

强激光破坏机制研究进展¹⁾

周益春 段祝平 解伯民

(中国科学院力学研究所, 材料动力学及激光与物质相互作用实验室, 北京 100080)



周益春, 1963年出生于湖南衡阳市, 1985年毕业于湘潭大学理论物理专业, 1988年在国防科技大学军用光学专业获工学硕士学位, 1994年在中国科学院力学研究所基础力学专业获理学博士学位, 毕业后直接晋升为副教授。现从事强激光破坏机理、材料本构关系及新型材料力学性能的实验和理论研究工作, 在国内外发表论文近30篇, 受到中国科学院等部门的多项奖励。

摘要 本文对强激光造成靶材破坏机理进行了评述, 将激光破坏机理在 $I-t$ 平面内分为冲击破坏、热烧蚀破坏和非熔化条件下的热应力破坏三个区域, 并分别对各区激光-靶材相互作用过程及破坏方式进行了评述, 给出了国内外的最新研究成果及研究展望。

关键词 激光破坏机理, 研究进展, 反问题

1 强激光对材料的破坏机制概述

由于激光束以光速传播, 具有能量高度集中等一些独特的性能, 自1961年第一台激光器问世以后, 人们很快就认识到激光将会成为科学研究和技术进步的重要工具。激光技术与激光和物质相互作用是紧密相关的。1971年Ready出版了关于激光效应的第一本专著^[1]。这本专著问世之后, 无论在强激光与物质相互作用的基础理论研究方面^[2], 还是激光加工^[3]以及激光的军事应用^[4,5]方面都有不少专著。我国对激光破坏机制的研究始于60年代, 但由于激光器件的限制, 60、70年代主要限于短脉冲激光束对靶材冲击破坏效应的理论研究方面^[6]。自80年代以后, 在强激光引起材料的热学和力学效应方面^[7], 在基础理论研究、大型数值程序计算、实验测试手段、大型的演示实验等领域都取得了长足的发展。

强激光对靶材的破坏机理研究就是要研究激光对金属(以铝合金、钛合金等航空材料为主)、非金属(以玻璃钢及其它复合材料为主)和光电子器件(以红外探测元件为主)等材料及其结构的破坏效应。强激光对金属和非金属等结构材料的破坏称为硬破坏, 而对光电子器件等功能材料的破坏称为软破坏, 本文只讨论硬破坏效应。破坏效应与激光光源、外界环境及靶材的参数有关。以框图1来说明强激光对靶材的破坏流程, 以入射激光参数、外界环境及靶材参数作为“输入”, 以激光-靶相互作用过程作为“中间运行”, 最后以破坏效应作为“输出”。同时, 输入参数、运行过程及输出三者之间又是相互耦合的, 使得整个系统是一个非线性系统。

入射激光参数包括激光波长 λ , 功率密度 I , 激光作用时间 τ , 激光束的时空结构等。激光波长的覆盖范围从nm到 μm 量级, 激光的时间特性从连续波到飞秒级的激光脉冲, 激

¹⁾ 国家863高技术激光技术领域和国家自然科学基金资助项目。

光的功率密度从 $10^2 \text{W/cm}^2 \sim 10^{12} \text{W/cm}^2$ ，激光束的时间分布可以是单脉冲型的和具有振荡型的多脉冲序列，激光束的空间分布可以是单模的高斯分布和多模的非高斯分布。外界环境可以是真空、各种各样的大气环境以及人工设计的具有易反射或易吸收功能的各种环境。靶材参数既包括材料的比热 C_p ，热传导系数 k ，热扩散系数 D ，熔点 T_m 等热物理性能参数，又包括弹性模量 E ，屈服强度 σ_0 ，拉伸断裂强度 σ_b 等力学性能参数。这些输入参数的差异，将导致完全不同的激光-靶相互作用过程和不同的破坏效应。

