

文章编号: 1004-0609(2006)11-1850-05

激光参数对 Ti6Al4V 钛合金激光冲击成形的影响^①

任旭东¹, 张永康^{1, 2}, 周建忠¹, 张兴权¹, 鲁金忠¹

(1. 江苏大学 机械工程学院 光子制造科学与技术省重点实验室, 镇江 212013;

2. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘 要: 研究在 Ti6Al4V 合金激光冲击成形过程中, 不同激光参数对板料弯曲角及表层硬度的影响。结果表明: 当激光功率密度小于 3 GW/cm^2 时, 弯曲角随着激光功率密度线性增加, 激光功率密度超过 3 GW/cm^2 时, 由于表面熔化现象的出现, 弯曲角出现减小的趋势; 板料弯曲角随冲击次数的增加也呈线性增长, 但弯曲阻力的增加使得弯曲角的增长速度逐渐减慢; 随着激光功率密度的增加, 材料表面冲击区的硬度增高, 表面硬化层的显微硬度最高达 HV490, 硬化层厚度约为 1.0 mm。

关键词: Ti6Al4V 钛合金; 激光冲击成形; 工艺参数

中图分类号: TN 249; TG 156

文献标识码: A

Influence of laser parameters on laser-shock forming of Ti-6Al-4V alloy

REN Xu-dong¹, ZHANG Yong-kang^{1, 2}, ZHOU Jian-zhong¹,
ZHANG Xing-quan¹, LU Jin-zhong¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Science and Technology of Photon Manufacturing,
School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Laser shock processing technology was employed on Ti6Al4V and the influence of laser parameters on laser-shock forming of Ti-6Al-4V alloy was investigated. The results show that the bending angle is in proportion to the laser energy density and the number of laser shocking when the laser energy density is less than 3 GW/cm^2 , when the energy density is larger than 3 GW/cm^2 , the shocked surface of Ti-6Al-4V alloy will result in melting and a uniform hardened layer with almost 1.0 mm in thickness and HV490 in hardness is obtained on the surface of Ti6Al4V alloy when the technologic parameters are selected properly in laser shock processing.

Key words: Ti6Al4V alloy; laser shock forming; technique parameters

钛合金具有密度小、比强度高、熔点高和耐腐蚀性好等特点, 因而在航天航空工业、船舶、电力工业等领域得到广泛应用^[1-3]。由于钛合金冷加工非常困难, 塑性成形是钛合金零件生产的主要途径, 因而钛合金锻造工艺的研究发展状况反映着一个国家钛合金的应用水平。

近 20 年来, 精密成形技术在国内外迅速发展, 大量优质、高效、节能、省力的塑性成形新技术相继推出, 并在工业中获得广泛的应用。由于钛合金的变形加工非常困难且原材料价格昂贵, 钛合金的激光冲击成形技术现在已成为钛合金成形技术发展的热点^[4-10]。所谓激光冲击成形技术, 就是通过精

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA336030); 国防航空基金资助项目(02H52053)

收稿日期: 2006-04-11; 修订日期: 2006-07-06

通讯作者: 任旭东, 博士; 电话: 0511-8791188; E-mail: renxd@ujs.edu.cn

确设计模具、严格控制激光加工工艺参数、合理调整成形工序生产出不需加工或仅需少量加工的产品零件的工艺技术, 其成形原理如图 1 所示。激光冲击成形技术具有传统锻造工艺的优点(良好的显微组织和完整的流线), 成形过程中通过严格控制激光加工工艺参数, 使得产品成形后达到预期的组织要求, 从而获得所要求的力学性能; 而且它不需要后续加工, 在减少产品生产周期和节省原材料的同时, 大大降低了生产成本^[11-15]。本文作者研究了激光参数对钛合金板料成形角度和力学性能的影响。

