剩余吸收层对激光冲击效果影响的实验研究

叶云霞,赵抒怡,熊 松,高昌达

(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

摘 要: 激光冲击过程中,剩余吸收层对冲击效果影响显著,但其影响规律少有人关注。文中选择厚度、材质不同的材料作吸收层,实施激光冲击,控制激光参数,使得靶材表面留有剩余吸收层。通过表征靶材表面冲击区域凹坑尺寸、力学性能,以及直接检测冲击时靶材背面的冲击波信号,研究剩余吸收层对冲击效果的影响规律。结果表明:剩余吸收层会显著衰减冲击波,进而削弱靶材的冲击效果;对确定的约束层和靶材,存在具有"最佳声阻抗值"的理想吸收层,使得作用于靶材的冲击波强度最大;激光冲击时,为获得好的冲击效果,必须根据约束层、靶材等,选择合适吸收层,优化吸收层涂覆厚度。文中结果为激光冲击时吸收层材质和厚度的选择提供了依据。

关键词: 剩余吸收层; 激光冲击; 冲击波; 声阻抗匹配

中图分类号: TG115.5+6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3541-07

Experimental study on the effect of the remaining absorbing layer on laser shock processing

Ye Yunxia, Zhao Shuyi, Xiong Song, Gao Changda

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Remaining absorbing layers have a significant influence on the shock effects of metal samples in laser shock processing (LSP). However, the influence laws are still pending. In this paper, the experiments of LSP were conducted with different materials as the absorbing layers. The influence of the thicknesses of the absorbing layer was also studied. To guarantee that there were remaining absorbing layers on the target surface after shock, the laser parameters were carefully chosen. The influence laws of the remaining absorbing layers on the laser shock effect were researched by measuring the laser shock induced-pit sizes and the mechanical properties of the shocked zones. Furthermore, the shock wave signals on the back of the metal samples were tested by PVDF detector. Experimental results show that, the remaining absorbing layers can attenuate shock wave seriously. Therefore, the shock effects are weakened accordingly. Through the experimental and theoretical research, it can be found that there exist an ideal absorbing layer with "the optimal acoustic impedance", when the confinement layer and metal sample are determined. With the ideal absorbing layer, we can get the strongest shock effect. For achieving good results in LSP, the absorbing layer material should be carefully chosen according to the

收稿日期: 2015-04-08; **修订日期:** 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51205172);机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金

作者简介: 叶云霞(1978-),女,副教授,博士,主要从事激光加工方面的研究。Email:yeyunxia@ujs.edu.cn

confinement layer and metal sample. In the same time, the thickness of an absorbing layer should be controlled reasonably. The results of this paper can provide guidance for choosing the most appropriate absorbing layer for different metal samples in LSP.

Key words: remaining absorbing layer; laser shock processing; shock wave; acoustic impedance matching

0 引 言

强激光作用于材料表面可诱导高压冲击波,该冲击波可以作为加工制造零件的能量源,这就是激光冲击加工技术(Laser shock processing)。激光冲击典型的工艺结构是在待加工靶材表面覆盖吸收层,吸收层上方覆盖约束层。强激光透过透明约束层被吸收层吸收,吸收层吸收强激光后迅速气化电离形成等离子体。被约束于靶材和约束层之间的等离子体产生高压冲击波作用于靶材表面,在靶材表面产生残余压应力,改善材料表面的力学性能,或者诱导靶材变形,实现工件的制造[1-3]。

激光冲击过程中,吸收层有两方面的作用:产生高压等离子体和保护被冲击靶材表面不被破坏[4]。目前,常用的吸收层材料有黑漆和铝箔。在以往激光冲击加工的研究中,一般认为吸收层完全气化,忽略“剩余吸收层”对冲击效果的影响。如,被广泛应用的估算强激光诱导冲击波峰值压力的 Fabbro 公式[5-6],也是建立在吸收层完全气化的基础上,所以 Fabbro 公式中只包含约束层和靶材的声阻抗。实际上,“忽略剩余吸收层对冲击波的影响”这一假设只有在吸收层几乎被完全烧蚀时才成立。但是,实际加工过程中,为了避免激光直接烧蚀破坏靶材表面,吸收层都没有或者不能被烧穿,存在一定厚度的“剩余吸收层”。因此,从工程应用的角度,应该探究“剩余吸收层”对激光冲击效果的影响,这一点对单次冲击显得尤为重要。目前,国内外关于吸收层的研究,一方面集中于寻找易气化、易吸收激光能量、易涂覆于靶材表面,适合作吸收层的材料;另一方面从理论上估算了理想状况下吸收层的气化厚度[4,7-10]。因此,总体来说,关于吸收层本身的研究就比较少,关于“剩余吸收层”对激光冲击效果影响的研究就更少。“剩余吸收层”对实际加载于靶材表面的冲击波压力的影响规律尚不清楚。

