

# 激光辐照诱导的热与力学效应

宋宏伟 黄晨光<sup>†</sup>

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** 对激光辐照诱导的热与力学问题研究进展进行了综述, 包括材料在高温、高升温速率下的本构关系, 典型薄板和柱壳等结构在激光辐照下的热力破坏效应, 多层材料体系的激光破坏行为等几个方面, 并着重介绍了包含相变与烧蚀过程的激光破坏分析模型与机制研究, 激光辐照效应的流-热-固耦合数值模拟方法, 以及短脉冲激光引起的冲击与破坏机理等方面的研究新进展.

**关键词** 激光, 本构关系, 热力破坏, 烧蚀, 流-热-固耦合, 冲击

中图分类号: V412.4 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-15-025

收稿日期: 2015-05-29; 录用日期: 2016-04-21; 在线出版日期: 2016-05-05

<sup>†</sup> E-mail: huangcg@imech.ac.cn

引用方式: 宋宏伟, 黄晨光. 激光辐照诱导的热与力学效应. 力学进展, 2016, 46: 201610

Song H W, Huang C G. Progress in thermal-mechanical effects induced by laser.

*Advances in Mechanics*, 2016, 46: 201610

© 2016 《力学进展》版权所有

## 1 引 言

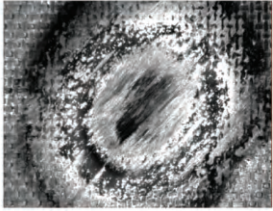
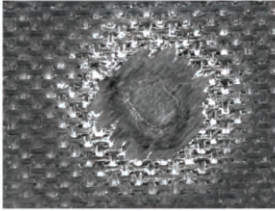
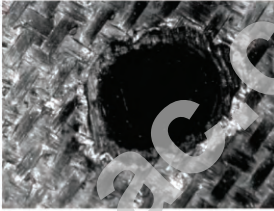
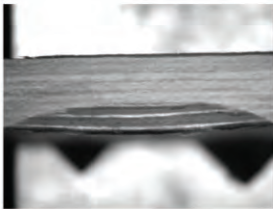
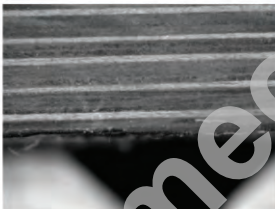

随着高能量、高功率密度激光技术日新月异的发展,激光诱导的热与力学问题越来越引起国内外学者的关注,成为以激光加工与制造为背景的工艺力学、以核应用为背景的动高压物理、以激光武器为背景的破坏效应等领域研究的共性基础科学问题。在我国,力学工作者很早就介入并主导了激光诱导的热与力学效应研究。1964年3月,中国科学院力学研究所牵头承担了国家强激光破坏效应的相关研究。20世纪80年代,由于强激光技术的快速发展,中国工程物理研究院、中国科学院力学研究所、国防科学技术大学等单位的工作使我国强激光热和力学效应的研究进入了一个快速发展阶段。

本文主要以激光破坏效应为背景,综述近年来国内外在激光辐照诱导的热与力学效应领域的研究进展。强激光对靶体的毁伤机理和破坏阈值,与激光参数、靶体材料与结构参数、环境与载荷参数等三个方面密切相关,涉及激光与流体、固体、等离子体等多种形态物质的相互作用与能量转化,以及烧蚀、相变、屈曲、热断裂、层裂等多种物理及化学过程诱导的热-力损伤与破坏现象,具有显著的多场、多尺度和非正常、非线性的特点。

不同功率密度的激光辐照靶体,会引起加热、熔融、升华和电离等不同的热致效应,以及热应力与热冲击等静、动力学效应。一般来说,较低功率密度( $10^4 \text{ W/cm}^2$ 以下)的激光会引起靶材局部加热、热应力乃至熔融等热效应和热力耦合效应;中等功率密度( $10^4 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ )的激光辐照下,靶材以熔融、烧蚀、气化等相变行为及其诱导的力学效应为主;激光功率密度在 $10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上,会诱导靶材生成等离子体并引起高幅值冲击波,激光辐照主要表现为冲击效应,在靶材很薄的区域中可能发生层裂形式的动力学破坏(Sun et al. 1996)。我们(Wu et al. 2015)近期的部分试验结果显示,连续激光会引起碳纤维复合材料(CFRP)的热解和脱层破坏,在高功率密度的长脉冲激光重复作用下该材料则因气化而发生穿孔破坏,而相同输入能量的短脉冲激光则仅造成表面的轻微烧蚀,如表1所示。

激光诱导的破坏效应还与靶体的材料与结构参数密切相关。例如,强激光辐照下的金属靶体主要以熔穿或热力耦合引起的屈曲、断裂等形式发生破坏,而复合材料靶体则主要以热解、烧蚀或热力载荷引起的脱层等形式发生破坏。靶材的热物性能和力学性能也会显著影响激光破坏效果,例如, $300^\circ\text{C}$ 是铝合金材料力学性能开始发生明显变化的温度, $680^\circ\text{C}$ 是熔化温度,在 $300^\circ\text{C} \sim 680^\circ\text{C}$ 的范围之间,铝材料的弹性模量、屈服强度、断裂强度等急剧下降,而塑性变形能力则成倍地增加,因此在激光辐照下容易丧失原有的承载能力。

表1 不同激光参数下碳纤维复合材料损伤行为比较

编号	试验1: 连续激光	试验2: 短脉冲	试验3: 长脉冲
试验参数	功率: 100 W 作用时间: 10 s 输入能量: 1 000 J	脉宽: 10 ns/10 Hz 单脉冲能量: 2.5 J 作用时间: 10 s 输入能量: 250 J	脉宽: 200 ns/10 Hz 单脉冲能量: 2.5 J 作用时间: 10 s 输入能量: 250 J
俯视图			
侧视图			

研究激光对靶体的破坏行为, 还要充分考虑其所承受的服役环境与载荷特征, 重视诸如气动载荷、惯性载荷、工作内压、易燃和易爆物、软目标中易损部件等不利因素和薄弱环节. 例如, 人们之所以关注助推洲际弹体的激光拦截问题, 一方面是因为该阶段实施的拦截对我方损失最小、敌方损失最大(李清源 2012), 另一方面还利用了激光辐照损伤后的弹体结构在轴向过载作用下更易发生屈曲破坏的特点, 因此作战费比最高. 再如, 固体火箭发动机壳体以及液体火箭的燃料、氧化剂贮箱是典型的柱壳结构, 研究强激光辐照下内压柱壳结构破坏机理具有重要意义. 可以利用激光辐照诱导靶目标内的含能材料(炸药、推进剂等)升温、点火并发生剧烈的化学反应, 通过含能材料自身化学能的释放来摧毁靶目标. 另外, 目前受到广泛关注的高超声速飞行器在服役过程中承受着复杂、极端的热-力载荷, 热防护能力已经处于现有技术的极限状态. 在气动热载、燃烧释热、工作内压和飞行过载的联合作用下, 结构的安全裕度本已不高, 额外的强激光能量有可能诱发穿孔、断裂、失稳等破坏行为, 从而使飞行器结构丧失完整性.

可见, 激光诱导的热-力效应研究体系十分丰富, 包含的主要内容有材料在相关条件下的力学性能和热物理性能, 材料的激光耦合性能, 结构的破坏模式, 典型构件在热-力加载下的破坏阈值, 激光破坏的环境效应, 相关的数值模拟技术和试验测试技术等(黄晨光等 2004).

## 2 材料在高温及高温升速率下的本构关系

在高功率连续激光辐照下, 靶体的升温速率通常在  $10^2 \sim 10^3 \text{ K/s}$  量级, 变形速率通常在  $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  量级. 研究表明, 常用的时效强化铝合金、钛合金、碳钢材料等在快速升温 ( $10^3 \text{ K/s}$ ) 下的力学性能与缓慢升温 ( $0.1 \text{ K/s}$ ) 下显著不同. Huang 等 (2007) 研究了防锈铝 LF6、超硬铝 LC4、锻造铝 LD10 和硬铝 LY12 在  $0.1 \sim 1000 \text{ K/s}$  范围内的 4 种升温速率下的力学性能. 图 1 表明, 升温速率较低时材料的抗拉强度也较低, 当升温速率达到  $1 \text{ K/s}$  后增加升温速率对抗拉强度的影响不再显著. 图 2 表明, 随着温度保持时间的增加, 材料的抗拉强度显著降低.

高温条件下不同加载速率下的应力应变曲线也有显著差别, 如图 3 所示 (Chen et al. 2008).

Chen 等 (2008) 在 Bodner-Partom 统一本构基础上, 除了考虑热-力载荷下的黏性项、应变硬化项以及材料微结构演化相关项, 还增加了热软化效应项

$$\left. \begin{aligned} d_x^p &= \frac{2D_0}{\sqrt{3}} \frac{\sigma}{|\sigma|} \exp \left[ - \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{3A^2}{\sigma^2} \right)^n \right] \\ A^2 &= \frac{1}{3} \left[ Z \exp(C_1 T'^{m_1}) \right]^2 \left( \frac{n+1}{n} \right)^{1/n} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp \left( -m \frac{W_p}{Z_0} \right) \\ W_p &= \sigma d_x^p, \quad T' = \frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

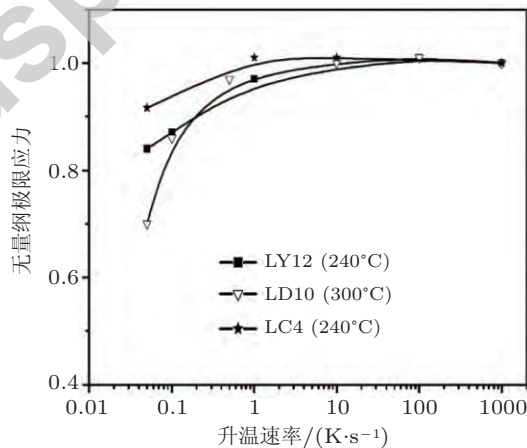


图 1

升温速率对抗拉强度的影响 (Huang et al. 2007)

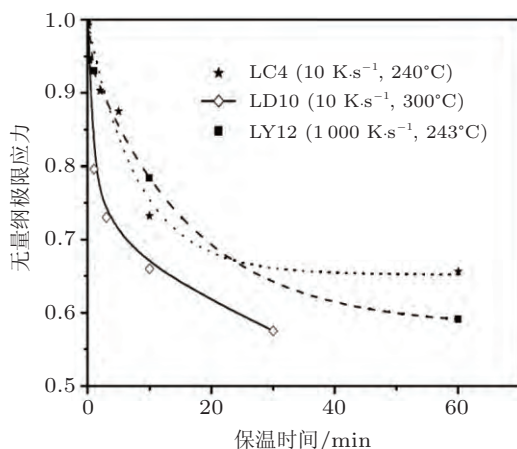


图 2

温度保持时间对抗拉强度的影响 (Huang et al. 2007)

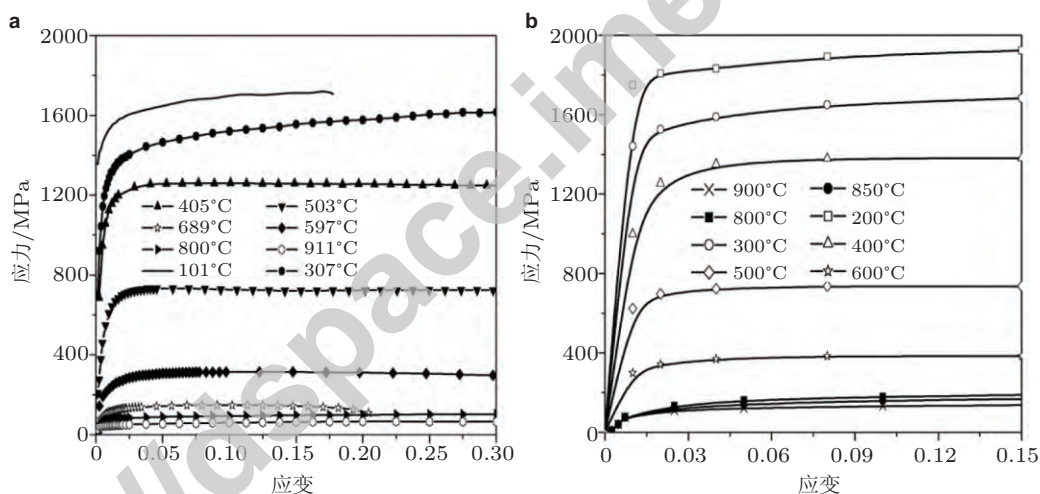


图 3

不同应变率下 30CrMnSiA 的应力 - 应变曲线 (Chen et al. 2008). (a) 应变率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , (b) 应变率为  $1 \text{ s}^{-1}$

其中,  $d_x^p$  为塑性应变率,  $W_p$  为塑性功,  $T'$  是无量纲温度,  $Z_0, Z_1, D_0, m, n, C_1, n_1$  是本构常数,  $Z$  代表与位错密度相关的变形历程,  $n$  与位错速度相关. 当温度从室温升至  $900^\circ\text{C}$  时, 应变率与屈服强度的指数关系表达式难以表达位错滑移、攀移等不同塑性变形机理. 为此, Chen 等 (2008) 提出了一个新的适用于更宽范围温度和应变率的本

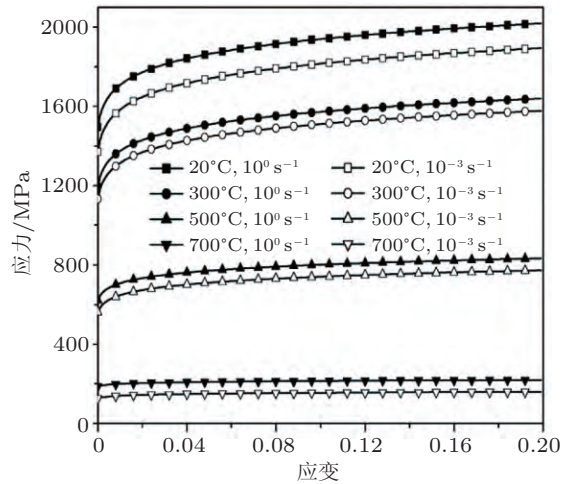


图 4

采用新的本构模型预测的 30CrMnSiA 力学性能 (Chen et al. 2008)

构模型, 用抛物型的公式来描述屈服强度与温度、应变率之间的关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (\sigma_0 + K_1 \varepsilon^m) \exp(C_1 T^{n_1}) + C \sinh^{-1}(z^{1/n}) \\ z &= \frac{\dot{\varepsilon}^p}{A \exp(-Q/RT)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $R$  是气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .  $T$  是绝对温度,  $Q$  是位错开动能.  $\sigma_0$ ,  $K_1$ ,  $m$ ,  $C_1$ ,  $n_1$ ,  $C$ ,  $n$  和  $A$  是试验拟合参数. 进一步采用新的本构模型预测了不同温度和加载速率下 30CrMnSiA 的力学性能, 如图 4 所示.

### 3 激光辐照金属薄板与柱壳的热-力效应

#### 3.1 激光辐照薄板的热-力效应

薄板与柱壳是激光破坏效应研究中所关注的基本单元.

在激光破坏效应研究的早期, Adachi 等 (1978) 对连续激光与外载共同作用下的平板结构破坏行为开展研究, 获得了包括激光功率密度与外载的破坏阈值. 陈海韬等 (1992) 实验研究了连续波  $\text{CO}_2$  激光辐照受拉铝合金板的破坏行为, 期望利用云纹法测定试件断裂前的应力分布, 由于受到高温的影响, 测试结果并不理想. 进一步对铝合金板的断口进行了观察, 并对裂纹产生位置进行了分析, 认为裂纹产生于与拉伸方向垂直的烧斑直径与烧斑边缘的两个交点上 (陈海韬等 1993). 一些学者针对入射激光功率密度对材料断裂强度的影响开展了研究, Zhang 等 (1996) 在实验中发现, 对于铝圆板受连续的 COIL 激光辐照的情况, 当激光功率密度从  $640 \text{ W}/\text{cm}^2$  增加到  $980 \text{ W}/\text{cm}^2$

时, 失效强度从约 250 MPa 线性下降到了 150 MPa. 强希文 (2000) 数值模拟了激光辐照金属圆板的温度场分布, 结合热弹性理论, 获得了金属圆板轴对称热应力计算公式, 并对合金钢薄圆板在 COIL 激光辐照下的热应力损伤进行了讨论. 陈裕泽 (1996) 研究了低功率密度激光辐照下结构的热动力失效, 发现热软化效应会引起受拉平板结构的应力、变形的重新分布, 容易导致平板断裂. 周益春等 (1995) 利用非高斯分布的激光辐照黄铜薄片, 发现了一种新的击穿破坏模式即“反冲塞效应”. 利用薄板热弹性理论对反冲塞效应进行了分析, 详细阐述了其产生的机制. 黄晨光等 (2002) 认为薄板的屈曲是“反冲塞效应”重要环节, 因此对强激光辐照下薄板铜片的动态热失稳过程进行了分析. 将静态和动态、含缺陷与不含缺陷结构的屈曲问题以统一的形式来研究, 求解了板中的温度场和热弹性薄板的控制方程, 利用小扰动方法和数值积分方法研究激光辐照下薄板的稳定性问题. 获得了简支圆薄板在热冲击下发生的屈曲及后屈曲过程, 并给出了临界激光功率密度与薄板厚径比的关系曲线, 该方法计入了温度分布、惯性项和缺陷大小对于失稳过程的影响. 陈小伟等 (1998) 推导了弹性薄圆板在热力联合作用下的弯曲动力响应方程, 发现热屈曲是弹性薄板的主要失效方式, 反鼓包或反冲塞是热屈曲的后继行为. 外加载荷和激光功率密度的增加都将加速热屈曲的发生, 材料热软化效应和激光的能量分布都会影响反冲塞发生. 陈小伟等 (1998) 利用 Berger 和 Galerkin 近似法, 导出了在连续激光与横向力联合作用下固支圆薄板的轴对称大挠度的表达式. 针对空间均匀和高斯型分布的激光束辐照, 采用理论和有限元法计算, 给出了板中心挠度. 随辐照时间及横向力的变化, 讨论了板中温度矩、温度膜力和材料参数的温度相关性对挠度的影响及温度场与横载联合对圆板大挠度的作用机制. 最近, 黄亿辉等 (2014) 利用三维数字图像相关技术和红外热像技术, 试验测量了四边固支薄板在激光辐照下的屈曲行为, 获得了全场变形过程, 如图 5 所示.

