

约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究^{*}

顾永玉^{1)†} 张永康^{1)‡} 张兴权¹⁾ 史建国¹⁾

1) 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

2) 华东理工大学机械与动力工程学院, 镇江 200237)

(2005 年 9 月 24 日收到, 2006 年 3 月 23 日收到修改稿)

针对刚性约束层、柔性约束层以及液体约束层, 从激光诱导冲击波阵面状态、汽化物(包括气体和等离子体)扩散以及冲击波的反射进行分析, 发现对于脉宽小于冲击波通过汽化物层的时间间隔的短脉冲激光, 约束层并不能直接提高冲击波的冲量, 而对于脉宽大于冲击波通过汽化物层时间间隔的激光, 其增强冲击效果是通过约束汽化物的扩散, 提高压力幅值和由于冲击波在约束层与工件表面的多次反射而延长对工件的作用时间来实现的. 刚性约束层能最大地增加冲击冲量, 而柔性约束层和液体约束层的主要优点是其形状可与非平面形工件表面符合.

关键词: 激光, 约束层, 扩散, 反射波

PACC: 5235T

1. 引言

激光与物质相互作用产生强冲击波, 对其力学效应的应用和研究诞生了一门新的制造科学与技术, 即基于激光冲击波力学效应的先进制造理论与技术, 在国防和民用制造业中具有广泛的用途. 例如, 航空结构件激光冲击抗疲劳制造, 其疲劳寿命能提高 5 倍以上^[1,2]、金属钣金件的激光冲击精密成形^[3]、薄膜界面结合强度的激光层裂测量^[4]等. 在这些利用激光冲击波技术的冲击加工中, 由于激光功率和脉冲宽度的制约, 激光驱动的冲击波作为成形力源有时不能满足加工的要求. 为了提高冲击效果, 普遍采用约束层技术. 针对约束层的选择及其具体约束效果国内外学者进行了大量的检测和研究^[5-21]. 目前采用的约束层按其特性可分为刚性约束层, 即各种玻璃和其他一些刚性透明材料; 柔性约束层, 即各种透明有机薄膜; 以及液体约束层, 其中使用较多的是各种水溶液. 不同约束层的约束效果各不相同, 差别很大. 目前对约束层约束效果的研究, 主要采用针对各种具体的约束层进行压力检测^[14, 15, 21]或者利用试样进行冲击加工^[16-19], 再根据测量或加工结果进行分析, 从约束层的自身性质

提出相应的解释. 从目前的研究现状来看, 对约束层增强冲击效果的作用机理有的从约束层的刚性上进行解释^[18, 21], 有的从约束层材料的厚度上进行解释^[18], 还有的从声阻抗方面进行解释^[20]. 虽然关于约束层的研究很多, 但很少对各种约束层进行系统的研究, 所有研究都认为约束层能够提高冲击波的强度, 却没有解释不同约束层约束效果不同的原因之所在. 另外所有的研究都把约束效果和冲击波的强度等同起来, 认为约束层提高了冲击效果就是提高了冲击波的强度. 实际上激光的冲击作用是激光驱动的冲击波、汽化物的射流作用、以及反射波的综合作用, 同样用传感器检测到的压力也不是单纯的冲击波阵面的强度, 也是上述几种作用的综合体现. 本文从激光诱导形成冲击波阵面状态、汽化物的扩散以及冲击波反射等角度对约束层的作用机理进行系统分析, 以解释不同约束层约束效果不同的原因之所在.

2. 约束层对激光驱动冲击波参数的影响

激光驱动的冲击波是通过吸收层材料吸收激光能量发生汽化(包括气体和等离子体)形成高压气团

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50275068)、国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2002AA421120, 2002AA336030)和江苏省自然科学基金(批准号: BK2005054)资助的课题.

[†] E-mail: guyongyu@sina.com

而产生的,它和爆炸产生爆轰波极其相似.所不同的是炸药爆炸产生爆轰波是由化学反应产生气体,并由爆轰使气体膨胀形成爆轰波,而激光诱导冲击波则是由固体吸收层材料汽化产生气体(包括等离子体)并通过激光转化的热能使气体和等离子体膨胀产生高压从而形成冲击波.因此可以参照爆炸动力学理论对激光诱导冲击波过程进行分析.

