

基于 STAR-CCM+与 ABAQUS 直接耦合的 排气歧管数值模拟

Numerical Simulation for Exhaust Manifold Based on the Direct Coupling of STAR-CCM+ and ABAQUS

李雪妮, 刘志恩, 侯献军

(武汉理工大学汽车工程学院, 湖北省武汉市 430070)

摘要: 为反应瞬态传热过程对内燃机排气歧管低周热疲劳寿命的影响, 采用直接耦合法对其进行瞬态流-固-热耦合仿真。研究了数值模拟过程中瞬时温度加载、网格划分及流固交界面温度插值等问题的处理方法, 实现了 CFD 软件 STAR-CCM+与 FEA 软件 ABAQUS 双向直接的流固耦合模拟, 以此进行内燃机排气歧管的共轭传热及热应力分析。

关键词: 排气歧管; 瞬态传热; 流固热数值模拟; 直接耦合

Abstract: To reflect the influence of transient heat transfer process on low cycle thermal fatigue life, the transient fluid-solid-thermal coupling simulation on the exhaust manifold is carried out by using direct coupling method. The research of dealing with the problems of transient temperature loading, the mesh generating and the interface temperature interpolation of fluid and solid are conducted in the process of numerical simulation. The goal of bidirectional fluid and solid coupling simulation between the CFD software STAR-CCM+ and the FEA software ABAQUS is achieved. Be based on it, the conjugate heat transfer and thermal stress analysis for internal combustion engine exhaust manifold can be proceeded.

Key words: exhaust manifold; transient heat transfer; fluid-solid-thermal simulation; direct coupling

引言

排气歧管是内燃机的主要受热部件, 它直接与缸盖相连, 将发动机高温废气直接传递给后续的排气系统, 工作热负荷大, 热应力高, 热循环冲击频繁, 工作环境十分恶劣, 在进行内燃机耐久性试验时常发生排气歧管疲劳断裂的现象。为了解裂纹产生的原因, 有必要进行瞬态的流-固-热耦合分析, 预测温度和热应力的瞬态波动情况, 找出其结构薄弱处, 为排气歧管的改进设计提供参考依据, 也为后续的低周热疲劳分析提供热边界条件。

多场耦合问题 (Multi Physics Problems, MPPS) 是在一个系统中, 由两个或两个以上的场相互作用而发生的一种现象, 它在自然界和工程实践中广泛存在^[1]。对于排气歧管多场耦合问题, 主要涉及

到结构场、流场、温度场的耦合，可以分为流体-热耦合、结构-热耦合、流体-结构耦合（流固耦合问题）、流体-结构的热耦合（耦合传热或共轭传热问题）、流体-结构-热耦合 5 个层面的耦合。前四种属于两场耦合，第五种涉及前 4 种耦合问题，属三场耦合。对于排气歧管，人们对流体-热耦合、结构-热耦合研究较多，而对耦合传热、流固耦合研究较少。其中耦合传热问题始于 1970 年的薄板两侧流体的传热问题，上世纪 70 年代中期，数值方法也有见报道。在国内，对气缸盖、活塞等的耦合传热研究大多采用反算法：实测若干关键点的温度，调整热边界条件，使关键点的计算值和实测值符合。文献[2]经过了一百多次的试算，才使几个关键点的计算值和实测值接近，计算周期和成本较高。反算法是建立在相应温度测量的基础上的，只能对已有的发动机进行改进，不能在设计阶段对新的设计进行指导。在排气歧管研究方面，国内基本都是采用流固耦合法计算排气歧管的温度场及热应力。首先用 CFD 软件计算排气歧管瞬态内流场(一定曲轴转角范围内)，再用时间平均的方法计算出内壁面稳态对流换热系数和环境温度。再将其映射到相应的有限元网格上，得到排气歧管温度场计算的边界条件。使用 FEA 软件计算得到的温度场修正 CFD 热边界条件，进行多轮迭代使相应节点温度的最大差值在一定范围内认为收敛。采用流固耦合的方法虽不依赖于温度场实测结果，就可以得到相对精确的温度场，但此类方法需通过文件进行数据传输或使用外部中转软件等冗余过程，同时时间平均法无法将变化的热边界条件施加到固体边界上，就不能反映瞬态传热过程对疲劳寿命的影响。

