

文章编号: 1001-3806(2005)06-0626-03

# 激光冲击成形约束层性能的研究

周益军<sup>1,2</sup>, 张永康<sup>1\*</sup>, 周建忠<sup>1</sup>, 冯爱新<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 激光技术研究所, 镇江 212013; 2. 扬州职业大学, 扬州 225500)

**摘要:** 概述了激光冲击成形领域中约束层性能的发展动态; 分析了约束层材料的厚度、密度、透光率、声阻抗、刚度、羟基-OH 含量、各向物理性能等对激光冲击成形的影响。认为约束层性能是制约激光冲击成形效果的决定性因素。指出了应用于激光冲击成形的理想约束层性能, 并提出约束层的制作工艺性这一概念, 强调解决约束层的制作工艺性是目前激光冲击成形领域走向应用的关键。

**关键词:** 激光冲击成形; 约束层; 性能; 制作工艺性**中图分类号:** TG 665      **文献标识码:** A

## Study on properties of overlay in laser shock forming

ZHOU Yijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1</sup>, ZHOU Jian-zhong<sup>1</sup>, FENG Ai-xin<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2 Yangzhou Polytechnical College, Yangzhou 225500, China)

**Abstract** The properties of overlay in laser shock forming is summarized. Then the impact of its thickness, along with density, light transmittance, impedance, stiffness, content of hydroxide radical, anisotropy or isotropy on laser shock forming is analyzed. On the above basis, the ideal property of overlay in laser shock forming is put forward and a new concept in manufacturing technology of overlay is set forth. In the view of making laser shock forming process applicable, more attention should be paid to the study of manufacturing technology of overlay.

**Key words** laser shock forming; overlay; properties in manufacturing technology

## 引言

激光冲击成形是由激光和材料相互作用所产生的高压冲击波来实现。激光脉冲能在金属表面产生峰值高达 GPa 的冲击波, 假若在金属表面涂上一层能透过入射激光的材料, 激光产生的冲击波幅值就会明显升高, 这些冲击波幅值的升高倍数受控于激光加热透明材料的温度, 其波形近似于入射激光脉冲的波形。冲击波的衰变时间慢于激光脉冲的衰变时间, 因为它取决于周围材料的作用速率及从加热的气体进入较冷的临界材料的热导速率。这种冲击波足以使金属产生强烈塑性变形, 即使在有气体的环境中(例如在标准条件下的空气中)进行实验也是如此<sup>[1]</sup>。板料在激光冲击成形的同时, 激光冲击波会对金属的性能产生影响<sup>[2~5]</sup>。为了探索激光冲击成形的规律, 已有学者对激光冲击成形的轨迹生成方法<sup>[6]</sup>和激光冲击波<sup>[7]</sup>进行了深入研究, 而对约束层的性能对激光冲击成形影

响的研究还不够深入。在激光冲击成形时, 金属表面的这种涂层就是所谓的约束层。约束层的作用对激光冲击的效果起决定性作用。约束层的性能是制约其充分发挥作用的决定性因素。所以, 对约束层的性能进行研究是目前激光冲击成形领域走向应用的关键所在。下面就约束层的性能和其作用进行探讨。

### 1 约束层的作用

理论和实践都证明约束层结构能有效增强激光冲击波的压力并延长其持续时间。使用有机玻璃作为约束层和没有约束层相比, 当有约束层时压力脉宽约相当于没有约束层时的 7 倍; 靶从激光获得的动量大约可提高两个数量级<sup>[8]</sup>。从理论上来说约束层在激光冲击成形过程中的作用主要有以下几个方面。

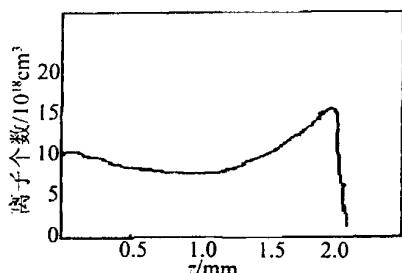
#### 1.1 阻碍等离子膨胀

在直接烧蚀状态下, 等离子体自由地逆着激光束方向膨胀; 加上约束层之后等离子体的膨胀局限于约束层与靶之间的狭小空隙中, 这种约束效应是很可观的<sup>[8]</sup>。陆建等<sup>[9]</sup>研究了能量为 120mJ 脉宽为 15ns 的激光直接照射铝靶表面产生的等离子体密度分布, 如图 1 所示, 等离子体厚度达 2mm, 而在约束状态下, 等离子体膨胀空间一般只有 10μm ~ 20μm<sup>[10]</sup>。

