

# 碳氢燃料冲击射流传热特性数值研究

杜蒙蒙<sup>1,2</sup>, 仲峰泉<sup>1,2\*</sup>, 邢云绯<sup>1</sup>, 张新宇<sup>1,2</sup>

(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)

杜蒙蒙, 博士研究生, 研究领域为热防护系统流固耦合传热,

联系电话与邮箱: 13651222358, [dumengmeng@imech.ac.cn](mailto:dumengmeng@imech.ac.cn)

## 摘要:

以碳氢燃料为冷却介质的冲击射流冷却在高超声速飞行器及发动机热防护领域有着重要的应用前景。与传统的冲击射流冷却介质水、空气有所不同, 碳氢燃料具有复杂的热物性, 其冲击射流流场与传热特性将发生显著变化, 需要深入研究。本文采用雷诺平均方法结合 SST k- $\omega$  湍流模型数值研究了相同流量条件下, 冲击孔板不同开孔率的航空煤油冲击冷却流动与传热特性。本文的研究表明, 煤油通过冲击孔形成高速射流冲击到冷却面, 在冲击冷却面产生了很强的换热效果, 换热系数由射流滞止区向周围逐渐减。同时, 由于多股冲击射流之间的相互作用, 在孔下游区域形成典型的反向旋转对涡结构, 进一步促进了换热效果。数值结果显示, 在相同流量下, 随着开孔率的增加, 冲击速度降低, 冲击效果也随之降低。但冲击冷却的压力损失随着开孔率的减少而迅速增大。

关键词: 冲击射流冷却, 碳氢燃料, 换热效果, 数值研究

## Numerical Study of Heat Transfer Characteristics for Impingement Jets of Hydrocarbon Fuels

Du Meng-meng<sup>1,2</sup>, ZHONG Feng-quan<sup>1,2</sup>, XING Yun-fei<sup>1</sup>, ZHANG Xin-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

## Abstract:

Impingement jets cooling of hydrocarbon fuels has good application prospect in the field of thermal protection for the hypersonic vehicle and scramjets. Physical properties of hydrocarbon fuels are more complicated than conventional coolant such as water and air, and the flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon fuels impingement jets are significant change and more research is needed. The numerical method of Reynolds averaged Navier-Stokes simulation with SST k- $\omega$  turbulence model is used to investigate the flow and heat transfer characteristics of aviation kerosene jets cooling with same flow rate and different opening area ratio. The results indicate that the kerosene coolant flow collides into the surface through holes and generate strong heat transfer effects. Meanwhile, interactions between multiple jets give rise to typical counter-rotating vortex pairs down the holes, and it enhances the heat transfer. Under the same flow rate, the heat transfer

---

\* 通讯作者, Email: [fzhong@imech.ac.cn](mailto:fzhong@imech.ac.cn)

effectiveness and jet velocity decreases with the decreases of opening area ratio. However, the pressure drop increases dramatically with the decreases of opening area ratio.

**Key words:** Impingement Jets cooling; Hydrocarbon Fuels; Heat Transfer Effectiveness; Numerical Study

## 1 引言

随着飞行马赫数的提高,高超声速飞行器与发动机的热载荷也越来越大,其对热防护的要求也越来越高。目前超燃冲压发动机常用的冷却方式是以管道对流换热为原理的再生冷却技术,其难以有效满足超燃冲压发动机对于热防护日益紧迫的需求,尤其对于局部高温高热流区域。冲击射流冷却技术作为一种高效的冷却方式,其已在诸多领域如航空、能源、电子等有了广泛的应用,冷却介质在压差作用下通过冲击孔冲击到壁面,在换热面形成很薄的边界层,具有显著的换热增益效果<sup>[1]</sup>。

