



激光冲击强化设备的开发

胡太友^{1,2}, 乔红超^{1*}, 赵吉宾¹, 陆莹¹

¹中国科学院沈阳自动化研究所机器人国家重点实验室, 沈阳 110016;

²中国科学院大学计算机与控制学院, 北京 100049



摘要: 针对目前国内激光冲击强化设备工业化程度不高的问题, 采用固定光路系统结构形式和模块化设计方法, 研制了一款激光冲击强化设备。分析了激光冲击强化设备的设计方案、激光光路布置特点以及系统控制方法, 并对激光冲击强化设备技术指标进行了测试。保持室温在 (22 ± 2) °C以内, 设备开机 20 min 后, 输出最大脉冲能量可达 25 J, 能量波动范围不超过 3%, 脉宽在 16 ns~20 ns 之间连续可调, 波动范围在 -1 ns~1 ns 以内, 光束的发散角小于 2.5 mrad, 光束指向波动小于 50 μ rad, 重复频率 0.5 Hz~5 Hz 可调, 光路系统的传输效率约为 92%, 约束层厚度均匀、且流量连续可控。测试结果表明, 激光冲击强化设备的各项性能良好。

关键词: 激光冲击强化设备; 激光器; 控制系统; 光路系统

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Development of laser shock peening equipment

Taiyou Hu^{1,2}, Hongchao Qiao^{1*}, Jibin Zhao¹ and Ying Lu¹

¹State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

²School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In view of the issue that the present domestic industrialization of laser shock peening equipment is not high, a laser shock peening equipment has been developed by using fixed optical system structure and modular design method. The design scheme of laser shock peening equipment, the characteristics of laser optical path arrangement and the system control method are analyzed, and the technical specifications of laser shock peening equipment are tested. When the room temperature stables at (22 ± 2) °C and 20 minutes after the device is switched on, the technical parameters such as the maximum output single pulse energy up to 25 J, energy instability < 3%, pulse width which can be continuously adjusted between 16 ns and 20 ns, pulse width instability < (-1 ns~1 ns), beam divergence < 2.5 mrad, beam points instability < 50 μ rad, the repetition rate of 0.5 Hz~5 Hz are achieved, the transmission efficiency of the optical system is about 92%, the thickness of the constraint layer is uniform and the flow rate is continuously controlled. The test results show that the performance of the laser shock peening equipment is good enough for industrial applications.

Keywords: laser shock peening equipment; laser; control system; optical system

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(7): 732-737

1 引言

激光冲击强化是一种新型的金属材料表面改性技

术^[1-3]。与喷丸、滚光、表面合金化等传统强化手段相比, 具有强化效果佳、可控性强, 适用性好的技术优势。激光冲击产生的冲击波使材料表面产生塑性变形, 在材料表面产生残余压应力, 从而提高金属零件的强度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命^[4-6]。

收稿日期: 2017-04-04; 收到修改稿日期: 2017-06-20

*E-mail: hcqiao@sia.cn

激光冲击强化技术的应用离不开激光冲击强化设备开发技术的发展,自20世纪60年代初第一台激光器诞生起,人们就不断拓展激光技术的应用,White^[7]于1963年首次发现脉冲激光可以在零件表面产生强冲击波使其产生塑性变形,从而引入激光冲击强化概念,直到70年代开始真正研究,90年代后开始深入研究以及针对工业化应用的激光器开发^[8,9]。时至今日,国外已经研制了一系列经典的激光冲击强化设备,如美国GE公司(通用电气公司)研发的用于加工大型薄壁件的激光冲击强化设备、MIC公司(金属改性公司)可提供现场服务的移动式激光冲击强化设备和LSPT公司(激光冲击强化技术公司)可加工齿轮等复杂结构件的一体化激光冲击强化设备,实现了发动机叶片/叶盘、机翼等飞机结构件的激光冲击强化,并成功在罗罗、普惠、GE、空客、波音等公司得到了应用^[10-12]。再如日本从2002年到2011年先后开发的一代、二代、三代激光冲击强化设备,实现了水下激光冲击强化,并应用在核电上。

