

低功率密度激光辐照结构的热动力失效*

陈裕泽

(西南结构力学研究所 成都521信箱50分箱 610003)

摘要 研究了低功率密度激光辐照结构的热动力失效。考虑材料的高温软化特性,研讨了温升速率对材料和结构的影响、结构热软化后的宏观受力和变形的重新分布以及可能的热运动。给出了几种热动力失效的结构破坏实验结果。

关键词 结构热失效 热辐射 温升速率

中图法分类号 O347.42

1 引言

强激光作用于金属靶目标,可导致材料和结构的失效。按不同激光功率密度,失效依次呈现不同的物理模式^[1]。一般说来, 10^{11} W/cm²以上,在 μ s 级时间尺度上,可产生激光热应力波;在 ms 级时间尺度上,会出现层裂的结构动力破坏。 10^5 W/cm²以上,靶目标光斑区将发生热烧蚀、熔融或汽化等现象。 10^4 W/cm²以下,视输入的能量,将产生微观或宏观的局部烧蚀、热应力以及材料和结构的整体破坏。

对短脉冲而言,在激光作用的时间脉宽范围内,非均匀的温度梯度场,在光斑区内将被限制在与输入电磁辐射波长相关的入射面的薄层内。若把此薄层视为内热源,则可研究由此产生的热应力波的传播。这种传播在结构厚度方向的一维自由面反射,就是激光辐射导致层裂的主要原因^[1]。结构中多维应力波传播,将引起整体响应的效应^[2,3]。通常,在研究短脉冲或 μ s 级的系列短脉冲作用时,由于热扩散速度比应力波传播速度低得多而成量级差,所以只需研究内热源引起的弹塑性应力波的传播,忽略热传导效应。总结70年代以来的文献^[4],对短周期高能量的激光辐射可能引起的破坏还包括:热能的突然沉积所产生的应力波,将引起脆性元器件的剥落或形成辐射状的裂纹;激光形成的等离子体和喷溅,产生冲量导致结构的瞬态动力响应。迄今为止,短脉冲激光的破坏效应仍滞留在研究材料和结构的响应或局部破坏阶段,形成或诱发的灾难性失效的研究尚少。

对于连续波激光的作用,其辐照时间历程长。结构在工作状态承受辐照,将存在热-力的综合效应。问题的数学提法,应该归结为耦合的热动力初边值问题的求解。由于数学上的困难,在实际分析中通常必须简化:忽略热力耦合项,可以使热传导问题和力学问题分别求解;忽略惯性效应,将使热动力学问题蜕化为稳态热弹塑性问题求解。低功率大光斑连续波激光热能沉积,在金属表面不会引起材料的相变、熔融、汽化和穿孔等现象。但是,光斑区的局部温升会使材料微观和宏观力学性能产生明显的变化,诸如弹性模量、屈服应

* 国家高技术和自然科学基金重点项目。

1994年6月29日收到原稿,1995年6月14日收到修改稿。

力、极限破坏应力下降,而塑性流动应变成倍地增加。这样,对于正常运行的结构,在其环境工作载荷作用下,如果结构强度和刚度设计裕度已经接近临界,那么再承受辐照,综合热和力学效应将可能引起结构失效^[5]。虽然其灾难性效果已初露端倪,并逐渐从认识上向纵深发展,但是问题的提法尚处于探索阶段。所以应该充分利用实验现象,加强概念性的研究,进而对物理现象的本质和机理取得进一步的认识。

我们研究低功率激光辐照引起的结构热动力失效。对材料的温度效应,结构的热软化及其受力和变形的重新分布等因素进行了分析,并结合几种受载结构的破坏形式进行探讨。

2 低功率激光的热效应

低功率激光束向金属表面层辐射,热能沉积是通过逆韧致辐射效应实现的。

激光辐照金属表面层,将进行光-热转换。当光子和金属的自由电子相碰撞时,金属导电电子的能级提高,并且将其吸收的能量转化为晶格的热振荡。由于光子穿透金属的能力极低,因此,仅能使其表面薄层温度升高。晶格的热振荡引起的热交换非常迅速。对连续波激光来说,非稳态的热交换必然使金属微观产生冶金学的率效应,呈现出材料宏观力学特性的差别。