对于多孔冲击射流,流动的换热效果主要由流动的结构参数如冲击孔的排布、冲击高度、孔间距和流动参数如雷诺数等影响,国内外针对简单介质为冷却工质(如空气、氮气等)的冲击射流冷却研究比较充分,获得了主要冲击参数对冷却性能的影响规律。Martin<sup>[2]</sup>等总结了空气冲击射流传热效果的经验关系式,Goldstein<sup>[3]</sup>等利用瞬态液晶技术实验研究了空气冲击射流冷却的换热规律。Ibuki<sup>[4]</sup>等研究了以水为冷却介质的冲击射流冷却特性。国内学者马重芳<sup>[5]</sup>等较早开展了冲击射流冷却的研究,马朝<sup>[6]</sup>等研究了冲击射流的换热均匀性问题。而冲击射流冷却在高超声速领域的研究与应用鲜有报道。尤其是以碳氢燃料为冷却介质的冲击射流冷却,由于燃料物性的复杂性,其流动与冷却性能变化规律尚不清楚。本文基于数值仿真方法,研究了碳氢燃料冲击射流的冲击结构参数对于冷却效果的影响规律。

## 2 数值计算模型及方法

### 2.1 问题描述

冲击射流的流体计算模型如图 1、2 所示,煤油冷却剂由左侧入口流入到稳压室,通过冲击孔冲击到冷却面,最后通过右侧出口流出。冷却剂的入口流量为 35g/s,入口温度为 300K,冲击冷却壁面为恒热流边界条件  $1\text{MW}/\text{m}^2$ ,其他壁面为绝热壁。本文分别研究了冲击孔板具有 2、4、12 个冲击孔的冲击射流流动与换热,相应的冲击射流雷诺数分别为 18375、9173、3058,相应的开孔率分别为 0.205%、0.41%、1.23%。冲击冷却面的尺寸为  $32\times 24\text{mm}$ ,冲击孔均匀分布,冲击孔直径 1mm,冲击高度为 3mm。

对于冲击射流的流动计算,本文通过雷诺平均方法求解 Navier-Stokes 方程,采用 SST k- $\omega$  模型模拟湍流,并考虑近壁区域的低雷诺数修正。数值研究了相同流量下不同开孔率的煤油冲击射流的流动及传热特性,分析了煤油冲击射流冷却效果以及经冲击射流冷却后的的压力损失。煤油热物性与输运参数采用 Zhong 等人<sup>[7]</sup>提出的 10 组分物理替代模型结合广义对应法则确定。

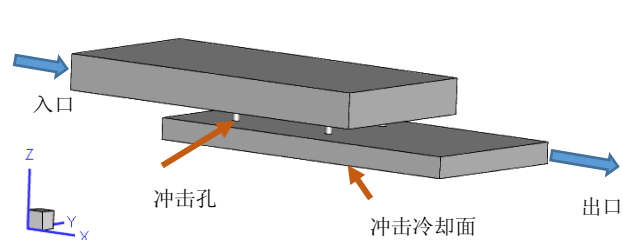


图 1 冲击射流计算模型

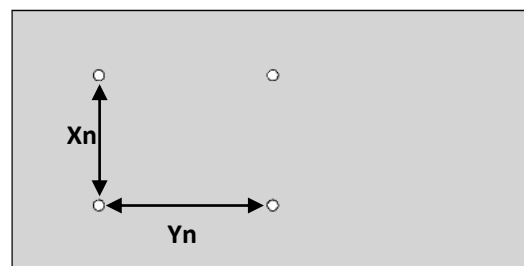


图 2 冲击冷却壁面及冲击孔分布(4个孔)

### 2.2 网格无关性验证

采用六面体网格对计算域进行了网格划分,如图 3、4 所示,在壁面处设置了拉伸边界层网格,为了保

证计算结果的有效性,对计算进行了网格无关性验证工作.以4孔结构冲击流动计算为例,网格验证结果如表1及图5所示,

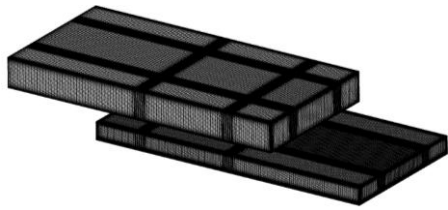


图3 模型网格划分

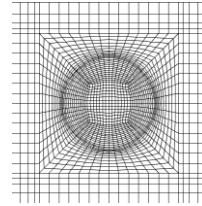


图4 冲击孔处网格划分

如表1所示,冲击面的平均换热系数随着网格数的增加呈现非单调变化趋势,网格数300万和500万的换热系数差异很小。同样,图5显示,网格数较低时,冲击孔正对的换热系数峰值有很大差别。当网格数达到300万时,换热系数峰值基本不变。这说明本文计算采用的网格300万满足要求,此时计算结果与网格数无关。

