

文章编号: 1001-3806(2007)01-0065-03

## 激光冲击用柔性贴膜的研究

张凌峰<sup>1,2</sup>, 张永康<sup>2\*</sup>, 冯爱新<sup>2</sup>, 张雷洪<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471003; 2. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 柔性贴膜作为一种集约束层与吸收层于一体的新手段, 使激光冲击技术有了更好的工程实际应用性。为了解决原技术中约束效果较差的问题, 采用丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶来代替硅胶做约束层。试验结果表明, 二者的约束效果远优于硅胶, 冲击后材料的硬度均达到 33HV 以上, 最大残余压应力均在 60MPa 左右, 接近光学玻璃约束的水平(硬度与残余应力分别约 34HV, 70MPa), 很好地解决了硅胶约束效果较差的问题, 使柔性贴膜技术更趋近于实用化。

**关键词:** 激光技术; 柔性贴膜; 激光冲击; 约束层; 吸收层

**中图分类号:** TG665 TN249 **文献标识码:** A

### Analysis of flexible coating for laser shock processing

ZHANG Ling-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>2</sup>, FENG Ai-xin<sup>2</sup>, ZHANG Lei-hong<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract** The flexible coating is an energy conversion body that consists of confinement layer and absorbing layer, so that laser shock processing(LSP) can be applied in engineering. For the sake of resolving original problem of bad shocking effect the acrylic acid synthetic resin and polyvinyl chloride(PVC) glue were used to replace silicone jelly. The result indicated the materials hardness after laser shocking all exceeded 33HV and maximum residual stress approximately achieved 60MPa which are comparative level with K9 optical glass(hardness and residual stress are 34HV and 70MPa separately). Flexible coating based on macromolecule materials can become the better energy conversion body that make LSP more practical.

**Key words** laser technique; flexible coating; laser shock processing; confinement layer; absorbing layer

### 引 言

激光冲击是近些年来国际上快速发展起来的以材料表面改性和板料成形为主要目的的一种新型加工技术<sup>[1,2]</sup>。随着各国研究的进行, 其基础理论研究已逐渐走向成熟<sup>[3]</sup>, 基本可以满足强化、成型等实际应用的需要, 但事实上迄今为止, 激光冲击真正应用到生产上的例子还是比较少的。除了成本的因素外, 约束层与吸收层技术也是制约激光冲击技术走向实用化的因素之一<sup>[4]</sup>。

目前, 国外普遍使用水作为约束层, 主要考虑到水获得简单, 而且可适用于各种约束界面<sup>[5]</sup>; 国内由于激光技术主要还处于试验阶段, 故大多采用玻璃作为约束层以保证约束效果。但水作为约束层时, 由于等

离子体对水的击穿电离效应, 激光压力持续时间被大幅度减小, 很难保证冲击效果<sup>[6]</sup>; 而玻璃作为约束层有无法解决的实际生产问题, 特别是对激光冲击优势所在, 如微孔、弯角等局部区域、非平面区域无法应用, 且成本很高。

基于江苏大学强激光技术研究所研制的发明专利“一种用于激光冲击处理的柔性贴膜”<sup>[7]</sup>, 作者改进了其配方。该研究成果适用于利用激光冲击波技术对材料表面进行改性或对金属板料进行冷塑性成形, 它原本采用两组不同成分的 GN-521 有机硅凝胶液以及添加剂按一定配方混合, 固化后形成对激光透明的约束层, 再在其上喷涂 86I 型黑漆的能量吸收层, 形成集吸收层和约束层于一体的柔性贴膜。但由于该技术使用了硅胶做约束层, 所以在冲击效果方面不是很理想, 这主要是由于约束层的弹性造成的结果<sup>[8]</sup>。由此问题并结合国外的研究<sup>[9]</sup>, 试验了分别以丙烯酸合成树脂和聚氯乙烯胶作为约束层, 来替代柔性贴膜中的硅胶, 并与 K9 玻璃约束层的冲击效果进行比较。

