

层板室壁无相变流动时的冷却性能

(上海交通大学工程热物理研究所) 吴慧英 程惠尔 邓澍

摘要: 对层板室壁中液态冷却剂的传热进行分析, 得出影响层板室壁冷却效果的性能参数 $m_{1/2}$, 该性能参数与层板通道换热面积、换热系数以及冷却剂比热有关, 并以层板推力室为例, 指出性能参数 $m_{1/2}$ 对层板室壁内壁温度及内外壁温差的影响。

关键词: 层板室壁; 冷却性能; 推力室; 壁温

中图分类号: TK124

文献标识码: A

1 引言

在对高热流密度室壁(如液体火箭发动机推力室、燃气轮机叶片等)的冷却方面, 传统的膜冷却方法、再生冷却方法都不可避免地存在着缺陷^[1]。为此, 美国 Aerojet 公司提出了层板冷却的概念^[2], 其思想是将数十至数百片蚀刻有精确微细通道的超薄板片经有序叠合及扩散焊工艺而形成一种特殊的冷却结构, 冷却剂在流过层板中曲折拐弯的微通道时吸收大量的潜热, 同时在层板室壁的热防护侧可形成每平方米数十至数百个微孔, 由这些微孔流出的冷却剂又可形成一层保护液膜以阻隔热量进一步流向热防护侧, 因此冷却效果十分显著。与传统烧结多孔材料相比, 层板结构可以准确控制通道的冷却剂流量分布, 从而避免烧结材料对“热点敏感”的缺点。美国在层板冷却技术的应用研究方面处于国际领先水平, 至今 Aerojet 公司^[2]已研制出层板涡轮叶片、层板换热器、层板防火墙、层板雷达罩、层板热管芯等一系列层板热管理装置, 然而基于保密考虑, 有关这些层板装置热性能等方面的数据却未予报道。在国内对层板冷却技术的研究几乎只限于数值计算^[3,4]。本文对冷却剂在层板中无相变时的传热进行分析, 得出影响层板冷却效率的性能参数, 该参数与层板微通道换热面积、换热系数、冷却剂比热有关, 当层板通道结构及冷却剂确定后, 该性能参数便可由实验确定。本文同时根据文献[4]的数值计算结果, 指出该性能参数对层板推力室内壁温度及层板推力室内外壁温差的影响。

2 冷却剂在层板中无相变流动的传热分析及冷却性能参数的得出

定义层板室壁冷却效率

$$\eta = \frac{t_o - t_i}{t_w - t_i} \quad (1)$$

式中 t_i 、 t_o 分别为冷却剂进入和离开层板室壁的温度, t_w 为层板室壁内壁温度。为便于分析作如下假设:

- (1) 冷却剂比热 c_p 在整个换热面上都为常量;
- (2) 换热系数 α 在整个换热面上相同;
- (3) 换热面壁温相同, 为层板室壁内壁温度 t_w 。

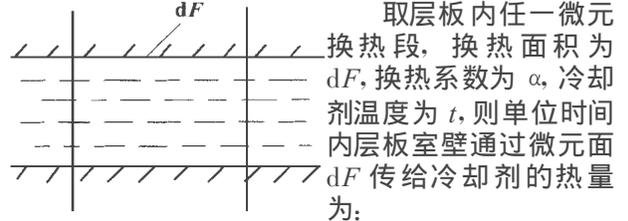


图1 层板内的微元换热段

取层板内任一微元换热段, 换热面积为 dF , 换热系数为 α , 冷却剂温度为 t , 则单位时间内层板室壁通过微元面 dF 传给冷却剂的热量

$$dq = \alpha \cdot (t_w - t) \cdot dF \quad (2)$$

冷却剂流过此段被加热, 温度上升 dt , 所以

$$dq = m \cdot c_p \cdot dt \quad (3)$$

式中 m 为单个微通道中的冷却剂质量流率,

由式(2)和式(3)可得:

$$\frac{d(t_w - t)}{(t_w - t)} = -\frac{\alpha}{m \cdot c_p} dF \quad (4)$$

对式(4)两边积分:

$$\int_{t_w - t_o}^{t_w - t_x} \frac{1}{(t_w - t)} d(t_w - t) = \int_0^{F_x} -\frac{\alpha}{m \cdot c_p} dF \quad (5)$$

