

文章编号: 1001-4322(2013)09-2229-06

超声速气流下强激光辐照靶体失效数值模拟^{*}

黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光

(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)

摘 要: 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。结果表明: 激光功率密度对失效辐照时间影响显著; 存在一个临界马赫数, 使得达到屈服失效和熔融失效的辐照时间最长。通过定量分析激光辐照下不同马赫数的气动生热、散热及能量分配, 解释了临界马赫数存在的机理。

关键词: 激光辐照; 超声速流动; 热流固耦合; 屈服; 熔融

中图分类号: V211.3; TN24 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/HPLPB20132509.2229

超声速气流作用下强激光辐照靶体结构的失效行为是工程上和学术上都非常关注的问题^[1]。由于受到超声速气流的影响, 破坏行为与没有流场介入的情况具有显著差异。Boley 等人在试验中发现, 由于气动压差和热软化效应的联合作用, 亚声速切向气流对激光辐照铝板的破坏行为有显著影响, 靶体在到达熔点之前即被击穿, 与无气流作用下的熔融破坏显著不同^[2-3]。有流场介入的激光辐照破坏是一个典型的热流固耦合问题, 对数值模拟方法提出了较高的要求。在激光和流场的共同作用下, 结构可能会以烧蚀熔穿、塑性屈服、屈曲失稳以及断裂层裂等模式发生破坏。赵剑衡^[4-5]、陈裕泽^[6]等人研究了激光辐照内压以及轴压柱壳的破坏, 但均未考虑流场影响。郑艳丽^[7]、李鹏飞^[8]、胡鹏^[9]等人对气流作用下激光辐照结构的耦合传热进行了研究, 仅研究了气流对结构温度场的影响, 没有对结构热变形以及失效进行分析。石卫波^[10]等人对高超声速飞行器激光毁伤效应及气动加热影响进行了数值模拟, 计算时气动热与激光能量假定为线性叠加。张健^[11]等人对外部流场作用下激光加热结构的温度、应力及变形进行了数值模拟, 仅分析了亚音速流场, 也没有分析激光能量和气流速度变化对结构的影响。

本文针对超声速靶体, 给出了较为完整的激光-靶体-流场的热流固耦合数值建模方法与策略, 考虑了流场换热以及气动压力对结构的影响以及结构传热和变形对流场的反作用。在此数值模型基础上, 研究了超声速靶体发生屈服和熔融失效的时间随激光能量和来流速度的变化规律。并定量分析了激光辐照下不同马赫数的气动生热、散热以及能量分配机理。

1 控制方程及耦合策略

1.1 基本控制方程

考虑结构变形对导热影响的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} (k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \beta T \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{ii} \epsilon_i) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 是材料的密度; c 为比热容; k 为导热系数; $\beta = \alpha E / (1 - 2\nu)$ 为热力系数, α 为材料的热膨胀系数, E 为弹性模量, ν 为泊松比; 方程最后一项表征的是结构变形对热传导的影响。光斑区域有 $-k \frac{\partial T}{\partial n} = AI$, 其中 I 为激光面热源热流密度, A 为吸收系数, n 为边界法向。

对于金属结构, 采用热弹塑性本构

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^t \quad (2)$$

式中: $d\epsilon_{ij}^e$ 为弹性应变增量; $d\epsilon_{ij}^p$ 为塑性应变增量; $d\epsilon_{ij}^t$ 为热应变增量。

^{*} 收稿日期: 2012-12-16; 修订日期: 2013-04-15

基金项目: 国家高技术发展计划项目; 国家自然科学基金重大研究计划项目(91016025)

作者简介: 黄亿辉(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光破坏效应研究; huangyihui10@mails.ucas.ac.cn.

