

超声速流场条件下激光辐照耦合效应数值模拟*

吴小翠¹, 王一伟¹, 程欣欣², 黄晨光¹, 吴臣武²

(1. 中国科学院 力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院 力学研究所, 先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 激光辐照结构物包含复杂的多物理场耦合问题, 其存在流、热、固多种机制的耦合效应。结合计算流体力学(CFD)和有限元方法, 对超声速条件下的激光辐照平板问题进行了热流固耦合分析。采用 CFD 方法得到平板附近流场分布, 利用有限元方法计算平板的温度分布, 并将二者结合起来实现流体和固体间的数据交互。理论分析确定了流场效应的最主要影响参数为来流马赫数与攻角。对于不同马赫数, 激光区域在 $6Ma$ 条件下存在温度的谷值, 小于等于 $6Ma$ 条件下主要体现为冷却效应, 而 $6Ma$ 以上主要体现为气动加热效应。攻角增大会导致激光区流体质量流量的增加, 使冷却效应更加明显。最后综合分析了流场气动加热和冷却两种效应的产生机制。

关键词: 超声速; 激光辐照; 流热耦合; 数值模拟; 攻角

中图分类号: TN246 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201426.091010

光辐照结构物是一种复杂的多物理场过程, 特别当结构物在空中飞行时, 流场、激光与结构之间会存在流、热、固等多种机制的耦合。激光导致的结构温度场以及应力场演化规律等问题得到了众多学者的广泛关注。袁红等^[1]采用有限元方法数值模拟在连续激光辐照下旋转柱壳温度场的变化和分布情况, 分析了热性能参数对温度场造成的影响; 王伟平等^[2]实验研究了重复频率脉冲 YAG 激光对旋转金属壳的加热效应, 发现激光作用下旋转金属壳的温升大大低于静止金属壳的温升。赵剑衡等^[3]用有限元方法数值模拟强激光辐照下柱壳上温度场的变化和分布情况, 并对热性能参数随温度变化对温度场造成的影响进行了研究。漆海滨等^[4]利用热传导理论分析了强激光对运动物体的加热问题, 得出了物体表面温度、激光功率密度、光斑尺寸及光斑相对于物体运动速度之间的关系。

考虑到结构周围绕流的影响, 张黎等^[5]采用动网格模型模拟气流对平板的“冲刷效应”。张健等^[6]在考虑激光与运动目标相互作用的基础上, 利用有限元方法分析了亚声速条件下运动目标在激光辐照全过程的温度场和热应力场的分布与演化规律。石卫波等^[7]采用工程计算方法求解高超声速飞行器碳-碳复合材料分别在气动热、激光单独作用以及气动热/激光耦合作用下的热化学烧蚀。张家雷等^[8]采用高能激光对复合材料的辐照效应进行了研究。为了预测激光辐照下碳纤维增强复合材料的瞬态热响应, 提出了一个简化计算模型。陈敏孙等^[9]实验研究了样品表面有切向空气气流、切向氮气气流和无气流时, 976 nm 连续激光对玻璃纤维增强 E-51 环氧树脂复合材料的辐照效应。黄亿辉等^[10]建立了能够反映激光、流场和结构相互作用的热流固耦合数值计算方法, 用于模拟超声速气流(马赫数 1.2~4.0)作用下强激光辐照靶体结构的失效行为, 分析了不同耦合策略对数值计算结果的影响, 研究了激光功率密度及来流马赫数对屈服失效和熔融失效行为的影响。陈华等^[11]在现有光滑粒子流体动力学方法基础上, 提出了结合差分方法处理激光辐照边界条件的方法, 并利用此方法自编程模拟计算了功率密度为 $5.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的强连续激光辐照铝靶时的热-力学效应。

综上所述, 目前工作对于热力耦合效应如温度、应力分布等给出了较为全面的结果, 但对于流体的效应研究相对较少。文献^[5]中认为流场在亚声速条件下主要是冷却效应, 而文献^[7]通过工程计算方法得出高超声速条件下气动加热影响很大。这反映了流场对激光辐照过程的影响具有非常复杂的规律, 因而对于超声速以及高超声速流场, 仍需要对流场的影响规律进行更为系统和细致的研究。

本文结合计算流体力学和有限元方法, 对超声速条件下的激光辐照平板问题进行了热流固耦合分析, 确定了流场效应的最主要影响参数为来流马赫数与攻角, 给出了超声速流场对于激光辐照效应的耦合作用规律。

* 收稿日期: 2013-11-15; 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(11202215); 国家自然科学基金重点基金项目(11332011)

作者简介: 吴小翠(1985—), 女, 博士研究生, 从事计算流体力学研究; wuxiaocui@imech.ac.cn.

