

# TC4 钛合金激光冲击强化参数及性能分析

乔红超 赵吉宾 于彦凤

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 为了研究激光冲击强化对钛合金性能的影响,采用波长 1064 nm、脉冲能量 0~6 J、脉冲宽度 6~14 ns 的 YAG 脉冲激光器对 TC4 钛合金试样表面进行冲击强化处理,并对其表面的显微硬度和残余应力进行了试验测试与分析。结果表明,采用脉冲能量 6 J、脉冲宽度 12 ns、水约束层厚度 1.8 mm 的激光冲击强化参数,冲击区的表面显微硬度明显增加,比处理前提高约 33.5%,冲击区表面存在的残余压应力数值高达 -323 MPa。试验结果表明,激光冲击强化钛合金的效果明显。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;显微硬度;钛合金;残余应力

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.041405

## Analysis on Laser Processing Parameters and Strengthening Effects of Laser Peening of TC4 Titanium Alloy

Qiao Hongchao Zhao Jibin Yu Yanfeng

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

**Abstract** In order to study the effect of laser peening on the properties of titanium alloy, a TC4 titanium alloy sample is processed using YAG laser with the wavelength of 1064 nm, pulse energy of 0~6 J and pulse width of 6~14 ns, and its micro-hardness and residual stress are examined and analyzed. The experimental results show that the satisfying laser peening appearance can be achieved when the pulse energy is 6 J, pulse width is 12 ns and tamping layer thickness of water is 1.8 mm, the surface micro-hardness increases up to 33.5% and the compressive residual stress on the surface of laser shocked area reaches -323 MPa. Laser peening improves the hardness and residual stress of titanium alloy significantly. The experimental results show that the effect of laser peening evidently strengthens the titanium alloy.

**Key words** laser technique; laser peening; micro-hardness; titanium alloy; residual stress

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 140.3538; 350.3850

## 1 引言

钛合金是目前工业应用最轻的金属结构材料之一,密度一般约在  $4.5 \text{ g/cm}^3$ ,仅为钢的 60%,而一些高强度钛合金超过了许多合金结构钢的强度<sup>[1,2]</sup>。随着航空和汽车工业的迅速发展,对通过降低产品的自重以降低能源消耗和减少污染提出了更迫切的要求,这给钛合金的发展带来了契机<sup>[3]</sup>。疲劳是各种工程构件在服役期间的主要失效形式之一,钛合金结构件也不例外。随着钛合金的应用范围越来越广,如何提高钛合金结构件的疲劳强度,延长其服役寿命,受到人们的普遍关注<sup>[4]</sup>。激光冲击强化(LSP)技术是利用功率密度为吉瓦每平方米量级、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<sup>[1~4]</sup>。激光诱导的冲击波持续时间极短(几十纳秒),材料变形小,适合处理成品零件,特别是能有效处理应力集中的局部区域<sup>[5~13]</sup>。开展激光冲击强化技术研究,对提高关键结构件的使用寿命和可靠性具有现实意义。本文采用 YAG 脉冲激光器对工业中广泛使用的 TC4 钛合金进行激光冲击强化处理,并对工艺参数、显微硬度和残余应力进行研究与探讨,为航空发动机整体叶盘的激光冲击强化工艺研究奠定基础。

**收稿日期**: 2012-12-20; **收到修改稿日期**: 2013-01-05; **网络出版日期**: 2013-03-14

**基金项目**: 国家 863 计划(2012AA041310)资助课题。

**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 试验材料及方法

试验采用自主研发的 SIA-LSP-1 激光冲击强化设备,图 1 为其示意图,YAG 脉冲激光器的最大脉冲能量 6 J、波长 1064 nm、脉宽 6~14 ns、频率 2 Hz,运动形式采用 XY 二轴运动平台带动工件沿 X 轴和 Y 轴做插补运动。从激光器输出的直径为 22 mm 的激光束经全反射镜和聚焦透镜聚焦在工件表面上,在工件表面形成直径为 3 mm 的光斑。

所用的吸收层为黑胶带,厚度约为 100  $\mu\text{m}$ ,选用水作为约束层,保证工件表面上水层的厚度为 1~3 mm。水约束层由上位机自动控制的送水系统施加,送水系统由水箱、恒压水泵、水流传感器、液位计、流量阀和电磁阀等组成。水约束层的厚度由磁致伸缩液位计、流量阀和电磁阀控制,其中磁致伸缩液位计的测量精度为 0.08 mm。

试验母材采用航空工业中广泛使用的 TC4 钛合金,试验板材由沈阳黎明发动机(集团)有限责任公司提供。TC4 钛合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction, %)

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.20	0.10	0.05	0.015	Bal.