鉴于此，笔者利用 STAR-CCM+与 ABAQUS 直接流固耦合的方法，获取排气歧管的瞬态温度场，为瞬态热疲劳分析提供边界条件，同时对排气歧管的热应力进行了分析。

1 瞬态传热基本原理及流程

耦合传热问题的热边界条件无法预先给定，而是由热量交换过程动态地加以决定，无论交界面上的温度或热流密度都应看成是计算结果的一部分，而不是已知条件。

流固耦合分析从控制方程解法上可分为直接求解的强耦合和分区迭代求解的弱耦合^[3]。强耦合是将流体域、固体域和耦合作用构造在同一控制方程中，在同一时间步内同时求解所有变量。弱耦合是在每一时间步分别依次对流体方程和结构方程求解，通过中介交换固体域和流体域的计算结果数据，从而实现耦合求解。采用强耦合方式需要对各学科有较深刻的理解，程序的开发成本较高，对硬件的要求也较高。而弱耦合方式可以利用各学科现有的程序，考虑边界上的相互影响。而且，由于对每个物理场的分析都是相对独立的，可以比较容易地采用计算机并行技术解决大型的复杂工程实际问题^[4]。鉴于弱耦合求解方式灵活、方便的特点，国外的许多学者和研究机构都在这方面进行了卓有成效的研究，其中以德国科学计算与算法研究所开发的 MPCCI 多学科耦合分析工具最为有名，它根据弱耦合原理，开创性地在多学科的商用软件之间建立了功能强大的链接，而 CD-adapco 公司研发的 STAR-CCM+软件基于弱耦合原理实现了和 SIMULIA 公司的 FEA 产品 ABAQUS 的直接耦合，

且无需使用第三方软件，大大提高了计算效率。而国内在这方面的研究还鲜有报导。为此，文中采用 STAR-CCM+与 ABAQUS 直接耦合合法进行排气歧管瞬态热流体-热应力分析，具体计算流程如图 1 所示。

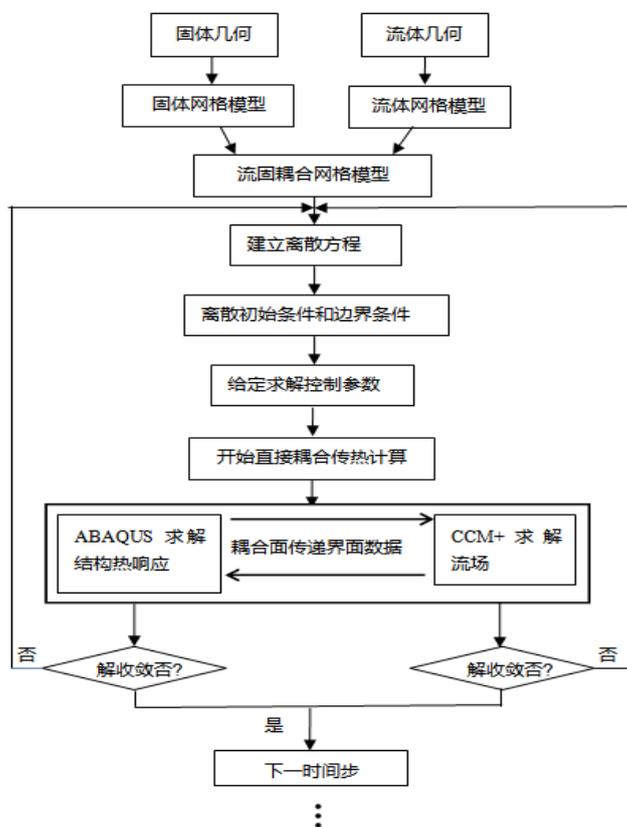


图 1 排气歧管瞬态传热流程

通过 STAR-CCM+里的 Abaqus Co-Simulation 模块自动实现耦合界面处的数据传递，即流体向固体实时输出薄膜温度和对流换热系数，固体向流体实时输入温度变量。其中耦合界面数据传递又分为并行耦合及串行耦合两种方法，并行耦合指两个 code 同时运行，code 之间是完全同步的，在每个时间步之间进行数据的交换，在新时刻接受到的边界条件都是旧时刻的数据，如图 2-(a)所示；串行耦合是指一个代码计算另一个代码等待，如图 2-(b)所示，一般认为并行的可靠程度不如串行耦合，同时，并行耦合会出现两个代码都在等待对方的数据，造成两者都算不下去的时间死锁现象。因此，本文采用串行耦合的方法，实现耦合界面处的数据传递。

