

# 基于空气中冲击波信号能量的 激光冲击强化在线检测方法

吴嘉俊<sup>1,2,3</sup>, 刘学军<sup>1,4</sup>, 赵吉宾<sup>1,2</sup>, 乔红超<sup>1,2</sup>, 孙博宇<sup>1,2</sup>, 陆莹<sup>1,2</sup>, 郭跃彬<sup>5</sup>

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110016; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.湖南工业大学, 株洲 412007; 5.阿拉巴马大学, 美国 塔斯卡卢萨 AL 35486)

**摘要:** **目的** 为克服激光冲击强化现有离线检测方法的缺点, 提出了一种基于空气中冲击波信号能量的激光冲击强化在线检测方法。**方法** 利用波长为 1064 nm、脉宽为 14 ns、单脉冲能量为 5~7 J 的 Nd:YAG 激光器对经过振动时效处理的 TC16 钛合金试件进行激光冲击强化处理。用自主研发的信号放大器对空气中的冲击波信号进行一级放大后, 再经前置放大器、数据采集卡传输到计算机控制系统, 从而实现对空气中冲击波信号的采样、存储、滤波和数据分析, 并从中提取冲击波信号能量。用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量 TC16 钛合金试件经激光冲击强化处理后的表面残余应力。最后对所得实验数据进行多项式拟合, 以获得材料表面残余压应力与冲击波信号能量之间的经验公式。**结果** 经激光冲击强化处理后, 材料表面形成了一定大小的残余压应力。随着激光能量的增加, 材料表面残余压应力及冲击波信号能量均增加, 且二者的增加趋势一致。**结论** 在激光冲击强化过程中, 对空气中传播的冲击波信号进行采集和提取其信号能量, 可以预测试件经激光冲击强化处理后的残余应力, 能够准确判断激光冲击强化质量, 从而实现工业过程的在线检测。

**关键词:** 激光冲击强化; 冲击波; 信号能量; 激光能量; 残余应力; 在线检测

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0100-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.012

## Online Detection Method of Laser Shock Peening Based on Shock Wave Signal Energy in Air

WU Jia-jun<sup>1,2,3</sup>, LIU Xue-jun<sup>1,4</sup>, ZHAO Ji-bin<sup>1,2</sup>, QIAO Hong-chao<sup>1,2</sup>,  
SUN Bo-yu<sup>1,2</sup>, LU Ying<sup>1,2</sup>, GUO Yue-bin<sup>5</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 5. University of Alabama, Tuscaloosa AL 35486, USA)

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2019-07-28

Received: 2019-01-04; Revised: 2019-07-28

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

**Fund:** NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259), National Natural Science Foundation of China (51501219), National Key Development Program (2016YFB1102704), and National Science and Technology Support Program (2015BAF08B01-01)

作者简介: 吴嘉俊 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光加工。

**Biography:** WU Jia-jun (1992—), Male, Doctoral student, Research focus: laser processing.

通讯作者: 赵吉宾 (1970—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光加工。邮箱: jbzhaoh@sia.cn

**Corresponding author:** ZHAO Ji-bin (1970—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: laser processing. E-mail: jbzhaoh@sia.cn

**ABSTRACT:** The work aims to propose an online detection method of laser shock peening based on shock wave signal energy in air to overcome the existing disadvantages of offline laser shock peening detection methods. The TC16 titanium alloy samples after the treatment of vibration stress relief were treated by Nd:YAG laser with a wavelength of 1064 nm, pulse width of 14 ns and pulse energy of 5~7 J. The shock wave signals in air were first amplified by the signal amplifier that independently developed by our research group, then transmitted to the computer control system through the preamplifier and the data acquisition card successively. So the sampling, storage, filtering and data analysis of shock wave signals in air were realized, then the shock wave signal energy was extracted. The surface residual stress of TC16 titanium alloy samples after the treatment of laser shock peening were measured by the X-350A X-ray stress tester. Finally, according to the obtained experimental data, an empirical formula between the surface residual stress of the material and the shock wave signal energy was obtained by polynomial fitting. The experimental results shown that after treatment of laser shock peening, there are a certain amount of residual compressive stress was formed on the surface of the material. At the same time, both the surface residual stress and shock wave signal energy were increased with the increases of laser energy, and their growth trends are consistent. In conclusion, during the process of laser shock peening, by collecting the shock wave signals propagating in air and extracting the shock wave signal energy, the residual stress of materials can be predicted and the quality of laser shock peening can be judged accurately, which will realize the online control of industrial process.

