CSTAM 2012-0283

再生主动冷却结构耦合传热分析方法研究

陆阳，王新竹，李龙，王晶，范学军

中科院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室

第五届高超声速科技学术会议

2012 年 11 月 广西·桂林

Copyright © 2007 版权所有 中国力学学会

地址: 北京市北四环西路 15 号 邮政编码:100190 Address: No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190

再生主动冷却结构耦合传热分析方法研究

陆阳[1,2]，王新竹[1,2]，李龙[1,2]，王晶[1,2]，范学军[1,2]

（1 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室，北京海淀区 100190）

（2 中国科学院高超声速科技研究中心，北京海淀区 100190）

摘要 发展了一套准三维的吸热碳氢燃料冷却燃烧室的稳态传热分析方法，考虑了以下几个方面的因素：摩擦对燃料在变截面通道内流动的影响、吸热碳氢燃料物性随压力温度的非线性变化，结构材料可变导热系数效应，编制了将冷却通道内燃料吸热和流动的计算与冷却结构热传导计算相耦合的热分析计算程序。针对典型工况的数值模拟的计算值与试验值吻合较好，本套分析方法具有较好地可靠性。

关键词 碳氢燃料，主动冷却，传热分析，数值模拟

引 言

为了使超声速旅行普及成为可能，世界各航空航天大国正在积极发展以吸气式发动机为动力装置的超声速飞行技术。吸气式推进技术，突出优点是无需携带氧化剂，利用大气中的氧气作为氧化剂，因而大大提高了比冲和载荷比，其运行成本比火箭低两个数量级。为应对超声速飞行带来的热负荷过大问题，使材料能够承受长时间飞行的考验，一种以燃料作为冷却剂的热防护技术的研究正在不断推进中[1]。

设计发动机再生冷却结构，除了必要的试验外，还需要建立起有效的预测分析方法，通过数值模拟以缩短设计时间，降低成本。国外业已发展了一些能够辅助超燃发动机再生冷却设计的计算工具。美国 NASA 为 NASP 项目发展的“飞行器一体化热管理分析程序”VITMAC[2]可以用来初步估算超燃冲压发动机气-固-液耦合传热过程。法国 MBDA 公司发展了一套一维耦合换热计算方法，并开发了计算程序 NANCY[3]，可以用来辅助冷却系统的设计。美国 SPIRITECK 公司开发了用于超燃冲压发动机热交换的分析工具 SRHEAT[4]，可以用来评估冷却结构在超燃热环境下的强度及优化冷却结构的设计。国内中科院力学所的仲峰泉等[5]发展了一套考虑高温气体和煤油物性的分析方法用于分析超燃发动机的主动冷却过程。但是，这些现有分析方法大多未能考虑碳氢燃料在冷却通道内流动时的摩擦效应；或是往往仅分析一根单独的冷却通道，又或把结构传热进行一维的近似处理。显然，这些分析方法都存在需要进一步改进的空间。

针对以上不足，本文发展了一套准三维的吸热碳氢燃料冷却燃烧室的耦合传热分析工具。它主要由两个模块耦合而成：其一是能描述燃料在多种几何构型（包括、矩形和扇形）的可变截面冷却通道内流动与吸热过程的模块，特点是加入了对摩擦力因素影响的考虑；其二是对多根冷却通道存在的冷却结构进行温度分布的数值求解模块，特点是用热阻法进行可变物性的二维导热求解。为验证这套方法的可靠性，将计算结果与试验结果进行了对比，效果较好。

1 数学物理模型

我们认为对应于巡航状态时整个系统应该达到热平衡，因此在建立数学物理模型时考虑稳态情况。燃料流动与换热模块以冷却通道壁面温度分布作为计算输入的边界条件，结构热传导模块则需要冷却通道内燃料的温度分布作为求解的输入条件之一，因此最终热平衡稳态解的获得需要两个模块耦合起来进行迭代求解。下面分别介绍冷却通道内燃料流动和吸热过程计算模块和冷却结构热传导模块。