**作者简介:** 周益军(1966), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事机械 CAD/CAM 及激光冲击方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2004-12-28 收到修改稿日期: 2005-02-24

图 1 等离子体轴向分布, 延时 243ns<sup>[10]</sup>

## 1.2 约束层能增强能量耦合

在此不考虑黑色涂层对激光的增强吸收。约束层阻碍等离子体膨胀的重要后果之一是对激光能量吸收的增强。由于约束层的存在, 等离子体被限制在靶体表面附近, 从而等离子体携带的能量能够通过正常热电子传导、短波长热等离子体辐射以及等离子体(或蒸气)回流等形式提供给靶表面的稠密相, 能量耦合得到加强<sup>[10]</sup>。

## 1.3 约束层与冲击波相互作用

若有约束介质存在, 等离子体向外喷射时, 除有直接射向靶表面的压力波以外, 还有射向约束介质并在其表面反射再传向靶表面的附加波。显然, 该附加波既增强了对靶的冲击应力也延长了对靶的冲击时间, 作用于靶的冲击动量也将提高<sup>[10, 11]</sup>。

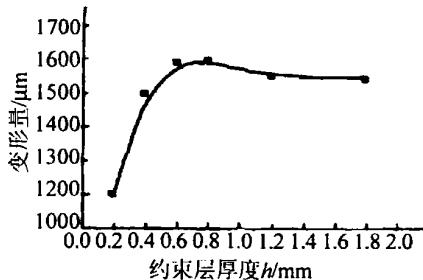
## 2 理想约束层应具备的性能

理想约束层应具备的性能有: (1)较高的透光率; (2)较好的制作工艺性; (3)一定刚度; (4)较高的声阻抗; (5)厚度易控制; (6)不含羟基—OH 或含较少的吸收激光束能量的成分; (7)各向物理性能相同; (8)具有一定的密度。

## 3 当前约束层研究已解决的问题

### 3.1 约束层材料厚度对激光冲击效果的影响

周建忠等<sup>[12]</sup>已通过实验研究光学玻璃约束层材料的厚度对激光冲击效果的影响, 在一定条件下得出了如图 2 所示的规律。试样为 2024-T62, 厚度为 0.8mm, 试样表面涂黑漆, 涂层厚 0.1mm, 用 K9 光学玻璃作为约束层, 激光功率密度为 3.12GW/cm<sup>2</sup>。从

图 2 约束层厚度与表面形变量的关系<sup>[12]</sup>

中可以看出, 随着约束层厚度的增加, 冲击区表面的变形量有增大的趋势。但当约束层厚度超过某一值时, 变形量逐渐趋于平稳。

此外, 激光冲击时如采用的约束层厚度太薄, 则在激光冲击波作用下, 约束层会过早破裂; 而约束层太厚, 则由于约束层对激光的吸收和散射, 会导致激光能量的利用率降低, 这都不利于激光冲击波峰压的提高。

### 3.2 约束层材料密度对激光冲击效果的影响

根据冲击波峰压公式:  $p = 0.1 \left[ \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2}$ ,

式中,  $I_0$  为激光密度,  $\alpha$  为等离子体内能增加系数,  $Z$  为阻抗。根据上式, 肖爱民<sup>[13]</sup>等推导出冲击波峰压公式:

$$p = 0.1 \left[ \frac{\alpha}{\alpha + 2} \right]^{1/2} \left[ \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2} \rho_0^{-1/2} I_0 \quad (1)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为金属材料和约束层的密度, 从上式可见, 在保证  $\rho$  不变的情况下, 可通过增加约束层的密度  $\rho_2$  来提高冲击波峰压。此外, 如果约束层在各点处密度不均匀, 很显然会影响其对激光冲击的作用。

