

文章编号: 0258-7025(2002)11-1041-04

约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究

周建忠¹, 杨继昌¹, 周 明¹, 张永康¹, 郭大浩², 吴鸿兴²

(¹ 江苏大学机械学院, 江苏 镇江 212013; ² 中国科学技术大学强激光研究所, 安徽 合肥 230026)

提要 用不同的实验方法研究了约束层的厚度和弹性与激光冲击强化效果和变形量的关系, 进而说明约束层本身的刚性对激光诱导冲击波的影响。实验表明, 采用一定厚度的约束层, 既能有效利用激光能量, 又能获得较大的激光冲击波峰压; 一定刚性的约束层比弹性约束层更能有效提高激光冲击波的峰压, 从而能得到更好的激光冲击效果。

关键词 约束层 刚性 激光冲击波

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Experimental Study on the Effects of Overlay Properties on Laser-induced Shock Waves

ZHOU Jian-zhong¹, YANG Ji-chang¹, ZHOU Ming¹,
ZHANG Yong-kang¹, GUO Da-hao², WU Hong-xing²

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013)

(² Laboratory of High Power Laser, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)

Abstract In this paper, the effects of thickness and flexibility of confining medium on laser shock strengthening and laser shock forming have been successfully investigated with different experimental method, and the relationship between the rigidity of confining medium and laser-induced shock wave was demonstrated. The experimental results revealed that an appropriate overlay thickness can not only use laser energy effectively but also provide optimal peak pressure of shock waves. It was also apparent from the experimental results that an appropriate overlay rigidity can increase peak pressure of laser-induced shock wave more effectively than flexible overlay, and attain the better effects of laser shock processing (LSP).

Key words confining medium, rigidity, laser-induced shock wave

激光诱导的高压冲击波已用于惯性约束聚变和激光冲击处理等多种领域, 已有的研究表明, 采用约束层技术能有效提高激光诱导的冲击波峰压, 增宽冲击波的脉宽^[1~6]。R. Fabbro 等在文献[2]中, 定量说明了在约束模式下冲击波峰压与激光功率密度、约束层阻抗等参数之间的关系。目前国内外学者对合适的约束层材料及作用作了较为详细的研究^[5~8], 但对约束层本身的性能, 如刚性等对激光冲击波峰值的影响却研究得很少, 国内尚未见有关的报道。作者用玻璃和硅胶约束层进行了激光冲击

试验, 研究了不同厚度的光学玻璃和具有弹性的有机硅胶约束层对激光冲击(强化)效果的影响。由于冲击效果来源于激光冲击波峰压的大小, 故通过测量激光冲击区的表面变形量和硬度, 来间接比较不同厚度和弹性的约束层对冲击波的影响。结果表明, 与约束层阻抗相比, 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。

1 实验设计

1.1 实验设备

收稿日期: 2001-08-16; 收到修改稿日期: 2001-12-11

基金项目: 江苏省应用基金资助项目(BJ98011), 国家自然科学基金资助项目(50275068)

作者简介: 周建忠(1964—), 男, 江苏无锡人, 江苏大学机械工程学院副教授, 博士, 主要从事激光强化新技术理论及应用研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

实验在中国科技大学强激光研究所的钨玻璃激光器 (Nd:Glass) 上进行, 激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 典型脉冲宽度 (FWHM) 为 20 ns , 输出能量最大为 30 J 。

1.2 实验试样

采用两种不同的实验方案：

(1) 试样采用 2024-T62 铝合金, 尺寸为 $50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。用于不同厚度约束层下激光冲击诱导的塑性变形量分析, 实验装置如图 1 所示, 在固定试件用的基座上有一个通孔, 以利于试件冲击后产生变形。

(2) 试样采用 LD31 锻铝合金, 尺寸为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$, 试样表面用 800 号砂纸抛光, 表面平均粗糙度 $Ra0.85$, 基体平均硬度 $Hv66.1$ 。试件在实验装置上刚性支撑, 基座上无孔。

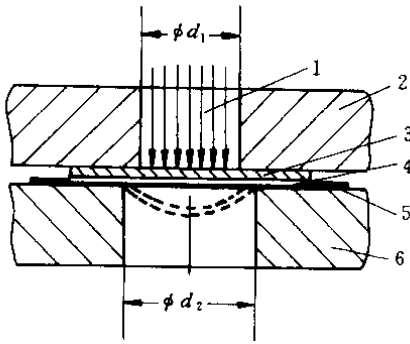


图 1 用于试样变形量测定的实验方案

1 激光束 2 夹板 3 约束层 4 吸收材料 5 试样 6 基座

Fig.1 Experimental set-up for deformation measurement

1 : laser beam ; 2 : clamp plate ; 3 : overlay ;