1.1 燃料流动与换热计算

实际应用中布置于燃烧室内外壁面之间的冷却通道截面形状可以多变，但一般均为细长管道，吸热碳氢燃料在其中的吸热与流动过程可以较好地近似为一维变截面流动问题。图 1 是用于分析的微元体示意图。

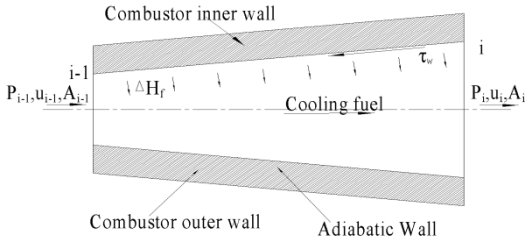

图 1 冷却通道内燃料流动传热一维分析示意图

连续方程：

$$\dot{m}_f = \rho_i u_i A_i = \rho_{i-1} u_{i-1} A_{i-1} \qquad (1)$$

动量方程：

$$\dot{m}_f u_{i-1} + P_{i-1} A_{i-1} - \int_{i-1}^{i} P dA = \dot{m}_f u_{i-1} + P_i A_i + \int_{i-1}^{i} \tau_w dA_{ch} \qquad (2)$$

能量方程：

$$\dot{m}_f \left(h_{i-1} + \frac{u_{i-1}^{\ 2}}{2} \right) + \Delta H_{f,i-1} = \dot{m}_f \left(h_i + \frac{u_i^2}{2} \right) \qquad (3)$$

其中 $\dot{m}_f$ 代表质量流量。与以往分析方法不同的是，我们引入了摩擦力影响，将其近似为：

$$\int_{i-1}^{i} \tau_w dA_{ch} \approx \frac{\tau_{w,i-1} S_{f,i-1} + \tau_{w,i} S_{f,i}}{2} \Delta x \qquad (4)$$

其中 $S_{f,i}$ 是冷却通道截面周长。将燃料看作牛顿流体，则摩擦力表达式为：

$$\tau_w = \frac{C_f}{2} \rho u^2 \qquad (5)$$

再根据修正的雷诺相似准则，用传热关系来推导摩擦力关系：

$$\frac{C_f}{2} = St \, \mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}}, St = \frac{Nu}{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}} \qquad (6)$$

Nu 数可以选用一些普适的或试验总结的经验关系式，比如 Gnielinski[6]公式：

$$Nu = 0.012(\mathrm{Re}_f^{0.87} - 280)\,\mathrm{Pr}^{0.4} \left(\mathrm{Pr}_f / \mathrm{Pr}_w \right)^{0.11} \qquad (7)$$

能量方程中吸热量的表达式为：

$$q_{w,f} = htc_f (T_{w2} - T_f), \Delta H_f = q_{w,f} S_f \Delta x \qquad (8)$$

其中：

$$htc_f = \frac{Nu \lambda_f}{D_{eh}} \qquad (9)$$

此外，吸热碳氢燃料有其特殊性，其物性会随着压力和温度等物理量的变化而发生较大变化。我们采用广义状态对应法则，选取优化过的燃料替代组分模型，调用 Supertrapp[7]子程序计算获得多个方程组求解所需的物性参数：

$$h_f = h_f(P,T), ..., \rho_f = \rho_f(P,T) \qquad (10)$$

将上述方程(1)至(10)立联立迭代求解即可得到燃料流动吸热的所有热物理和流动参数值。

1.2 冷却结构传热计算

由于冷却结构的长细比相当大，而温度在流动方向和截面内具有同样数量级的温度跨度范围。因而在分析冷却结构时，若沿流动方向划分足够多个数的冷却结构横截面，则基本可以忽略相邻截面间的热传导，从而将整个问题简化为多个“相互独立”的二维截面热传导问题的组合，而流动方向上的效应可通过对冷却通道内燃料吸热流动进行一维分析时燃料温度的变化间接地加以体现。这样处理的另外一个好处是，结构传热很方便进行多线程的并行计算，有效减少计算时间。与以往分析方法中对结构传热计算的处理不同，我们针对矩形燃烧室的冷却面板，将所有冷却槽道同时存在的结构进行二维热传导求解。同时，考虑到实际工程应用中冷却盖板和基底的材料很可能不一样，我们将结构的热传导系数看作是温度和位置的多变量函数。图 2 为热结构分析示意图：

