

强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中 诱导冲击波的实验研究*

张永康 于水生 姚兵 王飞 任爱国 裴旭

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

(2009 年 6 月 25 日收到; 2009 年 10 月 12 日收到修改稿)

为了研究强脉冲激光在镁合金中诱导冲击波的衰减, 采用 Nd: Glass 脉冲激光 (1054 nm, 23 ns) 对 AZ31B 变形镁合金试样表面进行冲击, 并利用响应快、测量范围大的 PVDF 压电膜传感器以及示波器实时测量了强脉冲激光在镁合金靶中诱导激光冲击波的相对压力. 根据冲击波每次在靶材背面反射时, 所经过距离的不同得到激光冲击波在镁合金中的衰减规律. 结果表明, 在激光能量为 5J 的强脉冲激光作用下, 镁合金中冲击波衰减的平均速度为 5.83×10^3 m/s, 与镁合金中应力波纵波的传播速度相符; 强脉冲激光诱导冲击波在镁合金中是以指数规律衰减的. 试验所得分析结果对激光冲击强化镁合金的应用具有重要意义.

关键词: 激光, 镁合金, 压电膜传感器, 衰减规律

PACC: 5235T

1. 引 言

镁合金是目前工业应用最轻的金属结构材料之一, 密度仅为 $1.3\text{--}1.9$ g/cm³, 具有比刚度高, 比强度高优点^[1]. 近年来, 镁合金在航空工业、汽车工业的应用日益广泛^[2]. 疲劳是镁合金构件在服役期间的主要失效形式之一, 随着镁合金的应用日益广泛, 如何提高镁合金构件的疲劳强度, 延长其服役寿命, 受到了普遍的关注^[3].

激光冲击处理 (laser shock processing, LSP) 是一种新型的表面强化技术, 利用功率密度 GW/cm^2 量级, 脉宽 ns 量级的强激光束辐照金属表面的吸收层, 在材料表面会产生高温高压的等离子体爆炸现象, 该等离子体受到覆盖在吸收层上面的约束层的约束, 从而产生高强度冲击波, 此冲击波向靶材内部传播, 从而使得材料表层产生塑性应变, 产生很大的残余压应力, 这大大提高金属材料的强度、改善其耐磨性能和抗腐蚀性能, 延长其疲劳寿命^[4].

由于冲击波衰减快, 历时短, 所以在激光冲击处理技术的研究日益增多的过程中并没有得到相应的重视. 近年来, 国内外对空气^[5-7], 水中冲击

波^[8]的传播以及冲击波与等离子体关系^[9, 10]的研究较多, 而对靶材中冲击波的研究仅见对不锈钢、钛合金、铝合金的研究较多^[11-14], 但有关镁合金中强激光冲击波衰减的研究未见报道. 本文利用 PVDF (piezoelectricity of polyvinylidene fluoride) 对 AZ31B 变形镁合金进行了实验研究, 不仅首次得到了镁合金中强激光冲击波的演化波形, 而且根据得到的冲击波压电波形, 分析得到在镁合金靶中强激光诱导冲击波的平均传播速度及衰减规律.

2. 实验方案

试验材料采用 AZ31B 变形镁合金, 试样大小为 $30\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$, 试样表面用 100—800# 金相砂纸逐级打磨、乙醇清洗、冷风吹干后, 在其表面紧密贴合一层约 0.22 mm 厚的铝箔, 冲击波测量实验装置见图 1. 靶材表面依次有吸收层和约束层, 为增强对激光能量的吸收同时保护试样表面不被高能激光灼伤, 采用铝箔作为能量吸收牺牲涂层. 为增强激光在材料表面产生的冲击波压力, 延长冲击波的作用时间^[15], 采用对激光透明的 K9 玻璃做约束层, 玻璃厚 4 mm. 靶材背面通过夹件与 PVDF 紧

* 国家自然科学基金 (批准号: 50735001, 10804037) 资助的课题.
通讯联系人. E-mail: yushuisheng2008@yahoo.com.cn

密贴合, PVDF 下面设有底座, 且底座很厚, 可以吸收透过 PVDF 的冲击波. 将示波器与 PVDF 相连接, 以便于记录 PVDF 所测得的压电波形, 与 PVDF 并联的是一个 25 Ω 的电阻. 实验所采用的是 Nd: Glass 脉冲激光, 激光波长 1054 nm, 脉冲宽度 23 ns, 试验采用的激光光斑直径 7 mm, 脉冲激光能量为 5 J. 示波器为 Agilent DSO 3202A 数字示波器, 所采用 PVDF 压电薄膜为中国科技大学研制.