积分结果为:

$$t_w - t_x = (t_w - t_i) \cdot e^{-\frac{\alpha F_x}{m c_p}} \quad (6)$$

式中 t_x 表示换热面积为 F_x 处的冷却剂温度,

式(6)表明层板室壁与冷却剂的换热温差沿换热面积成指数变化。假设 A 为冷却剂从层板进口到出口所经过的总的换热面积, 则可得到冷却剂出口温度 t_o :

$$t_w - t_o = (t_w - t_i) \cdot e^{-\frac{\alpha A}{m c_p}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(2), 并对整个换热面进行积分可得冷却剂从层板室壁进口到出口所吸收的总热量 q :

$$q = (t_w - t_i) m c_p (1 - e^{-\frac{\alpha A}{m c_p}}) \quad (8)$$

根据冷却剂从进口到出口的能量平衡, 有:

$$m c_p (t_o - t_i) = (t_w - t_i) m c_p (1 - e^{-\frac{\alpha A}{m c_p}}) \quad (9)$$

根据式(1)和式(8)可得层板室壁冷却效率 η :

$$\eta = 1 - e^{-\frac{\alpha A}{m c_p}} \quad (10)$$

收稿日期: 1998-11-26; 修订日期: 1999-06-01

基金项目: 受中国博士后基金、上海博士后基金及上海交大青年基金资助

作者简介: 吴慧英(1967-), 女, 1997年毕业于东南大学电厂热能动力工程系, 现上海交通大学工程热物理所博士后。通讯处: 200030 上海

交通大学工程热物理研究所

当层板通道结构、换热系数和冷却剂比热都确定后, η 的值仅与冷却剂质量流量 m 有关。定义使 $\eta = 1/2$ 的冷却剂质量流率为 $m_{1/2}$, 则根据式(10)得:

$$m_{1/2} = \frac{\alpha A}{c_p \ln 2} \quad (11)$$

式(11)表明 $m_{1/2}$ 只与冷却剂比热、换热系数以及层板通道结构有关。对一个实际的层板, 当冷却剂确定后, $m_{1/2}$ 的值是唯一的, 可通过实验来确定。因此可将 $m_{1/2}$ 看作衡量层板冷却效果的性能参数, 于是层板冷却效率与性能参数 $m_{1/2}$ 以及冷却剂质量流率 m 有关, 即:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{m_{1/2} \ln 2}{m}} \quad (12)$$

η 随性能参数 $m_{1/2}$ 的变化关系如图 2 所示。

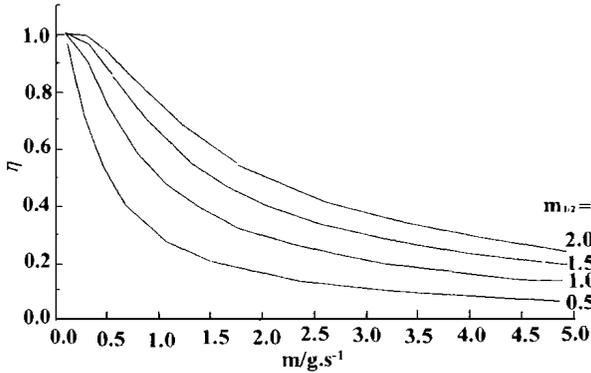


图 2 层板室壁冷却效率随性能参数 $m_{1/2}$ 的变化

由图 2 可知:

- (1) 性能参数 $m_{1/2}$ 越大, 层板室壁内部的换热效率越高, 层板的冷却效率也就越高;
- (2) 随着冷却剂质量流率的减小, η 趋近于 1, 即表示冷却剂出口温度接近于室壁温度;
- (3) 冷却剂流量增大时, η 值降低, 且随着冷却剂流量的增大, 冷却剂出口温度下降越慢。