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E}d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}d\sigma_{kk}\delta_{ij} \tag{3}$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{H} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \tag{4}$$

$$d\epsilon_{ij}^t = \alpha dT\delta_{ij} \tag{5}$$

式中： H 为塑性模量； f 为 Mises 屈服面。

在激光辐照下，靶体材料会经历巨大的升温历程，材料热物理性能和力学性能均随温度发生显著的变化。在实际计算中考虑了各参数随温度变化的非线性效应，材料本构采用随温度变化的双线性随动强化模型。

在流体计算中，考虑到超声速流动空气的性质及结构温度变形场的非均匀性，将流动看作三维可压缩粘性理想气体流动，采用 SST 湍流模型。

1.2 计算流程

采用如图 1 所示的数值计算流程。结构响应和流场响应分别采用有限元和 CFD 进行模拟，重点考虑流固界面处的耦合关系。

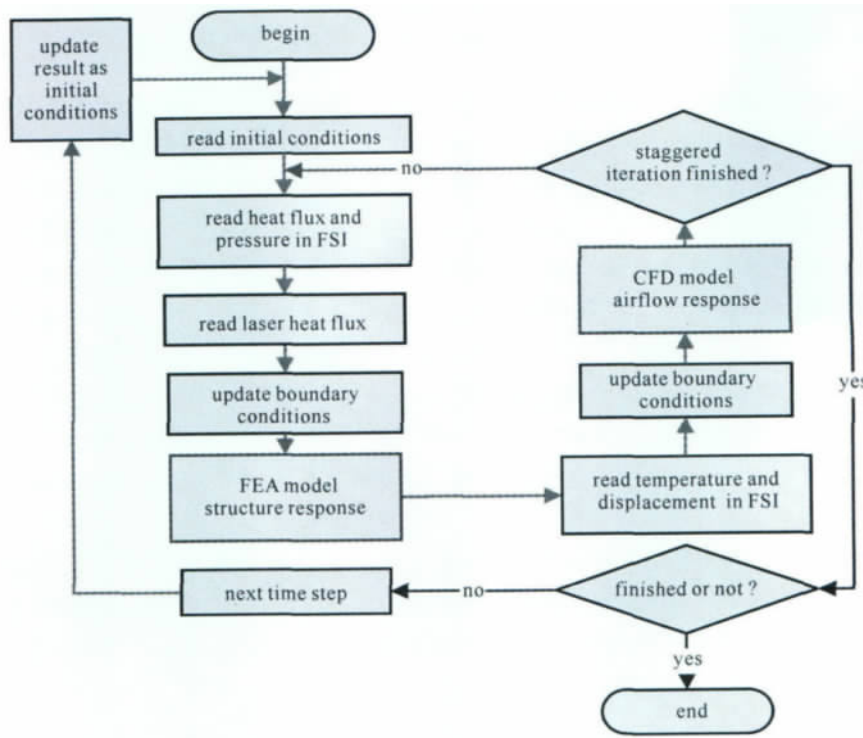


Fig.1 Flow chart of coupled thermal-fluid-structure numerical modeling (FSI means fluid-structure interface)

图 1 热流固耦合数值计算流程图(FSI 为流固界面)

在每一个时间步，结构通过流固界面将温度和变形计算结果向流场传递，保证温度和变形(无滑移)的连续

$$T|_s = T|_f \tag{6}$$

$$u|_s = u|_f \tag{7}$$

流场通过流固界面将每一个时间步的热流和压力计算结果向结构传递，保证界面处的热流和压力的连续

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_s = h(T_w - T_f) \tag{8}$$

$$p_i = \sigma_{ij}n_j \tag{9}$$

式中： h 为流固界面处的换热系数。由此形成循环迭代，直至该时间步内计算结果收敛，然后进入下一时间步的求解。

1.3 不同耦合策略影响

针对激光辐照高速飞行靶体开展算例研究。结构的尺寸及流场网格图如图 2 所示。结构材料为 LC4 铝合金，采用理想气体模型及全结构化网格，流体边界层第一层网格厚度为 10^{-5} m，计算中进行了网格无关性验证，激光作用区网格进行了加密。激光光斑半径 $r_0 = 0.15$ m，呈高斯分布热流

