

DOI: 10.12086/oe.2019.180534

激光诱导等离子体声波信号实时采集分析软件系统

刘学军^{1,3}, 吴嘉俊^{1,2}, 乔红超^{1,2*}, 赵吉宾^{1,2},
李长云³, 张旖诺^{1,2}, 万烂军³

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016;

³湖南工业大学计算机学院, 湖南 株洲 412007

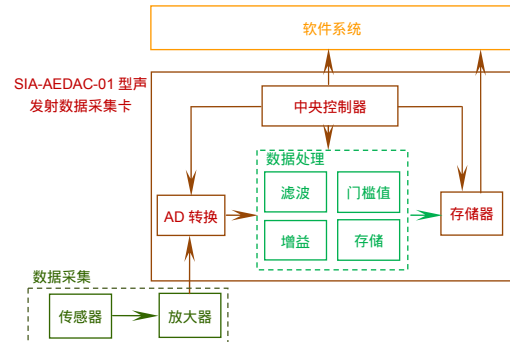
摘要: 为实现激光冲击强化在线检测, 针对激光诱导等离子体声波现象, 采用 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡采集声波信号, 研究并设计了一种激光诱导等离子体声波信号实时采集分析软件系统。设计了该系统的可行性和准确性测试实验, 首先用激光冲击强化在线检测系统采集传播在空气中的激光诱导等离子体声波信号, 并从中提取等离子体声波信号能量; 利用 X 射线应力分析仪测量试件强化后的残余应力以验证激光冲击强化实验的可靠性。实验结果表明, 本文设计开发的软件系统能实时采集分析激光冲击强化过程中的等离子体声波信号, 并能准确提取每一次冲击强化产生的声波信号能量; 且随着激光冲击能量的增加, 等离子体声波信号能量和试件表面残余压应力都增大, 且二者曲线型一致, 说明该软件系统准确可靠, 满足激光冲击强化在线检测的需求。

关键词: 激光冲击强化; 激光诱导等离子体声波; 在线检测; 实时采集分析; 软件系统

中图分类号: O439; TP311.5

文献标志码: A

引用格式: 刘学军, 吴嘉俊, 乔红超, 等. 激光诱导等离子体声波信号实时采集分析软件系统[J]. 光电工程, 2019, 46(8): 180534



The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal

Liu Xuejun^{1,3}, Wu Jiajun^{1,2}, Qiao Hongchao^{1,2*}, Zhao Jibin^{1,2}, Li Changyun³, Zhang Yinuo^{1,2},
Wan Lanjun³

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

³School of Computer, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China

Abstract: In order to realize the online detection of laser shock processing and aim at the phenomenon of laser-induced plasma acoustic wave, the SIA-AEDAC-01 acoustic emission acquisition card is used to collect acoustic wave signals. The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal

收稿日期: 2018-10-18; 收到修改稿日期: 2019-01-18

基金项目: 国家基金委-辽宁省联合基金资助项目(U1608259); 国家自然科学基金资助项目(51501219); 国家重点研发计划(2016YFB1102704); 国家科技支撑计划(2015BAF08B01-01)

作者简介: 刘学军(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事工业大数据处理与激光冲击强化信号处理的研究。E-mail: idliuxuejun@163.com

通信作者: 乔红超(1982-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事表面工程的研究。E-mail: hcqiao@sia.cn

is studied and designed. The test experiment for feasibility and accuracy of the system is designed. Firstly, the laser-induced plasma acoustic wave signal propagating in air is collected by the online detection laser shock processing system, and then the system gets the laser-induced plasma acoustic wave signal energy. The residual stress of the test pieces after the treatment of laser shock processing was measured by an X-ray stress analyzer to verify the reliability. The experimental results show that the laser-induced plasma acoustic wave signal can be collected and analyzed in real-time by the real-time acquisition and analysis software system, which is designed and developed in this work, and the software system can accurately get the acoustic signal energy. At the same time, both the acoustic wave signal energy and the surface residual stress of the test pieces are increased with the laser energy, and their change curve is consistent. In conclusion, the real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal can satisfy the requirements of online detection of laser shock processing with accurate and reliable performance, and meet the online monitoring requirements of laser shock processing.

Keywords: laser shock processing; laser-induced plasma acoustic wave; online detection; real-time acquisition and analysis; software system

Citation: Liu X J, Wu J J, Qiao H C, *et al.* The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180534

1 引言

激光冲击强化(Laser shock processing/peening, LSP)是一种新型的表面强化工艺技术,其基本原理为采用短脉冲(几十纳秒)、高峰值功率密度($>10^9$ W/cm²)的激光辐照到材料表面的涂覆层,涂覆层在吸收激光能量后爆炸性气化产生高温高压的等离子体,等离子体在束缚层的束缚下形成高压冲击波向材料内部传播,对材料表层产生塑性变形,引起一系列材料微观组织变化,形成残余应力,最终提高材料的强度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命^[1-5]。该技术具有强化效果佳、可控性强、适应性好等优点,在航空发动机、飞机、地面燃气机轮、叶轮机械等装备、设备部件制造和修理中广泛应用^[5-6]。