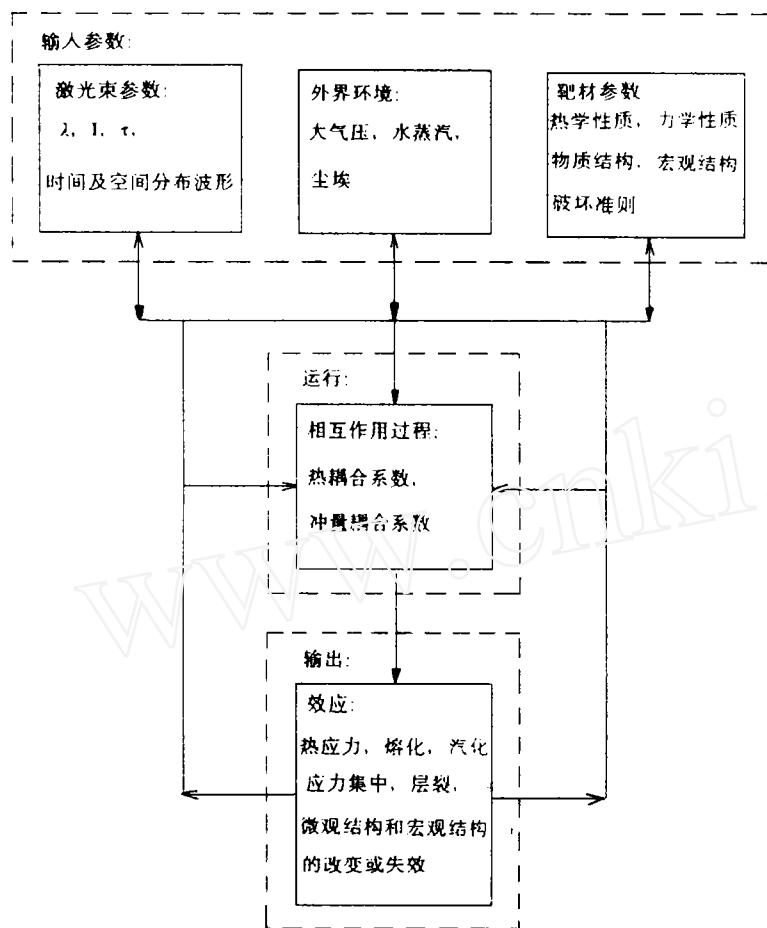


图 1 研究强激光对靶材破坏的流程图
 → 表示正过程, - - - - - 表示反过程

人们通常在激光束的功率密度 I 及其作用时间 τ 组成的 $I-\tau$ 平面内来研究各种不同的破坏效应^[8,9]。我们可以将 $I-\tau$ 平面划分成三个区域，①强冲击波区，即激光束的功率密度 I 大于 $10^8 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$ ，脉宽 τ 小于 $10\mu\text{s}$ 。这样一束激光引起靶材迅速熔化和汽化，而在靶材表面产生由激光维持的燃烧波 (LSCW)，或者是由激光维持的爆轰波 (LSDW)。在靶材内部产生一冲击波，该冲击波可能造成材料的损伤或层裂等材料破坏效应或者冲塞剪切等结构破坏效应。②烧蚀区，一般当功率密度 I 大于 10^5W/cm^2 ，而脉宽大于 $10\mu\text{s}$ 时，激光束将使靶材熔化或汽化，造成材料熔融和穿孔，冷却过程又会引起孔边一很高的应力集中区。③非穿孔区，Wendlandt^[8] 将此区定义为非破坏区。从 80 年代初以来，人们不断发现在此

区域内,靶材也可以被破坏,尤其是由热应力引起的破坏. 即当激光束的功率密度较低而作用时间较长,且存在外界载荷条件时,靶材由于高温软化和内部热应力,易造成材料的热应力破坏或结构的失效.

激光破坏机制的研究有助于加深对激光加工机理的了解. 这时人们也常用 $I-\tau$ 平面研究选择最佳激光加工参数,因为参数选择不当时可能适得其反. 例如在激光焊接或表面合金化时,在熔池底部有时出现裂纹. 在激光加工中,激光束通常对靶材作相对运动, Ion^[10] 等人以无量纲激光功率密度 I^* 和激光束的无量纲运动速度 V^* 作为平面,将 I^*-V^* 平面划分成汽化、熔化、加热三个区域. 本文对激光加工技术将不作特别的讨论,详细可参阅 Ion^[10] 的文章和王家金^[3] 的著作.