采用苏州宝玛格精密机械有限公司生产的 DK7740 线切割机床,将 TC4 钛合金板材加工成尺寸为 29 mm $\times$ 99 mm $\times$ 9 mm 的试块,接着对试块进行打磨抛光至表面粗糙度  $R_a=0.8$ ,然后对试件进行振动时效(VSR)处理 2 min,消除试件的残余应力。振动时效处理前后的残余应力值如表 2 所示,从表 2 中可以看出,振动时效处理前试件表面的残余应力在  $\pm 15$  MPa 内变化,振动时效处理后试件表面的残余应力在  $\pm 1.5$  MPa 内变化,残余应力趋近于 0,试件表面的残余应力均匀,从而能够保证后续激光冲击强化试验数据的可靠性。最后用乙醇将表面的油污去除清洗干净、用高纯氮气吹干后,在其表面覆盖一层约 100  $\mu\text{m}$  厚的黑胶带作为吸收层,并用弹性滚轮压实,保证无气泡出现。

表 2 试件振动时效处理前后的对比数据 (单位:MPa)

Table 2 Test data before and after vibration aging (unit: MPa)

No.	1	2	3	4	5	6	Average
Before VSR	14.5	-12	8	14	12	12.5	8.2
After VSR	-1	-0.4	0.5	-1.5	1.1	1.3	0

激光冲击强化处理后,撕掉试件表面的黑胶带,并用乙醇将试件表面的残胶清理干净。采用 FM-300 型显微硬度计测试激光冲击强化区域表面的显微硬度分布,加载  $9.8 \times 10^{-2}$  N 的力,保持载荷时间为 10 s,每

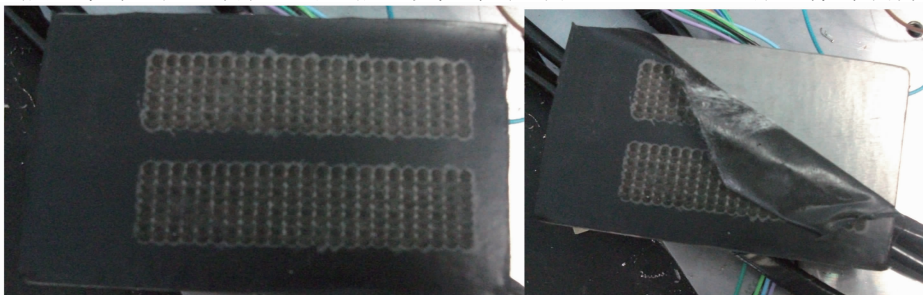


图 2 激光冲击强化处理后的试件照片

Fig. 2 Photos of specimen after laser peening

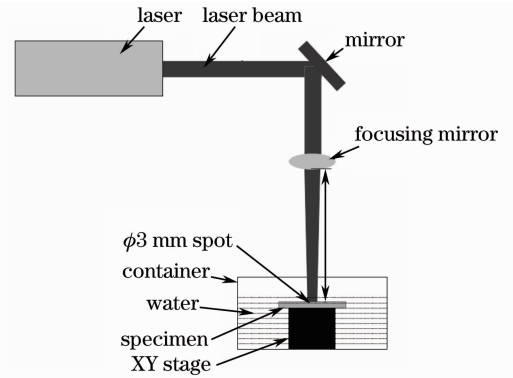


图 1 激光冲击强化设备示意图

Fig. 1 Schematic of laser peening device

组参数测量 6 次,计算出显微硬度算术平均值。同样,利用 X 射线应力仪测试表面残余应力,每组参数测试 6 次,并计算出残余应力的算术平均值。激光冲击强化处理后的照片如图 2 所示。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 单脉冲能量对处理效果的影响

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%,改变单脉冲能量进行激光冲击强化试验,试验后测得的表面显微硬度如图 3 所示,从中可以看出单脉冲能量对表面显微硬度的影响。母材的显微硬度约为 407 HV,随着单脉冲能量的增大,表面硬度不断增大。单脉冲能量小于 3 J 时,硬度的变化很小,说明单脉冲能量太低时,激光冲击强化对试件的表面显微硬度几乎无影响;在能量从 3 J 增大到 4 J 的过程中,表面硬度开始明显增大,说明单脉冲能量超过 3 J,对表面硬度有了一定的影响;在单脉冲能量从 4 J 变化到 6 J 的过程中,硬度迅速增大,当单脉冲能量达到 6 J 时,表面显微硬度达到了约 525 HV。

