

纳秒脉宽 Nd:YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析

乔红超¹ 赵吉宾¹ 陆莹^{1,2}

(¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; ² 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对近年来发展的提高工件疲劳寿命的激光冲击强化技术,采用一级谐振级 8 级放大级的系统结构和模块化设计方法,研制出了激光冲击强化用大能量、短脉宽、高频率的 Nd:YAG 脉冲固体激光器,分析了激光器的设计方案、激光光路布置特点,并对其技术指标进行了测试。在预热 20 min 后、环境温度变化小于 2 °C 的情况下,单脉冲最大输出能量达 25 J,能量不稳定性小于 3%,脉宽在 16~20 ns 范围内连续可调,脉宽不稳定性小于 ±1 ns,光束发散角不超过 2.5 mrad,重复频率达 5 Hz。为进一步验证激光器的性能,对 TC4 钛合金进行了激光冲击强化试验,大幅度提高了 TC4 钛合金试件表面的残余压应力,测试和试验结果均表明,激光器的各项性能良好。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 纳秒脉宽; 脉冲能量; 大能量激光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0802001

Develop and Analysis of Nanosecond Pulse Width Nd:YAG Laser for Laser Peening

Qiao Hongchao^{1,2} Zhao Jibin¹ Lu Ying^{1,2}

(¹ Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)
(² Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract For the laser peening technology which is a recently-developed surface treatment method designed to improve the fatigue life of mechanical parts, using a oscillation eight-stage amplified system structure and the modular design method, high-energy, short-pulse and high-frequency Nd:YAG solid-state lasers are developed. Design scheme of the laser and the characteristics of laser beam transmission are presented and discussed. At ambient temperature which changes less than 2 °C and after 20 min of warm-up, the technical parameters such as the maximum single pulse energy of 25 J, energy instability less than 3%, pulse width which can be continuously adjustable between 16 ns and 20 ns, pulse width instability less than ±1 ns, beam divergence less than 2.5 mrad, and the maximum single frequency of 5 Hz are achieved. To further verify the performance of the lasers, a TC4 titanium alloy work-piece is tested with the Nd:YAG lasers. The tested results show that the compressive residual stress is greatly improved and the performance of the lasers is excellent.

Key words laser technique; laser penning; nanosecond pulse; pulse energy; high energy laser

OCIS codes 140.3460; 140.3530; 140.3538; 140.3580

1 引言

激光冲击强化技术是近年来发展较为迅速的表面处理技术^[1-3]。激光冲击强化技术利用功率密度为 GW/cm² 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,特别是能有效

改善金属材料的抗疲劳断裂的性能^[4-6]。

激光冲击强化技术的发展离不开大能量、短脉宽、高频率的脉冲固体激光器技术的发展,比如以 Nd:glass 激光器和 Nd:YAG 激光器为代表的高能激光器在激光冲击强化领域均有应用^[7-9]。其中 Nd:glass 激光器输出的单脉冲能量可达 50 J 以上,

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-03-29

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,主要从事激光加工装备方面的研究。E-mail: hccqiao@sia.cn

但由于其散热性较差,故而重复频率较低甚至只能实现单次冲击,从而影响了激光冲击强化加工的效率,难以实现工业应用。Nd:YAG 激光器输出的单脉冲能量很难达到50 J,但其散热性相对较好,重复频率较高,适合工业应用^[10-13]。针对国外高能激光器对国内禁运和国内激光器技术相对落后的现状,本文采用一级谐振 8 级放大的系统结构和模块化设计方法,研制出了激光冲击强化用大能量、短脉宽、高频率的 Nd:YAG 脉冲固体激光器,并投入了使用。

2 激光器设计

2.1 设计方案

Nd:YAG 激光器的激光工作物质为重石结构基质钕钇氟化物(Nd:YAG)晶体,通过能级之间的粒子激发、辐射跃迁等方式实现激光输出。激光器主要由激光器主机、电源和冷却系统 3 大部分组成(如图 1 所示),其中激光器主机的外形尺寸为 1000 mm×260 mm×2000 mm。激光器主机内装有振荡级和放大级光学抽运腔、谐振腔和激光晶体等元器件,共采用了前 4 级放大,分束后各 4 级放大,最后双路合束输出激光。工作时,采用水循环冷却系统,脉冲放电电源供电、氙灯放电抽运 Nd:YAG 激光晶体,采用电光调 Q 方式,经过 4 级放大后增大到约 4 J,然后分束,经 2 路放大后每路输出 13 J,合束后输出 25 J、波长 1064 nm 的激光。