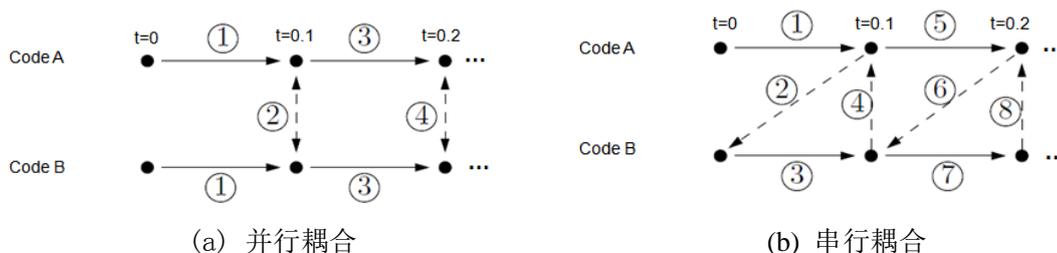


图 2 STAR-CCM+与 ABAQUS 耦合模式选择

2 数学模型

采用联接实体的 Fourier 热传导方程和流体的对流换热控制方程描述流固耦合界面处的热量传递^[5]:

$$K_{cond} \frac{\partial T}{\partial n} |_{wf} = q^{conv} = h_{conv} (T_f - T_w) \quad (1)$$

式(1)中: K_{cond} 为固体导热系数; h_{conv} 为局部对流换热系数; T_f 为流体温度; T_w 为壁面温度。

排气歧管内流场瞬态控制方程采用可压缩 N-S 方程, 湍流模型采用标准 k- ϵ 模型, 壁面取标准壁面函数。

固体侧, 假定零件为常物性并无内热源, 则排气歧管温度场计算的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \quad (2)$$

式(2)中: k_x 、 k_y 、 k_z 为沿 x、y、z 方向的热传导系数。

在瞬态热应力计算时, 将瞬态热流体计算得到的每时刻的温度以及对流换热系数作为第一、第三类边界条件加载到热应力计算时的有限元模型上, 为排气歧管的结构强度计算及热疲劳分析提供瞬态的热边界条件。

3 计算模型

3.1 几何模型的建立及网格划分

以某四冲程汽油机排气歧管为研究对象, 利用 STAR-CCM+ 的前处理功能进行流体域跟固体域网格的划分, 流体域由多面体网格构成, 在流体近壁面处划分了 2 层较密的边界层网格, 为减少边界对计算结果的影响, 将流体的出口面沿法线方向拉伸一段距离, 如图 3-(a)所示。从 CCM+ 里导出 .nas 格式的固体域面网格, 在 HYPERMESH 里生成体网格, 固体域仅包含四面体网格, 如图 3-(b)所示。歧管材料为属性如图 4 所示。

