

文章编号: 0258-7025(2010)05-1386-05

作用参数对镁合金中强激光诱导冲击波的影响

于水生 姚红兵 王 飞 袁 蓓 张永康

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了研究约束层和激光功率密度对激光冲击强化 AZ31B 镁合金所诱发的冲击波的影响, 采用响应快、频响高的绝缘膜组合式高聚物压电传感器和数字示波器对强激光诱发的冲击波进行测量。利用测得的有约束层和无约束层时的压电波形, 分别得到相应的冲击波压力波形并进行比较; 同时将不同激光功率密度下得到的压电波形转化为冲击波压力波形并进行对比。研究表明, 在有约束层的情况下冲击波峰值压力是无约束层时的 8 倍左右, 且脉冲的持续时间也有显著提高; 在约束层的绝缘击穿阈值范围内, 随着入射激光功率密度的增加, 冲击波的峰值压力也随之增大。

关键词 激光技术; 激光冲击波; 聚偏氟乙烯; 镁合金

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1386

Influence of Interaction Parameters on High Power Laser Induced Shockwave in Magnesium Alloy

Yu Shuisheng Yao Hongbing Wang Fei Yuan Bei Zhang Yongkang

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

Abstract In order to study the effect of overlay and laser power density on shockwave in laser shock processing to AZ31B magnesium alloy, the laser induced shockwave was measured by a polyvinylidene fluoride (PVDF) gauge with short rise time and high response frequency and a digital oscillograph. Based on the piezoelectric waves measured in the overlay geometry and direct ablation regime, pressure waves were obtained and compared; the pressure waves acquired in different laser power density conditions were also compared and analyzed. The research results show that the peak pressure of laser shockwave in the overlay geometry is about as eight times as it is in the direct ablation regime, and the duration time of the pulse is extended obviously. Below the dielectric breakdown threshold of the overlay, the peak pressure of laser shockwave is improved with the increase of the laser power density.

Key words laser technique; laser induced shockwave; polyvinylidene fluoride; magnesium alloy

1 引 言

镁合金是最轻的金属结构材料之一, 在航空航天、汽车制造以及电子等领域具有广阔的应用前景, 被誉为“21 世纪绿色工程材料”^[1,2]。疲劳是镁合金构件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^[3,4]。激光冲击处理(LSP)技术是利用功率密度为吉瓦每平方米量级, 脉冲

宽度为纳秒量级的强激光束辐照材料表面产生的冲击波来提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀性能, 特别是能有效改善金属材料的抗疲劳断裂性能^[5,6]。但是随着激光冲击处理技术研究的日益增多^[7~11], 冲击波由于衰减快、历时短的特点, 没有得到相应的重视。

聚偏氟乙烯(PVDF)压电传感器因其测量范围大(0~20 GPa)、频响高(纳秒量级)、动态定标简单

收稿日期: 2009-09-28; 收到修改稿日期: 2009-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(50735001, 10804037)资助课题。

作者简介: 于水生(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光脉冲诱导产生冲击波方面的研究。

E-mail: yushuisheng1018@163.com

导师简介: 张永康(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造与检测技术方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

方便,而成为超高压测量的理想传感器^[12]。近年来,人们利用 PVDF 压电传感器对铝合金、钛合金中的冲击波进行了研究^[13~15],但对于镁合金中强激光诱发的冲击波的相关研究尚未见报道。本文利用 PVDF 对强激光冲击 AZ31B 镁合金进行了实验研究,得到了镁合金中激光冲击波的演化波形,而且通过改变实验参数和比较冲击波相对压力波形较为直观地讨论了约束层、激光功率密度对冲击效果的影响。

2 实验方案及原理

实验所采用的是钕玻璃脉冲激光,波长 1054 nm,脉冲宽度 23 ns。激光束经过透镜聚集后照射在吸收层表面,光斑直径 5 mm。当吸收层吸收激光能量产生等离子体爆炸时,产生的冲击波向 AZ31B 镁合金试样(30 mm×20 mm×0.7 mm)内

