

文章编号: 1000-8055(2003)02-0230-05

多孔隔热壁温度场气动传热耦合计算方法

朱惠人, 白洛林, 张 丽, 刘松龄

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 研究了燃烧室多孔隔热壁温度场气动传热耦合计算新方法。特点是综合应用工程热力学、空气动力学、传热学(包括导热、对流换热及辐射换热)的基础理论, 结合数值传热学的理论和方法, 考虑了压力(压差)、流速(流量)、温度(温差)及热量等诸多参数的相互耦合影响的关系, 包括气膜孔内壁与冷气对流换热的影响。所发展程序在给出燃烧室进出口必要的气动参数后, 即可直接计算出带环状缝隙及多个气膜冷却孔的燃烧室隔热壁温度场。

关键词: 航空、航天推进系统; 燃烧室; 隔热壁; 气膜冷却; 传热; 空气动力学

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Coupled Method of Flow-Heat Transfer to Calculate Temperature Field of Multi-Hole Wall

ZHU Hui-ren, BA ILuo-lin, ZHANG Li, LIU Song-ling

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A code was developed by using the basic principles of aerodynamics, heat transfer, thermodynamics and numerical heat transfer taking into account the compound relationship among pressure difference, mass flow, temperature difference and heat flux, including the influence of heat convection between cooling air and inner surface of film cooling holes. Using this code we can calculate the two dimensional temperature field of burner inner liner with annular slots and multi-film cooling hole by giving the air/gas parameters at the inlet and outlet of the combustion chamber.

Key words: aerospace propulsion; combustion chamber; burner inner liner; film cooling; heat transfer; aerodynamics

1 引 言

燃烧室隔热壁温度的计算预测是燃烧室冷却系统设计的一项重要内容, 在这方面已进行了不少的数值计算研究工作^[1, 2]。但由于问题的复杂性, 多数研究均以燃烧室隔热壁的温度计算为重点, 即以导热计算为主, 辅以对流及辐射换热为其

提供边界条件。本文的主要目的是发展一种计算方法, 能较为细致地考虑有缝隙出流及气膜孔出流条件下冷气及燃气流动及导热、对流换热、辐射换热之间的相互耦合影响。本计算方法也可推广应用于考虑内流通道冷气流动及涡轮叶栅中燃气流动条件下, 带气膜冷却的涡轮叶片壁温的计算。

收稿日期: 2002-04-30; 修订日期: 2002-09-30

作者简介: 朱惠人(1958-), 男, 陕西西安人, 西北工业大学航空动力与热力工程系教授, 博士, 主要从事气膜冷却、内流强化换热等高温部件传热及冷却技术研究

