

一次调节通道流阻特性的数值模拟*

杨卫华, 程惠尔, 蔡 岸

(上海交通大学 工程热物理研究所, 上海 200030)

摘 要: 为了研究冷却剂在层板发汗冷却推力室一次调节通道中的流动特性, 引入了粗糙粘度 μ_R 的概念及其计算式, 用有效粘度 $\mu_{1,eff}$ 代替分子粘度 μ , 导出了冷却剂在一次调节通道中层流流动的 N-S 方程并对其进行了数值求解。计算结果表明, 利用 $\mu_{1,eff} = \mu_R + \mu$ 代数模型计算得到的流动结果与试验数据吻合较好, 说明冷却剂在 $D_h \approx 0.16\text{mm} \sim 0.18\text{mm}$ 的一次调节通道中层流流动时, 可不计微小尺度的效应, 但应考虑壁面粗糙度对流动的影响。

关键词: 推力燃烧室; 发汗冷却; 流动特性; 流体阻力; 数值仿真

中图分类号: V434.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 02-0115-03

Numerical simulation on the flow characteristics of the primary metering groove

YANG Wei-hua, CHENG Hui-er, CAI An

(Inst. of Engineering Thermal Physics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to study the flow characteristics of the coolant in primary metering groove, the N-S equation suitable for the laminar flow in primary metering groove was obtained by introducing the concept of roughness-viscosity model μ_R , replacing the viscosity μ with the effect viscosity $\mu_{1,eff}$, and then calculating. The numerical prediction shows that the calculation results obtained from the model $\mu_{1,eff} = \mu_R + \mu$ are in good agreement with the experimental results. It indicates that, for the coolant laminar flow in the primary metering grooves with the hydraulic diameter $D_h \approx 0.16\text{mm} \sim 0.18\text{mm}$, the micro-scale effect could be neglected, but the effect of surface roughness on the fluid flow must be considered.

Key words: Thrust chamber; Sweet cooling; Flow characteristic; Fluid drag; Numerical simulation

1 引 言

层板发汗冷却技术可用于下一代大推力、可重复使用液体火箭发动机的热防护。层板发汗冷却推力室由调节板片和散布板片组成。在调节板片上用化学蚀刻的方式加工一次调节通道和二次调节通道, 在散布板片上也采用蚀刻方式加工出冷却剂散布通道、分流增压槽道及定位孔。当冷却剂入口压力一定时, 对冷却剂流量的调节主要通过调整冷却剂在一次调节通道中的实际流通距离得到, 因此, 一次调节通道的流阻特性对层板发汗冷却推力室的安全工作有着重要的影响。刘伟强等^[1]曾讨论了发汗流压强和控制流道长度对壁温的影响, 本文采用理论和数值方法

对一次调节通道的流阻特性进行了分析研究。

2 理论预测

当冷却剂在一次调节通道流动时, 可采用 N-S 方程对其流动特性加以分析。在直角坐标系中, 三维定常不可压缩流体层流流动控制方程的张量形式为

$$\text{连续方程} \quad \partial/\partial x_j (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

将式(2)转化为曲线坐标系下的方程为

$$\frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\bar{J}^j \rho u_i \Phi - \frac{\Gamma^{\Phi}}{J} \bar{J}^j \bar{J}^i \frac{\partial \Phi}{\partial \xi^k} \right) = JS^{\Phi} \quad (3)$$

* 收稿日期: 2002-03-29; 修订日期: 2002-06-14。

作者简介: 杨卫华 (1972—), 男, 博士生, 研究领域为航天器先进热防护技术的研究。

式中 ξ^j 为曲线坐标分量, ρ 为流体密度, u_i 为直角坐标系下的速度分量, Φ 为通用变量, S^Φ 为源项, J 为 Jacobia 行列式, 可表示为

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \gamma)} = \begin{vmatrix} x_\xi & y_\xi & z_\xi \\ x_\eta & y_\eta & z_\eta \\ x_\gamma & y_\gamma & z_\gamma \end{vmatrix}, \quad \bar{J}_i^j = J \frac{\partial \xi^j}{\partial x^i}$$

用有限容积法对式(3)进行离散, 得到离散方程

$$a_p(u_j)_p = a_E(u_j)_E + a_W(u_j)_W + a_T(u_j)_T + a_B(u_j)_B + a_N(u_j)_N + a_S(u_j)_S + b^j \quad (4)$$

式中 $a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_B + a_T$

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + (|-F_e, O|)$$

$$F_e = (\rho U^1)_e \Delta \xi^2 \Delta \xi^3$$

$$D_e = \left(\frac{\Gamma^\Phi q^{11}}{J \Delta \xi^1} \right)_e$$

曲线坐标系下的逆变速度分量 $U^i = \bar{J}_i^1 u_i$, $q^{11} = \bar{J}_i^1 \bar{J}_i^1 = J^2 \frac{\partial \xi^1}{\partial x} \frac{\partial \xi^1}{\partial x}$, $Pe_e = F_e / D_e$ 为贝克来数, 表示对流输运强度和扩散强度之比, 式(4)中的其它系数 a_W, a_N ,

a_S, a_T 和 a_B 的推导同 a_E 。

本文用同位网格技术对式(2)进行数值分析, 计算结果与文献[2]的结果进行了比较。采用多面法^[3]生成一次调节通道的计算网格, 用文献[3,4]的方法对计算网格进行局部加密。用 SIP 算法^[3]对线性方程组进行求解, 通道几何尺寸及相关参数见文献[2]。

