

烃类火箭燃料(煤油)传热试验

梁克明

摘要

本文介绍了煤油传热试验结果及沉积物形成的速率,分析了烃类燃料的冷却特点。

关键词: 传热, 煤油, 燃料试验, 液体推进剂, 火箭发动机, 烃类燃料

一、实验系统

未来大型运载火箭及天地往返运输系统有可能采用液氧/烃类燃料,因此有必要对烃类燃料的冷却性能进行研究。这里介绍了煤油的传热试验情况。

实验系统采用挤压式,增压气体为氮气(或空气),实验介质(煤油、丙烷)反复使用,独山子航空煤油每次试验后用麂皮过滤。

实验件用高精度 $\phi 5 \times 0.5$ (或 $\phi 4 \times 0.5$)冷拉不锈钢Cr18Ni9Ti无缝钢管制造,实验件长0.46m,加热段长0.18m。

直流电由两台直流发电机供给,总功率为288kW。

每次介质试验前均采用蒸馏水进行校验性试验,按下面准则方程整理,误差在5%以内,证明实验精度高。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (Re < 2 \times 10^4) \quad (1)$$

$$Nu = 0.005 Re^{0.95} Pr^{0.4} \quad (Re \geq 2 \times 10^4) \quad (2)$$

二、实验结果

1. 强迫对流换热

独山子航空煤油在未沸腾和未出现沉积物之前的对流换热系数整理成以下准则方程式:

$$Nu = 0.0115 Re^{0.84} Pr^{0.4} \quad (Re < 2 \times 10^4) \quad (3)$$

$$Nu = 8.85 \times 10^{-4} Re^{1.1} Pr^{0.4} \quad (Re > 2 \times 10^4) \quad (4)$$

2. 煤油的“沸腾”换热

煤油在超临界工况下也有“伪沸腾”现象,尤其在低流速时“沸腾”现象更明显。图1为独山子煤油的试验结果,它在700℃左右出现“沸腾”,“沸腾”时极限换热系数为强迫对流换热系数的5倍。这类火箭发动机的冷却设计应该利用“沸腾”传热的特点。

3. 煤油的烧毁热流

图2是煤油在不同压力下的烧毁热流(流速为9.5m/s)。它说明在压力 $p = 5\text{ MPa}$ 时烧毁热流 q_{cr} 有最大值。当 $p > 5\text{ MPa}$ 时, q_{cr} 随压力增加而减小,在 $p = 16\text{ MPa}$ 时, q_{cr} 仍有较大的值,因此煤油在压力 $p < 16\text{ MPa}$ 时仍可作为冷却剂。图2还表明独山子煤油与21*煤油的试验结果相同。

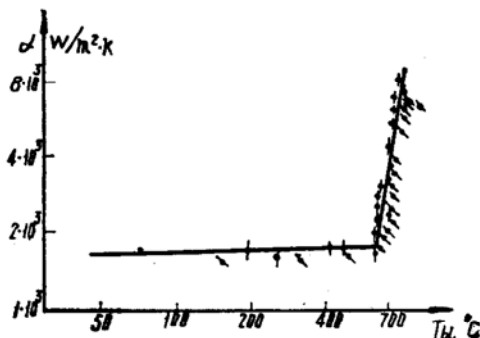


图1 独山子煤油的换热系数

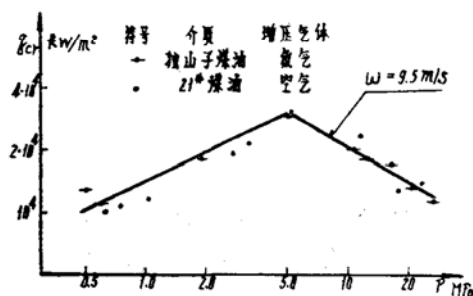


图2 压力与烧毁热流的关系

关于流速对烧毁热流的影响,我们试验的结果表明:烧毁热流 q_{cr} 随流速增加而增加。此外还表明,当 $\omega \leq 20\text{ m/s}$ 时,煤油的烧毁热流 q_{cr} 大于偏二甲肼的烧毁热流,当 $\omega > 25\text{ m/s}$ 时煤油的烧毁热流小于偏二甲肼烧毁热流;独山子煤油的 q_{cr} 与21*煤油的 q_{cr} 试验值相接近。最后我们对独山子煤油采用了空气和氮气增压进行了比较试验。结果表明,当 $\omega \leq 5\text{ m/s}$ 时,它们的烧毁热流相接近,当 $\omega > 5\text{ m/s}$ 时空气增压试验得的烧毁热流 q_{cr} 低于氮气增压的烧毁热流。

