈现出非稳定特性, 如图 7、8 中 60 m/s 的流速线, 结焦处壁温呈现出曲折上升趋势. 造成该现象的原因是由于流速的提高, 流体的冲刷能力增强, 新生的、小的结焦块容易被流体冲走, 使得壁面结焦不稳定, 但煤油总体结焦趋势不可避免, 壁温总体呈上升趋势, 最大值已近 600 °C. 随流速增大, 结焦时的热负荷相应增大. 与光管相比, 增加壁面粗糙度可明显提高结焦发生时的热负荷, 对

于 60 m/s 的流速, 光管发生结焦时的热负荷为 17 129 kW/m², 而粗糙管最大可达 27 813 kW/m², 远远高于光管. 增加管壁粗糙度不仅增强了煤油的换热能力, 而且使结焦现象大为改善.

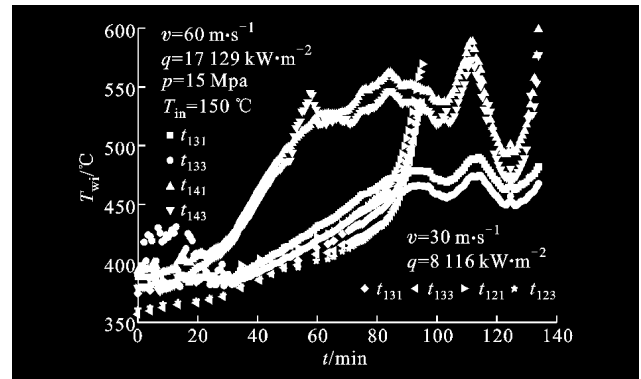


图7 不同流速下光管的结焦特性曲线

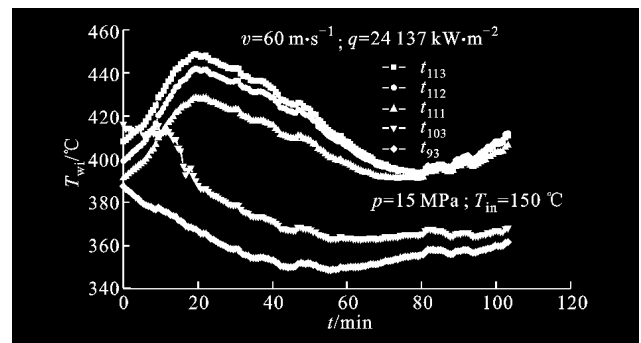


图8 粗糙管的结焦特性曲线

3 结论

(1) 在本文研究的参数范围内, 煤油换热的增强主要取决于质量流速的提高; 随入口初温增大, 煤油换热系数增大; 入口压力对传热的影响很小.

(2) 5 种粗糙管的传热系数均高于相同尺寸的光管; 相同条件下粗糙管的平均壁温明显低于光管; 较之光管, 粗糙管底面壁温明显低于顶面, 低流速下尤为突出.

(3) h 和 s 是影响粗糙管传热与阻力特性的主要参数, 2[#] 管的综合效果最好.

(4) 试件在不同流速下出现结焦时的温度基本相同. 低流速下结焦呈单调、稳定特性, 高流速下呈非稳定特性.

(5) 与光管相比, 粗糙管降低了壁温, 增强了煤油的换热能力, 提高了发动机的热防护效果并改善了结焦.

参考文献:

- [1] 查理. 液体火箭发动机技术[J]. 国防科技, 2004 (8): 25-30.
- [2] 胡平信, 刘国球. 液体火箭发动机的技术发展展望

- [J]. 导弹与航天运载技术, 1998, 232(2):1-10.
- HU Pingxin, LIU Guoqiu. Technological development and prospect for liquid rocket engines[J]. Missiles and Space Vehicles, 1998, 232(2):1-10.
- [3] 郭平. 液体火箭发动机中的传热和热防护[J]. 百科知识, 1995(3):46-47.
- GUO Ping. Heat transfer and thermal protection in liquid rocket engines [J]. Encyclopedic Knowledge, 1995(3):46-47.
- [4] VA'ZQUEZ M S, ROD W V, ISSA R. Effects of ridged walls on the heat transfer in a heated square duct[J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(3):2050-2063.
- [5] 马翰英. 航天煤油[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003.
- [6] 曾立. 液氧/煤油火箭发动机推力室冷却计算[D]. 西安:西北工业大学航天学院, 2003.

(编辑 荆树蓉)