### 3.3 约束层材料透光率对冲击效果的影响

在激光冲击成形过程中, 当激光功率密度、激光脉冲等参数选定后, 入射激光束的能量是一定的。约束层材料透光率会使激光束的能量产生损失。由于约束层材料透光率导致激光束的能量损失的主要原因是约束层材料对激光束的反射、散射和吸收<sup>[13]</sup>。散射作用主要与约束层的表面加工精度有关, 表面粗糙度越大, 散射作用越大。在考虑约束层材料对激光束的反射时, 首要考虑约束层的绝缘击穿(dielectrical breakdown)现象<sup>[13]</sup>。即过高的功率密度会使约束层表面产生等离子, 并导致用于产生激光冲击的能量减少。不同的约束层材料的绝缘击穿阈值不同, 在激光功率密度大于约束层材料的绝缘击穿阈值时, 冲击波峰压将达到饱和并呈下降趋势。其次要考虑约束层材料中羟基—OH、金属离子等对激光束能量的吸收。此外约束层表面的污垢, 如油脂、汗迹等也会吸收能量<sup>[13]</sup>。约束层材料对激光束的反射率  $R$  可通过其相对于空气的折射率  $n$  来计算。反射率  $R$  和折射率  $n$  有如下关系<sup>[14]</sup>:  $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$

### 3.4 约束层材料阻抗对激光冲击效果的影响

段志勇等研究发现, 激光冲击波峰压值与约束层材料的声阻抗的大小直接相关: 声阻抗越大, 则激光冲击波峰压值越大。实验中铅玻璃的增压作用最大, 但由于其成本高, 所以一般用石英玻璃作为约束层材料。实验数据见表 1。表中  $\beta$  反映了冲击波脉宽相对于激光脉宽的倍数<sup>[15]</sup>。

表 1 约束层与冲击波

约束层材料	声阻抗 / ( $10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	激光功率密度 / (GW · cm $^{-2}$ )	$\beta$	$P_m / \text{GPa}$	$P_s / \text{GPa}$
无	-	1.02	-	0.04	-
有机玻璃	0.32	0.74	1.1	1.13	1.11
硅橡胶	0.47	0.74	1.2	1.38	1.35
K9玻璃	1.14	0.68	3.7	1.59	1.66
石英玻璃	1.31	0.76	2.8	1.72	1.66
铅玻璃	1.54	0.90	3.1	2.28	1.93

### 3.5 约束层材料刚度对激光冲击效果的影响

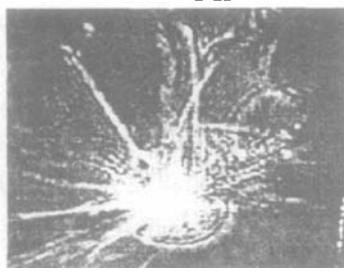
约束层材料一定时, 约束层的刚度随着其厚度的增加而变高。就相同厚度的不同约束层材料, 它们的刚度是不同的。约束层的刚度对激光冲击变形的效果有很大影响。与约束层的阻抗相比, 约束层本身的刚度对激光诱导的冲击波峰压产生更大的影响。约束层本身的刚度越好, 诱导的冲击波压力越大; 弹性(柔性)越大, 诱导的冲击波压力越小<sup>[12]</sup>。

### 3.6 约束层材料中羟基—OH 的含量对激光冲击效果的影响

2000年, 有人在中国科学技术大学强激光实验室通过利用含有羟基的酚醛树脂作为约束层, 发现酚醛树脂大量吸收激光能量而蒸发<sup>[16]</sup>, 大大降低了激光冲击的效果。硅胶、玻璃、水等由于不含羟基是它们能作为约束层材料的原因。

### 3.7 约束层材料的各向物理性能对激光冲击效果的影响

肖爱民<sup>[16]</sup>等在研究硅胶作为约束层时发现硅胶对激光的散射比较严重, 激光光场如图3所示。产生散射作用的主要原因是高分子化合物本身的特性, 如各向异性。