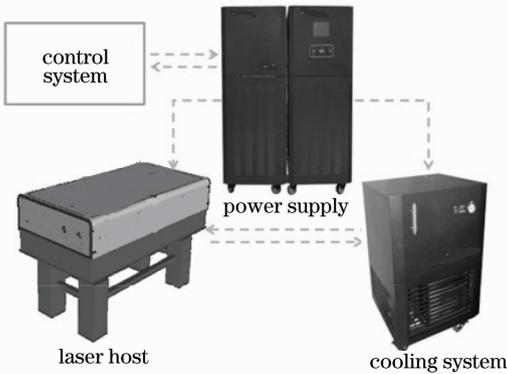


图 1 激光器组成示意图

Fig. 1 Composition schematic of laser

2.2 谐振级的设计

固体激光器激光腔的结构主要有稳定型激光腔和高斯型激光腔。其中高斯型激光腔的优势在于激光光斑聚焦性强,可以很容易地把光斑聚成微米量级大小的光斑,但其缺点为稳定性差。为了激光器长期稳定的工作,每次工作都需要一定的预热时间,通常为 8 s。为方便多种方式同步控制,实验采用稳定型

激光腔结构设计:稳定型调 Q 多模谐振级主要由 1 片后镜、1 个主动调 Q 开关、1 个偏振片、1 个 $\lambda/4$ 波片、1 个 $\Phi 6$ mm YAG 棒聚光腔、2 个 $\Phi 9$ mm×180 mm 氙灯、光闸、调 Q 开关驱动板和 1 片输出镜组成。为确保谐振级的机械稳定性,使用石墨棒组成的浮动式结构将谐振级安装在光学平台上。谐振级输出的光束具有去相干性和平顶的光斑轮廓形貌,其中最大重复频率为 10 Hz,且在 1~10 Hz 内任意调节。谐振级的照片和原理如图 2(a)和(b)所示。

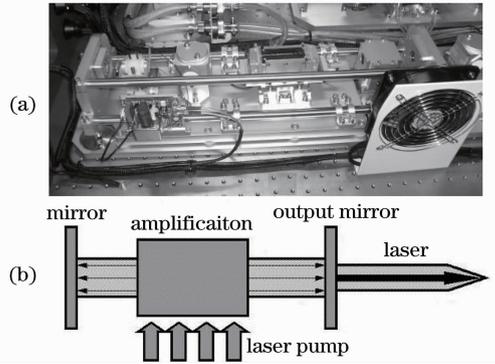


图 2 (a) 谐振级的照片; (b) 谐振级的原理图

Fig. 2 (a) Photos of oscillation; (b) schematic of oscillation

2.3 放大级光路设计

图 3 为放大级光路结构图,整个光路系统安装在带有抗电磁辐射罩的一体化铝铸件平台上。为保证平台的长期机械稳定性及对环境温度的最大不敏感度,采用自动恒温控制方法对整个平台进行温度控制,使平台温度稳定在 22 ℃左右,当温度达到 20 ℃时,激光器将保持稳定的参数输出。从图 3 中可以看出,激光器光路由 1 个谐振级和 8 个放大级组成,谐振级可输出重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 4 mJ、脉宽为 16~20 ns 的激光束,经过 8 级放大级放大后可输出重复频率为 5 Hz、单脉冲能量为 25 J、脉宽为 16~20 ns 的激光束。

在高能激光器中的光学反馈会造成频率漂移、振幅波动、带宽增宽、噪声增大以至元器件损坏,为消除光学反馈,在谐振级后方和第一级第二级放大级后方分别安装了 $\Phi 8$ mm 法拉第隔离器和 $\Phi 12$ mm 法拉第隔离器。该隔离器具有较强的磁场,当一束激光通过置于磁场中介质的时候,法拉第效应会使光束的偏振轴向顺时针偏转 45°,如果出射光再次被反射回原来介质时,光的偏振轴又被顺时针旋转了 45°,光经过隔离器之后,入射光与其二次经过旋转器的反射光偏振方向正好相差 90°。这样入口处的偏振器件就可以完全阻止反射光的透过,从而消除了光学反馈。