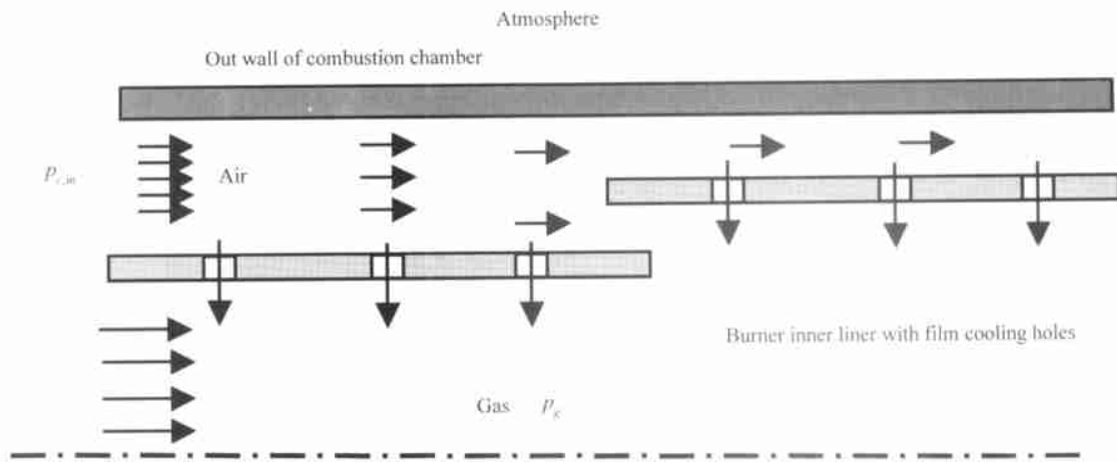


图 1 燃烧室冷却系统

Fig 1 Cooling system of combustion chamber

2 问题概述

图 1 为某发动机燃烧室示意简图。为了防止高温燃气对燃烧室外壁的热腐蚀,在靠紧外壁处装有带孔的隔热壁,形成一个冷气通道,冷气在该通道中流动时,其中一部分从环状缝隙及气膜孔流出,对隔热壁形成了保护作用。很明显,在这个系统中,既有冷气与燃气的流动,又有热量以传导、对流及辐射形式的传递。从传热角度讲,主要有以下环节:高温燃气以热辐射及对流换热的形式向带气膜孔的隔热壁传热,隔热壁则以对流换热的形式向冷气通道内的冷气传热,同时还以热辐射的形式向燃烧室外壁传热,冷气通道内的冷气与燃烧室外壁之间以对流换热的形式传热,燃烧室外壁与大气及环境之间也有对流换热及辐射换热。在燃烧室外壁及隔热壁内热量是以纯导热形式传递的。从气动角度讲,冷气沿冷气通道流动时,其状态要受到许多因素的影响,如冷气从隔热壁上气膜孔的流出,隔热壁对冷气的加热及冷气向外壁的散热等。

上述各个气动及传热环节是互相关联、互相影响的,例如,从隔热壁上气膜孔的冷气流流量取决于孔两端冷气与燃气之间的压差,而冷气的压力又与从气膜孔流出的冷气量有关。因此,为了能够较准确地预测燃烧室内带气膜冷却的隔热壁壁温的分布情况,必须对各个气动及传热环节进行耦合求解。由于问题的复杂性,本文在计算时做了适当的简化:(1)冷气通道内的流动为一维流动,由于冷气通道较窄,约为 2~4 mm,因此该简化不会引起较大误差;(2)由于实际隔热壁厚度

只有 1 mm,因此完全可以忽略温度沿隔热壁厚度方向的变化,但因隔热壁上开有气膜孔,孔内壁与冷气有很强的对流换热,所以隔热壁内的导热沿周向是不对称的,应按二维进行处理。

3 计算方法

计算涉及到冷气流动与燃气参数的匹配,还涉及到导热、对流换热和热辐射的耦合,以及流动与传热的相互影响。

3.1 冷气通道的一维流计算

计算的目的是预测冷气通道内流动参数的变化规律,并由此计算出通过隔热壁上各排气膜孔冷气的流量,计算中应考虑到通过气膜孔的出流,壁面对气流的加热,壁面的摩阻以及通道截面积变化的影响。根据计算结果可以得到隔热壁冷气侧的换热系数、隔热壁燃气侧带气膜冷却的换热系数及冷却效率等,做为计算隔热壁温度的边界条件。

一维流计算所依据的基本方程:

$$\dot{m} = A V \rho \quad (1)$$

图 2 为一维冷气流通道中长度为 dx 的控制体,对该控制体可建立如下动量方程:

$$\begin{aligned} (\dot{m} + d\dot{m})(V + dV) - \dot{m}V - V_{out,x} d\dot{m} = \\ pA + (p + dp/2)dA - \\ (p + dp)(A + dA) - \tau U dx \end{aligned} \quad (2)$$

以图 3 所示的控制体为对象,可建立一维流冷气通道的能量方程:

$$\begin{aligned} (\dot{m} + d\dot{m})[h + dh + (V + dV)^2/2] = \\ (h + V^2)\dot{m} + (h_{out} + V_{out}^2/2)d\dot{m} + \\ dQ_{in} - dQ_{out} \end{aligned} \quad (3)$$