我国从20世纪90年代开始进行激光冲击强化技术的研究,尽管起步较晚且遭遇国外相关技术的封锁,国内相关院所还是取得了很大的进展。如江苏大学、北京625所、西安空军工程大学先后开发的单脉冲钕玻璃激光冲击强化装置、低重复频率高能脉冲激光器和叶片激光冲击强化设备,在激光冲击强化应用方面取得了重大突破。但其与国外相比还有相当大的差距,主要表现为激光冲击强化设备性能不稳定、环境适应性差和自动化控制程度不高,难以实现工业化生产应用^[13-16]。

本文采用固定式光路系统结构和模块化设计方法研制了一款激光冲击强化设备,可以实现一次装夹完成航空发动机整体叶盘的加工,解决了国内设备普遍

存在的自动化程度低、精度低的问题。文章详细介绍了各个功能子系统的结构组成和模块间的协调工作方法,并对整体设备的性能参数进行了测试,旨在加强国内同行间的交流合作,促进我国激光冲击强化技术的快速发展。

2 设备的设计

2.1 设备整体设计方案

激光冲击强化设备主要由控制系统、高能脉冲激光器、光路整形系统、轨迹机器人、送水机器人、监控系统等模块组成,如图1所示。在控制系统的统一作用下,激光器实时输出相应参数的短脉冲高能激光束,激光束经过光路整形系统形成不同模式的激光,并且在加工面上聚焦形成相应形状、大小的高能量密度激光光斑,与此同时携带工件的轨迹机器人、送水机器人按照预先编制的程序运动,从而实现对工件指定位置指定路径的强化处理,而且设备配备有监控系统,可以监测各个子模块系统的运行状态,能够实时读取运行数据和故障报警,并形成闭环控制系统,反馈控制各个子模块系统。

2.2 激光器开发

激光器组成如图2,激光器主机配有循环水冷却系统、电源控制柜等设备,并且与工控机/PLC集成系统相连,从而实现激光器的控制。通过工控机/PLC控制可以设定激光器的工艺参数,包括激光能量、激光脉宽和重复频率。水冷系统采用非启停式制冷循环水冷却器,控温精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以调节激光器主机内部晶体的温度,使其保持温度恒定。通过调控晶体的温度,保证放大级不受热损坏,同时保证激光器输出的能量稳定。激光器主机由振荡级和放大级光学泵

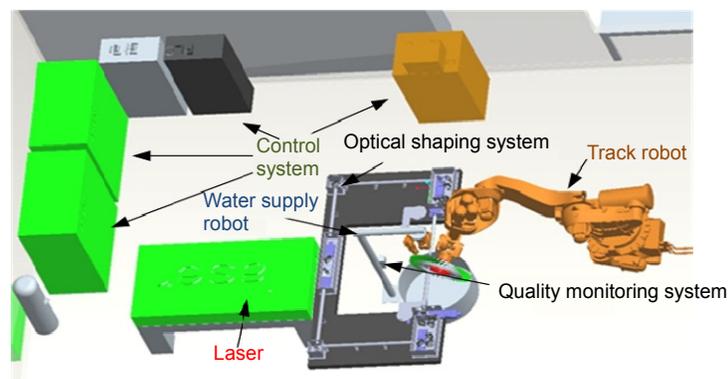


图1 激光冲击强化设备组成示意图。

Fig. 1 Diagram of laser shock peening equipment.

浦腔、谐振腔和激光晶体等元器件组成,采用脉冲放电电源供电,氙灯放电泵浦 Nd:YAG 激光晶体,电光调 Q 方式,经过 5 级放大后分束,然后经两路放大后输出,输出单脉冲能量 5 J~25 J,波长 1064 nm,脉冲宽度 16 ns~20 ns 的激光束,激光器的加工频率可设定为单点触发、0.5 Hz、1 Hz、1.5 Hz、...、5 Hz。

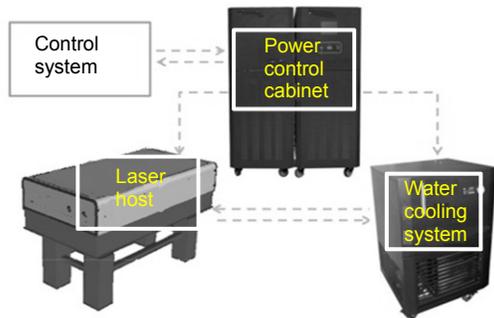


图 2 激光器组成示意图.

Fig. 2 Diagram of laser composition.