图 3 硅胶激光光场<sup>[16]</sup>

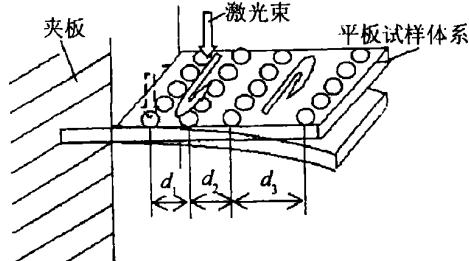
### 3.8 约束层材料的制作工艺性(包括去除性能)

约束层材料的制作工艺性是指在激光冲击成形前将约束层材料固定在工件表面的方法。约束层材料有许多种, 但到目前为止, 在简单的激光冲击成形中已有一些将约束层材料固定在工件表面的方法。但由于约束层材料制作工艺性差, 特别在当工件上某一点需多次激光冲击成形时, 约束层材料的制作工艺性距离实

际应用还需进行更多必要的研究。

## 4 当前约束层研究急待解决的问题

图4为激光冲击平板一维弯曲成形示意图。激光

图 4 激光冲击平板一维弯曲成形示意图<sup>[17]</sup>

束由激光冲击头输出。在冲击成形过程中需始终保证试样上的受冲击部位与激光冲击头输出的激光束垂直。由夹板完成上述动作<sup>[17]</sup>。在这个方案中, 试样的表面形状是不断地变化的, 对于这样非平面的区域, 目前没有很实用的办法在短时间内在其表面加上约束层。特别在当工件上某一点需多次激光冲击成形时, 如何在短时间内在其表面加上(或去除)约束层, 让工件实现连续激光冲击, 这一问题需作更多的研究。

使用刚性较好的约束层(如K9玻璃), 其厚度较易控制, 但不适用于曲面。使用柔性较好的约束层(如水), 可适用于曲面, 但其厚度较难控制。特别对于冲击的优势所在, 如含微孔、弯角、曲面等的工件, 激光冲击目前无法应用<sup>[18]</sup>。除非有新的工艺性很好的约束材料出现。所以, 对约束层材料的工艺性进行研究是当务之急。

为了使激光冲击成形获得广泛的工业应用, 江苏大学激光技术研究所已研制出一种新型的激光冲击约束层材料。这种约束层材料是以冰为主要成分。这种材料的工艺制作性能要优于传统的约束层材料。

## 5 结束语

(1) 解决约束层的制作工艺性是目前激光冲击成形领域走向应用的关键。

(2) 理想约束层性能需满足最大限度提高激光冲击峰压的作用。

(3) 新的约束层材料和其制作工艺仍是激光冲击的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] 郑启光. 激光先进制造技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001 184~185
- [2] 范勇, 王声波, 吴鸿兴 et al. 航空铝合金材料激光冲击强化实验研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(4): 273~275
- [3] 邹鸿承, 戴蜀娟, 徐明英 et al. 激光冲击处理提高铝合金性能的研究 [J]. 激光技术, 1995, 19(6): 321~325.

(下转第 644 页)

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dW(z)}{dz} = \sqrt{m+n+1}\theta_0 \quad (24)$$

式中,  $\theta_0$  为对应基模高斯光束远场发散角。

按照  $M^2$  因子定义<sup>[5]</sup>, 由(20)式和(24)式得到 HLG 光束的  $M^2$  因子为:

$$M^2 = m + n + 1 \quad (25)$$

从(25)式中可以看出, HLG 光束的  $M^2$  因子只与光束的模指数  $m, n$  有关, 与  $\alpha$  参数无关, 并等于  $m, n$  阶 HG 光束的  $M^2$  因子。

## 4 小 结

推导出了 HLG 光束通过近轴  $ABCD$  光学系统的解析传输公式, 并以自由空间传输和薄透镜聚焦为例进行了分析。与 HG 和 LG 光束不同, 除模指数  $m, n$  外, 在 HLG 光束中引入了新的  $\alpha$  参数, 它影响 HLG 光束的光强分布和对称性。通过  $ABCD$  光学系统传输时, HLG 光束形状保持不变。在自由空间传输时, HLG 光束随着传输距离的增加越来越发散; HLG 光束通过薄透镜聚焦时, 其实际焦点位置与光束模指数  $m, n$  及  $\alpha$  参数无关, 即对不同  $m, n$  和  $\alpha$  的 HLG 光束聚焦