**KEY WORDS:** laser shock peening; shock wave; signal energy; laser energy; residual stress; online detection

随着我国高端装备制造业的发展,人们对材料的使用性能提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。表面改性技术在提高材料使用性能方面有着重要作用,然而喷丸<sup>[3-4]</sup>、滚压<sup>[5]</sup>等传统工艺因引入的残余应力层浅、形成困难等因素,逐渐不能满足制造的要求。激光冲击强化(laser shock processing/peening, LSP)因能够引入更深的残余压应力层(可达 1~2 mm)和各种工艺参数可控等优势,很好地解决了以上问题<sup>[6]</sup>。

激光冲击强化又名激光喷丸,是一种利用冲击波对材料进行强化的先进表面技术,在航空航天材料的表面强化领域有着广泛应用<sup>[7]</sup>。其原理为激光器输出脉冲激光辐射到金属表面的吸收层上,吸收层快速吸收激光能量,形成高温、高压且不断膨胀的等离子体,等离子体在材料表面区域形成冲击波压力,由于受到约束层的限制,冲击波向零件内部传播并带动质点运动,在极短时间内使其发生塑性变形,如图 1 所示<sup>[8-9]</sup>。

由于冲击波压力远超过材料的动态屈服极限,波后质点不能回到原位置,在零件近表面形成一定深度的残余压应力场,同时伴随位错、孪晶等微观组态的改变,使得材料表层组织的力学性能得到改善,从而提高材料的耐腐蚀、抗疲劳、耐磨性等相关性能<sup>[10-12]</sup>。

对金属材料进行激光冲击强化处理,其宏观特征为在表面产生一定的塑性变形,从而形成一定数值的残余应力,并使表面显微硬度得到提高,其内层微观特征则表现为高密度位错和晶粒细化<sup>[13]</sup>。这些变化综合反映了金属材料的激光冲击强化质量。材料表面发生的晶粒细化,能够产生有利于表面的残余压应力,残余压应力层能够有效消除金属材料在加工过程中产生的有害拉应力,同时能够有效抑制疲劳裂纹的萌生与扩展,并提高材料抗应力腐蚀性能和疲劳寿命等<sup>[14-15]</sup>。因此,材料表面的残余应力对激光冲击强化效果起决定性作用,可采用残余应力的大小来评估激

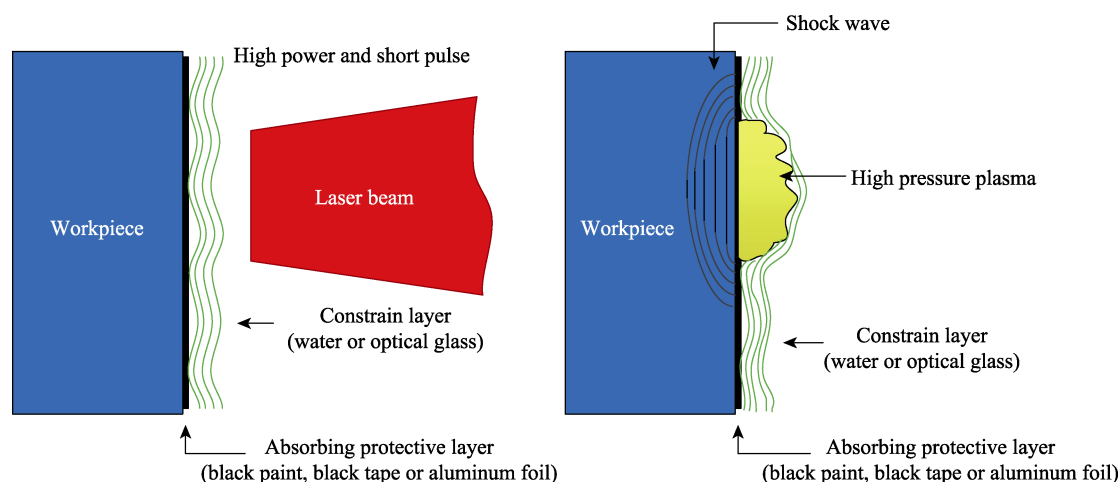


图 1 激光冲击强化原理<sup>[12]</sup>  
Fig.1 Schematics of laser shock peening<sup>[12]</sup>