图 1 是与温度峰值相当的炉温和激光辐照后的试件残骸的扫描电镜图,材料为 L2 铝^[6]。最高温度峰值约为 300 C,然后自然冷却降温,试件残骸均无宏观损伤痕迹。由图看出,由于温升速率不同,微观损伤和晶粒状态呈现差别。提高温升速率的试件,出现晶界显示和夹杂物爆开,晶界间有部份熔融痕迹,而炉温试件除表面加工伤痕外,无其它异常。

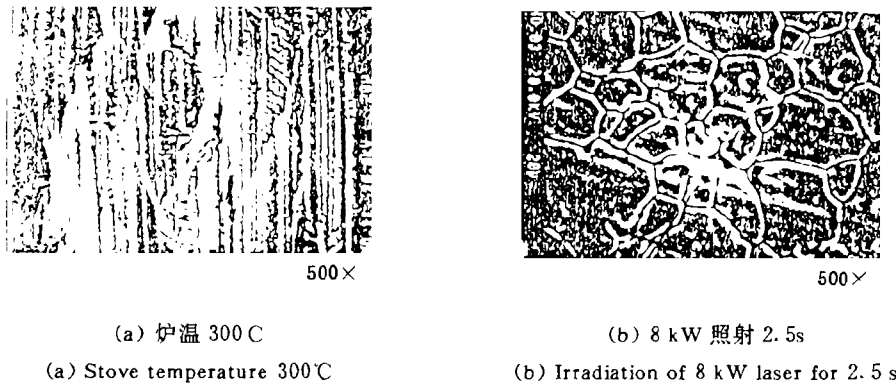


图 1 炉温和激光加热试件形貌

Fig. 1 The comparison of the patterns of the specimen between the stove and laser heating

激光辐照结构引起表层的冶金学率效应,涉及晶体强制性快速升温或晶界部份熔化的问题。文献[7]曾探讨过此问题,并认为平界面的稳态参数与熔化速度有关。

连续波激光在其持续的时间内,不断输入能量,通过表层使金属在厚度方向以热传导的时间量级呈现温度升高。在一定的时间内,厚度方向存在温度梯度,这种温度梯度

持续的时间正比于厚度与光斑直径的比值^[8]。如果激光照射持续,那么在厚度方向温度梯度将逐渐消失,而形成光斑区的均匀或近似均匀的温升。对低功率密度连续波激光辐照,除应考虑材料的吸收系数之外,功率密度将影响其温升速率,能量密度将影响温度峰值。

图 2 是尺寸为 100 mm×50 mm×0.2 mm 的纯铝板承受 8.64 kW 的 CO₂ 激光辐照时,用温度片在辐照的板背面测得 $\phi 50$ 光斑中心温度(温度峰值 $T_1=348$ °C,温升速率 $\dot{T}_1=250$ °C/s)以及光斑边缘温度(温度峰值 $T_2=159$ °C,温升速率 $\dot{T}_2=110$ °C/s)的时间历程曲线^[6],温度达到峰值时间即为机械光闸关闭的时间。由于光束是多模态,又由于热能往光斑外的传输,所以光斑中心温度比边缘高,温升速率也高。为分析测试结果的可靠性,文献^[6]还进行了数值模拟计算与之比较。

3 低功率激光的热-力效应

对于低功率密度的激光而言,初始的 μs 级时间范围,同样也会产生热层引起的应力波传播,但其幅值受到输入能量的限制。如果是连续波激光辐照,相应于热层形成的在厚度方向往复传播的应力波,还会被以热传导的时间量级扩散的温升而松弛。这样一来,对于低功率连续波激光作用,可以不必顾及初始应力波的影响。换句话说,热层引起的应力波的一维效应不予考虑。

对于激光垂直轴线入射的杆和梁,以及垂直入射表面的板和壳,热能总是首先在入射的横截面以及厚度层形成温度梯度和热平衡。虽然在大维度方向也存在热传导引起的温度梯度和热平衡,但是,激光束斑产生的效应更加重要。

