

航空煤油冲击射流强化传热的实验研究

杜蒙蒙^{1,2}, 仲峰泉^{1,2*}, 邢云绯¹, 张新宇^{1,2}

(1 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室 北四环西路 15 号, 北京 100190)

(2 中国科学院大学 工程科学学院 北京市石景山区玉泉路 19 号, 100049)

摘要: 本文实验研究了不同雷诺数条件下航空煤油冲击射流流动与传热特性。入口煤油处于常温、高压状态,冲击射流雷诺数分别为 4230、14090。实验结果表明,以煤油为介质进行冲击射流传热有着显著的传热效果,与相同条件下煤油在矩形管道中的传热相比较,其传热增益达 100% 以上;同时,冲击射流的压降很小,小于一个大气压。

关键词: 实验研究; 冲击射流; 航空煤油; 强化传热

Abstract: In this paper, characteristics of flow and heat transfer of aviation kerosene impingement jets were experimental studied. The inlet kerosene are in the state of ambient temperature and high pressure with Reynolds number 4230 and 14090, respectively. The experiment results show that kerosene impingement jets have high heat transfer efficiency with a more than 100% increasing compared to the heat transfer in rectangular channels under the same flow conditions., However, the pressure loss is not large, which is less than one atmosphere.

Key words: Experimental Study; Impingement Jets; Aviation Kerosene; Heat Transfer Enhancement;

1 引言

冲击射流传热有着高效的传热效率,其已经应用在诸多领域,如涡轮叶片冷却、电子器件冷却、制冷技术等。冲击射流工作原理是流体在压差作用下通过冲击孔形成高速射流,射流直接冲击换面,产生较高的传热效率。

目前关于冲击射流传热特性的研究主要以常规流体(如空气、水等)为主。Pautsch^[1]等实验研究了冲击孔排列方式对于以 FC-22 为冷却介质的冲击射流传热的影响。Ekkad^[2]等利用瞬态液晶技术研究了空气与 CO₂ 的冲击射流换热系数分布。Vader^[3]等开展了以水为介质的冲击射流换热研究。Zhang^[4]等人研究了液氮的冲击射流换热特性。国内学者刘远见^[5]等实验研究了高压涡轮机匣加强肋表面的空气冲击射流换热规律,刘明阳^[6]等采用液晶测温技术研究了空气冲击射流换热特性。但是,以具有复杂热物性的碳氢燃料为介质(如航空煤油)的冲击射流研究很少。煤油有着复杂的热物性与多物态变化(液体、气态、超临界态)^[7,8],其热力学和输运参数在临界点附近变化剧烈。同时,超临界状态下煤油的传热与流动也有很多奇特现象,如传热强化与恶化等。因此有必要对航空煤油的冲击射流传热特性进行实验研究。本文通过燃料流动与传热试验装置,研究了不同冲击射流雷诺数条件下航空煤油冲击射流的流动与传热效果,验证了煤油冲击射流具有很好的传热性能。

2 实验系统与模型

2.1 实验系统

实验系统如图 1 所示。实验系统主要由流动控制装置、燃料预热器、电加热装置、测量系统等组成。

实验系统运行时，油罐中的煤油在高压氮气驱动下流入实验段，流量控制器与压力控制器调节管路中流体流量与压力，当入口压力、流量等参数逐渐趋于平稳，可以判定流动达到稳定状态，选取典型时刻数据进行分析。

实验段上游的加热器可以控制冲击射流实验件流体的入口温度；实验件外有加热板对其进行加热，加热板外包有隔热材料，实验件外壁温及进出口的流体温度由 K 型热电偶测得，测量误差±0.4%。实验段进出口的压降由压差传感器测得，测量误差 0.1%。管路中流体压力的测量采用溅射薄膜型压力传感器，测量误差为 1%；流量由科式质量流量计测得，测量误差为 0.2%。

