

激光冲击强化在线检测系统设计及应用

乔红超 赵吉宾

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 为了克服现有激光冲击强化离线检测方法的缺点,对基于激光等离子体冲击波效应的在线检测系统进行了研究。激光被工件表面的吸收层吸收,在约束层的约束下形成高温高压的等离子体,并以冲击波的形式向外传播。该系统对空气中传播的冲击波进行采样、存储、数字滤波和波形数据分析,提取声压水平因子,来判断激光冲击强化的效果。提出了具体的实施方案,设计出了结构简单、实现方便的激光冲击强化在线检测系统,并通过测量工件表面的残余应力验证测量数据的可靠性。实验表明设计开发的激光冲击强化在线检测系统反应灵敏,检测结果可靠。

关键词 激光技术;激光冲击强化;在线检测;等离子体冲击波;强化效果

中图分类号 TH878 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.071401

Design and Implementation of Online Laser Peening Detection System

Qiao Hongchao Zhao Jibin

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract In order to overcome the existing disadvantages of offline laser peening detection methods, the online detection system based on laser plasma shock wave effects is developed. Laser is absorbed by the ablative layer on the surface of the work piece, and plasma of high temperature and pressure is formed under the tamping layer and propagated outward in the form of shock wave. The shock wave in the air is sampled, stored, digitally filtered and analyzed by the system. The system gets the sound pressure level factor to determine the effect of laser peening. The online laser peening detection system is designed and the implementation is performed. The system is very simple and convenient. By comparing the surface residual stress of work piece, the results show that the laser peening online detection system is sensitive and reliable.

Key words laser technique; laser peening; online detection; plasma shock wave; strengthening effects

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3538; 350.3850

1 引言

工件的失效形式主要是始于材料表面的疲劳、腐蚀和磨损,如何提高工件的疲劳强度,延长其服役寿命,受到了人们普遍的关注^[1-3]。激光冲击强化(LSP)技术利用功率密度为吉瓦每平方米(GW/cm^2)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,特别是有效改善金属材料的抗疲劳断裂的性能,防止表面出现裂纹。随着航空、航天、汽车、能源、医药等技术的发展,激光冲击强化技术得到了广泛的研究和应用^[4-7]。

目前,对激光冲击强化效果的检测方式主要是采用把经过激光冲击强化处理的工件取下来进行离线检测的方式,采用小孔法或 X 射线法测量残余应力,效率较低,也不利于及时更改工艺。激光冲击强化要实现大规模化的工业应用和实际生产,必须开发该工艺的无损在线检测技术^[8-10]。针对激光冲击强化过程中现有检测方法的缺点,本文研制了一套对加工环境适应性强、稳定可靠的激光冲击强化在线检测系统。

收稿日期: 2013-01-12; **收到修改稿日期**: 2013-03-02; **网络出版日期**: 2013-06-20

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041310)

作者简介: 乔红超(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: hcqiao@sia.cn

2 原 理

图 1 为激光冲击强化的原理图^[11-12]。从图中可以看出,从激光器发出一束短脉冲(几十纳秒)的高峰值功率密度(大于 10^9 W/cm²)的激光,激光束穿过约束层辐射到粘贴在金属表面上的吸收层上,金属表面吸收层吸收激光能量发生爆炸性气化蒸发,产生高温(高于 10000 K)、高压(在于 1 GPa)的等离子体,该等离子体受到约束层的约束时产生高强度压力冲击波,一部分冲击波向工件内部传播,在冲击波的作用下,在工件表面形成压应力层,一部分冲击波向工件外部传播,传播到空气介质中。