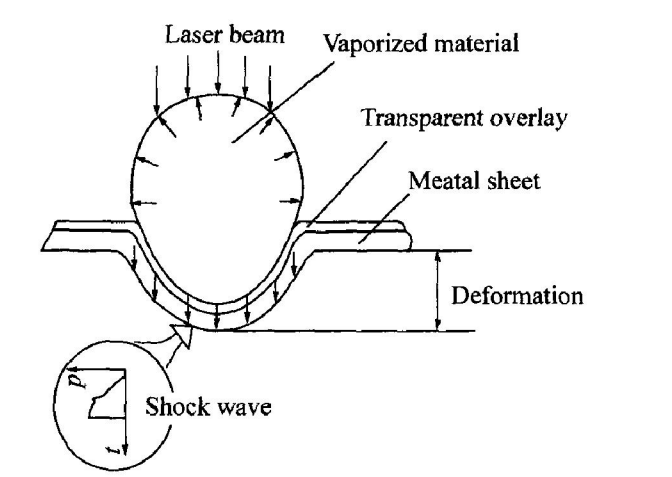


图 1 激光冲击成形原理图

Fig. 1 Basic process of laser shock processing

1 实验

选用 Ti6Al4V 钛合金薄板为实验材料, 实验前试件表面润磨并用酒精擦亮, 试样的主要化学成分如表 1 所示, 力学性能见表 2。

实验在江苏大学强激光实验室的高功率强激光钕玻璃激光器(Nd:YAG)上进行。激光波长为

表 1 Ti6Al4V 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V alloy (mass fraction, %)

Al	V	Fe	Si	
5. 5-6. 8	3. 5-4. 5	≤0. 30	≤0. 10	
C	N	H	O	Ti
≤0. 10	≤0. 05	≤0. 015	≤0. 015	Bal.

表 2 Ti6Al4V 材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti6Al4V alloy

$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ %	HB
826	900	13	295

1. 054 μm , 以 $d6\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的 YAG 棒作谐振腔激光棒, 一级钕玻璃激光预放大, 四级钕玻璃激光主放大器(分为二路)。采用大口径四分之一波片及高强度大口径偏振膜, 在 $d20\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 激光主放大级上有效地实现了激光的双程放大技术, 调 Q。输出激光的脉冲宽度(FWHM)为 20 ns, 激光冲击系统装置框图如图 2 所示。

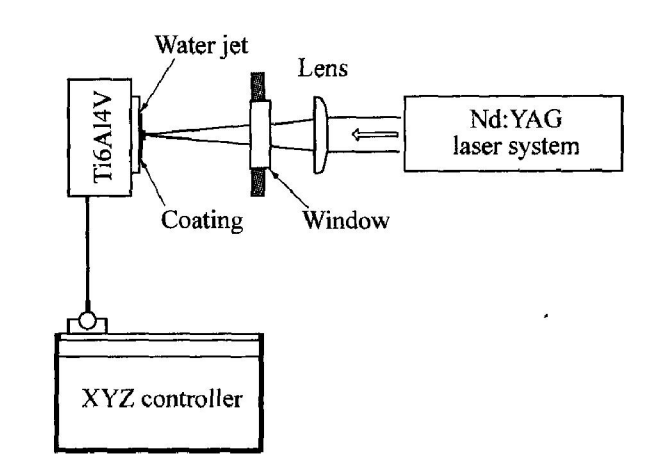


图 2 激光冲击系统装置框图

Fig. 2 Experimental setup of laser shock processing

2 结果与讨论

强激光不能直接冲击金属板料表面, 否则会引起严重的烧蚀, 甚至烧穿, 所以被处理表面必须涂一层涂层保护层或者覆盖能量转换体。当高功率密度(GW/cm^2 量级)、短脉冲(ns 量级)强激光辐照在能量转换体上时, 能量转换体涂层气化电离并形成冲击波, 使光能转变为冲击波机械能, 可将之作为钣金件成形的力源, 使板材发生塑性变形, 通过连续冲击和冲击轨迹的规划, 实现复杂形状工件的三维半模/无模成形。激光冲击成形技术“精密”或“精确”不仅是指“形状和尺寸”, 而且还包括金属材料变形后的组织和性能, 即在成形精确的同时还要获得优异的组织 and 性能。图 3 所示为 Ti6Al4V 钛合金连续冲击精密小曲率常温快速成形照片。弯曲角度采用专用的测角器测量, 板料的弯曲成形用多点的平均弯曲角度代替, 试样的显微硬度在 HVS-1000 型数字显微硬度计测量仪上测量, 保压时间 15 s, 负荷 0.98 N。