图 4 为单脉冲能量对表面残余应力的影响曲线,从中可以看出,表面残余压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,表面的残余应力约为 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 6 J 的过程中,残余压应力增大趋势明显,斜率明显增大,说明当单脉冲能量大于 3 J 后,脉冲能量的变化才对表面残余压应力有较大影响。

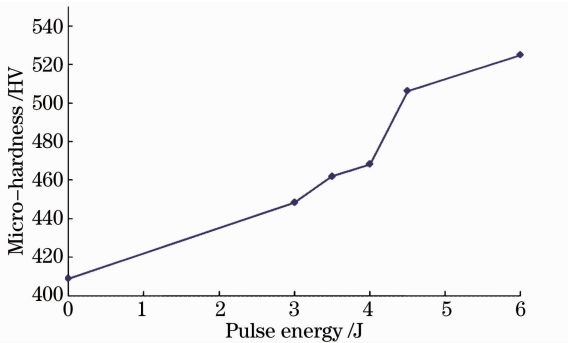


图 3 单脉冲能量对表面显微硬度的影响

Fig. 3 Effect of pulse energy on surface micro-hardness

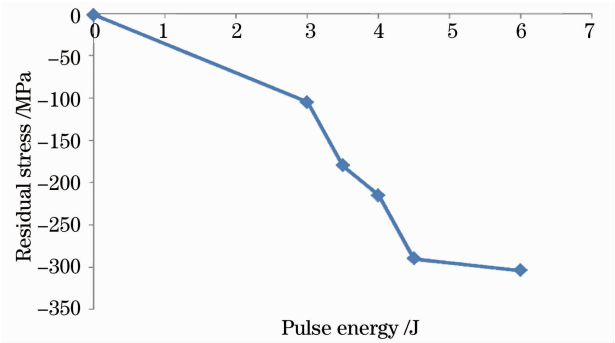


图 4 单脉冲能量对表面残余压应力的影响

Fig. 4 Effect of pulse energy on surface residual stress

分析可知,随着单脉冲能量的增大,表面显微硬度和残余压应力均增大,在单脉冲能量达到 6 J 时,表面显微硬度和残余应力分别达到了 525 HV 和 -304 MPa,说明随着单位面积内能量的增大,处理效果越来越明显。

#### 3.2 约束层厚度对处理效果的影响

采用单脉冲能量 6 J、宽度为 12 ns、光斑搭接率为 40%,水约束层厚度在 1~3 mm 的区间内变化,激光冲击强化试验后测得的试件表面显微硬度值如图 5 所示,从中可以看出水约束层厚度对试件表面硬度的影响。随着水约束层厚度的增加,表面显微硬度先增大后减小,在水约束层从 1 mm 变化到 1.8 mm 的过程中,表面硬度不断变大;在水约束层从 1.8 mm 变化到 2.6 mm 的过程中,表面硬度不断减小。在厚度 1.8 mm 附近出现了拐点,此处的表面显微硬度达到了 540 HV。

图 6 为水约束层厚度对表面残余压应力的影响曲线,从中可以看出,随着水约束层厚度的增大,表面残余压应力先增大后减小。在水约束层厚度从 1 mm 变化到 1.8 mm 的过程中,表面残余压应力从 -95 MPa 迅速增大到 -320 MPa;在水约束层厚度从 1.8 mm 变化到 2.6 mm 的过程中,表面残余压应力开始缓慢变小。表面残余压应力在厚度 1.8 mm 处出现了拐点。

分析可知,随着水约束层厚度的增大,表面显微硬度和残余压应力都先变大后变小,在水约束层厚度为 1.8 mm 时,表面显微硬度和残余应力分别达到了 540 HV 和 -320 MPa。这说明在水约束层厚度从 1 mm 变化到 1.8 mm 的过程中,水约束层的束缚力不断增大,强化效果越来越明显,而在水约束层厚度从 1.8 mm 变化到 2.6 mm 的过程中,水层对激光能量的吸收越来越明显,很大一部分能量被水层吸收掉,所以到达吸收层的能量减小,从而降低了强化效果。