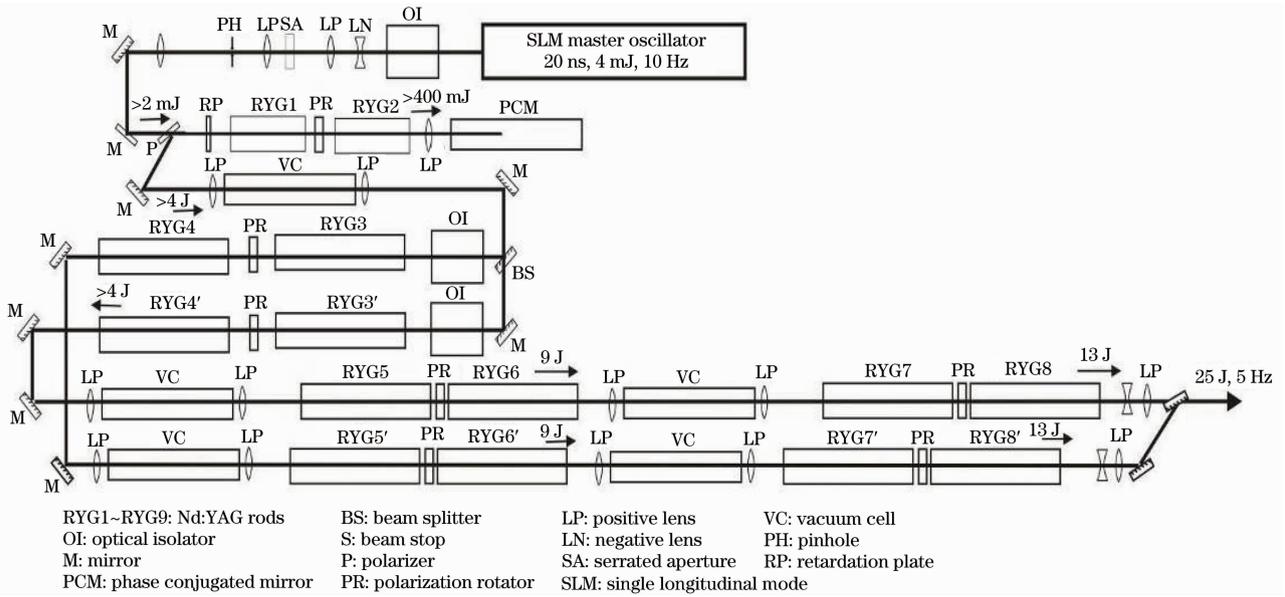


图 3 光路结构图

Fig. 3 Diagram of laser beam

光路中的锯齿光阑和圆孔光阑可以有效降低低频调制条纹的强度,得到光强分布较为均匀、填充因子较大的光束。通过整形得到光强分布相对均匀的近平顶分布光束对其在高能激光系统中各放大级间的传输非常有利,同时也有助于补偿光脉冲在介质中产生的高阶色散,从而得到较窄脉宽的脉冲激光。激光束从光阑出来后能量约为 2 mJ,然后激光束通过偏光镜进入由相位差板、 $\Phi 8$ mm Nd:YAG 棒、 $\Phi 10$ mm Nd:YAG 棒、偏振旋转器和相位共轭镜组成的第一级和第二级放大级,其中偏光镜能够让与其偏振方向同向的偏振光通过,而使与其偏振方向垂直振动的偏振光反射出去,从而使得从光阑出来的 2 mJ 激光束顺利进入第一级第二级放大级,使第一级第二级放大级输出的激光束反射进入三级放大级前的隔离器中。相位共轭镜是一种能产生入射波的相位共轭波装置,它主要是用来改善光束质量,使得散射光的发散角恢复到振荡级输出的发散角和压缩脉宽,补偿相位差元器件引起的光束波前畸变,输出高质量、近衍射极限的光束。偏振旋转器是将激光束的偏振方向旋转 90° 。相位差板是利用薄膜的相位差来对产生的折射激光束进行补偿。 $\Phi 8$ mm Nd:YAG 棒和 $\Phi 10$ mm Nd:YAG 棒在抽运灯的激励下对穿过它的激光束进行能量放大,使得从偏光镜反射出去的激光束能量达到 4 J。能量 4 J 的激光束通过分光镜分别进入放大级 RYG3 和放大级 RYG3' 中,分别通过放大级 RYG3 和放大级 RYG4、放大级 RYG3' 和放大级 RYG4' 放大,放大