材料在加工过程中形成的残余应力严重影响工件疲劳强度、静力强度及耐腐蚀性能,借助材料残余应力测试方法以检验材料性能和评估激光冲击强化的效果^[7-9]。目前残余应力的测试方法大多数为离线方法(如小孔法^[10-11]、X射线应力测量^[12-13]),这些方法效率低下,不利于及时更改工艺,而且测试成本高^[7,14-15]。为实现激光冲击强化工艺大规模的工业生产应用,必须开发该工艺的无损在线检测技术。为此,国内外许多学者开展了激光冲击强化无损在线检测研究,分析激光诱导等离子体声波的传播过程^[16-19]。通用电气公司提出了一种通过分析激光冲击强化过程中一阶或多阶固有频率变化值来实现激光冲击强化质量实时监测的方法^[20]。杨贺来^[21-22]通过叶片激光冲击强化处理的

过程监测研究发现:冲击点残余压应力值与叶片固有频率的变化值基本呈正相关关系,但相关性并不十分明显。中国科学院安徽光学精密机械研究所的郭大浩团队^[23]利用PVDF薄膜传感器对冲击强化过程的冲击波压力进行实时测量,得到了激光引发的冲击波峰压在铝中呈指数衰减的规律,从而实现了对激光冲击强化过程的实时监测;然而,PVDF薄膜在使用多次后会失效,在大规模生产中会降低激光冲击强化的生产效益,该方法中的冲击波峰值压力不能很好地体现激光冲击强化给工件材料带来的变化^[24]。邱辰霖^[25]研究表明激光诱导等离子体声波信号与激光冲击强化过程有着密切的联系。乔红超等^[26]通过自主研发的激光冲击强化在线检测系统对强化过程中在空气中传播的冲击波信号进行采样、存储、数字滤波和波形数据分析,通过提取声压水平因子来判断强化效果,研究结果表明随着单脉冲能量的增大,试件表面残余压应力和声压水平因子都增大,且二者的曲线形状一致;该研究能够解决基于固有频率检测方法相关性不明显的问题,具有很好的现实应用意义。

本文以中国科学院沈阳自动化研究所自主研发的SIA-AEDAC-01型声发射数据采集卡为研究对象,设计一种可用于激光诱导等离子体声波信号实时采集分析软件系统。通过实时采集分析软件系统对等离子体声波信号进行实时的采样、存储、数字滤波和波形数据分析,从中提取等离子体声波信号能量,用于激光冲击强化质量的判断。该研究的开展,能够丰富基于激光诱导等离子体声波信号的激光冲击强化在线检测

技术应用，促进激光冲击强化技术工业应用的智能化发展。

2 硬件模块

硬件平台基于中国科学院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡，该采集卡通过 PCI-Express(peripheral component interconnect express)接口与工控机进行通信，最大速率 100 Mb/s，性能上具备双通道 24 位 A/D 转换器，采样速率 5 MS/s，详细参数如表 1 所示。此外，平台使用声发射传感器采集激光诱导等离子体声波信号，其谐振频率 150 kHz，灵敏度 65 dB。图 1 所示为系统硬件平台的基本结构，其中，声发射传感器将激光诱导等离子体声波信号转换成微弱电信号，然后经外置放大器放大后通过低噪声信号线传输到采集卡进行 A/D 转换，在采集卡内部，声波信号经过预处理形成原始数字信号。

SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡内置一个 32

表 1 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡的主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of SIA-AEDAC-01 acoustic emission data acquisition card

Technical parameter	Value
Data interface	PCI-Express 100 Mb/s
Sampling precision	24 bit
Sampling rate	Maximum 5 MS/s
Bandwidth of signal frequency	1 Hz~400 kHz
Filters	Simulation/Digital
Channel	Double

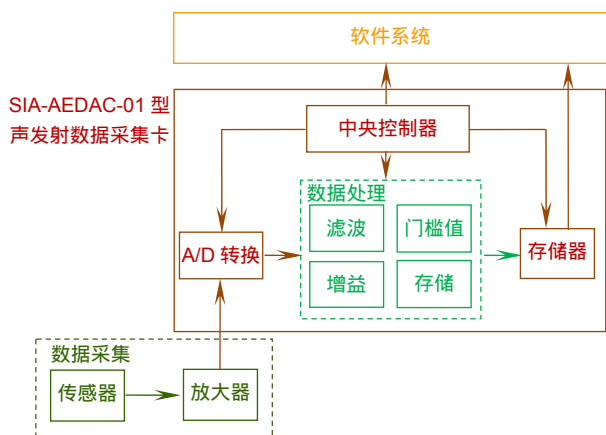


图 1 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡的硬件结构

Fig. 1 The hardware structure of SIA-AEDAC-01 acoustic emission data acquisition card

kb 的数据缓存，当采样频率提高数据量增大时，通过该缓存解决软件层和硬件层之间的数据传输速度不匹配问题。

为保证软件开发的易用性和安全性，采集卡的数据传输、控制命令和状态响应等操作封装成 SDK 形式。声发射数据采集软件基于操作系统 PCIe 通信方式，通过调用采集卡的 API 对其进行状态控制和声波信号数据获取。