2 冲击破坏与层裂效应

2.1 脉冲激光与靶材作用的过程

当一高强度的脉冲激光束辐照到固体靶材上时,固体物质将以各种不同的机制吸收激光能量. 一般而言,固体物质对激光能量的吸收机制大体上可以分为逆韧致吸收、光电离、多光子吸收、杂质吸收、空穴吸收等五种类型. 金属材料对通常范围波长激光的吸收主要是导带电子的逆韧致吸收. 材料吸收激光能量,首先并不是加热,而是使其粒子(电子、离子和原子)获得过剩的能量,包括束缚电子的激发能、自由电子动能和晶格能量等. 这些能量在各自由度内和各自由度之间的分配方式,一开始并不是热平衡的,它们还必须经过粒子之间的碰撞才能达到平衡,从而体现为材料宏观温度的升高. 材料吸收激光能量后趋于热平衡的过程叫做弛豫过程^[11],或者称热化过程. 弛豫过程是一个较短的时间尺度,对于脉冲宽度大于纳秒的激光脉冲,可假定在激光作用瞬间已达到热平衡. 如果激光在材料中的能量沉积速率足够快,材料的升温占优势. 当材料的某个局部温度升高到熔点 T_m 时,材料就会发生熔融,进而产生汽化. 在激光强度足够高时,激光与金属蒸汽作用,使金属原子激发,并导致等离子体的产生. 如果激光强度不足以使环境气体完全电离,这时的电离阵面将以亚声速传播,形成激光支持的燃烧波,即 LSC 波 (laser supported combustion waves). 当激光强度足够高到能使环境气体完全电离时,电离阵面将以超声速传播,形成激光支持的爆轰波,即 LSD 波 (laser supported detonation waves). 近 20 年来,人们对于 LSC 波和 LSD 波进行了许多实验和理论研究^[2]. 描述激光-靶相互作用过程的效应由一冲量耦合系数 (impulse coupling coefficient) C_m 来表征

$$C_m = \int_0^\infty P_a dt / \int_0^\infty I dt = J / E_J \quad (1)$$

式中 P_a 是靶表面的压力, J 是传给靶的总冲量, E_J 是入射激光的能量, C_m 的单位是 dyne/W.

1966 年, Lawrence Livermore 实验室的 Gregg 和 Thomas^[12] 首次用红宝石巨脉冲激光辐照不同材料,测出了靶材上获得的压力,并估算出靶材内引起的激波最大压强为 60 ~ 100 GPa (1 大气压 = 10^5 Pa), 并有可能达到 1000 GPa. 随后, Larson^[13]、Steverding^[14] 等人从军事应用出发,迅速从理论和实验上对冲量耦合系数进行了系统的研究. 尤其是最近几年,发展了各种不同的测试技术,如单摆法, LTFOS (luminosity time-to-flight technique) 技术,以及机电冲量计和悬浮冲量计法,并且直接从流体力学计算、比例模型、原子分子物理计算以及靶材所处的不同环境来研究冲量耦合系数. 这些理论和实验工作的紧密结合,大大推进了

激光与靶相互作用过程的研究. Phipps 等人^[15]在真空环境下,对 27 种不同材料用脉冲的 K_r ,F,HF, CO_2 激光,脉宽为 $22ns \sim 2\mu s$ 的范围内进行了 5 个系列的实验,测得了 2000 个实验数据,入射激光束的功率密度为 $5MW/cm^2 \sim 50GW/cm^2$ 的范围,覆盖了 $(I\lambda\sqrt{\tau})(W\sqrt{s}/cm)$ 从 $1 \sim 10^7$ 的 7 个数量级,同时也利用文献的许多实验数据,最后拟合出经验公式

$$C_m = b_0(I\lambda\sqrt{\tau})^{n_c} \quad (2)$$

其中 C_m, I, λ, τ 的单位分别为 $dyne/W, W/cm^2, cm, s$, 这里 $n_c = -0.3 \pm 0.03, b_0 = 5.6 \sim 6.5$, 与材料有关,对于铝 $b_0 = 5.6$, 对于 C-H 材料 $b_0 = 6.5$, Phipps 等人以及文献的实验数据点都落在 $(1.6 \pm 1)(I\lambda\sqrt{\tau})^{n_c}$ 的范围内. 公式 (2) 可能是现今在真空环境下最系统的实验结果总结,可惜,由于强激光与物质相互作用过程的极其复杂性,目前的各种理论模型及数值模拟结果都还很难与实验结果完全一致.

2.2 破坏效应

强脉冲激光束辐照到固体靶材上时,靶材的局部表面将受到突加载荷的作用. 但由于物质的惯性,突加载荷对于物体各部分质点的扰动不可能同时发生,而要经过一个传播过程,由局部扰动区逐步传播到未扰动区,即在靶材中形成应力波. 该应力波在靶中传播时,幅度衰减,后沿变宽,当它从后自由面反射时,形成拉伸波,同入射的压缩波相互作用,造成材料的局部损伤,甚至引起层裂效应. 这一过程类似于轻气炮等机械载荷加载时形成的层裂破坏.

