

文章编号: 1001-3806(2010)05-0694-03

激光冲击强化的冲击波幅值和飞行时间的测量

王飞, 姚红兵, 袁蓓, 于水生, 张永康
(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究不同激光功率密度下空气中冲击波幅值和飞行时间分别与工件中冲击波幅值和残余压应力的变化关系, 采用工件为 45# 钢、铝箔为吸收层、水为约束层、声发射传感器和聚偏氟乙烯压电膜传感器同时对空气和工件中的激光诱导等离子体冲击波进行测量。结果表明, 随激光功率密度的增加, 空气中冲击波飞行时间非线性的减少, 空气和工件内冲击波幅值非线性的增加, 工件中残余压应力值接近饱和。进行多项式拟合, 获得了空气中冲击波幅值与工件内冲击波幅值、空气中冲击波飞行时间与工件内残余压应力的经验公式, 为激光冲击强化质量评估提供一定的理论参考。

关键词: 激光技术; 激光冲击强化; 质量评估; 冲击波; 幅值; 飞行时间

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.032

Measurement of the amplitude and time-of-flight of the shock wave in laser shock processing

WANG Fei, YAO Hong-bing, YUAN Bei, YU Shui-sheng, ZHANG Yong-kang
(School of Mechanic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study the relationship between the amplitude of the shock wave in air and the amplitude of the shock wave in the workpiece, and the relationship between time-of-flight of the shock wave in air and the compressive residual stress in the workpiece respectively, the acoustic emission sensor and the polyvinylidene fluoride piezoelectricity gauge were used to detect laser induced plasma shock wave in air and the workpiece. In the experiment, the workpiece is 45# steel, the absorption layer is Al foil, and the confinement layer is fluid overlays. The results show that with laser intensities increases, time-of-flight of the shock wave in air decreases nonlinearly, and the amplitude of the shock wave in air and workpiece increases nonlinearly, and the compressive residual stress closes to saturation. Finally, the empirical formulas for the amplitude of the shock wave in air and the amplitude in the workpiece, and for time of flight of the shock wave in air and the compressive residual stress in the workpiece were established respectively, which could provide theoretical reference for quality assurance of laser shock processing.

Key words: laser technique; laser shock processing; quality assurance; shock wave; amplitude; time of flight

引言

激光作为一种加工工具, 有如下广泛的应用: 激光焊接, 激光切割, 激光熔覆, 激光清洗, 激光冲击强化等。这些技术, 如激光焊接, 在使用时分别从等离子体的声信号、光信号、电信号^[1-3]对加工进行监测, 控制加工的进程, 并判断加工的效果。

对激光冲击强化技术的监测及加工质量的评估, 从操作规模上可以分为多点式和单点式。多点式, 即对多个激光冲击强化点进行质量评估, 如 Almen 测试计法^[4], 它适用的情况是工件在多次激光冲击强化后

发生了宏观变形, 利用工件在处理后的宏观变形量来反应强化的效果, 这种方法的缺点是工件在冲击强化后必须产生可以测量的宏观变形量。单点式, 即对单个激光冲击强化点进行质量评估, 国内研究较多的是聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 压电薄膜法^[5]和 X 射线衍射法^[6], 在国外专利中还出现了对冲击点进行容积分析^[7]、对等离子体进行监测^[8]、对激光冲击强化进行超声分析^[9]和空气中冲击波飞行时间的探测^[10]等。

本文中对空气中冲击波测量的方法来源于专利^[10], 并进行了如下改进: (1) 专利中没有说明如何记录激光器发射激光的时间, 这里使用了分光镜加光电二极管的组合; (2) 专利中使用的 airborne 传感器谐振频率是 20kHz, 工作时容易受到周围环境的干扰, 这里使用了谐振频率为 150kHz 的声发射传感器; (3) 增加了空气中冲击波幅值参考量, 并与工件中冲击波幅值

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50735001)

作者简介: 王飞 (1986-), 男, 硕士, 主要从事激光脉冲诱导冲击波的研究。

E-mail: urrayu@163.com

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-09

结合,使测量结果更为可信。

对空气中冲击波测量的同时,使用 PVDF 压电膜传感器对工件内的冲击波进行了测量。在约束层模式下,采用不同激光功率密度对工件进行冲击强化,研究了不同激光功率密度下空气和工件中冲击波的变化规律,最后使用 X 射线衍射法对工件内残余压应力进行了测量,建立了空气中冲击波幅值与工件内冲击波幅值、飞行时间与残余压应力的经验公式,对激光冲击强化的实际应用具有一定的指导作用。