图 1 冲击波测量实验装置示意图

3. 试验结果及分析

3.1. 冲击波的形成及其在镁合金中传播的平均速度

当强激光脉冲辐照靶材时, 吸收层铝箔吸收激光能量产生气体(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, 瞬间的爆炸产生高压从而形成冲击波. 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, 反射波在约束层 K9 玻璃的限制下, 在约束层和工件之间来回反射, 形成多次反射波. 透射波和多次反射波的综合作用所形成的高压冲击波向靶材内部传播并在靶材前后表面来回反射, 每一次当冲击波传播到靶材后表面时便在 PVDF 压电薄膜上产生一个电压脉冲, 示波器将会记录下这一电压信号. 试验所得强激光驱动冲击波的演化波形如图 2 所示, 横轴代表时间, 每一大格为 100 ns, 纵轴代表电压, 每一大格为 5 V.

从图中可以看出冲击波在镁合金中的衰减是有规律的, 利用一个周期进行研究, 其中最大的峰值是由激光诱导的冲击波形成的, 之后紧跟着的波动为由汽化物在约束层表面压缩形成的多次冲击

图 2 镁合金中激光冲击波图像

波和约束层对冲击波的多次反射波形成的. 而且利用它的周期性也可以得出冲击波在镁合金中传播的平均速度, 如图 2 所示, 电压波形相邻两个脉冲起始点之间的时间间隔 t , 即为冲击波两次相邻传播到靶材后表面的时间间隔. 从图中可以读出时间分别为 239, 242, 240 ns, 取其平均值为 240 ns. 而试样的厚度 d 已知, 为 0.7 mm. 因此根据公式 $v=2d/t$ 可得到冲击波在试样镁合金中的平均传播速度 $v=5.83 \times 10^3$ m/s, 这与应力波中纵波在镁合金中的传播速度 5.77×10^3 m/s 相符^[16].

3.2. 强激光诱导冲击波峰压在镁合金中的衰减

3.2.1. 靶材表面冲击波峰压的计算

对于强激光冲击靶材所产生的冲击波压力的估算, 许多学者已进行了较为深入的研究^[17], 针对为提高激光冲击波峰压而广泛采用的约束模式, Fabbro 等人对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算^[18]

$$P = 0.01 \frac{Z}{2 + 3} I_0, \quad (1)$$

其中, α 为内能转化为热能的系数, $\alpha=0.1$; I_0 为入射激光功率密度, $I_0 = 1.1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; Z ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 为靶材与约束层的合成冲击波声阻抗, 定义为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{target}}} + \frac{1}{Z_{\text{K9glass}}}, \quad (2)$$

对靶材镁合金和约束层 K9 玻璃, 其声阻抗分别为

$$Z_{\text{target}} = 1 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$Z_{\text{K9glass}} = 1.14 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3)$$

联立(1) — (3) 式, 代入试验数据, 可计算出 $P = 1.92 \times 10^7$ Pa.

3.2.2. 冲击波峰压的试验数据处理

PVDF 压电传感器测量范围大(0—20 GPa)、频

响高 (ns 量级)、动态定标简单方便,是超高压测量的理想传感器^[19].在 t 时刻, PVDF 测得的压电信号 $V(t)$ 与 PVDF 薄膜表面上的冲击压力 $P(t)$ 之间,在 $P \in [0, 3 \times 10^8 \text{ Pa}]$ 的范围内满足以下关系^[20]:

$$P(t) = \frac{K}{A_0 R} \int V(t) dt \quad (4)$$

其中, K 为动态标定系数,取值范围为 $(6.6 \pm 0.3) \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{C}$, 计算时取值为 $6.6 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{C}$, A 为 PVDF 的激活面积(经靶材传输后光斑直径约为 7 mm), R 是与 PVDF 并联的电阻(25 Ω). 通过以上关系,可以将用示波器所得到的电压波形转化成为冲击波的压力波形,所得到的压力即为实测的冲击波相对压力.