通信作者: 王一伟(1983—), 男, 副研究员, 从事计算流体力学研究; wangyw@imech.ac.cn.

1 数学模型

1.1 问题描述

本文的主要目的是模拟超声速乃至高超声速条件下激光辐照、流动与结构传热的耦合效果。考虑到通常高速飞行器乘波体外形下表面的扁平特征,将物理模型简化为平板的流动与激光辐照耦合,如图 1(a)所示。平板长 0.5 m,宽 0.075 m,高 0.0054 m,由三种不同材料粘接组成,材料属性设置和激光光强设置参考典型的高超声速飞行器材料与激光特征,具体见表 1。激光为均匀连续光照,辐照时间为 1 s,光斑为圆形,辐照半径为 2.5 mm,吸收的激光功率密度为 300 W/cm²,辐照位置位于图 1(b)中圆圈处。气流为无穷远处的均匀来流,缺省条件下与平板成 5°夹角,缺省来流马赫数为 6。

表 1 材料参数设置
Table 1 Material parameter

	density/ (kg · m ⁻³)	heat capacity (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	thermal conductivity coefficient (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
bottom	8440	440~629	10.1~24.7
middle	7000	440~629	10.1~24.7
top	5730	467	2

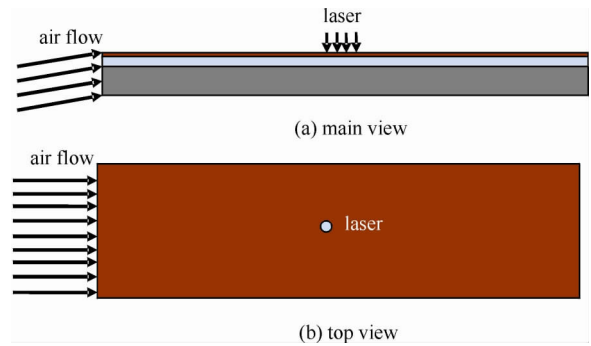


Fig. 1 Physical model
图 1 计算用物理模型

1.2 控制参数量纲分析

为了得到耦合计算中的主要影响参数,采用量纲分析方法对控制方程中各参量进行分析。

流场计算中主要影响参数为流体密度 ρ ,远场来流速度大小为 u ,导热系数 λ ,来流温度 T_0 ,定压比热容 c_p ,比热比 γ_0 ,攻角 α ,粘性系数 μ ,当地声速 C 。结构计算中主要影响参数为平板的导热系数 λ_s ,定压比热容 c_s ,弹性模量 E ,固体材料密度 ρ_s ,平板长度 L ,平板厚度 δ 。对于关心的激光区域最高温度有表达式为

$$T = (\rho, u, T_0, \gamma_0, \mu, \lambda, c_p, C, \alpha; \lambda_s, c_s, E, \rho_s; L, \delta) \quad (1)$$

取 ρ, u, T_0, L 为基本量,可得到无量纲表达式为

$$T/T_0 = (\gamma_0, Re, \frac{\lambda}{\rho c_p L u}, \frac{c_p}{c_s}, Ma, \alpha; \frac{\lambda_s}{\rho c_p L u}, \frac{\lambda_s}{\lambda}, \frac{E}{\rho u^2}, \frac{\rho_s}{\rho}; \frac{L}{\delta}) \quad (2)$$

在流场物性参数与结构材料参数确定的条件下,与流动效应相关的主要无量纲参数为 Re, Ma 和 α 。考虑到超声速条件下雷诺数很高,一般影响较小,因而马赫数 Ma 与攻角 α 对耦合效应的影响是最重要的。