### 3.2 激光辐照柱壳结构的热-力效应

充压柱壳在激光辐照下的损伤与破坏机理引起了人们的广泛重视. 赵剑衡等 (1998) 研究了圆柱壳外径、内压、激光输出功率、光斑尺寸、激光能量空间分布等因素对激光辐照下充压圆柱壳爆裂的定量影响和产生爆裂的临界条件, 并发现柱壳上高的温度梯度不利于裂纹萌生和扩展. 唐志平 (2001) 应用三维离散元方法模拟了充压柱壳在激光辐照下的破坏过程并得到了试验验证. 结果表明, 在较低功率密度和较大光斑条件下, 光斑中央产生裂纹并沿轴向扩展引起破坏. 在高功率密度和小光斑条件下, 则产生中央穿孔破坏. 当铁合金材料的延展性较大时, 可能产生第三种破坏形式, 即在数十微秒量级产生较大面积的整体粉碎性爆裂. 谭福利等 (2004) 采用有限元模拟激光辐照下充压柱壳的应力和应变分布, 分析了柱壳裂纹萌生的可能位置和条件. 研究发现, 外热源加载的柱壳在时间较短、内压足够大时, 裂纹可能会在光斑边缘处产生并展开开

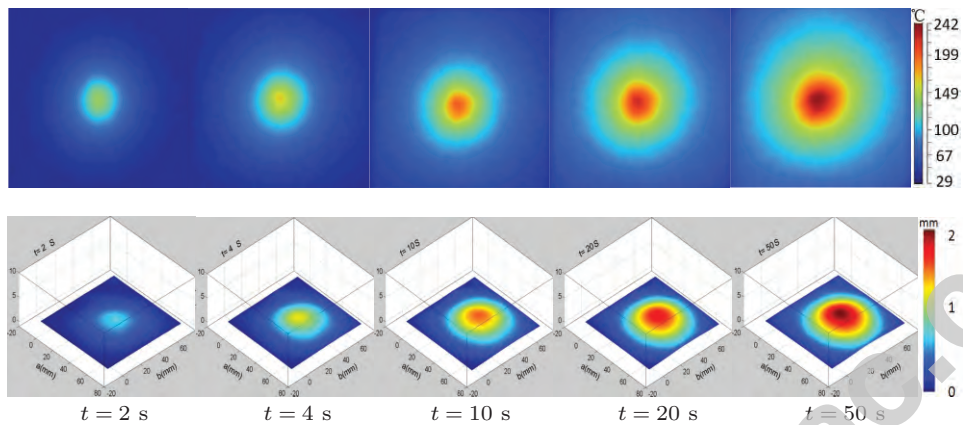


图 5

激光辐照薄板全场屈曲过程试验测量

来. 在不同时间、应力与抗拉强度之比分布不同, 过光斑中心的柱壳母线上的环向应力在柱壳裂纹的萌生中起主要作用. 张家雷等 (2010) 采用有限元方法模拟了激光辐照下充压柱壳的热力学响应, 根据材料强度准则判断了柱壳的破坏时刻, 并提出了一种预测激光辐照下充压柱壳破坏能量阈值的数值方法. 研究表明, 破坏能量密度阈值与壳体厚度、内压大小近似成线性关系, 壳体厚度比内压大小对柱壳的激光破坏能量阈值影响更大.

在轴压柱壳的激光热-力破坏方面, Chen 和 Li(1993) 在实验中发现, 圆柱壳在轴压预载和连续  $\text{CO}_2$  激光共同作用下容易发生屈曲, 且临界屈曲载荷随入射激光能量增加而下降; 后屈曲行为可能导致结构发生坍塌. 后期的数值模拟等研究表明, 激光辐照引起的温升和材料力学性能变化是导致轴压圆柱壳临界屈曲载荷明显降低的主要原因, 加筋会使圆柱壳结构的稳定性提高 (Keshun et al. 2000, 沈敏敬等 2008). 针对激光辐照内压圆柱壳的屈曲问题, 王吉等 (2005) 给出了屈曲行为与激光参数、预载条件和圆柱壳几何参数的关系. 一些研究者 (Li et al. 1994, 赵剑衡等 1998, 黄晨光等 2004) 还对激光辐照下充压圆柱壳变形的相似律问题以及充压圆柱壳在激光辐照下的热-力破坏行为进行了研究. 赵伟娜等 (2013) 研究了激光辐照引起的局部热软化效应对轴压下薄壳屈曲行为的影响. 若以  $\Delta E$  表示热软化引起的弹性模量的下降,  $E_0$  表示初始材料的弹性模量, 则  $\eta = \Delta E/E_0$  表征热软化程度. 图 6 给出了采用线性小挠度理论计算得到的不同热软化程度下圆柱壳的屈曲模态. 当热软化程度较小时, 失稳模式为整体屈曲; 当热软化程度逐渐升高, 失稳模式由整体屈曲转化为局部屈曲. 图 7 表明, 临界屈曲载荷随着局部热软化程度的增加而呈非线性下降.



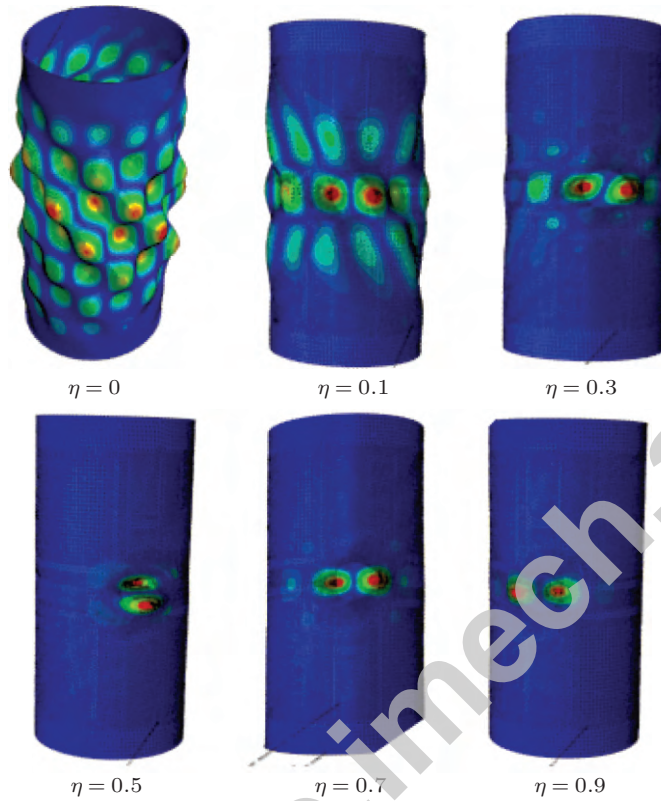


图 6

不同热软化程度下的轴压屈曲模态

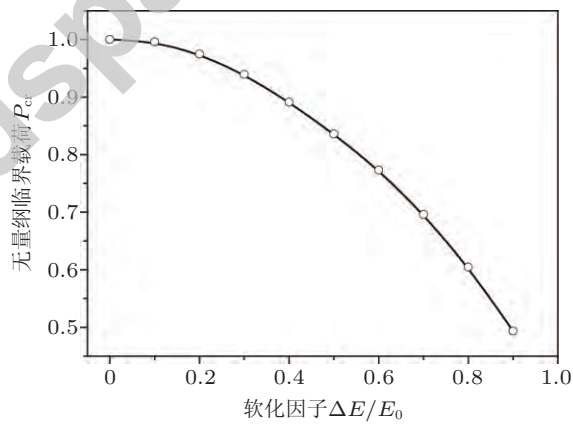


图 7

临界屈曲载荷随热软化程度的变化

### 3.3 激光破坏效应的相似准则

在激光破坏效应研究中, 往往需要开展选定靶结构的原型试验和大量的缩比模型试验. 这其中就涉及到尺度律 (scaling law) 或者相似准则的问题. 力学上的相似一般包括几何相似、运动相似和动力学相似等. 对于某些问题, 如圆柱壳轴压屈曲问题, 临界载荷满足几何相似关系. 线性小挠度理论的临界屈曲载荷为

$$p_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \frac{h}{R} \quad (4)$$

根据钱学森非线性大挠度理论, 临界屈曲载荷为

$$p_{cr} = 0.194E \frac{h}{R} \quad (5)$$

其中,  $E$  为杨氏模量,  $h$  和  $R$  分别为圆柱壳壁厚和半径,  $\mu$  为泊松比.

相似准则的导出方法通常有 3 种, 即定律分析法、方程分析法和量纲分析法, 其中后者最为常用.

黄晨光等 (2004) 综合使用了方程分析法和量纲分析法, 对激光辐照下充压圆筒变形的相似律开展了研究, 其中忽略了惯性效应、材料性能的应变率相关性以及塑性变形功生成的热等复杂因素.

把表征物理现象的所有量用一般函数的形式表达, 这些物理量由如下几方面组成. 激光相关参数: 光斑直径  $a$ , 激光功率密度  $I$  和辐照时间  $t$ , 靶的激光吸收率  $\beta$ ; 载荷相关参数: 内压  $P$ ; 尺寸相关参数: 圆筒的直径  $D$ , 筒长  $L$ , 壁厚  $h$ ; 材料相关参数: 杨氏模量  $E$ , 屈服应力  $\sigma_0$ , 硬化模量  $E'$ , 泊松比  $\mu$ , 最大塑性应变  $\varepsilon_f$ , 软化系数  $f$ , 热膨胀系数  $\alpha$ , 密度  $\rho$ , 比热容  $c$ , 热传导系数  $\kappa$ ; 输出相关的参数: 等效应力和等效塑性应变  $\sigma_{eq}$ ,  $\varepsilon_{eq,p}$ . 如果模型试验使用的材料与原型材料相同, 一些仅由材料参数组成的无量纲量便可以忽略, 于是有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_{eq,p}}{\varepsilon_f} &= f_1 \left[ \frac{h}{a}, \frac{D}{L}, \frac{a}{L}, \frac{t}{h^2 \rho c} \kappa, \frac{\alpha I t}{h \rho c \varepsilon_f}, \frac{P}{E} \left( \frac{a}{h} \right)^4 \right] \\ \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} &= f_2 \left[ \frac{h}{a}, \frac{D}{L}, \frac{a}{L}, \frac{t}{h^2 \rho c} \kappa, \frac{\alpha I t}{h \rho c \varepsilon_f}, \frac{P}{E} \left( \frac{a}{h} \right)^4 \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过有限元计算验证了上述相似关系的成立 (黄晨光等 2004).

## 4 含涂层的多层材料与结构的激光破坏效应

在极端恶劣的服役热环境条件下, 往往仅靠单一的材料体系难以满足防隔热要求, 通常在很多热端部件上覆盖隔热涂层. 例如, 发动机燃烧室的热障涂层可以显著提高发动机推进效率, 而飞行器外壁面热障涂层则可以保障飞行器主体结构在高马赫

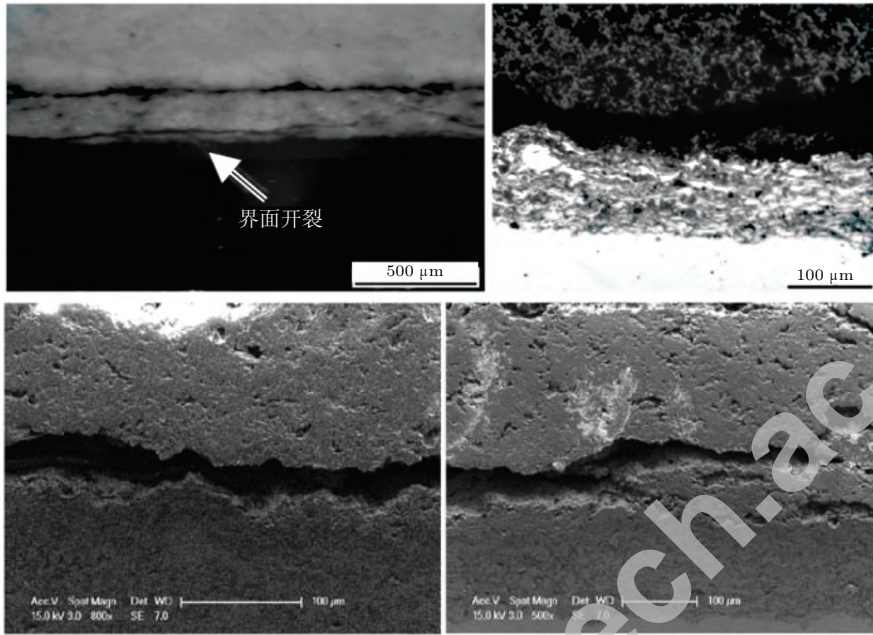


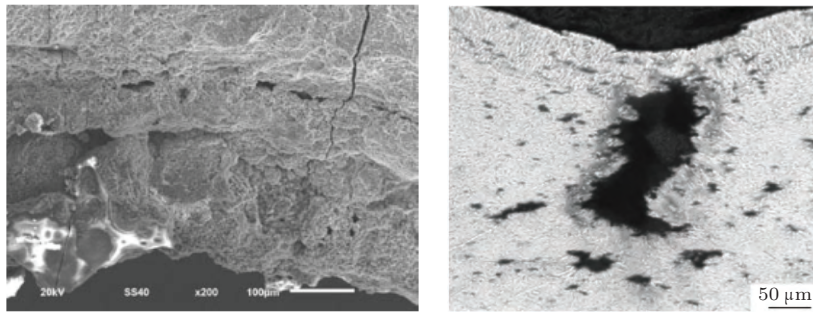
图 8

激光辐照诱导陶瓷-合金界面开裂 (Wu et al. 2010)

数条件下仍然具有一定的强度和刚度 (Evans et al. 2001, Clarke & Phillpot 2005, Rapp 2006, Vaßen et al. 2010, Clarke et al. 2012, 张树林等 2013). 对于包含涂层的结构-功能一体化材料而言, 其表面硬质合金涂层或陶瓷涂层往往具有较高的熔点以及相变潜热 (Moskal 2009), 这就给基于激光局部熔穿等破坏机制提出了很高的到靶功率密度要求. 然而, 如果摒弃单纯追求材料熔穿的破坏模式, 从激光诱导的热力破坏角度出发, 通过激光辐照形成的高幅值温度梯度和热应力, 诱导陶瓷层开裂、剥落, 依然可以有有效的激光破坏参数窗口. 基本的思想在于以下两个方面.

一方面, 在涂层-基体体系中, 涂层和基底不可避免的存在明显的热-机械性能差异, 这种差异使得其力学行为与均质材料截然不同 (吴承康 1995, Slifka 1998, 董永香等 2005, Zhao et al. 2009). 在激光辐照的热力效应中, 热应变正比于热膨胀系数和温度变化, 异质的各层材料导热率差异会在层间界面附近形成较高的温度梯度, 而热膨胀系数、弹性模量和泊松比等参数存在跨界面突变的不连续特征, 往往会导致在界面区域附近的热应力集中, 乃至奇异性. 考虑到大多数多层异质材料的各层界面往往都是强度较低的弱区, 因此, 激光辐照的热力效应极可能首先造成界面开裂 (Wu et al. 2010), 如图 8 所示.