后两束激光的能量均达到 4 J,然后分别通过放大级 RYG5 和放大级 RYG6、放大级 RYG5' 和放大级 RYG6' 放大,放大后两束激光的能量均达到 9 J,然后分别通过放大级 RYG7 和放大级 RYG8、放大级 RYG7' 和放大级 RYG8' 放大,放大后两束激光的能量均达到 13 J,最后两束激光通过合束镜合为一束能量为 25 J 的激光束,光斑直径为 27 mm,图 4 为激光光斑的形状和大小。在每个放大级中装有 4 个 $\Phi 9$ mm $\times 180$ mm 氙灯和 Nd:YAG 棒,从第一级到第八级中采用的 Nd:YAG 棒的直径分别为 8、10、12、17、22、24、30 mm,采用这种先分束后合束的结构设计,主要是为了减小每级 Nd:YAG 棒的直径,不仅可以节约成本还可以增大 Nd:YAG 棒的散热效率,从而使得重复频率最大能够达到 5 Hz。

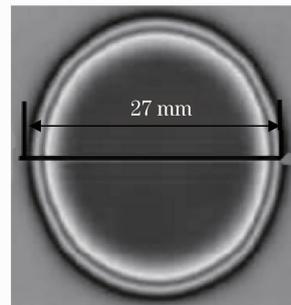


图 4 光斑形状大小

Fig. 4 Shape of spot size

2.3 其他辅助设计

激光器电源安装在带脚轮的机柜中,电源采用功率变换电路、功率开关器件和软开关工作模式,弱

电也采用了开关电源,采用触摸屏控制,图 5 为本地激光器操作控制界面,能方便调节各项参数。激光器电源带有远程通信接口,可以通过 RS232 接口或 I/O 接口实现远程控制,控制全部安全保险设施,产生所有控制谐振级和放大级的同步信号,控制调 Q 系统工作,为闪光灯提供能量。

通过调节谐振级与放大级闪光灯之间的延时或调 Q 延时可以对激光器输出的能量进行连续调节。这项工作可以通过 RS232 接口以及外部晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)信号控制完成。整个系统可以工作在外同步方式也可以工作在内同步方式。外同步

是通过图 6(a)和(b)中所展示出来的 TTL 信号来实现的,图 6(a)是闪光灯同步输入信号的特征,其中 $U_1 < 0.8 \text{ V}$ 、 $5 \text{ V} < U_h < 15 \text{ V}$ 、 $25 \mu\text{s} < t_w < 1 \text{ ms}$ 、 $t_r < 1 \mu\text{s}$,图 6(b)是调 Q 同步输入信号的特征,其中: $U_1 < 1.35 \text{ V}$ 、 $3.15 \text{ V} < U_h < 5 \text{ V}$ 、 $10 \mu\text{s} < t_w < 1 \text{ ms}$ 、 $t_r < 1 \mu\text{s}$ 。根据不同的系统架构,外同步可以通过以下方式实现:闪光灯外触发,调 Q 内触发;闪光灯内触发,调 Q 外触发;闪光灯和调 Q 都外触发。内同步模式时,图 7 展示了典型的时序图,调 Q 的输出同步信号相对于调 Q 触发信号有 $\pm 400 \text{ ns}$ 的延时,这个延时可以通过 RS232 或者控制面板进行连续的调节。