2 数值计算方法

采用基于 CFD 与有限元的流固耦合方法,分别给出流场部分与结构部分的求解方法,最后给出耦合求解策略。

2.1 流场求解方法

流体区域的控制方程为三维可压缩非定常 Navier-Stokes 方程,具体形式为连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho U_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_x \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla U_x) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho u' w'})}{\partial z} \right] + S_{M_x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho U_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_y \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla U_y) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho v' w'})}{\partial z} \right] + S_{M_y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho U_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_z \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla U_z) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho w'^2})}{\partial z} - \frac{\partial (\overline{\rho u' w'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho v' w'})}{\partial y} \right] + S_{M_z} \quad (6)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v})) + S_h \quad (7)$$

式中： x, y, z 表示三个方向； $\mathbf{U} = [U_x \ U_y \ U_z]$ ， ρ 为流体密度； p 为压力； t 表示时间； μ 为粘度系数； $S_{M_x}, S_{M_y}, S_{M_z}$ 是动量方程的源项； k_{eff} 是热传导系数； E 是密度内能； h 是显焓； T 是温度； \dot{q} 是体积热源； S_h 是能量方程的源项。

利用 Boussinesq 的涡粘假定，引入涡粘性系数 μ_t ，建立 Reynolds 应力相对于平均速度梯度的关系，即 Reynolds 应力可表述为

$$\rho \overline{u'u'} = -\mu_t (\nabla \mathbf{U} + \nabla^T \mathbf{U}) \quad (8)$$

其中

$$\nabla \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_x}{\partial z} \\ \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial z} \\ \frac{\partial U_z}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad \nabla^T \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial x} \\ \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial y} \\ \frac{\partial U_x}{\partial z} & \frac{\partial U_y}{\partial z} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (9)$$

FLUENT 中应用 Boussinesq 涡粘假定的湍流方程有 S-A 模型， $k-\epsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型，三种模型分别采用不同方法对涡粘系数进行求解，均为目前较为成熟的湍流模型。其中 S-A 模型方程是从经验和量纲分析出发，由针对简单流动再逐步补充发展而适用于带有层流流动的固壁湍流流动的方程模型，是关于涡粘性相关量 $\tilde{\nu}$ 的输运方程。相对于两方程湍流模型，S-A 模型的计算量较小，稳定性较好，计算网格在物面处不需要很精细，与代数模型的网格量级相当即可。另外，S-A 模型方程是“当地”型的，也就是说，在某一点上模型方程不受其他点的解的影响。因此，S-A 模型可以应用于结构网格和非结构网格。本文采用 S-A 模型对 NS 方程进行封闭。S-A 模型方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_\nu \quad (10)$$

涡粘系数定义为

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{\nu 1} \quad (11)$$

其中： $f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{\nu 1}^3}$ ， $\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$ ， ν 为层流粘性系数。

对于上述方程在软件 FLUENT 中采用有限体积方法进行离散求解，使用基于密度的 Roe 格式求解器，空间离散为二阶迎风格式。针对计算域划分的典型六面体结构化网格如图 2 所示，网格中激波导致的密度梯度较大的部分进行了自适应加密。来流采用远场压力入口(图 3 所示)，给定压力、马赫数和温度条件，出口由于位于超声速区，采用压力出口外差的方式。壁面部分采用温度条件，具体温度值通过与结构的耦合计算得到。

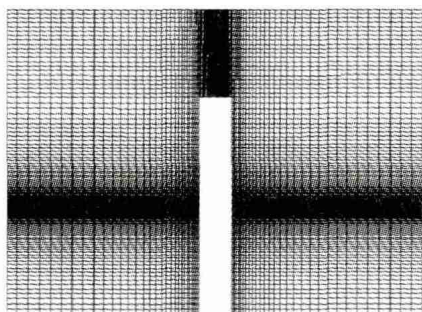


Fig. 2 Computational mesh for CFD(XY plane)

图 2 流场计算用网格(XY 截面)

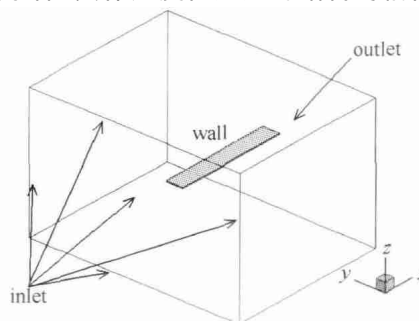


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

图 3 计算域与边界条件

2.2 结构求解方法

固体区域仅考虑传热问题，忽略了变形对传热与流场的影响。因而控制方程为能量方程，具体形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{q} \quad (12)$$