界面开裂后所引起的界面热阻陡增, 使得激光辐照到表层所吸收的热能更不容易

**图 9**

裸露合金基底的后续破坏形貌 (Wu et al. 2013)

向远离热源的各层材料传递, 这就会进一步加剧界面层温度梯度和热应力集中. 在这种复杂的边界热 - 结构耦合作用下, 界面裂纹的持续扩展会导致层与层之间的大面积分离, 并最终因为表层材料的断裂、剥离, 而使基底暴露在恶劣的工作环境下.

当入射激光功率足够高时, 则会直接造成表面陶瓷层的熔化, 液相陶瓷材料在环境气动力作用下被移除而使合金基底暴露在恶劣的环境中. 在典型工作环境下, 裸露的合金基底将很快因为热 - 物理 - 化学变化而断裂或熔穿失效 (Wu et al. 2013), 如图 9 所示. 当然这种基底断裂或熔穿也可以直接由后续入射的高功率激光辐照实现.

另一方面, 涂层 - 基体体系为代表的多层材料在制备过程中, 往往会因为晶格失配及材料热膨胀失配等因素引起较高水平的残余应力 (黄晨光等 2002, Huang et al. 2003); 对于后续的激光辐照加载而言, 这些残余应力实际上构成了不可忽视的初始预应力. 在激光辐照加热时, 这种预应力表层结构会因为材料刚度的非均匀变化而产生局部松弛或重新分配 (Cheng et al. 2013). 在预应力局部松弛或重新分配的过程中, 会对激光辐照诱导的热弹性场贡献一个增量场, 使材料的表层失效变得更加复杂.

可见, 预应力特征会显著影响激光辐照时结构应力分布, 特别是当预应力明显偏离等轴应力状态时, 激光辐照形成的热应力会出现类似于裂纹体的奇异性, 这会加剧激光的破坏效应. 因此, 充分了解初始预应力特征及其局部热松弛和重新分配的规律, 对于激光破坏阈值的预测是非常必要的.

对于多层结构 - 表面功能一体化材料来说, 当激光功率达到一定水平时, 就足以使表面层发生断裂剥离, 而将合金基底裸露在恶劣环境下并因其自身工作环境而造成基底失效; 当激光功率进一步增大时, 就可能造成表层材料熔化移除, 并立即对暴露在激光辐照下的基底材料形成局部的高温梯度、造成激光热力破坏; 当激光功率更高时, 就有可能将表层材料和合金基底材料一次熔穿、使结构很快失效.

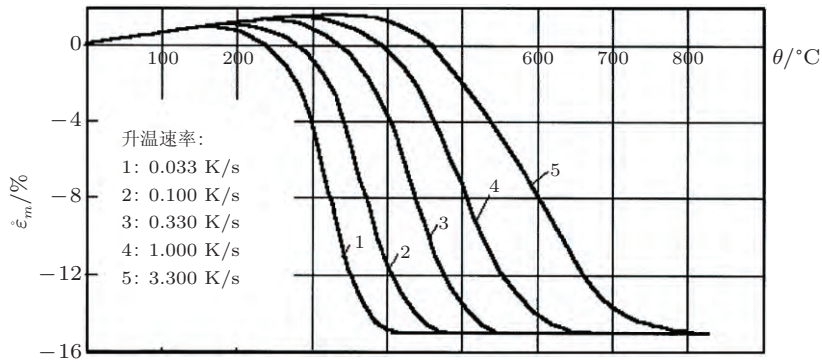


图 10

不同升温速率下环氧树脂基体热变形随温度变化

## 5 激光辐照复合材料靶体的热力破坏行为

### 5.1 复合材料的热烧蚀机理与热力学性能

相比较而言, 强激光辐照下的树脂基复合材料的破坏行为要比金属材料更为复杂. 这主要是由于树脂基复合材料在高温环境下特殊的热与力学性能决定的:

(1) 高温条件下树脂基复合材料的热与力学性能会发生不可逆的退化, 并且随温度和暴露于高温环境的时间呈非线性增长. 热物性能、力学性能以及热应变等随温度和升温速率发生非线性变化, 如图 10 所示 (Dimitrienko 1998).

(2) 高温条件下纤维和基体经历不同的物理、化学机制的烧蚀过程. 树脂基体会发生热解, 生成挥发气体并在内部空隙中产生压力, 随着热解程度加剧, 气体会从空隙中溢出, 树脂基体变为多孔焦炭. 碳纤维具有较好的热稳定性, 通常不会发生严重的热解, 但当温度升高到 400°C 以上时会发生相变. 在有氧环境中, 多孔焦炭和碳纤维还会发生氧化反应, 在更高温度和热流条件下, 纤维和基体会出现升华现象.

因此, 热解、升华和氧化是树脂基复合材料在高温下的 3 种主要的热烧蚀机制.

### 5.2 复合材料的细观热与力学模型

发生烧蚀的树脂基复合材料可以视为包含固相、气相和液相的复杂多相材料, 需要分别考虑纤维和基体的性能差异以及烧蚀机制的差异, 并考察由此而引起的热变形及热应力. 为此, 需要建立起树脂基复合材料的高温细观热-力学分析模型.

热解气体逸出会在基体内部形成疏松多孔焦炭, 不仅会引起密度的下降, 还会导致比热、热导率、弹性模量等热-力学性能的下降. Dimitrienko (1997) 通过将热解过程中无序的各相映射为规整排布的各相, 基于微分方程渐近展开的理论, 建立了树脂

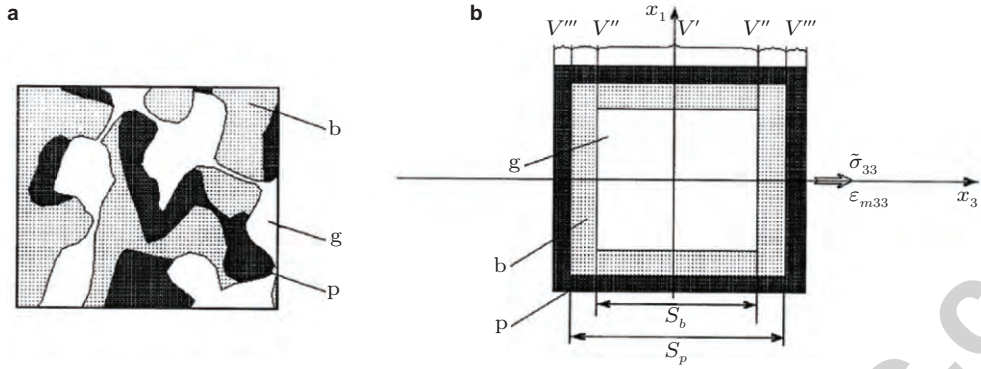


图 11

热解细观模型 (Dimitrienko 1997). (a) 热解过程中无序的各相, (b) 映射后规整排布的各相

基复合材料的高温细观热 - 力学分析模型. 该方法最早由 Bakhvalov 等 (1989) 提出, Lions (1979), Pobedrya (1981) 和 Samarski (1976) 将模型改进后用于复合材料和多孔介质材料分析. 如图 11 所示, 对于基体来说, 规整化后树脂相、热解焦炭相和热解气体相三相的体积比保持不变. 纤维也可以采用类似的映射模型.

Dimitrienko(1998) 研究了树脂热力学性能随三相体积比变化的细观模型并给出了相关函数关系式. 引入  $\varphi_b$ ,  $\varphi_p$  和  $\varphi_g$  分别表示树脂相、热解焦炭相和热解气体相的体积分数来描述环氧树脂的热解程度

$$\varphi_b + \varphi_p + \varphi_g = 1 \quad (7)$$

$$\varphi_p = \frac{\rho_b}{\rho_p}(1 - \varphi_b)(1 - \Gamma) \quad (8)$$

根据理论分析可以得出树脂的密度、比热、导热系数和模量与  $\varphi_b$ ,  $\varphi_p$  和  $\varphi_g$  的关系

$$\rho_m = \rho_b \varphi_b + \rho_p \varphi_p \quad (9)$$

$$C_m = \frac{\rho_b C_b \varphi_b + \rho_p C_p \varphi_p}{\rho_b \varphi_b + \rho_p \varphi_p} \quad (10)$$

$$\lambda_m = \lambda_b \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} / b_1 \quad (11)$$

$$E_m = E_b / a_1 \quad (12)$$

其中, 下标 “b”, “p”, “g” 和分别代表初始相、热解焦炭相和热解气体相, 下标 “m” 代表热解后的树脂基体,  $\rho$ ,  $C$ ,  $\lambda$  和  $E$  分别代表密度、比热、导热系数和弹性模量,  $\varphi$  代表体积比,  $T$  为温度,  $T_0$  为初始温度.

热解化学反应速率遵循 Arrhenius 方程, 可以表示为

$$\frac{\partial \varphi_b}{\partial t} = -B_0 \varphi_b^n \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (13)$$

其中,  $B_0$  为指前因子,  $E_A$  为热解反应活化能,  $n$  为反应级数,  $R$  气体常数.  $B_0$ ,  $E_A$  和  $n$  通过对复合材料开展热重试验 (TGA) 分析来确定. 根据热解反应动力学方程, 热解程度是热解时间和温度的函数, 也即与升温速率相关.

碳纤维在惰性环境中不会发生明显的化学反应, 可以认为密度和比热随温度变化不大, 导热系数和弹性模量只和温度有关

$$\lambda_f = \lambda_{f0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} \quad (14)$$

$$E_f = E_{f0} \exp(a_f \Delta \tilde{T}_f) \quad (15)$$

其中,  $\Delta \tilde{T}_f = \Delta T_f + P_f \int_0^t \exp(-Q_f(t-\tau)) \Delta T_f(\tau) d\tau$ ,  $\Delta T_f = T - T_0$ ,  $a_f$ ,  $P_f$ ,  $Q_f$  都是和材料有关的常数. 下标 “f” 代表高温的碳纤维, 下标 “f0” 代表常温下的碳纤维.

### 5.3 激光辐照复合材料热力破坏行为实验研究

Kibler 等 (1977) 研究了石墨纤维/环氧树脂复合材料在连续波  $\text{CO}_2$  激光辐照下的热烧蚀行为, 分析了激光功率密度、光斑形状、光斑尺寸、板材厚度、铺层方式、辐照时间等对温度以及质量损失的影响. 王立君等 (1996a, 1996b) 实验测定了玻璃钢在  $\text{CO}_2$  激光和 DF 激光辐照下烧蚀热、热解碳化层度等实验数据, 并利用红外散射谱对碳化物进行了分析. 刘淑英 (1999) 实验研究了玻璃钢在 YAG 连续激光辐照下的烧蚀行为, 发现激光辐照首先导致环氧树脂发生热解, 当温度足够高时, 玻璃纤维会发生熔化. 万红等 (2008) 对 CFRP 开展激光辐照研究, 发现当激光功率密度大于  $0.1 \text{ kW/cm}^2$  时, 树脂基体发生燃烧, 碳纤维没有明显的损伤, 材料的拉伸力学性能降低了 30%~40%; 当激光功率密度达到  $1 \text{ kW/cm}^2$  时, 碳纤维复合材料产生明显的层间开裂, 表面碳纤维出现少量破断, 材料的拉伸力学性能降低了 80% 以上. 张宁 (1995) 开展了连续 COIL 激光辐照 CFRP 的实验, 发现在空气环境中 CFRP 出现热解、燃烧, 随激光功率密度增加热解碳化层厚度和质量损失线性增加, 燃烧时间缩短. 郭亚林等 (2006) 实验测试了 CFRP 平均烧蚀率随激光参数的变化, 发现平均烧蚀率随入射激光功率密度和光斑直径增大而增大. 李雅娣等 (2010) 开展了激光辐照试验 CFRP 层合板的热烧蚀实验, 分析了不同功率密度和辐射时间下试件温度分布和烧蚀特性, 并对烧蚀后试件进行了扫描电镜观察.

激光辐照下, 复合材料呈现出复杂的热力损伤形式. 图 12 是氮气环境中激光辐照 CFRP 典型的破坏模式. 在材料表层环氧树脂已完全热解, 碳纤维由于部分升华并

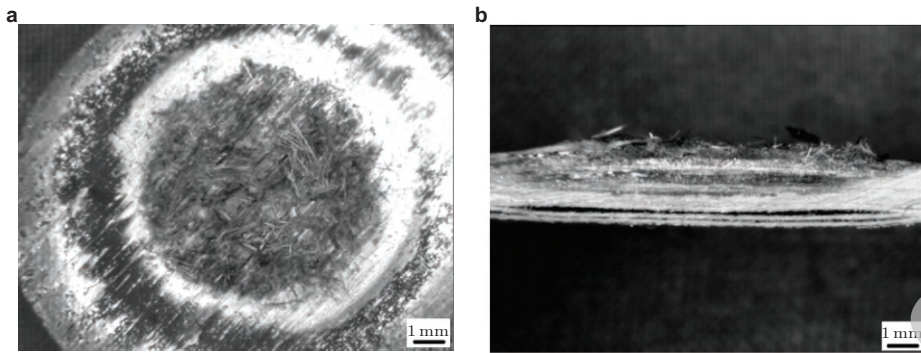


图 12

激光辐照后表面和内部损伤. (a) 表面损伤, (b) 内部损伤

发生断裂而显得杂乱. 剖面图显示的深色区域为热解区域, 层合板表层由于基体和纤维烧蚀形成明显的烧蚀坑. 树脂热解和纤维升华是两种主要的热烧蚀损伤机制. 另一方面, 由于复合材料导热系数相对较小, 激光辐照后在材料内部形成较大的温度梯度和显著的热应力. 层间抗剪切强度弱是复合材料层合板的显著特点, 高温和热烧蚀损伤会进一步降低层间强度, 当热应力达到层间剪切强度时, 就会出现层间开裂. 烧蚀引起的力学性能退化和材料内部温度不均匀引起的热应力是导致层合板层间开裂的主因. 此外, 层间开裂形成了显著的热阻效应, 使得激光能量在一定时段内主要沉积在脱层铺层以上, 加剧了局部的热解与烧蚀, 也促进了层间裂纹的扩展.

#### 5.4 复合材料激光烧蚀热力损伤数值模型

复合材料烧蚀热力损伤数值模拟的困难性在于, 与传统的固定边界的热力问题不同, 烧蚀过程是具有移动边界和质量去除并包含相变与脱层的传热问题以及热力耦合问题. 此外, 复合材料在高温环境下特殊的热与力学行为, 包括纤维和基体性质差异、热物性能和力学性能随温度和升温速率非线性变化、材料性能的各向异性等, 使得数值模拟更为困难.

热解对传热的影响主要体现在几个方面: 热解反应的吸热、热解后材料热物性的变化以及热解气体在材料内部流动诱导的能量输运. Bamford 等 (1946) 提出了描述包含热解的一维热传导模型, 假定材料热物性保持不变. Munson 等 (1961) 对 Bamford 提出的模型进行了改进, 考虑了热解气体在材料中的流动以及材料热物性随温度的变化. Pering 等 (1980) 利用 Munson 的改进模型研究了纤维增强复合材料在高温环境下的温度场、质量损失、热解碳化层厚度的一维分布. Semak 等 (2006) 提出了多级热解模型, 并在此基础上研究了玻璃纤维/环氧树脂复合材料的激光辐照行为, 模型中没



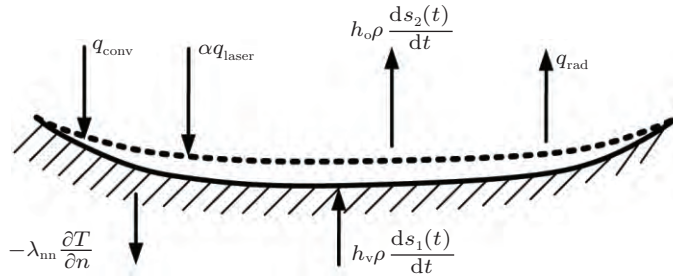


图 13

激光烧蚀模拟的移动边界条件

有考虑热解气体的流动. 在处理热解效应的时候, 有些研究人员采用显热容法来描述. Griffis 等 (1981) 没有采用 Arrhenius 方程来描述树脂基体的热解, 而是通过在一定温度范围内提高材料比热容方式来处理热解造成的能量耗散, 该方法叫做“显热容法” (Pelletier et al. 2000). 陈博等 (2008) 采用显热容法对连续波激光辐照下纤维增强树脂基复合材料的温度场进行了一维模拟. 王以忠 (2007) 采用热焓法模拟了激光辐照下 CFRP 的一维热响应, 其基本思想是引入热焓, 它包含了内能增加焓和热解焓, 在以热焓为未知量的热传导方程中不再显式地出现热解热源项. 热焓法和显热容法原理上是等效的. 上述研究大多没有考虑氧化和升华效应. 氧化和升华对传热的影响主要体现在氧化反应的放热和升华的相变潜热吸热, 能量的大小与氧化或升华造成的质量烧蚀速率有关. 此外, 氧化和升华往往会形成边界的移动.