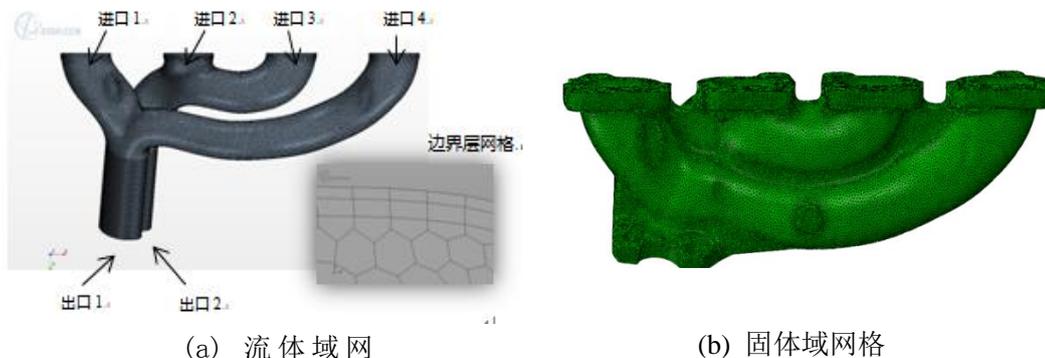


图 3 排气歧管流体域&固体域计算网格

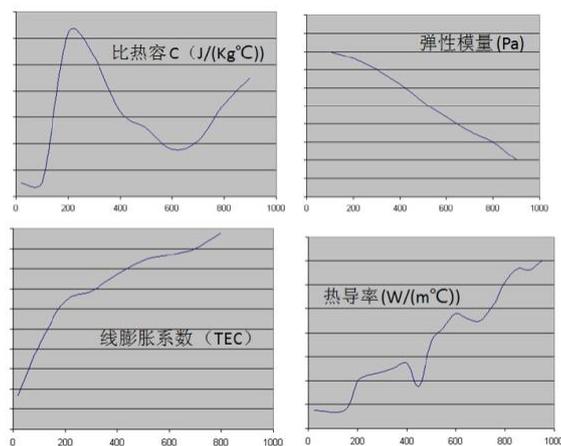


图 4 排气歧管的材料属性

3.2 计算工况及边界条件

计算工况为汽油机标定工况，标定转速为 6000r/min，发火顺序为 1-3-4-2。进出口边界条件取自一维热力学仿真分析结果。热循环计算的时间周期为 1210s（忽略预加热时间），图 5 给出了某缸进口端废气温度随时间的变化曲线，其余 3 缸的瞬时质量流量和温度可由发火顺序和排气相位确定。出口给定随时间变化的相对静压及温度，排气歧管外壁面对流换热系数为 $13.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，环境温度为 300K。其余为壁面边界条件。初始条件：压力为 400kPa，温度为 1218K。

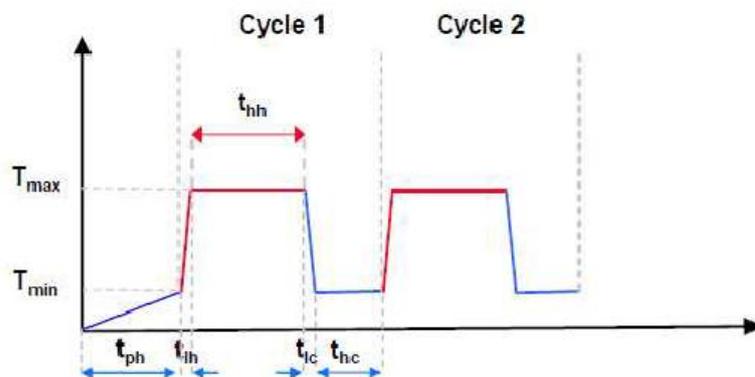


图 5 热循环视图

T_{\max} : 进口端废气最高温度, $T_{\max}=950^{\circ}\text{C}$; T_{\min} : 进口端废气最低温度, $T_{\min}=200^{\circ}\text{C}$;

t_{ih}, t_{ic} : 加载时间（加热/冷却）, $t_{ih}=t_{ic}=5\text{s}$; t_{hh}, t_{hc} : 加热/冷却持续时间, $t_{hh}=900\text{s}, t_{hc}=300\text{s}$; t_{ph} : 预加热时间, $t_{ph}=300\text{s}$.

3.3 弱耦合分析瞬时温度的传递

为准确进行排气歧管瞬时热应力计算，须将由瞬态耦合传热计算得到的每一时刻的固体温度作为第一类边界条件加载到有限元模型上。CCM+的 Abaqus Co-Simulation 模块采用映射法完成瞬时温度载荷的处理。将流体域和固体域网格一起进行热流体分析，把同时得到的固体域节点温度值直

接插值到热应力分析的有限元网格的节点上去。文献[4]称这种方法为体映射法。图 6 为采用体映射法示意图, 该方法的特点是固体部分网格疏密与类型等均不受前一阶段分析的限制。由于在第二阶段不需要进行温度场的计算, 所以比面映射法少一个温度场分析过程。相对直接转换法, 体映射法在第二阶段分析时网格单元类型不受前一阶段热流体分析中固体网格类型的限制, 显得更灵活。另一方面, 目前 CFD 分析的网格大都是一次线性单元, 而结构分析往往为了提高计算精度要求采用二次非线性单元。采用体映射方法完全能够满足不同分析系统对于网格类型的要求。