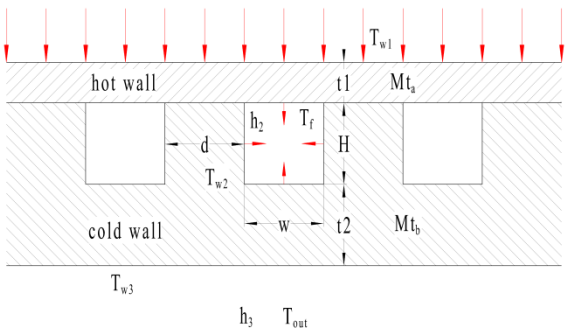

图 2 冷却结构二维分析示意图

稳态二维热传导的原始控制方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa(T,\vec{x})\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\kappa(T,\vec{x})\frac{\partial T}{\partial y}\right)=0 \quad (11)$$

采用有限容积法的守恒方程，引入热阻概念改造后以温度作为因变量的运算方程为[8]：

$$\frac{T_{i+1,j}-T_{i,j}}{R_1}+\frac{T_{i,j+1}-T_{i,j}}{R_2}+\frac{T_{i-1,j}-T_{i,j}}{R_3}+\frac{T_{i,j-1}-T_{i,j}}{R_4}=0 \quad (12)$$

热阻 R_i（i=1,2,3,4）根据节点位置的不同具体的表达式也不同。以冷却通道壁面为例，认为冷却油温度 T_f 和对流换热系数 h_2 已由燃料在冷却通道内吸热流动计算模块得到，从而可写出冷却通道下壁面边界温度表达式：

$$T_{i,j}=\frac{\frac{T_{i+1,j}}{R_1}+\frac{T_{i,j-1}}{R_2}+\frac{T_{i-1,j}}{R_3}+\frac{T_f}{R_4}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}} \quad (13)$$

其中：

$$\begin{cases} R_1=\dfrac{\Delta X_{i+1,j}}{\frac{1}{2}\Delta Y_{i+1,j}}\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{K_{i,j}}+\dfrac{1}{K_{i+1,j}}\right), \\ R_2=\dfrac{\Delta Y_{i,j-1}}{\Delta X_{i,j-1}}\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{K_{i,j}}+\dfrac{1}{K_{i,j-1}}\right), \\ R_3=\dfrac{\Delta X_{i-1,j}}{\frac{1}{2}\Delta Y_{i-1,j}}\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{K_{i,j}}+\dfrac{1}{K_{i-1,j}}\right), \\ R_4=\dfrac{1}{h_2\Delta X_{w2}} \end{cases} \quad (14)$$

其它位置节点温度表达式依法可得，这里不再细说。需要特别指出的是，燃烧室几个外壁面的边界条件可以根据需要有多种选择方式。我们在这里将左右以及下壁面都作了绝热处理，对上壁面（对应于燃烧室热壁面）则编制了对应于三种不同边界条件的模块，可灵活选用：

$$T\big|_{w1}=T_{w1}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{w1}=q_{w1}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{w1}=htc_1\left(T_{aw1}-T_{w1}\right)$$

当所有类型的节点温度表达式都已得到后，利用超松弛加速收敛，有：

$$T_{i,j}^{n+1}=T_{i,j}^{n}+\Omega\left(T_{i,j}-T_{i,j}^{n}\right) \quad (15)$$

其中 Ω 为松弛因子，文中取 1.6。

2 计算结果与分析

为了验证此套分析方法的可靠性，以中科院力学所直联台一次长时间燃料冷却超声速燃烧试验的典型工况为条件进行了数值模拟。工况具体参数如下：Qt=1.47 kg/s, Pt=1.38 MPa, Tt=1500 K ，冷却面板的冷却油流量是 52.2g/s。