热解引起的能量耗散可以用体热源描述, 包括热解反应热和热解气体流动两部分

$$\dot{Q} = Q_{\text{deco}} \frac{\partial \rho}{\partial t} - (\varphi_g \rho_g \tilde{v}_g) \nabla \cdot h_g \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi_g \rho_g \tilde{v}_g) \quad (17)$$

$$h_g = \int_{T_0}^T \rho_g c_g dT = \rho_g c_g (T - T_0) \quad (18)$$

其中,  $Q_{\text{deco}}$  为热解热,  $\rho$  为材料的密度,  $\varphi_g$  为气体体积分数,  $\rho_g$  为热解气体的密度,  $\tilde{v}_g$  为气体流速矢量,  $h_g$  为气体热焓,  $c_g$  为热解气体定压比热.  $Q_{\text{deco}} \frac{\partial \rho}{\partial t}$  项表征的是热解吸热过程的能量耗散,  $(\varphi_g \rho_g \tilde{v}_g) \nabla \cdot h_g$  项表征的是热解气体流动引起的能量耗散.

将激光等效为面热源, 复合材料靶体与外部环境的辐射换热为  $q_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon (T - T_0)^4$ , 如图 13 所示, 在面烧蚀边界上  $s(t)$  满足以下条件

$$-\lambda_{\text{nn}} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha q_{\text{laser}} - q_{\text{rad}} - q_{\text{conv}} - h_v \rho \frac{ds_1(t)}{dt} + h_o \rho \frac{ds_2(t)}{dt} \quad (19)$$

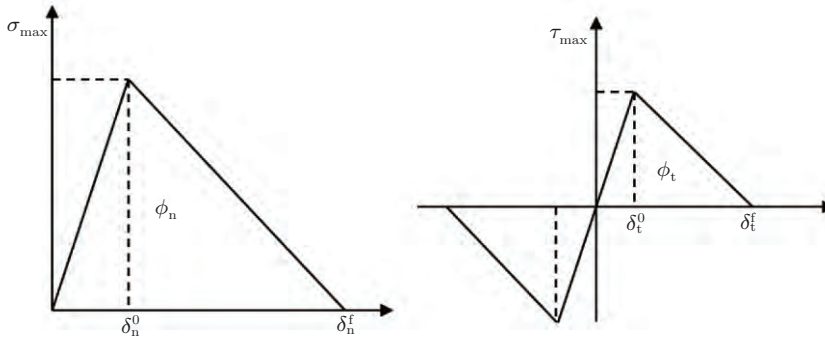


图 14

双线性内聚力模型的张力 - 位移关系

$$\frac{ds_1(t)}{dt} = f_1(T, P), \quad \frac{ds_2(t)}{dt} = f_2(T, P, \phi_2)$$

其他边界上  $\lambda_{nn} \frac{\partial T}{\partial n} = q_{rad} + q_{conv}$  (20)

初始时刻  $T = T_0$  (21)

其中,  $T_0$  为环境温度,  $q_{laser}$  为入射激光能量,  $\alpha$  是激光能量耦合系数,  $q_{rad}$  是辐射热流,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\xi$  为表面辐射系数,  $q_{conv}$  是气动引起的对流换热热流分布,  $q_{conv} = h(T - T_0)$ ,  $h$  为换热系数,  $T$  为瞬时结构壁温,  $\frac{ds_1(t)}{dt}$  和  $\frac{ds_2(t)}{dt}$  分别为升华和氧化所引起的烧蚀边界的变化率,  $\frac{ds_1(t)}{dt}$  是温度和边界层压力的函数,  $\frac{ds_2(t)}{dt}$  是温度、边界层压力和边界层氧气浓度的函数, 函数形式均已知,  $\lambda_{nn}$  为导热系数,  $h_v$  为相变潜热,  $h_o$  为氧化反应热.

可以采用内聚力模型 (cohesive zone model) 描述复合材料层间开裂行为, 开裂过程中应力是位移的函数, 两者的函数关系称为张力 - 位移法则. 常见的张力 - 位移关系法则有双线性、梯形、多项式和指数型 4 种, 最常用的是由 Mi 等 (1998) 提出双线性张力 - 位移法则, 如 图 14 所示, 用以下公式来描述 (Geubelle & Baylor 1998)

$$F_n = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_n^0} \delta, & 0 \leq \delta \leq \delta_n^0 \\ \sigma_{max} \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} \delta, & \delta_n^0 < \delta < \delta_n^f \\ 0, & \delta_n^f \leq \delta \end{cases} \quad (22)$$

$$F_t = \begin{cases} \frac{\tau_{\max}}{\delta_0^t} \delta, & 0 \leq \delta \leq \delta_0^t \\ \tau_{\max} \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_0^t} \delta, & \delta_0^t < \delta < \delta_t^f \\ 0, & \delta_t^f \leq \delta \end{cases} \quad (23)$$

其中,  $F_n$  和  $F_t$  分别为法向的应力值和切向的应力值,  $\sigma_{\max}$  和  $\tau_{\max}$  分别为法向的最大应力值和切向的最大应力值, 此时对应的界面处裂纹张开的位移分别为  $\delta_n^0$  和  $\delta_t^0$ . 界面应力达到最大值后, 应力随位移的增加开始下降. 位移继续增加至最大位移  $\delta_n^f$  和  $\delta_t^f$  时, 应力下降为 0, 层间完全开裂.

双线性内聚力模型中法向和切向的临界断裂能  $\phi_n^c$  和  $\phi_t^c$  分别为

$$\phi_n^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^f \quad (24)$$

$$\phi_t^c = \frac{1}{2} \tau_{\max} \delta_t^f \quad (25)$$

目前来看, 考虑烧蚀过程与层间开裂相互作用的热力耦合损伤模型基本未见报道, 包含完整的热解、氧化和升华效应的烧蚀分析数值模型也较为少见. 复合材料的热与力学性能不仅随温度和升温速率非线性变化, 还与热解状态相关, 是一个过程量, 现有的分析模型均没有很好地体现这一点. 为此, 黄亿辉等 (2015) 提出了热解和脱层耦合的多尺度分析模型, 主要分析流程如图 15 所示. 温升引起的热解及热应力会造成层间开裂, 脱层引入的层间热阻又会反过来影响传热, 构成一个典型的热力耦合过程. 在求解过程中, 包含热解的传热分析模块和热应力及层间开裂分析两个模块在时域上显式推进, 交错迭代. 在传热分析模块中, 需要输入材料的细观热与力学模型, 并耦合热分解模型以及相变模型进行求解; 在热应力分析模块中, 引入内聚力模型求解层间开裂, 同时依据层间开裂和热解程度设置热阻. 这样就可以对激光辐照复合材料层合板的损伤机理进行较为完整的描述. 图 16 是包含脱层效应的数值模拟结果与实验结果对比. 同时, 该分析模型还能够给出各层的热解程度, 以及热解边界和氧化边界随激光辐照时间的演化过程, 如图 17 所示.

## 6 来流条件下激光辐照的流 - 热 - 固耦合效应

### 6.1 来流条件下激光辐照破坏的多场耦合行为

来流条件对激光辐照的破坏行为产生显著影响. Abbott 和 Boley 等 (2006, 2007) 的实验研究表明, 在亚声速气流的作用下, 金属薄板在未到达熔融温度以前发生破坏现象, 如图 18 所示. 这与无气流作用时激光辐照引起的熔融破坏有着明显的区别. 分

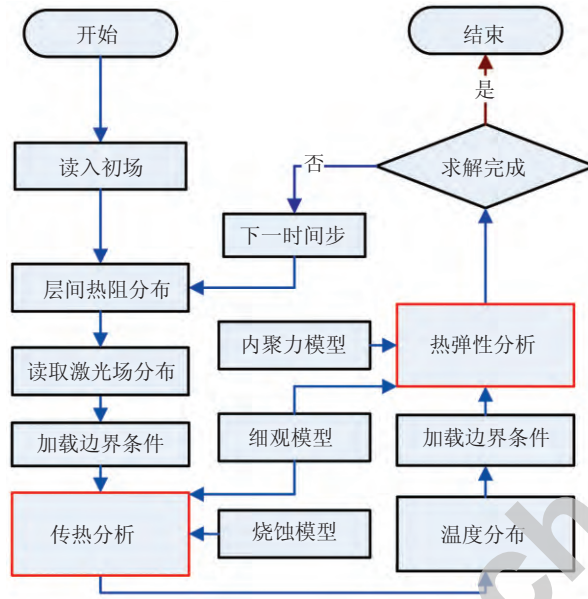


图 15

激光辐照 CFRP 多尺度热力耦合分析流程

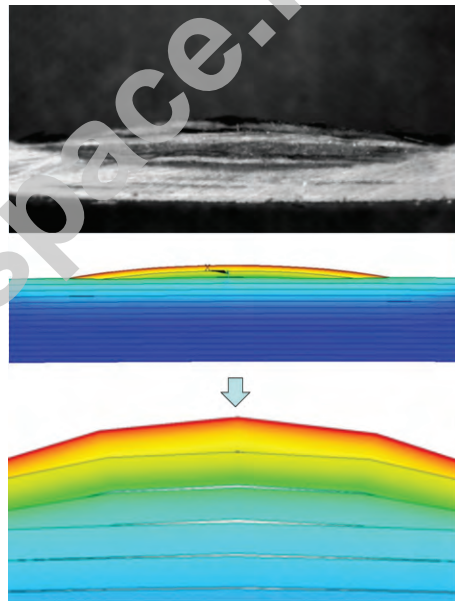


图 16

激光辐照 CFRP 层间开裂数值模拟结果与试验结果对比

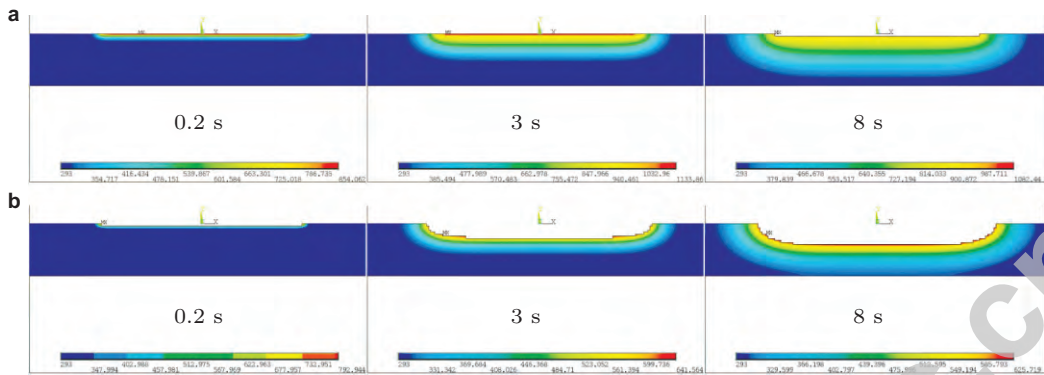


图 17

氧化边界与热解边界随激光辐照时间的演化。(a) 氧化边界, (b) 热解边界

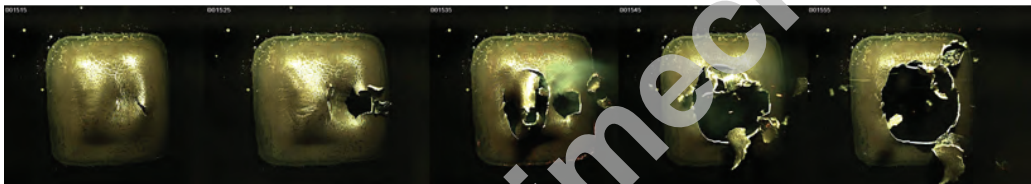


图 18

亚声速切向气流作用下激光辐照金属薄板的破碎现象 (Abbott et al. 2006, Boley et al. 2007)

析认为, 切向气流流过凸起的激光辐照面时在薄板两侧引起气动压差, 使得处于高温热软化状态下的金属靶体很容易被击穿破碎。

研究激光对高速运动靶体的热力破坏行为, 必须充分考虑运动引起的气动热/力载荷、结构内力分布与激光诱导热力效应的耦合。同时, 一般还需要考虑气流速度对于激光能量耦合效率的影响。

首先, 气动载荷会显著改变靶体结构的换热边界条件, 从而影响激光能量在靶体中的沉积; 反过来, 由于气动换热与结构壁温、环境温度和流动状态相关, 激光辐照引起的结构表面温升会改变周围流场的温度, 从而对当地的对流换热边界条件进行更新。对于不同的飞行速度、不同的激光辐照时间, 在高速来流的作用下可能会出现气动加热或气动冷却两种截然不同的效果。

其次, 激光辐照运动靶体表面时, 局部高温引起的热变形或烧蚀行为会改变气动构型或结构的几何边界, 从而影响流场的流动特性; 另一方面, 流场流动特性的改变也会导致流-固边界上的气动热和气动力发生变化, 气动热的改变会影响结构内部的传

热或激光烧蚀行为, 气动力的改变会影响结构的高温热变形或激光烧蚀形貌, 因此流场反过来影响了激光对结构的温升效应、烧蚀行为、热变形乃至破坏行为。

因此, 激光对运动目标的破坏行为是涉及激光、流场与结构之间相互作用的流-热-固多场耦合问题。对于这样的多场耦合问题, 流-固边界条件始终是动态的, 而且是未知的, 给数值求解带来了很大的难度 (张阿漫和戴绍仕 2011, Blades & Newman III 2007)。

## 6.2 激光辐照的流-热-固耦合数值模拟方法

流-热-固耦合问题的数值求解可分为一体化求解和分区求解两种方式。一体化求解是在时间域上使用统一的数值方法同时求解流场控制方程和结构控制方程, 获得流-热-固耦合问题的解 (Wieting et al. 1991, 耿湘人等 2002)。虽然一体化求解方法取得了一定的进展, 但是对于工程上复杂的多场耦合问题, 特别是包含高超声速流场的流固耦合问题, 一体化求解还是存在着非物理振荡、激波分辨率低、计算效率低等困难 (王岩 1994, 段占元 1997)。分区求解是指分别求解流场和结构的控制方程, 通过流-固边界上的数据交换实现流场与结构的耦合作用 (Loehner et al. 1998, Cebra & Löhner 2005)。分区求解可以利用结构和流场各自现有的成熟算法, 而且消耗的计算资源较低, 在解决复杂的工程问题时具有较大的优势。分区求解计算主要包括 3 个方面的内容: (1) 流场和结构的各自求解; (2) 流场域和结构域求解器的时域推进算法; (3) 流-固耦合边界上的数据交换。时域推进算法有显式迭代 (松耦合) 和隐式迭代 (紧耦合) 两种 (Hurka & Ballmann 2001)。显式迭代是指在一个时间步内, 耦合的子物理场只需求解一次, 其基本假设是, 在该时间步内结构变化不剧烈, 流场近似为定常 (Najmi & Sadowsky 1997)。显式迭代计算效率高, 但是容易引起累积误差, 所以对时间步长有限制。隐式迭代是指在一个时间步内, 耦合的子物理场要求多次迭代收敛到一体化求解的解, 然后才能进入下一时间步。隐式迭代求解比较稳定、精度较高, 但计算效率较低。流-固耦合界面上的数据交互是关系到计算精度的重要环节。通常情况下, 流场网格要比结构网格精细的多, 二者往往是不匹配的。耦合界面上的数据交互其实为两套不匹配网格之间的相互插值。常用的数据交换方法有最近邻点插值法、投影法、径向基函数法三类 (Aukje et al. 2005), 其中最近邻点插值法是目标点从最近源场获取数据信息, 还可通过临近点加权平均法来提高精度 (汪学锋等 2009), 因此最为简单、快捷、有效, 应用较为广泛。

可以采用图 19 的计算流程开展来流条件下激光辐照效应的流-热-固耦合分析。采用分区求解的思想, 流体域的 CFD 和固体域的 FEA 分别独立求解的, 通过控制流-固边界上的数据传递来实现热-流-固耦合分析。采用动网格技术模拟变形引起的边界移动。时域推进算法采用隐式迭代, 具体求解流程为: 在每一个时间步内先对一

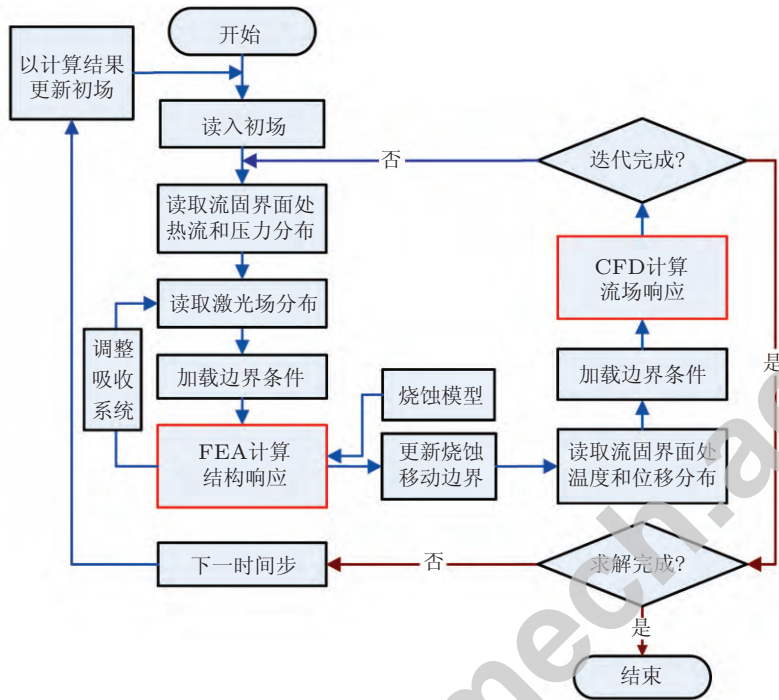


图 19

激光辐照的流-热-固耦合数值计算流程图

个场进行分析, 将所得界面处的结果传递给另一个场, 并作为边界条件加载进行计算; 然后对另一个场进行分析, 并将所得界面处的结果传递给第一个场, 并作为边界条件加载进行计算. 如此交错迭代, 直至计算结果收敛才能进入下一个时间步, 时域上往前推进直至计算结束.