1 实验装置

图 1 是激光诱导冲击波检测装置示意图。实验中

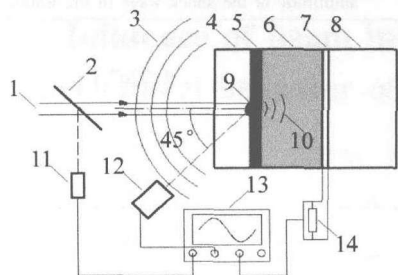


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup composed of laser induced plasma shock wave detection, 1—laser beam; 2—beam splitter; 3—shock wave propagating in air; 4—confinement layer; 5—absorption layer; 6—workpiece; 7—PVDF piezoelectric gauge; 8—base; 9—plasma; 10—shock wave propagating in the workpiece; 11—photodiode; 12—acoustic emission sensor; 13—oscilloscope; 14—resistance

采用的是 Nd:glass 脉冲激光器,输出能量 5J ~ 15J,波长 1054nm,脉冲宽度为 23ns,激光光斑直径为 7mm。工件材料采用 45#钢,厚度为 5mm,直径为 30mm,表面用 100# ~ 800# 金相砂纸逐级打磨、乙醇清洗、冷风吹干后,在其表面贴合一层约 0.22mm 厚的铝箔作为吸收层,厚度约 1mm 的水层作为约束层。实验检测装置如图 1 所示,声发射传感器谐振频率为 150kHz,距离冲击点的距离是 5cm, PVDF 压电膜传感器有效面积 1.2cm × 3cm,厚度为 50μm,示波器模拟频率带宽为 1GHz。

在铝箔为吸收层、水为约束层的模式下,以不同功

率密度激光束对 45# 钢工件进行冲击强化。使用声发射传感器和 PVDF 压电膜传感器对不同入射激光能量下空气和工件中的冲击波进行了测量,最后使用 X 射线衍射法对工件内的残余应力进行了测量。

2 实验结果与讨论

2.1 空气中冲击波的飞行时间与工件中的残余压应力

在水约束层模式下,由声发射传感器测量的空气中冲击波典型信号如图 2 所示。空气中冲击波飞行时

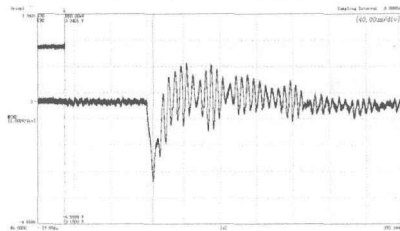


Fig.2 The signal of laser induced plasma shock wave collected by the acoustic emission sensor in air

间的计时起始点在图 2 中第 1 条竖虚线所在位置,即光电二极管电流上升处,说明此刻激光器发射激光束;由于不同激光功率密度冲击时,声发射传感器所测信号的峰值明显,冲击波飞行时间计时的结束点选在图 2 中第 2 条竖虚线所在位置,即声发射传感器所测信号的峰值处,说明此刻空气中冲击波的波前经过声发射传感器所在位置。

通过确定空气中冲击波信号的计时起始点和结束点位置,可以直接从示波器上读出空气中冲击波的飞行时间,结合声发射传感器与冲击点的距离,计算出空气中冲击波的平均速度,另外使用 X 射线应力测定仪对 45# 钢冲击点进行残余压应力测量,结果见表 1。

表 1 中在不同激光功率密度下,声发射传感器检测信号的飞行时间发生了变化,对应平均速度发生了变化,由于声波在同一种介质中传播速度不变,因此,声发射传感器检测的信号是冲击波作用的结果。对于工件中的残余压应力,随激光功率密度的增加,应力值接近饱和。

Table 1 Time of flight and the mean velocity of the shock wave in air and the compressive residual stress in the work piece in different laser intensities

laser intensity/ ($10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	time of flight of the shock wave in air/ 10^{-6} s	mean velocity of the shock wave in air/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	compressive residual stress in the workpiece/MPa
0.57	124.064	403.02	151
0.85	114.614	436.25	199
1.13	102.456	488.01	225
1.41	98.337	508.46	227
1.69	96.696	517.08	228

在水约束层模式下,随激光功率密度的增加,空气中冲击波的飞行时间非线性的减少,工件内的残余压

应力非线性的增加。进行多项式拟合,得出空气中冲击波飞行时间和工件内残余压应力的经验公式:

$$y = -938.17529 + 23.63257x - 0.1197x^2 \quad (1)$$

该式的意义在于,在一些场合,如合金材料的残余应力不容易测量,还有在大批量强化工件时,不可能对每个工件进行残余应力测试,使用该经验公式结合空气中冲击波飞行时间可以估算出强化后工件内形成的残余压应力值。