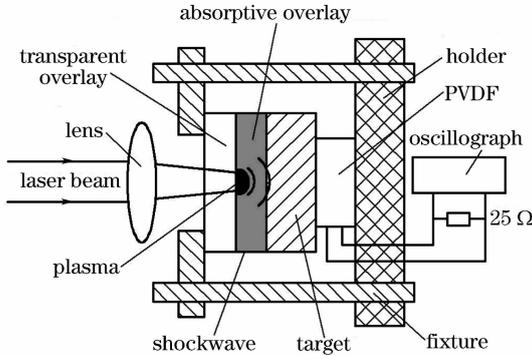


图 1 冲击波测量实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock processing

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其紧密贴合的 PVDF 压电薄膜上产生一个电压脉冲,数字示波器将会记录下这一电压信号。如图 1 所示,靶材与 PVDF 是通过夹件紧密贴合在一起的,且 PVDF 下设有较厚底座,可吸收透过 PVDF 的冲击波。

实验中所采用的 PVDF,膜厚 50 μm,测量时两级并联一个 25 Ω 的电阻 R 。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 $P \in [0, 3 \times 10^8]$ Pa 的范围内满足关系^[16]

$$P(t) = \frac{K}{A} \int_0^t \frac{V(t)}{R} dt, \quad (1)$$

式中 K 为动态标定系数,取值范围为 $6.3 \times 10^8 \sim 6.9 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{C}$,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(光斑直径为 5 mm)。通过(1)式可将测得的压电波形转化为压力波形进行分析。

3 实验结果及分析

3.1 约束层对冲击波的影响

实验采用的脉冲激光能量为 5 J,为了防止吸收层厚度对实验的影响,选用等厚度的铝箔为吸收层,在有约束层(K9 玻璃)和无约束层的情况下分别对试样进行单次冲击。示波器所得压电波形如图 2 所示,图 2(a)为 K9 玻璃做约束层时的压电波形,图 2(b)为无约束层时的压电波形。

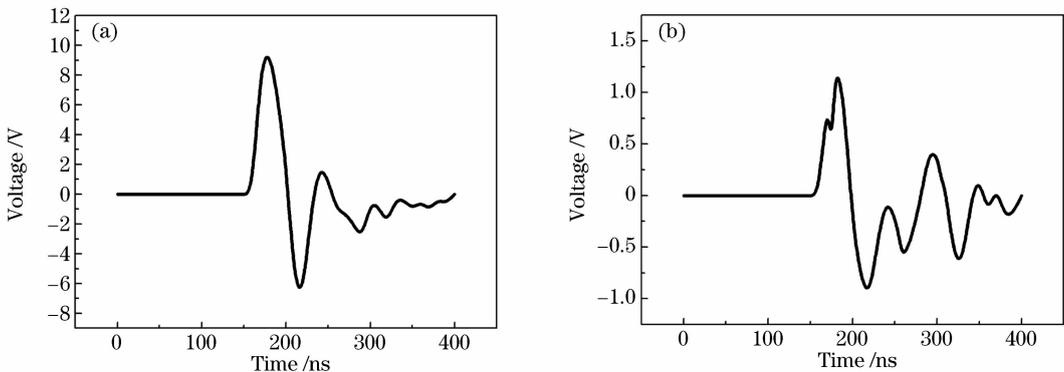


图 2 激光能量为 5 J 时,有约束层(a)和无约束层(b)时的冲击波压电波形

Fig. 2 Piezoelectric waves of shockwave with 5 J, with overlay (a) and without overlay (b)

对图 2 压电波形进行积分得到冲击波相对压力波形,图 3(a)为在 K9 玻璃做约束层的情况下冲击波的相对压力波形,图 3(b)为无约束层的情况下冲击波的相对压力波形。由图 3 可知,在有约束层的情况下冲击波峰值压力是无约束层时冲击波峰值压力的 8 倍左右,与此同时脉冲的持续时间也有显著