3 软件架构设计

软件架构如图 2 所示。软件主要功能包括建立与采集卡的通信、提取原始传感数据、进行信号分析和处理得到声波信号波形、参数值等数据，最终将其可视化显示。通过该软件实现两个目的：1) 实现数据监控、实时诊断激光冲击强化过程；2) 存储声波信号数据，用于离线分析激光冲击强化性能。

3.1 软件功能模块

中国科学院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡的采样率高达 5 MS/s，采集软件在满足基本功能的前提下，要求执行效率高，并且需要考虑软件功能升级与维护的需求。为此，采用面向对象的程序方法，首先独立设计各个功能模块，然后通过软件主框架衔接各子模块，最后利用主框架响应用户操作进行功能调度，实现软件的各项需求。图 3 所示为本文声发射采集处理软件系统的功能模块示意图。

1) **主框架** 采集软件的核心部分，承载软件各个功能模块，并进行模块间的数据传输和指令交互，使

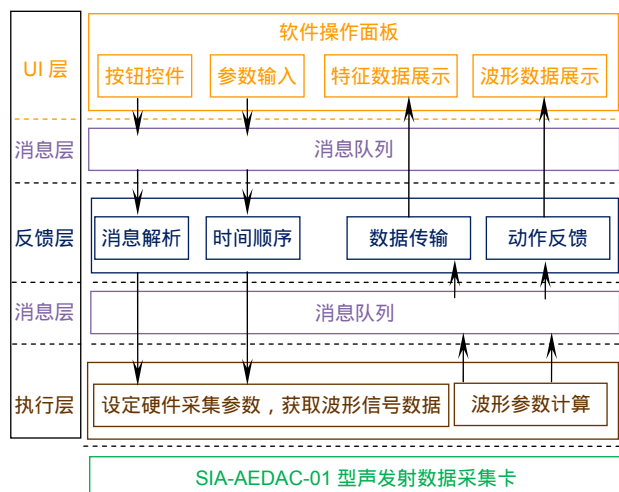


图 2 软件基本架构

Fig. 2 The basic framework of software

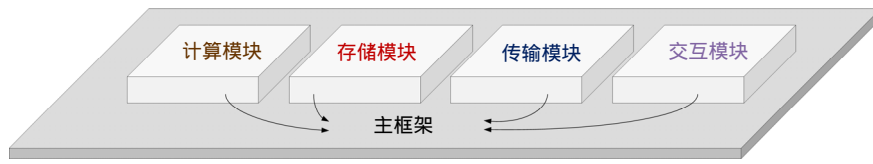


图3 软件功能模块设计

Fig. 3 The design of software function module

各模块之间相互独立，保证软件逻辑结构清晰、层次分明、数据安全，提高软件升级和维护性能。

2) **存储模块** 激光诱导等离子体声波信号数据包括两种，一是波形流数据，反映声波变化状态；二是声波特征参数数据，由采集卡获取的等离子体声波原始数据经特征提取获得。

存储模块保存激光诱导等离子体声波波形数据和特征参数数据，软件从采集卡获取原始数据，由传输模块负责数据的发送和接收，存储模块相应地进行存储操作，包括监听存储请求、文件初始化、数据写入读出等。

此外，由于采样率较高，采集卡单位时间内获取的数据量较大，软件层无法实时接收处理传感数据，容易造成数据堵塞现象。为此，存储模块中设置一个环形队列数据缓存，声波信号数据从缓存队尾依次存入，从队首依次读出并存储，不断循环遍历整个环形队列。

3) **计算模块** 原始声波信号数据因包含噪声，需要通过计算模块进行降噪、滤波等预处理操作。为此，计算模块包括一些低通、均值、高斯等滤波方法，经过滤波的数据可以进行存储或显示。并且，为了有效分析激光诱导等离子体声波数据，需要进一步提取信号中的关键特征数据如能量、幅值等，将由计算模块负责完成相应的特征计算或提取方法。

根据声发射参数分析方法^[27]，本文采集到的等离子体声波信号能量可由均方电压 V_{ms} 或方均根电压 V_{rms} 推导获取：

$$V_{ms} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \quad (1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_{ms}} \quad (2)$$

式中： ΔT 为平均时间， $V(t)$ 为随时间变化的信号电压。

则等离子体声波信号在 $t_1 \sim t_2$ 时间内的总能量可由下式表示：

$$E \propto \int_{t_1}^{t_2} (V_{rms})^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} V_{ms} dt \quad (3)$$

4) **交互模块** 实现人机交互功能。根据激光冲击

强化工件材料特性，软件在采集激光诱导等离子体声波信号时需要选择不同的参数，如幅值门槛、采样率，以确保采集到最理想的数据。用户在进行软件操作和输入设定时，由交互模块进行消息响应，并将其发送至主框架的消息队列，由主框架进行各个指令的具体处理，调用各子模块完成消息功能，如数据存储、波形显示、数据采集、传输控制等。