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] \tag{10}$$

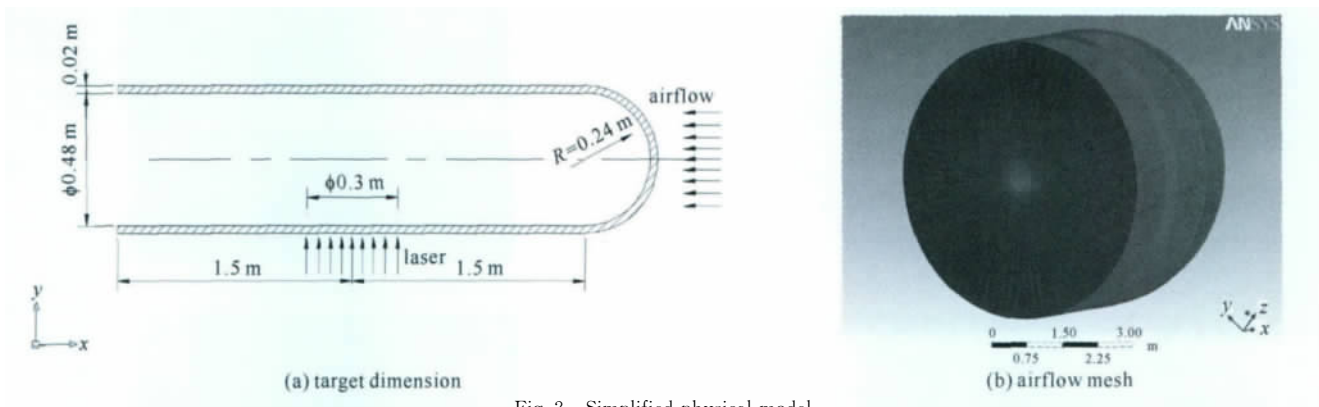


Fig. 2 Simplified physical model

图 2 简化的物理模型

其中 I_0 为激光作用中心点功率密度。针对 $I_0 = 500 \text{ W/cm}^2$ ，来流 $Ma=2$ 的基本算例，考虑不同情况激光中心区域温升历程计算结果如图 3 所示。其中，算例 1 为耦合传递数据时，流场向结构传递热流和压力，结构向流场传递温度和变形；算例 2 为耦合传递数据时，流场只向结构传递热流，结构只向流场传递温度；算例 3 为没有流场影响下结构温升过程。在 3 s 时刻，三种耦合策略计算获得的激光作用中心点温度分别为 733, 736 和 754 K，流场对温度计算结果的影响约为 5%（考虑 400 °C 左右的结构升温），气动压力引起结构变形对结构温度场计算结果的影响约为 1%。为使计算结果更为精确，计算过程中仍按算例 1 的耦合方式进行数据传递。

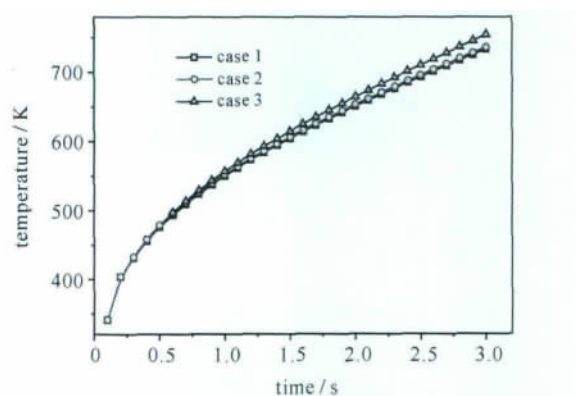


Fig. 3 Spot center temperature rise for different coupled methods

图 3 不同耦合策略激光中心区域温升历程

2 计算结果分析

2.1 流场和结构主要计算结果

图 4 为基本算例 ($I_0 = 500 \text{ W/cm}^2, Ma=2$) 的流场主要计算结果。激波引起速度、压力和温度的间断，柱壳头部出现高温高压区，流固界面处激光辐照区域气流温升显著。图 5 为结构主要计算结果，光斑区的温度和变形随辐照时间显著升高。1 s 时刻激光作用中心区已发生屈服，到 2, 3 s 时刻，屈服面积急剧增大。由图 5 (c) 可以看出，1 s 时刻以后，激光作用中心区的应力水平比周围要低，这是因为高温时材料的屈服强度显著下降所致。随着屈服面和熔融面的扩大，靶体结构有可能发生整体失效。本文以结构发生屈服和熔融为失效判据，以达到屈服强度 σ_{yield} 所需要的辐照时间 t_{yield} ，和达到熔融温度 T_{melt} 所需要的辐照时间 t_{melt} 为度量，研究不同参数对激光破坏行为的影响规律。

