

新型半发散结构的冷却特性参数研究*

西北工业大学 李 威** 唐 明 李长林 严传俊

【摘要】 根据席壁冷却的传热模型, 采用数值迭代法, 对席壁的冷却特性参数即壁面热效率和壁面温比进行了计算。结果表明, 席壁的冷却特性参数主要受壁面多孔度和冷却剂热容数的影响, 边界换热条件的影响不显著。与已有的实验数据相比较, 计算结果与之基本符合。

主题词: 发散冷却 参数 传热计算

分类号: TK124

近年来, 已有多种新型冷却结构问世, 并相继得到成功的应用^[1]。席壁是文献[2]提出的新型半发散冷却结构。对这一结构, 目前已有一些研究成果: 文献[2~4]从不同角度提出了换热与壁温的计算方法, 文献[5]从实验方面研究了一些重要的冷却参数。通常, 对表达半发散结构的冷却特性而言, 壁面热效率和壁面温比是两个很重要的参数。本文根据文献[4]的方法, 从理论上研究了席壁冷却的壁面热效率和壁面温比特性, 并与已有的实验数据进行了比较。

1 冷却特性参数

席壁冷却如图 1 所示。在席壁冷却情形下, 冷却特性参数即壁面热效率和壁面温比的意义可由图 2 加以说明。在图 2 中, 虚线内为席壁的单元控制体, T_0 、 T_1 分别为席壁孔进出口处的冷却剂温度, U_0 、 U_1 分别为壁面冷热侧的面积平均温度。与文献[1]相一致, 壁面热效率 η 和壁面温比 θ 定义为:

$$\eta = (T_1 - T_0) / (U_1 - T_0) \quad (1)$$

$$\theta = (U_0 - T_0) / (U_1 - T_0) \quad (2)$$

可见, 壁面热效率反映了冷却剂穿过壁体时的温度升高程度, 壁面温比则表达了壁面冷热侧间的温差程度。通常, 壁面热效率越高, 壁体内部的换热过程越充分; 壁面温比越高, 壁面垂

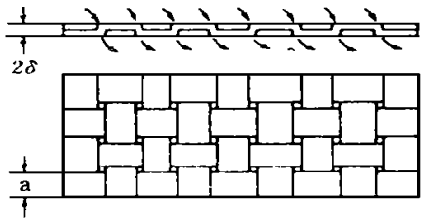


图 1 席壁冷却结构

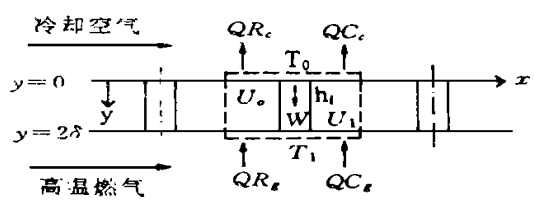


图 2 席壁单元控制体的传热简图

直方向上的壁温梯度越小。在半发散结构的设计中,总是尽可能地追求高的壁面热效率和壁面温比。

2 传热模型和计算过程

席壁冷却的传热过程见图 2。图中 W 是单位壁面积上穿过的冷却剂流量, h_i 为冷却剂与壁面间的内部体积换热系数, QR_g 、 QC_g 分别为壁面热侧的辐射与对流换热量, QR_c 、 QC_c 分别为壁面冷侧的辐射与对流换热量。假定控制体内,壁温为 y 的函数,且不考虑控制体与其上、下游控制体间的 x 向热传导的影响,那么,由控制体的能量守恒得到:

$$\begin{cases} k_e(d^2U/dy^2) - h_i(U - T) = 0 \\ WC_p(dT/dy) + h_i(T - U) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U 、 T 分别为壁体和冷却剂的局部温度, k_e 为壁面的有效导热系数, C_p 为冷却剂的定压比热。同时,边界条件可写成:

$$\begin{cases} k_e(dU/dy)_{y=0} = QR_c + QC_c \\ k_e(dU/dy)_{y=2\delta} = QR_g + QC_g \end{cases} \quad (4)$$