独山子煤油在压力 $p = 12\text{ MPa}$, $\omega = 20\text{ m/s}$ 时,它的烧毁热流 $q_{cr} = 31.8 \times 10^6\text{ W/m}^2$ 。

4. 煤油的沉积速率及热阻

独山子煤油在流速、压力、热流不变的条件下进行了长时间(约1小时)沉积物形成速率的试验。试验结果是:

1. 平均沉积速率是 $2 \sim 5.1^\circ\text{C/min}$ (即壁温每分钟升高 $2 \sim 5.1^\circ\text{C}$)。
2. 前10分钟沉积速率大约为 $5 \sim 12^\circ\text{C/min}$,然后沉积速率减慢并趋向稳定。
3. 沉积物有时还有脱落现象;
4. 沉积物稳定后的热阻 $\delta/\lambda = 0.95 \sim 1.7 \times 10^{-5}\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (21*煤油 $\delta/\lambda = 1.7 \sim 3.4 \times 10^{-5}\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)。74年我们测得自来水的结垢速率为 $0.117 \sim 1.08^\circ\text{C/min}$,最大结垢速率为 4°C/min 。由此可见煤油与自来水一样,它的沉积物的沉积速率也不高。

由上述分析可以看出合理的进行冷却设计,煤油完全可以实现燃烧室压力 $p_K = 10\text{ MPa}$ 的液氧、煤油发动机的冷却要求。

三、结 论

1. 独山子航空煤油在管内强迫对流换热系数可以用准则方程(3)及(4)进行计算。

(下接第84页)

另外, Crocco压力面积律及“熵限”概念在超音燃烧室中的适用性,也有人提出异议^[5]。升谷五郎的实验表明^[6],在 N 值小的情况下($N = 1 \sim 4$),Аннушкин公式也偏离实验。但是,由于Billig模型和Аннушкин公式是以广泛实验为基础的,就工程应用来说,它们的正确性是可信的。

鉴于以上的理由,本文提供的方法,在超音燃烧室研究的初期阶段,是一简单而有效的分析工具。

参 考 文 献

- (1) Billig, F.S., Combustion Processes in Supersonic Flow, ISABE 85-7026, 7th International Symposium on Air Breathing Engine, 1985, PP245-256.
- (2) Аннушкин, Ю.М., Основные Закономерности Выгорания Турбулентных Струй Водорода в Воздушных Каналах, ФГВ, ТОМ. 17, №4, 1981.
- (3) Billig, F.S., Dugger, G.L. and Waltrup, P.T., Inlet-Combustor Interface Problems in Scramjet Engines, The 1st International Symposium on Air Breathing Engines, Marseill, France, June 1972.
- (4) Billig, F.S., Ramjets with Supersonic Combustions, AGARD-MATO PEP Lecture Series No. 136, Ramjet and Ramrocket Propulsion Systems for Missiles, AGARD-L5-136, Oct. 1984.
- (5) Ramaty, Y., Spiegler, E. and Timant, Y.M., The Self-adjustment Mechanism Model of Scramjet Combustors, 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1982, PP549-556.
- (6) 升谷五郎, 鎮西信夫, 工藤賢司, 村上淳郎, 小室智辛, 石井進一: 空気吸込ロケットの研究 (111) 超音速モフ燃烧器, 航技研報告NAL TM-756, 1983年4月, 19頁。



(上接第66页)

2. 当 $\omega \leq 20 \text{ m/s}$ 时, 煤油的烧毁热流比偏二甲肼的高, 经分析后认为煤油可以满足 $p_K = 10 \text{ MPa}$ 液氧、煤油发动机的冷却要求。

3. 煤油在加热时生成沉淀物沉积在试件内表面上, 形成 $0.95 \sim 3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 的热阻。

4. 煤油沉积物的沉积速率不大。