一般来说,在 ms 级时间内横截面或厚度层的温度梯度将影响结构的热弯曲运动。在热应力的本构框架下,文献^[3,9~11]中,对板的热弯曲运动进行了系统的研究。结果表明,束斑区的热矩会引起结构的整体运动。因此,对于短脉冲或系列短脉冲而言,这类响应可能引起的结构整体失效是值得重视的。譬如,窗口元件在装配状态下的脆性断裂或韧性起皱的失效机理。

对于连续波激光而言,低功率密度引起结构的失效在 ms 级以上。因此,在辐照持续一定的时间后,光斑区横截面或厚度方向的热平衡已完成,可以忽略温度梯度的影响,而只需考虑光斑区的空间温度分布,即大维度方向的温度分布,可能给整体结构响应和失效带来的影响。

温升速率存在的宏观效果将带来力学参量的率效应。设 f 代表某力学参量, T 代表温度,那么其率效应可写为

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial f}{\partial x_i} \dot{x}_i \quad (1)$$

式中: t 、 x 分别为时间变量和空间变量。右边第一项为温升速率引起的力学参量的率效

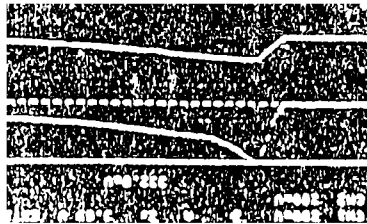


图 2 光斑中心(上)和光斑边缘(下)的温度时间历程曲线(上升沿为 1.4 s)

Fig.2 The measured curves of temperature time for spot center (upper) and edge(lower)(raised interval time is 1.4 s)

应,第二项为包括空间变量和时间变量的运动学参量的贡献。例如,对应变率 $\dot{\epsilon}$ 而言,第一项将是温升速率和应变随温度变化率的乘积;第二项是应变随时间的响应变化率,以及应变梯度和质点速度的乘积。

低功率激光的热-力效应与其输入的总能量和能量密度密切相关,它们确定了材料的温度,其状态可以分为三类。

3.1 热应力

热应力的研究是一个古老的课题,早已有专著^[12]。其主要研究的范畴是在本构关系中,考虑材料的线膨胀,研究非均匀的热膨胀或热收缩产生的效应。因此,可以说热应力的研究主要是力学效应,在位移型的运动方程中,其影响是以温度梯度与线膨胀系数的乘积形式出现,而只认为线膨胀系数为恒定参量的效应。

3.2 热软化

研究的本构关系中,考虑激光外热源引起材料的弹性模量、屈服应力、塑性流动应变以及线膨胀系数随温度的变化等带来的热-力综合效应。激光能量的不断输入使材料变“软”,改变结构的力学状态,称为材料的激光热软化。

3.3 热熔融

与前面两种状态不同的是,光斑区的部分熔融或全部熔融,已丧失承载能力,物质的热物理效应起主要作用。对整体结构而言,仅起新型的边界条件效应。

4 瞬时高温下材料的力学性能

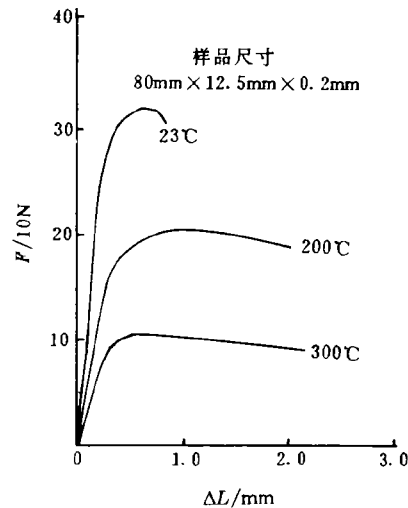
随着温度的提高,材料静态拉伸应力-应变曲线将发生变化,反映在弹性模量 E ,屈服应力 σ_s ,以及破坏极限应力 σ_b 降低,而塑性流动应变 ϵ_p 将增加。图3是L2铝在不同炉温下的实验数据^[6]。