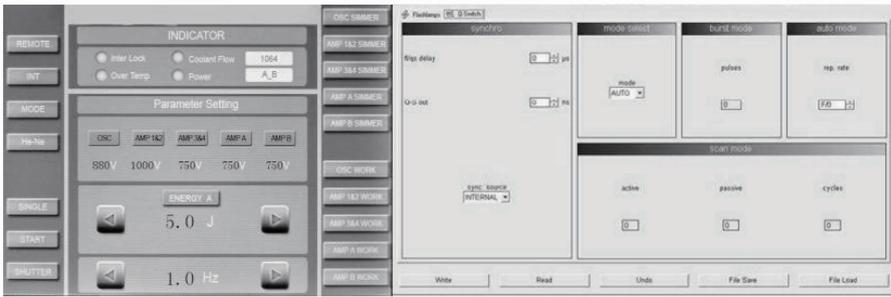


图 5 激光器操作控制界面
Fig. 5 Control interface of laser

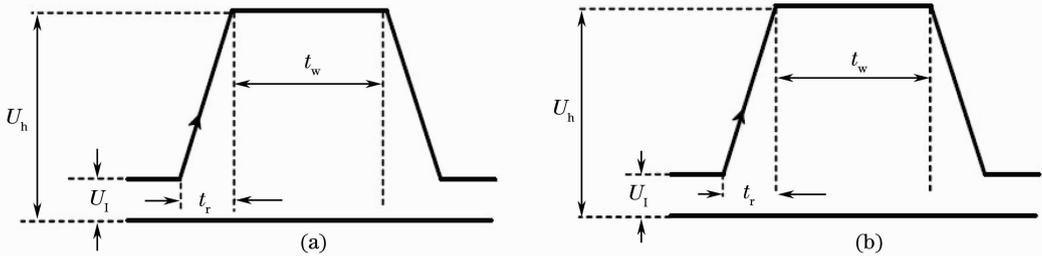


图 6 输入信号特征。(a) 闪光灯同步信号; (b) Q 开关同步信号

Fig. 6 Characteristics of input signal. (a) Flash lamp synchronization; (b) Q-switched synchronization

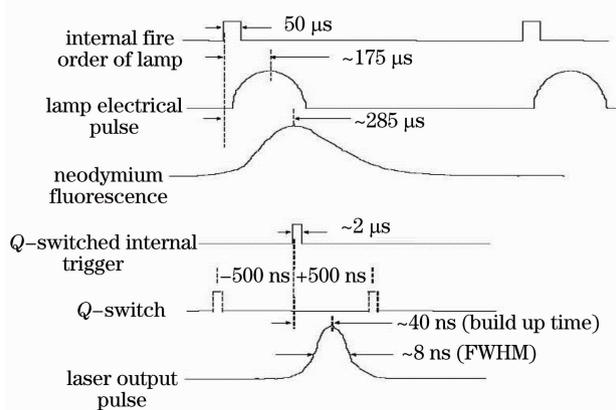


图 7 内触发时序图

Fig. 7 Automatic mode-timing diagram

激光器内部有一个闭循环的去离子水制冷系统制冷闪光灯和 Nd:YAG 棒,冷却系统采用热交换功率为 7500 W 的非启停式制冷循环水冷却器,图 8(a)为激光器冷却系统的内部结构照片,主要由散热风扇、水箱、热交换器、温度探头、过滤器、离子交换器、水流开关、水泵和压缩机等组成。冷却系统的节流装置是可调节的,另外换热系统控温是通过“热气旁路”的技术来实现的,图 8(b)为热气旁路技术原理图,控温系统控制一个节流装置,当温度高于设置温度时,该装置打开,此时从压缩机出来的高压热气通过冷凝器冷却后,进入板式换热器,吸收水中的热量,从而使水温降低;当温度低于设置值时,可调节节流装置关闭,此时从压缩机出来的高压热气不能通过冷凝器进入板式换热器,由于此时板式换热器进

出的都是热气,因而不会吸收水中的热量,即不制冷,此时处于“热气旁路”的状况。制冷系统的温度控制设备为功率仅几瓦的比例-积分-微分(PID)控温器,温度与设定温度相差越大,制冷量越大;温度与设定温度相差越小,制冷量越小,避免温度过冲现象,控温精度在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时由于采用了热气旁路技术还可以节约用电。

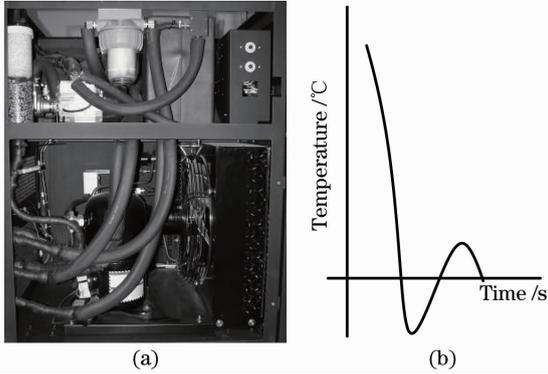


图 8 (a) 制冷系统内部结构照片; (b) 制冷系统工作原理
Fig. 8 (a) Photos of cooling system; (b) working principle of cooling system