鉴于此,文中将系统研究剩余吸收层厚度和材质对激光诱导冲击波的影响规律。文中选择黑漆和不同厚度的铝箔作为吸收层,选择块体金属靶材作为冲击对象。通过测量靶材表面冲击区域的三围形貌、冲击区域的表面硬度以及检测靶材背面的冲击波信号,分析剩余吸收层厚度和材质对冲击效果的影响。

1 实 验

实验在 Nd^{3+}:YAG 激光器上进行。激光器波长为 1 064 nm,脉冲宽度为 15 ns。文中实验所用的激光单脉冲能量为 9 J,作用于试样表面的光斑直径为 3 mm。冲击靶材大小为 1.5 cm×1.5 cm×1 cm 的退火纯铜(退火条件 800 ℃×3 h、型号 T2),靶材表面用砂纸打磨并用金相抛光剂抛光。选用三种吸收层:厚度为 120 μm 的铝箔、厚度为 80 μm 的铝箔、厚度为 80 μm 的黑漆。实验中均用水作为约束层。

冲击实验结束后,用丙酮清洗材料表面。用 keyence VHX-1000 三维形貌仪测量了靶材表面冲击区域的三围形貌;冲击区域硬度在 HV-1000 显微硬度仪上测量。为了直接观察不同材质的剩余吸收层对冲击波信号的影响,用 PVDF 传感器检测了冲击过程中靶材背面的冲击波信号,检测实验装置示意图如图 1 所示。PVDF 薄膜大小为 5 mm×5 mm,厚度为 30 μm,压电系数 d_{33} 为 21 PC/N,与传感器并联的是一个 25 Ω 的放电电阻,为了避免透射进 PVDF传

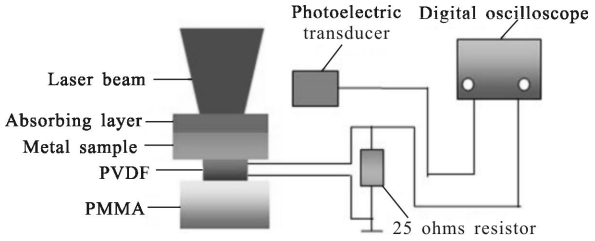


图 1 冲击波检测的实验装置示意图

Fig.1 Experimental device schematic diagram of shock wave detection

感器的冲击波重新反射回 PVDF 薄膜，影响测量信号，在传感器后面垫一块声阻抗值与其相接近的 3 cm 厚的有机玻璃(PMMA)。

2 结果和分析

2.1 剩余吸收层厚度对冲击效果的影响

图 2 为用铝箔作吸收层时，激光冲击后靶材表面形貌测量效果。其中图 2(a)的吸收层厚度为 80 μm，图 2(b)的吸收层厚度为 120 μm。激光冲击后，铝箔均未被烧穿，存在剩余吸收层。