图1为冷却剂在一次调节通道流动时(未考虑壁面粗糙度), 摩阻系数 C_f 与 Re 间的数值预测和试验结果, 可看出, 在相同 Re 下, 试验得到的 C_f 明显高于 N-S 方程的理论预测结果, 主要是微小通道表面粗糙度的影响。对于深 $b = 0.1 \text{ mm}$, 宽 $a = 0.5 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ 的微小矩形通道, 表面的相对粗糙度 $\bar{k}_{0, \text{micro}} = k_{\text{micro}} / D_h$ 将远大于工业尺度管道的表面相对粗糙度 $\bar{k}_{0, \text{macro}}$, 因此必然增强冷却剂在流动过程中的扰动, 对冷却剂在一次调节通道中的流动状态产生较大的影响。为了较准确地从理论上分析冷却剂在微小的一次调节通道中的流动, 需要对经典的 N-S 方程进行适当修正, 以考虑通道的表面粗糙度对流动造成的影响。

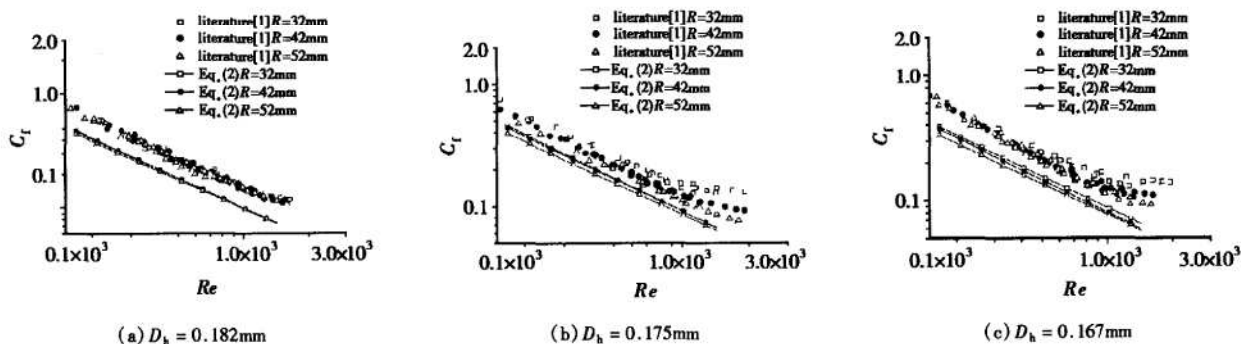


Fig.1 Relationship between C_f and Re without surface roughness considered

3 壁面粗糙度对流动状态的影响

文献[5]提出了粗糙粘度 μ_R 模型, 并应用于具有均匀壁面粗糙度的微小直圆管中的层流流动。通常, 当流体层流流过固体壁面时, 壁面粗糙度会促进近壁层流体的扰动, 因此, 引入 μ_R 来表示壁面粗糙度的这种影响。其特征为: (1) μ_R 应在壁面处最大, 在流动中心最小; (2) μ_R 应随 Re 的增大而增大。对于矩形截面的微小通道, μ_R 的表示为

$$\frac{\mu_R}{\mu} = A Re_k \frac{(R_h - l_{\min})}{k} \left[1 - \exp\left(-\frac{Re_k (R_h - l_{\min})}{Re k}\right) \right]^2 \quad (5)$$

式中, A 为修正系数; R_h 为水力半径; $l_{\min}$ 为通道中任

一点距壁面的最短距离; k 为通道壁面绝对粗糙度; Re_k 是粗糙雷诺数^[6], 表达式为

$$Re_k = U_k \rho k / \mu \quad (6)$$

式中, U_k 为距壁面 k 处的流速, 根据文献[6]的假定, U_k 可由下式求得

$$U_k = (\partial u / \partial n)_w k \quad (7)$$

将式(6), (7)代入式(5)得

$$\mu_R = A \rho k (\partial u / \partial n)_w (R_h - l_{\min}) \cdot \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\rho k (\partial u / \partial n)_w (R_h - l_{\min})}{\mu Re}\right] \right\}^2 \quad (8)$$

类似于紊流流动时对紊流粘度的处理, 定义层流有效粘度 $\mu_{l, \text{eff}}$ 的概念, 并令

$$\mu_{l,eff} = \mu + \mu_R \quad (9)$$

将式(9)代入式(2)得到了考虑壁面粗糙度影响的动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{l,eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (10)$$