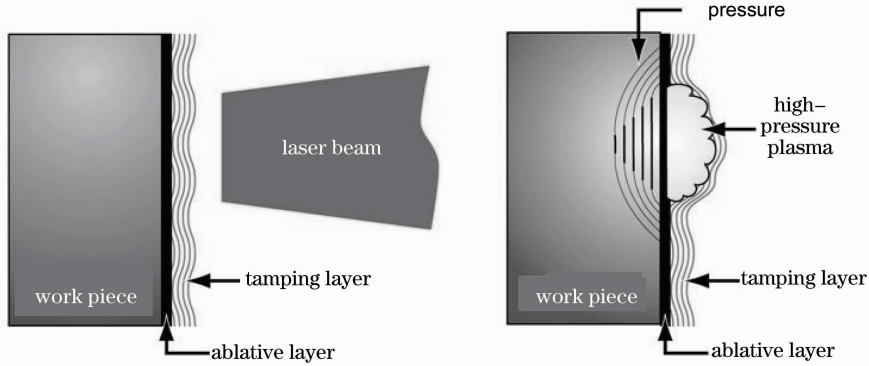


图 1 激光冲击强化原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser peening

本文开发的激光冲击强化在线检测系统,通过数据采集卡对空气中传播的冲击波进行采样并存储,开始于激光器发出激光的那一刻,结束于冲击波作用结束的那一刻,将两个时间节点之间的时间段作为采样时间。采样周期或频率与激光器发射激光束的周期或频率相同,即激光器每发出一次激光、对工件冲击一次,采集一次数据,采集冲击波的信号幅值、信号能量和振铃计数等相关数据。再将激光等离子体冲击波的采样数据传送到控制系统中,由控制系统对采集卡采集的冲击波波形进行数字滤波和数据分析。

在激光冲击强化过程中,激光的能量直接决定冲击波的信号幅值、信号能量、振铃计数以及冲击强化效果,而冲击波的信号幅值、信号能量、振铃计数与冲击强化的效果也是密切相关的,因此可以通过检测冲击波的波形特征判断冲击强化处理的效果^[11]。本文就是利用激光等离子体冲击波的信号幅值、信号能量、振铃计数预测冲击强化后的材料表面残余应力,并总结归纳了如下公式:

$$L_f = 20 \times \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i E_i}{n} \right],$$

式中 L_f 表示声压水平因子,单位为 dB; C_i 表示第 i 个声发射通道的振铃计数; A_i 表示第 i 个声发射通道的信号幅值,单位为 dBmV; E_i 表示第 i 个声发射通道的信号能量,单位为 dBW。

系统的声发射通道由传感器、前置放大器、滤波器、二次放大器、连接电缆以及处理器等构成,声压水平因子与所有声发射通道的振铃计数、信号幅值和信号能量的乘积的算术平均值成 20 倍的对数关系。采用 X 射线应力分析仪测量试件表面的残余应力值,对用声压水平因子来表征激光冲击强化效果进行验证。

3 激光冲击强化在线检测系统设计

3.1 机械结构设计

图 2 和图 3 分别为本文设计的接收器结构图和照片。激光冲击强化在线检测系统主要由立柱、安装支架、声发射传感器、放大器、声波接收器等组成,其中立柱利

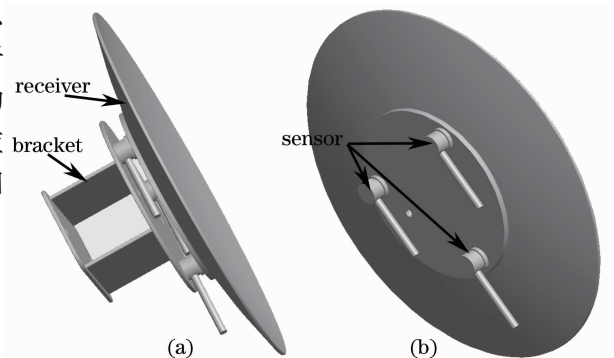


图 2 接收器。(a) 接收器结构图;(b) 传感器布置图

Fig. 2 Schematic of receiver. (a) Receiver structure; (b) sensor arrangement

用化学地钉固定在车间的地面上,立柱和地面之间垫一层胶垫,阻止或减弱地面振动波传播到立柱上,消除噪音。支架和立柱之间同样夹一层胶垫,防止立柱与支架之间的振动传播。

材料为不锈钢的接收器的外圆直径为 300 mm,曲面半径为 550 mm,在其背面有三个直径为 20 mm、深 3 mm 的盲孔,三个盲孔相互之间成 120° 角均布在直径为 120 mm 的圆周上。将三个声发射传感器的接收端涂上硅胶分别压入盲孔中,利用螺钉将接收器和安装支架连接在一起,将声发射传感器紧紧压在接收器和安装支架之间。