光冲击强化的效果<sup>[16]</sup>。残余应力的测量主要采用离线的方式,如钻孔法<sup>[17]</sup>和 X 射线衍射法<sup>[18]</sup>等,但这些方法效率低下,不利于推动大规模的工业化应用和生产<sup>[19]</sup>。为此,人们迫切希望开发激光冲击强化无损在线检测技术。美国 GE 公司提出了一种声信号固有频率移动<sup>[20]</sup>的测试方法,通过测量强化过程中材料固有频率的改变值来预测材料表面残余应力。杨贺来等<sup>[21]</sup>通过激光冲击强化航空发动机叶片固有频率实验研究,发现材料表面残余压应力与固有频率变化值基本呈正相关关系,但相关性并不明显。吴边等<sup>[22]</sup>利用 PVDF 压电传感器对强化过程中引发的冲击波压力进行实时监测,得到激光诱导冲击波峰值压力在金属材料中呈指数型衰减的规律,但由于 PVDF 薄膜在使用多次后容易失效,不适合在大规模生产中应用,此外,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<sup>[23]</sup>。以上研究推动了激光冲击强化在线检测技术的发展,但离实际的工业应用还有一定的差距。

本文以传播在空气中的冲击波信号为研究对象,提出了一种基于空气中冲击波信号能量的激光冲击强化在线检测方法。该方法环境适应性好、检测数据稳定可靠,能够满足激光冲击强化设备全速运行要求。本研究所得结论对激光冲击强化在线检测技术的发展具有重要意义。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验选取的材料为 TC16 钛合金板片,试件规格大小为 20 mm×20 mm×2 mm,其化学成分详见表 1。实验前需要将实验试件在 HY4050 毫克能应力消除设备上处理 5 min,以消除试件表面残余应力,其中振动时效处理参数为:频率 40 kHz,输出振幅 50  $\mu\text{m}$ 。再用无水乙醇清洗并用氮气吹干,在其表面粘贴一层 100  $\mu\text{m}$  厚的黑色胶带作为吸收保护层。

表 1 TC16 钛合金化学成分  
Tab.1 Chemical element composition of TC16 titanium alloy

Chemical composition	Ti	Al	Mo	V	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Other
Content/%	Bal.	2.2~3.8	4.5~5.5	4.0~5.0	≤0.10	≤0.25	≤0.15	≤0.30	≤0.15	≤0.05	≤0.012	0.40

### 1.2 实验装置

实验装置主要由激光冲击强化系统和冲击波信号检测系统两部分组成。激光冲击强化系统主要包括 Nd:YAG 激光器、机器人、夹具、工件、供水系统、水槽等;冲击波信号检测系统主要包括信号采集器、声发射传感器、前置放大器、数据采集卡和计算机等。

实验装置示意图如图 2 所示。实验采用本单位自主研制的 SIA-LSP-2 型激光冲击强化设备。Nd:YAG 激光器的脉冲能量最大值为 7 J,波长为 1064 nm,激光脉宽为 12~18 ns,重复频率为 0、0.25、0.5、1、2 Hz;从激光器输出的  $\phi 22\text{ mm}$  的激光束经全反射与聚焦透镜后,在工件表面形成  $\phi 3\text{ mm}$  的光斑。信号采集器为本实验室自主研发,型号为 SIA-S-L1801,将其放