在 ANSYS 中进行有限元求解，结构网格如图 4 所示。主要单元类型为 SOLID70，物性参数如表 1 所示。

在表面处覆盖一层 SURF57 单元, 给定从流场处耦合求解得到的贴壁流动速度与换热系数, 同时将激光作用产生的热流直接赋给 SOLID70 节点上。

2.3 耦合方法

本文采用松耦合分析方法对平板流热耦合效应进行求解, 具体耦合策略如图 5 所示。针对高超声速平板流场特性, 通过求解 RANS 方程得到平板近壁表面流体温度和对流换热系数。结构部分通过局部加载方式考虑激光的辐照效果, 进而得到平板的表面温度分布。由于结构求解器在边界处的网格密度高于流场求解器, 引入 MPCCI 软件作为流固耦合接口程序实现两者之间的数据信息交换。

2.4 计算模型验证

因气动与耦合效应的计算难点在于无完整的实验结果进行比较, 故本文采用流场与结构分别验证的方式。其中流场部分采用钝头体飞行器在高超声速飞行时的气动力计算结果与实验结果的比较来证明本文采用方法在超声速流场计算方面的可行性与精度。固体部分可以通过与流场的耦合计算结果进行比对验证。

验证模型为直径 80 mm 的半球头圆柱, 前端激波针长度为 80 mm, 直径为 12 mm。图 6 为计算得到在来流马赫数 5.9332, 雷诺数 2×10^7 , 总温 464 K, 0° 攻角条件下的激波形态, 图 7 为对应的实验结果, 计算结果能够很好的捕捉到超声速条件下在模型头部的激波形态, 与实验结果吻合较好。

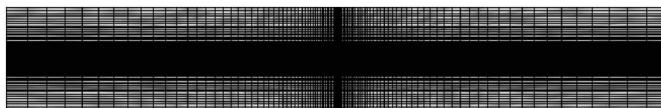


Fig. 4 Computational mesh for ANSYS

图 4 结构计算用网格

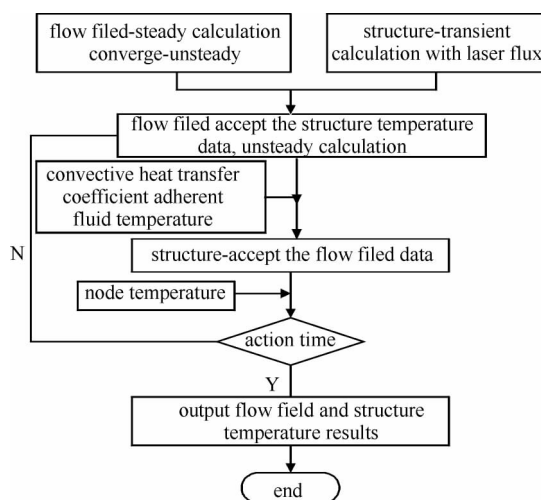


Fig. 5 Flow chart for fluid—solid coupling

图 5 流固耦合计算流程图

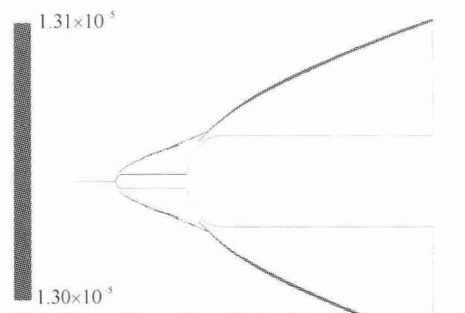


Fig. 6 Schlieren figure at 0° attack angle with simulation

图 6 零攻角纹影图计算结果

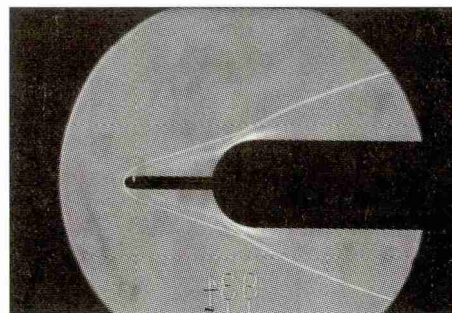


Fig. 7 Schlieren figure at 0° attack angle in experiment

图 7 零攻角纹影图实验结果

图 8 为 0° 攻角静压曲线计算与实验对比, 图 9 为 4° 攻角迎风面静压曲线计算与实验对比, 从图中可以看出不同攻角条件下计算结果均与实验结果吻合良好, 证明了该套流场计算算法的可靠性。