2.3 光路系统开发

激光器主机输出的脉冲激光束经过光路系统到达工件表面,光路系统最终决定了光斑的形状、大小、质量与精度,是设备的重要组成部分。如图 3 为设计的激光光束传导示意图,光路系统主要由多个全反射镜、匀光整形系统以及真空腔体组成。激光器输出的两束激光束分别由 A 出光孔和 B 出光孔输出,经过一系列 45°全反射镜,匀光整形后传输至工件的正反面。光路系统可以实现两束圆形光斑或两束方形光斑输出,进而实现工件的双面加工,光束通过反射镜 1、2 传输时,输出圆形光斑;移动反射镜 1、2,使其通过反射镜 3、4 传输整形后即可输出方形光斑,同时也可

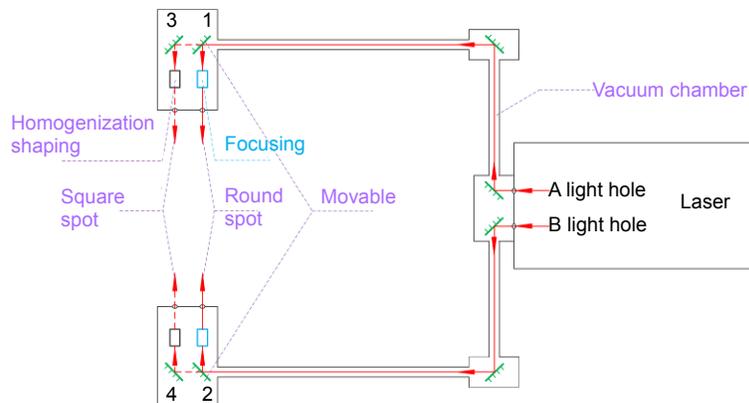


图 3 光束传导图.

Fig. 3 Diagram of beam transmission.

关闭其中的一路激光束,实现工件的单面加工。

整个光路系统封闭在一个真空腔体内,从而避免了光路系统中的镜片污染。光束系统后部设计有匀光、整形系统,其采用微透镜原理,将传输过来的圆形光束通过微透镜离散成多个小光束,然后通过聚焦镜将多个小光束叠加在一起,进而实现光束匀化。光斑的形状可通过选择微透镜的形状来选择。图 4 和图 5 显示了方形光斑的整形方法以及整形后的光强分布,结果显示,经过整形后的光斑光强分布均匀,四周边界锐利,光强平顶分布波动为 $(98\pm 2)\%$ 。采用微透镜阵列整形光束,不仅可以匀化光强,将传来的高斯分布的光束匀化成平顶分布的光束,还能够通过选择微透镜的形状来控制光斑的形状,具有操作方便、精度高的特点。

2.4 激光冲击强化设备机器人

该激光冲击强化设备中包含两个机器人,其中一个为轨迹机器人,在激光冲击强化过程中,工件固定在机器人手臂末端并相对于激光束做指定轨迹运动,从而实现对工件指定位置的强化处理;另一个为送水机器人,能够实现在金属靶材上形成厚度约为 1~4 mm(可调)的均匀稳定的水约束层,将等离子体限制在约束层和金属靶材之间。使用的轨迹机器人为六轴联动的机械臂,采用曲面插补控制实现复杂曲面加工轨迹运行,工控机接收模拟软件生成的仿真数据,在机械臂控制柜中形成常规的直线和圆弧的插补指令,又可以结合 CAD/CAE 等造型软件,对复杂曲面进行分段加工,拟合成大量运行轨迹指令,实现循环逼近。对于多维的复杂空间型面,还可采用离线技术提取其型值点,进行样条曲线拟合或拟合分段的有理多项式,

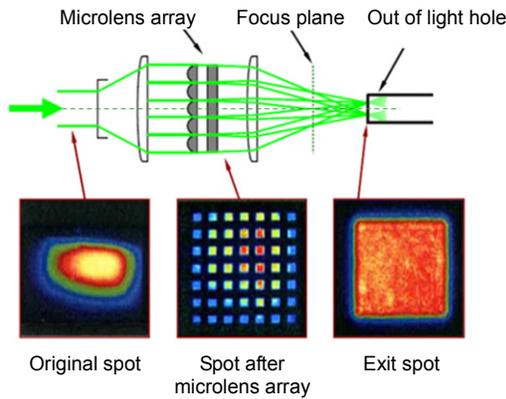


图4 方形光斑整形示意图.

