国 防 科 技 大 学 学 报
第 25 卷第 1 期 JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY Vol. 25 No. 1 2003

文章编号: 1001- 2486(2003) 01- 0035- 05

钝体高超声速气动加热与结构热传递耦合的数值计算[X]

夏 刚, 刘新建, 程文科, 秦子增

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 气动加热与结构热传递耦合问题在航天和工程应用领域非常重要。分别采用松耦合与紧耦合方法, 数值模拟了高超声速二维圆管绕流的流场与结构传热耦合的非定常过程。在紧耦合方法中, 流场部分采用基于 Navier2Stokes 方程的有限体积法, 将 AUSM$^+$ 格式与时间方向的显式多步 Runge2Kutta 法结合; 结构传热部分采用基于二维热传导方程的 Galerkin 有限元法。流场与结构区通过交界面的热流和温度边界条件实现耦合。计算结果分别与实验、文献做了对比, 结构内部温度变化关系以及壁面的热流分布均较好地吻合。两种耦合方式的计算结果对比表明, 对于流场特征时间远小于结构传热特征时间的问题, 松耦合方法计算效率高, 精度与紧耦合方法接近。

关键词: 耦合计算; 结构传热; 气动加热; 高超声速

中图分类号: V211. 1 文献标识码: A

Numerical Simulation of Coupled Aeroheating and Solid Heat Penetration for a Hypersonic Blunt Body

XIA Gang, LIU Xin2jian, CHENG Wen2ke, QIN Zi2zeng

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The coupling problems of aeroheating and solid heat penetration are very important to aerospace and engineering applications. The loosely2coupled and the fully2coupled methodology are both applied to simulate a two2dimensional hypersonic fluid2solid thermally coupled flow around a cylinder. The unsteady Navier2Stokes equations and the 2D unsteady heat2conduction equation are derived, solved by the finite volume and the Galerkin finite element methods respectively. The coupling is processed by the boundary conditions of heat flux and temperature at the fluid/ solid interface. The flow part is solved by AUSM+ and explicit mult2step Runge2Kutta method. The results are compared with the experimental data and computational results from the reference. The method is shown to give good predictions of the temperature variation and heat flux distribution, and the loosely2coupled method is shown to be more efficient and similar accurate if the characteristic time for fluid is far less than the time for solid.

Key words: coupled simulation; structural thermal; heat penetration; hypersonic

最近几年发展起来的充气式防热罩(简称 ITS) 是一种新型的航天回收系统, 其再入过程所受的气动加热要远小于传统的返回舱(如 Apollo 系列) , 因此防热系统可以抛弃烧蚀性材料转而采用轻质耐高温的柔性编织结构。在方案论证阶段, 通过数值模拟的途径, 研究柔性编织材料在时变的气动加热作用下的温度变化特性, 对于选择合理的防热材料及其组合方式具有重要意义。此外, ITS 所受气动加热的特点是历时长, 热流密度较小且随时间变化幅度较大, 传统的气动估算难以满足研究防热材料时间特性的需求。将流场与结构传热耦合进行一体化计算, 一方面更符合物理实际, 另一方面便于深入了解防热材料的具体温度变化过程。

流场与结构传热数值模拟的耦合方式可以分为紧耦合与松耦合两类。紧耦合是指流场与结构传热按统一的时间步长同步求解, 并通过边界条件相互作用。一般情况下流场的特征时间远小于结构传热的特征时间, 约相差 3~ 4 个数量级, 因此紧耦合一般统一采用流场的计算时间步长。紧耦合的特点是

[X] 收稿日期: 2002- 09- 21

作者简介: 夏刚(1973)) , 男, 博士生。

流场与结构传热实时耦合,反映了物理实际,但计算需要耗费大量时间。根据这类耦合问题的特点,采用松耦合方法能够在保证一定的计算精度前提下弥补紧耦合方法计算效率低的缺陷。所谓松耦合,首先假定流场特征时间很小,流场达到平衡的时间与结构传热的特征时间相比可以忽略不计,因此可以先/ 冻结0流场,单独对结构热传导方程进行迭代求解来研究结构的温度特性。下面分 0, t_1, t_2 三个时刻来说明松耦合方法: 1) 首先以 0 时刻的结构边界条件求得稳态流场,将该时刻的稳态流场/ 冻结0; 2) 在 0 到 t_1 时间段内单独求解结构热传导方程,获得 t_1 时刻的结构温度分布; 3) 以 t_1 时刻的结构边界温度为边界条件,求得对应 t_1 时刻的稳态流场; 4) / 冻结0 t_1 时刻的流场,继续在 t_1 到 t_2 的时间段内单独求解结构热传导方程,获得 t_2 时刻的结构温度分布,如此继续下去直到计算终止。