流场的流动与传热行为、结构的传热与变形等行为, 主要取决于流固界面处的热流、温度、位移和压力等的动态耦合边界条件. 任意时刻流-固边界处必须满足以下条件:

结构温度  $T_s$  和流体温度  $T_f$  相等

$$T_s = T_f \tag{26}$$

结构对流换热的热流  $q_{conv}$  等于流体气动热流  $q_{ae}$

$$q_{conv} = q_{ae} \tag{27}$$

边界上几何保持连续, 结构变形产生的位移  $u_i^s$  与流体边界上处的位移  $u_i^f$  相等

$$u_i^s = u_i^f \tag{28}$$

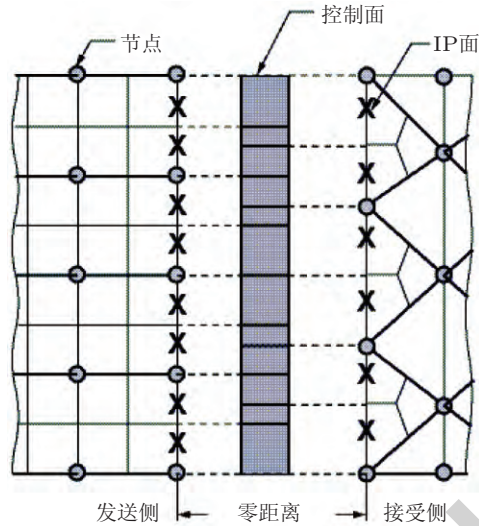


图 20

通过流固边界控制面传递数据示意图

边界上结构的法向应力  $\sigma_{ij}n_j$  和流体气动压力  $p_i$  相等

$$\sigma_{ij}n_j = p_i \quad (29)$$

由式 (26)~式 (27) 可知, 流-固边界处传递的所有物理量严格保证守恒性及连续性. 如图 20 所示, 在一个时间步内, 流场通过流-固边界控制面向结构传递气动热流  $q_{ae}$  和气动压力  $p_i$ , 结构通过流-固边界控制面向流场传递温度  $T_s$  和变形  $u_i^s$ . 流体域和结构域在流-固边界上几何要求一致, 由于边界层的存在, 流场分析通常需要更密的网格, 很难保证与结构的网格节点完全重合, 需要通过插值函数来保证物理量连续与守恒. 可以采用临近点加权平均等算法进行数据插值.

### 6.3 高速来流条件下激光破坏的热力效应

高速来流条件下激光辐照靶体或激光辐照高速运动靶体引起的热结构响应问题已得到了众多学者的广泛关注. 漆海滨和李文煜 (1999) 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与激光功率密度、光斑尺寸及光斑移动速度之间的关系. 王伟平等 (2001) 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, 在长时间加热下, 旋转频率对加热效果影响很小. 袁红等 (2005, 2006) 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, 分析了热物性参数对温度场造成的影响.



近年来, 人们更加关注高能激光在高速、乃至高超声速来流条件对靶体的辐照行为. 石卫波等 (2010) 采用工程计算方法求解高超声速来流条件下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. 计算分析表明, 气动加热条件下激光对高超声速来流下碳碳复合材料的烧蚀毁伤效应会明显增强, 沿弹道的气动加热累积效应对碳碳复合材料气动热/激光耦合烧蚀作用不明显. 在计算分析时将气动加热热流和激光辐照热流直接线性叠加, 忽略了流场与结构耦合引起的气动载荷的变化. 李海燕等 (2010) 分析了高超声速飞行器高温绕流气体对激光热力破坏效应的一些主要影响因素, 包括气体击穿、等离子体屏蔽效应、烧蚀产物颗粒的影响. 结果表明, 通常情况下流场电子数密度小于  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 流场本身等离子体特性不会引起对激光的等离子体屏蔽效应, 宽脉冲激光对高压流场气体击穿引起等离子体屏蔽效应在实际战场条件下一般不会发生. 对采用烧蚀手段进行热防护的飞行器而言, 飞行高度大于 10 km, 并且基于自由来流流量的无量纲化烧蚀流量小于  $10^{-2}$  左右时, 烧蚀产物颗粒不会引起激光的衰减.

一些学者考虑了耦合效应, 对切向气流下激光辐照平板的加热行为展开研究. 张黎等 (2011) 采用数值模拟研究了气流和激光共同作用下的金属平板温度场, 流体控制方程为三维雷诺平均 N-S 方程, 采用  $k-\epsilon$  两方程模型对湍流黏性系数求解, 使用动网格模型来表征气流的“冲刷效应”. 计算结果表明, 在气流速度和激光功率较低时, 气流冷却效应占主导地位; 在气流速度和激光功率较高时, 气流的“冲刷效应”开始对温度场产生影响. 胡鹏和陈发良 (2011) 通过流-热-固耦合数值计算分析了高速流场对激光辐照平板温度分布的影响, 计算结果表明, 在没有激光辐照的情况下, 气动加热会使平板温度升高, 且对换热系数随来流速度增大而增大, 对流换热系数在平板前沿增长最快, 在后段增速趋于平缓; 在有激光辐照的情况下平板温度分布是由对流换热、摩擦生热和激光加热三种机制竞争的结果所决定. 吴小翠等 (2014) 采用流-热-固耦合数值计算方法对高超声速气流下的激光辐照平板问题进行了分析, 利用 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, 采用 MPCCI 软件作为流固耦合接口程序来实现流体和固体间的数据交互. 通过量纲分析与计算模拟, 确定了流场效应的最主要影响参数为来流马赫数与攻角. 研究表明, 在功率密度为  $300 \text{ W/cm}^2$  激光辐照下, 马赫数小于或等于 6 时气流体现为冷却效应, 而大于 6 时气流体现为气动加热效应; 攻角增大会导致激光区流体流量的增加, 使换热效应更加明显. 郑艳丽等 (2010) 数值研究了气流对激光辐照金属材料氧化放热的影响, 分析了在空气流、氮气流以及无气流情况下激光辐照钢板的温度分布, 结果表明氮气流和无气流情况下钢板背表面温度差异不大, 而在空气流下氧化放热会在钢板中沉积一部分热量.

上述工作多是围绕气动条件下激光辐照的热效应影响规律开展的研究. 目前来看,

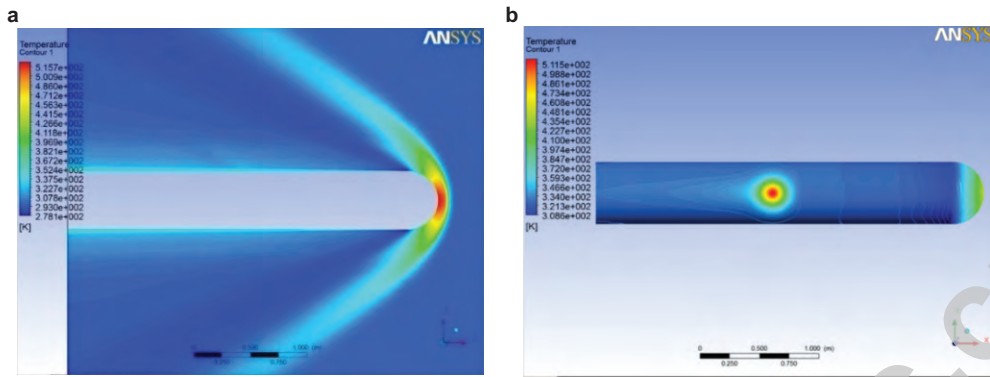


图 21

激光辐照超声速靶体的流-热-固耦合数值模拟. (a) 流场的温度分布, (b) 流固界面的温度分布

考虑了激光对飞行靶体的流-热-固耦合效应及其热力破坏行为的数值模拟工作还非常有限. 张健和黄晨光 (2007) 在考虑激光与运动目标相互作用的基础上, 分析了亚声速条件下运动目标在激光辐照过程的温度场和应力场的分布与演化规律. 结果表明, 激光辐照过程中靶体材料发生了屈服, 激光停止辐照后结构内出现了残余应力和残余变形. 光斑边缘温度梯度和应力梯度很高, 亚声速气流的冷却效应, 使得受辐照区域前后两端应力分布不对称. 黄亿辉等 (2013) 建立了反映激光、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. 图 21 为基本算例 ( $I_0 = 500 \text{ W/cm}^2$ ,  $Ma = 2$ ) 的主要计算结果. 激波引起速度、压力和温度的间断, 在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 22 的结构计算表明, 激光辐照 1s 时刻光斑中心区域已经发生屈服, 随后屈服面急剧增大, 到 3s 时刻的等效塑性应变已经达到 0.6%. 由于铝合金靶材的高温热软化效应, 即弹性模量和屈服强度随温度显著下降, 激光作用中心区的应力水平比周围要低, 并且随着辐照时间的增加和温度的升高, 光斑区的应力水平呈下降趋势.

进一步以结构发生屈服和熔融为失效判据, 以达到屈服应力  $\sigma_{\text{yield}}$  所需要的辐照时间  $t_{\text{yield}}$  和达到熔融温度  $T_{\text{melt}}$  所需要的辐照时间  $t_{\text{melt}}$  为度量, 研究了激光功率、来流马赫数等参数对激光破坏行为的影响规律. 如图 23 所示, 存在一个临界马赫数 ( $Ma = 2$ ), 使得发生屈服失效和熔融失效所需的辐照时间最长, 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, 可解释临界马赫数存在的机理 (黄亿辉等 2013).

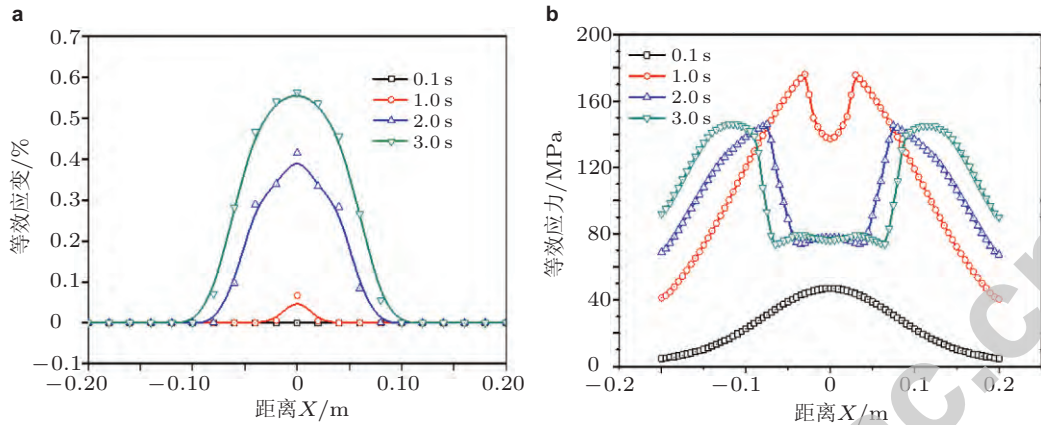


图 22

激光辐照区结构分析结果. (a) 塑性应变分布, (b) 等效应力分布

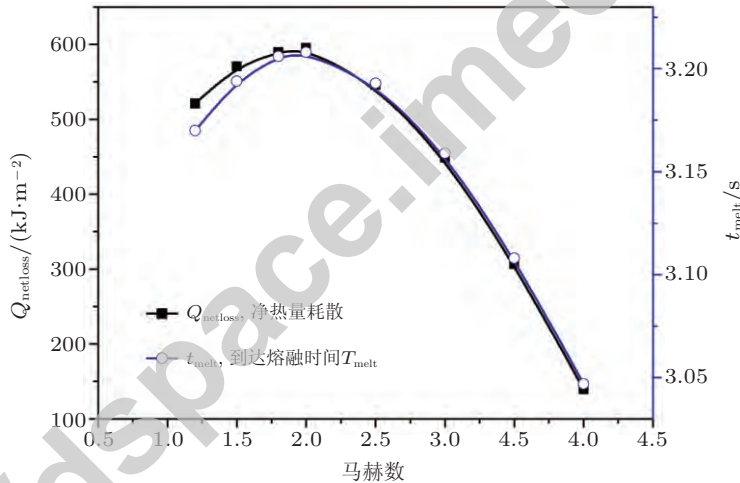


图 23

气动引起能量耗散和熔融所需时间随马赫数变化

#### 6.4 包含烧蚀的流-热-固耦合破坏行为

气动环境下强激光辐照以 CFRP 为代表的复合材料, 可能因物理、化学和力学因素造成质量损失而引起材料烧蚀, 包含氧化、热解、升华、热裂破坏及机械剥蚀等多种复杂过程. 因此, 来流条件下 CFRP 的强激光烧蚀问题, 不仅要考虑不同烧蚀机制引起的材料表面的边界移动和质量引射的传热问题, 还要考虑烧蚀边界演化对流场流动特性和传热特性的影响, 其本质是激光参数、材料性质与气动环境之间的耦合作用

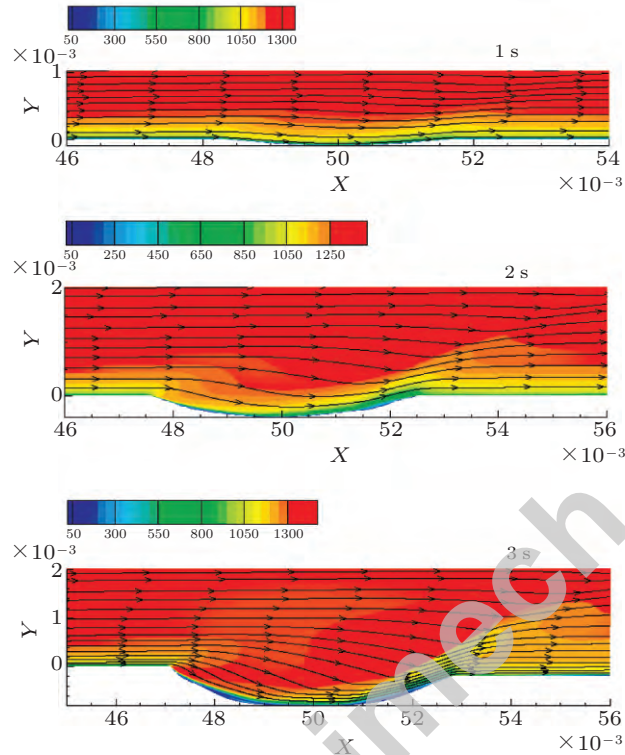


图 24

不同时刻烧蚀区域的速度分布云图

的结果. 陈敏孙等 (2011) 研究了切向气流对连续激光烧蚀 CFRP 的影响, 发现切向气流会带走热解产物对, 促进氧气到达碳纤维表面, 进而导致碳纤维在较低的温度发生氧化烧蚀. 陈敏孙等 (2010, 2011) 还建立了数值模型研究切向气流对激光烧蚀行为的影响. 其中, 切向气流的影响以等效、固定的常数描述, 没有考虑烧蚀行为对流动换热的反作用.