放大器分散安装在空心的立柱内部,即保证了放大器的散热效果,同时又不影响在线检测系统的美观。相应的电缆和电路均布置在立柱的内部和立柱上方的电柜里,保证了线路的安全可靠,防止被外界物体碰撞而影响整个系统的稳定性。

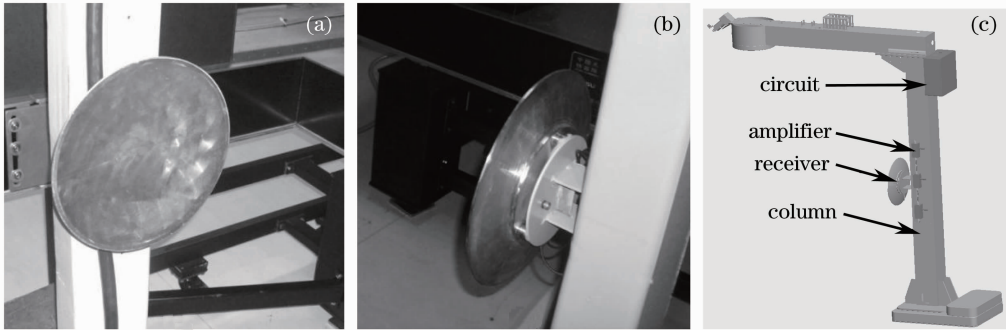


图 3 接收器照片。(a) 接收器正面照片;(b)接收器背面;(c) 安装图

Fig. 3 Photos of receiver. (a) Front view; (b) back view; (c) installation diagram

3.2 硬件设计

图 4 为激光冲击强化在线检测系统的硬件组成示意图。从图 4 中可以看出,开发设计的在线检测系统主要由 PXR15 声发射传感器、放大器、ET-3000TIL 激光探测器、PCI-50612 高速同步数据采集卡、工控机和显示器组成。

声发射传感器选用北京祥鹏公司的产品,该传感器可以响应频率在 $100 \sim 400$ kHz 之间的激光等离子体冲击波,灵敏度大于 65 dB。激光探测器选用美国 EOT 公司的光电探测器,该产品直接输出模拟或晶体管-晶体管逻辑(TTL)信号,便于和数据采集卡集成。该探测器用于探测脉冲激光并将其转换为电脉冲信号,该信号在本系统中作为同步数据采集系统的外部同步触发信号,实现各传感器信号的同步采集。同步数据采集卡实现传感器信号的外部触发、同步采集存储和实时信号处理功能。工控机主要实现数据的处理、滤波、计算和历史数据的查询功能。显示器实时显示每一次冲击的结果,并以曲线形式直观地表征出来。

系统的运算速度快,最高采样率为 $50 \text{ MS}/(\text{s} \cdot \text{channel})$,输入信号带宽 $0 \sim 10 \text{ MHz}$,信噪比大于等于 55 dB。

3.3 软件设计

系统软件采用 VC++、Matlab、Lab VIEW 混合编程进行设计,软件主要实现直接和间接激光等离子体冲击波参数的数据采集、存储、显示、报表、处理、分析以及历史数据查询等功能。软件的运行环境为 Windows XP,操作简单,界面友好,全中文操作。

在数据采集和处理方面,利用四川拓扑测控科技有限公司提供的采集卡驱动程序以及数据采集函数库,实现激光等离子体冲击波的振铃计数、信号幅值、信号强度等参数的同步采集,对采集来的信号进行信号滤