3.2 多线程设计

采集软件通过调用 API 函数与声发射采集卡进行通信，包括状态控制和声波信号数据传输。采集卡被动完成相应操作，无法向软件层发起通信请求，导致采集卡获取一帧有效的声波信号数据后无法立即传输至采集软件。为此，软件层必须设置一个监听数据采集卡数据状态的任务，考虑到采集卡单帧数据量大、特征计算复杂的特点，采用多线程并发技术，增加若干工作线程独立完成各项程序任务，实现软件效率最大化。

软件系统在主线程基础上开辟 4 个工作线程(图 4 所示)，主线程主要完成软件初始化、创建工作线程、任务调度、界面交互等任务，工作线程分别完成声波信号数据监听传输、数据存储、可视化显示和声波信号数据分析处理。

1) **子线程一** 监听声发射采集卡数据状态以及传递有效数据。上文所述，由于通信机制，采集卡无法主动发起数据就绪准备传输请求，在该线程中，程序循环查询声发射采集卡工作状态，包括是否获取到激光诱导等离子体声波信号数据，当监听到数据采集完成、准备就绪的状态后立即读出采集卡中声波信号数据，并置入数据缓存中，然后继续转入采集卡状态监听任务中。

该线程主要从采集卡读取声发射数据，然后写入程序数据缓存中，软件主线程以及其它工作线程根据需求从数据缓存中读取数据，完成相应功能。显然，多个线程之间对同一内存的读写容易产生冲突，为此，该数据缓存采用上文所述环形队列结构^[28]，对比一般

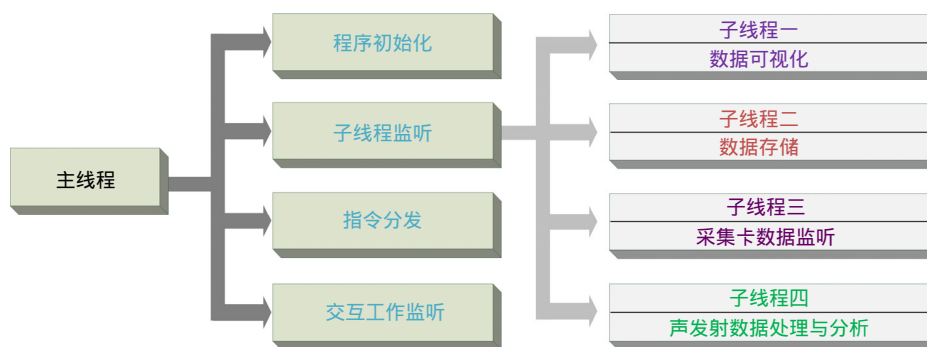


图 4 软件线程设计

Fig. 4 The design of software thread

“线程锁”的方式，提高了数据处理效率。

2) **子线程二**：存储声波信号数据。软件系统单次指令采集的激光诱导等离子体声波信号数据量大，数据从内存写入硬盘文件速度较慢，如果程序保存数据任务指令放在主线程中进行，必然会影响主线程其它任务的效率，为此，另增加一个数据存储线程。在该线程中程序循环检测主线程中是否有保存数据任务需求，当存在保存操作指令时，存储线程立即从数据缓存中读取激光诱导等离子体声波信号数据，并按照存储规则保存到本地磁盘，完成操作后继续进入循环检测主线程保存任务需求指令中。同时，该线程接收用户界面发出的采集暂停、恢复和结束指令而执行存储待机、恢复和结束操作。

3) **子线程三**：可视化显示声波信号数据。此线程

主要在程序界面上显示声波信号数据，包括波形流数据和参数数据，当主线程发起数据显示请求后，该线程将从声波信号数据缓存中分别取出波形数据和特征数据展示在界面上。

4) **子线程四**：声发射数据处理与分析。计算声波信号数据能量，进行频域变换，从多维角度分析材料冲击强化性能。

4 验证实验方案设计

基于上述软件架构设计思路，采用 Microsoft Visual Studio 2012 开发环境，编写了基于 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡的软件系统，实时采集激光诱导等离子体声波信号，软件结构如图 5 所示。