Fig. 4 Diagram of square spot shaping.

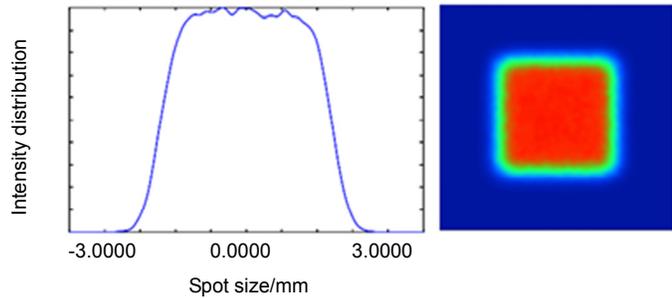


图5 方形光斑光强分布.

Fig. 5 Intensity distribution of the square spot.

采用 NURBS 插补技术实现加工。通过构建六坐标联动数控运动关系，分析三个直线运动状态和三个回转运动状态与运动合成速度的对应关系，推导合成速度计算公式与相应的单坐标速度插补计算公式，实现单点的稳速进给；根据单坐标速度的插补值，推导出相应的六轴坐标速度的插补值，实现六轴联动控制，从而确保合成运动的稳定与精度。采用这种六轴联动的控制算法，机械臂仿真与实际加工测试相结合的方式，既可以提高机械手的控制精度又能够方便地设计和修改其运动轨迹。

2.5 控制系统开发

设计采用开放式分布式控制系统，可以实现控制的数字化、自动化、实时性，通过工控机/PLC 集成控制，现场总线将激光器、轨迹机器人、送水机器人和质量监测系统等功能模块连接起来，实现各系统的信息交换和系统各部分的协同作业，并通过对系统运行状态的监测与反馈，从而避免重大故障的产生。控制系统的总体框图如图 6 所示，激光器、机器人和监测系统通过主控计算机进行通讯，从而实现激光器的参数配置、机器人的运动控制与各个模块的状态监测。激光器和机器人在主控计算机的控制下密切配合，实现激光冲击加工，且实时显示和记录激光冲击加工相关参数，从而使操作人员可以实时观测激光加工系统的当前运行数据，并分别对激光器和机器人实行监测。设计的控制管理子模块分别为数据处理模块、故障处理模块、通信模块、数据故障记录模块等，实现激光器报警、冷却水装置报警以及机器人报警功能。另外通过安装视频采集系统，向操作人员实时传输当前激光冲击加工过程的运行图像，实现无人化厂房。

控制系统工作流程如下：首先利用力学分析软件对工件进行疲劳性能受力分析，输入激光冲击强化性能指标、初始条件、边界条件、材料工艺参数，并调用具有分布式 C/S 模式的 SQL Server 后台数据库，构建残余应力分布模型，然后将其导入结构力学 CAE 分析软件，自动生成作用在工件表面的激光冲击波压力及加工运动轨迹。工控机系统根据计算出来的冲击波压力及其与激光冲击强化工艺参数之间的函数关系，自动选择并优化激光器的工艺参数，包括激光能量、激光脉宽和脉冲频率，从而完成激光器的参数配置；同时，对由轨迹规划形成的各关节角度序列，经运动学正解得到机器人位姿序列，对运动轨迹进行优化，输出轨迹信号，机器人控制柜接受 PLC 输出的激光冲击强化路径规划轨迹信号，利用离线自动编程的方式生成的程序代码输出 PLC 并通过局域网络传输给机器人，控制激光冲击的加工轨迹运动和自动聚焦。激光器和机器人在工控机的控制下密切配合，控制激光器光束各项工艺参数和机器人的运动，完成激光冲击加工过程。最后利用有限元分析软件平台中的应力应变分析模块，对激光冲击强化压力加载的应力、应变进行误差分析和参数修正，进一步指导激光冲击强化实验，确保在零件表层产生预期的残余应力分布以实现力学性能强化的要求。

本文开发的激光冲击强化设备解决了普通设备手工示教加工的问题，例如，激光束很难作用到狭窄缝隙中，一般采用加装小反射镜的方式(例如小转角激光头)使得激光束引入遮蔽部位，那么如果采用示教的方式加工，激光头或者送水头在示教的过程中很容易与零件碰撞造成表面划伤，甚至造成零件报废，而如果通过自动化的程序控制，对运动路径和空间位置通过