提高。这是因为,当激光照射到吸收层上时,吸收层吸收激光能量使其表面材料产生气化和等离子体形成气化区,并同时在吸收层表面形成各向传播的冲击波。在约束模式下,一方面由于约束层的限制作用使得冲击波不能向空气中自由扩散,而且 K9 玻璃属于声阻抗较大的刚性约束层,可以较长时间

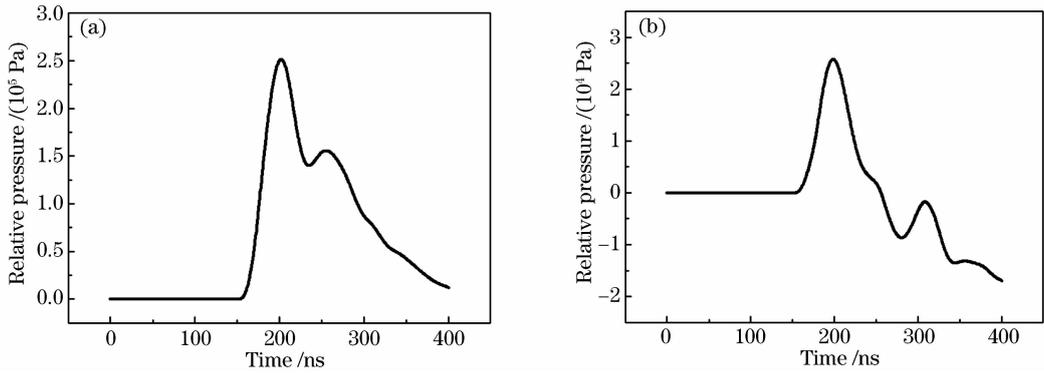


图3 激光能量为5 J时,有约束层(a)和无约束层(b)时的冲击波相对压力曲线

Fig. 3 Relative pressure waves of shockwave with 5 J, with overlay (a) and without overlay (b)

维持高压气团的初始状态,使得等离子体与靶材充分作用;另一方面,部分冲击波被靶材前表面反射回来形成反射波,约束层对这些反射波进行反复约束,使其向靶材内部传播形成应力波。因此约束层不仅能够提高冲击波的峰值压力,使其甚至可以达到吉帕量级,而且有效地延长了脉冲的持续时间^[17,18]。传播到靶材中的冲击波,当其峰值压力超过材料的动态屈服强度时,材料便发生塑性变形并在表面形成残余压应力,提高材料的抗疲劳性能。因此冲击波的峰值压力和脉冲的持续时间是影响冲击强化效果的两个重要因素,所以在约束模式下,会在材料表面层产生更高的残余压应力,冲击强化的效果也会更加明显。

3.2 激光功率密度对冲击波的影响

实验中改变入射脉冲激光能量,设为5 J和8 J,分别对试样进行单次冲击,同样选用等厚度的铝箔作吸收层,K9玻璃作约束层。根据激光功率密度与入射激光能量之间的关系

$$E = \frac{\pi d^2}{4} \tau I, \quad (2)$$

可以得到在不同的入射脉冲激光能量下的激光功率密度,式中 E 为入射脉冲激光能量, $d = 5 \text{ mm}$ 为光斑直径, $\tau = 23 \text{ ns}$ 为脉宽, I 为激光功率密度。当入射激光能量分别为5 J和8 J时,计算得到激光功率密度分别为 1.11 GW/cm^2 , 1.77 GW/cm^2 。

当有约束层,入射脉冲激光能量为5 J时,冲击波压电波形以及相对压力波形已讨论;当入射脉冲激光能量为8 J时,压电波形如图4(a)所示,运用(1)式对图4(a)的压电波形进行积分得到冲击波相对压力波形如图4(b)所示。对比两种不同激光功率密度下的冲击波相对压力曲线[图3(a)和图4(b)],可以得出,在一定范围内,随着激光功率密度的增加,镁合金中冲击波的峰值压力也随着增大,这意味着靶材表面会产生更大的残余压应力,对镁合金的抗疲劳性能也会有更好的改善。