由图3知

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_s(T) && \text{且 } \frac{\partial \sigma_s}{\partial T} < 0 \\ E &= E(T) && \text{且 } \frac{\partial E}{\partial T} < 0 \quad (2) \\ \alpha &= \alpha(T) && \text{且 } \frac{\partial \alpha}{\partial T} > 0 \end{aligned}$$

这里 α 为线膨胀系数^[12],且 $\sigma_b \approx \sigma_s$ 。

连续波激光对材料辐照引起的温升速率视其功率密度不同而有差异,一般可达几十~几百C/s,短时热冲击下温升速率对材料力学性能的影响,60~70年代为模拟再入体的气动加热,曾引起人们的注意^[13],后来被冷漠。鉴于激光破坏的驱动,我们注意到受快速加热金属的非弹性热软化现象^[14]。描绘应力、应变、温度、温升速率仍在探索之中。这里



Specimen size: 80 mm × 12.5 mm × 0.2 mm

图3 不同温度的力-变形曲线

Fig. 3 The force-deformation curves for different temperature

引入屈服温度的定义:在一定的应力和温升速率下使试件产生 0.2% 的非弹性变形,所对应的温度为该应力及温升速率下的屈服温度。利用冲击大电流加热装置,对 $90\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 和 $150\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 试件进行快速加热;采用 EKTAPRO 高速摄像及图像处理系统测量试件两点位移,得到位移时间曲线。图 4 为两种材料在不同温升速率下的预应力与屈服温度的关系。由图看出,温升速率高低对屈服温度的影响十分明显,材料的屈服温度随着温升速率的增加而增加,预载越低效应越明显。文献[14]对材料的显微组织分析表明,温升速率的高低将明显影响材料微观组织的变化过程,应该注意到再结晶的动力学的研究。

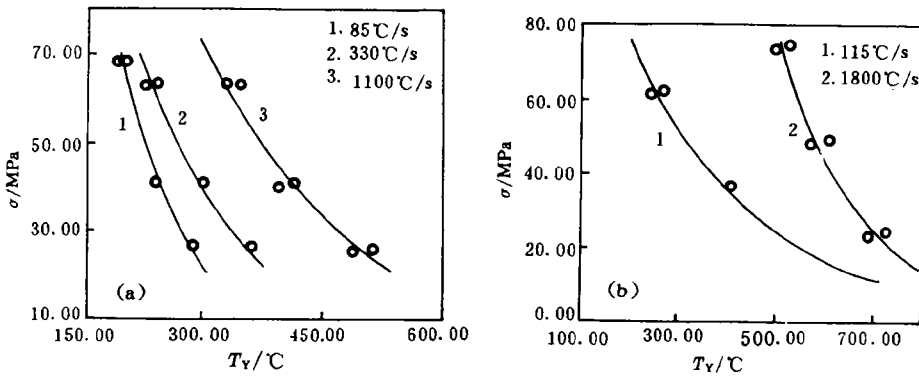


图 4 温升速率对屈服温度的影响

Fig. 4 The influence of heating rate on yield temperature

5 连续波激光的结构破坏效应

工作状态的受力结构,承受激光辐照会诱发力学模型的改变,从而带来失效或破坏。

5.1 弹性段的瞬时热蠕变或松弛

由于激光辐照是瞬时完成升温,因此,在结构中热应力应该是与时间相关的过程量。恒载荷作用的结构元件将产生瞬时热蠕变,而恒约束的结构元件将产生瞬时热松弛。以一维应力应变状态为例

$$\sigma = E(\varepsilon - \alpha T) \quad (3)$$

若恒载,有 $\dot{\sigma} = 0$,则有 $\dot{\varepsilon} = \alpha E \cdot \dot{T}$,即在恒载作用的一维热应力情形,温度升降温函数 $T(t)$ 决定了应变的函数关系 $\varepsilon(t)$,温升速率决定了材料瞬态的应变率效应;若恒约束, $\dot{\varepsilon} = 0$,则有 $\dot{\sigma} = -\alpha E \cdot \dot{T}$,即在恒约束的一维应变情形,温度升降温函数 $T(t)$ 决定了应力的函数关系 $\sigma(t)$ 。由此,恒载系统的瞬时升温将引起瞬时应变蠕变,恒约束系统的瞬时升温将引起瞬时应力松弛。一般而言,结构的变形和应力皆会受限,所以外加热蠕变和外加热松弛兼而有之。热应力为过程量,应该严格依赖于升温曲线 $T(t)$ 。