激光诱导冲击波的模型如图 1 所示.激光照射到吸收层表面使吸收层材料汽化和等离子体化形成汽化区,同时在吸收层材料表面形成向工件方向传播的冲击波(实际上是各向同性地向四面八方传播,这里我们只提感兴趣的方向).汽化物的体积马上膨胀,并向左侧扩散形成扩散区.

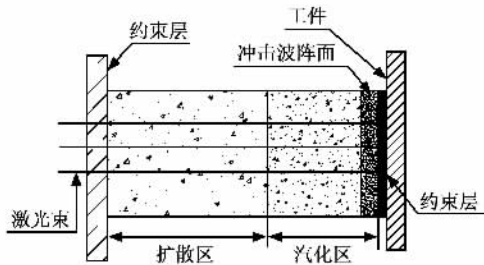


图 1 激光诱导冲击波模型图

根据爆炸动力学理论,由冲击波阵面与波前、波后的物质、冲量和能量守恒关系可以得到冲击波阵面的参量^[22]

$$p_k = \frac{1}{k+1} \rho_+ D^2, \quad (1)$$

$$a_k = \frac{k}{k+1} D,$$

$$D = \sqrt{\chi(k^2 - 1)Q_v},$$

其中 p_k , a_k 分别为冲击波阵面上的压力和声速. ρ_+ 为冲击波波前介质密度, D 为冲击波速度, k 为汽化物的多方指数, Q_v 为激光能量转化热. 从冲击波阵面参量可知,冲击波压力由波前吸收层的密度和冲击波阵面传播速度 D 确定,而 D 只与激光能量密度和吸收层性质有关,即冲击波强度由激光能量密度和吸收层材料确定.

由冲击动力学理论可知,冲击波阵面状态和约束情况确定了波后状态,在波前状态一定的情况下冲击波的强度只与激光转化能 Q_v 和汽化物的多方指数 k 有关,即只与激光能量密度和吸收层材料性质有关,而不涉及到扩散区的状态,这说明在激光诱导形成冲击波过程中,对于短脉冲激光,当激光脉冲

宽度短于冲击波阵面穿过汽化物的时间间隔时,汽化物的密度基本上不发生变化,则冲击波强度只与吸收层材料性质和激光能量密度有关,而与约束层无关,即约束层对增强冲击波强度不起作用.而当激光脉冲宽度大于冲击波阵面穿透汽化物的时间间隔时,汽化物密度 ρ_+ 增加,由(1)式第一式可知,冲击波强度与 ρ_+ 成比例增加.

3. 约束层对汽化物扩散的影响

在激光诱导冲击波的同时,伴随着汽化物的扩散.但由于激光脉冲作用时间很短,可以认为在激光脉冲作用期间汽化物来不及扩散,在激光脉冲结束后形成一团高压静止气体,并进行绝热膨胀.在讨论汽化物扩散时为方便起见,假定工件不发生变形.汽化物扩散的模型如图 2 所示.图 2(a)为柔性约束层、液体约束层和无约束层时的汽化物扩散模型,(b)为刚性约束层时的汽化物扩散模型.