3 激光器参数测试方法

在环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、环境湿度不超过 50%、冷却水温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行无尘实验,激光器预热 20 min 后,采用内触发和外触发的方式对激光器的参数进行测试分析,进行能量、脉宽稳定性实验分析,使激光器长期工作 4 h,记录每一个脉冲激光的能量并绘制能量波动曲线进行分析,利用感光相纸、光束质量分析仪、衰减器、示波器、光电二极管、卡尺等测试仪器测量激光束的直径、发散角、指向性、频率等参数指标。并对 TC4 钛合金进行激光冲击强化试验,测量 TC4 钛合金试件表面的残余压应力变化。图 9 为搭建的 Nd:YAG 激光器照片。利用感光相纸和卡尺反复测量光斑直径的大小,垂直



图 9 激光器照片
Fig. 9 Photos of laser system

方向为 27.1 mm ,水平方向为 26.9 mm ,光斑形状接近 $\Phi 27\text{ mm}$ 的圆,为近圆形,满足要求。利用示波器和光电二极管反复测量激光的重复频率,测得重复频率的最大值为 5.1 Hz ,最小值为 4.95 Hz ,平均值为 5.0 Hz ,满足要求。

4 试验结果及分析

4.1 能量稳定性分析

为分析输出能量的稳定性,搭建了由 FieldMax 能量计、斜梯形分光镜、计算机等组成的测试平台[如图 10(a)所示],其中斜梯形分光镜的衰减比例为 $1:31.5$ 。设定重复频率为 5 Hz 、能量为 25 J ,预热 20 min 后进行测量,并记录每一个脉冲激光的能量值。能量随时间变化的曲线如图 10(b)所示,从图 10(b)中可以看出,输出能量的平均值为 25.02 J ,最小值为 24.69 J ,最大值为 25.38 J ,输出能量不稳定性为 2.76% ,小于 3% 的设计指标,能够满足激光冲击强化加工的需要。从图 10(b)中还可以看出,曲线在起始段平滑下降,2 h 后逐渐趋于稳定,经分析认为能量的下降是因激光器工作一段时间后,激光器主机温度重新达到了一个新平衡点,从而使得光学元件的机械特性等发生了微小变化,导致各放大级的放大系数发生了变化,在后续的研究中考虑采用更精确的温度控制方法改善稳定性,例如在

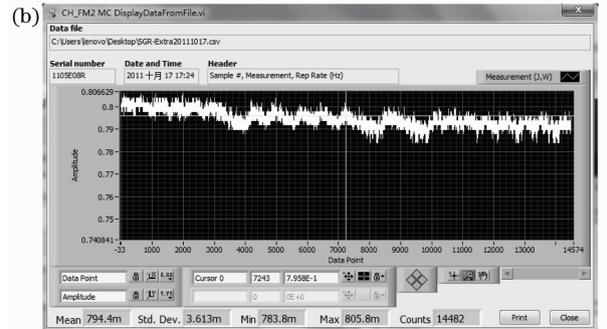
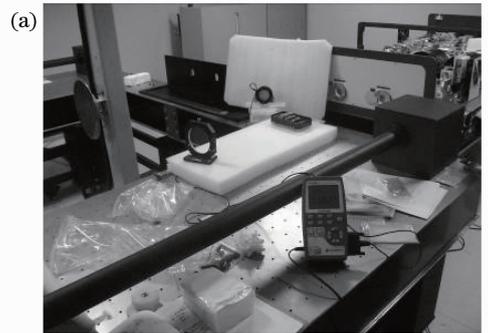


图 10 能量稳定性测试。(a) 测试平台; (b) 测试结果
Fig. 10 Energy stability test. (a) Test platform; (b) test results