方程组(3)式类似于发散冷却的控制方程组,根据文献[6],可得(3)式的解析解为:

$$\begin{cases} T = \alpha + \beta e^{(B-A/2)y} + \gamma e^{-(B+A/2)y} \\ U = \alpha + (0.5 + B/A)\beta e^{(B-A/2)y} + (0.5 - B/A)\gamma e^{-(B+A/2)y} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 、 β 和 γ 为取决于边界条件的常数, A 、 B 分别为 $A = h_i/(WC_p)$, $B = h_i/k_e + 0.25A^2$ 。

(3)、(4)式构成了席壁冷却的传热模型。如果冷却剂为空气(Pr 数等于 0.7),根据文献[4]的推导,最后得到:

$$\begin{cases} T_0 = \alpha + \beta + \gamma \\ T_1 = \alpha + \beta e^{2\zeta\varphi_1} + \gamma e^{-2\zeta\varphi_1} \\ U_0 = \alpha + 0.5(1 + \varphi)\beta + 0.5(1 - \varphi)\gamma \\ U_1 = \alpha + 0.5(1 + \varphi)\beta e^{2\zeta\varphi_1} + 0.5(1 - \varphi)\gamma e^{-2\zeta\varphi_1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varphi = 1 + F/\zeta$ 其中的 F 为冷却剂的热容数即 $WC_p(2\delta)/k_e$, ζ 为壁面多孔度,计算式为 $[\delta/(a + \delta)]^2$ 。同时边界条件(4)式可简化为:

$$\begin{cases} WC_p(\beta + \gamma) = QR_c + QC_c \\ WC_p[\beta e^{2\zeta\varphi_1} + \gamma e^{-2\zeta\varphi_1}] = QR_g + QC_g \end{cases} \quad (7)$$

这样,根据 η 、 θ 的定义,得到:

$$\eta = \frac{\beta[e^{2\zeta\varphi_1} - 1] + \gamma[e^{-2\zeta\varphi_1} - 1]}{\beta[0.5(1 + \varphi)e^{2\zeta\varphi_1} - 1] + \gamma[0.5(1 - \varphi)e^{-2\zeta\varphi_1} - 1]} \quad (8)$$

$$\theta = \frac{0.5\beta(\varphi - 1) - 0.5\gamma(\varphi + 1)}{\beta[0.5(1 + \varphi)e^{2\zeta\varphi_1} - 1] + \gamma[0.5(1 - \varphi)e^{-2\zeta\varphi_1} - 1]} \quad (9)$$

可见, η 和 θ 除与多孔度 ζ 热容数 F 有关外,还与 α 、 β 、 γ 所代表的边界条件有一定关系;而且, η 和 θ 有下列极限值:当 $F \rightarrow 0$, 则 $\eta \rightarrow 1 - e^{-4\zeta}$, $\theta \rightarrow 1$; 当 $F \rightarrow +\infty$, 则 $\eta \rightarrow 0$, $\theta \rightarrow 0$ 。然而,由于(6)式和(7)式非线性地相互关联,除非采用数值迭代法,(8)、(9)式给不出更多的信息。

在(6)、(7)式组成的联立方程组中,未知量(T_1 、 U_0 、 U_1 、 α 、 β 和 γ)的个数等于方程的个数,故方程组是封闭的。数值迭代过程是:先假定 U_0 和 U_1 的初值,由(7)式求出 β 和 γ ;再将 β 和 γ 代入(6)式,求出 α 、 T_1 和 U_0 、 U_1 的新值;最后,比较 U_0 、 U_1 新旧值间的差别,若不满足收敛条

件, 则将 U_0 、 U_1 的新值作为新的初值, 再重复上述步骤直到收敛。

用于研究的流动系统如图 3 所示。内管的冷却段由席壁板材制成, 板材规格详见表 1。

表 1 席壁板材规格

No.	δ mm	a /mm	ζ
1	1.0	6.0	0.0204
2	1.0	5.0	0.0278
3	1.0	4.0	0.0400
4	1.0	3.5	0.0494
5	1.0	3.0	0.0625