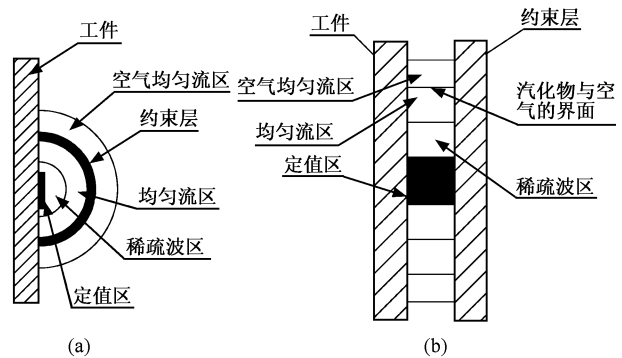


图 2 不同约束状态下汽化物扩散模型图

在汽化物刚开始膨胀时,汽化物的初始状态为

$$p_0 = p_h, u_0 = 0, a_0 = a_h, \rho_0 = \rho_h.$$

由于实际状态下汽化物进行三维扩散,要对其扩散过程进行分析极其困难,因此将其简化为沿工件表面法线方向的一维扩散,即不考虑汽化物的侧向扩散.一维扩散模型虽不能反映整个汽化物流动状态,但能较好地反映汽化物中心区域沿工件法线方向的流动状态.汽化物的一维扩散过程可由黎曼积分描述^[23],即

$$u = u_0 - \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho a}. \quad (2)$$

求积分得

$$u = \frac{2a_0}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]. \quad (3)$$

3.1. 无约束层

汽化物直接在空气中扩散,在汽化物与空气的交界面上, $p = 10^5 \text{ Pa}$, 则边界的运动速度为^[23]

$$U = \frac{2a_0}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]. \quad (4)$$

假设汽化物膨胀过程为等熵过程, 则其状态方程为

$$p\tau^k = \text{常数} = p_0\tau_0^k, \quad (5)$$

τ, τ_0 分别为汽化物扩散过程中某一时刻的体积和初始状态的体积.

在讨论汽化物在激光脉冲结束后作用在工件表面的压力时可以不考虑流场内的具体状态, 当作均匀流区看待. 由于是一维单向扩散, 则

$$\tau_0 = s\delta_0, \quad (6)$$

s 为一维汽化物的截面积, δ_0 为汽化物的初始厚度. t 时刻汽化物边界所处位置 X 为

$$X = Ut + \delta_0 = \delta_0 + \frac{2a_0t}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right], \quad (7)$$

则 t 时刻汽化物的体积为

$$\tau = sX = s \left(\delta_0 + \frac{2a_0t}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \right). \quad (8)$$

由(5)式得

$$p = p_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^k = p_0 \left(\frac{\delta_0}{\delta_0 + \frac{2a_0t}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]} \right)^k. \quad (9)$$

3.2. 对于柔性约束层和液体约束层

约束层在高压气体作用下产生抛射, 忽略柔性约束层的应力和液体约束层的黏滞力, 在古尼抛掷公式^[23]中令 $u_2 = 0$, 则得到约束层的抛飞速度为

$$u = \sqrt{e_0} \sqrt{\frac{6\rho_0\delta_0}{3\rho_1\delta_1 + \rho_0\delta_0}}, \quad (10)$$

其中 ρ_1, δ_1 为约束层的密度和厚度, e_0 为激光脉冲转化为汽化物的内能和约束层的运动能量. 则

$$e_0 = Q_v = \frac{D^2}{\chi k^2 - 1}. \quad (11)$$

故约束层的抛飞速度为

$$u = \frac{D}{\sqrt{\chi k^2 - 1}} \sqrt{\frac{6\rho_0\delta_0}{3\rho_1\delta_1 + \rho_0\delta_0}}$$

$$= \frac{a_0(k+1)}{k\sqrt{\chi k^2 - 1}} \sqrt{\frac{6\rho_0\delta_0}{3\rho_1\delta_1 + \rho_0\delta_0}}. \quad (12)$$

由古尼抛飞公式求得的约束层运动速度为约束层运动期间的平均速度. 由(5)式得到汽化物内的压力为

$$p = p_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^k = p_0 \left(\frac{s\delta_0}{s(\delta_0 + ut)} \right)^k = p_0 \left(\frac{\delta_0}{\delta_0 + \frac{a_0(k+1)t}{k\sqrt{\chi k^2 - 1}} \sqrt{\frac{6\rho_0\delta_0}{3\rho_1\delta_1 + \rho_0\delta_0}}} \right)^k. \quad (13)$$

由于液体约束层内的黏滞力和柔性约束层内的拉应力作用, 约束层的真实抛飞速度均要小于古尼公式确定的速度, 因此汽化物的压力要比计算压力大. 而液体约束层在膨胀过程中液膜厚度不断变薄, 最终破裂, 约束层破裂后汽化物直接在空气中扩散, 扩散情形与无约束层的状态相同.