4 : absorption material ; 5 : specimen ; 6 : support

1.3 约束层

约束层采用 (1) 光学玻璃, 厚度 $0.2 \sim 2.0 \text{ mm}$ (2) 有机硅凝胶, 厚度 $1 \text{ mm}, 1.8 \text{ mm}, 2.2 \text{ mm}$ (3) 有机玻璃薄膜, 厚度 1 mm 。

1.4 测量仪器和指标

测量指标为试样表面冲击区变形量、硬度和硬化层深度。

测量仪器 : HVS-1000 型数字显微硬度计测量冲击区硬度, 负荷为 100 g , 保压时间为 15 s ; Taylor Hobson 表面轮廓仪测量试样表面的粗糙度及变形量。

2 结果与讨论

2.1 2024-T62 铝合金试样的激光冲击变形

试样表面涂黑漆涂层 0.1 mm , 分别用厚度为 $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.8 \text{ mm}$ 的光学玻璃作为约束层, 用图 1 所示的实验装置进行冲击试验, $d_2 = d_1 = \phi 8 \text{ mm}$, 测量试样的变形深度。因在用不同厚度的约束层进行冲击时, 激光能量会有波动, 采用归一化处理激光功率密度为 3.07 GW/cm^2 , 测量结果如图 2。从中可以看出, 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, 最大形变量为 1.6 mm 。但当约束层厚度超过某一值时, 变形量逐渐趋于平稳。图 3 为激光功率密度为 3.12 GW/cm^2 时, 用 1.8 mm 厚的光学玻璃作约束层进行冲击后所测得的试样表面变形的轮廓形状。

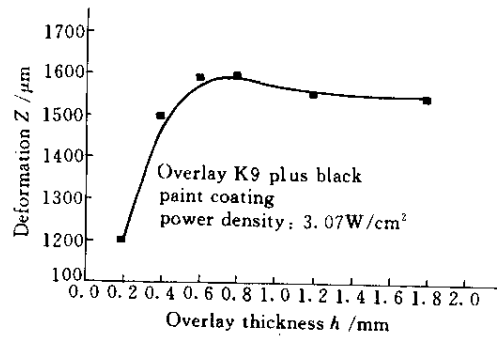


图 2 约束层厚度与表面形变量的关系

(试样 2024-T62, 厚度 0.8 mm)

Fig.2 Overlay thickness versus surface deformation

(specimen 2024-T62, thickness : 0.8 mm)

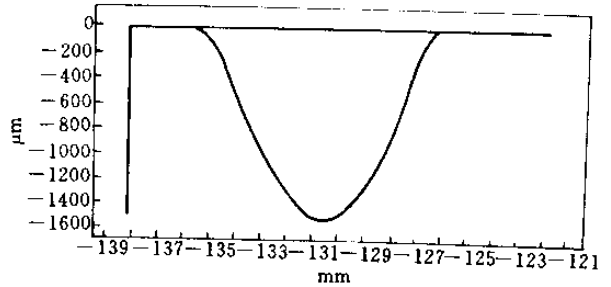


图 3 靶材激光冲击变形后的表面轮廓

(激光功率密度 3.12 GW/cm^2 , 约束层 K9 玻璃厚度 1.8 mm , 试样厚度 0.8 mm)

Fig.3 Cross-section profile of specimen after laser shocking 2024-T62

(laser power density : 3.12 GW/cm^2 , overlay K9 glass thickness : 1.8 mm , specimen thickness : 0.8 mm)

结果表明, 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, 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。因此,采用适当厚度的约束层,可在有效利用激光能量的同时,获得较佳的冲击效果。故在利用激光能量进行动高压加载的实际应用中,需对约束层的厚度进行优化。

2.2 LD31 铝合金试样的冲击强化

试样表面涂黑漆约 0.1 mm,分别用 1.0 mm 厚的有机硅胶、有机玻璃薄膜和 2 mm 厚的 K9 玻璃作为约束层,进行激光冲击后,LD31 试样冲击区的表面硬度和形变量的实测结果如表 1。

可以看出,虽然有机硅胶的冲击波阻抗($0.47 \times 10^6 \text{ g/cm}^2\text{s}$)比有机玻璃的阻抗($0.32 \times 10^6 \text{ g/cm}^2\text{s}$)

大,但试样冲击后的变形量和强化效果都比用有机玻璃约束层的效果差。经分析,除了涂层略有不均匀等因数外,有机硅胶的透光率虽较高(达 94%),但其刚性比有机玻璃差是主要原因。在用硅胶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。为证实约束层的弹性膨胀对冲击效果的影响,我们用 K9 玻璃将有机硅胶压紧在试样上,以增加硅胶的刚性,消除其弹性膨胀的影响。冲击后发现,压紧后的硅胶约束层,其冲击效果比原来显著增加(如表 1)。