2.2 功率密度对热结构响应的影响

随着激光功率密度发生改变，结构发生屈服和熔融失效所需要的时间如图 6 所示 (来流 $Ma=2$)。可见， t_{yield} 和 t_{melt} 随功率密度增加迅速减小，且 t_{yield} 显著小于 t_{melt} ；当 I_0 达到 2000 W/cm^2 后， t_{yield} 和 t_{melt} 变化不再显著，且屈服和熔融几乎是同时发生的。

2.3 来流马赫数对热结构响应的影响

当激光功率密度 $I_0 = 500 \text{ W/cm}^2$ 时，图 7 给出来流马赫数对发生屈服和熔融失效所需的辐照时间的影响，其中 $Ma=0$ 对应的是无气流的条件。随马赫数增加， t_{yield} 和 t_{melt} 均出现先增大后减小的趋势，即存在一个临界马赫数，使得结构发生屈服和熔融失效最难发生。对于 $I_0 = 500 \text{ W/cm}^2$ ，临界马赫数在 $Ma=2$ 附近。

图 8(a) 给出了不同来流马赫数 ($Ma=1.2 \sim 4.0$) 下激光作用中心区由气流引起的热流密度随辐照时间的变化，图 8(b) 以 $Ma=4$ 为例进行能量分配关系的定量分析。根据牛顿冷却定律，气动热流密度为