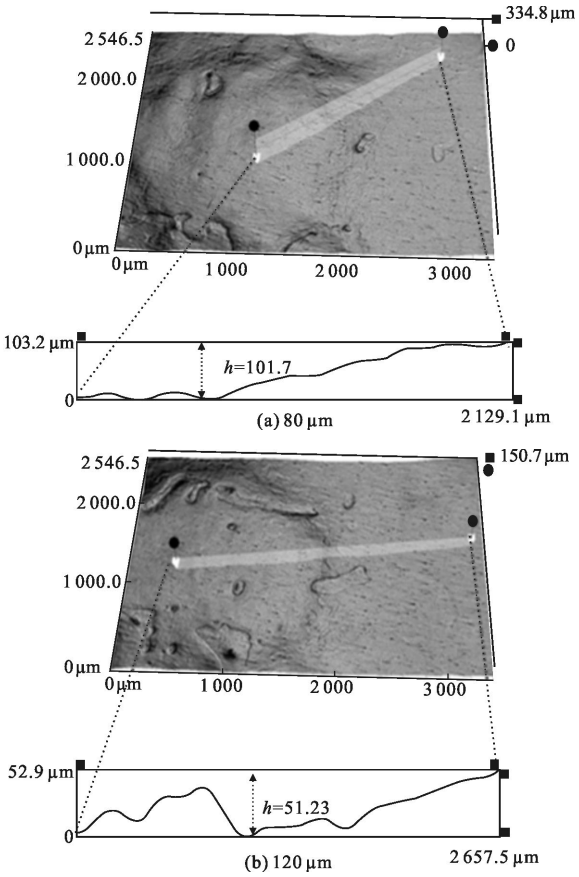


图 2 不同厚度铝箔吸收层时靶材表面的形貌

Fig.2 Surface morphology of shocked metal sample with aluminum absorbing layers of different thicknesses

图中的曲线显示了冲击后靶材凹坑侧面轮廓。由图可见，当吸收层厚度为 80 μm 时凹坑深度可达 101.7 μm；当吸收层厚度为 120 μm 时凹坑深度只有 51.23 μm。由于靶材表面的凹坑深度与其所受到的实际冲击压力有关，凹坑深度越大，则表明，靶材所受的冲击压力越大。所以，由凹坑深度可以判断，剩余吸收层厚度不同时靶材的受力情况不同。如图 3 所示，由于冲击后仍存在一定厚度的剩余吸收层，激光在约束层和靶材之间诱导产生的冲击波，需要透过剩余吸收层，才能到达靶材表面。根据 Bodner-Partom 无屈服本构理论[11]知冲击波的衰减规律形式为 $P(x)=a\mathrm{e}^{-bx}$(其中 a、b 为与材料有关的系数，x 为径向传输距离)。所以，当其他条件相同时，剩余吸收层的厚度越大冲击波在其中的衰减量就越大，实际作用于靶材的有效冲击力就越小。吸收层 120 μm 时，激光冲击后的剩余厚度大于 80 μm 时的剩余厚度，所以两种冲击情况下靶材表面的凹坑深度明显不同，剩余吸收层对冲击波有显著的衰减作用。

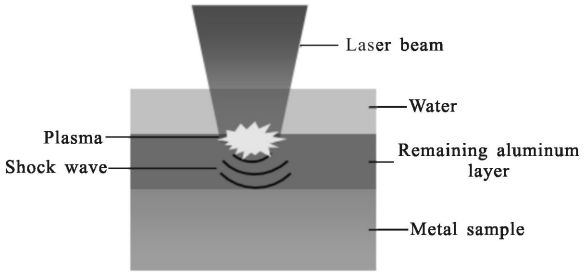


图 3 吸收层铝箔未烧蚀完时冲击波的传输

Fig.3 Transmission of shock wave when aluminum layer was ablated incompletely

此外，冲击后材料表面的力学性能也可以反映靶材表面的受力强度情况。图 4(a)和(b)分别为 80 μm 和 120 μm 厚的铝箔做吸收层时，激光冲击后靶材表面的硬度测量结果。

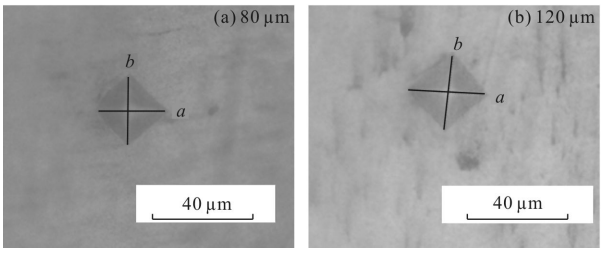


图 4 不同厚度铝箔吸收层时靶材表面硬度

Fig.4 Surface hardness of shocked metal sample with aluminum absorbing layers of different thicknesses

图中线段 a、b 为压痕对角线长度。由显微硬度公式[12]：

$$0.189\,1\times\frac{\text{pressure}}{\left(\frac{a+b}{2}\right)^2}=HV(\mathrm{N/mm^2}) \tag{1}$$

计算材料的维氏硬度，结果见表 1。由表 1 可知，当

吸收层为 120 μm 时靶材表面硬度达 99.58 N/mm²，低于吸收层厚度为 80 μm 时靶材表面硬度 114.3 N/mm²。进一步说明，剩余吸收层厚度越大，冲击波衰减越严重。吸收层厚度对被冲击靶材表面硬度有显著影响。