表 1 不同约束层时形变量和硬度的测试结果

Table 1 Measuring results of deformation and hardness using different overlay

Overlay material	Laser power density/ $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$	Surface deformation/ μm	Ave. hardness in shock area/Hv
LTV silicone rubber	0.40	6	68
	0.42	7	68.5
PMMA film	0.45	22.5	75.2
	0.40	27.5	73.8
K9 glass	0.45	105	98
	0.48	98.5	89.3
LTV silicone rubber + K9 glass	0.41	18	79
	0.36	17.5	78.5

实验结果表明,约束层材料的弹性对激光冲击强化效果有很大的影响。由于约束层材料的性能不同,导致在激光作用期间约束层与靶材之间的等离子体的体积不同,因而所产生的冲击波峰压也不同。K9 玻璃具有相当高的强度和刚度,其整体的自由膨胀量很小,因而所获得的冲击效果最好。

2.3 约束层破裂

在激光冲击试验中,覆盖在试样表面的玻璃约束层发生了碎裂现象。约束层的破裂不利于冲击波峰压的提高和持续时间的延长,进而影响激光冲击效果。

激光冲击诱导的高压冲击波一部分以强应力波的形式传入靶内,引起材料的塑性变形及显微组织和机械性能的改变;另一部分则传入约束层中,当它传播至约束层的自由表面时,被依次反射为拉伸波。拉伸波在往回传播的过程中与入射波相互作用后,在约束层介质中产生拉应力,当拉应力大于材料的抗拉强度极限时,即在应力集中处产生裂纹和层裂,严重时引起约束层材料的破裂分离。防止约束层材料在冲击过程中发生破裂的方法,一是选取适当的

约束层厚度,使得反射后拉伸波有较大的衰减量,所产生的拉应力达不到约束介质的抗拉强度极限;二是提高约束层材料的抗拉强度。

3 结 论

1) 试样经激光冲击后的变形量随约束层厚度的增加而增加,说明增大约束层厚度能增加激光诱导的冲击波压力。但当约束层厚度达到一定值时,冲击波峰压有趋于饱和的趋势。过厚的约束层,因对激光的吸收和散射,反而会使激光诱导的冲击波峰压降低,从而影响冲击强化效果。在本实验条件下,光学玻璃约束层的最佳厚度在 1.6~2.0 mm。

2) 约束层的弹性对激光冲击强化效果有很大的影响。与约束层阻抗相比,约束层本身的刚度强度对激光诱导的冲击波峰压产生更大的影响。约束层的刚性越好,激光诱导的冲击波压力越大;弹性(柔性)越大,激光诱导的冲击波压力越小,冲击强化效果越差。

3) 如何综合考虑约束层的阻抗、约束层刚性和

力学性能,以及激光参数等相互关系对激光诱导冲击波的影响,从理论上建立较符合实际的冲击波峰压模型有待于进一步深入的研究。

参 考 文 献

1 J. D. O'Keefe, C. H. Skeen. Laser-induced stress-wave and impulse augmentation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(10):464~466

2 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser induced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):755~784

3 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3):1497~1502

4 L. Berth, R. Fabbro, P. Peyre *et al.*. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. *J. Appl.*

Phys., 1997, **82**(6):2826~2832

5 Hong Xin, Shengbo Wang, Dahao Guo *et al.*. Confining medium and absorptive overlay: their effects on a laser-induced shock wave [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, **29**:447~455

6 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Zhou Guanquan. Experimental study of the effects of PMMA confinement on laser-induced shock waves[J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(2):118~122 (in Chinese)

7 Duan Zhiyong, Wang Shengbo, Wu Hongxin *et al.*. Effect of confining material and surface properties of target on laser-induced shock waves[J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2000, **21**(2):19~21 (in Chinese)

8 Xiao Aimin, Yang Jichang, Zhang Yongkang *et al.*. The research of the using and selecting of the confinement medium in laser shock processing[J]. *Applied Laser* (应用激光), 2001, **21**(1):16~18 (in Chinese)



敬 告 作 者

最近,编辑部收到了中国科协学会技术部“关于在学术论文中规范关键词选择的决定(试行)”的通知。现全文刊登如下:

一、发表在中国科协系统学术期刊中所有学术论文,必须在摘要后列出不少于4个关键词。从技术角度考虑,没有关键词的论文应列入非学术论文类。

二、这些关键词按以下顺序选择:

第一个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标 GB/T 13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等,此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文,此处不写被研究的方法名称,而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词中没有出现的,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

三、各期刊编辑部对促进科学技术的发展和学术论文的质量负有重大责任和义务。关键词是学术论文进入流通和引用的窗口,规范关键词选择有利于检索和引用。希望各编辑部提高对此项工作的认识,深入开展编辑业务研究,精益求精,与时俱进,不断提高刊物质量。

四、各全国性学会和地方科协学会部在组织学术会议、学术论文时,请提醒作者参照此项规定执行。

希望广大作者在投稿时,参照通知精神规范选择关键词。

谢谢合作!

《中国激光》编辑部
2002年9月16日