平台下方进行温度补偿,使得平台上下表面的温度一致。

4.2 脉宽稳定性及光束质量分析

采用 DET10A 型光电二极管和 Tektronix 型示波器测量激光器输出激光束的脉宽,图 11 为脉宽稳定性测试结果。图 11(a)为设定值为 15.5 ns 的测试结果,从图中可以看出,经过 30 次测量的平均值为 15.34 ns,最大值为 15.59 ns,最小值为 15.1 ns,脉宽不稳定性小于 ± 0.08 ns,满足脉宽不稳定性小于 ± 1 ns 的设计要求。图 11(b)为设定值为 20.5 ns 的测试结果,从图中可以看出,经过 30 次测量的平均值为 20.52 ns,最大值为 21.53 ns,最小值为 19.55 ns,脉宽不稳定性小于 ± 0.99 ns,满足脉宽不稳定性小于 ± 1 ns 的设计要求。在 16~20 ns 的范围内,脉宽稳定性完全满足激光冲击强化加工的需要。脉冲宽度是通过调节谐振级的电压进行调节的,脉宽 16 ns 对应谐振级的电压为 950 V,脉宽 20 ns 对应谐振级的电压为 850 V,电源的稳定性和充放电的可靠性对脉宽的大小非常重要。

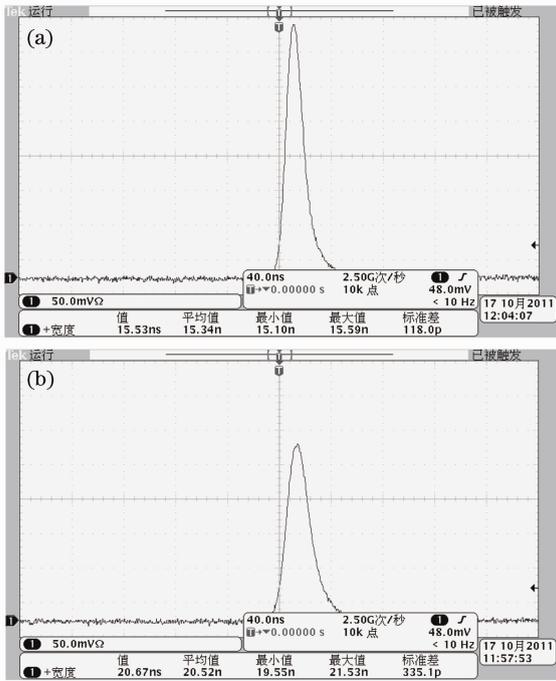


图 11 脉宽稳定性测试。(a) 15.5 ns; (b) 20.5 ns
Fig. 11 Pulse width stability test. (a) 15.5 ns; (b) 20.5 ns

采用 COHERENT 衰减器, LAERCAMER 激光光束质量分析仪对光束的质量进行了测量分析。图 12(a)为光束发散角的测量结果,光束的发散角为 2.2 mrad,满足光束发散角不超过 2.5 mrad 的要求,满足激光加工的需要。图 12(b)为光束指向

性的测量结果,光束指向稳定性小于 50 μ rad。

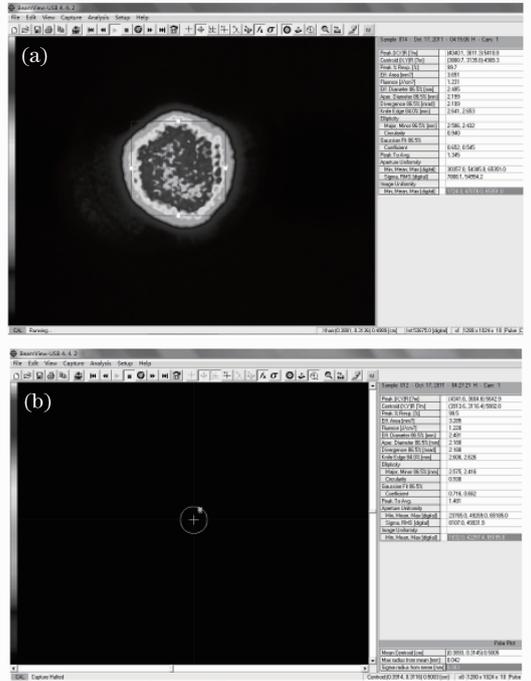


图 12 光束质量。(a) 光束发散角; (b) 光束指向性
Fig. 12 Beam quality. (a) Beam divergence angle; (b) beam pointing stability