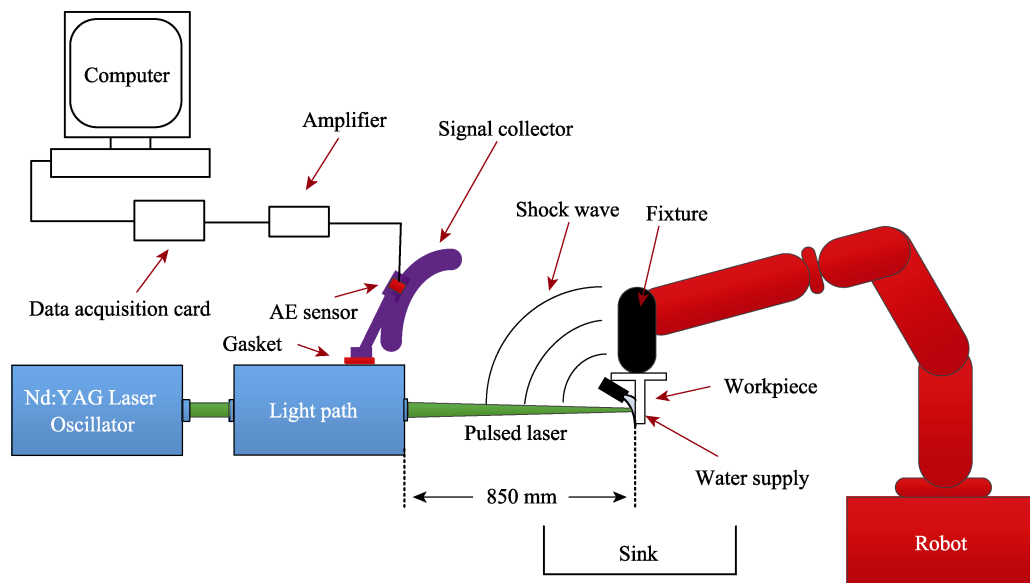


图 2 实验装置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of experimental device

置在光路平台上, 内部结构经过机械滤波处理。该装置可对采集的冲击波信号进行放大, 其信号接收面中心点与强化区域的水平距离为 850 mm (与激光焦距相等), 倾斜角为 27°, 在信号采集器的安装过程中, 需要在信号采集器底座与光路平台之间垫一层垫片, 以阻止或减弱地面振动, 达到降噪的目的。声发射传感器型号为 PXR15, 前置放大器型号为 PXPA2, 数据采集卡型号为 PXDAQ16172G。其中声发射传感器镶嵌在信号采集器里面, 声发射传感器通过低噪音信号线与前置放大器进行连接, 前置放大器通过同轴电缆与数据采集卡进行连接, 数据采集卡通过网络信号线与计算机进行连接。

本次实验所采用的激光参数为: 脉冲宽度  $\tau$  为 14 ns, 光斑直径  $d$  为 3 mm, 重复频率为 1 Hz, 激光能量  $E$  为 5~7 J。激光功率密度计算公式如式(1)所示:

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为激光功率密度。表 2 为不同激光能量对应的激光功率密度。

表 2 不同激光能量对应的激光功率密度

Tab.2 Laser power intensity under different associated laser energy

Laser energy/J	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0
Laser power intensity/ (GW·cm <sup>-1</sup> )	5.05	5.46	5.86	6.27	6.67	7.08

采用 100  $\mu\text{m}$  厚的黑胶带作为吸收保护层, 采用水流作为约束层, 水膜均匀且厚度为 1.2 mm。采取 3×3 光斑分布, 采用蛇形路径冲击, 光斑搭接率为 25%, 具体路径由 KUKA 六轴联动机器人实现。

在激光冲击强化过程中, 强化区域产生的冲击波向空气中传播, 用信号采集器采集冲击波信号, 冲击波在采集器接收端充分振动, 信号得以放大和准确接收。采集的信号经前置放大器得到进一步的放大, 并由数据采集卡对其进行采样并存储。对采集到的冲击波信号进行数字滤波和数据分析后, 从中提取每一次冲击强化作用的冲击波信号能量。在实验过程中, 声发射通道的触发方式选择为通道独立触发; 采集模式为多个采集器独立采集, 且不同步; 前置放大增益为 40 dB, 电压 28 V; 板卡增益为 0 dB; 门槛类型为固定类型 (28 dB), 浮动门宽为 6; 模拟滤波器设置为高通 1 K、低通 200 K; 数字滤波器设置为高通无、低通无; 波形设置为采样率 2 M, 预触发 0, 长度 1 K; AE 定时参数设置为 PDT200、HDT800、HLT1000  $\mu\text{s}$ , 最大持续时间 100 ms。

采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪对强化后的 TC16 钛合金试片进行表面残余应力测试, 应力测试方法为同倾固定  $\psi$  法 ( $\pm 20^\circ$ , 平均取 7 个  $\psi$  角), 采用 Cu 靶, 通过 Ni 过滤片获得  $K\alpha$  射线 (波长为

1.5406 nm), 准直管直径为 2 mm, 测试电流设定为 25 mA, 测试电压设定为 30 kV, 衍射晶面为  $\alpha$  相的 Ti{213}, 衍射角  $2\theta$  范围为  $139^\circ \sim 145^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 连续波形图