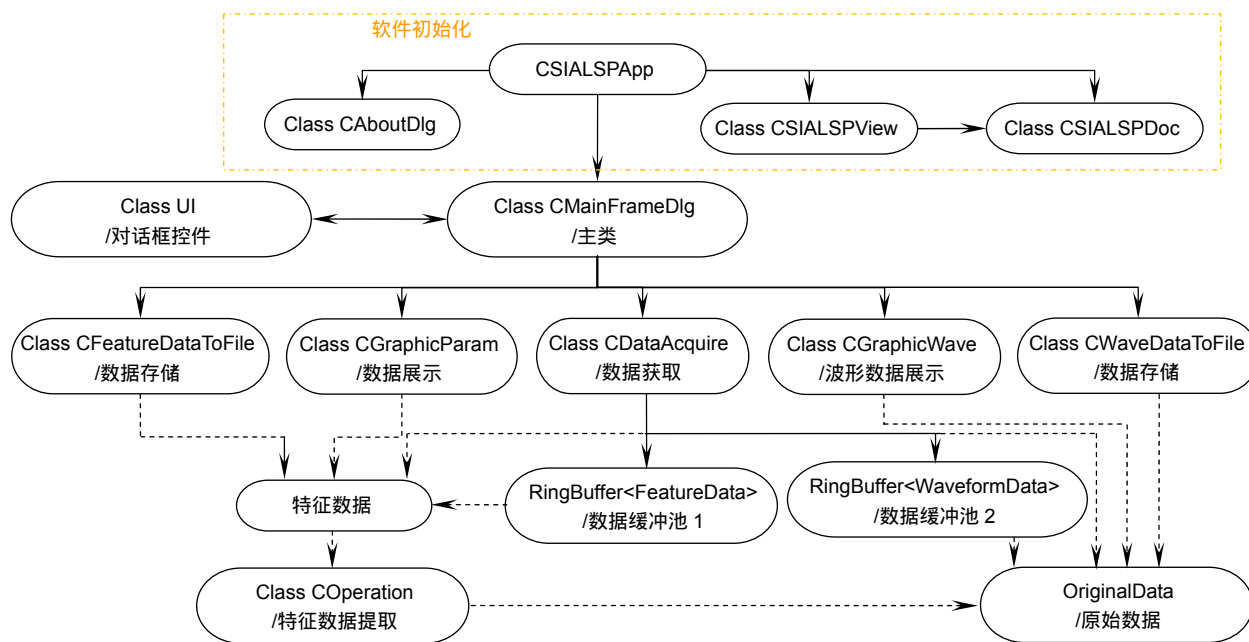


图 5 程序体系结构

Fig. 5 The architecture of program

为了对软件系统可靠性进行验证, 利用中国科学院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-LSP-01 型激光冲击强化设备对经过振动时效处理的 TC17 钛合金试件进行激光冲击强化实验, 其中激光器的具体技术参数如表 2 所示。

激光能量分别为 5 J、5.5 J、6 J、6.5 J、7 J 条件下进行五组冲击强化实验。激光功率密度函数计算式:

$$I_0 = \frac{4E}{\pi D^2 \tau} \quad (4)$$

式中: I_0 为激光功率密度, 单位为 GW/cm^2 ; E 为激光能量; D 为光斑直径; τ 为激光脉宽。

本次实验选用激光参数为: 频率 1 Hz, 光斑直径

2.8 mm, 激光脉宽 14 ns; 根据式(3)可得不同能量密度下的功率密度, 如表 3 所示。采用 100 μm 厚的黑胶带为吸收层; 1.5 mm 厚的均匀水膜为约束层; 光斑搭接率为 25%, 为 6 \times 6 光斑分布; 冲击强化路径采取蛇形轨迹, 具体由库卡机器人实现。在激光冲击强化实验结束后, 通过 X 射线应力分析仪测量强化试件的表面残余应力以验证该冲击试验可靠性并评价设计的软件系统。实验装置示意图如图 6 所示。

5 实验结果

图 7 为软件系统分析测量得到的等离子体声波波形。从图中可以看出: 激光冲击强化一次, 产生一个

表 2 激光器技术参数

Table 2 The technical parameters of laser

Parameters	Value
Operation material	Nd:YAG
Wavelength/nm	1064
Pulse energy/J	0~7
Working frequency/Hz	Singal,0.25,0.5,1,2
Pulse width/ns	10~30
Energy distribution	Gaussian distribution
Spot shape	Circle
Spot diameter/mm	2~4

表 3 不同激光能量下对应的激光功率密度

Table 3 Laser power intensity of each associated laser energy

Laser energy/J	Laser power intensity/(GW/cm^2)
5	5.80
5.5	6.38
6	6.96
6.5	7.54
7	8.12

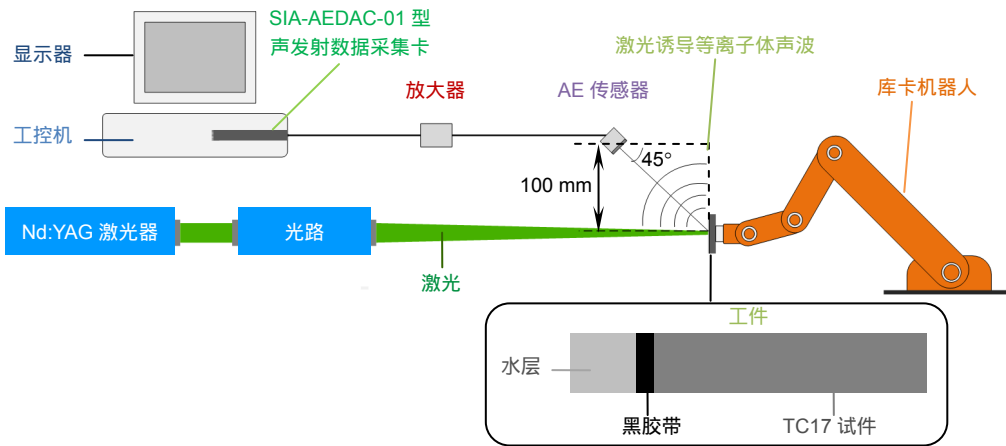


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 The diagram of experimental device