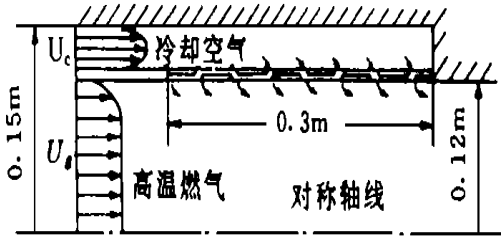


图 3 用于研究的流动系统示意图

从冷却段开始, 沿轴向每隔一排席壁孔划定一站计算截面, 且进口站的流动条件假定为: (1) 内通道和环道流动的速度、温度剖面均为完全发展型的; (2) 燃气静压保持为 10 kg/cm^2 ; 冷却空气静压比燃气高 2%, 静温为 500 K ; (3) 对给定规格的席壁板材, 燃气流量和冷却空气流量均在较大范围内变化, 但前后者间的比值保持为 2 : 1; 对每种流量状态, 燃气进口静温以 200 K 的步长从 1000 K 增至 2000 K ; (4) 燃气进口雷诺数为 $0.3 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$, 冷却空气进口雷诺数为 $0.1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ 。

3 结果与讨论

通过前述的计算过程, 可得到如下函数关系式:

$$\eta = \eta_0 - C_{\eta} F^m \tag{10}$$

$$\theta = 1 - C_{\theta} F^n \tag{11}$$

式中: η_0 为 η 在 $F \rightarrow 0$ 时的极限值, 等于 $1 - e^{-4\zeta}$; C_{η} 、 C_{θ} 、 m 和 n 均为 ξ 的函数, 如表 2 所示。

表 2 C_{η} 、 C_{θ} 、 m 和 n 与 ξ 间的关系

ξ	C_{η}	C_{θ}	m	n
0.0204	0.0056	0.139	0.60	0.55
0.0278	0.0077	0.142	0.63	0.55
0.0400	0.0116	0.156	0.67	0.55
0.494	0.0149	0.168	0.70	0.55
0.0625	0.0204	0.190	0.73	0.55

由前述分析, 席壁冷却的 η 和 θ 的影响因素有 ξ 、 F 和边界换热条件。计算表明, 边界换热条件的影响是微弱的, η 和 θ 均可视为 ξ 和 F 的函数, (10)、(11) 式就是根据计算结果的最小二乘拟合获得的。从图 4、图 5 可以看到:

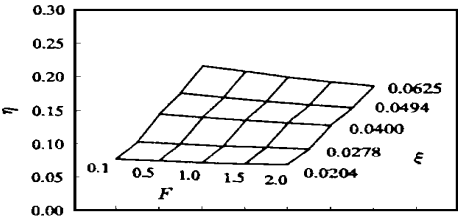


图 4 η 与 ξ 、 F 的关系

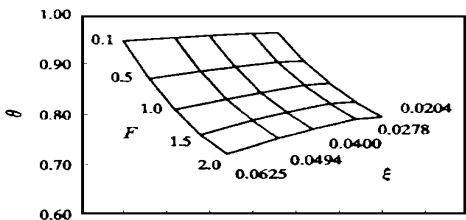


图 5 θ 与 ξ 、 F 的关系

对 η 来说, ξ 的影响远比 F 的影响显著, 对 θ 来说, 则正好相反。因此, 从综合提高 η 和 θ 的角度看, 应当采用多孔度较大且导热性好的席壁材料。

图 6、图 7 为计算结果与已有实验数据的比较。可见, 在 η 、 θ 随 F 的变化趋势及多孔度的

影响方面, 计算结果是与实验数据相一致的, 但在量值上, 两者之间还有一定差距。对 η 来说, 计算值要比实验值低 22%~35%。这种差别固然与本文传热模型的近似性有关, 但与实验数据的准确度也有一定关系: 实验中, 由于席壁孔很小, 测量冷却剂出口温度 T_1 的热电偶探头不

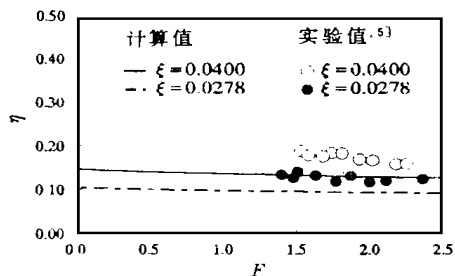


图 6 η 的计算值与实验值比较

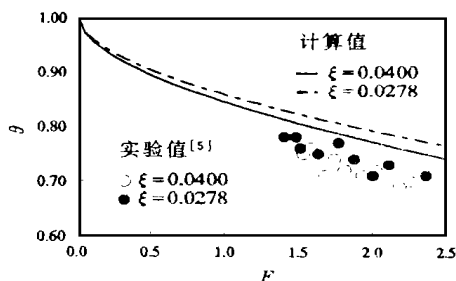


图 7 θ 的计算值与实验值比较

得不稍微离开精确的出口位置, 这就使得 T_1 的测量值高于实际值, 由此得到的 η 偏高。对 θ 来说, 计算值高于实验值 8%~14%, 由于壁温测量的准确度相对较高, 这一误差主要来源于传热模型的近似性。从这个角度讲, 本文的传热模型还须进一步地完善。