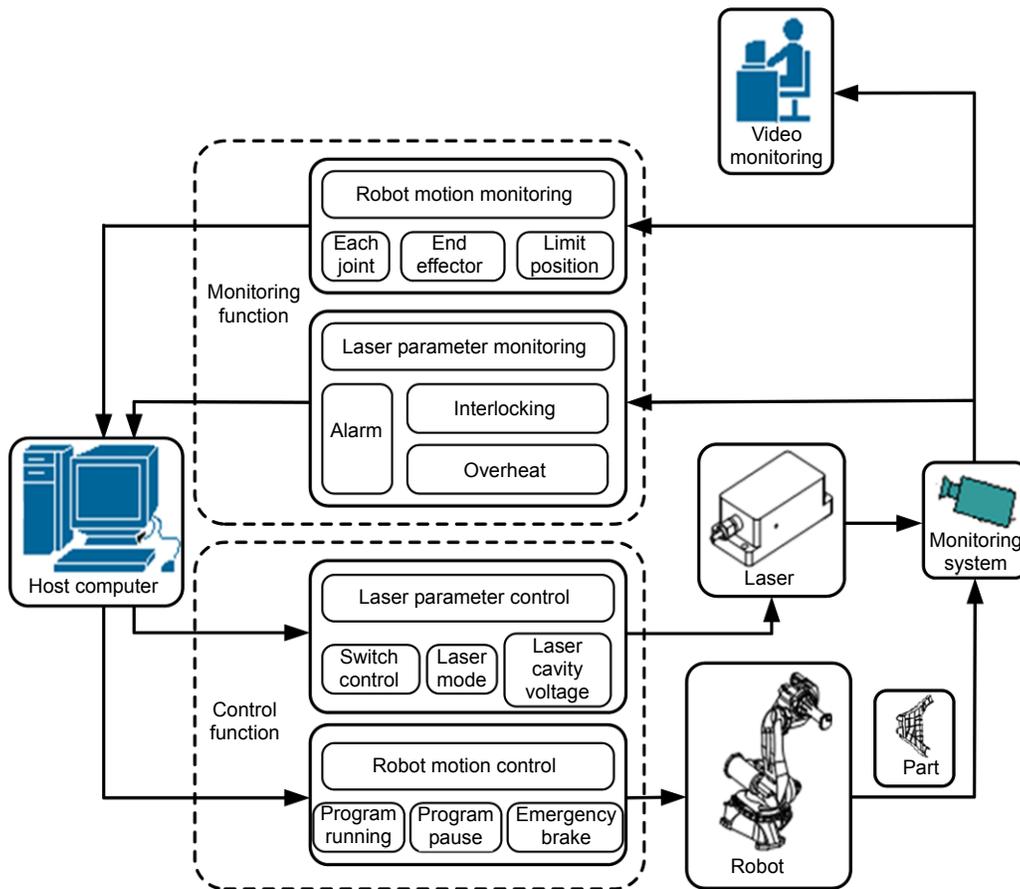


图6 控制系统.

Fig. 6 Control system.

轨迹规划、运动仿真、实时监控等功能软件模块进行保障,能够很好躲避干涉;再例如小孔结构,由于光线不好及人眼视觉偏差,人眼很难判断激光头的出光孔相对于孔内壁待加工点的精确位置,从而引入强化位置误差,而本文开发的自动化设备根据零件的数字模型可精确确定强化位置,因而定位精确、强化位置精度高;再次,采用普通的示教激光冲击强化设备适应性较差,难以快速对多种复杂结构零件进行加工,而本文开发的激光冲击强化设备,在事先获得零件的数字模型的前提下,能够快速对待加工区域进行轨迹规划离线编程,因而能够快速对各种复杂的零部件进行加工。本文开发的激光冲击强化设备和现有的激光冲击强化设备相比,其自动化程度相对较高,解决了普通设备手工示教加工的问题,使得冲击强化的路径轨迹更加精确、柔顺、精度更易保证。

3 设备的测试

开发的激光冲击强化设备如图7所示,在无尘车

间内(保持室温 20 °C~24 °C之间、湿度不大于 50%、冷却水温约为 25 °C),激光器热机 20 min 后,对设备的性能指标进行了测试。结果显示光路系统的传输效率约为 92%,输出最大脉冲能量可达 25 J,能量波动范围不超过 3%,脉宽在 16 ns~20 ns 之间连续可调,波



图7 激光冲击强化设备实物图.