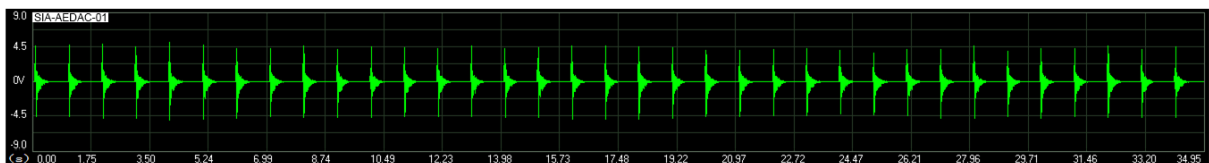


图 7 等离子体声波信号波形图

Fig. 7 The diagram of plasma acoustic waveform

呈“三角形”衰减的波形信号；本次实验激光频率设定为 1 Hz，故每隔 1 s 激光冲击强化 1 次，图中“三角形”波形信号的时间间隔为 1 s，与实验设置的时间间隔对应；图中各冲击点的波形信号基本一致，表明在相同激光能量下，等离子体声波信号稳定。本文设计的软件系统得到等离子体声波信号能量，其大小为信号包络线下的面积，与波形图中的“三角形”区域面积对应，单位为 $V \cdot s$ 。

图 8 为激光能量对试件表面残余压应力的影响曲线，从图中可以看出：试件经激光冲击强化后，在其表面形成了残余压应力(由于经过振动时效处理，试件初始表面应力为 0)，且试件表面残余压应力随激光能量的增加而增加；当激光能量为 5 J 时，试件表面形成的残余压应力为 337 MPa，当激光能量增加到 7 J 时，试件表面残余压应力为 454 MPa。

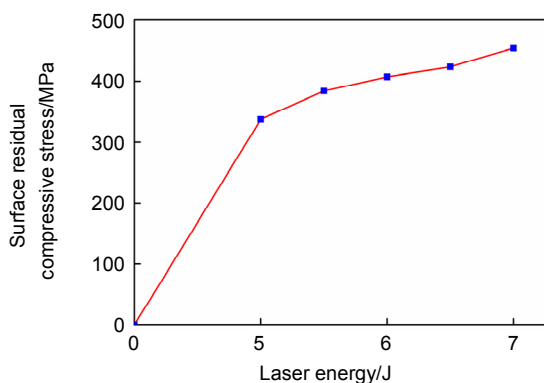


图 8 激光能量对试件表面残余压应力的影响
Fig. 8 Effect of laser energy on surface residual compressive stress of samples

图 9 为激光能量对等离子体声波信号能量的影响曲线，从图中可以看出：激光诱导等离子体声波信号能量随激光能量的增加而增加；当激光能量为 5 J 时，

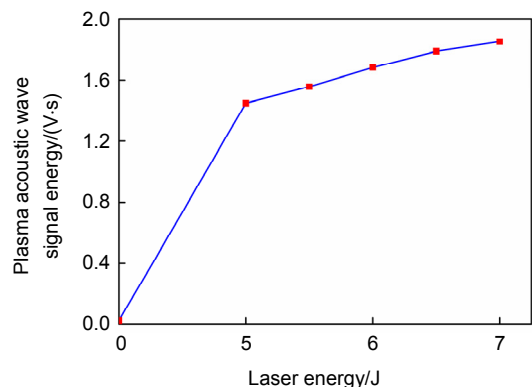


图 9 激光能量对等离子体声波信号能量的影响
Fig. 9 Effect of laser energy on plasma acoustic wave signal energy

激光诱导等离子体声波信号能量约为 1.449 $V \cdot s$ ；当激光能量增加到 7 J 时，激光诱导等离子体声波信号能量约为 1.851 $V \cdot s$ 。

通过对比图 8 和图 9 可以发现，随着激光能量的增加，激光诱导等离子体声波信号能量和试件表面残余压应力都增大，且二者曲线线型一致，说明本文设计的软件系统的检测结果可靠；同时也反映了 SIA-AEDCA-01 型声发射数据采集卡能够满足激光冲击强化声波检测的技术要求。

6 结 论

1) 针对激光冲击强化过程中产生的激光诱导等离子体声波现象和基于激光诱导等离子体声波信号的激光冲击强化在线检测方法，以中国科学院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-AEDAC-01 型声发射数据采集卡为研究对象，本文设计出了一种激光诱导等离子体声波信号实时采集分析软件系统，为激光冲击强化声波检测技术的发展提供了理论基础。

2) 对 TC17 钛合金试件进行激光冲击强化实验以验证该软件系统的可靠性，实验结果表明：随着激光能量的增加，激光诱导等离子体声波信号能量和试件表面残余压应力都增大，且二者曲线线型一致。