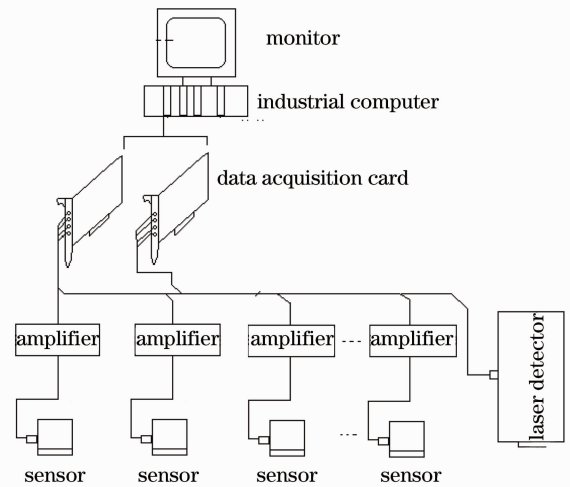


图 4 硬件组成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hardware configuration

波、信号时域分析、振动模态分析。

在数据存储方面,建立不同实验条件下的加工参数和工艺数据库,采用 SQL Server 作为后台数据库,采用分布式客户机/服务器模式及 Client/Server 网络模式的构建,支持网络通讯,满足企业网络化和集成化需要。

在数据分析方面,通过大量的实验,建立在线检测的声压水平因子与试件表面残余应力、显微硬度等离线测量数据的函数关系,并总结归纳出相应的公式[(1)式],将数据的处理结果以曲线和数字的形式显示在激光冲击强化设备的控制界面上,便于工艺人员及时掌握每一次冲击加工的结果,并给出相应的加工指令。

4 实验验证

为了对开发的激光冲击强化在线检测系统的可靠性进行实验验证,利用自主研制的 SIA-LSP10-2 激光冲击强化设备,采用脉冲宽度为 12 ns、水约束层厚度为 1.8 mm、光斑搭接率为 40%、光斑直径为 3 mm、单脉冲能量 0~5 J 等工艺参数,对经过振动时效处理后的 TC4 钛合金母材进行激光冲击强化实验。

图 5 为单脉冲能量对表面残余应力的影响曲线,从中可以看出,表面残余应力随着单脉冲能量的增大而增大。母材经过振动时效处理后的表面残余应力约为 0,当单脉冲能量增大到 3 J 时,表面残余压应力约为 -100 MPa,可知,单脉冲能量低于 3 J 时,激光冲击强化效果不明显,影响很微弱,在单脉冲能量从 3 J 增大到 5 J 的过程中,残余压应力增大趋势明显,斜率明显增大。

图 6 为单脉冲能量与声压水平因子之间的关系曲线。从图 6 中可以看出,声压水平因子随着单脉冲能量的增大而增大。当单脉冲能量为 0 时,声压水平因子为 0 dB,当单脉冲能量增加到 3 J 时,声压水平因子增大到 95 dB,当单脉冲能量增大到 5 J 时,声压水平因子增大到 236 dB。