计算时，燃烧室外壁面和侧面边界用绝热边界条件近似。热壁面则以热流分布作为输入条件。热流分布数据来自同一试验平台上相同工况下相同结构水冷燃烧室的试验测量值。具体说来，先由本课题组李龙等[9]的高精度热流测量获得水冷燃烧室热流分布。同时，平均热流密度可由冷却水进出口水温差计算得到。油冷燃烧室由于结构和工况条件与其一致，因此可以认为其燃烧热流密度分布形状与水冷的分布一致，绝对值大小则相差一个比例因子。这个比例因子等于油冷燃烧室进出口油温焓值变化计算得到的平均油冷热流密度与之前得到的水冷条件下的平均热流密度的比值。再将水冷燃烧室热流分布乘以这个比例因子并进行插值，就得到了计算需要的油冷燃烧室内热壁的热流分布。

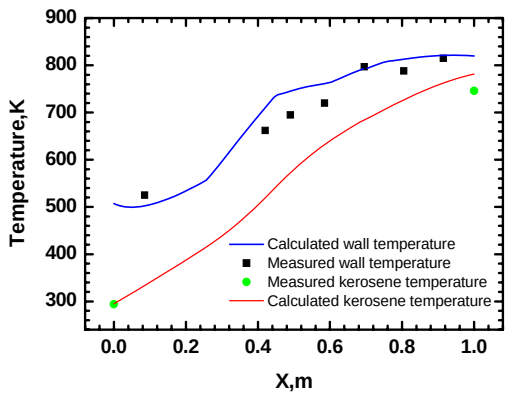

图 3 冷却油温和外壁面温度分布实验值与计算值对比

图 3 为冷却油温和燃烧室外壁面温度分布的实验值与计算值的对比。冷却油出口温度计算值为 774K（按流量加权平均所有冷却通道的出口油温），试验测得的相应出口油温为 473 摄氏度（取试验开始较长时间后的稳定数据），即 746K；计算值略高。外壁温分布方面，沿着流动方向某一位置处的值取此流向位置横截面结构二维温度分

布上表面一条线上所有计算值的平均值。从图 3 中的计算与试验测量外壁面温度分布对比来看，无论是形态走势，还是绝对数值都吻合地相当好。可以认为，此套分析方法得到的模拟值较好地预测了试验值（无论是碳氢燃料冷却剂的温度分布还是燃烧室的外壁面温度分布），整套耦合热分析方法是比较可信的。

图 4-6 分别是计算得到的沿燃烧室流动方向不同位置截面处的冷却结构温度分布云图。

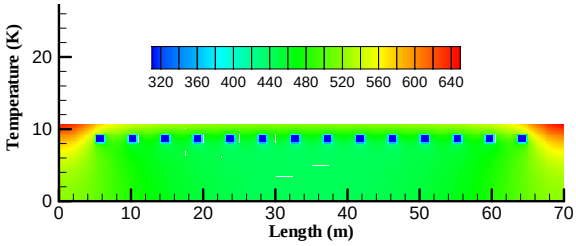

图 4 冷却结构入口截面温度分布图

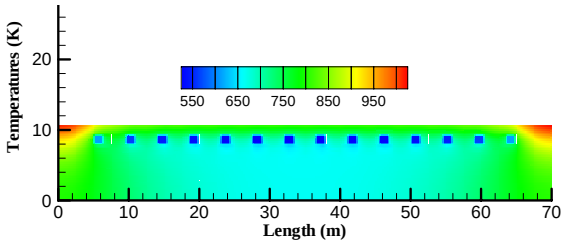

图 5 冷却结构距入口一定距离中间截面温度分布图

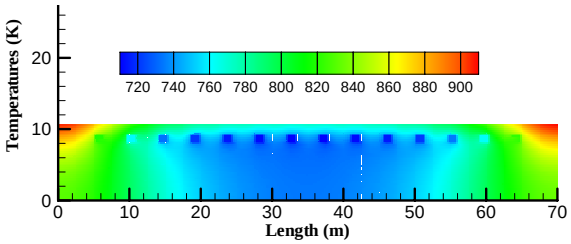

图 6 冷却结构出口截面温度分布图

从图中可以发现，冷却结构往往在上壁面（对应于燃烧室内热壁面）的端角点温度最高，而在外壁面的中部温度较低。因此，热防护在内热壁面角点附近应该引起特别重视，防止局部过高温度引起对结构材料的热破坏现象发生。