(上接第 628 页)

- [4] 任乃飞, 杨继昌, 蔡 兰 et al. 激光冲击对金属材料机械性能的影响 [J]. 激光技术, 1998, 22(4): 235~238
- [5] 任乃飞, 高传玉. 碳钢的激光冲击强化研究 [J]. 激光技术, 2000, 24(2): 66~68
- [6] 金 川, 殷苏民, 蔡文泉. 激光冲击成形中冲击轨迹生长方法的研究 [J]. 激光技术, 2005, 29(2): 142~145
- [7] 戴蜀娟, 刘富荣, 杨 晓 et al. 激光冲击在 LY12 CZ 中形成冲击波的研究 [J]. 激光技术, 1997, 21(6): 330~333
- [8] 李志勇, 朱文辉, 周光泉 et al. 实验研究有机玻璃约束层对激光冲击波的影响 [J]. 中国激光, 1997, 24(2): 118~122
- [9] 陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 30~38
- [10] 段志永. 激光冲击波及激光冲击处理技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2000. 70~71
- [11] 郭大浩, 吴鸿兴, 王声波 et al. 激光冲击强化机理研究 [J]. 中国

后其束腰在同一位置, 但聚焦后 HLG 光束的束腰宽度与  $m, n$  有关, 与  $\alpha$  参数无关, 且为入射 HLG 光束束腰宽度的  $1/\sqrt{1+\pi^2 N_c^2}$ 。HLG 光束的  $M^2$  因子等于  $\sqrt{m+n+1}$ 。HLG 光束是一类有广泛代表性的光束, 并已得到实验证实<sup>[3]</sup>, 在光束的对称化变换以及“奇点光学”中有重要实际应用意义。有关研究结果将另文发表。

## 参 考 文 献

- [1] SIEGMAN A E. Lasers [M]. California University Science Books Mill Valley, 1986. 642~913.
- [2] KIMEL J ELIAS L R. Relations between Hermite and Laguerre Gaussian modes [J]. IEEE J Q E, 1993, 29(9): 2562~2567.
- [3] ABRAMOCHKIN E G, VOLOSTNIKOV V G. Generalized Gaussian beams [J]. J Opt 2004, A6 157~161.
- [4] COLLINS S A. Lens system diffraction integral written in terms matrix optics [J]. JOSA, 1970, 60(9): 1168~1177.
- [5] 王喜庆, 吕百达. 拉盖尔高斯光束的聚集特性 [J]. 激光技术, 1996, 20(3): 185~190.
- [6] 吕百达, 马 虹. 复宗量拉盖尔高斯光束及其特性研究 [J]. 激光技术, 2001, 25(4): 312~316.
- [7] SIEGMAN A E. New development in laser resonators [J]. Proc SPIE, 1990, 1224: 2~20.

科学, 1999, E42(3): 288~293

- [12] 周建忠, 杨继昌, 周 明 et al. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究 [J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1041~1044.
- [13] 肖爱民. 激光冲击强化约束层选择的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2001. 19~21.
- [14] 朱勤勤, 封麟先. 光学透明高分子材料 [J]. 高分子材料科学与工程, 1995, 11(5): 1~6.
- [15] 段志勇, 王声波, 吴鸿兴 et al. 约束材料及靶材表面特征对激光冲击波的影响 [J]. 激光杂志, 2000, 21(2): 19~21.
- [16] 肖爱民, 杨继昌, 张永康 et al. 激光冲击强化约束层的选择研究 [J]. 应用激光, 2001, 21(1): 15~18.
- [17] 张永康, 周 明, 周建忠. 一种激光冲击精密成形方法及装置 [P]. 中国专利: CN01134063.0 2003-11-26.
- [18] 张凌峰, 张永康, 周建忠 et al. 激光冲击能量体转换技术之发展趋势 [A]. 2004江苏博士研究生论坛 [C]. 南京: 东南大学出版社, 2004. 436~439.