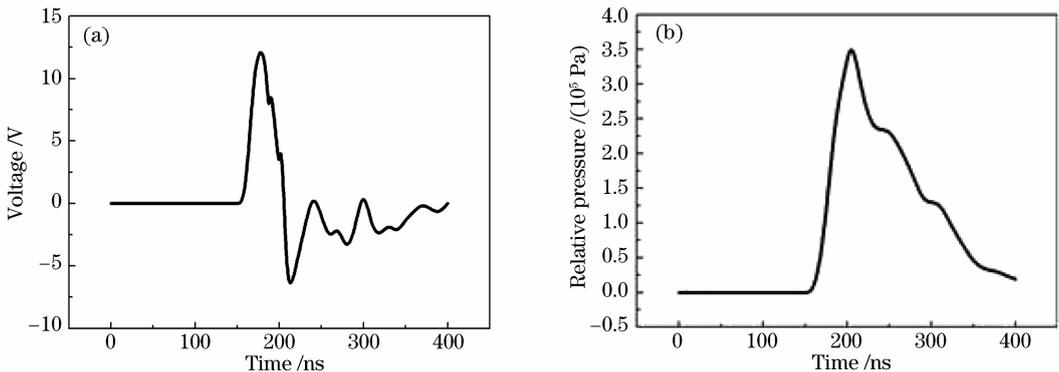


图4 激光能量8 J时,有约束层时的冲击波压电波形(a)和相对冲击波压力曲线(b)

Fig. 4 Piezoelectric waves (a) and relative pressure waves (b) of shockwave with overlay when laser energy is 8 J

为了进一步研究激光功率密度对激光冲击效果的影响,将激光能量设为10 J和15 J分别进行实验,利用(2)式可得激光功率密度分别为

2.22 GW/cm^2 , 3.32 GW/cm^2 。将PVDF所测得的压电波形利用(1)式进行积分得到压力波形后,比较激光能量为5,8,10,15 J时的冲击波峰压,得到激光

功率密度对冲击波峰压的影响,如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着激光功率密度的增大,冲击波峰压也随之增大,但是增加的幅度越来越小。在实验过程中,当用 20 J 的较大能量对靶材进行冲击时,冲击波幅值虽然有很大提高,但其变化趋势呈现出不规律性,这表明当入射激光能量较大时,激光与靶材的作用较为复杂,还有待进一步研究。同时美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)利用钽玻璃激光器进行了大量的实验研究^[19],证明当激光功率密度超过一定范围时,冲击波峰值压力将会达到饱和,甚至有可能下降。这是因为当激光功率密度继续增加,达到约束层的击穿阈值时,会将约束层绝缘击穿,这种绝缘击穿使约束层中产生等离子体,并导致等离子体的电离雪崩^[20]。由于此过程吸收激光能量,使得到达吸收层的激光能量减少,限制了冲击波峰压的继续增加。因此,激光功率密度并不是越大越好,而是有一个选择的范围。

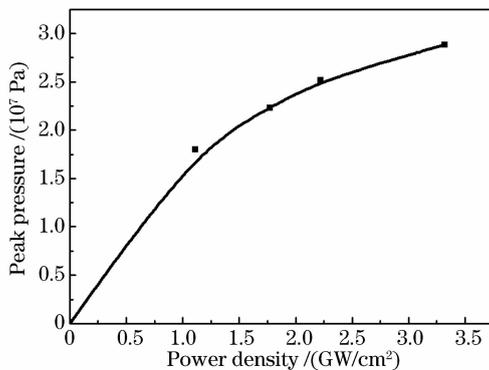


图 5 激光功率密度对冲击波峰压的影响

Fig. 5 Peak pressures as a function of laser power density

4 结 论

采用钽玻璃脉冲激光对 AZ31B 镁合金进行冲击强化,利用 PVDF 压电传感器对靶材中的冲击波进行检测,不仅得到了 AZ31B 镁合金中强激光诱导冲击波的演化波形,而且通过对比实验结果得到了约束层、激光功率密度对激光诱发冲击波的影响。实验证明,在有约束层的情况下冲击波峰值压力是无约束层时冲击波峰值压力的 8 倍左右,而且脉冲的持续时间也有显著提高;在一定范围内,随着激光功率密度的增加,冲击波的峰值压力也随之大大增加。这对激光冲击强化技术在镁合金领域的应用有一定的参考价值。