由于冲击波在镁合金靶中来回反射,其前表面与空气接触,而空气的声阻抗比镁合金的声阻抗小 5 个数量级,因此可视为自由端反射,反射后压强大小不变.而靶材后表面与 PVDF 薄膜接触,有部分冲击波透射入 PVDF 中,而底座将会吸收透射入 PVDF 中的冲击波.又因为底座厚度很大,冲击波在其中反射的时间较靶材中冲击波的衰减相比要长得多,所以不会影响实验的测量.但针对透射入 PVDF 内的冲击波,需要对得到的实测冲击波压力进行透射补偿.对第 n 次在镁合金靶材后表面反射时的冲击波实际峰值

除以 $F^n = \frac{Z_{\text{Mg}} - Z_{\text{PVDF}}}{Z_{\text{Mg}} + Z_{\text{PVDF}}}$ 则可得到无透射损失峰压^[10],其中 $Z_{\text{Mg}} = 1 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_{\text{PVDF}} = 0.25 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可得 $F = 0.6$.将所得的冲击波的峰值经过上述计算,可得到无透射损失峰压.

如前所述,冲击波在靶材前后表面不断反射,因此可根据冲击波每次在靶材后表面反射时,所经过的不同距离来得到冲击波峰压的衰减规律.现将经过转换后的冲击波峰压值列于表 1.

表 1 激光冲击波在 0.7 mm 镁合金中各次反射后的峰压

厚度/mm	0.7	2.1	3.5	4.9	6.3
相对峰压 / 10^7 Pa	1.80	0.90	0.50	0.28	0.14
无透射损失峰压 / 10^7 Pa	1.80	1.52	1.40	1.25	1.08

采用指数衰减拟合,可得到激光冲击波峰值在镁合金中的衰减规律为

$$P_{\text{max}} = 1.86e^{-0.08x} \quad (5)$$

其中, P_{max} 为冲击波的峰值压力 (10^7 Pa), x 为冲击波传播的距离 (mm). 由 (5) 式可以得到峰值压力的最大值为 $1.86 \times 10^7 \text{ Pa}$, 可知,由实验所得到的冲击波的峰值压力与估算值接近.

镁合金中激光冲击的峰值压力的衰减如图 3 所示. 由图可以看出,实验数据所拟合出的衰减规律为指数型的,这说明冲击波峰压的减小率与传播距离的增加成线性关系,进而表明镁合金内部的均一性较好,对冲击波衰减比较均匀.也可以得出,较之铝合金,钛合金等的衰减曲线,镁合金的衰减较慢,这是由于镁合金的声阻抗较少的原因.

图 3 镁合金中冲击波峰压的衰减规律

4. 结 论

本文利用 PVDF 压电传感器首次得到了 AZ31B 变形镁合金中强激光诱导冲击波的演化波形,并计算得出其平均传播速度 $v = 5.83 \times 10^3 \text{ m/s}$, 与应力波中纵波在镁合金中的传播速度 $5.77 \times 10^3 \text{ m/s}$ 相符.通过对试验数据的分析处理,得出冲击波峰值的衰减规律为指数衰减形式,这对于镁合金的激光冲击强化处理具有重要意义.