5.2 应变和应力的重新分布

激光辐照结构的特点是受热区域的空间高度局部化。光斑区内按激光的功率密度呈温度梯度的分布状态,而结构材料的热传导还来不及疏散强激光连续供给的能量,不断沉

积的热能促进光斑区温度迅速上升,材料将会从热应力状态转化为热软化或热熔融。

如果光斑区内材料的力学性能随激光辐照而发生变化,那么,承受工作载荷的结构的力学状态,也会随温升而发生变化。

5.2.1 弹性段

应力表达式为

$$\sigma_{ij} = \frac{E(T)}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + \frac{E(T)}{1-2\nu} \left[\frac{\nu}{1+\nu} \varepsilon_{kk} - \alpha(T)T \right] \delta_{ij} \quad (4)$$

于是

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= \frac{E(T)}{1+\nu} \varepsilon_{ij,j} + \frac{E(T)}{1-2\nu} \left[\frac{\nu}{1+\nu} \varepsilon_{kk,j} - \alpha(T)T_{,j} \right] \delta_{ij} \\ &+ E_{,j} T_{,j} \left\{ \frac{1}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + \frac{1}{1-2\nu} \left[\frac{\nu}{1+\nu} \varepsilon_{kk} - \alpha(T)T \right] \delta_{ij} \right\} \\ &- \frac{1}{1-2\nu} E(T) T \alpha_{,j} T_{,j} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

将它与运动方程联系,就形成材料随温度变化的基本方程。从(5)式看出,表达式第一、二项恰恰是研究热应力的 Lamé 运动方程所需的项,第三、四项分别为弹性模量和线胀系数随温度的变化所引起的增量。

5.2.2 塑性段

由图 3 和图 4 知,温度提高或温升速率的变化,屈服面将发生变化,有

$$\varphi(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, t, T) = 0 \quad (6)$$

其弹塑性增量形式的本构关系为

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E(T)} d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E(T)} d\sigma_{kk} \delta_{ij} + d\lambda \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7)$$

式中: $d\lambda$ 为非负的比例系数。与运动方程联系,光斑区的温度梯度也将带来屈服面的分布状态,从而同样改变了应力状态。

考虑如图 5 所示的三杆对称桁架受竖直力 p 作用。按静力平衡和变形协调有

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \sigma_1 + \sigma_2 &= p/A_0 \\ \varepsilon_2 &= 2\varepsilon_1 \end{aligned} \quad (8)$$

若三杆均为弹性,有

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2 + \sqrt{2}} \frac{p}{A_0} \\ \sigma_2 &= \frac{2}{2 + \sqrt{2}} \frac{p}{A_0} \end{aligned} \quad (9)$$

A_0 为杆的横截面面积。如果仅有第 2 杆承受激光辐照,分两种状态的可能:(1)仍处弹性段,辐照效应表现在第 2 杆弹性模量降低,且与温度相关,而第 1,3 杆材料仍为常温特性,有

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \frac{E_0}{2E(T) + \sqrt{2} E_0} \frac{p}{A_0} \\ \sigma'_2 &= \frac{2E(T)}{2E(T) + \sqrt{2} E_0} \frac{p}{A_0} \end{aligned} \quad (10)$$

显然, $\sigma'_1 > \sigma_1, \sigma'_2 > \sigma_2$ 。换言之, 激光辐照使桁架杆系统发生了应力和应变的重新分布; (2) 进入了塑性流动段, 辐照效应表现在第 2 杆弹性模量和屈服应力降低, 且与温度相关, 有

$$\sigma'_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{P}{A_0} - \sigma_s(T) \right] \quad (11)$$

$$\sigma'_2 = \sigma_s(T)$$

第 2 杆的一维应力状态有 $\partial \sigma_s(T) / \partial T < 0$, 显然, $\sigma'_2 < \sigma_2, \sigma'_1 > \sigma_1$, 激光辐照热软化了第 2 杆材料, 使应力和应变产生了重新分布现象。