### 1 试验材料及方法

冲击试件为 3A21 防锈铝合金, 尺寸 40mm ×

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275068); 国家八六三计划资助项目(2002AA336030)

作者简介: 张凌峰(1974), 男, 博士研究生, 从事激光冲击方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lase@uj.edu.cn

收稿日期: 2005-11-08 收到修改稿日期: 2006-05-28

40mm × 0.4mm。使用铝合金是由于其强度较小,利于冲击成形,且冲击效果比较明显。使用的激光机为江苏大学强激光技术研究所的钨玻璃脉冲激光器。

能量吸收涂层为 861 型黑漆涂料,均匀涂覆,涂层厚度约 0.1mm,充分固化后待用;约束层材料分别为丙烯酸合成树脂(粘度: 8000MPa·s ~ 12000MPa·s),聚氯乙烯胶(粘度: 9000MPa·s ~ 10000MPa·s), $\varnothing$ 40mm × 4.5mm K9 光学玻璃。

残余应力分析使用邯郸爱斯特研究所研制的 X-350A 新型 X 射线应力测定仪,硬度在江苏大学材料学院的 HV-1000 显微硬度仪上测量。

试验过程中 3 种约束方式使用同一夹具、相同激光参数(脉冲能量 42J,脉冲宽度 23ns,脉冲功率密度  $\geq 1.2 \times 10^9 \text{W/cm}^2$ ;脉冲能量输出不稳定性  $\leq \pm 5\%$ );显微硬度测量使用同一载荷;残余应力分析在相同方向进行。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微硬度分析

高能激光作用于靶材时,靶面吸收大量激光能量,从而熔融与汽化,形成等离子体,等离子体产生的冲击波压力使金属材料发生弹塑性变形,这一过程必然导致冲击区显微硬度的上升,且硬度的升幅与冲击波的峰值压力有直接的关系。所以比较 3 种约束层冲击后的硬度分布,可以说明前二者相对于 K9 玻璃约束层的约束效果。

图 1a 为激光冲击结束后,对冲击变形区进行硬度测量的取点分布情况,这样可以防止奇点导致数据产生较大偏差,分别以同侧、等径位置所测 3 点显微硬度值取平均作为硬度的径向分布。

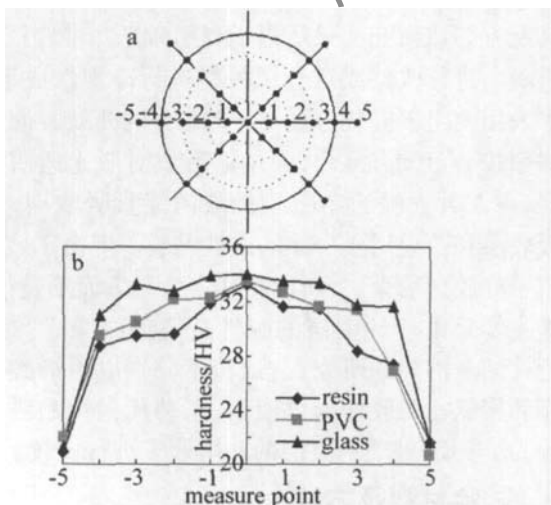


Fig 1 a—the measure point b—the hardness distributing of shocking area

图 1b 为丙烯酸合成树脂、聚氯乙烯胶、K9 光学玻璃分别为约束层的冲击试样显微硬度分布特征,可看

出:丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶为约束层冲击后的试样,冲击区域硬度随变形量的增加有明显的上升,且与玻璃约束层的效果相同,其硬度增幅与玻璃也相差无几。相近的显微硬度升幅说明这 3 种材料作为约束层时,在相同的功率密度下,可得到相差不大的冲击波峰值压力。