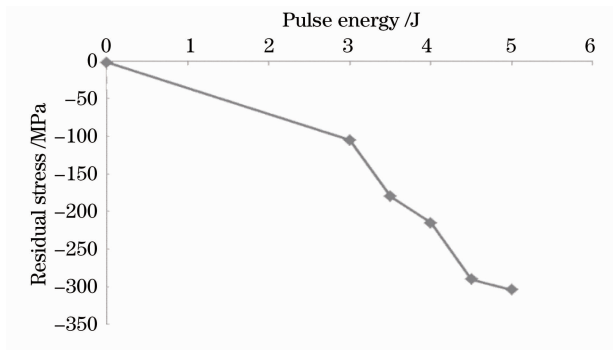


图 5 单脉冲能量对表面残余应力的影响

Fig. 5 Effect of single-pulse energy on surface residual stress

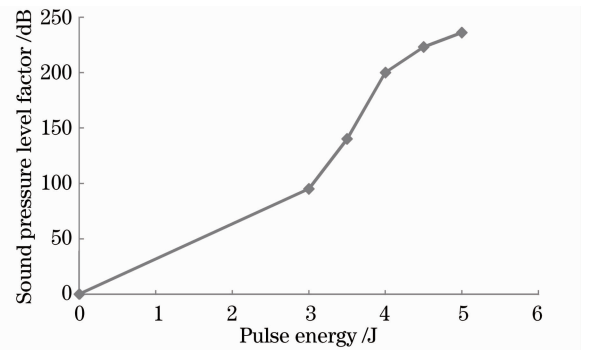


图 6 单脉冲能量对声压水平因子的影响

Fig. 6 Effect of single-pulse energy on sound pressure level factor

通过比较图 5 和图 6 可以发现,随着单脉冲能量的增大,残余压应力和声压水平因子都增大,且曲线形状基本吻合,说明本文开发的激光冲击强化在线检测系统的检测结果可靠。

5 结论

1) 针对现有激光冲击强化效果离线检测方法的缺点,利用激光等离子体冲击波效应,从理论上推导出了声压水平因子与激光冲击波强度的关系,建立了声压水平因子与信号幅值、信号能量和振铃计数的函数关系,为激光冲击强化在线检测系统的设计提供了理论基础。

2) 设计了激光冲击强化在线检测系统,通过简单的实验证明,开发设计的激光冲击强化在线检测系统反应灵敏,检测结果可靠。该系统已成功应用在中国科学院沈阳自动化研究所为某航空发动机公司开发的 SIA-LSP-10-2 激光冲击强化设备上,得到了用户的好评。

3) 残余应力和声压水平因子随能量的变化曲线趋势吻合,但也有微小的差别,还需通过实验和生产进一步总结规律,考虑吸收层、水层以及工件材料等参数的影响,完善函数关系式。

参 考 文 献

- 1 Tao Chunhu, Liu Qingquan, Cao Chunxiao, *et al.*. Aerospace Titanium Alloys Failure and Its Prevention[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 5—10.
陶春虎, 刘庆琮, 曹春晓, 等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 5—10.
- 2 Y K Zhang, C L Hu, L Cai, *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser excited shock waves[J]. Appl Phys A, 2001, 72 (1): 113—116.
- 3 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 J Fatigue, 2002, 24(10): 1021—1036.
- 4 A T Dewald, J E Rankin, Michael R Hill, *et al.*. Assessment of tensile residual stress mitigation in alloy 22 welds due to laser peening[J]. J Engng Mater Technol, 2004, 126(3): 465—473.
- 5 K K Liu, M R Hill. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons[J]. Tropology International, 2009, 42(9): 1250—1262.
- 6 P Peyre, R Fabbro. Laser shock processing of materials physical processes involved and examples of applications[J]. J Laser Applications, 1996, 8(3): 135—141.
- 7 Ren Xudong, Ruan Liang, Huangfu Yongzhuo, *et al.*. Experimental research of laser shock processing 6061-T651 aluminum alloy during elevated temperature[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(3): 0303010.
任旭东, 阮亮, 皇甫喆卓, 等. 中高温条件下 6061-T651 铝合金激光冲击强化研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303010.
- 8 B P Fairand, B A Wilcox, W J Gallagher, *et al.*. Laser shock induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum[J]. J Appl Phys, 1972, 43(9): 3393—3395.
- 9 P J Golden, A Hutson, V Sundaram, *et al.*. Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6Al-4V[J]. International J Fatigue, 2007, 29(7): 1302—1310.
- 10 Y K Zhang, J Z Lu, X D Ren, *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1697—1703.
- 11 K Ding, L Ye. Laser Shock Peening Performance and Process Simulation[M]. Boca Raton: Woodhead Publishing, 2006. 17—18.
- 12 Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al.*. Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103006.
聂贵锋, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103006.