1969 年, Anderholm^[16]用脉宽为 $12ns$ 、能量为 $7J$ 的红宝石激光辐照 $0.5mm$ 厚的铅靶上,首次观察到激光引起材料的层裂现象,但其工作未正式发表; 1973 年 Fox 和 Barr^[17]进行激光打靶实验时,意外地观察到了铝靶的层裂现象. 实验是用 $1ns$ 钕玻璃激光辐照到 $1.0mm$ 厚 6061-T6 铝靶,能量密度为 $(5 \pm 2) \times 10^3 J/cm^2$, 光斑直径是 $1.0 \sim 1.5mm$, 结果使靶材背面直径 $0.89mm$ 范围完全撕裂,裂片厚 $0.53mm$. Fox 和 Barr 的工作引起了人们的高度重视,并详细地从理论上对这种现象进行了研究,且给出了一维数值程序. 随后,我国的科学工作者也给出了关于激光引起靶材层裂的一维和二维流体弹塑性数值分析,并且在最近几年也相继观察到短脉冲激光引起金属材料的层裂现象,还发现应变率高达 $10^7 s^{-1}$.

虽然激光束引起材料的层裂现象同爆炸载荷、平板撞击引起材料的层裂现象的机理是相同的,但由于激光束的时间和空间的非均匀性(通常是高斯分布),激光能量的限制、电磁干扰以及激光-靶相互作用的复杂性使研究工作进展缓慢,尤其是实时观察记录非常困难. 最近几年来,随着冲量耦合系数研究和实时测量的深入,人们发展了各种不同的实验手段,包括在靶材前加上一些薄膜来增加冲量耦合系数等方法以及用压电石英晶体, Doppler 位移干涉技术和 Doppler 速度干涉仪来测量冲击波的衰减规律或者靶材背面的质点速度等. 现时,人们已不满足于观察到层裂现象,而是用其来研究应变率高达 $10^7 s^{-1}$ 的极高应变率(只有超高速碰撞才能达到这样高的应变率)下材料的动态力学性能,材料界面强度,结构材料的角裂以及激光加工的冲击硬化效应等.

激光束与平板撞击载荷不同,它会造成在激光辐照面出现烧蚀区,在材料内部有明显的“体积”破坏空洞和剥落破坏空洞(即层裂). 前表面的烧蚀,后表面的层裂以及剩余材料性能的改变将严重影响到结构的承载能力. 虽然短脉冲激光束引起材料层裂效应研究已取得重要进展,而且也注意到了由于激光的作用可能会出现结构的失效^[18],但由于激光能量的限制,短脉冲激光束对受载结构的整体破坏行为研究开展得还很少,尤其是人们预言

的短脉冲激光可能引起材料产生冲塞剪切破坏现象至今在实验上未观察到。

3 热烧蚀及热应力破坏效应

3.1 热耦合系数

功率密度 $I < 10^8 \text{W/cm}^2$ 的长脉冲或连续激光束辐照到固体靶材上时, 一般不会出现等离子体点火和产生激光维持的吸收波 (LSAW, 包括 LSCW 和 LSDW)。低强度激光束对靶材的破坏主要是热烧蚀和热应力引起的 (与应力波的冲击破坏性质不同), 因此, 热耦合效率在激光-靶的相互作用中起着重要的作用。以 $C_{th} = (1 - R_0)$ 来表征热耦合效率, C_{th} 称为热耦合系数 (thermal coupling coefficient) 或能量吸收系数, R_0 是靶材对激光束的反射系数。热耦合系数与靶材热物理性质、靶面状态、激光功率密度、波长及脉宽等多种因素有关。

由于金属靶材, 特别是铝、钛、铜等都是良导体, 它们对激光束的反射系数特别大, 只有很小一部分被表面所吸收。假如将激光束看作是理想的平面电磁波, 将金属看作是理想的良导体, 在未发生固-液等相变时, 可以由经典的 Drude-Lorentz 理论得到热耦合系数, 由 Hagen-Robens 公式表示。事实上, 在激光作用下, 金属中不仅是自由电子会产生传导电流, 而且束缚电子在外电场 (激光束) 的作用下, 也会产生部分传导电流, 从而对热耦合系数也具有影响, 甚至随着激光功率密度的增加, 束缚电子还会被激发而成为自由电子。Combis 等人^[19] 就用带间模型 (interband model) 研究了因束缚电子跃迁而对 Drude-Lorentz 理论的修正, 带间模型同实验结果是一致的。

随着入射激光的不断辐照、靶材温度的升高、表面的变形, 同时可能出现表面一层材料的熔化和汽化, 这些因素都会对热耦合系数有影响, 尤其是随着固-液, 液-汽等相变的开始, 反射系数迅速降低。最初以为造成这种现象的原因是由于金属在液体状态时逐渐向非导电性转变, 在汽化时是由于靶材密度发生改变所致。但稍后研究表明, 主要是由于靶材表面的热膨胀变形和汽化后形成的部分电离的等离子体所造成的。由于靶材存在的一些缺陷和杂质对入射激光束起到一个散射的作用, 当表面产生非均匀变形时, 光的散射更严重, 而散射光束与入射光束又是相干的, 并且散射光束同入射光束发生干涉对辐射源又起到调制的作用。这些原因造成热耦合系数的变化。基于配分理论和 Laplace 变换可由它由几何光学研究, 也可由基于变形理论的力学方法来研究。