### 2.2 残余应力分析

2.2.1 测量方法 试样表面残余应力测量方法采用侧倾固定  $\Psi$  法,交相关法定峰;辐射为  $\text{Co K}\alpha$ ,  $\Psi$  角  $0^\circ \sim 45^\circ$ ,  $2\theta$  角  $170^\circ \sim 158^\circ$ ,  $2\theta$  角扫描步距  $0.10^\circ$ ,计数时间 0.25s, X 光管高压 22.0kV, X 光管电流 6.0mA;准直管直径  $\varnothing 4\text{mm}$ 。

在每个试样变形区的直径方向分别选 7 个点进行测量,如图 2 所示。

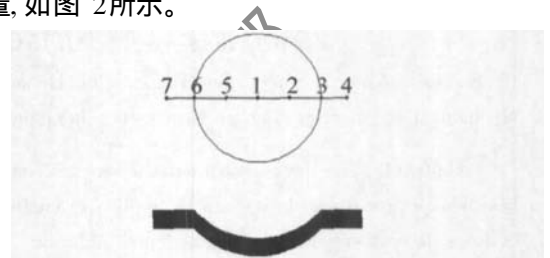


Fig 2 Position of the measure

2.2.2 残余应力结果与分析 表 1 为 3A 21 防锈铝合金分别在丙烯酸合成树脂、聚氯乙烯胶和 K9 玻璃约束层下进行冲击的残余应力分析结果,结合测点分布状况可知,中心点由于变形量最大,所以有最高的残余压应力;冲击区边缘由于夹具的影响,有较大的变形量,所以也有相当高的残余压应力存在。由于激光束是垂直冲击,所以该结果具有对称性,即对整个冲击区而言都有相同的残余应力分布特征。

Table 1 Result of residual stress/MPa

position	crylic acid synthetic resin		PVC		K9 glass	
	error	residual stress	error	residual stress	error	residual stress
1	-58.6	8.6	-61.2	11.5	-68.2	16.4
2	-33.6	15.4	-29.4	10.4	-31.6	5.6
3	-43.1	18.9	-53.9	13.6	-56.3	12.2
4	-6.4	8.7	-8.7	2.4	-2.3	1.7
5	-29.4	13.4	-25.6	18.6	-31.5	16.5
6	-46.7	26.4	-50.2	16.7	-48.8	8.3
7	-10.6	8.6	-7.7	12.3	-6.5	4.3

由以上结果可知:防锈铝在丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶的约束情况下,经冲击后表面可形成最大高于 55MPa 的残余压应力,这与 K9 光学玻璃约束下形成的 60MPa ~ 70MPa 的残余压应力也非常相近。

无论材料硬度还是残余压应力的变化,都与冲击波峰压有直接关系,而影响冲击波峰压的主要因素是激光功率密度以及约束层材料和被冲击材料的声阻抗,所以上述结论可以通过计算 3 种约束层作用下的冲击波峰压来进行分析。

### 2.3 冲击波峰压分析

约束层声阻抗对冲击波峰压的影响并没有人们想象中的那么大,使用 FABBRO 等建立的公式<sup>[10]</sup>可以方便的计算不同材料下的冲击波峰压:  $p[\text{GPa}] = 0.01 \left[ \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{1/2} Z^{1/2} [g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] I_0^{1/2} [\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}]$ , 式中,  $I_0 = 1.2 \text{GW} / \text{cm}^2$ ;  $\alpha$  是由内能转换为热能部分的系数,其特征值  $\alpha = 0.15$   $Z$  为折合声阻抗,  $2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$ ,  $Z_1, Z_2$  分别为约束层与被冲击材料的声阻抗。分别将聚氯乙烯 ( $0.49 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、丙烯酸合成树脂 ( $0.43 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、K9 玻璃 ( $1.14 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷 ( $1.35 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的声阻抗<sup>[11]</sup>代入可得:  $Z_{\text{glass}} = 1.23 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Z_{\text{PVC}} = 0.72 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Z_{\text{resin}} = 0.65 \times 10^6 g \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将上述数据代入,则 3 种约束层作用下的冲击波峰压分别为:  $p_{\text{glass}} = 2.59 \text{GPa}$ ,  $p_{\text{PVC}} = 1.98 \text{GPa}$ ,  $p_{\text{resin}} = 1.88 \text{GPa}$ 。