其中静焓 $h = C_p T$, dQ_{in} 及 dQ_{out} 分别为隔热壁对通道内冷气的加热量及冷气向燃烧室外壁的散热量。

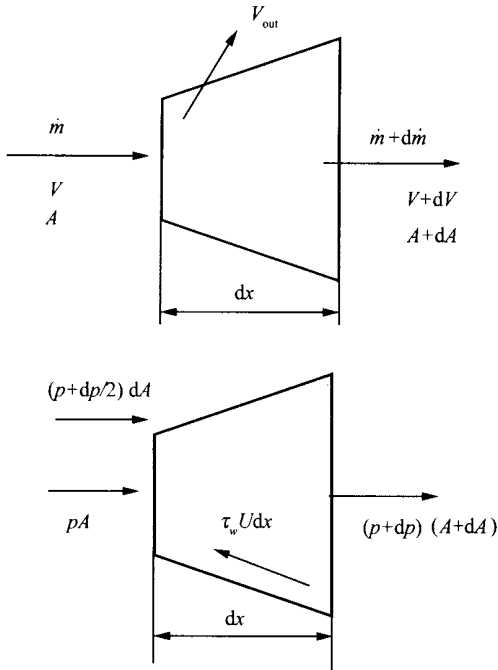


图 2 动量方程控制体

Fig. 2 Control volume of momentum equation

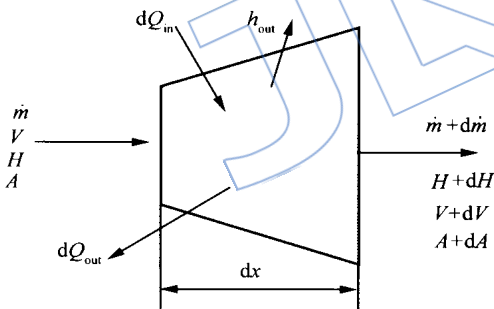


图 3 能量方程控制体

Fig. 3 Control volume of energy equation

冷气通道内的压力一般较高, 温度约 450 K 以上, 可按理想气体处理, 其状态方程为:

$$p = \rho R T \quad (4)$$

联立求解上述式(1)~(4), 可得冷气通道中沿流动方向各种冷气参数的分布, 为计算对流换热系数、通过气膜孔冷气的出流量等打下基础, 前者可用于重新确定式(3)中的 dQ_{in} 及 dQ_{out} , 后者可用于重新确定每排孔下游计算站冷气的参数。

3.2 隔热壁二维导热的计算

隔热壁二维导热的计算以热网络算法为基础, 同时引入热源的概念来考虑燃气侧通过辐射

和对流传入隔热壁的热量 dQ_g 及隔热壁以对流方式传向冷气及以辐射方式传给外壁的热量之和 dQ_{∞} 。

如图 4 所示, P 点所代表的网格与其周围的网格(分别以 E, N, W, S 代表)有导热热交换, 同时 P 网格两侧又分别与燃气及冷气及燃烧室外壁有热量 dQ_g 及 dQ_a 的交换, 其热平衡方程可以写为:

$$\frac{T_p - T_c}{R_c} + \frac{T_p - T_a}{R_n} + \frac{T_p - T_w}{R_w} + \frac{T_p - T_s}{R_s} = Q_g - Q_a \quad (5)$$

其中: R 代表相应的导热热阻。

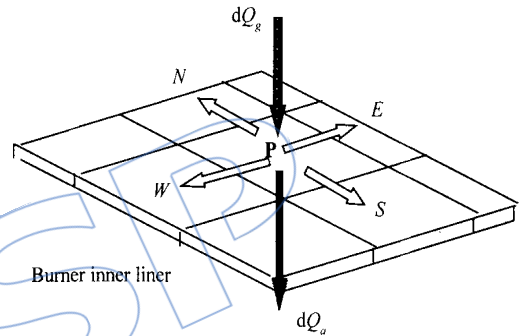


图 4 导热方程控制体

Fig. 4 Control volume of conduction equation

所求出的壁温可用于重新计算式(3)中的 dQ_{in} 及 dQ_{out} , 和式(5)中的 dQ_g 及 dQ_{∞} 。在上述计算中, 同时考虑了气膜孔内壁与冷气的对流换热, 其处理方法本文从略。