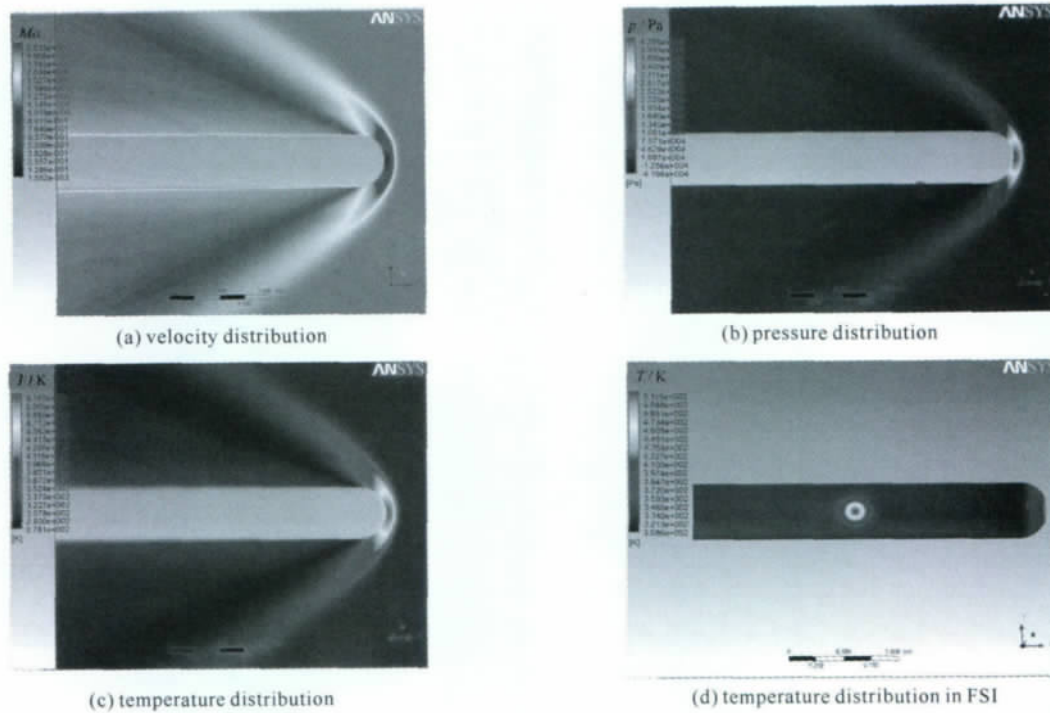


Fig. 4 Results at 3 s for airflow

图 4 流场 3 s 时刻计算结果

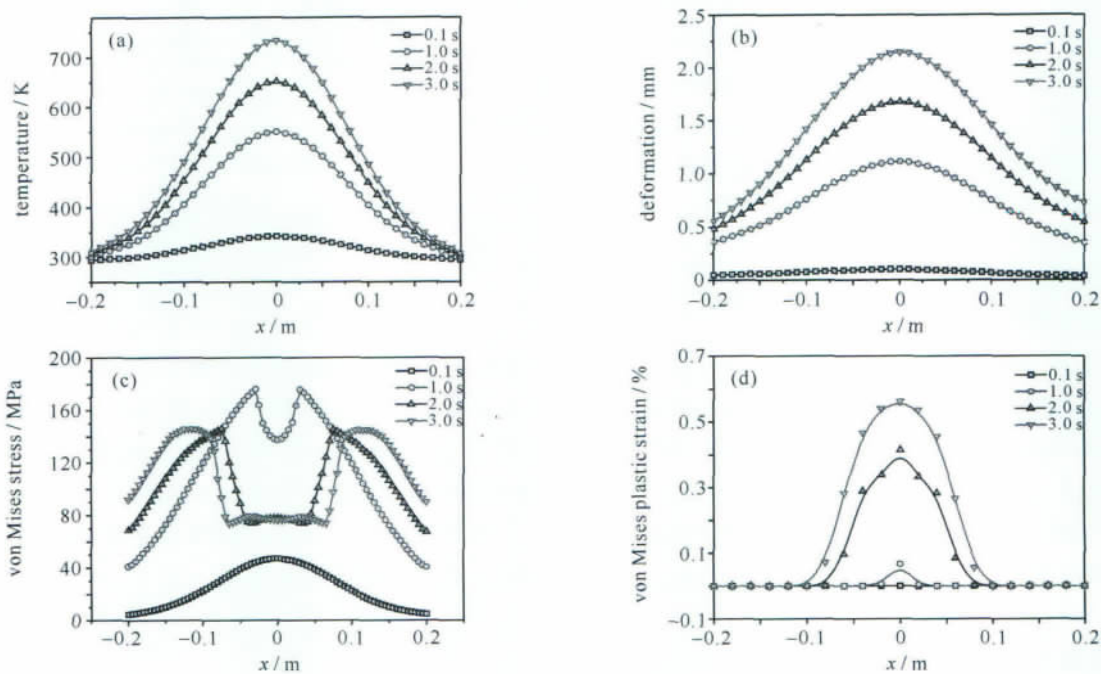


Fig. 5 Thermal structure response for laser irradiation region

图 5 激光辐照区热-结构响应

$$q(t) = h(t)[T_w(t) - T_f(t)] \tag{11}$$

$T_w(t)$ 和 $T_f(t)$ 分别为瞬时结构壁温和环境气体温度。由图 8 可知,对于某一马赫数的来流,存在一个临界时间 t_c ,使得气流引起的热流为零,即 $T_w(t) = T_f(t)$ 。在 t_c 时刻以前,由于激光加热引起的结构温升尚未超过环境气体温度,因此表现为气动加热的效应,热流密度为负;在 t_c 时刻以后,激光的持续加热使得结构壁温大于环境气体温度,表现为气动冷却的效应,热流密度为正。为此,定义气流引起的净能量耗散为

$$Q_{\text{netloss}} = \int_0^{t_0} q(t) dt = - \int_0^{t_c} |q(t)| dt + \int_{t_c}^{t_0} q(t) dt \tag{12}$$