国外此方面的工作开展较早, 1989 年 Pramote Dechaumphai 等人[1]完成了流场、传热与结构应力一体化耦合计算,得到比较理想的结果。国内黄唐等人[2]在 2000 年研究了二维流场与结构传热的一体化数值模拟;宁勇、高晓成等人[3]研究了防热结构外流场及其热响应的耦合计算。

本文将基于 AUSM$^+$ 格式的高超声速非定常流场计算与基于 Galerkin 有限单元法的热传导数值模拟[4]相结合,研究该紧耦合方法在瞬态热响应问题中的适用性,并与采用 Nastran 热力学分析模块的松耦合计算结果进行对比,以便为 ITS 的防热结构设计选择准确高效的计算手段。

1　流场、结构传热耦合问题的控制方程及算法

1.1　流场

流场部分,取任意的控制体 V,令 dA 为控制体的表面微元面积。则二维无量纲化 Navier2Stokes 方程在直角坐标系下写成如下的积分形式:

$$\frac{5}{5t}\mathrm{Q}_V Q\,dV + \mathrm{R}[F - G]\,\#\,dA = 0 \qquad (1)$$

式中, Q 是守恒型变量, F 为无粘通量, G 为粘性通量项。对上述流动控制方程,无粘项采用有限体积法的 AUSM$^+$ 格式[5, 6]进行矢通量分裂。AUSM$^+$ 格式的基本思想是将无粘通量分裂为对流通量项以及压力通量项来处理。该格式在粘性层中的耗散较小,捕捉激波的分辨率也较高,鲁棒性较强。为获得单调解,采用完全迎风的二阶 MUSCL 格式离散分裂后的通量。并采用 minmod 限制器,使格式达到空间二阶精度。为减少计算量,假设边界层流态为层流。

为模拟非定常过程,时间方向采用显式多步 Runge2Kutta 步进格式,即在从 n 到 n+1 时间步内,有

$$\begin{aligned} &Q^0 = Q^n \\ &Q^i - Q^{i-1} = -A_i\,\$t R^{i-1},\ i = 1, 2, , , m \\ &Q^{n+1} = Q^m \end{aligned} \qquad (2)$$

其中 A_i 是第 i 中间步的步进系数,残差 R^i 由第 i 中间步的 Q^i 求得。时间步长 $\$t$ 可由 CFL 数获得,其中 K_{max} 是方程 1 的最大特征值。

$$\$t = \frac{CFL\,\$x}{K_{max}} \qquad (3)$$

为加速收敛,采用隐式残差光顺技术以增大时间步长:

$$\overline{R_i} = R_i + E\,\mathrm{E}\left(\overline{R_j} - \overline{R_i}\right) \qquad (4)$$

通过上式, i 单元的残差被相邻单元的残差平均,放宽了时间步长的限制。当取 E= 015 时, $\$t$ 可增加一倍。

1.2　结构热响应

固体结构热传导采用基于各向同性材料假设的二维热传导方程:

$$QC_p\,\frac{5T}{5t} = k\left(\frac{5^2T}{5x^2} + \frac{5^2T}{5y^2}\right) \qquad (5)$$

上述瞬态温度场控制方程的有限元总体合成公式为:

$$K\{T^n\}+N\left\{\left(\frac{5T}{5t}\right)^n\right\}=\{P^n\} \tag{6}$$

对于从 n 到 n+ 1 的时间步, 用 Galerkin 格式离散得:

$$\left(2K+\frac{3}{\$t}N\right)\{T^n\}=2\{P^n\}+\{P^{n-1}\}+\left(\frac{3}{\$t}N-K\right)\{T^{n-1}\} \tag{7}$$

其中, K 为温度刚度矩阵, N 为非稳态变温矩阵, {T}为未知温度的列向量, {P}为总体合成公式的右端列向量。

2　耦合求解方法

2.1　紧耦合

紧耦合计算的特点是流场与结构计算域在接触面实时交互数据, 耦合迭代。主要体现在流体与结构接触面上的边界条件处理, 即各自的温度边界条件。如图 1, 在直角坐标系下, 记流体和结构的计算域分别为 8_F 和 8_S, # 为流、固接触面。热传导方程在边界 # 上的定解条件是:

$$k\left(\frac{5T}{5x}n_x+\frac{5T}{5y}n_y\right)=q_S \tag{8}$$

其中 q_S 为接触面 # 传至结构内部的热流。从能量守恒出发, 在忽略辐射效应的假设前提下, 流体区域传至固壁的热流应等于固壁传至结构体内部的热流, 因此有:

$$q_xn_x+q_yn_y=q_S \tag{9}$$

由上式建立起流场与结构传热计算的耦合关系, 如图 2。先给定 t= 0 流场 8_F 的初场和 # 上的温度分布, 通过求解 Navier2Stokes 方程得到 \$t 时间后壁面 # 上的热流分布。然后以该热流分布为边界条件, 用有限单元法计算 \$t 时间后的结构温度分布, 并得到壁面 # 上新的温度分布, 至此完成耦合计算的一个周期。如此反复迭代, 直到计算要求的截止时刻。需要说明的是, 由于流场部分达到平衡状态的特征时间很短, 故将 t = 0 时刻的初场假定为在来流条件下由等温壁假设得到的稳态解。该假设符合物理实际, 并有利于加速计算。