4.3 激光冲击强化试验分析

利用研制的激光器,在中国科学院沈阳自动化研究所搭建了激光冲击强化设备,采用脉宽为 20 ns、光斑直径为 3 mm 的激光束,通过改变单脉冲能量的大小,对 TC4 钛合金进行了激光冲击强化处理,并对处理前后的表面残余应力通过 X 射线应力分析仪进行了测量。图 13 为 TC4 钛合金试件表面残余压应力随激光能量的变化曲线,从图中可以看出,随着单脉冲能量的增大,表面残余压应力增大,当脉冲能量达到 10 J 时,表面残余压应力已达到了 350 MPa 以上,表明激光冲击强化效果非常明显。

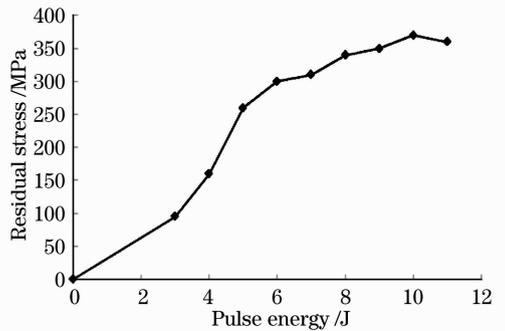


图 13 表面残余压应力与能量变化关系
Fig. 13 Surface compressive residual stresses versus pulse energy

研制的激光器完全满足激光冲击强化加工的需要。

5 结 论

研制的激光器在预热 20 min 后、环境温度变化小于 2 °C 的情况下,单脉冲最大输出能量达 25 J,能量不稳定性小于 3%,脉宽 16~20 ns 连续可调,脉宽不稳定性小于 ±1 ns,光束发散角不超过 2.5 mrad,光束指向稳定性小于 50 μrad,重复频率为 5 Hz。利用研制的激光器,对 TC4 钛合金进行激光冲击强化试验,随着单脉冲能量的增大,表面残余压应力增大,当脉冲能量达到 10 J,表面残余压应力已达到了 350 MPa 以上,表明激光冲击强化效果明显。研制的一级谐振 8 级放大纳秒脉宽 Nd:YAG 激光冲击强化激光器,能够输出高能量、高频率、窄脉宽、高稳定性的激光束,光束直径为 27 mm,满足了工业材料的激光冲击强化加工需求。随着航空航天工业、核工业和石油化工业对激光冲击强化技术的需求,为适合野外工作和满足市场需求,车载激光器或更抗噪激光器的研制将是未来激光器研究的一个重要方向。

参 考 文 献

- Zhou Jianzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu, *et al.*. Effect of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 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.
- Ren Xudong, Ruan Liang, Huangpu Yongzhuo, *et al.*. Experimental research of laser shock processing 6061-T651aluminum alloy during elevated temperature[J]. Chinese J Lasers, 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.
- 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.
- 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.
- Xu Haiying, Zou Shikun, Che Zhigang, *et al.*. Influence of laser shock processing times on TC4 argon welding joint microstructure and properties[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0303002.
许海鹰,邹世坤,车志刚,等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊焊缝微观结构及性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0303002.
- Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi, *et al.*. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603025.
张凌峰,熊毅,张毅,等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603025.
- Li Dongxue, Wang Ding, Chen Xiaowei, *et al.*. Generation of high-energy few-cycle pulses compression through a hollow-core fiber[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1939-1942.
李冬雪,王丁,陈晓伟,等. 基于空心光纤技术产生高能量周期量级脉冲压缩[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1939-1942.
- Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang, *et al.*. Experiment on delivery of megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1934-1937.
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): 1934-1937.
- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1616.
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): 1605-1616.
- S. Lee, M. Yun, B. H. Cha, *et al.*. Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser with 770-W output power[J]. Appl Opt, 2002, 41(27): 5625-5631.
- Zhang Jian, Guo Liang, Zhang Qingmao, *et al.*. Resonant amplification structure of high-power Nd:YAG laser design and analysis[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0402002.
张健,郭亮,张庆茂,等. 谐振放大结构的大功率 Nd:YAG 激光器设计及分析[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402002.
- Zhang Xiaopeng, Fei Qunxing, Zhang Xiaobing. The research of hundred-nanosecond pulse width Nd:YAG laser for dring[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.
- Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong, *et al.*. Study on producing non-taperd holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003004.
姜梦华,李强,雷甸,等. 高峰值功率自适应直脉冲 Nd:YAG 激光加工无锥度直孔研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003004.

栏目编辑: 宋梅梅