激光-靶的热耦合系数虽然有大量的实验结果, 但由于 C_{th} 强烈地依赖于材料的表面状况, 如光洁度等级、加工方法、氧化程度等等, 因此各种各样的实验结果相差较大, 即使是对于清洁的靶表面, 理论结果同实验测量也相差较大。而且在空气中的靶材会由于激光的辐照被加速氧化, 氧化铝的 C_{th} 是纯铝的 4 倍。另外, 材料表面通常涂有漆和水蒸汽等, 这也增加了热耦合系数。

3.2 热烧蚀破坏效应

长脉冲激光束引起靶材破坏主要是熔融和汽化等热烧蚀破坏效应, 人们关心的是熔融和汽化的速度以及固体靶的剩余厚度和它的温度场分布。

为了对激光的热烧蚀破坏效应作大型数值研究, 多年来, 国内外先后发展了一些激光热烧蚀效应的物理模型和程序软件包。Chan 和 Mazumder^[20] 用一维定态模型将固-液-汽作统一处理, 将固-液边界处理为传统的 Stefan 问题。而液-汽边界比固-液边界要复杂得多, 该边界不是理想的几何边界, 而具有几个分子自由程厚的 Knudsen 层, 跨过 Knudsen 层时, 温度、密度、压力等都是间断的, Chan 和 Mazumder 用 Mott-Smith 形式解来处理该间

断层, 这样可以方便地获得熔化和汽化的速度等各物理量的解析解. 刘成海等^[21]用一维或二维多相流体力学模型(状态方程是多相的), 计及了汽化时的部分电离过程, 由于问题中存在量级差异的不同特征尺寸, 给计算带来困难, 因此他们发展了一些特殊的数值方法, 编出相关计算程序, 计算了金属材料在激光辐照后从熔化到汽化的全过程.

上述理论和计算都是一维模型下进行的, 但实际的熔化和汽化过程至少是二维的, 这样就存在熔化后的液体受到熔化和汽化反冲压力的影响而被冲刷出熔池, 这就是所谓的熔池冲刷问题. 人们或者用简单的方法, 即将 Navier-Stokes 方程作一些简化对冲刷问题进行估算, 或者根据实验结果将固液汽混合物分成不同的区域, 用二维模型解简化的 Navier-Stokes 方程, 获得了熔池冲刷问题的半解析解. 然而不同时空分布的激光束, 造成靶材表面黏性流体的规律也是极不相同的, 有时会出现湍流和复杂的流动图像. Smurov 等人^[22]观察到了激光辐照靶材时黏性流体的湍流现象, 并进行了理论分析. 由此可见, 激光引起材料的熔融过程是十分复杂的, 不是简单的一维或二维程序就能准确模拟的.

随着理论分析和大型数值程序计算的不断深入, 在实验上也发展了一些测试方法, 比如 PTD 技术 (photothermal deflection) 可以诊断激光引起材料热熔融的全过程, 包括熔化、汽化以及固体材料的冲刷等; LTFOS 技术可以实时测量熔融质量率 \dot{m} ; 用金相显微图像数据处理方法可以测量被熔融部分材料的体积换算成熔融质量, 同时还用金相显微图谱分析法研究了 LY12 铝的熔化热和激光熔化阈值. 高速摄影技术也可用以实时观察熔融的过程.

以上的理论和实验方法只关心被烧蚀部分的材料, 对于已经有了熔池的剩余固体材料的破坏机制研究较少. 虽然有人注意到因热熔融区的快速凝固而引起该区域大量裂纹的存在, 但无论在理论上还是实验上这个方面的工作都还未深入开展.

3.3 非烧蚀条件下的热应力破坏效应

在连续激光辐照时, 靶材内因温度的非均匀性而在材料内产生一定的热应力. 由热应力造成靶材破坏所需的激光能量密度阈值比纯粹由穿透效应(即因熔化和汽化造成材料的穿孔)造成材料破坏的相应阈值低得多.