必须指出文中换热系数 α 是指层板微通道中的换热系数, 而不是传统经典公式中的换热系数。微细尺寸下的传热与常规尺度下的传热有一些区别, 而其区别主要体现在换热系数 α 及努氏数 Nu 的数值上。Wu 和 Little^[3] 得到紊流状态下微尺度的换热经验公式为 $Nu = 0.00222Re^{1.09}Pr^{0.4}$, Xin 和 Shi^[3] 得到层流状态下微尺度的换热经验公式为 $Nu = 1.51(RePrD_h/L)^{0.5545}(H_c/W_l)^{-0.3615}(\mu_f/\mu_w)^{0.11}$, 而另外一些研究者则提出了不同的计算公式。至今对微结构中的传热问题所作的研究工作还很有限, 还未取得一致公认的微结构中的传热计算公式。本文主要研究的是层板室壁的总冷却性能, 尽管性能参数 $m_{1/2}$ 与 α 存在着式(11)的关系, 但其值的获得却可根据定义直接由实验来确定, 从而避开直接对微通道中换热系数的求取, 这也是本文提出性能参数 $m_{1/2}$ 的用意所在。

3 性能参数 $m_{1/2}$ 对层板推力室壁温的影响

力为 2 500 N 的液体火箭发动机层板推力室的室壁进行了数值模拟, 冷却剂为液态一甲基肼。数值计算结果给出了性能参数 $m_{1/2}$ 对层板推力室室壁温度的影响关系, 如图 3、4 所示。

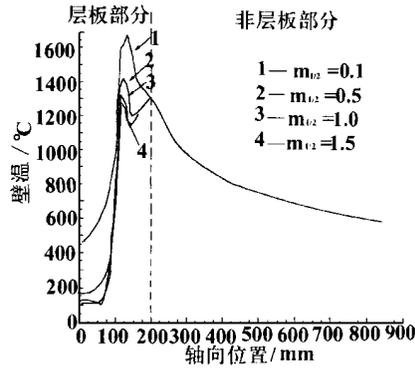


图 3 $m_{1/2}$ 对层板室壁内壁温度的影响

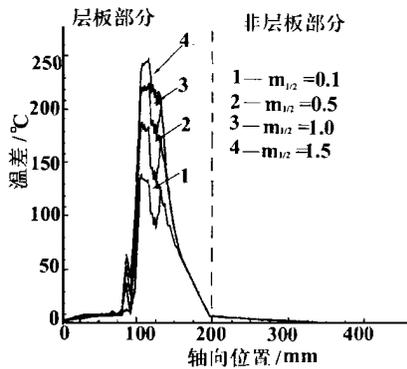


图 4 $m_{1/2}$ 对层板室壁内外壁温差的影响

由图 3 和图 4 可见:

(1) 相同情况下, $m_{1/2}$ 越大, 层板室壁内壁温度降低。这是因为, $m_{1/2}$ 越大, 层板室壁内部换热效率越高, 冷却剂吸收的热量越多, 从而层板室壁内壁温度也降低, 这对防止推力室壁温过高是很有好处的。

(2) 相同情况下, $m_{1/2}$ 越大, 层板内部的换热效率越高, 冷却剂内部吸热越多, 内、外壁温差也就越大。

4 结论

(1) 通过对层板室壁中冷却剂无相变流动时的传热分析, 得到了衡量层板室壁冷却效率的性能参数 $m_{1/2}$, 该性能参数与层板通道结构、换热系数、冷却剂比热有关, 其值可通过实验确定。

(2) 性能参数 $m_{1/2}$ 越大, 层板内部的冷却换热效率越高, 冷却剂内部吸热越多, 从而使相同情况下层板室壁内壁温度越低, 内、外壁温差越大。

参考文献

- [1] Kessler E L, et al. Transpiration cooling in H_2/O_2 combustion devices. *AAIA*, 1996; 2581.
- [2] Mueggenburg H H, et al. Platelet actively cooled thermal management devices. *AAIA*, 1992; 3127.
- [3] 刘伟强等. 层板发汗冷却计算模型. 工程热物理论文集, 1998, 5.
- [4] 邓 澍. 层板推力室发汗冷却的数值分析. 上海交通大学硕士学位论文, 1998, 1.
- [5] Peng X F, et al. Liquid flow and heat transfer in microchannels with/without phase change. In *Heat Transfer*, Taylor and Francis Pub. Co., 1994.