3 小结与展望

本文发展了一套准三维的吸热碳氢燃料冷却燃烧室的稳态传热分析方法，加入了摩擦对燃料在通道内流动的影响，考虑了吸热碳氢燃料特殊物性变化，体现了冷却结构材料可变导热系数效应和不同材质物性，将冷却通道内燃料吸热和流动的计算与冷却结构热传导计算进行耦合，编制了较通用的热分析计算程序，并针对典型工况的试验进行了数值模拟。通过对比发现，计算值与试验值吻合较好，说明本套分析方法合理，预测结果可靠性较高。另外，发现了燃烧室内热壁面角点附近是温度最高区域的规律，提出了需要对此区域进行重点热防护的建议。

今后，需要在此套分析方法框架内加入较精确的燃烧室分析模块，使得整个耦合传热分析过程更加完整、更加全面，把分析方法推广应用到燃烧室辅助设计层面。

致谢

感谢孟令谨、李英、黄鹏、王景泉等多位同事在试验方面的巨大帮助。本研究得到了国家自然基金重大研究计划重点支持项目（91016005）、国家自然基金创新群体项目（10621202）和中国科学院力学研究所所高温气体动力学实验室青年创新基金（2011 年度）的资助，一并表示感谢。

参考文献

1 Lander H, Nixon A C. Endothermic Fuels for Hypersonic Vehicles [J]. Journal of Aircraft, 1971 , 8(4).
2 M.Traci R, L.Farr J, Jr., et al. A Thermal Management Systems Model for the NASA GTX RBCC Concept. NASA/CR-2002-211587.
3 Bouchez M, Dufour E, Daniau E. Semi-empirical and CFD Analysis of Actively Cooled Dual-mode Ramjets:2006 status [J]. AIAA 2006-8073.
4 Gamble E J, Gutierrez J, Giet D, et al. Development of a Scramjet/Ramjet Heat Exchanger Analysis Tool [J]. AIAA 2008-4614.
5 仲峰泉, 范学军, 俞刚. 带主动冷却的超声速燃烧室传热分析 [J]. 推进技术, 2009, 30(5): 513-7.
6 常杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
7 Ely J, Huber M. NIST standard reference database 4-NIST thermo physical properties of hydrocarbon mixtures [P]. National Inst. of Standard, Gaithersburg, MD, 1990.
8 Earl A. Thornton. “A Finite Element Program for Steady-state Thermal Analysis of Convectively Cooled Strutures.” NASA/CR-145069,1976.
9 Long Li, Xuejun Fan, etc. “Measurements of Wall Heat Flux and Temperature in a supersonic Model Combustor,” AIAA-249406-323.

A coupled Thermal Analysis Method for Actively Cooling Structure

Lu yang[1] Wang xinzhu[1] Li long[1] Wang jing[1] Fan xuejun[1]

(1National Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190)

Abstract A quasi 3-dimensional thermal analysis method for fuel-cooled combustor is developed. Fuel flow and heat convection process in cooling channels and heat conduction within structure are coupled during numerical simulation. Friction effect is realized in the method. Reasonable simplifications are introduced to simplify analysis and to reduce the overall computing cost. With this method, 3-dimensional effect which used to be easily missing in previous conventional thermal analysis methods can be captured. The validness and accuracy of this new method was testified with experimental results, which turned out to be good.

Key words thermal analysis, hydrocarbon fuel, fuel-cooled combustor, numerical simulation