表 1 不同厚度吸收层时材料的表面硬度

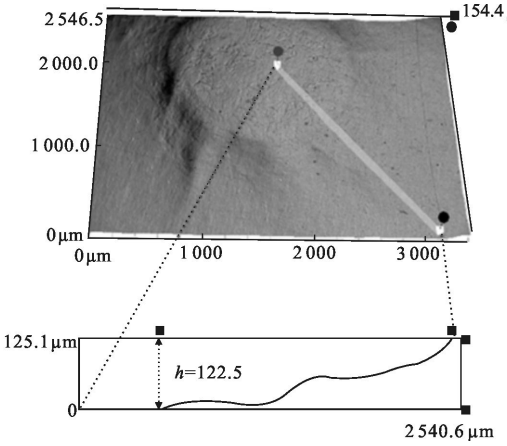
Tab.1 Material surface hardness under different thicknesses of absorption layers

Absorbing layer	Test pressure/N	a/μm	b/μm	Hardness /N·mm^{-2}
80 μm Al foil	0.26	20.74	20.74	114.3
120 μm Al foil	0.26	22.22	22.22	99.58

2.2 剩余吸收层材质对冲击效果的影响

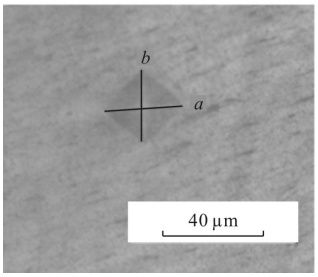
2.2.1 不同剩余吸收层时实际冲击效果

选择厚度 80 μm 的铝箔和 80 μm 黑漆作为激光冲击的吸收层，冲击后吸收层均未被烧穿。图 5(a)为黑漆作吸收层时靶材表面形貌测量结果，由图知，凹坑深度可达 122.5 μm；图 5(b)为黑漆作吸收层时靶材表面硬度测量，由公式(1)得靶材硬度为 160.8 N/mm²。与图 2(a)和表 1 结果对比可见，黑漆作吸收层时，靶材凹坑深度和表面硬度均比相同厚度的铝箔作吸收层时要大。



(a) 表面形貌

(a) Surface morphology



(b) 表面硬度

(b) Surface hardness

图 5 80 μm 黑漆吸收层时靶材表面形貌和硬度

Fig.5 Surface morphology and hardness of shocked metal sample with 80 μm black paint as absorbing layer

2.2.2 吸收层声阻抗对实际冲击波的影响

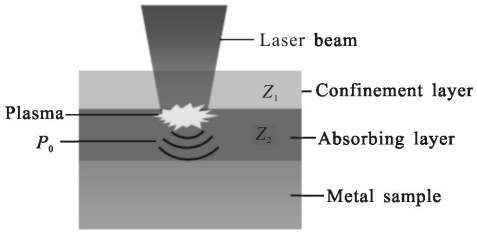
由实验测量结果知，黑漆作吸收层时，实际作用于靶材表面的冲击波强度比铝箔作吸收层时高。这与约束层、吸收层和靶材之间的声阻抗密切有关。

如图 6(a)所示，当靶材表面存在剩余吸收层时，激光在吸收层表面诱导产生的原始冲击波，实际被约束于剩余吸收层和约束层之间。因此，根据 Fabbro 公式[5-6]，激光诱导原始冲击波峰值压力 P_0 为：

$$P_0=0.01\left(\frac{\alpha}{2\alpha+3}\right)^{1/2}\cdot Z^{1/2}\cdot I^{1/2} \tag{2}$$

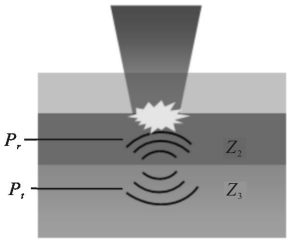
式中：α 为修正系数，当水作约束层时 α 等于 0.2；I 为激光器的峰值功率密度；Z 满足如下关系：$\frac{2}{Z}=\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2}$，其中 Z_1、Z_2 为冲击波两侧材料的声阻抗。这里，由于存在剩余吸收层，Z_1、Z_2 分别为约束层和吸收层的声阻抗。因此，根据公式(2)，剩余吸收层声阻抗对激光诱导的原始冲击波峰值压力有显著影响。