[1] Zhang J, Zhang Z H 2004 *Magnesium Alloys and the Application* (Beijing: Chemical Industry Press) p1 (in Chinese) [张津、章宗和 2004 镁合金及应用(北京:化学工业出版社)第 1 页]

[2] Tharumarajah A, Koltun P 2007 *Journal of Cleaner Production*

15 1007

[3] Zhang Y K, Chen J F, Xu R J 2008 *Chinese Journal of Lasers* **35** 1068 (in Chinese) [张永康、陈菊芳、许仁军 2008 中国激光 **35** 1068]

[4] Clauer A H, Lahman D F 2001 *Key Engineering Materials* **197**

- 121
- [5] Bian B M, Yang L, Chen X, Ni X W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 809 (in Chinese) [卞保民、杨玲、陈笑、倪晓武 2002 物理学报 **51** 809]
- [6] Zhang Y, Li Y T, Zheng Z Y, Liu F, Zhong J Y, Lin X X, Liu F, Lu X, Zhang J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3728
- [7] Zhao R, Liang Z C, Han B, Zhang H C, Xu R Q, Lu J, Ni X W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1877
- [8] Bian B M, Chen X, Xia M, Yang L, Shen Z H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 508 (in Chinese) [卞保民、陈笑、夏铭、杨玲、沈中华 2004 物理学报 **53** 508]
- [9] He M Q, Dong Q L, Sheng Z M, Weng S M, Chen M, Wu H C, Zhang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 363 (in Chinese) [何民卿、董全力、盛政明、翁苏明、陈民、武慧春、张杰 2009 物理学报 **58** 363]
- [10] Qiu X M, Tang D L, Sun A P, Liu W D, Zeng X J 2007 *Chin. Phys.* **16** 186
- [11] Liu L, Wang S B, Wu H X, Guo D H, Liao P Y 2007 *Laser Technology* **31** 134 (in Chinese) [刘丽、王声波、吴鸿兴、郭大浩、廖培育 2007 激光技术 **31** 134]
- [12] Liao P Y, Wang S B, Sheng J J, Liu L, Xia X P 2007 *Appl. Laser* **27** 110 (in Chinese) [廖培育、王声波、盛晶晶、刘丽、夏小平 2007 应用激光 **27** 110]
- [13] Deng Q L, Wang Y, Hu D J, Zhang Y K, Yu C Y 2004 *Key Engineering Materials* **274-276** 889
- [14] Morales M, Porro J A, Blasco M, Molpeceres C, Ocana J L 2009 *Applied Surface Science* **255** 5181
- [15] Gu Y Y, Zhang Y K, Zhang X Q, Shi J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5885 (in Chinese) [顾永玉、张永康、张兴权、史建国 2006 物理学报 **55** 5885]
- [16] Ma D Y, Shen H 2004 *Acoustic Handbook* (Beijing: Science Press) p173 (in Chinese) [马大猷、沈壕 2004 声学手册 (北京: 科学出版社) 第 173 页]
- [17] Thord T, Franz J K, Aravinda K 2003 *Optics and lasers in engineering* **39** 51
- [18] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, Devaux D, Virmont J 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 775
- [19] Peyre P, Berthe L, Fabbro R, Sollier A 2000 *J. Phys. D* **33** 498
- [20] Romain J P, Bauer F, Zagouri D, Boustie M 1994 *High-pressure Science and Technology -1993* (New York: American Institute of Physics) p1915

Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy^{*}

Zhang Yong-Kang Yu Shui-Sheng Yao Hong-Bing Wang Fei Ren Ai-Guo Pei Xu

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

(Received 5 June 2009; revised manuscript received 12 October 2009)

Abstract

In order to study the attenuation of shock waves induced by a high-power pulsed laser in magnesium alloy, an AZ31B magnesium alloy sample is processed with an Nd: Glass laser with a wavelength of 1054 nm and pulse width of 23 ns, and the relative pressures of the shock waves are measured on time by a polyvinylidene fluoride (PVDF) gauge with a short rise time and a wide linear response range, combined together with an oscilloscope. The law of attenuation of laser shock wave is obtained by measuring the intensity pressures on the rear surface of the target for different thicknesses through which the shock waves pass each time. The experimental results show that the average velocity of the shock wave attenuation in magnesium alloy is 5.83×10^3 m/s with using a laser pulsed energy of 5 J is in good agreement with the propagation velocity of stress longitudinal wave; the law of the shock wave attenuation is exponential. The experimental result can be very useful for the laser shock processing on magnesium alloy.

Keywords: laser, magnesium alloy, PVDF, the law of attenuation

PACC: 5235T

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50735001, 10804037).

Corresponding author. E-mail: yushuisheng2008@yahoo.com.cn