Garrison^[23]最先从事这方面的理论分析工作. 他用热弹性理论, 在不考虑热-力耦合的情况下, 假设材料内热应力(拉应力)达到屈服强度时材料就被破坏了, 即结构丧失其承载能力. 如设因热应力和穿透效应造成材料破坏所需激光辐照时间分别为 t_0 和 t_1 , 当 $IC_{th} = 1500\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 对于 2mm 厚的 2024-T3 铝有 $t_1 = 70t_0$. 可见热应力的破坏要容易得多. Imbrie 等人^[24]从热弹塑性板理论出发, 使用 Bodner-Partom 本构模型, 不仅考虑了几何非线性效应, 而且计及了横向惯性和转动惯量效应, 用有限单元法计算了热应力分布规律, 但他们的模型中未考虑热-力耦合效应, 即忽略了塑性功对材料温升的贡献. 由 Imbrie 等人计算的位移理论值与测量值相差近 3 倍.

早在 70 年代就获得了一些关于连续激光和外载共同作用造成靶结构承载能力下降的实验数据. 人们认为实际的结构都可以用平板和圆柱壳来模拟. 对于平板, 外机械载荷是拉力, 对于圆柱壳, 外机械载荷是扭矩. 这些外载和连续激光的辐照会容易造成靶结构的破坏. Medford 等人^[25]用抗拉伸强度为 5.93kbar 的 7075-T6 铝合金在 CO_2 连续激光辐照时做了这方面的破坏实验. 他们将表面涂有一层漆的样品放在马赫数为 0.3 的空气流中. 研究表明, 厚度为 1mm 和 6.35mm 的板材在受到 2.2kbar 的拉应力作用下, 当材料被拉断时, 激光束的能量密度分别为 $0.28\text{kJ}/\text{cm}^2$ 和 $1.72\text{kJ}/\text{cm}^2$.

陈海韬等人^[26]对受拉伸载荷的 LY12 铝板被 CO_2 激光连续辐照时的热机械响应进行

了初步的实验和理论研究. 他们不但测得了在不同的拉力和不同的激光功率密度下材料的断裂时间, 并用扫描电镜观察断口. 结果表明, 试件的断口由三个区域组成: 激光辐照区、热影响区和正常组织区. 试件的开裂起源于受热区. 简单的分析表明, 这是由于激光辐照区的材料因高温而软化, 其强度大大降低, 甚至完全丧失其承载能力, 同时径向的热应力始终为压应力, 环向的热应力在光斑内为压应力, 在光斑外为拉应力. 这个实验结果表明, 当靶板受到拉伸载荷时, 激光束不必对靶板完全熔融烧穿, 仅靠高温热软化就可以使靶板拉断. 人们^[27]还进行了关于连续激光对材料和结构破坏的大型演示实验, 研究了板、柱壳受到各种形式加载下结构的破坏模式, 包括受拉板的弹塑性断裂, 预轴压柱壳的屈曲, 充内压柱壳的爆裂. 演示实验还包括热电偶测温, 热像仪测温, 应变片测位移, 破坏过程的高速摄影实时观察等复杂测试系统. 这些系列演示实验都表明, 结构处于工作状态(即受到预载荷、装有炸药或燃料)下, 当激光辐照时, 结构的破坏不是激光产生的热学破坏效应和预载荷产生的力学破坏效应的简单线性叠加, 而是热-力耦合的非线性效应, 使结构发生灾难性的破坏效应, 或者是激光束仅仅起到一个导火索的作用. 结构可能会由于自激励效应而发生毁灭性的破坏, 例如已观察到的自燃现象就如此. 由此可见, 研究相对较低功率密度的激光束对受载结构的破坏效应具有重要意义.

3.4 强激光对新型复合材料的破坏效应

复合材料具有许多力学、热学及电、磁、光等优良性能, 因而在航空结构中大量使用复合材料代替传统的金属合金材料. 其中结构材料以碳纤维-环氧树脂复合材料(CFRC)等纤维增强复合材料类应用最广. 空间飞行器在启动和飞行过程中, 不仅受到预载荷的影响, 而且受到各种热辐射、水蒸汽等自然环境及核辐射、激光辐照等战争环境的严重影响. 以CFRC为代表的各种先进复合材料的热-力学性能受到人们的极大关注. 其中以高温炉和激光热源等模拟手段来研究热辐射的影响是重要的研究手段之一. 早期主要集中在研究激光束对复合材料的热烧蚀破坏效应. 最近的大量实验和理论研究表明^[28,29], 强激光对材料的破坏主要是力学破坏效应. 例如, 对于纤维增强的复合材料, 不管纤维是单向的还是交叉铺设的层合板, 单根纤维在压应力作用下可能屈曲, 如一层内出现屈曲的纤维数达到一定临界值时, 将造成整层的屈曲, 从而在层间出现微裂纹. 微裂纹的发展将造成层间分裂, 即出现宏观裂纹, 而造成复合材料的局部破坏. 同样道理, 在强激光辐照下, 当层合板层与层之间存在一定的温度梯度时, 由于各层间杨氏模量、热传导系数、热扩散系数等热-力学参数的差异, 以及界面结合能的降低, 同样出现层间分裂.