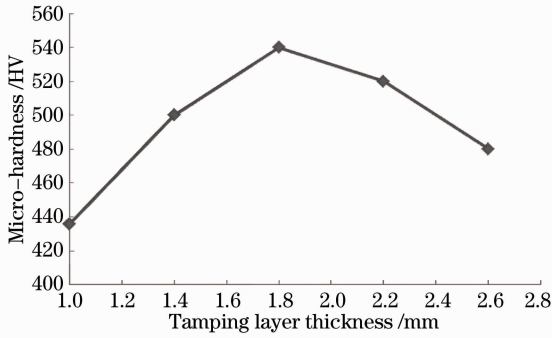


图5 约束层厚度对表面微硬度的影响

Fig. 5 Effect of tamping layer thickness on surface micro-hardness

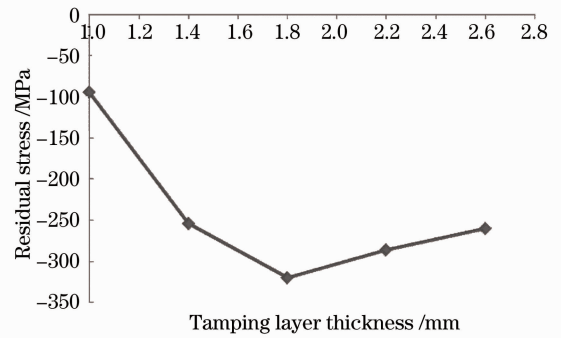


图6 约束层厚度对表面残余压应力的影响

Fig. 6 Effect of tamping-layer thickness on surface residual stress

### 3.3 脉宽对处理效果的影响

采用单脉冲能量 6 J、水约束层厚度为 1.8 mm、光斑搭接率为 40%，脉冲宽度在 6~14 ns 的区间内变化，激光冲击强化试验后测得的试件表面显微硬度值如图 7 所示，从中可以看出脉冲宽度对试件表面显微硬度的影响。随着脉冲宽度的增加，表面显微硬度先增大后减小，在脉冲从 6 ns 变化到 12 ns 的过程中，表面硬度缓慢变大；在水约束层从 12 ns 变化到 14 ns 的过程中，表面硬度缓慢减小，整体来看，变化较为缓慢。

图 8 为脉冲宽度对表面残余压应力的影响曲线，从中可以看出，随着脉宽的增大，表面残余压应力先增大后减小。在脉宽从 6 ns 变化到 12 ns 的过程中，表面残余压应力从 -110 MPa 增大到 -327 MPa；在脉宽从 12 ns 变化到 14 ns 的过程中，表面残余压应力开始缓慢减小。表面残余压应力在脉宽 12 ns 处出现了拐点。

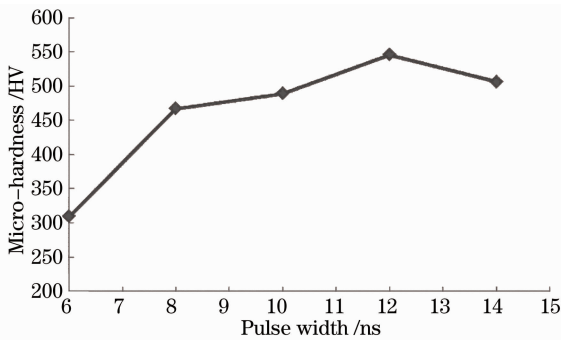


图7 脉宽对表面显微硬度的影响

Fig. 7 Effect of pulse width on surface micro-hardness

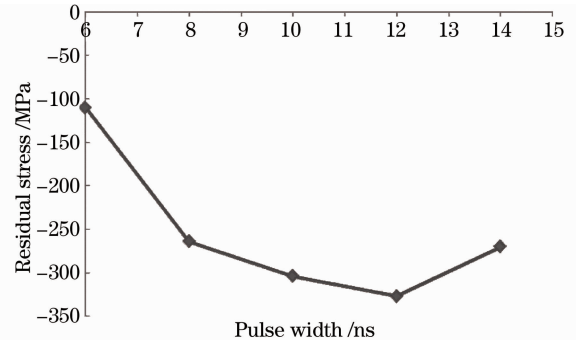


图8 脉宽对表面残余压应力的影响

Fig. 8 Effect of pulse width on surface residual stress

分析可知，随着脉宽的增大，表面显微硬度和残余压应力都先变大后变小，在脉宽为 12 ns 时，表面显微硬度和残余应力分别达到了 546 HV 和 -327 MPa。这说明冲击波与试件表面的作用时间越长，冲击强化效果越明显，但随着脉宽的增加，在脉宽大于 12 ns 后，冲击强化效果不再明显，这是由于激光峰值功率密度随着脉宽的增加而降低的缘故，激光冲击强化的效果与激光峰值功率密度成正比，所以在脉宽大于 12 ns 后，激光峰值功率降低，表面显微硬度和残余压应力都变小。