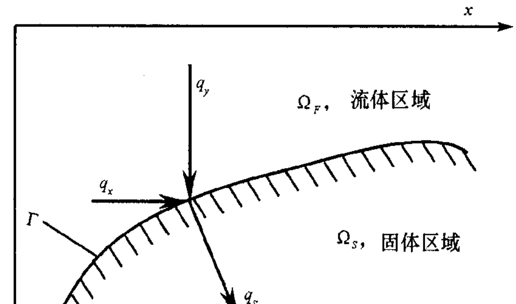


图 1　流、固接触面的耦合原理

Fig. 1　The principle of coupling at fluid2solid interface

8_S 区域除 # 外的三个边界条件分别为对称边界、绝热边界、绝热边界。由于计算所考察的时间段较短(共 2s), 圆管内壁面与内部空气的热交换较弱, 对内壁面做绝热假设是合理的。

2.2　松耦合

松耦合方法中, 假定从 t = 0 时刻开始, # 上的热流分布为恒定值, 即上节紧耦合计算的 0 时刻热流分布。结构区域 8_S 以此作为边界条件进行热传导分析。为使松耦合与紧耦合的比较更具有一般性, 热传导的求解器采用 Nastran 软件的热力学分析模块。

3 算例分析

1987年Allan R. Wieting所做的激波干扰对圆管前缘加热的实验[7]被多次用作于流场、结构传热耦合的验证算例，本文对该实验简化后的二维超声速圆管绕流问题进行验证研究。实验中的来流为甲烷的燃烧产物，其热值与成分有别于标准大气。圆管材料为不锈钢，计算中采用标准钢材的热力学参数：密度Q为8030kg/m^3，比热C_p为502.48J/(kg#K)，热传导系数k为16.27W/(m#K)。

来流温度T = 241.5K，M_a = 6.47，Re = 1131e-06m^{-1}，压力P = 64811Pa，结构初始温度为29414K。

二维圆管外形及网格划分如图2所示，计算域取1/4象限。圆管内、外半径分别是2514mm和3811mm。为模拟壁面热流，对壁面附近网格进行加密，使贴近壁面的一层网格Re数接近1。流场与结构区域的网格数分别为90@60和30@60。

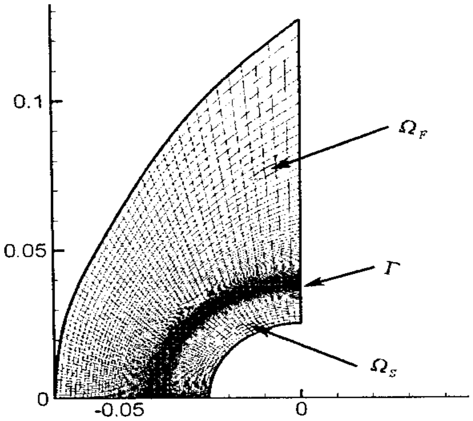
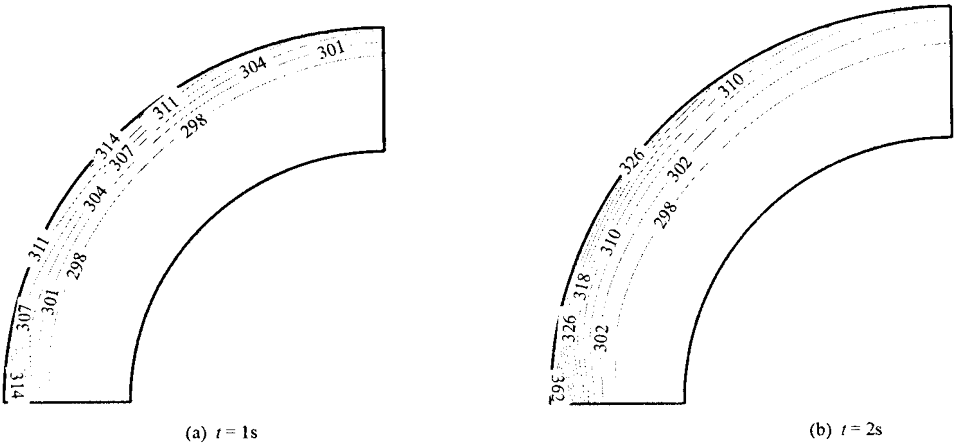