除此以外，吸收层声阻抗还会影响吸收层-靶材界面处的透射冲击波。如图 6 所示，激光诱导的原始



(a) 冲击波的产生

(a) Generation of shock wave



(b) 冲击波在界面处的透射和反射

(b) Transmission and reflection of shock wave in the interface

图 6 冲击波在剩余吸收层和靶材内的传输

Fig.6 Transmission of shock wave through the remaining absorbing layer and the metal sample

冲击波经过剩余吸收层，到达吸收层-靶材界面，传输至靶材内部。根据冲击波的传输规律[13-14]：由于吸收层声阻抗 Z_2 和靶材声阻抗 Z_3 不等，使得只有部分冲击波能量进入靶材内部，而另一部分能量则反射回吸收层被损耗。用 P_t 表示透射进入靶材的压力。P_t 表达式[13-14]：

$$P_t=\frac{2Z_3}{Z_2+Z_3}P_0 \tag{3}$$

由该式可见，剩余吸收层阻抗 Z_2 会进一步影响透射冲击波强度。

由此可见，只要激光冲击过程中存在剩余吸收层，吸收层的声阻抗就会影响激光诱导原始冲击波强度和吸收层-靶材界面处透射冲击波强度，进而影响实际作用于靶材表面的冲击波强度。

在文中实验中，水为约束层，吸收层分别为黑漆和铝箔。因此，公式(2)中 Z_1 取水的声阻抗 0.148×10^6 g/(cm²·s)，Z_2 取黑漆或者铝箔的声阻抗，分别为 $0.315\,6\times10^6$ g/(cm²·s)，1.506×10^6 g/(cm²·s)。由于实验中激光单脉冲能量 9 J，脉冲宽度为 15 ns，光斑直径为 3 mm，所以公式(2)中 I=8.5 GW/cm²，激光在吸收层和约束层之间诱导的冲击波峰值压力 P_0 的具体计算结果见表 2。

表 2 不同剩余吸收层冲击波的透射强度

Tab.2 Transmission pressure of shock wave under different absorbing layers

Absorbing layer	Peak pressure P_0/Pa	Interface	Transmission pressure P_t/Pa
Al foil	3.671×10^9	Cu-Al	5.212×10^9
Black paint	3.172×10^9	Cu-black paint	5.844×10^9

激光诱导冲击波经过剩余吸收层传输至吸收层-靶材界面，其透射规律遵循公式(3)，其中靶材铜的声阻抗 Z_3 为 3.685×10^6 g/(cm²·s)，根据公式(3)，P_t 的计算结果也在表 2 中给出。

由表 2 可知，铝箔作吸收层时，初始冲击波峰值压力值 P_0 比黑漆作吸收层时高。但由于冲击波在剩余吸收层-靶材界面处的透射、反射，实际上，黑漆作吸收层时作用于靶材的冲击波压力值 P_t 却比铝箔作吸收层时高。计算结果与实验所测靶材表面性能规律相一致。

为了研究一般情况下吸收层声阻抗 Z_2 与透射压力 P_t 之间的关系，将公式(2)和公式(3)合并、整理得：

$$P_t=A\left(\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}\right)^{1/2}\frac{Z_3}{Z_2+Z_3} \tag{4}$$

式中：$A=0.01\cdot2\sqrt{2}\cdot\left(\frac{\alpha}{2\alpha+3}\right)^{1/2}I^{1/2}$，该值与修正系数 α 和激光能量密度 I 有关。由公式(4)可知，当激光能量密度 I、约束层声阻抗 Z_1、靶材声阻抗 Z_3 确定后，P_t 是只与剩余吸收层阻抗 Z_2 有关的函数，即吸收层声阻抗对实际作用于靶材表面的冲击波压力有决定性影响。图 7 给出了约束层为水，靶材为纯铜时，P_t/A 随吸收层声阻抗 Z_2 的变化规律。

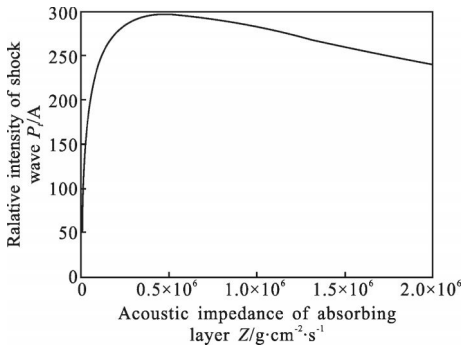


图 7 透射冲击波相对强度 P_t/A 随剩余吸收层阻抗的变化

Fig.7 Relationship between relative intensity P_t/A and remaining absorbing layer acoustic impedance