Fig. 7 Photo of laser shock peening system.

动范围在-1 ns~1 ns 以内,光束的发散角小于 2.5 mrad, 光束指向波动小于 50 μ rad, 重复频率 0.5 Hz~5 Hz 可调, 约束层厚度均匀、且流量连续可控。又通过在沈阳黎明航空发动机公司的大量实践测试, 结果显示设备稳定性较好, 经激光冲击强化的航空发动机叶盘叶片的振动疲劳寿命从 2.1×10^6 提高至 2.6×10^7 , 叶尖的变形量不大于 0.032 mm, 最大残余压应力可达 400 MPa~450 MPa。

4 结论

1) 本文开发的激光冲击强化设备可以一次装夹完成航空发动机整体叶盘的强化处理, 具有精度高、自动化程度高的特点, 实现了工业应用。

2) 研制的激光冲击强化设备单脉冲最大输出能量达 25 J, 能量波动范围不超过 3%, 脉宽在 16 ns~20 ns 之间连续可调, 波动范围在-1 ns~1 ns 以内, 光束的发散角小于 2.5 mrad, 光束指向波动小于 50 μ rad, 重复频率最大 5 Hz, 光路系统的传输效率约为 92%。

3) 设计的光路整形系统不仅可以匀化光强, 还能实时调整光束模式、光斑的形状大小与位置。

4) 开发的开放式分布式控制系统, 可以实现控制的数字化、自动化、实时性控制, 并具有监控反馈功能。

5) 采用模块化设计, 设备故障率低, 设备运行安全可靠, 每一模块系统均可独立工作, 自成系统, 客户可根据需求任意选配, 便于安装, 便于调试。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51501219)。

参考文献

- Zhou Jianzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu, et al. Effects of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, **38**(9): 0903006.
周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903006.
- Li Songxia, Qiao Hongchao, Zhao Jibin, 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.
- 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 Journal of Laser*, 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
- Liu K K, Hill M R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons[J]. *Tribology International*, 2009, **42**(9): 1250-1262.
- Xu Haiying, Zou Shikun, Che Zhigang, et al. Influence of laser shock processing times on TC4 argon arc welding joint microstructure and properties[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, **38**(3): 0303002.
许海鹰, 邹世坤, 车志刚, 等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊缝微结构及性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0303002.
- Luo Kaiyu, Lu Jinzhong, Zhang Lingfeng, et al. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2010, **31**(5): 2599-2603.
- White R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption [J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, **34**(7): 2123-2124.
- Clauer A H, Fairand B P, Wilcox B A. Pulsed laser induced deformation in an Fe-3 Wt Pct Si alloy[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1977, **8**(1): 119-125.
- Fairand B P, Clauer A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, **50**(3): 1497-1502.
- Qiao Hongchao, Zhao Jibin. 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.
- Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang, et al. Experiment on delivery of megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(8): 1934-1938.
赵兴海, 胡建平, 高杨, 等. 大芯径光纤传输兆瓦级 Nd:YAG 激光脉冲实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1934-1938.
- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605-1618.
- Lee S, Yun M, Cha B H, et al. Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser with 770-W output power[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5625-5631.
- Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Lu Ying. Develop and analysis of nanosecond pulse width Nd:YAG laser for laser peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(8): 0802001.
乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 纳秒脉宽 Nd:YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析[J]. *中国激光*, 2013, **40**(8): 0802001.
- Zhang Xiaopeng, Fei Qunxing, Zhang Xiaobing. The research of hundred-nanosecond pulse width Nd:YAG laser for drilling[J]. *Applied Laser*, 2012, **32**(5): 416-419.
张晓鹏, 费群星, 张晓兵. 百纳秒脉宽 Nd:YAG 制孔激光器的研制[J]. *应用激光*, 2012, **32**(5): 416-419.
- Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Zhao Yixian, et al. Effect of laser peening on residual stress and micro-hardness of TC4 titanium alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **710**: 208-212.