2.2 空气中的冲击波幅值与工件中的冲击波幅值

在水约束层模式下,由 PVDF 压电膜传感器检测的工件内冲击波如图 3 所示,将信号最大峰值处的电压值计为工件内冲击波的幅值。图 2 中将信号最低峰

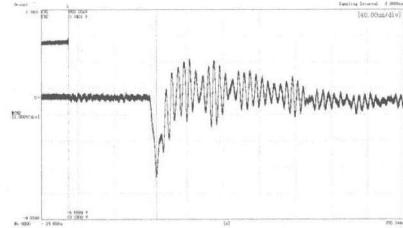


Fig. 3 The signal of laser induced shock wave detected by the PVDF piezoelectricity gauge in the workpiece

值处的电压值计为空气中冲击波幅值,并进行归一化处理,结果见表 2,随激光功率密度的增加,工件和空气中的冲击波幅值非线性的增加。

Table 2 The amplitude of the shock wave in air and the amplitude of the shock wave in the workpiece in different laser intensities

laser intensity/($10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	amplitude of the shock wave in air/a. u.	amplitude of the shock wave in the workpiece/a. u.
0.57	1.3587	1.4844
0.85	1.5748	1.7267
1.13	1.8281	2.2931
1.41	2.5634	5.1769
1.69	3.06	7.9375

空气和工件中冲击波幅值的关系如表 2 所示,进行多项式拟合,得出如下经验公式:

$$y = 2.76097 - 3.10604x + 1.57059x^2 \quad (2)$$

该式的意义在于,使用 PVDF 压电膜传感器对工件内冲击波进行测量时,其结果受到工件厚度及工件材料的影响,而使用声发射传感器并结合该经验公式能得出工件内冲击波相对幅值。

在实际操作中,对工件进行强化时单独使用声发射传感器对空气中冲击波进行检测,获得空气中冲击波的飞行时间及幅值,结合经验公式(1)式和(2)式,估算出工件中残余压应力值及工件中冲击波相对幅值,对激光冲击强化进行质量评估。

3 结论

使用声发射传感器和 PVDF 压电膜传感器同时对空气和工件中的冲击波进行了测量。随激光功率密度的增加,空气中冲击波的飞行时间非线性的减少,空气和工件内冲击波幅值非线性的增加。

对工件内的残余压应力进行测量,随激光功率密度的增加,残余压应力值接近饱和。进行多项式拟合,得出了空气中冲击波幅值与工件内冲击波幅值、空气中冲击波飞行时间与工件内残余压应力的经验公式,为激光冲击强化质量评估提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] JANG P, CHEN W Zh, GUO J, *et al.* The FFT analyze of the acoustic signal on plasma in laser welding[J]. Laser Journal, 2001, 22(5):62-63(in Chinese).
- [2] WANG Ch M, YU F L, DUAN A Q, *et al.* Relationship between penetration depth and plasma optic signal during partial-penetration laser welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2002, 23(5):45-46(in Chinese).
- [3] JIANG P, CHEN W Zh, XIAHOU L P, *et al.* Mechanism and mathematical model of the laser-induced plasma current in laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(5):471-472(in Chinese).
- [4] TENAGLIA R D, CLAUSER A H, DULANEY J L, *et al.* Bend bar quality control method for laser shock peening: U S, 20060021409[P]. 2006-02-02.
- [5] WU B, WANG Sh B, GUO D H, *et al.* Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10):1353-1354(in Chinese).
- [6] ZHANG Y K, CHEN J F, XU R J. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7):1069-1070(in Chinese).
- [7] SOMERS R M, WINIARZ M L, RISBECK J D. Laser shock peening quality assurance by volumetric analysis of laser shock peened dimple: U S, 5948293[P]. 1999-09-07.
- [8] SOKOL D W, WALTER C T, EPSTEIN H M, *et al.* Quality control plasma monitor for laser shock processing: U S, 6254703[P]. 2001-07-03.
- [9] SUH U W. Laser shock peening quality assurance by ultrasonic analysis: U S, 6422082[P]. 2002-07-23.
- [10] DEATON J B, AZAD F H, AZER M Z, *et al.* Laser shock peening system with time of flight monitoring: U S, 20070119824[P]. 2007-05-31.