取汽化物的初始状态参数为 $p_0 = 1000 \text{ MPa}$, $\delta_0 = 1 \text{ mm}$, $k = 3$, $\rho_0 = 1.2 \text{ g/cm}^3$ 汽化物初始状态的声速为 $a_0 = 1000 \text{ m/s}$, 液体约束层的密度为 $\rho_1 = 1 \text{ g/cm}^3$, 柔性约束层的密度为 $\rho_0 = 0.8 \text{ g/cm}^3$, 约束层的厚度均为 $\delta_1 = 2 \text{ mm}$, 考虑到汽化物扩散后期压力衰减, 对工件变形影响较小, 故只在 $0-1 \text{ ms}$ 内画出不同约束层作用下压力和时间的关系曲线, 如图 3 所示. 不同

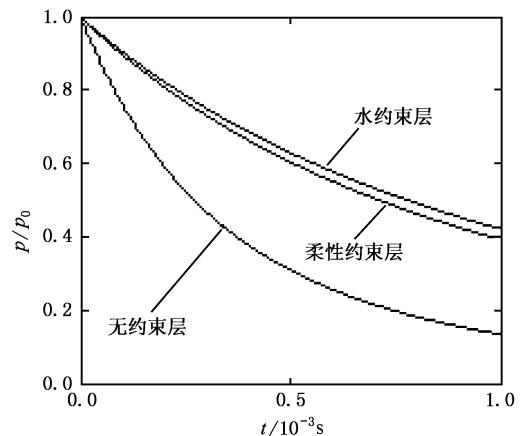


图 3 压力-时间曲线图

时刻不同约束情况下的汽化物 p/p_0 数据见表 1. 由图 3 可以看出高压汽化物在同样初始状态下开始扩散, 没有约束层时作用在工件表面的压力急剧下降, 而有约束层时压力下降则慢得多. 在 1 ms 时, 无约束层的汽化物压力已衰减到初始压力的 12%, 而密度为 0.8 g/cm^3 的柔性约束层和水约束层的汽化物压力仍维持在初始压力的 40% 左右, 是无约束层的

3.5 倍. 液体约束层和柔性约束层压力下降的快慢取决于液体的密度和约束层厚度, 即取决于约束层的单位面积的质量 $\rho_1 \delta_1$.

表 1 气化物压力与初始压力比值表

p/p_0 \ 时间/ms	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
约束层					
液体约束层	0.82	0.69	0.58	0.495	0.43
柔性约束层	0.81	0.67	0.55	0.46	0.39
无约束层	0.59	0.39	0.26	0.18	0.12

3.3. 刚性约束层

在以一维模型讨论气化物扩散时, 由于刚性约束层不变形, 因此可以较长时间维持高压气团的初始状态. 实际刚性约束情况下, 气化物从约束层和工件之间的缝隙进行扩散, 因气隙厚度很小, 所以此时气化物扩散速度远小于无约束或柔性约束和液体约束的情况. 由于高压微量流体缝隙运动极其复杂, 难以建立合适的数学模型, 因而无法进行定量分析.

取气化物扩散前的初始状态与前相同, 不同时刻下气化物与约束层的单位面积质量 $\rho_1 \delta_1$ 关系如图 4 所示. 不同 $\rho_1 \delta_1$ 的约束层不同时刻下的 p/p_0 值见表 2. 从图 4 和表 2 可以看出, 在气化物扩散的初始阶段, 约束层的单位面积质量 $\rho_1 \delta_1$ 对压力影响

表 2 气化物压力与初始压力比值表

p/p_0 \ $\rho_1 \delta_1$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
时间 / ms					
5	0.12	0.17	0.22	0.265	0.31
10	2.2×10^{-3}	3.2×10^{-3}	4.3×10^{-3}	5.4×10^{-3}	6.5×10^{-3}
15	0.75×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.9×10^{-3}	2.3×10^{-3}
20	0.35×10^{-3}	0.53×10^{-3}	0.68×10^{-3}	0.88×10^{-3}	1.1×10^{-3}
25	1.8×10^{-4}	2.0×10^{-4}	3.7×10^{-4}	4.9×10^{-4}	5.95×10^{-4}