考虑来流条件下激光烧蚀行为的流-热-固耦合效应的研究目前还很少见. Huang 等 (2016) 针对切向气流作用下高功率密度激光辐照碳碳复合材料靶板及高温合金靶板, 建立了包含烧蚀效应的流-热-固耦合模型. 研究了高速气体流动对烧蚀形貌演化的影响, 以及烧蚀形貌对流动特性和换热特性的反作用. 如图 24 所示, 激光简化为高斯分布的面热源, 在  $Ma = 4$  的切向气流下, 随着烧蚀坑的增大, 在烧蚀坑前沿的流动分离现象越来越明显, 流经烧蚀坑底部的气体流动滞止效应也越来越强. 图 25 表明, 随着激光烧蚀形貌的演化, 流场的流动特性和传热特性也发生了显著的改变. 在  $t = 4\text{ s}$  时刻主要是闭式流动, 到了  $t = 4.5\text{ s}$  已转换为开式流动. 其主要特点为气流

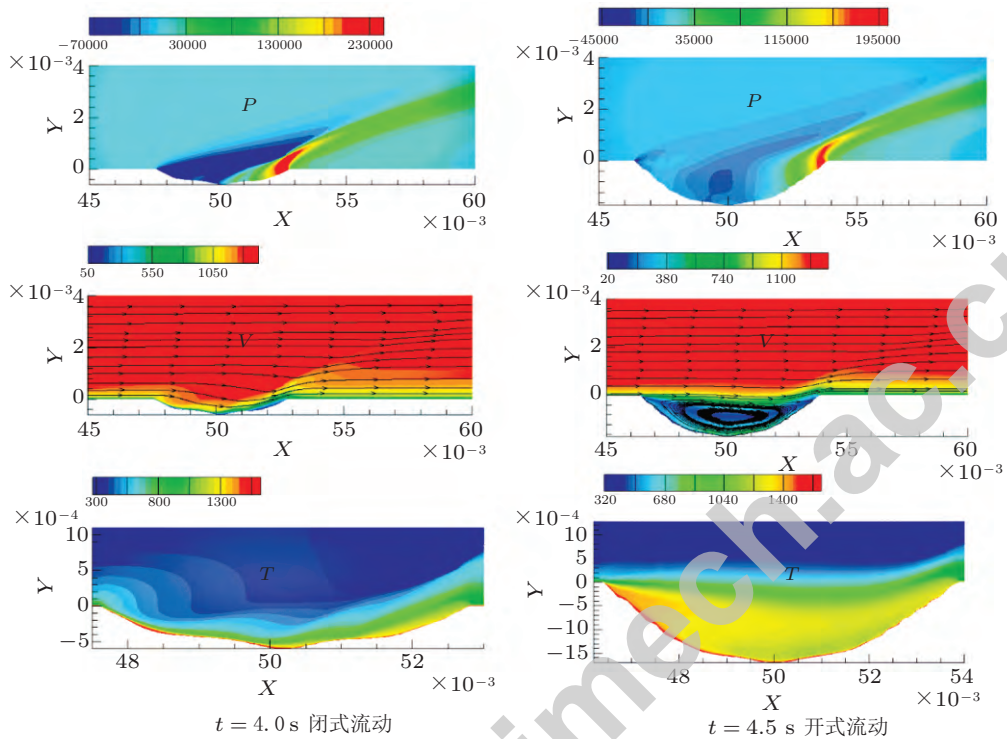


图 25

烧蚀形貌演化与流动模式转变

在烧蚀坑前沿膨胀分离,一部分在烧蚀坑内形成一个较强的主涡,另一部分滑过烧蚀坑并在后沿形成压缩。开式流动的高温气体在烧蚀坑内有很强的滞止效应,在一定程度上降低了气动冷却效应。

## 7 脉冲激光诱导的烧蚀与冲击效应

强激光辐照靶体引起蒸汽或等离子体运动及其在凝聚态靶中的动力学响应,构成了脉冲激光对靶体的力学效应。激光辐照引起靶物质的气化和烧蚀,靶蒸汽或等离子体的喷溅膨胀施加给凝聚态靶表面反冲压力及冲量,是短脉冲强激光的流体动力学效应的主要研究内容(孙承纬 2002)。20世纪90年代,随着短脉冲和超短脉冲高能激光技术逐渐成熟,大量学者开始关注脉冲激光与金属相互作用时的烧蚀、蒸汽喷发、离子发射等气体动力学现象。

对于短脉冲激光烧蚀行为,温度场可用一般的傅里叶热传导模型或非傅里叶热传导模型(Zhang et al. 2005)。超短脉冲激光由于作用时间极短,电子和晶格的热响应不一致,电子吸收能量后不能及时传递给晶格,导致材料薄层电子温度极高,温度场

的理论求解要复杂很多. Anisimov 等 (1974) 从理论上提出了双温模型, 用于计算超短脉冲激光对材料辐照的温升, 该模型考虑了金属电子和晶格在超短脉冲激光作用下不同的温度响应和两者之间的耦合系数对温度的影响. 烧蚀过程中的等离子体和蒸汽对激光有吸收、屏蔽等作用. Boardman 等 (1996) 提出了一种材料的激光烧蚀解析模型, 考虑了材料的熔化、光的吸收和等离子体对激光的屏蔽, 可以比较准确地预测靶材的熔深. 当激光强度较高时, 产物偏离平衡态麦克斯韦分布, 在冲离靶面的过程中, 通过分子碰撞才达到平衡, 此时靶面上存在蒸汽处于不平衡向平衡状态过渡的薄层称为克努森层. 对于克努森层的研究, Anisimov (1968), Chan 和 Mazumder(1987) 早期对这个问题都建立了分析模型. 对于烧蚀蒸汽膨胀过程的研究, Singh 和 Narayan(1990) 建立了一个椭圆模型, 解释了脉冲激光真空的烧蚀和相应的等离子体膨胀现象, 他用气体动力学方程对烧蚀产物的密度和膨胀速度分布进行计算, 获得了广泛的认可, 成为其他模型的基础. Vidal 等 (2001) 为了模拟等离子体在空气中膨胀的情况, 提出了一维 Cartesian Lagrangian 流体模型, 他们假定等离子体处于热力学平衡状态下, 模拟的烧蚀深度、烧蚀阈值以及电子密度演化与实验结果非常符合. Chen 和 Bogaerts(2005) 建立了考虑了环境气体对烧蚀的影响模型, 可以计算纳秒激光烧蚀过程中的靶面烧蚀温度、靶面烧蚀深度、等离子体的空间分布及其对激光强度的影响、以及由此造成的环境气体的冲击波等诸多物理量.

高功率密度的脉冲激光辐照靶材会诱导生成等离子体, 并以逆韧致吸收等机制吸收激光能量, 在材料的可压缩性和惯性约束下, 压力、温度、电子密度迅速升高, 对靶体形成冲击效应. Fairand 等 (1974) 和 Fabbro 等 (1997, 1998) 建立了脉冲激光诱导的等离子体压力模型, 分析不同参数条件下的冲击波压力特征. 童慧峰和唐志平 (2008) 采用具有五阶精度的 WENO 差分格式和简易等离子体状态方程模型对激光与等离子体相互作用的复杂物理过程进行了数值计算. 黄晨光等 (2003) 对弹性薄板在长脉冲激光诱导的热冲击响应进行了分析, 给出了强激光诱导结构变形的量纲分析和相似准则. Wu 等 (2011, 2012) 考虑了短脉冲激光诱导的等离子体膨胀与约束层、吸收层以及靶体介质的变形耦合作用, 提出了描述等离子体压力特征的一维耦合分析模型, 并发展了等离子体压力的迭代求解方法. Wu 等 (2012) 对短脉冲激光引起的残余应力和硬化层深开展量纲分析, 得到了激光冲击强化效果的几何相似律, 并通过数值模型进行了验证. 如图 26 所示, 有约束层的激光冲击效应存在两个主要过程: 一是激光诱导生成高温高压等离子体, 并继续吸收激光能量, 在约束下膨胀的过程; 二是具有压力峰值为  $p_{\max}$ , 高压持续时间为  $\tau_p$  的等离子体在惯性约束作用下, 对金属靶体施加较高的压力, 最终使深度为  $h_p$  的金属表层得到强化, 并在表面形成特征残余应力  $\sigma_{\text{surf}}$ . 考虑如下控制参数:

激光束: 激光能流率  $J$ 、持续时间  $\tau$ 、光斑面积  $S$ ;

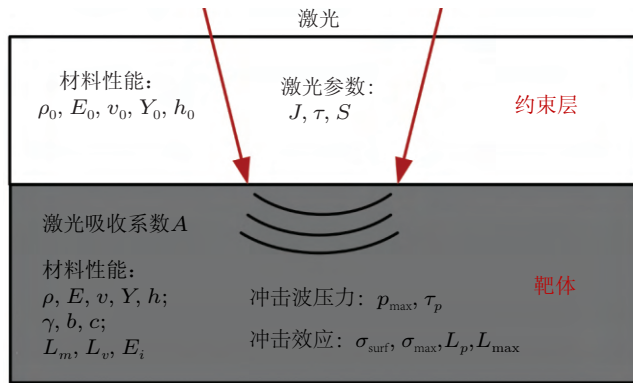


图 26

激光冲击效应主控参数

金属对激光能量的吸收系数:  $A$ ;

约束层: 密度  $\rho_0$ , 杨氏模量  $E_0$ , 泊松比  $\nu_0$ , 屈服强度  $Y_0$ , 厚度  $h_0$ ;

金属靶体: 密度  $\rho$ , 熔化潜热  $L_m$ , 气化潜热  $L_v$ , 电离能  $E_i$ , Grüneison 系数  $\gamma$ , Hugoniot 参数  $b$  和  $c$ , 杨氏模量  $E$ , 泊松比  $\nu$ , 屈服强度  $Y$ .

将上述两个阶段的几何相似律结合起来, 得到激光冲击过程表面残余应力  $\sigma_{surf}$  和塑性影响区深度  $L_p$  的几何相似律

$$\sigma_{surf}/Y = f(AJ/(\rho c^3), \tau/(S^{1/2}/c), h_0/S^{1/2}) \quad (30)$$

$$L_p/S^{1/2} = g(AJ/(\rho c^3), \tau/(S^{1/2}/c), h_0/S^{1/2}) \quad (31)$$

Song 等 (2012) 采用改进的 PDV 激光干涉测速装置, 测量获得了激光冲击靶材的自由表面速度. 如图 27 所示, 捕捉获得了激光冲击过程中金属材料内部的应力波传播和衰减规律, 包括弹性前驱波、塑性加载波、弹性卸载波、塑性卸载波引起的质点速度扰动等特征. 传统的 VISAR 难以测量这类具有低速且快速变化特征的弹性前驱波.

短脉冲强激光也可能引起靶体的层裂破坏. 层裂主要源于两种稀疏波相互产生的高幅值的拉应力: 在适宜厚度的靶材中传播的激光诱导的冲击波压力可以近似为三角波, 当入射的压缩波传至靶体背表面反射为稀疏波并和冲击波的后沿相互作用时, 会在靶体中产生拉应力, 当拉应力大于材料到动态拉伸极限时, 靶体的累积损伤参数达到临界值, 会产生新的自由表面并有裂片从整体分离. 图 28 给出了短脉冲激光诱导的冲击波传播与层裂过程的时空关系原理简图. 凌晨等 (2014) 采用脉宽为 7.32 ns, 能量为 2.5 J 的短脉冲激光器对 0.38 mm 厚的铝靶开展了层裂破坏研究, 采用 PDV 测

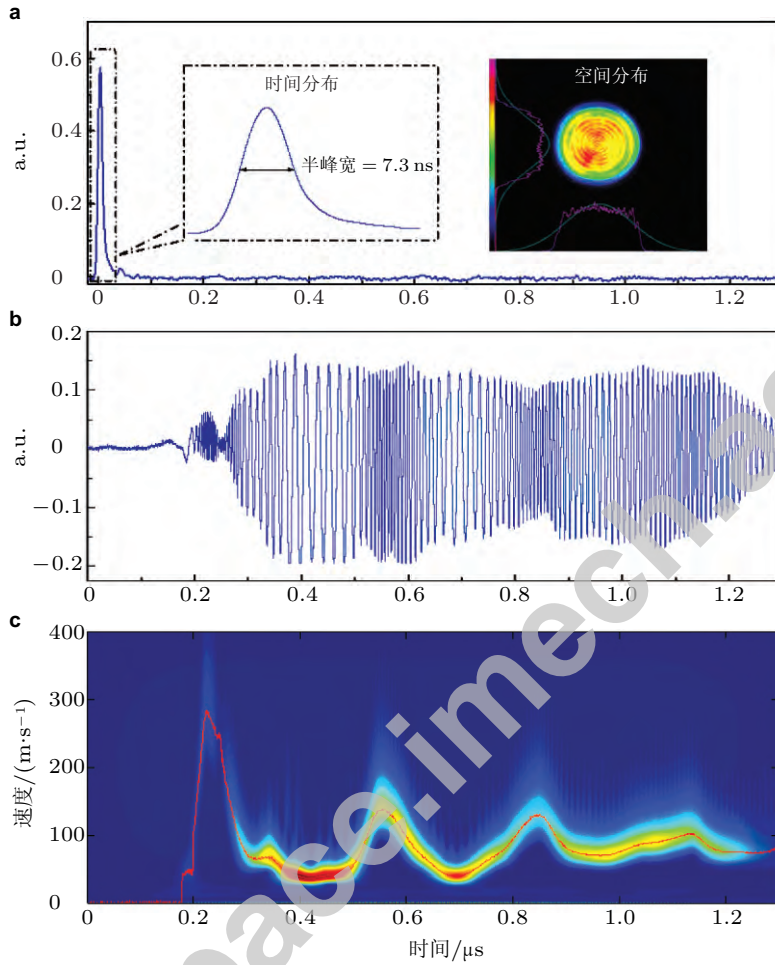


图 27

PDV 对激光冲击过程中靶体背表面质点速度测量. (a) 激光脉宽, (b) 干涉信号, (c) 速度历程

量获得了背表面质点速度, 如图 29 所示. 在  $0.1\ \mu\text{s}$  附近可以看到速度在下降段有一个明显的再上升的过程, 这表明在靶体内部发生了层裂并形成了新的自由表面. 当反射回的卸载波传至新形成的自由表面时, 会再次反射形成压缩波, 从而引起靶体背表面的质点速度再次增大. 靶体的层裂强度  $\sigma_s$  与下降段的速度变化  $\Delta u$  成正比

$$\sigma_s = \frac{1}{2}\rho_0 c_0 \Delta u \quad (32)$$

其中,  $\rho_0$  为铝箔的密度,  $c_0$  为冲击波在铝箔中传播的声速,  $\Delta u$  为在下降段速度下降的大小. 从 PDV 测得的背表面质点速度历程可以看出,  $\Delta u$  大约为  $400\ \text{m/s}$ , 因此可以计算出铝靶的层裂强度  $\sigma_s$  大约为  $2.95\ \text{GPa}$ , 这与已有文献中报道的测量值较为吻合. 从



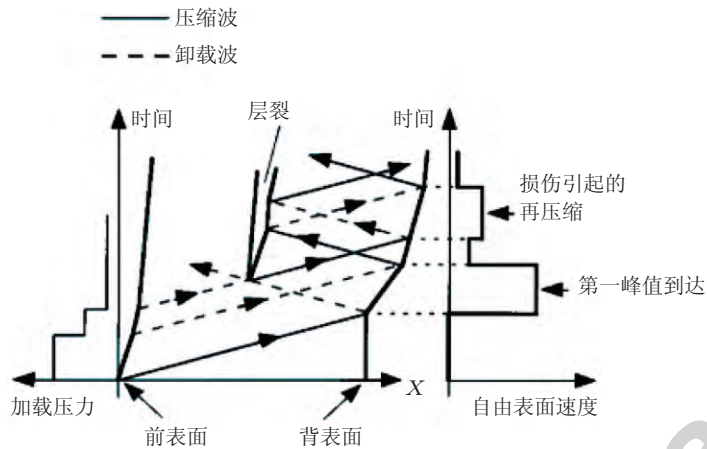


图 28

冲击波传播与层裂过程的时空关系原理简图 (Tollier & Fabbro 1998)

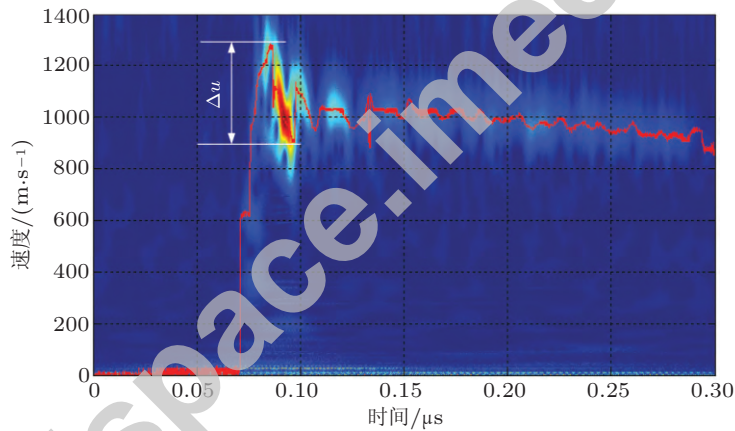


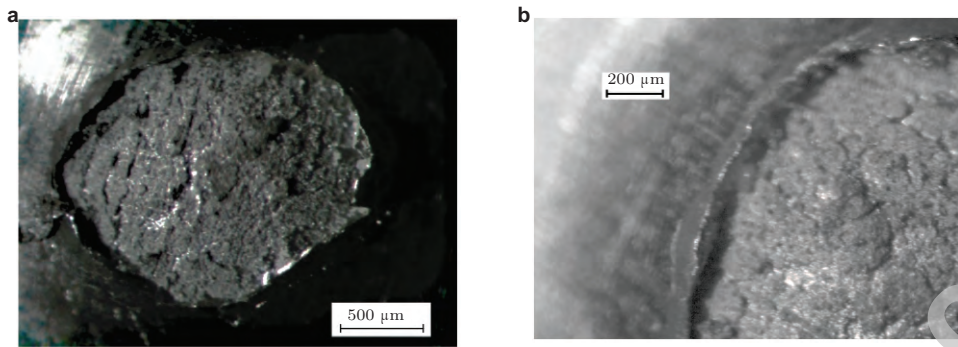
图 29

激光冲击引起的层裂靶体背表面的质点速度历程

显微照片中可以看到由于层裂片的飞离在铝靶中形成的凹坑, 如 图 30 所示.