2.1 激光功率对成形的影响

由图 4 可以看出, 随激光功率的增大, 板料弯曲角呈上升趋势。在激光功率较小时, 注入到板料

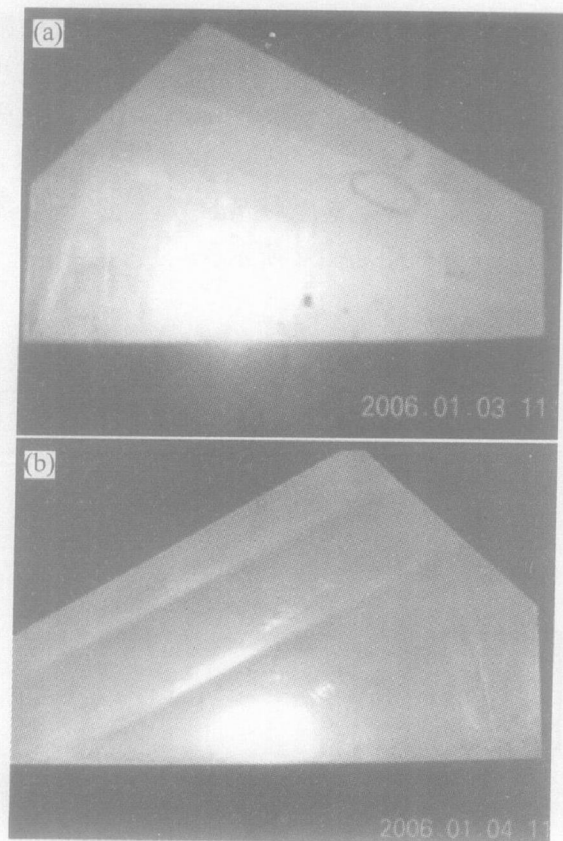


图3 Ti6Al4V 钛合金连续冲击精密常温快速成形

Fig. 3 Samples of Ti6Al4V with precise shapes after successive laser shock processing
(a) —Shaped figure; (b) —Shocked surface

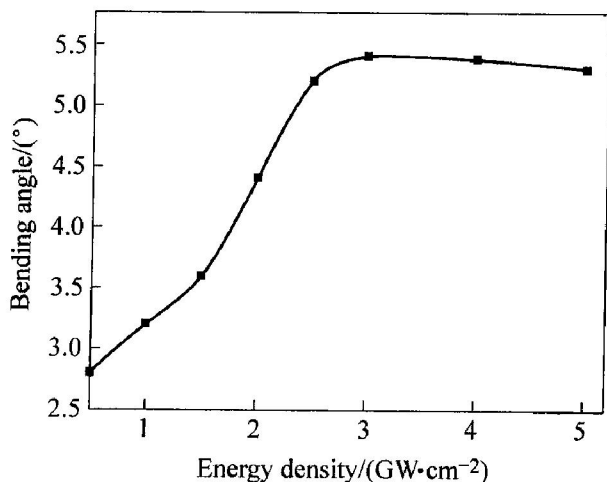


图4 激光功率密度对弯曲角的影响

Fig. 4 Effect of laser energy density on bending angle

中的能量太少,冲击波产生的力学效应不足以在厚度方向产生足够的冲击力,激光冲击区产生的主要是弹性变形,形成的弯曲角非常小。

随激光功率的加大,冲击波力学效应加大,当大于材料屈服强度时冲击区发生塑性变形的金属增

多,此时弯曲角随激光功率几乎成线性增长。当激光功率增大到一定程度时,板料表面涂覆的涂层吸收的能量已差不多完全吸收,弯曲角也不会随之继续增大。作者认为此时的激光功率为弯曲成形的极限功率。若继续加大功率,在材料表面可能会出现微熔现象,由于熔化现象的出现,弯曲角出现减小的趋势。这种现象说明了对钛合金这种特定的材料存在最佳的工艺参数使得板料产生最大的弯曲变形。

2.2 冲击次数对成形的影响

在实际的激光冲击过程中,由于一次激光冲击所获得的弯曲角度较小,所以工件最终的变形是由数次激光冲击累积而成,由图5可见,随冲击次数的增加弯曲角基本上是呈线性增长,但是弯曲角的增长速度却是逐渐减慢,也就是说弯曲角增量逐渐减小。