在扩散的初期, 气化物的压力很大, 约束层内的应力和黏滞力可以忽略不计, 约束层的运动完全可以当作刚体的抛飞来进行处理, 即利用古尼公式计算其运动速度. 随着压力的降低, 应力和黏滞力不能再忽略不计, 不过低压阶段气化物作用在工件表面的压力对工件的变形影响不大, 这一阶段不在考虑范围之内. 在实际约束情况下, 无约束层或有柔性约束层和液体约束层时, 气化物均作三维扩散. 而在刚性约束层作用下, 气化物从约束层和工件的缝隙中扩散. 对于刚性约束层, 气化物在缝隙中扩散, 情况比较复杂, 但由于缝隙较小, 气化物扩散比液体约束层和柔性约束层约束情况下要慢得多, 因此有效压力维

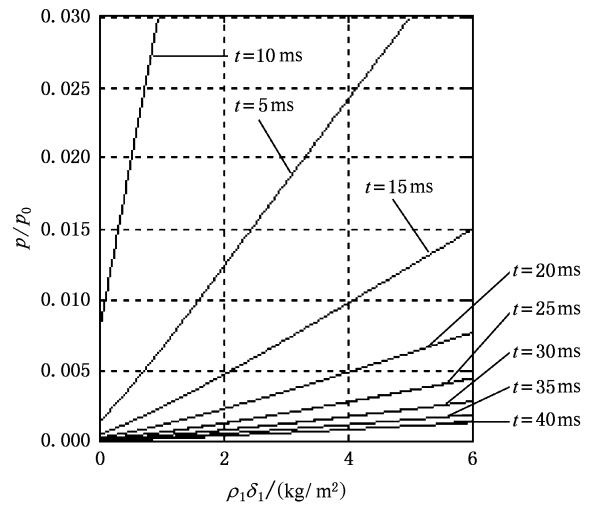


图 4 气化物压力曲线图

持时间显然比液体约束和柔性约束情况长. 另外在讨论时均假定工件不发生变形, 如果考虑工件变形则气化物作双向不对称三维扩散, 情况要相对复杂.

很大. 随着时间的推移, $\rho_1 \delta_1$ 对压力的影响越来越小. 在 30ms 之后差别很小. 而从图 3 发现在 30ms 之后, 气化物的压力已衰减很多, 处于低压阶段, 对工件的变形影响不大. 因此约束层单位面积质量对气化物高压阶段的维持起着关键作用, 可以通过提高约束层的密度和增加约束层的厚度来增强约束效果 (但厚度太大 (如大于 8mm) 时, 一是使用不方便, 二是可能因逆韧致辐射效应而使介质破坏, 这样透过约束层的光反而小了).

4. 冲击波的反射

激光诱导产生的冲击波在工件表面发生反射和透射, 透射波在工件内形成应力波使工件发生变形, 而反射波则向气化物中传播. 仍把工件当作不变形的刚壁考虑.

由气体动力学理论得到冲击波反射前后的压力

关系

$$\frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0} \approx 2 + \frac{k+1}{k-1}, \quad (14)$$

式中, p_0 为汽化物的初始压力, p_1 和 p_2 分别为入射和反射波的压力。

忽略 p_0 , 对于汽化物取 $k=3$, 则 $\frac{p_2}{p_1} = 4$, 可见反射波阵面后的压力增加很大。由于工件的声阻抗大于汽化物的声阻抗且激光诱导的冲击波强度很大, 因此在工件表面反射回来的依然是较强的冲击波, 并向约束层方向传播。

4.1. 无约束层、柔性约束层、液体约束层

没有约束层情况下, 反射波通过汽化物向空气中传播, 由于空气的声阻抗小于汽化物的声阻抗, 因此在汽化物与空气的界面上反射回来的是稀疏波, 它向工件传播的冲击波的作用效果极小。同时汽化物扩散推动空气运动, 在界面前面形成向空气中传播的冲击波而没有再次向工件传播的冲击波。