3 结果与讨论

3.1 典型条件耦合结果

对于典型的 $6Ma$ 耦合条件, 选取 1 s 时刻为关注时刻。图 10 为流场求解器获得 1 s 时刻截面温度图, 其中高温区主要位于激光作用区域, 在流动上游一端也有温度较高的位置。图 11 为计算得到的截面压力云图, 可见明显的激波效果。

将激光作用区域放大, 图 12~13 分别为平板激光区域的温度分布云图和曲线图。从图中可以看出, 激光核心区域的温度在 1000 K 左右, 平板周边区域温度为 350 K, 激光核心区域的加热效果很明显。此外, 从图 13 可以看出耦合计算时无论是从 FLUENT 还是从 ANSYS 中提取出的温度分布数据是基本相符的。

为了分析流场与结构的换热情况, 得到图 14 表征交界面流场区域的热流密度图, 所有值均为负值, 表示热量从流场流向结构, 即该马赫数下为气动加热过程。图中可见上游平板前段气动加热效应最为明显, 之后依次

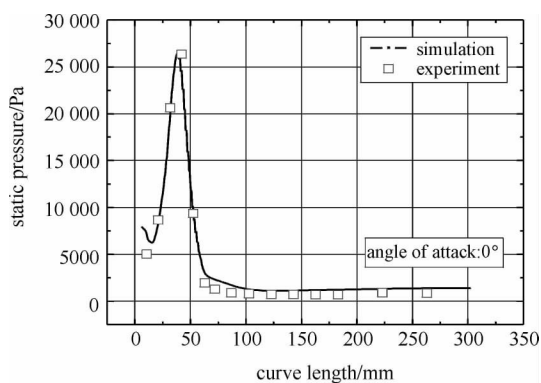


Fig. 8 Static pressure comparison of simulation and experiment at zero angle of attack

图 8 零攻角静压曲线计算与实验对比

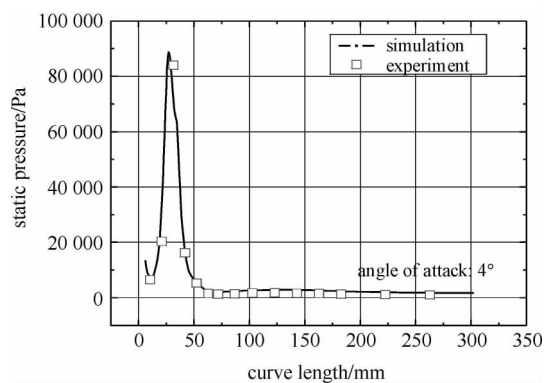


Fig. 9 Static pressure comparison of simulation and experiment at four angle of attack