由自主研发的冲击波信号采集系统对激光强化过程中传播在空气中的冲击波信号进行测试, 获得的代表性连续波形图如图 3 所示。从图中可以看出, 单次冲击的冲击波信号呈脉冲振荡衰减特征, 脉冲激光每冲击强化材料一次, 产生一个振荡衰减信号波形。由于本次实验激光工作频率为 1 Hz, 即每隔 1 s 激光冲击强化作用材料一次, 产生一个振荡衰减信号, 图中信号之间的时间间隔为 1 s, 与实验工作频率设置相吻合, 说明本文所测得的冲击波信号准确。根据获取的连续波形图, 计算机控制系统从中提取每一次冲击的冲击波信号能量的大小为冲击波信号包络线下的面积, 其计算公式如式 (2):

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

式中,  $E_A$  为冲击波信号能量,  $t_1$ 、 $t_2$  分别为冲击波信号 (单帧) 超过阈值电压的起始、终止时刻,  $V_{\text{rms}}$  为均方根电压,  $V_{\text{ms}}$  为均方电压。冲击波信号的  $V_{\text{ms}}$ 、 $V_{\text{rms}}$  定义如式 (3)、(4) 所示:

$$V_{\text{ms}} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \quad (3)$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_{\text{ms}}} \quad (4)$$

其中,  $\Delta T$  为平均时间,  $V_{(t)}$  为随时间变化的信号电压。

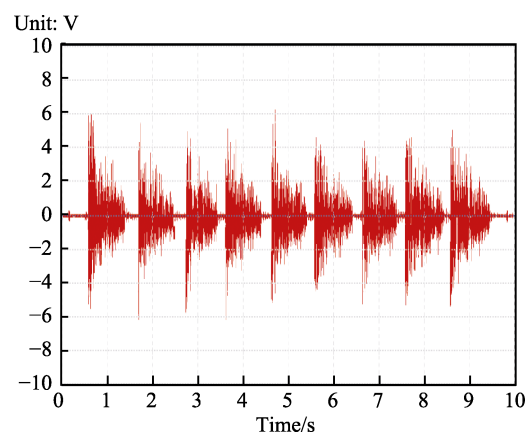


图 3 空气中冲击波信号的连续波形图  
Fig.3 Continuous waveform diagram of laser induced plasma shock wave in air

### 2.2 冲击波信号能量

在不同激光能量下, 提取出不同冲击点 (次) 中的冲击波信号能量, 各点冲击波信号能量分布如图 4



所示。从图中可以看出,冲击波信号能量随着激光能量的增加而增加,在相同的激光能量下,不同冲击点处的冲击波信号能量在较小范围内波动。

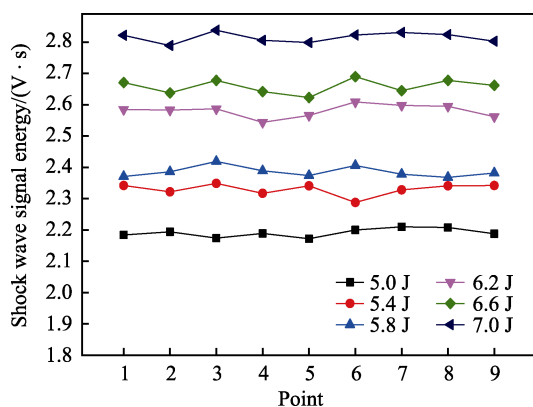


图4 各点冲击波信号能量分布  
Fig.4 Distribution of shock wave signal energy in different points

对不同激光能量下的冲击波信号能量求取平均值后,得到冲击波信号能量随激光能量的变化曲线,如图5所示。当激光能量增加到5 J时,冲击波信号能量约为2.191 V·s;当激光能量增加到7 J时,冲击波信号能量约为2.815 V·s。

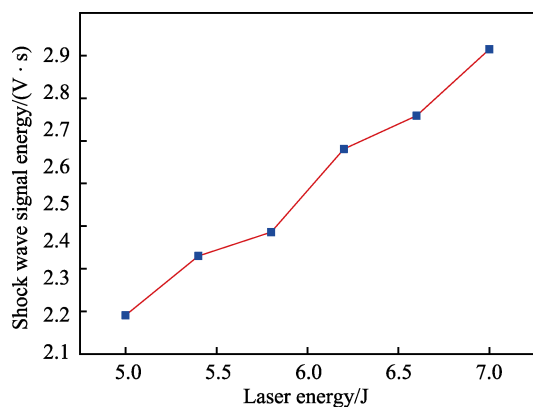


图5 冲击波信号能量随激光能量的变化  
Fig.5 Variation of shock wave signal energy as a function of laser energy