由该曲线可见，随着 Z_2 的变化，P_t/A 存在一极大值。由此说明，当激光能量密度、约束层和靶材确定后，为了获得最理想的冲击效果，Z_2 存在一个最佳值。对公式(4)求导，当 $dP_t/dZ_2=0$，可得“最佳声阻抗值”Z_2 为：

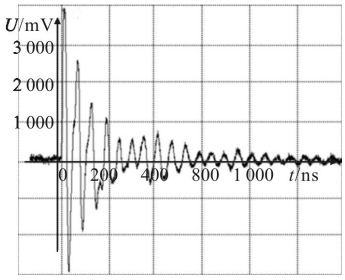
$$Z_2=\frac{\sqrt{Z_1^2+8Z_1Z_3}-Z_1}{4} \tag{5}$$

此时透射冲击波压力 P_t 最大。实际应用中，可以根据公式(5)选择合理的吸收层材料以获得最佳冲击效果。

2.2.3 冲击波检测

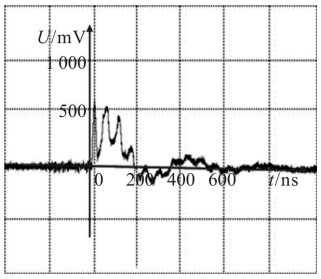
为了直接验证“剩余吸收层声阻抗影响着冲击效果”这一理论分析，用 PVDF 压电传感器直接检测激光冲击过程中靶材背面的冲击波信号，装置如图1所示。由于厚块体材料对冲击波衰减太多，不利于辨别剩余吸收层对冲击波强度的影响。因此，在这部分，选择 200 μm 的铜箔为靶材，测量其背面的冲击

波信号。吸收层分别为:80 μm 厚的铝箔,80 μm 厚的黑漆,冲击后均存在剩余吸收层。图 8(a)、(b)分别为两种吸收层时,靶材背面的冲击波压电信号。



(a) 80 μm 黑漆

(a) 80 μm black paint



(b) 80 μm 铝箔

(b) 80 μm aluminum foil

图 8 不同材料吸收层时靶材背面冲击波信号

Fig.8 Shock wave signals on the back of metal sample with different absorbing layers

图中,波形呈周期性振荡,是由于冲击波在靶材中来回反射所致[15]。由 PVDF 传感器的特性,将电压信号积分得极化电荷量 $Q(t)=\int_0^t \frac{U(t)}{R}\mathrm{d}t$,利用公式 $P(t)=\frac{Q(t)}{d_{33}A}$($d_{33}$ 为薄膜的压电系数,A 为薄膜有效面积) 可得传输到靶材中的压力随时间的变化规律 $P(t)$[16-17]。图 8 所示,当吸收层为黑漆时,PVDF 检测得到的冲击波电压值高于铝箔为吸收层时的值。由此说明, 黑漆作吸收层时传输到靶材中的压力比铝箔吸收层时的压力大。进一步验证了剩余吸收层的声阻抗对冲击效果有显著影响。

3 结 论

文中研究了激光冲击过程中剩余吸收层对冲击效果的影响。具体结论如下:

(1) 剩余吸收层对冲击效果有显著影响,剩余吸收层越厚,冲击波在其中的衰减就越严重,实际作用于靶材的冲击力越小,冲击效果减弱。

(2) 剩余吸收层声阻抗对激光诱导的原始冲击波压力 P_0,以及吸收层-靶材界面处透射冲击波压力 P_t,均有显著影响。靶材的实际加工恰是两者综合作用的效果。

(3) 当激光参数、约束层和靶材选定后,吸收层声阻抗为 $Z_2=\frac{\sqrt{Z_1^2+8Z_1Z_3}-Z_1}{4}$,时,理论上可获得最佳冲击效果。

(4) 在激光冲击的实际应用过程中,吸收层的选择,既要保护工件表面不受破坏,也要考虑剩余吸收层对冲击波的衰减,因此吸收层厚度应仔细选择;选择吸收层材质时, 应综合考虑其对激光诱导原始冲击波, 以及吸收层-靶材界面处的透射冲击波的影响。在其它条件满足的情况下,尽量选择声阻抗值最接近“最佳声阻抗值”的材料。

参考文献:

[1] Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy [J]. ***Chinese J Lasers***, 2010, 37(11): 2925-2930. (in Chinese)
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2925-2930.