## 8 结论与展望

激光诱导的热与力学效应往往会引起靶体的破坏, 主要通过烧蚀效应、热力耦合效应和冲击效应等机制对靶体形成综合破坏. 相关研究是一个多学科、跨领域的系统性工作, 涉及到固体力学、流体力学、传热学、化学、光学、材料科学等基础理论学科, 其核心是极端环境下强激光与复杂介质的相互作用机理. 特别是当有高速气流介入以后, 其烧蚀机理与破坏阈值都发生了显著改变. 目前来看, 考虑了各种烧蚀机

**图 30**

激光冲击引起层裂后的铝靶显微照片

理, 并与气动环境及激光辐照相耦合的、较为完整的定量化分析模型还处于发展之中。

开展激光、靶体和服役环境相互作用效应及破坏机理研究, 离不开可靠的实验方法和测量技术。气动环境下激光对靶体的破坏行为与非气动条件有显著不同, 因此有必要研究高功率激光装置与风洞装备联合的实验技术, 开展模拟飞行气动载荷条件下高功率激光对靶体破坏效应的实验研究。通过激光与风洞联合试验, 获取不同气动条件、不同激光参数与靶材的能量耦合系数和冲量耦合系数, 可为流-热-固耦合数值计算提供输入条件; 而在风洞条件下激光破坏机理和破坏阈值的试验研究, 可以作为相关理论分析和数值计算方法验证、改进和应用的主要依据。目前来看, 国内同时具备较强的激光器装备和风洞装备的研究单位不多, 即便在国外也缺乏第一手的实验数据。将高功率固体激光器与标准模型、风洞条件相结合的实验技术还处于探索阶段。

为了实现激光热力效应及其破坏行为的定量化分析与表征, 需要进一步发展能够反映激光、靶体和气动环境相互作用的流-热-固耦合数值计算方法, 掌握固体激光器与风洞联合的激光破坏实验方法与测量技术, 明确强激光对典型靶体材料与结构的毁伤机理、影响规律和破坏阈值。开展上述关键科学问题与关键技术研究, 可以为相关的工程应用提供基础性支撑。

**致谢** 感谢国家自然科学基金重点项目(11332011)、国防科工局基础科研重点项目、中国科学院重大项目资助。作者感谢孙承纬院士、段祝平研究员、赵剑衡研究员、周益春教授、陈发良研究员给予的启发与有益的探讨。感谢吴臣武副研究员提供第4章素材, 黄亿辉博士、赵伟娜提供第5, 6章素材, 吴先前博士提供第7章素材。

### 参 考 文 献

陈博, 万红, 穆景阳, 白书欣. 2008. 重频激光作用下碳纤维/环氧树脂复合材料热损伤规律. 强激光与

- 粒子束, **20**: 547-551 (Chen B, Wan H, Mu J Y, Bai S X. 2008. Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiated by repetition frequency laser. *High Power Laser and Particle Beams*, **20**: 547-551).
- 陈海韬, 夏生杰, 李旭昌, 韩金虎, 姜在英, 靳刚. 1992. 受拉铝板对连续波 CO<sub>2</sub> 激光的热机械响应. 强激光与粒子束, **4**: 141-147 (Chen H T, Xia S J, Li X C, Han J H, Jiang Z Y, Jin G. 1992. Thermomechanical response of Al plates under tension to CW CO<sub>2</sub> laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **4**: 141-147).
- 陈海韬, 夏生杰, 李旭昌, 姜在英, 韩金虎, 吴坚. 1993. 强激光照射受拉铝板的破坏过程. 力学学报, **25**: 16-22 (Chen H T, Xia S J, Li X C, Jiang Z Y, Han J H, Wu J. 1993. The damage process of a tensile Aluminum plate under the intense laser radiation. *Acta Mechanica Sinica*, **25**: 16-22).
- 陈敏孙, 江厚满. 2011. 切向空气气流对激光烧蚀碳纤维复合材料过程的影响. 光学精密工程, **19**: 482-486 (Chen M S, Jiang H M. 2011. Influence of tangential airflows on process of laser ablating carbon-fiber composites. *Optics and Precision Engineering*, **19**: 482-486).
- 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 2010. 切向气流对激光辐照树脂基复合材料的影响. 强激光与粒子束, **22**: 2848-2852 (Chen M S, Jiang H M, Liu Z J. 2010. Effect of tangential airflow on resin composite irradiated by laser. *High Power Laser and Particle Beams*, **22**: 2848-2852).
- 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 2011. 切向空气气流对激光辐照碳纤维复合材料的影响. 国防科技大学学报, **33**: 23-27 (Chen M S, Jiang H M, Liu Z J. 2011. Influence of tangential airflow on laser irradiating carbon-fiber composite. *Journal of National Univeristy of Defense Technology*, **33**: 23-27).
- 陈小伟, 陈裕泽, 余同希, 尹益辉. 1998. 热力联合作用弹性薄圆板的弯曲与屈曲. 强激光与粒子束, **10**: 531-536 (Chen X W, Chen Y Z, Yu T X, Yin Y H. 1998. Non-linear bending, buckling and failure of elastic thin circular plates under combined thermal and force loading. *High Power Laser and Particle Beams*, **10**: 531-536).
- 陈裕泽. 1996. 低功率密度激光辐照结构的热动力失效. 爆炸与冲击, **16**: 149-157 (Chen Y Z. 1996. Thermodynamic failure of the structures irradiated by laser beam with low power density. *Explosion and Shock Waves*, **16**: 149-157).
- 董永香, 黄晨光, 段祝平. 2005. 多层介质对应力波传播特性影响分析. 高压物理学报, **19**: 59-65 (Dong Y X, Huang C G, Duan Z P. 2005. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **19**: 59-65).
- 段占元. 1997. 有限差分-有限元杂交算法及其应用. [博士论文]. 合肥: 中国科学技术大学 (Duan Z Y. 1997. Algorithm and application of hybrid finite difference and finite element. [PhD Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China).
- 耿湘人, 张涵信, 沈清, 高树椿. 2002. 高速飞行器流场和固体结构温度场一体化计算新方法的初步研究. 空气动力学学报, **20**: 422-427 (Geng X R, Zhang H X, Shen Q, Gao S C. 2002. Study on an integrated algorithm for the flowfields of high speed vehicles and the heat transfer in solid structures. *Acta Aerodynamica Sinica*, **20**: 422-427).
- 郭亚林, 梁国正, 丘哲明, 邓杰. 2006. 激光参数对碳纤维复合材料质量烧蚀率的影响. 复合材料学报, **23**: 84-88 (Guo Y L, Liang G Z, Qiu Z M, Deng J. 2006. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite. *Acta Materiae Compositae Sinica*, **23**: 84-88).
- 胡鹏, 陈发良. 2011. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析. 强激光与粒子束, **23**: 1935-1939 (Hu P, Chen F L. 2011. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **23**: 1935-1939).
- 黄晨光, 陈思颖, 段祝平. 2003. 强激光诱导结构变形的量纲分析和相似准则. 爆炸与冲击, **23**: 532-536 (Huang C G, Chen S Y, Duan Z P. 2003. Dimensionless analysis and similarity criterion of high power laser induced structural deformation. *Explosion and Shock Waves*, **23**: 532-536).

- 黄晨光, 陈思颖, 段祝平. 2004. 激光辐照下充压圆筒变形的相似律问题. 强激光与粒子束, **16**: 962-966 (Huang C G, Chen S Y, Duan Z P. 2004. Similarity criterion about deformation and failure of pressurized cylinder subjected to laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **16**: 962-966).
- 黄晨光, 段祝平. 2002. 激光辐照下圆薄板的动态屈曲研究. 应用数学和力学, **23**: 667-672 (Huang C G, Duan Z P. 2002. Studies on the dynamic buckling of circular plate irradiated by laser beam. *Applied Mathematics and Mechanics*, **23**: 667-672).
- 黄晨光, 段祝平, 吴承康. 2002. 热喷涂构件中残余应力的理论分析. 工程力学, **19**: 135-140 (Huang C G, Duan Z P, Wu C K. 2002. A new analytical model for residual stresses due to thermal surface coating. *Engineering Mechanics*, **19**: 135-140).
- 黄亿辉. 2015. 强激光辐照典型目标多场耦合效应的实验与数值模拟研究. [博士学位] 北京: 中国科学院力学研究所 (Huang Y H. 2015. Experimental and numerical studies on the multi-field coupling effect of typical target irradiated by high power laser. [PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences).
- 黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光. 2013. 超声速气流下强激光辐照靶体失效数值模拟. 强激光与粒子束, **25**: 2229-2234 (Huang Y H, Song H W, Huang C G. 2013. Numerical simulation of failure of target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, **25**: 2229-2234).
- 黄亿辉, 袁武, 宋宏伟, 黄晨光. 2014. CW 激光辐照薄板热力响应全场测量. 强激光与粒子束, **26**: 111012-1-5 (Huang Y H, Yuan W, Song H W, Huang C G. 2014. Full-field measurement of thin plate irradiated by CW laser. *High Power Laser and Particle Beams*, **26**: 111012-1-5).
- 李海燕, 李四新, 罗万清, 柳森. 2010. 高超声速飞行器高温流场对激光武器毁伤效应的影响. 强激光与粒子束, **22**: 1192-1196 (Li H Y, Li S X, Luo W Q, Liu S. 2010. Effects of high temperature flowfields around hypersonic air vehicles on laser lethality. *High Power Laser and Particle Beams*, **22**: 1192-1196).
- 李清源. 2012. 强激光对飞行器的毁伤效应. 北京: 中国宇航出版社 (Li Q Y. 2012. Damage Effects of Vehicles Irradiated by Intense Lasers. Beijing: China Astronautic Publishing House).
- 李雅娣, 吴平, 马喜梅, 南宝江, 平丽. 2010. 碳纤维/环氧树脂复合材料层板连续激光烧蚀试验研究. 纤维复合材料, **21**: 21-24 (Li Y D, Wu P, Ma X M, Nan B J, Ping L. 2010. The tests of carbon fiber/epoxy laminated composites under continuous laser irradiation. *Fiber Composites*, **21**: 21-24).
- 凌晨, 宋宏伟, 黄晨光. 2014. 激光冲击下靶体厚度对其动态力学行为的影响. 第十届全国爆炸力学学术会议, 贵阳 (Ling C, Song H W, Huang C G. 2014. The influence of the thickness of targets on the dynamic behavior of them under laser shock. 10th National Conference on Explosion, Guiyang).
- 刘淑英. 1999. YAG 连续激光对玻璃钢材料的破坏效应研究. 红外与激光工程, **28**: 52-57 (Liu S Y. 1999. Research of destructive effect produced by YAG continuous laser acting on fiberglass material. *Infrared and Laser Engineering*, **28**: 52-57).
- 漆海滨, 李文煜. 1999. 强激光束对运动物体的加热. 红外与激光工程, **28**: 33-35 (Qi H B, Li W Y. 1999. High-power laser beam heating up the moving body. *Infrared and Laser Engineering*, **28**: 33-35).
- 强希文. 2000. 强激光与靶材相互作用的力学效应研究. 激光与红外, **30**: 141-144 (Qiang X W. 2000. Investigation on mechanical effects of laser-targets interaction. *Laser and Infrared*, **30**: 141-144).
- 沈敏敬, 龙连春, 陈兴华, 阳志光. 2008. 激光辐照下圆柱壳结构的稳定性分析. 计算力学学报, **25**sup: 124-128 (Shen M J, Long L C, Chen X H, Yang Z G. 2008. Buckling analysis of cylindrical shell under laser irradiation. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, **25**sup: 124-128).
- 石卫波, 李四新, 肖雨, 柳森. 2010. 气动加热对高超声速飞行器激光毁伤效应影响. 强激光与粒子束, **22**: 1215-1218 (Shi W B, Li S X, Xiao Y, Liu S. 2010. Laser lethality of hypersonic vehicles under aero-heating. *High Power Laser and Particle Beams*, **22**: 1215-1218).

- 孙承纬. 2002. 激光辐照效应. 北京: 国防工业出版社 (Sun C W. 2002. Laser Irradiation Effects. Beijing: National Defense Industry Press).
- 谭福利, 赵剑衡, 李永池. 2004. 激光辐照下充压柱壳热断裂的可能性分析. 强激光与粒子束, **16**: 977-980 (Tan F L, Zhao J H, Li Y C. 2004. Probability analysis on thermal fracture of the internally pressured cylinder shell irradiated by laser. *High Power Laser and Particle Beams*, **16**: 977-980).
- 唐志平. 2001. 激光辐照下充压柱壳失效的三维离散元模拟. 爆炸与冲击, **21**: 1-7 (Tang Z P. 2001. 3D Discrete meso-element simulation of failure processes for cylindrical shells subjected to inner pressure and surface laser irradiation. *Explosion and Shock Waves*, **21**: 1-7).
- 童慧峰, 唐志平. 2008. 激光与固体靶面烧蚀等离子体的能量耦合计算. 高压物理学报, **26**: 142-148 (Tong H F, Tang Z P. 2008. Simulation of energy coupling of laser and ablated plasma at target surface. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **26**: 142-148).
- 万红, 胡凯为, 穆景阳, 白书欣. 2008. 树脂基复合材料在连续激光作用下的损伤. 强激光与粒子束, **20**: 6-10 (Wan H, Hu K W, Mu J Y, Bai S X. 2008. Damage analysis of fiber reinforced resin matrix composites irradiated by CW laser. *High Power Laser and Particle Beams*, **20**: 6-10).
- 汪学锋, 李锋, 周炜, 冷文浩, 汤家力. 2009. 流固耦合网格插值方法研究. 船舶力学, **13**: 571-578 (Wang X F, Li F, Zhou W, Leng W H, Tang J L. 2009. Research on grid interpolation method of fluid-structure coupling. *Journal of Ship Mechanics*, **13**: 571-578).
- 王吉, 王肖钧, 王峰, 赵凯. 2005. 强激光辐照下预载柱壳热屈曲失效的数值分析. 高压物理学报, **19**: 151-158 (Wang J, Wang X J, Wang F, Zhao K. 2005. Numerical simulations on buckling failure of preloaded cylindrical shell irradiated by high power laser beam. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **19**: 151-158).
- 王立君, 刘泽金, 姜宗福, 赵伊君, 唐荣奇. 1996. 3.8 $\mu\text{m}$  激光对玻璃钢的碳化破坏研究——玻璃钢的激光碳化破坏研究之二. 红外与激光工程, **25**: 21-25 (Wang L J, Liu Z J, Jiang Z F, Zhao Y J, Tang R Q. 1996. Experimental study on 3.8 $\mu\text{m}$  laser caused fiberglass epoxy carbonization—The second report on laser damage to fiberglass epoxy. *Infrared and Laser Engineering*, **25**: 21-25).
- 王立君, 漆海滨, 刘泽金, 姜宗福, 赵伊君, 唐荣奇. 1996. 玻璃钢的二氧化碳激光碳化实验研究——玻璃钢的激光碳化破坏研究之一. 红外与激光工程, **25**: 48-52 (Wang L J, Qi H B, Liu Z J, Jiang Z F, Zhao Y J, Tang R Q. 1996. Experimental study on CO<sub>2</sub> laser caused fiberglass epoxy carbonization—The first report on laser damage to fiberglass epoxy. *Infrared and Laser Engineering*, **25**: 48-52).
- 王伟平, 唐小松, 桂元珍, 赵龙, 廉敬阳. 2001. 激光对旋转金属壳的加热研究. 应用激光, **21**: 319-321 (Wang W P, Tang X S, Gui Y Z, Zhao L, Lian J Y. 2001. Laser thermal effects on rotating metal shell. *Applied Laser*, **21**: 319-321).
- 王岩. 1994. 计算流体力学中有限元的强间断处理. 空气动力学学报, **12**: 22-29 (Wang Y. 1994. The computation of FEM with strong discontinuity in CFD. *Acta Aerodynamica Sinica*, **12**: 22-29).
- 王以忠. 2007. 激光对碳纤维增强环氧树脂基复合材料的辐照效应. [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学 (Wang Y Z. 2007. Effects of Laser Irradiation to Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites. [Master Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology).
- 吴承康. 1995. 等离子体材料加工. 航空制造技术, (**S1**): 11-12 (Wu C K. 1995. Material processing by plasma. *Aeronautical Manufacturing Technology*, (**S1**): 11-12).
- 吴小翠, 王一伟, 程欣欣, 黄晨光, 吴臣武. 2014. 超声速流场条件下激光辐照耦合效应数值模拟. 强激光与粒子束, **26**: 091010-1-7 (Wu X C, Wang Y W, Cheng X X, Huang C G, Wu C W. 2014. Numerical simulation on coupling effect of laser irradiation in supersonic flow. *High Power Laser and Particle Beams*, **26**: 091010-1-7).