誉为“20世纪最有前途的新材料”纳米复合材料具有许多优异的性能, 如高强度、高比热、高热膨胀系数, 尤其是纳米材料作为涂覆材料可能为抗激光加固和抗核加固具有潜在的应用前景, 强激光对纳米材料的破坏效应也开始受到人们的关注.

4 激光破坏机理研究的一个新进展

当入射激光的波长、辐照时间、平均功率密度保持相同的条件下, 改变激光的时-空结构会产生不同的破坏模式. 在上述激光参数基本不变时, 如何合理选择激光的时空分布, 以便达到最佳的破坏效果, 这类问题我们可称为激光破坏机理研究中的反问题. 迄今为止, 人们对这一反问题的研究甚少. 目前已有多种方法, 如孔径变迹AA(apodized aperture)技术可以将激光束变成具有人们所要求的任意空间分布结构^[30], 这些技术使研究激光破坏的反问题成为可能. 传统的激光破坏机理的研究方法是在现有的激光时空结构(通常其空

间分布是高斯型的)的情况下,研究材料或结构的破坏阈值。我们放弃了这种传统的研究方法,而是设法改变激光的空间分布来研究破坏效应。通过实验发现了一种新的破坏方式:

“反冲塞”效应^[31-34],即脉宽为300 μ s,功率密度为 $10^5 \sim 10^6$ W/cm²,空间分布近似均匀的激光束辐照到厚度为0.1mm的H65黄铜薄片上时会出现一种新的破坏模式,如图2所示。这种破坏是由反鼓包运动、剪切变形集中和贯穿三个阶段组成。在第一阶段,即激光辐照初期,激光能量只沉积在靶材表面很薄的一层,从而沿厚度方向有很高的温度梯度,在靶内造成较高的弯曲应力,使靶材会逆着激光入射方向做弯曲运动——“反鼓包”运动。同时由于激光束的空间分布是近似均匀的,在光斑边缘,沿径向的温度梯度也很大,从而在这一区域剪应力较大,且出现大变形时,较大的膜应力和剪应力共同作用在该区形成剪应变集中区,这样光斑内部靶材逆着激光入射方向加速运动,光斑外部靶材顺着激光入射方向运动,从而在光斑边缘区有一附加的剪应变,此为第二阶段。当激光能量

足够高时,热塑剪切变形进一步发展,由于高温影响,材料剪切断裂强度下降,当光斑边缘区的剪应力超过剪切断裂强度时,就出现贯穿现象或出现碎片,此为第三阶段。我们将这种新的破坏方式称为反冲塞效应(revers plugging effect),它和人们熟悉的激光引起材料层裂、热烧蚀及热应力破坏等现象的机理不同。我们从宏观观察、破坏阈值及瞬时温度场的测量、三阶段的理论模型分析、从大变形理论出发的二维有限元数值程序计算等各方面分析均表明,通常的高斯分布激光束不会产生这种新的破坏模式。反冲塞效应的实验和理论研究给我们的启示就是:改变并选择合适的激光束时空结构,完全有可能使靶材最易破坏,即开展激光破坏反问题的研究不但必要,而且可能。

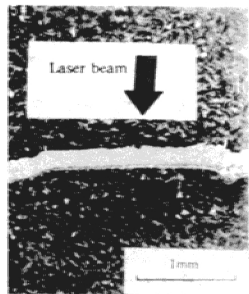


图2 反鼓包和剪切变形局部化现象(侧视图)
激光光斑直径为2.3mm,入射激光能量为8.2J
(图中箭头为激光入射方向,黑色为镶嵌背景材料炭木粉。)