图 9 攻角 4°迎风面静压曲线计算与实验对比

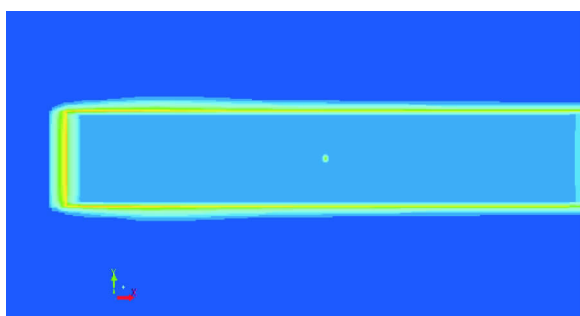


Fig. 10 Temperature distribution around panel

图 10 平板周边温度分布

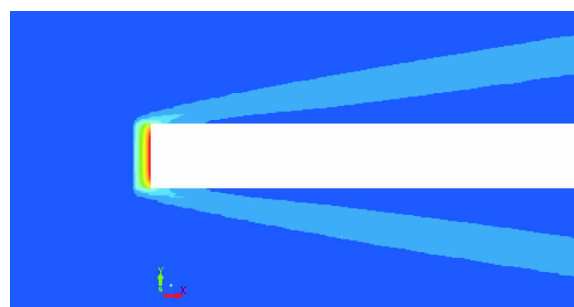


Fig. 11 Pressure distribution around panel

图 11 平板周边压力分布

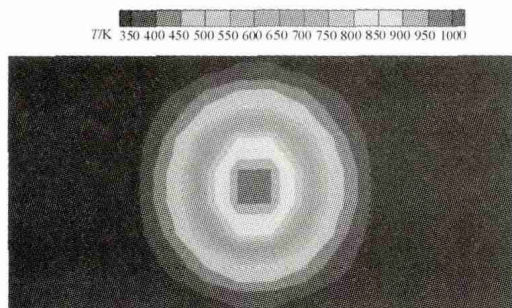


Fig. 12 Temperature distribution in the laser domain

图 12 激光核心区域温度分布云图

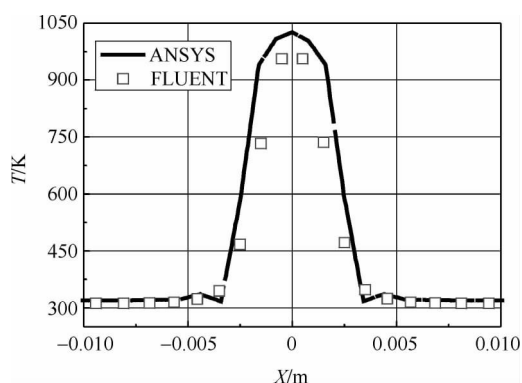


Fig. 13 Temperature distribution in laser domain

图 13 激光核心区域温度分布曲线

递减。而激光作用区域由于激光导致当地壁面温度很高,因此流场对结构的加热效果最弱。

3.2 马赫数对耦合结果影响

计算了进口条件为 $0Ma$, $4Ma$, $6Ma$, $8Ma$, $10Ma$ 条件下耦合的情况,其中 $0Ma$ 为仅考虑激光的加热作用。图 15 为 $1s$ 激光核心区域温度峰值随 Ma 数的变化规律。可见随着 Ma 数的增加温度呈现出了先减小再增加的趋势。即当 $Ma < 6$ 时,流体对激光作用区域主要体现为气动冷却的效果,而当 $Ma > 6$ 时,流体对激光作用区域主要体现为气动加热的效果。

3.3 攻角对耦合结果的影响

为了分析不同来流攻角对激光辐照平板耦合作用效果的影响,计算了 $6Ma$ 来流条件下攻角为 0° , 2° , 4° , 5° , 8° , 10° 的几种工况。图 16 为激光核心区域温度峰值随攻角的变化规律,图 17 为平板其他区域(除激光核心

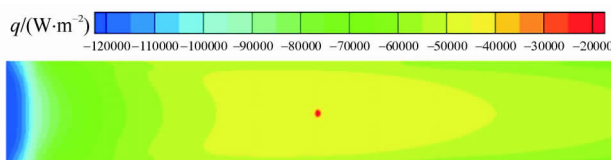


Fig. 14 Boundary heat flux distribution on plane

图 14 壁面能流密度分布

区域)温度随攻角的变化规律。可见在给定 Ma 条件下,随着攻角的增加,激光核心区域的温度呈下降趋势,而其他区域呈现出明显的上升趋势。解释为随着攻角的增加,气动本身的加热效果是增加的,也可以理解为气流的绝热壁温提高导致非照射区温度升高了。但与此同时,随着攻角增加,流过平板的气流质量流量也提高(图 18 所示),其意味着有更多的流体能够从激光照射区域带走热量,即冷却效果也会提高。