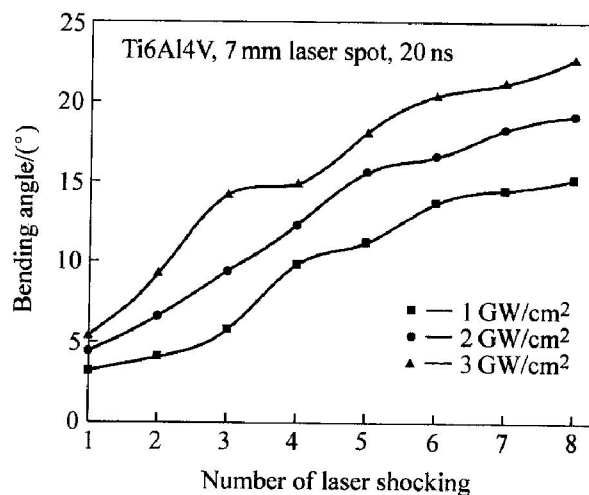


图5 冲击次数和成形弯曲角的关系

Fig. 5 Relationship between bending angle and number of laser shocking

这一变化趋势可从图中明显看出,在最初的几次冲击过程中,产生的弯曲角增量较大,此后随冲击次数的增多,弯曲增量逐渐减小。这是由于经过多次激光冲击材料发生了应变强化,增加了弯曲阻力,由此可以说明,采用激光冲击成形,可以容易地控制板料的成形精度,而且激光成形是小变形下的累积变形,不容易起皱。

2.3 冲击参数对显微硬度的影响

图6所示为冲击后钛合金板横截面上不同层次的硬度分布。从图中可以看出,激光冲击后,使得冲击区材料的表面硬度值有所提高,而且随着激光

功率密度的增加,材料表面硬度提高越大。经分析认为,涂层经过激光冲击后,曲轴材料的表层硬度得到了明显的提高,表面硬化层的显微硬度最高达HV490,硬化层深度约为1.0 mm。导致板料激光冲击硬度提高的主要原因在于激光束能量高而集中,作用时间短而冲击区域瞬间有较大的过热、过冷度,使涂层中的超细硬质碳粉颗粒弥散强化、细晶强化及高致密、高结合强度的综合作用。钛合金材料经过激光冲击处理出现了位错列或位错墙。由于位错列或位错墙的存在,材料形成了亚晶界,从而使得变形过程中的位错移动阻力增加,表现为热暴露后拉伸强度和屈服强度存在一定程度的升高。而且由于弯曲角的增大,周围金属的拘束作用越来越小,产生的应力也相应减小,从而影响了弯曲变形量。

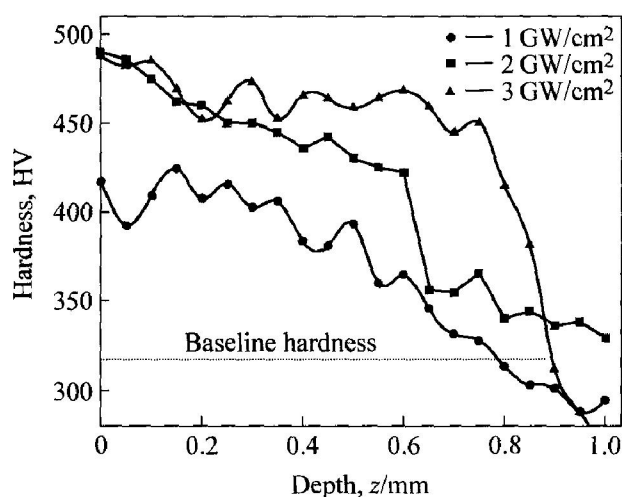


图6 激光冲击表层硬度分布

Fig. 6 Distribution of Vickers hardness versus depth of LSP on Ti6Al4V

3 结论

1) 对于Ti6Al4V合金激光冲击成形,当激光功率密度小于 3 GW/cm^2 时,弯曲角随着功率密度线性增加,继续增大功率密度,由于熔化现象的出现,弯曲角出现减小的趋势。