参 考 文 献

- 1 Ready J F. Effects of High-Power Laser Radiation. New York: Academic Press,1971
- 2 von Allmen M. Laser-Beam Interactions with Materials: physical principles and applications. New York:Springer-Verlag Press, 1987
- 3 王家金. 激光加工技术. 北京:中国计量出版社, 1992
- 4 美国物理学会(APS) 研究组报告, 西南工程物研院译. 定向能武器的科学与技术, 1987
- 5 王乃彦. 新兴的强激光. 原子能出版社, 1982
- 6 国防科技大学 5222 任务组. 国防科技大学学报, 1979(3):71-80
- 7 孙承伟. 强激光束对金属和复合材料的热和力学效应. 北京:第二届全国激光科学技术青年学术交流会论文集, 1993:43-59
- 8 Wendlandt B C H. NASA, N74-16188,1973
- 9 Kar A, Mazumder J. J. Appl Phys, 1990, 68(8):3884-3891
- 10 Ion J C. Acta Metall Mater, 1992, 40(7):1539-1551
- 11 段祝平, 周益春. 力学进展, 1992, 22(4): 433-448
- 12 Gregg D W, Thomas S J. J. Appl Phys, 1966, 37(7): 2787-2789
- 13 Larson A R. LA-5619,1974

- 14 Steverding B, Dudel H P. *J Appl Phys*, 1976, 47(5):1940-1945
- 15 Phipps Jr C R et al. *J Appl Phys*, 1988, 64(3): 1083-1096
- 16 Anderholm N C. SC-TM-69-735(unpublished), 1969
- 17 Fox J A, Barr D N. *Appl Phys Lett*, 1973, 22(11):594-596
- 18 周益春, 段祝平. 固体力学学报, 1993, 14(2):163-166
- 19 Combis F et al. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(2):403-420
- 20 Chan C L, Mazumder J. *J Appl Phys*, 1987, 62(11):4579-4586
- 21 刘成海, 关吉利等. 真空环境中激光与靶相互作用理论模型和激光热烧蚀. 激光的热和力学效应学术会议论文集, 上海, 1991
- 22 Smurov I et al. *J Appl Phys*, 1992, 71(7):3147-3158
- 23 Garrison J N. AD-A034877, 1976
- 24 Imbrie P et al. AIAA-89-0181, 1989
- 25 Medford J E, Gray P M. AIAA80-1550, 1980
- 26 陈海韬等. 力学学报, 1993, 25(1):16-21
- 27 陈裕泽. 激光辐照结构的热动力失效. 长沙: 激光的热和力学效应学术会议论文集, 1993:127-137
- 28 Berlin P et al. *Composites*, 1992, 23(4):235-243
- 29 Chen F et al. *Composites*, 1994, 25(1):21-26
- 30 Lukishova S G et al. *Laser and Partical Beams*, 1990, 8(1-2):349-360
- 31 周益春. 激光诱导反冲塞效应的实验与理论研究. 中国科学院力学研究所博士论文, 1994
- 32 周益春, 段祝平等. 力学学报, 1995, 27(3)
- 33 Duan Z P, Zhou Y C et al. In: Proceedings of IUTAM Symp on Impact Dyn., edited by Zheng Z M et al. Peking University Press, 1994:176-187
- 34 黄晨光, 段祝平等. 激光的空间分布对薄铜片作用的二维数值实验. 海口: 光的热和力学效应学术会议论文集, 1994

(1994年3月12日收到第1稿,
1994年12月15日收到修改稿)

~~~~~  
(上接第3页)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 程福谦 | 马以惇 | 孙树勋 | 吴有生 | 张涤明 |
| 匡震邦 | 梅凤翔 | 陶宝祺 | 武际可 | 张涵信 |
| 梁在潮 | 梅占馨 | 佟景伟 | 伍小平 | 张善元 |
| 林逸  | 欧进萍 | 王大钧 | 谢和平 | 张圣坤 |
| 刘殿魁 | 潘立宙 | 王洪纲 | 徐秉业 | 张盛宗 |
| 刘光栋 | 钱忠柔 | 王俊扬 | 薛明伦 | 张湘伟 |
| 刘后森 | 秦逸民 | 王礼立 | 严宗达 | 张兆顺 |
| 刘人怀 | 秦玉文 | 王良国 | 杨卫  | 赵学仁 |
| 刘夏石 | 沈庆  | 王全凤 | 杨挺青 | 钟万勰 |
| 刘延柱 | 沈亚鹏 | 王照林 | 杨振声 | 钟伟芳 |
| 刘英卫 | 沈志云 | 王自强 | 姚福生 | 周盛  |
| 刘元镛 | 是勋刚 | 韦树英 | 姚振汉 | 周丰峻 |
| 刘正兴 | 寿楠椿 | 吴长春 | 尹双增 | 周光泉 |
| 柳兆荣 | 舒玮  | 吴承康 | 俞鸿儒 | 诸德超 |
| 陆培炎 | 孙茂  | 吴代华 | 余寿文 | 诸德培 |
| 吕志咏 | 孙珏  | 吴望一 | 袁子荣 | 庄逢甘 |
| 马德林 | 孙锦山 | 吴秀水 | 张熹  | 庄礼贤 |