表格1 网格无关性验证

| 网格数        | 70万   | 150万  | 300万  | 500万   |
|------------|-------|-------|-------|--------|
| 第一层网格高度/mm | 0.01  | 0.005 | 0.001 | 0.0001 |
| 平均换热系数     | 11424 | 11719 | 11387 | 11414  |

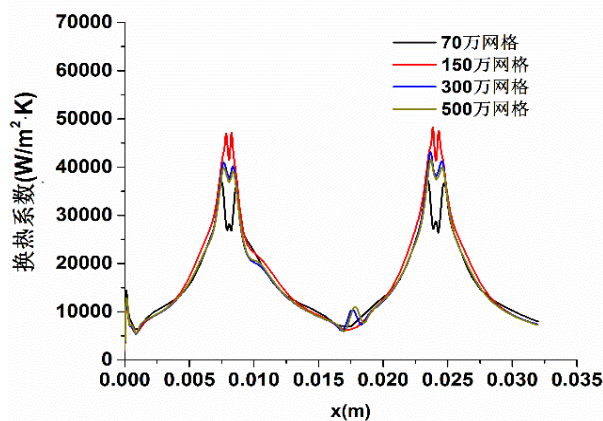


图5 不同网格的冲击冷却的换热系数分布

## 2.1 流场计算结果

以4孔结构的煤油冲击射流冷却为基本算例,进行流动与传热特性分析。图6、7是冲击射流的流场,其云图为湍动能的等值面。煤油在压差作用下通过冲击孔形成高速射流冲击到冷却面,多股冲击射流之间产生相互作用,在冲击区域形成典型的反向旋转的对涡结构,将壁面上加热的流体卷吸进主流区域,进一步增加了流体的扰动,冲击射流的涡旋结构也显著增加了流动的湍动能,有效促进了对流传热。

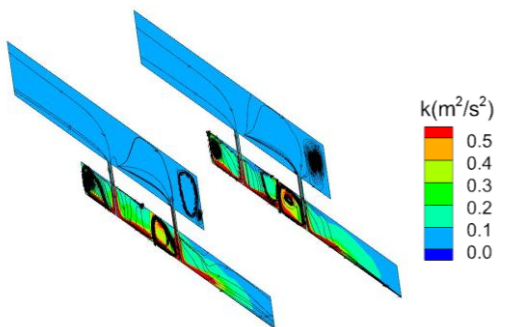


图6 不同纵截面流线

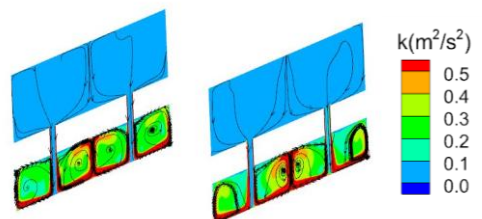


图7 不同横截面流线

图 8、9、10 分别给出不同开孔率条件下冲击冷却面内换热系数分布云图。如图所示在射流孔下方的滞止区换热系数最高。随着与冲击滞止区距离的增加，冲击冷却面内换热系数逐渐变弱。随着开孔数的增加，定流量下射流雷诺数减小，冲击速度减弱，换热峰值也减小。