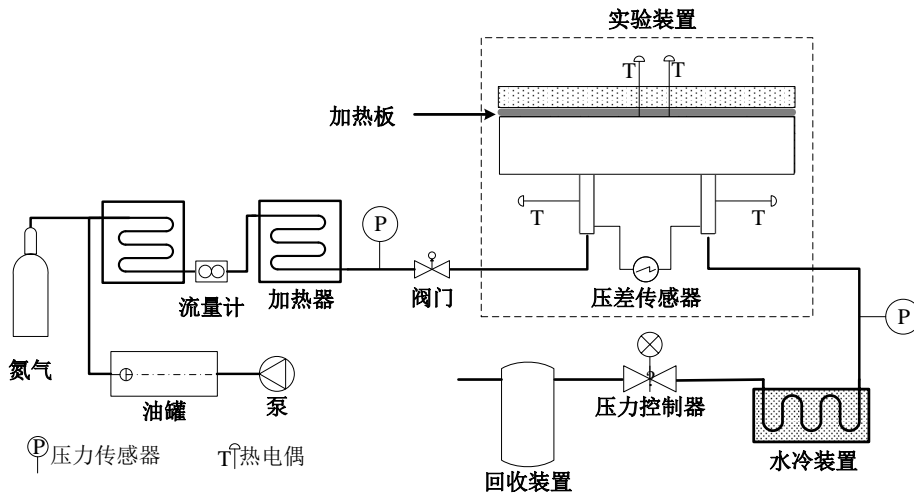


图 1 实验系统图

1.2 实验模型

冲击射流实验件的示意图如图 2 所示，实验件材料为 304 不锈钢，冲击高度为 3mm，冲击孔板上有 4 个均匀分布的冲击孔，冲击孔间距为 12×16mm。实验时煤油由入口流入稳压室，经冲击孔形成多股射流冲击到换热面，最后经出口汇流区流出实验件。

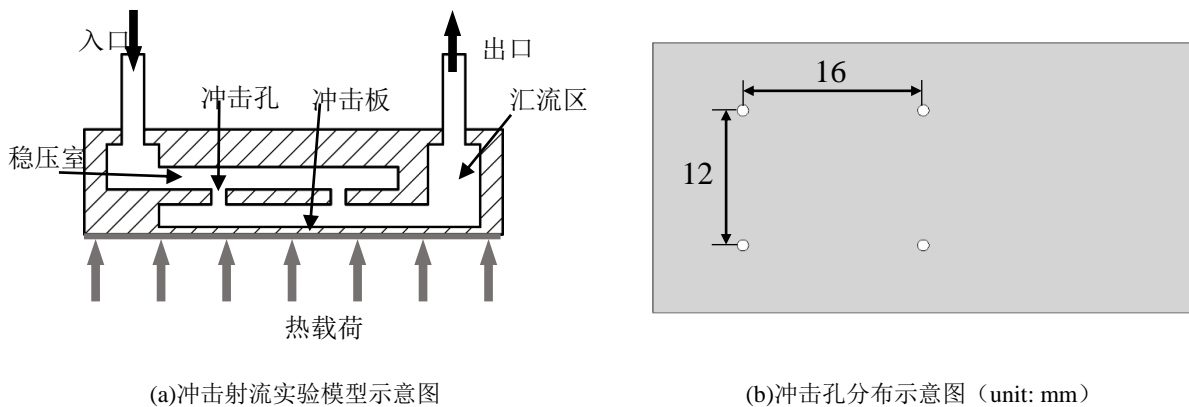


图 2 实验件示意图

3 数据处理

测量实验件冲击面外壁温度 T_0 ，煤油进出口温度 T_1 、 T_2 及沿程压降 ΔP 等；采用一维控制体分析

方法、基于能量守恒，得到冲击冷却面内平均传热系数 λ 、努赛尔数 Nu 以及无量纲压差系数 ζ 。传热系

数定义为 $\lambda = \frac{q_w}{T_w - T_b}$ ，努赛尔数定义为 $Nu = \frac{\lambda d}{k}$ ，无量纲压差系数定义为 $\zeta = \frac{\Delta P}{1/2 \rho u^2}$ 。

其中 ρ 为煤油密度， k 为煤油导热系数， q_w 为壁面热流， T_b 为流体进出口平均温度。这些系数的数值由煤油进出口平均温度、进出口平均压力，并采用 Zhong^[7]等人提出的 10 组分物理替代模型与广义对应状态法则所确定。