2) 随冲击次数的增加,弯曲角基本上是呈线性增长,但是由于弯曲阻力的增加,弯曲角的增长速度却是逐渐减慢。而且随弯曲角的增大,周围金属的约束作用越来越小,产生的应力也相应减小,从而影响了弯曲变形量。

3) 激光冲击后,冲击区材料的表面硬度值有所提高,而且随着激光功率密度的增加,材料表面

硬度提高越大,表面硬化层的显微硬度最高达HV490,硬化层深度约为1.0 mm。

REFERENCES

- [1] Lei C S C, Davis A, Lee E W. Effect of BSTOA and mill anneal on the mechanical properties of Ti6Al4V casting[J]. *Advanced Materials & Processes*, 2000 (2): 75-80.
- [2] Hackel L A, Chen H L. Laser Peening—A Processing Tool to Strengthen Metals or Alloys to Improve Fatigue Lifetime and Retard Stress-Induced Corrosion Cracking[R]. Department of Commerce Laser Science and Technology, National Technical Information Service US, 2003: 9.
- [3] REN Xu-dong, ZHANG Yong-kang. Comparison of two kinds of laser shock processing for aerospace aluminum alloys[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(11): 37-39.
- [4] 罗国珍,周廉,邓炬. 中国钛的研究和发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 1997, 26(5): 1-6.
LUO Guo-zhen, ZHOU Lian, DENG Ju. Research and development of titanium in China[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1997, 26(15): 1-6.
- [5] Lee D, Kim S. Effects of micro structural morphology on quasistatic and dynamic deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Metal Trans A*, 2001, A32: 315-318.
- [6] Wagoner Johnson A J, Bull C W. The Influence of microstructure and strain rate on the compressive deformation behavior of Ti-6Al-4V[J]. *Metal Mater Trans A*, 2003, A34: 295-297.
- [7] Magee J, Watkins K G, Steen W M. Advances in laser forming[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 235-246.
- [8] Veeck S, Lee D, Tom T. Titanium investment casting[J]. *Advanced Materials & Processes*, 2002(1): 59-62.
- [9] 杨建阳,左敦稳,黎向锋,等. 激光冲击成形TA2钛合金板的变形与残余应力[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(增刊1): 31-35.
YANG Jian-yang, ZUO Dun-wen, LI Xiang-feng. Deformation and residual stresses of titanium alloy TA2 sheet after laser shock forming[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37 (Suppl): 31-35.
- [10] 高长伟,黎向锋,左敦稳,等. TC4钛合金板激光冲击成形实验研究[J]. *应用激光*, 2005, 25(3): 158-160.

- GAO Chang-wei, LI Xiang-feng, ZUO Dur-wen. The experimental study on the laser shock forming of TC4 titanium alloy sheet[J]. Applied Laser, 2005, 25(3): 158 - 160.
- [11] Williams J. Thermo-mechanical processing of high-performance Ti alloys: recent progress and future needs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 311 - 317.
- [12] 陈敦军, 向毅斌, 吴诗惇. 钛合金板料激光曲线弯曲及热辐射对其组织性能的影响[J]. 金属学报, 2001, 37(6): 643 - 646.
- CHEN Dur-jun, XIANG Yi-bin, WU Shi-dun. Curved laser bending of titanium alloy sheets and effects of heat radiation on its microstructure and property[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(6): 643 - 646.
- [13] 李俐群, 王 威, 林尚扬. 温度梯度机理下激光参数对激光成形的影响[J]. 热加工工艺, 2002(3): 35 - 37.
- LI Li-qun, WANG Wei, LIN Shang-yang. The influence of laser parameters on laser forming under the temperature gradient mechanism[J]. Hot Working Technology, 2002(3): 35 - 37.
- [14] 李俐群, 陈彦宾, 张立文, 等. Ti6Al4V 钛合金的激光弯曲成形特性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 842 - 847.
- LI Li-qun, CHEN Yan-bin, ZHAN Li-wen, et al. Laser bending characteristics of Ti6Al4V titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 842 - 847.
- [15] Pinkerton A J, Lin L. The significance of deposition point stand off variations in multiple layer coaxial laser cladding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(6): 573 - 584.
- (编辑 何学锋)