### 3.4 激光冲击强化的效果分析

根据图 3~8 所示的试验结果，选择最优的一组激光冲击强化参数，即单脉冲能量 6 J、脉冲宽度 12 ns、光斑搭接率 40% 以及水约束层厚度 1.8 mm，对试件进行激光冲击强化，并对激光冲击强化前后的表面显微硬度和残余应力进行分析。表 3 为试件激光冲击强化前后的对比数据。从表 3 可以看出，激光冲击强化处理前测量的表面显微硬度最大值为 412 HV，最小值为 405 HV，平均值为 409 HV，处理后测量的表面显微硬度最大值为 551 HV，最小值为 540 HV，平均值为 546 HV，即表面显微硬度提高了 33.5%；处理前残余应力最大值为 1.3 MPa，最小值为 -1.5 MPa，平均值为 -0.28 MPa，处理后残余应力最大值为 -316 MPa，最小值为 -330 MPa，平均值为 -323 MPa。

表3 试件激光冲击强化前后的对比数据

Table 3 Test-data comparison of specimen before and after laser peening

No.	Micro-hardness	Micro-hardness after	Residual stress before	Residual stress after
	before processing /HV	processing /HV	processing /MPa	processing /MPa
1	408	546	-1	-327
2	410	540	-1.5	-320
3	405	543	1.2	-323
4	412	548	1.3	-330
5	411	551	-1.4	-316
Average	409	546	-0.28	-323

## 4 结 论

1) 对于 TC4 钛合金,采用自主开发的 SIA-LSP-1 激光冲击强化设备,通过调节单脉冲能量、脉冲宽度和水约束层厚度,可以获得良好的表面强化效果,达到产品强化的要求。采用脉冲能量 6 J、脉冲宽度 12 ns 和水约束层厚度 1.8 mm 的激光冲击强化参数,对试件进行强化处理,可以获得较好的强化质量,冲击区的显微硬度明显增加,表面显微硬度比处理前约提高 33.5%,冲击区域表面存在的残余压应力数值高达-323 MPa。

2) 随着单脉冲能量的增大,处理效果越来越明显,表面显微硬度和残余压应力均增大,在单脉冲能量达到 5 J 时,表面显微硬度和残余应力分别达到了 525 HV 和-304 MPa。

3) 随着水约束层厚度的增大,表面显微硬度和残余压应力都先变大后变小,在水约束层厚度为 1.8 mm 时,表面显微硬度和残余应力分别达到了 540 HV 和-320 MPa,水约束层对激光冲击强化效果影响明显。

4) 随着脉宽的增大,表面显微硬度和残余压应力都先变大后变小,在脉宽为 12 ns 时,表面显微硬度和残余应力分别达到了 546 HV 和-323 MPa,冲击波与试件表面的作用时间越长,冲击强化效果越明显,但随着脉宽的增加,功率密度也随之降低,所以当脉冲宽度超过 12 ns 后,冲击强化效果趋于不明显。

## 参 考 文 献

- Huang Xu, Li Zhengxi, Huang Hao. Recent development of new high-temperature titanium alloys for high thrust-weight ratio aero-engines[J]. *Materials China*, 2011, **30**(6): 20~27  
黄旭,李臻熙,黄浩.高推重比航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J].*中国材料进展*, 2011, **30**(6): 20~27
- Bi Xiuguo, Bu Fanling, Kang Jian. Titanium alloy drilling and new development[J]. *Tool Engineering*, 2008, **42**(12): 19~22  
毕秀国,卜繁岭,康健.钛合金钻削加工及其新发展[J].*工具技术*, 2008, **42**(12): 19~22
- Chen Guolin, Wu Pengwei, Leng Wenjun *et al.*. The development prospect and current status of titanium alloys[J]. *Ship Science and Technology*, 2009, **31**(12): 110~113  
陈国琳,吴鹏炜,冷文军等.钛合金的发展现状及应用前景[J].*舰船科学技术*, 2009, **31**(12): 110~113
- 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,刘庆琰,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
- 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
- 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
- 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
- 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. Engineering Materials and Technology*, 2004, **126**(3): 1~8
- 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, Huangfu 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
- 11 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
- 12 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**: 1250~1262
- 13 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 氩弧焊焊缝微结构及性能的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0303002