对于无滑移边界条件,在通道壁面, $u = 0$ 。

对比式(8)和式(2), μ_R 已知时,可应用数值方法求出冷却剂在一次调节通道中的流动情况。由式(8)还可看出,除修正系数 A 外,其它参数均可由冷却剂的流场、一次调节通道的几何形状以及通道的壁面粗糙度确定。从本质上讲,系数 A 不仅依赖于流场的分布、通道的几何结构,同时还依赖于通道壁面粗糙单元的高度及粗糙单元的分布。然而,根据试验测得的数据,采用数值计算的方法是可以推算出 A 的表达式的。具体方法为:先对 A 赋一初值,根据试验测得的流量,给出相应的入口速度 u_{in} , 然后对式(8)进行数值求解,待收敛后得到沿一次调节通道的压降 Δp , 将计算得到的 Δp 与试验得到的压降 Δp_m 进行

比较,不断调整 A 的值,直到 $\Delta p - \Delta p_m < \epsilon$, ϵ 为给定的精度,用最小二乘法对一系列的 A 值进行拟合,得到 A 的关系式,最后再将得到的粗糙粘度模型代入式(9)、(10)进行计算,最终得出冷却剂在一次调节通道中流阻特性的理论预测值。采用扫描探针显微镜对试件的表面粗糙度进行了测量,得到以下结果:线切割表面,绝对粗糙度 $k = 2.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$, 对上下覆盖板片, $k = 2.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。根据上述方法得到了试验所采用的一次调节通道的粗糙粘度修正系数为

$$A = 0.013 (R_h/k)^{0.35}.$$

$$\exp \left[Re^{0.94} \left(5.0 \times 10^{-5} \frac{R_h}{k} - 0.0031 \right) \right] \quad (11)$$

同样对式(10)进行数值求解,结果见图2。可见,采用粗糙粘度模型得到的计算结果与试验结果吻合较好,说明该模型在一定程度上能反映冷却剂在矩形截面、弯曲的一次调节通道中的流动特性。还可看出,当冷却剂在弯曲的一次调节通道中流动时,其摩擦阻系数 C_f 随通道曲率半径 R 的减小而增大。

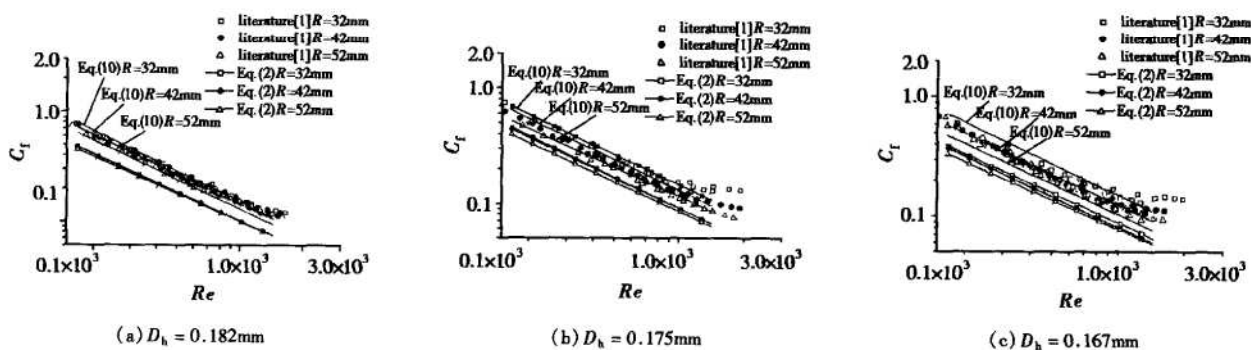


Fig. 2 The relationship between C_f and Re (with surface roughness considered)

4 结论

冷却剂在当量直径 $D_h \approx 0.16 \text{ mm} \sim 0.18 \text{ mm}$ 的一次调节通道中层流流动时,可以不考虑通道的微小尺度效应,但必须考虑其壁面粗糙度对流动的影响。冷却剂有效粘度 $\mu_{l,eff}$ 等于分子粘度 μ 加粗糙粘度 μ_R 的代数模型,取代层流流动时的分子粘度,可以导出适用于一次调节通道层流流动的 N-S 方程,求得符合实际流动情况的冷却剂层流流动的数值结果。

参考文献:

[1] 刘伟强,陈启智,吴宝元. 液体火箭发动机层板式预燃室液氨发汗冷却热控制[J]. 推进技术,1998,19(5).

[2] 杨卫华,程惠尔. 层板发汗冷却推力室板片流动调节性能的试验研究[J]. 推进技术,2002,23(4).
 [3] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京:科学出版社,2000.
 [4] 牛禄,程惠尔. 双边界代数法在喷管内流场网格生成中的应用[J]. 推进技术,2001,22(1).
 [5] Gh Mohiuddin Mala, Li Dongqing. Flow characteristics of water in microtubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999,20(2).
 [6] Merkle C L, Kubota T, Ko D R S. An analytical study of the effects surface roughness on boundary-layer transient[R]. AD/A004786.

(编辑:朱立影)