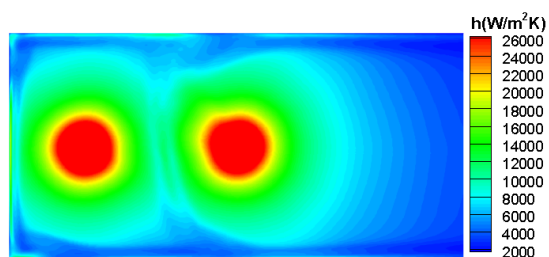


图 8 2 孔结构冲击面内传热系数分布云图

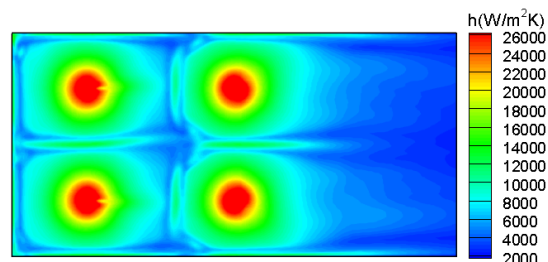


图 9 4 孔结构冲击面内传热系数分布云图

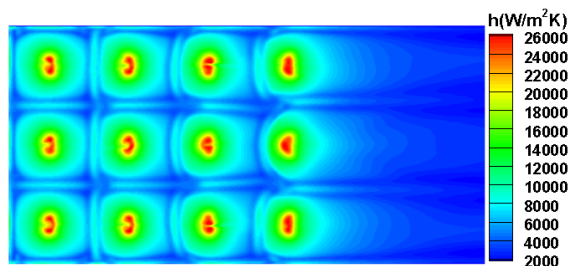


图 10 12 孔结构冲击面内传热系数分布云图

统计换热面的平均换热系数与冷却剂流经冲击结构后的压力损失，如表 2。随着开孔率的增加，孔间距 ( $X_n$ 、 $Y_n$ ) 减小，换热系数也在下降。在相同的燃料流量下，若不采用冲击结构，煤油在 4 根沿冲击面展现均匀分布、水力直径 2mm 的管道中流动，其对流换热系数约为 4760。可见，采用冲击射流方式，可以显著提高换热系数。同时，需要注意的是，随着开孔率的减小，流动压力损失也显著增大。

表格 2 不同开孔率换热效果统计

| 孔数 | 开孔率 ( $A_r$ ) | Re    | $X_n$ | $Y_n$ | 压降, atm | 平均换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ |
|----|---------------|-------|-------|-------|---------|---------------------------|
| 2  | 0.205%        | 18375 | 16    | -     | 5.42    | 12455                     |
| 4  | 0.41%         | 9173  | 16    | 12    | 1.41    | 11387                     |
| 12 | 1.23%         | 3058  | 8     | 8     | 0.163   | 8967                      |

### 3. 结论

本文通过数值方法研究了固定流量下煤油冲击射流冷却的流动与传热特性，本文的计算结果表明：

- 1). 以煤油为冷却介质进行冲击射流冷却有着显著的传热增益效果；
- 2). 相同流量下随着开孔数的增加，孔间距减小，射流速度降低，射流的换热效果也不断降低；同时随着射流雷诺数的减小，冲击孔下游旋涡结构更弱，降低了换热效果；
- 3). 煤油流动的压力损失随着开孔数目的降低而显著增大。

由此可见，冲击射流冷却设计需要综合考虑换热增益效果与压力损失，选择出最佳的冷却参数。基于现有的结果，还需对流动参数与冲击结构参数进行进一步的优化研究。

### 致谢

本文研究获得了国家自然科学基金资助(项目编号: 11672307)以及中国科学院青年创新促进会资助, 在此表示感谢。

### 参考文献

- [1] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京航空航天大学出版社, 2005.

- [2] Martin H. Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces[J]. Advances in Heat Transfer, 1977, 13:1-60.
- [3] Goldstein R J, Timmers J F. Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1982, 25(12):1857-1868.
- [4] Ibuki K, Umeda T, Fujimoto H, et al. Heat transfer characteristics of a planar water jet impinging normally or obliquely on a flat surface at relatively low Reynolds numbers[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2009, 33(8):1226-1234. [3] Martin H. Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces[J]. Advances in Heat Transfer, 1977, 13:1-60.
- [5] 陈永昌, 马重芳, 雷道亨. 极小尺寸圆形空气射流强化换热的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(4):5-8.
- [6] 马朝, 严超, 曹学伟, 等. 阵列空气射流传热均匀性问题的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, V37(11):2378-2384.
- [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.