[2] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(4): 736-740. (in Chinese)
孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 736-740.

[3] Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming, et al. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading[J]. ***Chinese J Lasers***, 2005, 32(1): 135-138. (in Chinese)
周建忠, 张永康, 周明, 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 135-138.

[4] Zhang Lingfeng, Zhang Yongkang, Ren Xudong, et al. Study of confinement layer and absorbing layer in laser shock processing [J]. ***Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery***, 2007(1): 127-131. (in Chinese)
张凌峰, 张永康, 任旭东, 等. 激光冲击约束层和吸收层的

研究[J]. 农业机械学报, 2007(1): 127-131.

[5] Devaux D, Fabbro R, Tollier R, et al. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. ***J Appl Phys***, 1993, 74(4): 2268-2273.

[6] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. ***J Appl Phys***, 1990, 68(2): 775-784.

[7] Hu Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 33-35. (in Chinese)
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 33-35.

[8] Zhang Lingfeng, Zhang Yongkang, Feng Aixin, et al. Analysis of flexible coating for laser shock processing [J]. ***Laser Technology***, 2007(1): 65-67. (in Chinese)
张凌峰, 张永康, 冯爱新, 等. 激光冲击用柔性贴膜的研究[J]. 激光技术, 2007(1): 65-67.

[9] Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, et al. Thickness optimizing of surface coating for laser shock processing [J]. ***Heat Treatment of Metals***, 2006(7): 61-64. (in Chinese)
任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 激光冲击加工表面涂层厚度的优选[J]. 金属热处理, 2006(7): 61-64.

[10] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminum alloys application to high cycle fatigue behavior [J]. ***Materials Science & Engineering***, 1996, A210(1-2): 102-113.

[11] Hong Xin, Wang Shengbo, Guo Dahao, et al. Research on the attenuation property of the laser-induced shock wave propagation in aluminum [J]. ***Chinese Journal of Quantum Electronics***, 1998(5): 474-478. (in Chinese)
洪昕, 王声波, 郭大浩, 等. 激光冲击波在铝靶中衰减特性研究[J]. 量子电子学报, 1998(5): 474-478.

[12] Liu Xiang. Dynamic pressure measurement technology using by PVDF piezofilms and its engineering application [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009: 6-7. (in Chinese)
刘祥. 基于图像处理技术的维氏硬度检测方法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009: 6-7.

[13] Gai Jingbo, Wang Shan, Yang Shiquan. Promulgation of impact wave in multilayer structure [J]. ***Fire Control and Command Control***, 2007, 32(3): 12-13+18. (in Chinese)
盖京波, 王善, 杨世全. 冲击波在多层结构中的传播[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(3): 12-13+18.

[14] Ren Lianbao, Ding Li, Liu Runsheng. The meaning and role of acoustic impedance in the process of explosion welding for Ti steel composite plate [J]. ***Titanium Industry Progress***, 2010(4): 5-8. (in Chinese)
任连保, 丁力, 刘润生. 声阻抗在钛-钢复合板爆炸焊接过程中的意义和作用[J]. 钛工业进展, 2010(4): 5-8.

[15] Zhu Wenhui, Li Zhiyong, Zhou Quangquang, et al. Measurement of laser-induced shock waves by PVDF [J]. ***Journal of Experimental Mechanics***, 1997(2): 52-56. (in Chinese)
朱文辉, 李志勇, 周光泉, 等. 用 PVDF 实时测量激光诱导的冲击波压力[J]. 实验力学, 1997(2): 52-56.

[16] Zhu W H, Yu T X, Li Z Y. Laser-induced shock waves in PMMA confined foils [J]. ***International Journal of Impact Engineering***, 2000, 24: 641-675.

[17] Li Sizhong. Dynamic pressure measurement technology using by PVDF piezofilms and its engineering applications [D]. Chengdu: Sichuan University, 2001: 9-11. (in Chinese)
李思忠. 高速冲击条件下 PVDF 传感元件测压技术及其工程应用[D]. 成都: 四川大学, 2001: 9-11.