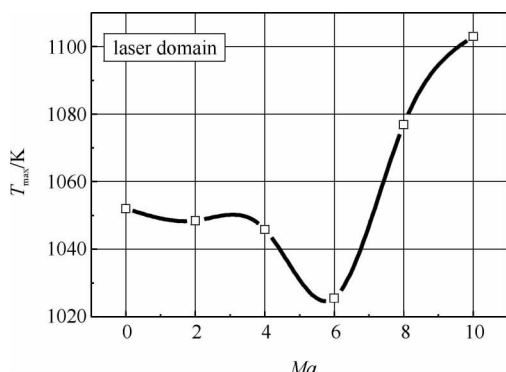


Fig. 15 Variation of peak temperature in laser domain with Ma

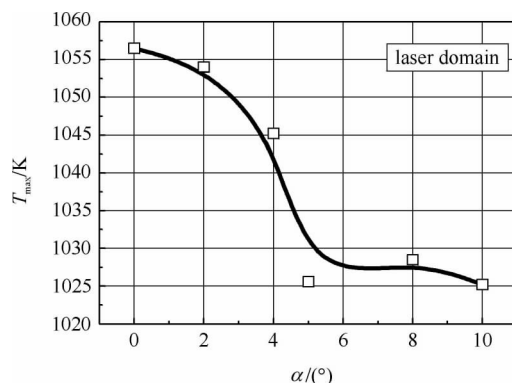


Fig. 16 Variation of peak temperature in laser domain with angle of attack

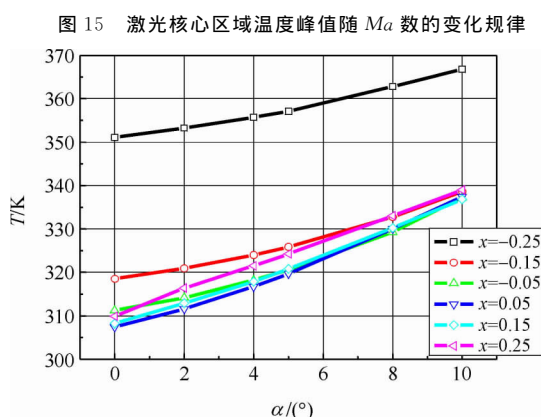


Fig. 17 Variation of temperature in domain except laser with angle of attack

17 平板其他区域(除激光核心区域)温度随攻角的变化规律

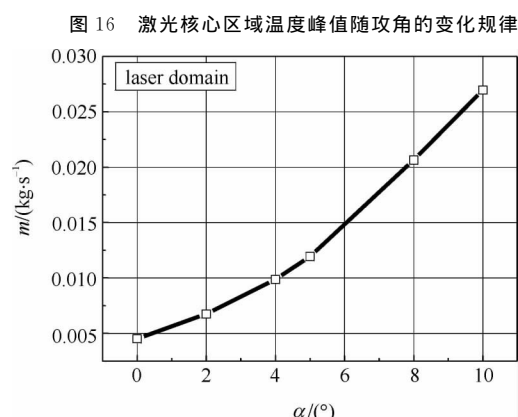


Fig. 18 Variation of flow mass in laser domain with angle of attack

图 18 激光核心区域气流质量流量随攻角的变化规律

因此综合前文所述马赫数的影响分析,流场对于激光辐照区域的加热或者冷却效果并非单一的。加热效果主要源自气流在壁面处的滞止效果带来的绝热壁温的提高,体现为由绝热壁温的气流向结构内进行传热;而冷却效果主要表现为气流的流动效果从激光作用区域带走热量。前者的主控参数为绝热壁温,后者为当地质量流量。因而,对于不同的马赫数条件下,攻角对温度的影响结果可能有所不同,但总体应遵循与典型工况类似的趋势,即大攻角条件下来流对激光核心区域有气动冷却的效果,而对平板其他区域为气动加热的效果。

4 结 论

建立了基于 CFD 与有限元结合的热流固耦合方法,典型工况下获得了温度分布,能够确认流场与结构求解器之间数据得到了合理的传递;对于不同马赫数,激光区域在 $6Ma$ 条件下存在温度的谷值, $6Ma$ 及以下主要体现为冷却效应,反之则主要体现为气动加热效应; $6Ma$ 条件下攻角增大会导致激光区流体质量流量的增加,使冷却效应更加明显,而无激光区的气动加热效果也随之增加;综合马赫数与攻角的影响,我们可以认为流场对于激光辐照区域的加热或者冷却效果并非单一,主要由气流的滞止效果和流动效果的总体效应决定。