由此可知,不管是上述任何约束层,产生的冲击波峰压都远远超过材料的屈服强度,且相互之间的差别并不很大,同时由于脉冲的作用时间极短,所以对比较材料的屈服强度而言,产生的冲击波已有足够的能力使材料产生变形与强化行为。

综合分析这几种材料可以发现, K9 玻璃由于具有高的声阻抗,较高的强度,所以具有很好的约束效果;硅胶由于本身的高弹性,所以作为约束层进行激光冲击时,压紧的硅胶膜在高压等离子体作用下没有破裂,而是发生了弹性膨胀呈鼓包状,从而使约束层与试样表面之间的间隙增大,降低了约束层的约束效果<sup>[8]</sup>;丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶固化后的强度虽然比玻璃要小,但其具有很强的粘合作用,能与能量吸收层紧密结合,这样在等离子体膨胀时,由于约束层与吸收层之间的强结合限制了等离子体的横向膨胀,不会出现类似硅胶的泄压现象,其破碎形式也与玻璃类似,同时

这二者均有较高的透光率和声阻抗,所以约束效果要远优于硅胶。

## 3 结 论

(1) 丙烯酸合成树脂、聚氯乙烯胶为约束层的冲击试样显微硬度分布与 K9 光学玻璃约束层冲击试样非常相近,增幅也相差很少。(2) 丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶为约束层冲击后的材料的残余应力分布与 K9 玻璃约束层冲击后的残余应力特征类似,最大残余压应力也比较接近。说明二者具有与光学玻璃相近的约束效果。(3) 丙烯酸合成树脂与聚氯乙烯胶制成的柔性贴膜可限制等离子体的横向膨胀,具有远优于硅胶的约束效果,完全可以替代硅胶成为理想的柔性贴膜材料。

### 参 考 文 献

- [1] CHU J P, RGSBEE J M, BABAS G. Laser shock-processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel [J]. Materials Science and Engineering 1999, A260: 145~ 164
- [2] FAN Y, WANG Sh B, WU H X *et al*. Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy [J]. Laser Technology 2003, 27(4): 273~ 275 (in Chinese).
- [3] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M *et al*. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology 2002, 26(6): 478~ 480 (in Chinese).
- [4] HONG X, WANG Sh B, GOU D H *et al*. Confining medium and absorptive overlay: their effects on a laser induced shock wave [J]. Optics and Lasers in Engineering 1998, 29(6): 447~ 455.
- [5] BERTHE L, FABBRO R, PEYRC P *et al*. Wavelength dependent of laser shock wave generation in the water confinement regime [J]. JA P, 1998, 85(11): 7552~ 7555.
- [6] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P *et al*. Shock waves from a water confined laser generated plasma [J]. JA P, 1997, 82(6): 2826~ 2832.
- [7] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M *et al*. A flexible coating for laser shock processing [P]. Chinese Patent ZL02138338. 3, 2004-06-02 (in Chinese).
- [8] ZHOU J Zh, YANG J Ch, ZHOU M. *et al*. Experimental study on the effect of overlay properties on laser induced shock waves [J]. Chinese Journal of Lasers 2002, 29(11): 1041~ 1044 (in Chinese).
- [9] CLAUSER A H, DULANEY J L, TENAGLIA R D. UV curable overlays for laser peening [P]. U S Patent US2003015508, 2003-06-24.
- [10] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P *et al*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. JA P, 1990, 68(2): 775~ 782.
- [11] ROSE J L. Ultrasonic wave in solid media [M]. Beijing Science Press 2004, 86~ 123 (in Chinese).