4 实验结果与分析

实验测量了入口流量分别为 10、30g/s 冲击射流传热与流动参数。入口煤油处于常温状态，入口压力 3.2MPa，相应的冲击射流雷诺数分别为 4230 及 10490(特征长度取冲击孔直径)。

4.1 实验过程

图 3 分别为流量 30g/s 实验煤油入口流量、压力、进出口温差及压差随时间的变化数据。实验启动时，流量控制器与压力控制器进入调节状态，流体逐渐流入传热实验段管路，流量逐渐升高并趋于恒定。同时，经过一段时间的调节之后，压力也区域恒定，并达到设定参数。如图 3(c)所示，进出口压差也趋于平稳，说明此时流动达到稳定状态。

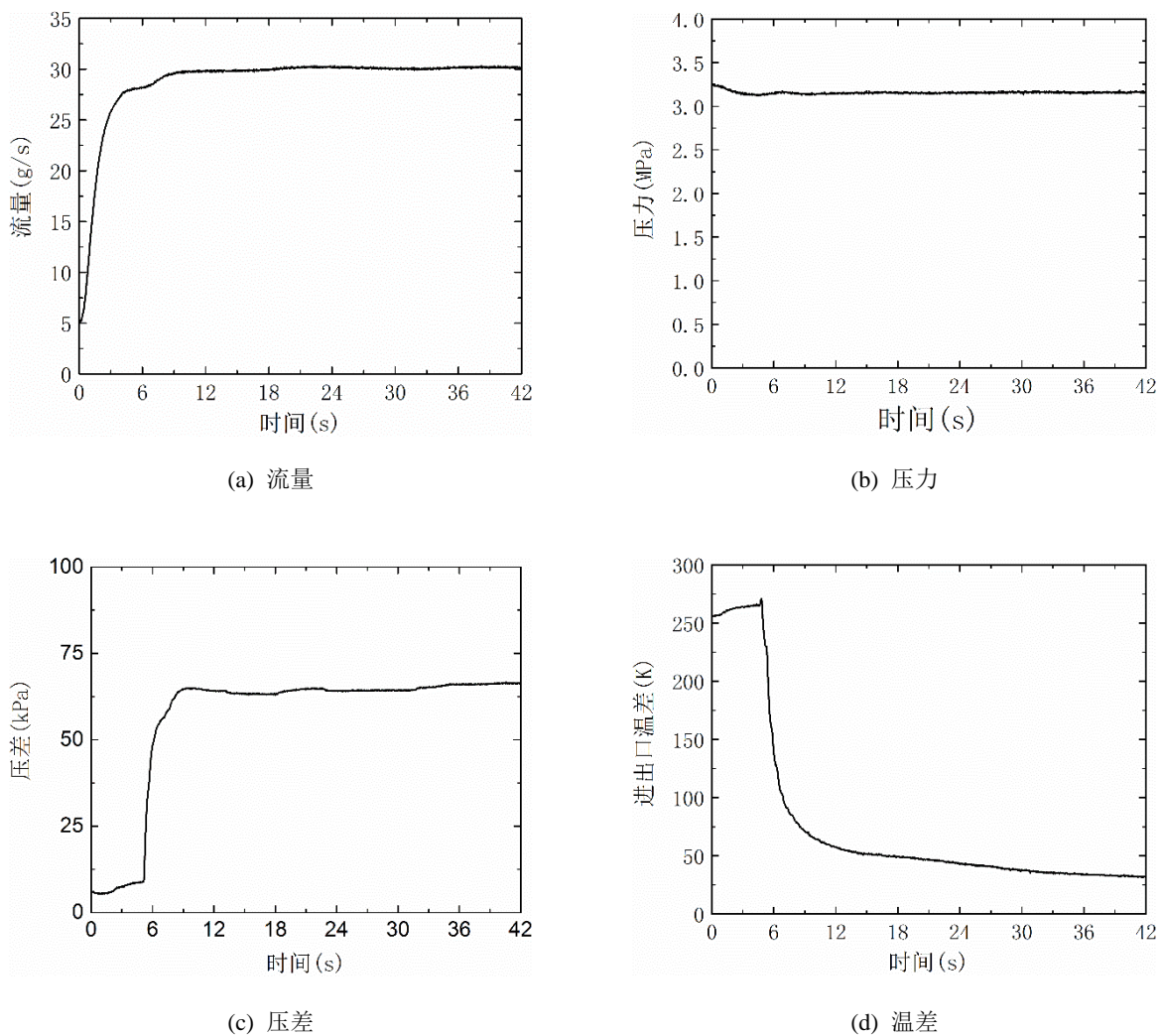


图 3 流动参数随时间变化曲线

4.2 实验传热效果

表 1 给出了煤油冲击射流的实验结果。随着流量增加, 雷诺数增大, 冲击换热面整体传热系数也在增大。进出口压差也随着雷诺数的增加而增大, 压差范围在 11.8-63.0kPa, 远小于一个大气压。而无量纲压差系数随着雷诺数增加而减小, 这与以往关于多孔板流动的压力损失研究结果相一致^[9,10]。

表 1 煤油冲击射流实验结果

No.	流量(g/s)	Re	λ (W/m ² ·K)	Nu	ΔP (kPa)	ζ
1	10.1	4230	4379.7	33.4	11.8	1.72
2	30.3	10490	12468.8	93.4	63.0	1.05

4.3 冲击射流传热增益

表 2 给出了煤油冲击射流的传热增益效果。与相同流量下航空煤油在矩形管道中(横截面 2×2mm, 沿展向均匀分布 4 根冷却通道, 通道间距 4mm)的传热效果相比较。煤油充分发展管道流动的传热系数根据已有的管流实验数据确定^[11]。如表 2 所示与管道对流传热相比, 煤油冲击射流传热系数增益超过 100%。

表 2 煤油冲击射流传热增益

No.	冲击射流 λ (W/m ² ·K)	管流 λ (W/m ² ·K)	传热增益
1	4379.7	2119.1	107%
2	12468.8	4517.0	176%

5 结论

本文基于流动与传热实验装置, 实验研究了不同雷诺数下常温煤油冲击射流冷却的流动与传热特性, 获得了煤油冲击射流的传热系数与压力损失结果, 主要结论如下:

- 1) 以煤油为介质进行冲击射流冷却有着高效的传热效果, 传热系数随着冲击雷诺数的增加而增大; 与传统管流的对流传热性相比, 冲击射流传热系数增益超过 100%;
- 2) 煤油冲击射流流动的压力损失很小, 本文的实验数据显示进出口压差远小于一个大气压。

参考文献

- [1] Pautsch A G, Shedd T A. Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part I: Heat transfer data using FC-72[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(15):3167-3175.