参考文献:

[1] 袁红, 赵剑衡, 谭福利, 等. 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 15(5): 681-684. (Yuan Hong, Zhao Jianheng, Tan Fuli, et al. Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 15(5): 681-684)

[2] 王伟平, 唐小松, 桂元珍, 等. 激光对旋转金属壳的加热研究[J]. 应用激光, 2001, 21(5): 319-321. (Wang Weiping, Tang Xiaosong, Gui

- Yuanzhen, et al. Laser thermal effects on rotating metal shell. *Applied Laser*, 2001, **21**(5): 319-321)
- [3] 赵剑衡, 章冠人, 刘绪发. 强激光辐照下柱壳温度场的数值模拟[J]. 高压物理学报, 1996, **10**(1): 44-49. (Zhao Jianheng, Zhang Guanren, Liu Xufa. Numerical simulation of the temperature distribution on a tank wall under an intensive laser loading. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(1): 44-49)
- [4] 漆海滨, 李文煜. 强激光束对运动物体的加热[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(1): 33-35. (Qi Haibin, Li Wenyu. High-power laser beam heating up the moving body. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 33-35)
- [5] 张黎, 贺佳, 谭福利. 激光加热金属板流固耦合数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(4): 866-869. (Zhang Li, He Jia, Tan Fuli. Numerical simulation of metal plates under laser irradiation based on fluid-solid coupling. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(4): 866-869)
- [6] 张健, 黄晨光. 外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, **11**(2): 1818-1821. (Zhang Jian, Huang Chengguang. Numerical simulation of air flow effect on moving body under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **11**(2): 1818-1821.)
- [7] 石卫波, 李四新, 肖雨, 等. 气动加热对高超声速飞行器激光毁伤效应影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(6): 1215-1218. (Shi Weibo, Li Sixin, Xiao Yu, et al. Laser lethality of hypersonic vehicles under aero-heating. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(6): 1215-1218)
- [8] 张家雷, 刘国栋, 王伟平, 等. 激光对碳纤维增强复合材料的热烧蚀数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(8): 1888-1892. (Zhang Jialei, Liu Guodong, Wang Weiping, et al. Simulation to thermal ablation of carbon fiber reinforced composites under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(8): 1888-1892)
- [9] 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(5): 1075-1080. (Chen Minsun, Jiang Houman, Jiao Luguang, et al. Laser irradiation effects on glass fiber composite subjected to tangential gas flow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(5): 1075-1080)
- [10] 黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光. 超声速气流下强激光辐照靶体失效数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(9): 2229-2234. (Huang Yihui, Song Hongwei, Huang Chengguang. Numerical simulation of failure of target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(9): 2229-2234)
- [11] 陈华, 汤文辉, 冉宪文, 等. 激光辐照柱体铝靶的三维光滑粒子流体动力学仿真[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(12): 2802-2806. (Chen Hua, Tang Wenhui, Ran Xianwen, et al. Three-dimensional smoothed particle hydrodynamics numerical simulation of laser irradiating columnar aluminum target. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(12): 2802-2806)

Numerical simulation on coupling effect of laser irradiation in supersonic flow

Wu Xiaocui¹, Wang Yiwei¹, Cheng Xinxin², Huang Chengguang¹, Wu Chenwu²

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Interaction between structures and laser irradiation is a complex multi-physics process with heat-fluid-solid coupling effects. Laser irradiation on a plate in supersonic flow is simulated. Computational fluid dynamics (CFD) and Finite Element Method (FEM) software are adopted, while MPCCI is used to exchange the data between fluid and solid solvers. Moreover, Mach number and attack angle are derived as control parameters using theoretical analysis. Numerical results indicate that the cooling effect is dominant when the Mach number is less than 6, while aerodynamic heating effect is more important when the Mach number is greater than 6. The cooling effect becomes more remarkable as the attack angle increases. Finally, the mechanism of heating and cooling of aerodynamic flow field are analyzed comprehensively.

Key words: supersonic; laser irradiation; flow thermal coupling; numerical simulation; angle of attack

PACS: 47.40.Ki; 47.55.pd; 47.11.Fg; 47.11.-j