(何静芳 编辑)

tion, gas-solid fluidized bed, mixing, non-uniformity, oscillation

径向浓淡旋流燃烧器出口扩锥壁温分布及其对抗磨性能的影响 = **Temperature Distribution at the Expansion Cone Wall of a Radial Dense-dilute Swirl Burner Outlet and Its Effect on Abrasion Resistance** [刊, 中]/Niu Haifeng, Li Zhengqi, Sun Rui, (Harbin Institute of Technology), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 15 ~ 17

An analysis is performed of the abrasion resistance loss of a central expansion cone at a radial dense-dilute swirl burner outlet. The wall temperature distribution of the central expansion cone under actual operating conditions is studied and determined. The results obtained can serve as a reliable basis for the rational selection of materials for the central expansion cone, contributing to its enhanced high-temperature abrasion resistance. **Key words:** burner, abrasion, wall temperature distribution

层板室壁无相变流动时的冷却性能 = **Cooling Performance of a Laminated Platelet Wall in the Absence of a Phase-change Flow** [刊, 中]/Wu Huiying, Cheng Huier, Deng Shu (Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 18 ~ 19

An analysis is conducted of the liquid coolant heat transfer in a laminated platelet wall. As a result, identified is a performance parameter $m_{1/2}$, which exercises an influence on the platelet wall cooling effectiveness. The above-cited parameter has a bearing on the platelet passage heat exchange area, heat exchange factor and the coolant specific heat. With the platelet thrust chamber serving as an example the authors have determined the effect of the performance parameter $m_{1/2}$ on the platelet inner wall temperature and the temperature difference between the inner and outer wall. **Key words:** laminated platelet wall, cooling performance, thrust chamber, wall temperature

加福煤粉燃烧过程的微观形态观察 = **Microscopic state Observations of Jiafu Pulverized-Coal Combustion Process** [刊, 中]/Gu Zhongzhu, Zhang Yonglian, Cai Song (Southeastern China University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 20 ~ 22

With the help of an optical microscope and a scanning electronic microscope conducted are the detailed observations of the microscopic-state change relationship of a Jiafu pulverized-coal combustion process. The results of the investigation indicate that there appear in the Jiafu pulverized-coal combustion process five different types of particles, i. e., white, brown and black balls, black lump I and black lump II. The burn-off process is influenced by thermodynamic operating conditions. The key factor in reducing the carbon content of fly ash consists in an attempt to achieve a complete burning of the black lump I and an maximum ignition of the black lump II. **Key words:** pulverized coal, combustion, optical microscope, scanning electronic microscope, fly ash

100MW 螺旋管高压加热器封头应力分析 = **Stress Analysis of the High-pressure Spiral-tube Heater Head of a 100 MW Unit** [刊, 中]/Lu Yue, Zhang Jianping, Jin Jiadong (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 23 ~ 25

Through the use of a finite element method analyzed and evaluated in this paper is a high-pressure heater head. **Key words:** high-pressure heater, mechanics model, boundary conditions, finite element analysis

啮合齿向误差对齿轮承载能力的影响 = **The Effect of Gear Mesh Error on Gear Loading Capacity** [刊, 中]/Yao Shaoming, Cheng YinLi, Huang QinHai (Harbin No. 703 Research Institute), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 26 ~ 27

The authors have come up with a method for calculating gear mesh error. Under this method the gear axial inclination angle is divided into two components with the gear mesh error being calculated separately and then added up as per direc-