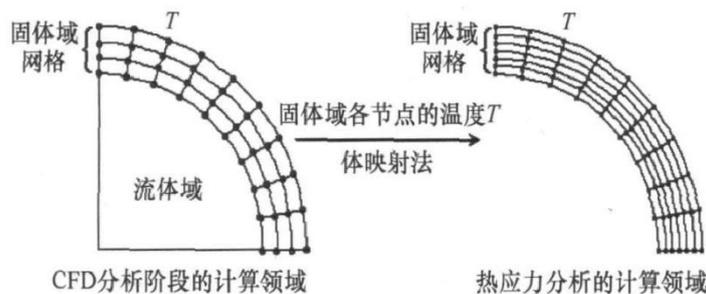


图 6 体映射法示意图

4 计算结果分析

4.1 温度场结果

如图 5 热循环所示, 发动机从冷启动状态启动后经预热达到一定温度, 在短时间内升到额定功率, 保持一段时间后, 再在短时间内进入低怠速状态, 保持一段时间后再升到额定功率。从第二循环开始, 发动机从热机开始循环, 温度变化趋于稳定, 考虑到计算时间的经济性, 取 Cycle2 的温度结果作为结构计算的温度输入。为了实时监控歧管温度的变化过程, 在歧管耦合界面选取了一个观察点, 图 7 给出了该节点的瞬时变化曲线, 其温度变化趋势与图 5 相同。

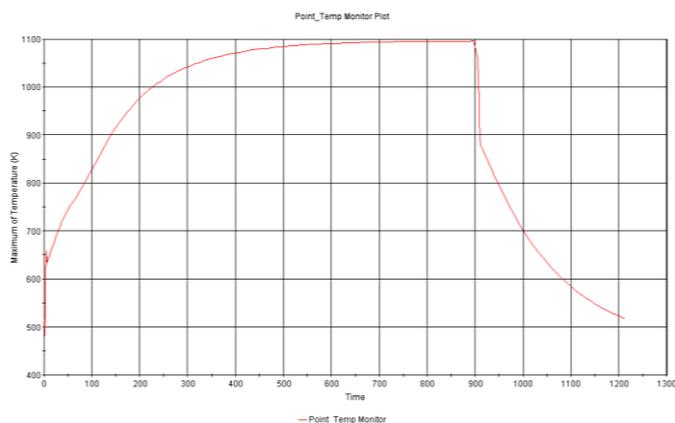


图 7 耦合面处节点温度变化曲线

图 8、图 9 分别给出了歧管稳态计算与瞬态计算在额定功率下的温度分布, 对应的时间是图 5 中第二循环峰值点。瞬态温度计算由于热惯性的影响, 其结果与稳态计算结果存在很大的不同。稳态结果中, 歧管除了法兰面的大部分区域温度都高于 960 度, 而瞬态结果中, 高于 960 度的区域大