图2 耦合计算网格和区域划分

Fig.2 Grid and zones of the coupled computation



(a) t = 1s

(b) t = 2s

图3 圆管在不同时刻的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the cylinder at different time

采用Nastran热力学分析软件模块对松耦合的结构部分瞬态传热过程进行了分析，其结果与上述紧耦合算法得到的温度分布及变化趋势一致。表明在此类流场与结构传热的特征时间相差悬殊的耦合问题中，松耦合方法能够取得理想的结果，而且具有很高的计算效率。

图3比较了1s和2s时刻的圆管内温度分布，表明随时间推移，在流场气动加热作用下，圆管内温度逐渐上升。驻点附近的热流值最高，因此圆管在该区域的温度上升最快。2s时刻的温度分布与文献

[1]的计算结果一致, 说明采用的耦合计算方法是合理的。

t = 0s 时刻的热流分布见图 4, 分布规律与实验值基本一致。但是驻点热流值与实验有一定的偏差, 计算的 q_0= 5411J/ cm^2, 而实验值为 6710J/ cm^2, 文献[1]的计算值为 4812J/ cm^2。

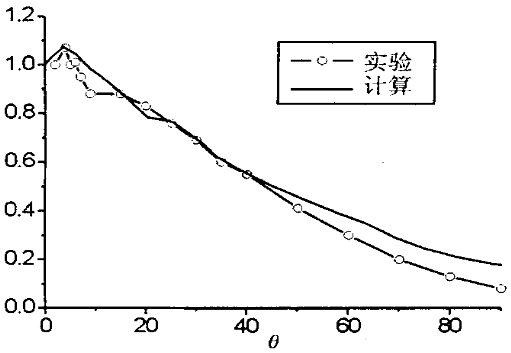


图 4 计算与实验的热流分布比较

Fig. 4 Comparison of the heat flux between computation and experiments

4 结论

对流场与结构传热耦合进行统一的数值模拟, 研究了二维圆管在高超声速流动中耦合加热问题。将空间二阶精度的 AUSM^+ 格式与结构传热的 Galerkin 方法相结合, 并与采用 Nastran 热力学专业分析模块的松耦合算法进行比较, 得到下列结论:

(1) 文中采用的紧耦合方法能够较好地模拟壁面热流, 并成功地实现流场与结构接触面上的实时数据交互。紧耦合的模拟的结构温度变化情况与实验及文献[1]的结论一致, 说明该方法在耦合边界条件的处理以及两类计算域内求解方法是合适的。

(2) 计算过程中发现, 采用显式时间差分格式模拟非定常流动过程, 尤其是高超声速问题时, 受格式稳定性限制, 只能取很小的时间步长, 计算过程耗时较多; 采用隐式残差光顺技术可以明显加速收敛, 但是总的计算时间仍然较长。

(3) 流场和结构传热的耦合计算有助于深入了解气动加热与防热结构相互作用的动态过程, 对于防热结构的选材和设计具有重要参考价值。

(4) 通过紧耦合与松耦合的结果对比发现, 对高超声速气动加热这类流场特征时间远小于结构传热特征时间的问题, 采用恒定的流场边界热流假设来求解结构传热, 即松耦合方法, 能够大幅度节省计算时间, 并获得与紧耦合法相近的计算结果。结构传热的瞬态分析可以借助 Nastran 等成熟的商业软件来完成, 显著提高工作效率。说明在一些防热结构设计任务中, 采用松耦合方法足以满足需求。而紧耦合方法本身在计算效率以及对复杂流场问题的适用性方面仍然有许多问题有待进一步研究。

参考文献:

[1] Dechaumphai P, Thornton E A, Wieting A R. Flow2Thermal2Structural Study of Aerodynamically Heated Leading Edges[J]. J. Space2craft. 1989, 26(4): 201- 209.

[2] 黄唐, 毛国良, 姜贵庆, 等. 二维流场、热、结构一体化数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(1): 115- 119.

[3] 宁勇, 高晓成, 桂业伟, 等. 前缘类防热结构的外流场及其热响应的耦合计算[A]. 全国高超声速气动力(热)学术交流会议文集. 浙江, 2001: 154- 158.

[4] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[5] 赵兴艳, 苏莫明, 苗永淼. LU2AUSM+ 混合格式在三维可压缩流动数值分析中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 9- 12.

[6] 陈靓, 阎超. 新型上风格式(AUSM+)的性能分析及其应用[J]. 计算物理, 1998, (5): 547- 552.

[7] Wieting A R. Experimental Study of Shock Wave Interference Heating on a Cylindrical Leading Edge[R]. N87227154, 1987.