参 考 文 献

- Zhang Jin, Zhang Zonghe. Magnesium Alloys and the Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 283~307
张津,章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 283~307
- Barrallier L. Kouadria. Texture characterisation of hexagonal metals: magnesium AZ91 alloy welded by laser processing [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, **A429**(1):11~17
- Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1068~1072
张永康,陈菊芳,许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. 中国激光, 2008, **35**(7):1068~1072
- Xu Renjun, Zhang Yongkang, Chen Jufang. Microstructure change of AZ91 magnesium alloy surface melted by laser [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5):487~489
许仁军,张永康,陈菊芳. AZ91 镁合金激光表面熔凝处理的微观组织变化[J]. 激光技术, 2008, **32**(5):487~489
- Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):371~373
邹世坤,谭永生,郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. 中国激光, 2004, **31**(3):371~373
- P. Peyer, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1213~1229
- Xie Songjing, Zhang Wei. Study of develop trend and effects on laser shocking processing [J]. *New Technology & New Process*, 2006, (10):36~39
谢颂京,张伟. 激光冲击效果的影响因素及其发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2006, (10):36~39
- Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):316~320
曹子文,邹世坤,刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. 中国激光, 2008, **35**(2):316~320
- Shali Xiao, Hongjian Wang, Jun Shi *et al.*. High resolution X-ray spherically bent crystal spectrometer for laser-produced plasma diagnostics [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1):92~94
- Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6):24~32
王东生,田宗军,沈理达等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6):24~32
- Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):931~936
陈瑞芳,郭乃国,花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2008, **35**(6):931~936
- Zhao Hongping, Ye Lin, Lu Zhongqi. Application of PVDF gauge to stress wave measurement [J]. *Mechanics and Engineering*, 2004, **26**(1):37~41
赵红平,叶琳,陆中琪. PVDF 压电薄膜在应力波测量中的应用[J]. 力学与实践, 2004, **26**(1):37~41
- Liu Shiwei, Guo Dahao, Wang Shengbo *et al.*. Effects of experimental parameters on LSP [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10):937~940
刘世伟,郭大浩,王声波等. 实验参数对激光冲击强化效果的影响[J]. 中国激光, 2000, **A27**(10):937~940
- Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10):

- 1352~1356
吴 边,王声波,郭大浩 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究 [J]. 光学学报, 2005, **25**(10):1352~1356
- 15 Liao Peiyu, Wang Shengbo, Sheng Jingjing *et al.*. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in Ti alloy target [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(2): 110~112
廖培育,王声波,盛晶晶 等. 实验研究脉冲强激光在钛合金靶中诱导的冲击波[J]. 应用激光, 2007, **27**(2):110~112
- 16 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Property of laser-induced shockwave with confinement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8):981~984
王声波,范 勇,吴鸿兴 等. 约束结构下激光冲击波特性实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8):981~984
- 17 Zhou Jianzhong, Yang Jichang, Zhou Ming *et al.*. Experimental study on the effects of overlay properties on laser-induced shock waves [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1041~1044
周建忠,杨继昌,周 明 等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(11):1041~1044
- 18 Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photo mechanics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11):5885~5890
顾永玉,张永康,张兴权 等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(11):5885~5890
- 19 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, :1021~1036
- 20 Han Jinghua, Feng Guoying, Yang Liming *et al.*. Study on cut-off laser pulse of laser-induced dielectric breakdown [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1547~1551
韩敬华,冯国英,杨李茗 等. 激光诱导介质击穿中的脉冲截断问题[J]. 光学学报, 2008, **28**(8):1547~1551