## 2.3 表面残余应力

图6为材料表面残余应力随激光能量的变化曲线。从图中可以看出,经激光冲击强化处理后,试件表面产生了残余压应力,且试件表面残余压应力随激光能量的增加而增加:当激光能量增加到5 J时,试件表面残余应力约为-319 MPa;当激光能量增加到7 J时,试件表面残余应力约为-426 MPa。

在激光冲击强化过程中,激光与金属材料表面发生相互作用,当激光功率密度超过1 GW/cm<sup>2</sup>量级时,会在材料表面形成极速扩展的等离子体,进而产生GPa量级超强冲击波作用。材料在激光等离子体冲击

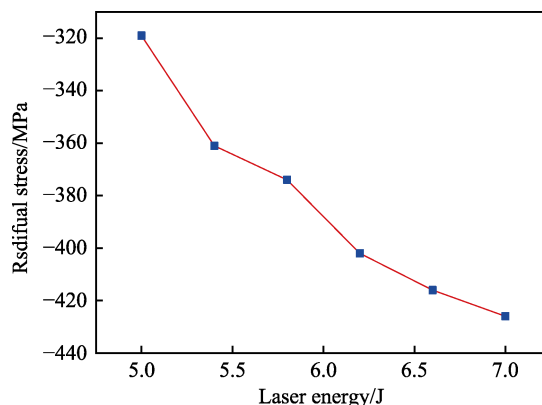


图6 材料表面残余应力随激光能量的变化  
Fig.6 Variation of surface residual stress as a function of laser energy

波的作用下产生剧烈的塑性变形,宏观上表现为材料的相互挤压,微观上则表现为晶格畸变、位错增殖、位错滑移和孪晶等。材料的这些晶体变化,在激光冲击强化作用结束后并不能完全消失,仍有部分残留在材料内不能释放,于是形成了一定大小的残余压应力。随着激光脉冲能量的增加,冲击波的瞬时冲击力增大,位错、畸变和孪晶的概率也随之增大,进而导致材料表面残余压应力随着激光脉冲能量的增加而增大<sup>[24]</sup>。

## 2.4 讨论分析

从以上研究可得,材料表面残余压应力和冲击波信号能量均随激光脉冲能量的增加而增加,且二者曲线线型一致,这为激光冲击强化在线检测技术提供了研究动向,也说明本文提出的在线检测方法可靠。

根据激光冲击强化作用原理可知,冲击波在金属材料中的传播引起材料高应变率动态响应,是材料强化的直接诱导因素,其决定了材料的表面强化质量。因此,材料激光冲击强化质量可以通过测量冲击波参数来确定<sup>[25]</sup>。冲击波在空气中的运动规律可参考Taylor自模拟理论<sup>[26]</sup>,即:

$$R = \left( k \frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5} \quad (5)$$

$$D = \frac{dR}{dt} = \frac{2}{5} \left( k \frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{-3/5} = \frac{2}{5} \left( k \frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/2} R^{-3/2} \quad (6)$$

式中:  $D$  为冲击波速度;  $R$  为冲击波波阵面的半径;  $E_0$  为爆炸总能;  $\rho_0$  为周围气体密度;  $t$  为冲击波到达  $R$  处的时刻;  $k$  是与爆炸过程有关的积分常数,其数值接近1。在本研究中,信号采集器放置为固定位置,故  $R$  为确定值。由于实验环境为室温(由实验室内环境控制系统实时控制)洁净间,故  $\rho_0$  也为确定值。因此有:

$$D \propto \sqrt{E_0} \quad (7)$$

此外,爆炸总能  $E_0$  与激光能量密度或激光能量

有确定关系<sup>[27]</sup>, 即

$$E_0 \propto E \quad (8)$$

结合式(7)、(8), 有:

$$D \propto \sqrt{E} \quad (9)$$

根据强冲击波关系式<sup>[25]</sup>:

$$p = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 (D-u_0)^2 \quad (10)$$