对连续波激光而言, 应力和应变的重新分布是连续的过程。

5.3 热动力响应

辐照区是否存在热动力响应, 取决于由温度过程量代替的时间尺度的状态, 实际上

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial u_i}{\partial T^2} \dot{T}^2 + \frac{\partial u_i}{\partial T} \ddot{T} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \dot{x}_j^2 + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \ddot{x}_j, \quad (12)$$

研究小变形时, (12) 式右端第 3、4 项是不存在的, 第 1 项与温升速率相关, 第 2 项与温升速率的变化率相关。这里 u_i 代表某位移分量。

由图 3 知, 一俟结构热辐照区材料处于塑性状态, 那么屈服应力随温度升高而下降。除辐照区的热动力响应外, 屈服应力的下降在某些结构中还会诱发动力学效应。最简单的例子是一维的杆、梁静定结构, 当某截面受到激光辐照后, 必然会发生诱发动力学效应, 如图 6 所示。

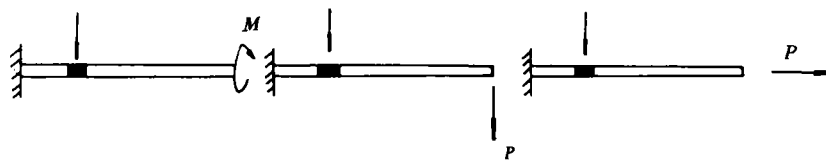


图 6 激光诱发的结构运动

Fig. 6 The structural dynamics induced by laser

图 6 三种结构都是一端固支一端自由承受端载荷的静定结构。当激光辐照某截面时, 由于屈服应力, 屈服弯矩和屈服扭矩都随激光连续辐照不断降低, 因此, 将分别形成端头部分结构拉伸、弯曲和扭转运动。

5.4 热诱导的功能失效

当热辐照区出现熔融或部分熔融时, 对原有结构的完整造成缺陷而导致的功能失效。例如正在燃烧的喷管, 如果出现激光烧蚀孔, 将引起不稳定燃烧或出现新的喷口, 以致使原喷管功能性失效; 红外探测头部分材料烧蚀导致的光学功能失效等。

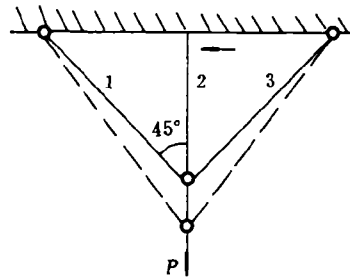


图 5 桁架杆系统

Fig. 5 The system of trussed rods

6 结构整体破坏实例

工作状态的结构承受激光辐照的整体灾难性破坏,都是材料和结构的热-力综合效应的集中体现。以实例概述如下。

6.1 均匀受拉板的断裂^[4]

假设圆形激光光斑的直径同板宽,当激光辐照后,类 Gauss 分布的温度场随连续波时间的历程,均匀受拉的一维应力状态向二维应力状态变化,光斑中心横截面应力重新分布呈马鞍形,中心应力水平下降,边缘应力水平提高。由于光斑区材料的冶金动力效应和应力水平的综合作用,形成了裂纹的萌生和发展,最终形成宏观断裂。

6.2 轴压柱壳的屈曲塌陷^[13]

若激光光斑直径与柱壳直径同量级,辐照区应力状态的变化及材料的高温塑性流特性。在温升的时间范围内,对柱壳形成局部扰动,并影响区域轴压的分布状态,从而导致光斑区的菱形波纹屈曲和后续塌陷破坏。

6.3 内压柱壳的爆裂^[14]

激光光斑直径与柱壳直径相当,辐照区应力状态的变化及材料微裂纹扩展,形成气压爆裂,导致整体爆裂破坏。

对于一定的激光功率密度和一定的光斑而言,以上实例结果表明,工作状态应力越大,结构破坏所需的激光输入能量就越低。

7 结 论

在低功率大光斑的连续波辐照条件下,工作状态的结构存在热和力学的综合破坏模式。破坏机理包括,材料在高温和高温升速率条件下的物理和力学特性的变化,以及结构局部温升带来的应力、变形的重新分布和热动力响应,在原有的工作受力环境下的结构整体破坏。