燃烧室外壁一般面对大气, 是向环境散热或从环境吸热, 与飞行状态及环境条件有关。由于外壁无气膜孔, 其热传导计算较为简单, 方法与上述类似。

3.3 对流换热的计算

对流换热计算, 大致可分为三种: (1) 燃烧室外壁的两侧光滑表面上的对流换热, 其中一侧对大气, 由于导弹飞行速很高, 必须考虑高速流效应对换热的影响, 另一侧对冷气, 可依据光滑表面上的对流换热的经验关系式计算; (2) 隔热壁燃气一侧有气膜冷却时的对流换热, 与冷气出流的吹风比有较大的关系, 可以参考本课题组过去所做的实验结果及国内外类似的实验结果进行近似计算; (3) 隔热壁冷气一侧有冷气被吸入时的对流换热。由于有冷气通过气膜孔被吸走, 使得该侧流动边界层变薄, 导致换热大幅度增强, 增强的幅度应

与冷气被吸入的量有关, 可以参考文献[3]的实验结果进行计算。

3 4 辐射换热的计算

辐射换热主要有两类: (1) 主要是隔热壁与燃烧室外壁之间的换热, 可简化为两个同心圆套筒之间的辐射换热, 具体计算时需细划为微元环进行处理, 其中关键问题是角系数的计算, 本文参照文献[4]进行处理; (2) 燃气与隔热壁间的辐射换热, 本文采用较为工程实用的简化方法进行计算, 可参考文献[5]。

3 5 燃烧室燃气参数的计算

燃烧室内燃气的流动及参数的变化规律非常复杂, 实验测量由于温度高而变得非常困难, 本文这部分计算只能采用简化处理的方法进行。将燃烧室内燃气的流动近似看作一维流动, 则其中燃气参数的变化应满足下述方程。

$$\frac{dM}{M} = \frac{(1 + kM^2)\varphi}{2(1 - M^2)} \left[\frac{dT^*}{T^*} + 2 \frac{dm}{m} \right] \quad (6)$$

其中: $\varphi = 1 + \frac{k-1}{2} M^2$

$$\frac{dP^*}{P^*} = - \frac{kM^2}{2} \left[\frac{dT^*}{T^*} + 2 \frac{dm}{m} \right] \quad (7)$$

$$\frac{dT^*}{T^*} = \frac{1}{(m + dm)Cp} \left[mCp' + \frac{dmH\eta}{T^*} \right] - 1 \quad (8)$$

其中: dm 为燃料添加量, H 为燃料热值, η 为燃烧效率。

据上述方程, 在已知燃气进口总温、总压及马

赫数时, 就可依次求出燃烧室内其他截面燃气的参数。

4 计算示例

编程计算时, 必须考虑到以上各部分的计算结果是互相影响的。

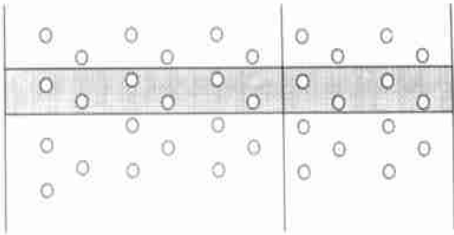


图 5 二维温度场计算域

Fig 5 Calculation area of two dimensional temperature field

本文对某发动机燃烧室冷却结构的冷却效果进行了计算, 其中隔热壁由三段直径依次增加的带气膜孔的套筒组成, 因此冷却通道的面积是逐段收缩的。气膜孔以交错形式排列, 考虑到排列的周期性, 计算只对沿周向覆盖两个相邻孔位的区域进行, 见图 5。图 6 给出了计算所得到的带有缝隙及气膜孔的隔热壁的二维温度分布云图(第二和第三段), 图 7 给出了全部三段套筒的壁温沿周向平均后沿流向的分布曲线。从这两个图可明显地看到沿流动方向壁温的变化趋势, 特别是环状缝隙下游及气膜孔周围隔热壁温度的分布情况。