式中,  $p$  为冲击波压力;  $\gamma$  是比热比;  $u_0$  是冲击波波前速度, 本文  $u_0=0$ 。

$$p \propto D^2 \propto E \quad (11)$$

因此, 固定位置的信号采集器所采集到的冲击波信号参数与激光能量存在正相关关系。采用冲击波信号能量表征冲击波信号, 则有:

$$E_A \propto p \propto E \quad (12)$$

此外, 材料的表面残余应力由激光功率密度或激光脉冲能量决定, 且它们之间有着确定的关系, 在冲击波峰值压力  $P$  小于  $2.5 \sigma_{\text{HEL}}$  时, 有:

$$\sigma \propto E \quad (13)$$

式中,  $\sigma_{\text{HEL}}$  为 Hugoniot 弹性极限,  $\sigma$  为材料表面残余应力。

综合式(12)、(13)有:

$$\sigma = f(E_A) \quad (14)$$

因此, 可以通过对冲击波信号特性的分析和提取来实现激光冲击强化过程的实时在线检测, 通过冲击波信号能量来预测材料表面残余应力。

结合图 5 和图 6, 得到冲击波信号能量对试件表面残余应力的影响曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 材料表面残余应力随冲击波信号能量的增加而增加, 且增加趋势逐渐趋于平缓, 这与激光冲击强化作用本质是相吻合的。对二者进行曲线拟合, 可得到如式(15)的经验公式:

$$y=221.02x^2-1273.8x+1410.1 \quad (15)$$

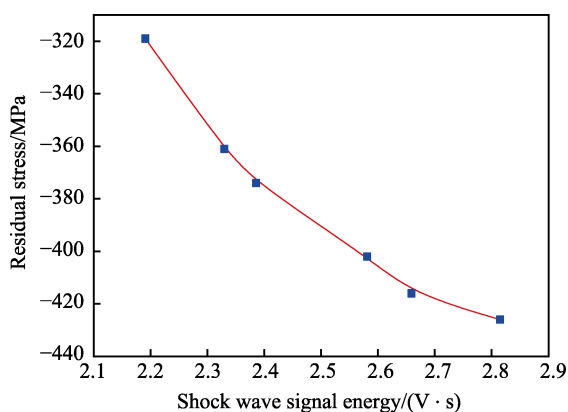


图 7 冲击波信号能量对材料表面残余应力的影响

Fig.7 Effect of shock wave signal energy on surface residual stress of the material

该公式的意义在于, 在激光冲击强化工业应用过程中, 用激光冲击强化在线检测系统对空气中传播的冲击波信号进行测量, 经过采样、存储、数字滤波和

波形数据分析, 提取冲击波信号能量, 能够预测材料表面残余应力。对于偏离曲线比较大的点, 能及时进行工艺上的更改。

由于冲击波信号能量受材料厚度、规格、化学性质及信号采集器位置等众多因素的影响, 还需要通过实验、生产经验、理论建模等多方面来进一步总结和完善关系式。此外, 还需要对本文设计的激光冲击强化在线检测系统进行集成和优化, 真正实现自动化生产, 即当进行激光冲击强化处理后, 自动得到激光冲击强化质量。

### 3 结论

通过自主研发的激光冲击强化在线检测系统对一种基于空气中冲击波信号能量的激光冲击强化在线检测方法进行了实验研究, 通过测量并提取冲击波信号能量来预测材料表面残余应力, 从而定量评估激光冲击强化效果, 得出结论如下:

1) 随着激光能量的增加, 材料试件的表面残余压应力和冲击波信号能量均增加, 且二者增加趋势一致, 表明本文研究的在线检测方法可靠, 通过多项式拟合得到表面残余应力-冲击波信号能量之间的经验公式, 为激光冲击强化质量评估和激光冲击强化在线检测技术的发展提供一定的理论参考。

2) 激光冲击强化过程中产生的冲击波信号, 经空气传播、信号采集器和前置放大器多级放大后, 得到的冲击波信号呈振荡衰减特征且波形都较为相似。

3) 由于空气中冲击波信号受众多因素的影响, 需要通过实验、生产和数学建模等进一步总结和完善关系式, 同时需要对本文设计的激光冲击强化在线检测系统进行集成和优化, 真正实现自动化生产。