参 考 文 献

- 1 孙承纬. 强激光引起材料和结构破坏的机理分析. 见: 1991 年激光的热和力学效应会议论文集, 上海嘉定: 1991 年
- 2 Chen Yuze, Yin Yihui. Analysis of Thermoelastic Bending Waves in the Plate with Pulsed Thermal Deposit. In: Zhang Guanren, eds. 2nd Proc of Inter Symp on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Chengdu, China; Sichuan University Press, 1992, 621~625
- 3 Yin Yihui, Chen Yuze. Analysis of Thermoelastic Bending Wave and Plane Wave Propagation in Timoshenko Plate with Axial Symmetric Thermal Deposit. IUTAM 93 Symp Nonlinear Waves in Solids, Victoria, Canada: 1993
- 4 陈裕泽, 等. 强激光对结构的破坏机理调研专集. 见: 1991 年激光的热和力学效应会议论文集, 上海嘉定: 1991 年
- 5 Chen Yuze. Dynamic Thermal Failure of the Structures under Laser Irradiation. Proc of IUTAM Symp on Impact Dynamics, Beijing, China; Peking Univ Press, 1994, 92~104
- 6 Chen Yuze, Li Sizhong. Transient Fracture of the Aluminum Plate in Tension and Irradiated by CW CO₂ Laser Beam. AIAA 24th Plasmadynamics and Lasers Conference, Orlando, FL, USA: AIAA 1993, 3205

- 7 陈延峰,周尧和. 晶体强制性熔化过程及形态选择:[博士论文]. 西安:西北工业大学,1990
- 8 周益春,段祝平. 激光诱导反冲塞效应的实验和理论研究:[博士论文]. 北京:中国科学院,1994
- 9 尹益辉,陈裕泽. 轴对称热载作用厚板的热弹性运动效应分析. 爆炸与冲击,1994,14(2):119~128
- 10 尹益辉,陈裕泽. 激光辐照下有界圆厚板的热弹性弯曲响应分析. 爆炸与冲击,1995,15(1):54~62
- 11 尹益辉,陈裕泽. 一类微分方程组的解法及圆板热弯曲问题解. 重庆大学学报,1995,18(3):91~96
- 12 竹内洋一郎著;郭廷玮,李安定译;张质贤校. 热应力. 科学出版社,1997年
- 13 Alan V Levy 著;丁光届译. 短时高温实验. 北京:国防工业出版社,1966
- 14 刘宗德,王仁,等. 结构非弹性动力屈曲和材料在快速加热下的力学性能研究:[博士论文]. 北京:北京大学,1994
- 15 Chen Yuze,Li Sizhong. Buckling Failure of the Axially Pre-compressed Cylindrical Shell Irradiated by CW CO₂ Laser Beam. AIAA 24th Plasmadynamics and Lasers Conference,Orlando,FL,USA :AIAA,1993, 3231
- 16 Li Sizhong,Chen Yuze,Zhang Guangjun,et al. The Failure of Shell Subjected to Internal Pressure and Irradiated by CW CO₂ Laser Beam. AIAA 25th Plasmadynamics and Lasers Conference,Colorado Springs,CO,USA ;AIAA,1994,2461

THERMODYNAMIC FAILURE OF THE STRUCTURES IRRADIATED BY LASER BEAM WITH LOW POWER DENSITY

Chen Yuze

(Southwest Institute of Structural Mechanics,P. O. Box 521-50,Chengdu,610003)

ABSTRACT The thermodynamic failure of the structures irradiated by laser beam with low power density are studied in this paper. Considering the effect of heating rate and thermo-softening of material, the redistribution of macro-stress and deformation in structures and the possible heat inducing motion are discussed. Some experimental results of destructive tests of structures are presented.

KEY WORDS thermal failure of structure,thermal radiation,heating rate