3) 由于激光冲击强化过程极为复杂，涉及众多因素，等离子体声波信号能量受测试材料、约束层和吸收层的厚度、激光参数等因素的影响，因而激光冲击强化在线检测技术还存在巨大的研究空间，需要进一步通过实验总结规律，完善理论。

参考文献

- [1] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. The application status and development of laser shock processing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(2): 170690.
吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展[J]. *光电工程*, 2018, **45**(2): 170690.
- [2] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-roduced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, **68**(2): 775-784.
- [3] Li S X, Qiao H C, Zhao J B, et al. Research and development of laser shock processing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 569-576.
李松夏, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化技术原理及研究发展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 569-576.
- [4] Zhang G X, Wu J J, Gao Y, et al. Experimental study on laser shock peening of TC17 titanium alloy[J]. *Surface Technology*, 2018, **47**(3): 96-100.
张恭轩, 吴嘉俊, 高宇, 等. TC17 钛合金激光冲击强化实验研究[J]. *表面技术*, 2018, **47**(3): 96-100.
- [5] Li Y H. *Theory and Technology of Laser Shock Processing*[M]. Beijing: Science Press of China, 2013.

- 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] Zhang Y K. The key issue and application prospect of laser shock processing industrialization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3): 74–77.
张永康. 激光冲击强化产业化关键问题及应用前景[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3): 74–77.
- [7] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. Acoustic wave detection of laser shock peening[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(9): 180016.
- [8] Ma Z X, Guo X W. Methods of monitoring laser shock peening for aviation engine blade[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, **37**(10): 81–86.
马泽祥, 郭兴旺. 航空发动机叶片激光冲击强化质量的评估方法[J]. *无损检测*, 2015, **37**(10): 81–86.
- [9] Takata T, Enoki M, Chivavibul P, et al. Acoustic emission monitoring of laser shock peening by detection of underwater acoustic wave[J]. *Materials Transactions*, 2016, **57**(5): 674–680.
- [10] Li W L, Yu L, Wang X G. Test of residual stress by hole drilling strain method[J]. *Wisco Technology*, 2013, **51**(6): 55–59.
李未龙, 余立, 汪选国. 小孔法测量残余应力[J]. *武钢技术*, 2013, **51**(6): 55–59.
- [11] Chen H N, Tang Y D. Fem analysis of stress-strain for measuring residual stresses with blind-hole method[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 1993, **15**(3): 21–24.
陈怀宁, 唐延东. 小孔法测量残余应力的应力—应变有限元分析[J]. *机械强度*, 1993, **15**(3): 21–24.
- [12] Zhang D Q. Basic knowledge of stress determination by x-ray—lecture No.1 basic concept of residual stress[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part: A Physical Testing)*, 2007, **43**(4): 211–213.
张定铨. X射线应力测定基本知识第一讲残余应力的基本概念[J]. *理化检验-物理分册*, 2007, **43**(4): 211–213.
- [13] Zhang D Q. Basic knowledge of residual stress determination-lecture No. 2 basic concept of stress determination by X-ray[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part: A Physical Testing)*, 2007, **43**(5): 263–265.
张定铨. 残余应力测定的基本知识 第二讲 X射线应力测定的基本原理[J]. *理化检验-物理分册*, 2007, **43**(5): 263–265.
- [14] Yang J F, Zhou J Z, Feng A X. Non-destructive detection of the effect of laser shock processing[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, **35**(5): 160–162.
杨建风, 周建忠, 冯爱新. 激光冲击强化效果的无损检测[J]. *机床与液压*, 2007, **35**(5): 160–162.
- [15] Zou S K, Cao Z W, Yang H L. Natural frequency test of turbine blades in laser shock processing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, **21**(6): 648–651.
邹世坤, 曹子文, 杨贺来. 激光冲击处理发动机叶片的固有频率测试[J]. *中国机械工程*, 2010, **21**(6): 648–651.
- [16] Zhao R, Xu R Q, Shen Z H, et al. Dynamics of laser-induced shock wave by optical probe in air[J]. *Optik*, 2006, **117**(7): 299–302.
- [17] Aguilera J A, Aragón C. Characterization of laser-induced plasma during its expansion in air by optical emission spectroscopy: observation of strong explosion self-similar behavior[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2014, **97**: 86–93.
- [18] Bian B M, Chen J P, Yang L, et al. The transmission characteristic of airborne laser plasma shock wave[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(3): 445–448.
卞保民, 陈建平, 杨玲, 等. 空气中激光等离子体冲击波的传输特性研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(3): 445–448.
- [19] Bian B M, Yang L, Chen X, et al. Study of the laser-induced plasmas and the kinematics of shock waves in air by a way intense explosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(4): 809–813.
卞保民, 杨玲, 陈笑, 等. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(4): 809–813.
- [20] Michael D B, David M R, Won S U, et al. Real time laser shock peening quality assurance by natural frequency analysis: 6914215[P]. 2005-07-05.
- [21] Liang J M, Yang H L, Zou S K. The processing monitor for aero-engine blades' laser shock processing[J]. *New Technology & New Process*, 2008(2): 82–84.
梁建民, 杨贺来, 邹世坤. 叶片激光冲击强化处理的过程监测[J]. *新技术新工艺*, 2008(2): 82–84.
- [22] Yang H L, Liang J M. Research on the quality inspection for blades' laser shock processing[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2010, **16**(1): 37–40.
杨贺来, 梁建民. 叶片激光冲击强化处理质量检测技术研究[J]. *天津城市建设学院学报*, 2010, **16**(1): 37–40.
- [23] Wu B, Wang S 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): 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.
- [24] Wang F. Experimental studies on quality assurance of laser shock processing by the amplitude and time-of-flight of the shock wave in air[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
王飞. 基于空气中冲击波幅值和飞行时间的激光冲击强化在线检测试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [25] Qiu C L, Cheng L, He W F. A condition monitoring method for laser peening based on the correlation between the adjacent aata[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, **36**(4): 139–143.
邱辰霖, 程礼, 何卫锋. 一种基于数据间相关性的激光喷丸声学监测技术[J]. *振动与冲击*, 2017, **36**(4): 139–143.
- [26] Qiao H C, Zhao J B. Design and implementation of online laser peening detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(7): 071401.
乔红超, 赵吉宾. 激光冲击强化在线检测系统设计及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(7): 071401.
- [27] Shen G T, Geng R S, Liu S F. Parameter analysis of acoustic emission signals[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, **24**(2): 72–77.
沈功田, 耿荣生, 刘时凤. 声发射信号的参数分析方法[J]. *无损检测*, 2002, **24**(2): 72–77.
- [28] Bacon D F, Konuru R, Murthy C, et al. Thin locks: featherweight synchronization for Java[J]. *ACM SIGPLAN Notices*, 2004, **39**(4): 583–595.