图 8(b)中两处阴影面积之差即是 Q_{netloss} 。将不同马赫数下 Q_{netloss} 与到达熔融所需辐照时间进行比较,如图

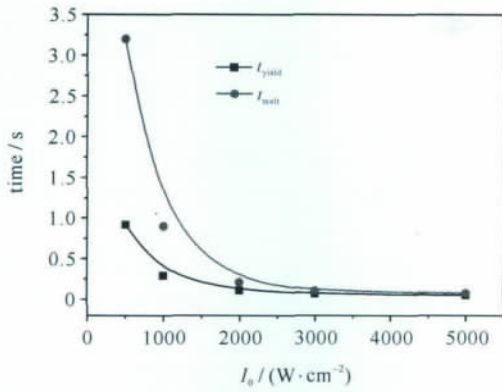


Fig. 6 Irradiation times for yield and melting failure as laser power changes

图 6 不同激光功率密度下结构发生屈服和熔融失效的时间

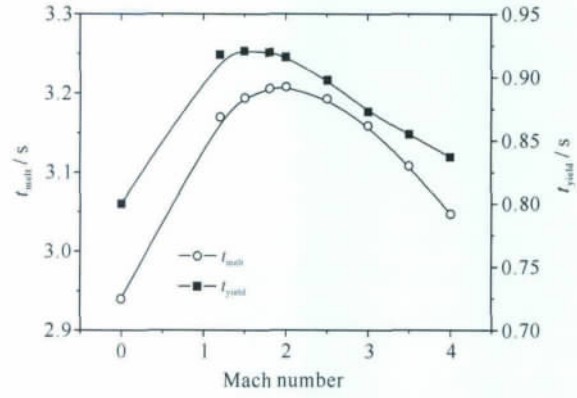
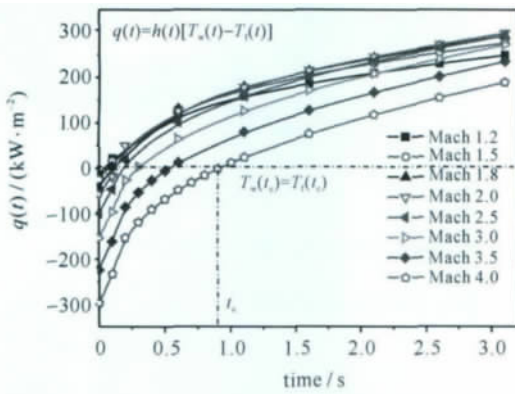


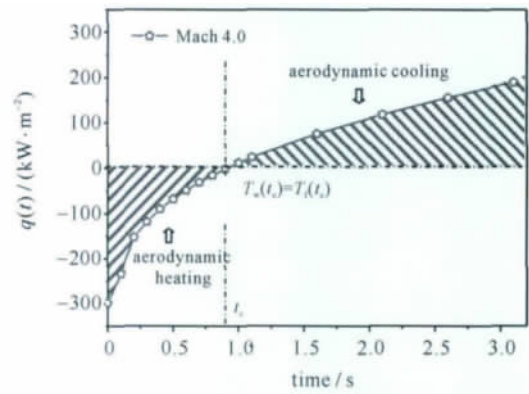
Fig. 7 Irradiation times for yield and melting failure as Mach number changes

图 7 不同马赫数下发生屈服和熔融失效的辐照时间

9 所示,发现两条曲线有相似的趋势。当激光输入能量一定且结构热沉一定时,结构温度响应主要受到气流的影响。 $Q_{netloss}$ 越大,表明一定时间内气流带走的热量越多,冷却效果越明显,因此结构发生熔融破坏所需的时间越长。可见,临界马赫数存在的根源是由于不同马赫数下气动加热与气动冷却两种机制相互竞争的结果。



(a) heat flux vs irradiation time for different Mach numbers



(b) illustration for aerodynamic heating and cooling

Fig. 8 Heat flux taken by airflow for spot center

图 8 激光作用区域气流引起的热流密度随时间变化

3 结 论

初步建立了能够反映激光、流场和靶体结构相互作用效应的热流固耦合数值计算方法,对耦合策略的探讨表明,流场与结构耦合作用对计算结果影响较大。激光的功率密度和来流马赫数对结构发生屈服和熔融失效所需的辐照时间影响显著,存在一个临界的马赫数,使得屈服和熔融失效所需的辐照时间最长,其物理机制主要是由于不同来流马赫数下的气动加热和气动冷却两种机制相互竞争的结果。需要注意的是,本文数值计算采用相同的激光到靶功率,未考虑不同马赫数下的激光吸收系数的差异,主要是考虑到目前相关的试验数据还很不完备。