### 参考文献:

- [1] GAO Y, TSE S, ZHANG D, et al. Experimental validation of the dynamic models of a high performance workpiece table under preloaded hertzian contact[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 129(1/3): 485-489.
- [2] 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.  
WU Jia-jun, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. The application status and development of laser shock processing[J]. Opto-electronic engineering, 2018, 45(2): 170690.
- [3] TORRES M A S, VOORWALD H J C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel[J]. International journal of fatigue, 2002, 24(8): 877-886.
- [4] 赵西洋, 陈晓秀, 孟海英. 喷丸强化技术在某型作动筒延寿修理中的应用[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 87-90.  
ZHAO Xi-yang, CHEN Xiao-xiu, MENG Hai-ying. App-

- lication of shot peening technology on lifetime extension repair of an actuator cylinder[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 87-90.
- [5] RATRA B, PEEBLES P J. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field[J]. Phys rev D part fields, 1988, 37(12): 3406-3427.
- [6] TRDAN U, SKARBA M, GRUM J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al-Mg-Si alloy[J]. Materials characterization, 2014, 97: 57-68.
- [7] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening[J]. Materials science & engineering A, 2006, 435(4): 12-18.
- [8] QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, ZHANG Gong-xuan, et al. Effects of laser shock peening on microstructure and residual stress evolution in Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B alloy [J]. Surface & coatings technology, 2015, 276: 145-151.
- [9] SALIMIANRIZ A, FOROOZMEHR E, BADROSSAMAY M, et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6[J]. Optics & lasers in engineering, 2016, 77: 112-117.
- [10] 曹子文, 杨清, 高宇. 激光冲击强化 TC17 钛合金室温和高温拉伸性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 85-90. CAO Zi-wen, YANG Qing, GAO Yu. Tensile properties at room and high temperature of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 85-90.
- [11] SEALY M P, GUO Y B, CASLARU R C, et al. Fatigue performance of biodegradable magnesium-calcium alloy processed by laser shock peening for orthopedic implants[J]. International journal of fatigue, 2016, 82: 428-436.
- [12] 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. LI Song-xia, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Research and development of laser shock processing technology[J]. Opto-electronic engineering, 2017, 44(6): 569-576.
- [13] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013. LI Ying-hong. Theory and technology of laser shock processing[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [14] 静永娟, 王新英, 张继. 喷丸处理对 TiAl 合金拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(5): 750-753. JING Yong-juan, WANG Xin-ying, ZHANG Ji. Effect of shot peening on tensile properties of tial alloys[J]. Chinese journal of rare metals, 2009, 33(5): 750-753.
- [15] 陆莹, 赵吉宾, 乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 119-124. LU Ying, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of tial alloy by laser shock peening[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(10): 119-124.
- [16] 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.
- [17] RENDLER N J, VIGNESS I. Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses[J]. Experimental mechanics, 1966, 6(12): 577-586.
- [18] GELFI M, BONTEMPI E, ROBERTI R, et al. X-ray diffraction debye ring analysis for stress measurement (DRAST): A new method to evaluate residual stresses[J]. Acta materialia, 2004, 52(3): 583-589.
- [19] 乔红超, 赵吉宾. 激光冲击强化在线检测系统设计与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 47-51. QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin. Design and application of laser shock strengthening online detection system[J]. Advances in laser and optoelectronics, 2013, 50(7): 47-51.
- [20] DAVIS B M, MCCLAIN R D, SUH U W, et al. Real time laser shock peening quality assurance by natural frequency analysis: US, US6914215[P]. 2005-05-07.
- [21] 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]. 天津城建大学学报, 2010, 16(1): 37-40. YANG He-lai, LIANG Jian-min. Research on the quality inspection for blades' laser shock processing[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(1): 37-40.
- [22] 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. WU Bian, WANG Sheng-bo, GUO Da-hao, et al. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy[J]. Acta optica sinica, 2005, 25(10): 1352-1356.
- [23] 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]. 江苏: 江苏大学, 2010. WANG Fei. Experimental study on on-line detection of laser shock enhancement based on shock wave amplitude and time of flight in air[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2010.
- [24] 乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1766-1773. QIAO Hong-chao, ZHAO Yi-xiang, ZHAO Ji-bin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. Optics and precision engineering, 2014, 22(7): 1766-1773.
- [25] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2005. MA Da-you. The foundation of modern acoustics theory [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [26] TAYLOR G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1950, 201: 175-186.
- [27] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. LI Wei-xin. One-dimensional unsteady constant flow and shock wave[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.