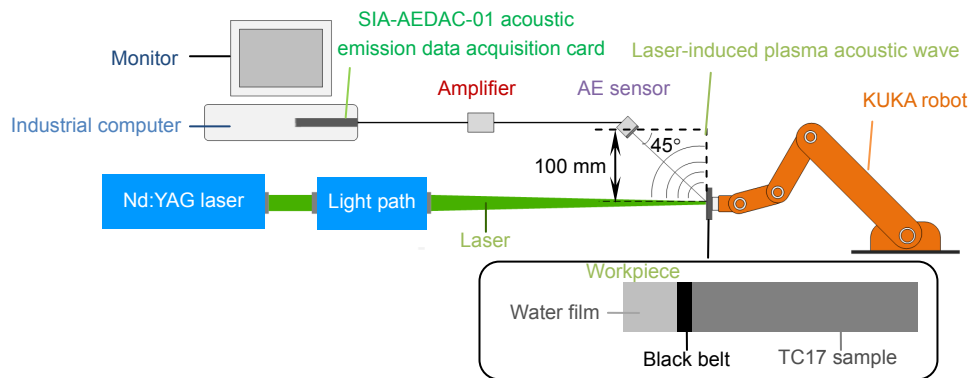
The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal

Liu Xuejun^{1,3}, Wu Jiajun^{1,2}, Qiao Hongchao^{1,2*}, Zhao Jibin^{1,2},
Li Changyun³, Zhang Yinuo^{1,2}, Wan Lanjun³

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

³School of Computer, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China



The diagram of experimental device

Overview: Laser shock processing (LSP) is an innovative surface treatment technique. It involves irradiation of the thin opaque coating layer with high-energy short-width laser pulses causing instantaneous vaporization of the surface layer into high-temperature high-pressure laser-induced plasma. The expansion of the laser-induced plasma generates high speed compressive shock waves that propagate into the components. Then the metal material is plastically deformed and generates compressive residual stress in the surface. The surface residual compressive stress is generally used to evaluate the effect of the process of LSP. The main methods of measuring surface residual compressive stress are off-line and low efficiency. It is necessary to develop the non-destructive online detection technology of LSP. The correlation analysis showed the laser-induced plasma acoustic waves can comprehensively reflect the parameter characteristics in the process of LSP. The analysis and extraction of the characteristics of acoustic wave can be used for real-time online detection of the LSP. The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal based on SIA-AEDAC-01 acoustic emission acquisition card is developed in this work to realize the online detection of LSP. Firstly, the laser-induced plasma acoustic wave signal propagating in air is collected and its energy is obtained by the software system. The residual stress of the test pieces after the treatment of LSP was measured by an X-ray stress analyzer to verify the reliability. The experimental results show that the laser-induced plasma acoustic wave signal can be collected and analyzed in real-time by the software system which can accurately get the acoustic signal energy. At the same time, both the acoustic wave signal energy and the surface residual stress of the test pieces are increased with the laser energy, and their change curve is consistent. In conclusion, the software system can satisfy the requirements of online detection of LSP with accurate and reliable performance.

Citation: Liu X J, Wu J J, Qiao H C, *et al.* The real-time acquisition and analysis software system for laser-induced plasma acoustic wave signal[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180534

Supported by NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259), National Natural Science Foundation of China (51501219), National Key Development Program (2016YFB1192704), and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAF08B01-01)

* E-mail: hcqiao@sia.cn