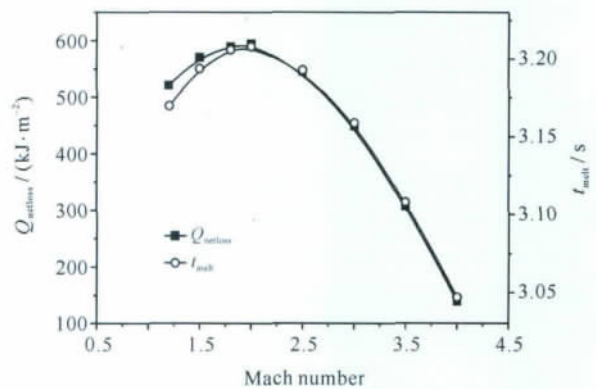


Fig. 9 Net heat loss and irradiation time for melting failure as Mach number changes

图 9 气流引起能量耗散和发生熔融时间随马赫数变化

参考文献:

[1] 孙承纬,范正修,陈裕泽,等. 强激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:1-151. (Sun Chengwei, Fan Zhengxiu, Chen Yuze, et al. High power laser irradiation effects. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:1-151)

[2] Abbott R P, Boley C D, Fochs S N, et al. High-power solid-state laser: Lethality testing and modeling[R]. UCRL-CONF-224732. 2006.

[3] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Lethality effects of a high-power solid-state laser[J]. *Journal of Directed Energy*, 2007, 3(1): 15-

- 24.
- [4] 赵剑衡,孙承纬,袁永华,等. 激光辐照下充压圆柱壳爆裂规律的实验研究[J]. 应用激光, 1998, **18**(5):196-200. (Zhao Jianheng, Sun Chengwei, Yuan Yonghua, et al. Experimental study on the rupture regulation of inner-pressurized cylindrical shells under laser beam loading. *Applied Laser*, 1998, **18**(5):196-200)
- [5] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 激光辐照下充压柱壳结构变形的数值模拟[J]. 高压物理学报, 1996, **10**(4):262-268. (Zhao Jianheng, Zhang Guanren, Liu Xufa. A numerical simulation to the deformation of an internally pressured cylinder tank under intensive laser irradiation. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(4):262-268)
- [6] 陈裕泽,李思忠. 轴压柱壳在连续波激光辐照下的屈曲破坏[J]. 强激光与粒子束, 1995, **7**(3):404-408. (Chen Yuze, Li Sizhong. Bulking failure of the axially pressed cylindrical shell irradiated by CW CO₂ laser beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3):404-408)
- [7] 郑艳丽,杜太焦,束庆邦,等. 不同气流环境下激光辐照金属材料温升的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(11):2531-2534. (Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qingbang, et al. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiation by high power laser beam in different airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11):2531-2534)
- [8] 李鹏飞,吴颂平. 二维圆柱在高超声速气流中的耦合传热计算[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(6):34-37. (Li Pengfei, Wu Songping. Coupling calculation of heat conduction in 2D column in hypersonic flows. *Missiles and Space Vehicles*, 2010(6):34-37)
- [9] 胡鹏,陈发良. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(7):1935-1939. (Hu Peng, Chen Faliang. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(7):1935-1939)
- [10] 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)
- [11] 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, **19**(11):1817-1821. (Zhang Jian, Huang Chenguang. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11):1817-1821)

Numerical simulation of failure of target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow

Huang Yihui, Song Hongwei, Huang Chenguang

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A preliminary coupled thermal-fluid-structure numerical method which reflects interaction of laser, airflow and target is presented, in order to investigate failure behavior of the target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow (at Mach number 1.2-4.0). The influences of different coupling methods on the target temperature are investigated. Also, the influences of laser power density and airflow velocity on the failure behavior of the irradiated target are investigated, where irradiation times to reach the yield failure and melting failure are the main concern. Results show that, laser power density significantly affects the failure behavior; there is a critical Mach number at which irradiation times to reach yield failure and melting failure are the longest. By quantitatively evaluating the aerodynamic heating, aerodynamic cooling and energy distribution for different Mach numbers, we explain the mechanism for the critical Mach number.

Key words: laser irradiation; supersonic airflow; thermal-fluid-structure coupling; yield; melting