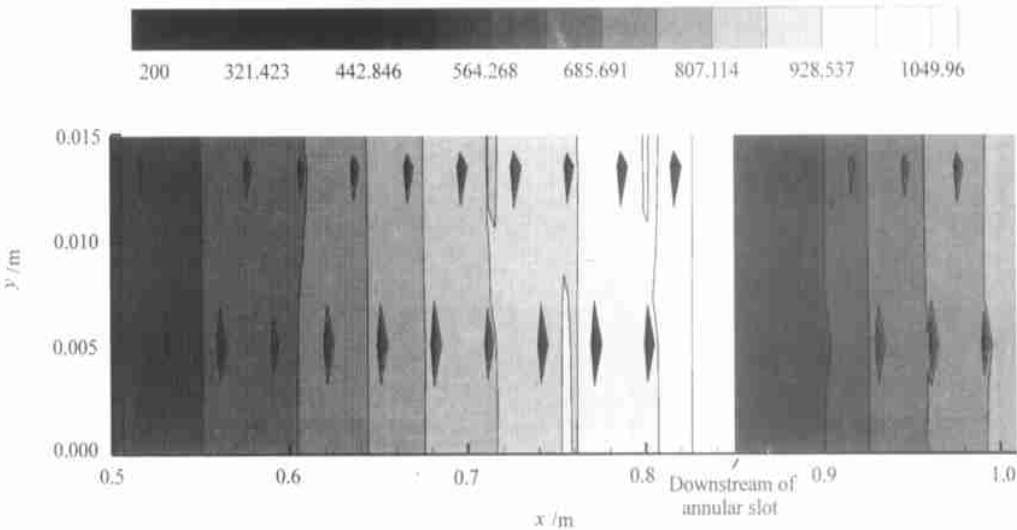


图 6 隔热壁二维温度场

Fig 6 Two dimensional temperature field of burner inner liner

由于从段与段之间的环状缝隙有很多的冷气流出,使其下游套筒的壁温有一个跳跃式的大幅下

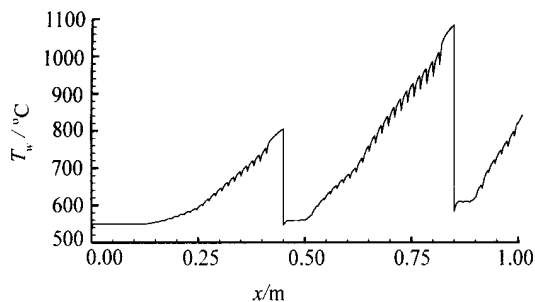


图 7 隔热壁平均温度分布

Fig 7 Distribution of average wall temperature of burner inner liner

降。在每一个气膜孔周围的壁温也较低,主要是因为有部分热量通过气膜孔内壁被冷气带走。从平均壁温看,在每排气膜孔的下游,壁温也有一定幅度的下降,但与缝隙相比,其冷却效果要弱得多。

5 结 论

本文综合应用工程热力学、空气动力学、传热学(包括导热、对流换热及辐射换热)的基础理论

及前人的研究结果,结合数值传热学的有关理论和计算方法,考虑到各个气动环节及传热环节的相互耦合影响的关系,研究开发了燃烧室隔热壁壁温的计算软件,其特点是在给出燃烧室进出口必要的气动参数,即可直接计算出带环状缝隙及多个气膜冷却孔的燃烧室隔热壁壁温分布情况。用该程序可以对燃烧室的各种冷却方案(分段情况,孔排布局等)进行比较优化计算,结合工作状态,用气量及冷却效果选择最佳可行的冷却方案。

参考文献

- [1] 韩振兴,朱谷群,冀守礼,等.气膜冷却燃烧室火焰筒二维壁温分布计算[J].航空动力学报,1995,10(1):83-86
- [2] 董志锐,周四平,王舟山.复杂边界条件下的多层多孔壁温度场的计算模型[J].航空学报,1999,20(5):405-408
- [3] 吴宏,邓宏武,陶智.气膜出流对叶片内表面换热系数影响的实验研究和计算[J].航空动力学报,1999,14(3):247-250
- [4] Samuel N. Rea, Rapid Method for Determining Concentric Cylinder Radiation View Factors[J]. AIAA Journal, 1975, 13(8): 1122-1123
- [5] 王宝官.传热学[M].北京:航空工业出版社,1993.169-171