对于柔性约束层和液体约束层, 冲击波到达约束层时使约束层有一定的抛飞速度。另一方面, 由于约束层的反射也使汽化物的压力有所增加, 对工件的作用时间也延长一些, 从而增加了冲击波对工件的冲量。从约束层表面反射的反射波是弱冲击波还是稀疏波取决于汽化物和约束层的声阻抗。

4.2. 刚性约束层

由于刚性约束层变形量很小, 因此工件和约束层间汽化物厚度很薄, 但其温度和密度却快速增加, 因而冲击波的压力快速增加。因为刚性约束层的声阻抗大于汽化物的声阻抗, 因而从约束层表面反射的波是较强的冲击波, 冲击波在工件和约束层之间来回反射形成多次反射波对工件重复加载因而增强了作用于工件的应力幅值和作用时间, 从而大大加强了作用于工件的冲量, 直至该冲量强度大于约束介质的动态屈服强度而使约束层被破坏为止, 因此进一步增强工件的冲击效果。

在刚性约束状态下, 冲击波的强度取决于汽化物的状态和约束层的变形量, 在汽化物状态相同的情况下仅与约束层的变形量有关, 即与约束层的刚性有关。约束层变形量越小, 高速扩散的汽化物冲击约束层表面受到的压缩越厉害, 形成的冲击波越强。这与有关论文^[3]中提到的约束效果与约束层刚性有关是一致的。刚性约束情况下反射波如图 5 所示。

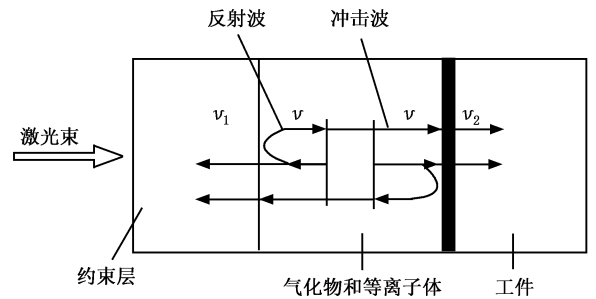


图 5 刚性约束下冲击波和反射波示意图^[24]

在刚性约束条件下用 PDVF 膜检测激光诱导冲击波压力^[4] 实际检测得到的并不单纯是激光诱导的冲击波压力, 而是冲击波以及多次反射波联合作用的压力。相关实验测得的压力曲线如图 6 所示, 有多个递减的压力峰值, 其中最大的峰值是由激光诱导的冲击波形成的, 而依次递减的峰值则是由汽化物在约束层表面压缩形成的多次冲击波和约束层对冲击波的反射形成的, 这很好的验证了反射波和多次冲击波的存在。

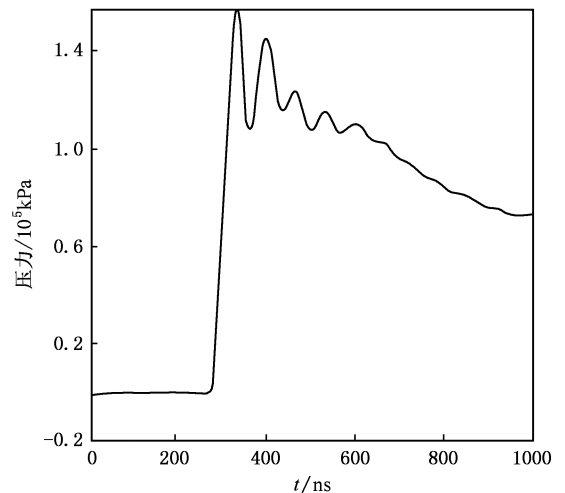


图 6 刚性约束层冲击波压力曲线图^[18]