- 袁红, 谭福利, 王伟平, 孙承纬. 2006. 连续和重复频率激光对旋转壳体加热效率的数值模拟. 强激光与粒子束, **18**: 1975-1978 (Yuan H, Tan F L, Wang W P, Sun C W. 2006. Numerical simulation of heating efficiency comparison of CW laser and repeated frequency laser irradiating rotational shells. *High Power Laser and Particle Beams*, **18**: 1975-1978).
- 袁红, 赵剑衡, 谭福利, 孙承纬. 2005. 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟. 强激光与粒子束, **17**: 681-684 (Yuan H, Zhao J H, Tan F L, Sun C W. 2005. Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **17**: 681-684).
- 张阿漫, 戴绍仕. 2011. 流固耦合动力学. 北京: 国防工业出版社 (Zhang A M, Dai S S. 2011. Dynamics of Fluid-Structure Coupling. Beijing: National Defense Industry Press).
- 张家雷, 谭福利, 全延锦. 2010. 激光辐照下充压柱壳的破坏能量阈值数值模拟. 强激光与粒子束, **22**: 991-995 (Zhang J L, Tan F L, Tong Y J. 2010. Numerical simulation of failure energy threshold of internally pressured cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **22**: 991-995).
- 张健, 黄晨光. 2007. 外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟. 强激光与粒子束, **19**: 1817-1821 (Zhang J, Huang C G. 2007. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, **19**: 1817-1821).
- 张黎, 贺佳, 谭福利. 2011. 激光加热金属板流固耦合数值模拟. 强激光与粒子束, **23**: 866-870 (Zhang L, He J, Tan F L. 2011. Numerical simulation of metal plates under laser irradiation based on fluid-solid coupling. *High Power Laser and Particle Beams*, **23**: 866-870).
- 张树林, 王洪斌, 张联合. 2013. 热障涂层隔热效果试验研究. 航空发动机, **39**: 61-64 (Zhang S L, Wang H B, Zhang L H. 2013. Experimental Study of Insulating Effectiveness for Thermal Barrier Coating. *Aeroengine*, **39**: 61-64).
- 赵剑衡, 孙承纬, 袁永华, 王春彦, 李思忠. 1998. 激光辐照下充压圆柱壳爆裂规律的实验研究. 应用激光, **18**: 196-200 (Zhao J H, Sun C W, Yuan Y H, Wang C Y, Li S Z. Experimental study on the rupture regulation of inner-pressurized cylindrical shells under laser beam loading. 1998. *Applied Laser*, **18**: 196-200).
- 赵伟娜, 黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光. 2013. 激光辐照下轴压薄壁圆柱壳屈曲行为研究. 2013 中国力学大会, 陕西西安 (Zhao W N, Huang Y H, Song H W, Huang C G. 2013. Buckling behavior of thin-walled circular shell under laser irradiation. National Conference on Mechanics 2013, Xi'an, Shaanxi).
- 郑艳丽, 杜太焦, 束庆邦, 王建国. 2010. 不同气流环境下激光辐照金属材料温升的数值模拟. 强激光与粒子束, **22**: 2531-2534 (Zheng Y L, Du T J, Shu Q B, Wang J G. 2010. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high-power laser beam in different airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, **22**: 2531-2534).
- 周益春, 段祝平, 解伯民, 黄晨光, 杨治星. 1995. 激光破坏机理研究的一个新进展. 力学学报, **27**: 277-293 (Zhou Y C, Duan Z P, Xie B M, Huang C G, Yang Z X. 1995. A new progress on laser damage mechanism. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **27**: 277-293).
- Abbott R P, Boley C D, Fochs S N, Nattrass L A, Parker J M, Rubenchik A M, Smith J A. 2006. High-power solid-state laser: lethality testing and modeling, DTIC Document.
- Adachi J, Anastasi R F, Beatty J F. 1978. Laser-produced strength degradation of plates in tension and tubes in torsion, DTIC Document.
- Anisimov S. 1968. Vaporization of metal absorbing laser radiation. *Sov. Phys. JETP*, **27**: 182-183.
- Anisimov S, Kapeliovich B, Perelman T L. 1974. Electron emission from metal surfaces exposed to ultra-short laser pulses. *Sov. Phys. JETP*, **39**: 375-378.

- Aukje D B, Hester B, Alexander V Z. 2005. Comparing different methods for the coupling of non-matching meshes in Fluid-Structure Interaction computations. AIAA CFD Conference, Toronto.
- Bakhvalov N, Panasenko G. 1989. Homogenisation: Averaging processes in periodic media//Mathematical Problems in the Mechanics of Composite Materials, Mathematics and Its Applications, vol. 36. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Bamford C, Crank J, Malan D. 1946. The Combustion of Wood. Part I//Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Berthe L, Fabbro R, Peyre P, Tollier L, Bartnicki E. 1997. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma. *Journal of Applied Physics*, **82**: 2826-2832.
- Blades E L, Newman III J C. 2007. Computational Aeroelastic Analysis of an Unmanned Aerial Vehicle using U2NCLE//Proc. of the AIAA Dynamics Specialists Conf.
- Boardman A, Cresswell B, Anderson J. 1996. An analytical model for the laser ablation of materials. *Appl. Surf. Sci.*, **96-98**: 55-60.
- Boley C, Fochs S, Rubenchik A. 2007. Lethality effects of a high-power solid-state laser//Proc. of 4th High Energy Laser Lethality Conference.
- Cebal J R, Löner R. 2005. On the loose coupling of implicit time-marching codes. *AIAA Paper*, **1093**: 2005.
- Chan C, Mazumder J. 1987. One-dimensional steady-state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser material interaction. *J. Appl. Phys.*, **62**: 4579-4586.
- Chen S Y, Huang C G, Wang C K, Duan Z P. 2008. Mechanical properties and constitutive relationships of 30CrMnSiA steel heated at high rate. *Materials Science & Engineering A*, **483-484**: 105-108.
- Chen Y, Li S. 1993. Buckling failure of the axially pre-compressed cylindrical shell irradiated by CW CO<sub>2</sub> laser beam. *Plasmadynamics & Laser Conference: AIAA 93-3231*.
- Chen Z, Bogaerts A. 2005. Laser ablation of Cu and plume expansion into 1 atm ambient gas. *J. Appl. Phys.*, **97**: 063305.
- Cheng X X, Wu C W. 2013. Film residual stress assessment method via temporarily thermal relaxation. *Experimental and Applied Mechanics*, **4**: 267-276.
- Clarke D R, Oechsner M, Padture, N P. 2012. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*, **37**: 891-898.
- Clarke D R, Phillpot S R. 2005. Thermal barrier coating materials. *Materials Today*, **8**: 22-29.
- Dimitrienko Y. 1997. Modelling of the mechanical properties of composite materials at high temperatures: Part 1. Matrix and fibers. *Applied Composite Materials*, **4**: 219-237.
- Dimitrienko Y. 1998. Thermomechanics of Composites under High Temperatures. Springer Science & Business Media.
- Evans A G, Mumm D R, Hutchinson J W, Meier G H, Pettit F S. 2001. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, **46**: 505-553.
- Fabbro R, Peyre P, Berthe L, Scherpereel X. 1998. Physics and applications of laser-shock processing. *Journal of Laser Applications*, **10**: 265-279.
- Fairand B P, Clauer A H, Jung R G, Wilcox B A. 1974. Quantitative assessment of laser-induced stress waves generated at confined surfaces. *Applied Physics Letters*, **25**: 431.
- Geubelle P H, Baylor J S. 1998. Impact-induced delamination of composites: A 2D simulation. *Composites Part B: Engineering*, **29**: 589-602.

- Griffis C, Masumura R, Chang C. 1981. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating. *Journal of Composite Materials*, **15**: 427-442.
- Huang C G, Chen S Y, Wang C K. 2007. Effects of heating rate and temperature holding time on mechanical behaviors of aluminum alloys. *Key Engineering Materials*, **345-346**: 33-36.
- Huang C G, Chen S Y, Duan Z P. 2003. FEM simulations and optimization about residual stresses in coating structures with functionally graded materials layer. *Materials Science Forum*, **423-425**: 659-664.
- Huang Y H, Song H W, Huang C G. 2016. Heat transfer and mode transition for laser ablation subjected to supersonic airflow. *Chin. Phys. Lett.*, **33**: 014201.
- Hurka J, Ballmann J. 2001. Elastic panels in transonic flow. AIAA 2001-2722.
- Keshun D, Zheng J, Davies A, Williams F W. 2000. Thermal buckling of axially precompressed cylindrical shells irradiated by laser beam. *AIAA Journal*, **38**: 1789-1794.
- Kibler K, Carter H, Eisenmann J. 1977. Response of graphite composites to laser radiation, DTIC Document.
- Li S Z, Chen Y Z, Zhang G J, Li Z M. 1994. The failure of shells subjected to internal pressure and irradiated by CW CO<sub>2</sub> laser beam. AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference, 25th, Colorado Springs, CO.
- Lions J. 1979. Remarks on non local phenomena in composite materials and in perforated materials//Proc. of the IUTAM Symp. Northwestern University. Amsterdam: Noth-Holland.
- Loehner R, Yang C, Cebra J, Baum J D, Luo H, Pelessone D, Charman C. 1998. Fluid-structure-thermal interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructured grids//Proc., 29th AIAA Fluid Dynamics Conference.
- Mi Y, Crisfield M A, Davies G, Hellweg H B. 1998. Progressive delamination using interface elements. *Journal of Composite Materials*, **32**: 1246-1272.
- Moskal G. 2009. Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **37**: 323-331.
- Munson T R, Spindler R J. 1961. Transient thermal behavior of decomposing materials. Part 1. General theory and application to convective heating, DTIC Document.
- Najmi A H, Sadowsky J. 1997. The continuous wavelet transform and variable resolution time-frequency analysis. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, **18**: 134-140.
- Pelletier D, Borggaard J, Hetu J. 2000. A continuous sensitivity equation method for conduction and phase change problems//38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- Pering G, Farrell P V, Springer G. 1980. Degradation of tensile and shear properties of composites exposed to fire or high temperature. *Journal of Composite Materials*, **14**: 54-68.
- Pobedrya B. 1981. Numerical Methods in the Theory of Elasticity and Plasticity. Izd. Mosk. Univ., Moscow.
- Rapp B. 2006. Coatings improve efficiency. *Materials Today*, **9**: 6.
- Samarski A. 1976. Some questions from the general theory of difference schemes. *Trans. Amer. Math. Soc.*, **105**.
- Semak V V, Miller T. 2006. Modeling of laser charring and material removal in fiberglass materials. *J. Directed Energy*, **2**: 5.
- Singh R, Narayan J. 1990. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model. *Phys. Rev. B*, **41**: 8843.
- Slifka A J, Filla B J, Phelps J M, Bancke G, Berndt C C. 1998. Thermal conductivity of a zirconia thermal



- barrier coating. *Journal Of Thermal Spray Technology*, **7**: 43-46.
- Song H W, Wu X Q, Huang C G, Wei Y P, Wang X. 2012. Measurement of fast-changing low velocities by photonic doppler velocimetry. *Review of Scientific Instruments*, **83**: 073301.
- Sun C W, Zhuang S M, Wang Y P. Dynamic fracture in metals at high strain rate. In: Davison L, Grady D E, et al. eds. *High-Pressure Shock Compression of Solids*, Vol. II, Springer, 1996.
- Tollier L, Fabbro R. 1998. Study of the laser-driven spallation process by the VISAR interferometry technique. II. Experiment and simulation of the spallation process. *Journal of Applied Physics*, **83**: 1231-1237.
- Tollier L, Fabbro R, Bartnicki E. 1998. Study of the laser-driven spallation process by the velocity interferometer system for any reflector interferometry technique. I. Laser-shock characterization. *Journal of Applied Physics*, **83**: 1224-1230.
- Vaßen R, Jarligo M O, Steinke T, Mack D E, Stöer D. 2010. Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, **205**: 938-942.
- Vidal F, Lavillea S, Johnstona T. 2001. Numerical simulations of ultrashort laser pulse ablation and plasma expansion in ambient air. *Spectrochimica Acta Part B*, **56**: 973-986.
- Wieting A R, Dechaumphai P, Bey K S, Thornton E A, Morgan K. 1991. Application of integrated fluid-thermal-structural analysis methods. *Thin-Walled Structures*, **11**: 1-23.
- Wu C W, Huang C G, Chen G N, Wang M X. 2013. Laser heating induced plastic deformation in a pre-elastic-stretched titanium alloy strip. *Optics and Laser Technology*, **45**: 558-564.
- Wu C W, Wu X Q, Huang C G. 2015. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes. *Optics and Laser Technology*, **73**: 23-28.
- Wu C W, Huang C G, Chen G N. 2010. Interface delamination of the thermal barrier coating subjected to local heating. *Science China Technological Sciences*, **53**: 3168-3174.
- Wu X Q, Duan Z P, Song H W, Wei Y P, Wang X, Huang C G. 2011. Shock pressure induced by glass-confined laser shock peening: Experiments, modeling and simulation. *Journal of Applied Physics*, **110**: 053112.
- Wu X Q, Wang X, Wei Y P, Song H W, Huang C G. 2012. Parametric study on single shot peening by dimensional analysis method incorporated with finite element method. *Acta Mechanica Sinica*, **28**: 825-837.
- Zhang D M, Li L, Li Z H. 2005. Non-Fourier conduction model with thermal source term of ultra short high power pulsed laser ablation and temperature evolution before melting. *Physica B*, **364**: 285-293.
- Zhang K X, Liu X F, Liu C L, Sun C W, Zhang N. 1996. CW/COIL induced laser thermal stress in aluminum alloy plane plate. 27th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Zhang N, Liu C L, Sun C W. 1995. The thermocoupling effect of CW COIL beam on composites//Proc. of 26th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Zhao H B, Levi C G, Wadley H N G. 2009. Vapor deposited samarium zirconate thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, **203**: 3157-3167.

(责任编辑: 戴兰宏)

## Progress in thermal-mechanical effects induced by laser

SONG Hongwei      HUANG Chenguang<sup>†</sup>

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

**Abstract** In this paper we review several recent progresses in laser-induced thermal-mechanical effects, including constitutive model under high temperature and high temperature rise rate, laser damage behaviors of typical structures like thin plate and cylinders, and laser damage behaviors of multi-layered materials. We describe analytical model and mechanism study on the laser damage behavior including phase transformation and ablation, numerical modeling on the thermal-fluid-structure coupling behavior, and the shock effect and damage behavior induced by short pulse laser.

**Keywords** laser, constitutive model, thermal-mechanical damage, ablation, thermal-fluid-structure coupling, shock

---

Received: 29 May 2015; accepted: 21 April 2016; online: 5 May 2016

<sup>†</sup> E-mail: huangcg@imech.ac.cn

Cite as: Song H W, Huang C G. Progress in thermal-mechanical effects induced by laser. *Advances in Mechanics*, 2016, 46: 201610

© 2016 *Advances in Mechanics*.



黄晨光, 1969 年生, 理学博士, 研究员、博士生导师, 现为中科院力学所副所长、学术委员会委员, 中科院流固耦合系统力学重点实验室主任。主要研究方向包括冲击动力学、强激光与物质相互作用、流固耦合等。曾获得中科院科技进步一等奖、国防科技进步二等奖等奖项。现任国家 863 专题专家组成员、中国力学学会常务理事、流固耦合专业委员会副主任委员、《爆炸与冲击》副主编等。在国内外学术期刊发表论文 100 余篇。



宋宏伟, 1973 年生, 工学博士, 研究员、中科院力学所学位委员会委员。主要研究方向为轻质材料与结构的热-力学行为、激光的热力效应等。国家重大专项、中科院重大项目、863 项目等课题负责人。已发表学术论文 70 余篇, 其中 SCI 收录 20 余篇, 合作出版专著 1 部。现任中国科学院青年科学促进会会员, ASME 会员。曾荣获哈尔滨工业大学优秀博士论文、中国科学院卢嘉锡青年人才等多项奖励。