4 结 论

(1) 本文的传热模型是基本恰当的, 但有待进一步的完善。

(2) 席壁的冷却特性参数可归纳为壁面多孔度和冷却剂热容数的函数, 边界换热条件的影响可忽略。

参 考 文 献

- 1 Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion. Hemisphere Pub. Corp., 1983: 257~320
- 2 朱长青, 李长林. 席壁结构燃气轮机燃烧室壁温计算. 中国航空学会第六届燃烧与传热学术会议, 南京, 1988
- 3 李威, 李长林. 采用全气膜席壁冷却的燃烧室换热分析与壁温预测. 中国航空学会第三届动力年会, CSAA93- P- 152 (C), 重庆, 1993
- 4 李威等. 燃烧室席壁冷却的性能预测与实验研究. 西北工业大学学报, 1994, 12(4)
- 5 李威. 燃烧室新型冷却技术与室壁结构: [学位论文]. 西北工业大学, 1992
- 6 Bayley F J, Cornforth J W, Turner A B. Experiments on a Transpiration Cooled Combustion Chamber. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1973, 187(17/73)

(责任编辑 杨再荣)

NUMERICAL STUDY ON BIFURCATION PHENOMENON IN A COMBUSTOR WITH A NON-SLOT CONICAL SWIRLER

Chen Liru and Jiao Shujian

(Dept. of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT

The numerical simulations of bifurcation phenomena in a combustor with a non-slot conical swirler and in a diffuser fixed before the non-slot conical swirler have been carried out. The results of the simulations show that there are two different kinds of vortex emerged before the conical swirler, that may be one of the feed-back factors controlling bifurcation phenomenon, and the characteristics of the turbulent flow in the combustion zone must be changed abruptly as the bifurcation phenomenon occurs. These conclusions may reveal the causation of bifurcation phenomenon in this combustor from the viewpoint of aerodynamics. The calculated results are consistent with the experimental data.

Key words Numerical computation Flow field Bifurcation

STUDY ON COOLING PARAMETERS OF A NEW SEMI-TRANSPARATION COOLING SCHEME

Li Wei, Li Changlin, Tang Ming, Yan Chuanjun

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xian 710072)

ABSTRACT

The mat-wall cooling is a new semi-transpiration cooling scheme. A heat transfer model of the mat-wall cooling is established and a numerical iteration method is employed to calculate its cooling parameters (i. e. thermal effectiveness and wall-temperature ratio) in the porosity range from 0.0204 to 0.0625. It is shown that the cooling parameters are affected mainly by the porosity and coolant flow number, and the boundary conditions have insignificant effect. The calculated results are consistent with the existed experimental data. This fact indicates that the presented heat transfer model is principally adequate, but must be further improved for more accurate prediction.

Key words Heat transfer computation Parameters Transpiration cooling

MODEL-BASED FAULT DIAGNOSIS ALGORITHM FOR LIQUID PROPULSION SYSTEM

Cui Dingjun and Zhang Zhenpeng

(Institute of Astroautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A quasi-dynamical mathematical method of fault simulation and a diagnosis algorithm based on Grey Relational Analysis are given for a liquid rocket engine (LRE) system with series double-turbine pump-feed structure. By use of this algorithm, numerical simulations of various typical fault modes have been carried out for a certain system determined by adjustment calculation, the fault mode database for this system was obtained in advance, a group of parameters collected from the engine tests were diagnosed in real-time by use of the above database and model to determine the health conditions of the engine. In consequence it is possible to take measures in good time to enhance the safety and reliability of the engine.

Key words Fault diagnosis Mathematical model Liquid propellant rocket engine