大缩小，主要分布在歧管气流交汇处。

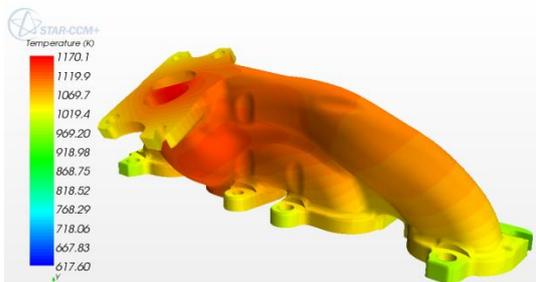


图 8 额定功率下稳态温度计算结果

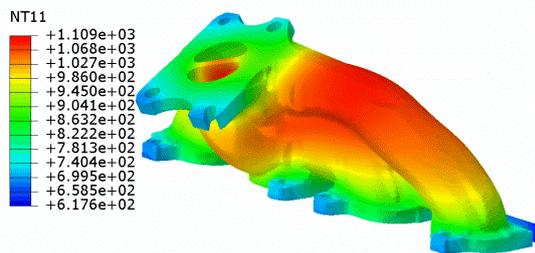


图 9 额定功率下瞬态温度计算结果

4.2 热应力结果

图 10、11 分别为排气歧管稳态与瞬态的热应力分布云图。稳态热流体-热应力分析时 4 个进口面的流量和温度按稳定工况下的平均流量和平均温度给定，而其他边界条件都与瞬态计算一致。稳态最大应力值为 187.1MPa，与瞬态计算相近，但最大应力点的位置有所不同，瞬态出现在一、二缸交汇处，稳态出现在三、四缸交汇处。同时，瞬态计算应力分布更为细密，对比温度场来看，高应力区出现于高温梯度处，进一步说明了热应力主要由温度梯度控制。从准确性考虑，后续的疲劳可靠性分析应使用瞬态热流体-热应力分析。

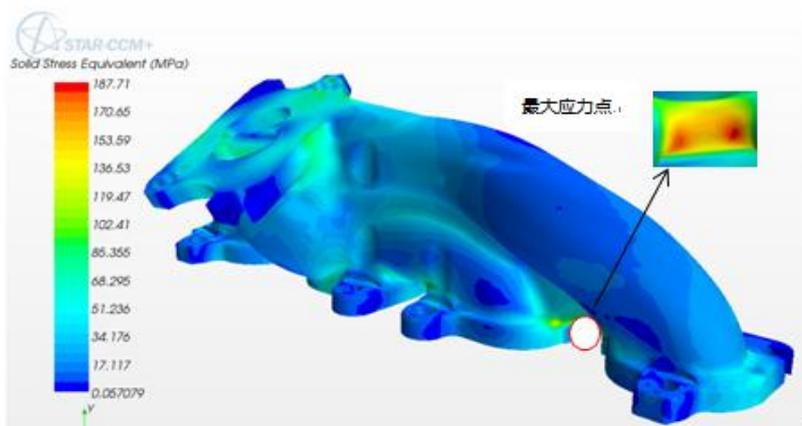


图 10 稳态热应力计算结果

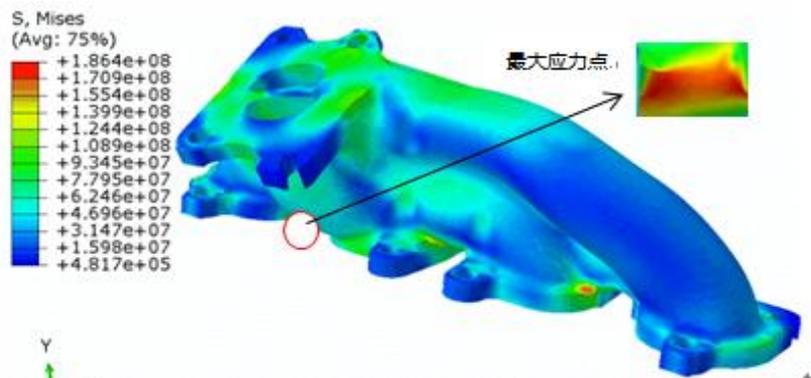


图 11 瞬态热应力计算结果 (t=905s)

5 总结

- (1) 研究了数值模拟过程中瞬时温度加载、网格划分及流固耦合界面温度插值等问题的处理方法;
- (2) 比较了瞬态热流体-热应力计算与稳态计算的差异, 证明进行排气歧管瞬态分析的必要性和有效性;
- (3) 实现了CFD软件STAR-CCM+与FEA软件ABAQUS双向直接的流固耦合模拟, 完成排气歧管的共轭传热及热应力分析, 为低周热疲劳计算提供瞬态热边界条件。

参考文献

- [1] 宋少云. 多场耦合问题的分类及其应用研究[J]. 武汉工业学院报, 2008, 27(3).
- [2] 薛明德, 丁宏伟. 柴油机活塞的温度场、热变形与应力三维有限元分析[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 11-14.
- [3] 钱若军, 董石麟. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008, 14(1): 3-15.
- [4] 董非, 范秦寅. 内燃机流-固-热耦合数值模拟的研究[J]. 2009, 31(2).
- [5] 骆清国, 刘红彬. 柴油机气缸盖流固耦合传热分析研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(7).