5. 结 论

1. 对于脉冲宽度小于冲击波穿透汽化物层的时间间隔的激光脉冲, 约束层对直接提高激光诱导的冲击波强度并不起重要作用, 对于脉冲宽度大于冲击波穿透汽化层的时间间隔的激光来说, 它增强冲击效果是通过约束汽化物的扩散从而增大压力以及对冲击波在约束层与工件间的多次反射从而增加对工件的冲量来实现的。

2. 柔性约束层和液体约束层增强冲击效果主要是通过约束汽化物的扩散, 延长冲击波作用在工件表面的有效压力时间实现的, 其优点是其形状可与被约束工件形状符合. 柔性约束层和液体约束层的约束效果与约束层的厚度和密度相关, 在高压阶段密度、厚度越大效果越好. 但一般来说不如刚性约束层的约束效果大. 而且约束层易破碎, 污染实验环境.

3. 刚性约束层可延长冲击波作用在工件表面的有效压力时间, 从而增加对工件的冲击效果. 冲击波的强度与约束层的刚性相关, 即与约束层的声阻抗有关. 因此其作用效果要优于柔性约束层和液体约束层. 其缺点是不能与非平面工件相符合, 这将减小其对非平面工件的约束效果. 另外, 当激光功率密度较高时, 冲击波强度可大于约束层的动态屈服强度, 此时约束层被冲破成碎片, 会污染实验环境.

- [1] Zhang Y K , Hu C L , Cai L , Yang J C , Zhang X R 2001 *Applied Physics A* **72** 113
- [2] Zhang Y K , Zhang X R , Wang X D , Zhang S Y , Gao C Y , Zhou J Z , Yang J C , Cai L 2001 *Material Science and Engineering A* **297** 138
- [3] Zhou J Z , Yang J C , Zhang Y K , Zhou M 2002 *Journal of Material Processing Technology* **129** 243
- [4] Zhou M , Zhang Y K , Cai L 2002 *Applied Physics A* **74** 475
- [5] Bian B M , Yang L , Chen X , Ni X W 2002 *Acta Phys. Sin.* **54** 809 (in Chinese) [卞保民、杨 玲、陈 笑、倪晓武 2002 物理学报 **54** 809]
- [6] Bian B M , Chen J P , Yang L , Ni X W , Lu J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 445 (in Chinese) [卞保民、陈建平、杨 玲、倪晓武、陆建 2000 物理学报 **49** 445]
- [7] Bian B M , Chen X , Xia M , Yang L , Shen Z H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 445 (in Chinese) [卞保民、陈 笑、夏 铭、杨 玲、沈中华 2004 物理学报 **53** 445]
- [8] Zheng Z Y , Zhang J , Hao Z Q , Yuan X H , Zhang Z , Lu X , Wang Z H , Wei Z Y 2006 *Chinese Physics* **15** 580
- [9] Wang G C , Zheng Z J , Yang X D , Gu Y Q , Liu H J , Wen T S , Ge F F , Jiao C Y , Zhou W M , Zhang S G , Wang X X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4803 (in Chinese) [王光昶、郑志坚、杨向东、谷渝秋、刘宏杰、温天舒、葛芳芳、焦春晔、周维民、张双根、王向贤 2005 物理学报 **54** 4803]
- [10] Oros C 2002 *Shock Waves* **11** 393
- [11] Chumakov A M , Petrenko A M , Bosak N A 2002 *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* **75** 725
- [12] Chen R F , Hua Y Q , Yang J C , Zhang Y K 2004 *Materials Science Forum* **471-472** 811
- [13] Svetsov V , Popova M , Rybakov V , Artemiev V , Medveduk S 1997 *Shock Waves* **7** 325
- [14] Marton Z , Landström L , Heszler P 2004 *Applied Physics A* **79** 579
- [15] Zhang Y K , Cai L 1997 *Chinese Journal of Lasers* **B 6** 81
- [16] Zhang Y K 1997 The youth academic proceeding of acoustical society of China in 1997 (press of Haerbing institute of technology , (Haerbing China) (in Chinese) [张永康 1997 中国声学学会 1997 年青年学术会议论文集 (中国·哈尔滨 : 哈尔滨工业大学出版社)] **180-184**
- [17] Zhang Y K , Zhang B , Yu C Y , Liu Z D 1994 *Aviation Precision Manufacturing Technology* **30** 24 (in Chinese) [张永康、张 斌、余承业、刘志东 1994 航空精密制造技术 **30** 24]
- [18] Zhou J Z , Yang J C , Zhang Y K , Zhou M 2002 *Applied Laser* **22** 164 (in Chinese) [周建忠、杨继昌、张永康、周 明 2002 应用激光 **22** 164]
- [19] Zhou J Z , Zhang Y K , Zhou M , Yin S M , Yang J C , Wu H X , Guo D H 2005 *Chinese Journal of Laser* **32** 136 (in Chinese) [周建忠、张永康、周明、殷苏民、杨继昌、吴鸿兴、郭大浩 2005 中国激光 **32** 136]
- [20] Duan Z Y , Wang S B , Wu H X , Guo D H , Liu S W 2000 *Laser Journal* **21** 19 (in Chinese) [段志勇、王声波、吴鸿兴、郭大浩、刘世伟 2000 激光杂志 **21** 19]
- [21] Zhu W H , Li Z Y , Zhou G Q , Li X Z , Cheng J Y 1997 *Journal of Experiment Mechanics* **12** 216 (in Chinese) [朱文辉、李志勇、周光泉、李欣增、程经毅 1997 实验力学 **12** 216]
- [22] Li W X 2003 *One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Wave* . The first edition (National Defense Industry Press , Beijing) Chapter 4 (in Chinese) [李维新 2003 一维不定常流与冲击波 (北京 : 国防科技大学出版社)]
- [23] Lü H S , Ceng X W 1991 *Dynamics of Continuous Media* The first edition (National University of Defense Technology Press , Changsha) Chapter 11 (in Chinese) [吕洪生、曾新吾 1991 连续介质流体力学 (北京 : 国防科技大学出版社)]
- [24] Guo D H , Wu H X , Wang S B , Hong X , Wang J , Dai Y S , Xia X P 1999 *Science in China (Series E)* **29** 222 (in Chinese) [郭大浩、吴鸿兴、王声波、洪 昕、王 、戴宇生、夏小平 1999 中国科学 (E 辑) **29** 222]

Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics^{*}

Gu Yong-Yu¹⁾ Zhang Yong-Kang^{1,2)} Zhang Xing-Quan¹⁾ Shi Jian-Guo¹⁾

1) *School of Mechanical Engineering of Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

2) *School of Mechanical and Power Engineering of Ecust, Shanghai 200237, China*

(Received 24 September 2005 ; revised manuscript received 23 March 2006)

Abstract

The interaction between laser and material can induce strong shock wave, so a new subject of science and manufacture technology—photomechanics is being founded on the basis of the mechanical effect of laser induced shock wave which is applied in areas such as laser shock shaping and laser spallation measurement. One of the key problems is to enhance the pressure peak value of shock wave effectively, for which the overlay is generally introduced in laser shock processing to improve the shock effect. So it has important theoretical significance and application value to study the influence of overlays exerting on the shock wave pressure. With respect to rigid overlays, flexible overlays and fluid overlays respectively, we analyze the influence from the aspects of the state of surface of discontinuity of laser induced shock wave, the diffusion of gasified material and plasma and the reflection of shock wave. It is found that overlays do not raise the pressure peak value directly when the pulse width is shorter than the time for the shock wave to cross the gasified material. On the contrary, shot of laser pulse with width longer than the time of shock wave crossing the gasified material heightens the shock effects by heightening the pressure by way of restricting the diffusion of gasified material and plasma and prolonging the acting time of useful pressure through multiple reflection of the shock wave betiseen the surfaces of the workpiece and the overlay. The rigid overlay can raise the pressure peak value of shock wave greatly. But the advantage of the flexible and fluid overlays is the adaptation to the form of the surface of non-planar workpieces.

Keywords : laser, overlays, diffusion, reflected wave

PACC : 5235T

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50275068), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2002AA421120, 2002AA336030), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2005054).