- [2] Ekkad S V, Zapata D, Han J C. Heat transfer coefficients over a flat surface with air and CO₂ injection through compound angle holes using a transient liquid crystal image method[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 580-586.
- [3] Vader D T, Incropera F P, Viskanta R. Local convective heat transfer from a heated surface to an impinging, planar jet of water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(3): 611-623.
- [4] Zhang P, Xu G H, Fu X, et al. Confined jet impingement of liquid nitrogen onto different heat transfer surfaces[J]. Cryogenics, 2011, 51(6): 300-308.
- [5] 刘远见, 毛军逵, 江华, 李毅, 沈毅, 陆海鹰. 高压涡轮机匣加强肋表面换热特性试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2619-2628.
- [6] 刘明阳, 常士楠, 杨波. 稳态与瞬态冲击射流换热性能实验对比[J]. 推进技术, 2019, 40(03): 619-623.

- [7] Zhong F, Fan X, Yu G et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J].*Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543-550.
- [8] 范学军,俞刚.大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J].*推进技术*,2006(02):187-192.
- [9] Kolodzie Jr P A, Van Winkle M. Discharge coefficients through perforated plates[J]. *AICHE Journal*, 1957, 3(3): 305-312.
- [10] 周昊,赵梦豪,张昆,李宁,马炜晨.中高开孔率多孔板高温环境下阻力特性试验研究[J].*浙江大学学报(工学版)*,2018,52(10):1888-1893.
- [11] Sieder E N, Tate G E. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(12): 1429-1435.