

文章编号 : 0258-7025(2002)11-1049-05

激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究

刘顺洪, 胡乾午, 周龙早, 李志远, 胡席远

(华中科技大学材料学院, 湖北 武汉 430074)

提要 采用大功率 CO₂ 快轴流激光器进行了 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的激光弯曲成形, 研究了累积线能量密度对钛合金显微组织和维氏硬度的影响。提出了累积能量密度门槛值的概念, 累积线能量密度高于门槛值时, 累积线能量密度对钛合金显微组织和显微硬度有影响, 低于门槛值时没有影响。随着累积线能量密度的增加, HAZ 尺寸呈二次曲线增加。

关键词 激光弯曲成形, 累积线能量密度, 显微组织, 维氏硬度, 门槛值

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Investigation on Microstructure and Property of Laser Bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V

LIU Shun-hong, HU Qian-wu, ZHOU Long-zao, LI Zhi-yuan, HU Xi-yuan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract This paper investigates laser forming of Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V with a 2000 W fast-axial flow CO₂ laser unit. The study has been on the influence of accumulated energy density (AED) on the microstructure and Hv₅ hardness of laser bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V. The paper presents a concept of critical value on AED. Microscopy observations have revealed that there are no effect on the microstructure of Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V with the AED values less than 40 J/mm², but the effects occur with the AED values higher than the critical value. With the increasing of AED the HAZ size grows in quadratic function.

Key words laser bending, AED (accumulated energy density), microstructure, Hv hardness, critical value

1 引 言

激光弯曲是通过激光辐照特定区域和路径产生非均匀加热诱发热应力而导致弯曲进行成形的一种新工艺, 它不需要模具和外力。虽然这种工艺成形过程是渐进成形的, 但在局部也能形成复杂的形状。因此, 近几年激光弯曲成形受到广泛的关注^[1, 2]。

目前, 有 3 种激光弯曲成形机理——温度梯度机理^[2]、压曲机理^[3]和墩粗机理^[4]。温度梯度机理是激光辐照到工件表面形成温度场, 此温度场沿板厚方向形成较大的温度梯度导致热应力, 从而形成

的压缩塑性变形量沿板厚分布不均匀, 上表面形成压缩塑性变形量比下表面要大, 冷却后收缩形成弯曲, 适用于板材的成形。压曲机理是使用的激光光斑直径比板厚要大, 加热速度较慢, 沿板厚方向不造成温度梯度, 加热时形成的热膨胀所造成的压应力超过试件(或零部件)的失稳应力而产生弯曲, 压曲机理产生的弯曲角度方向与板材的原始状态有关, 主要用于薄板的成形。墩粗机理则主要用于型材的激光弯曲成形。

激光弯曲成形是一种局部累积热成形工艺, 成形后不产生反弹, 且激光能量精确可控, 故可进行精

收稿日期 2001-06-29; 收到修改稿日期 2001-11-26

基金项目 湖北省自然科学基金(2000J124)资助项目。

作者简介 刘顺洪(1954—), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学材料工程系副主任, 教授, 工学硕士, 主要从事焊接力学行为、激光与材料相互作用方面的科研与教学工作。E-mail: liushunhong@public.wh.hb.cn

确的激光弯曲成形,特别适用于冷加工难以成形的硬且脆,或刚性大的金属材料。钛合金是一种广泛应用于航空航天的结构材料,具有高的屈强比,但其弹性模量较低(是钢的1/2),冷加工成形时,变形抗力大,回弹也大,且不易校形,故用激光弯曲来成形钛合金是非常有现实意义的。

以前人们对激光弯曲的研究大都关注于成形规律的研究^[5~7],对激光弯曲热过程对钛材组织和性能的影响研究报道不多^[2]。本文利用大功率激光器,研究了钛合金的弯曲成形规律以及激光弯曲工艺参数,特别是累积线能量密度对钛合金显微组织和维氏硬度的影响。

2 实验材料与实验方法

2.1 实验材料

实验材料为 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 近 α 钛合金板材,试件尺寸为 80 mm × 80 mm × 2 mm,化学成分为(wt.-%):Al 5.5~7.0;Zr 1.4~2.5;Mo 0.5~1.8;V 0.8~2.3,其余为 Ti,力学性能为 $\sigma_b = 95 \sim 100 \text{ kg/mm}^2$; $\sigma_{0.2} = 85 \sim 100 \text{ kg/mm}^2$; $\delta = 7\% \sim 10\%$,退火态供货,合金基体为等轴 α 相,另有极少量的 β 相,显微组织见图 1。

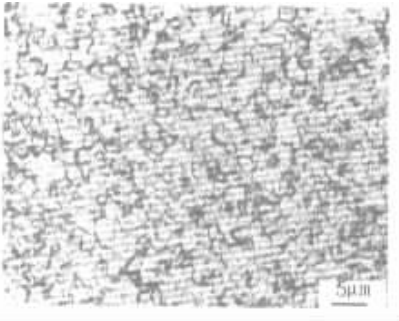


图 1 基本金属的显微组织

Fig. 1 Microstructure of the base metal

2.2 实验方法

实验装置以及试样的夹持方式如图 2 所示,实验中用位移传感器实时测量弯曲角。采用 PRC 2 kW CO₂ 快轴流激光器,试验激光功率为 1.2 kW,扫描光斑直径为 3 mm,加氩气保护,表面涂氧化钛吸光涂料。试验中改变扫描速度,研究线能量密度对成形规律的影响,扫描方式为沿扫描路径往复连续扫描,考查累积线能量密度对母材显微组织和维氏硬度的影响。金相试样用氢氟酸 10%,硝酸 10% 的水溶液浸蚀,显微组织采用 OLYMPUS PHG3 显

微镜观察并且用 OLYMPUS DP10 数码相机照相,维氏硬度采用 Hv-50 维氏硬度计测量,载荷 5 kg,热影响区(HAZ)尺寸用体视显微镜观察测量并照相。

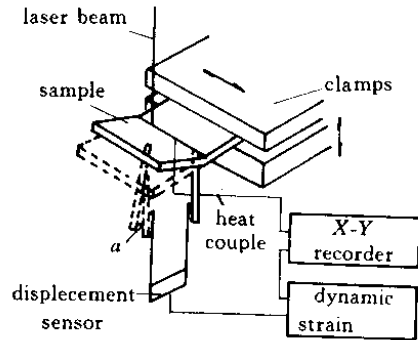


图 2 激光弯曲试验装置简图

Fig. 2 Setup of laser bending experiment

2.3 累积能量密度 AED

由于激光弯曲成形是通过多次激光扫描累积弯曲成形的,因此,必须研究激光功率(P),光束直径(d),扫描速率(v)和扫描次数(n)以及同一扫描路径上的扫描时间间隔对成形材料的显微组织和性能的影响。本文使用累积线能量密度(AED)^[8]来表征注入基本金属的能量效应, $AED = \eta n P / dv$,单位为 J/mm^2 ,式中 η 为材料的吸光率,AED 给定了激光弯曲连续扫描期间激光照射区域吸收的总能量,AED 值越高,施加给材料的热效应越大,可以反映累积热效应对母材的影响,如果是单次扫描,或者每次扫描间隔时间很长,所形成温度冷却到室温后,再开始下一步扫描,这样就不会产生累积热效应,AED 就变成乘以恒定系数的线能量密度了。

3 试验结果与分析

3.1 激光扫描次数与弯曲角度之间的关系

钛合金的弯曲角度与扫描速度、扫描次数的关系如图 3 所示。由图可见,在激光功率、光束直径不变的情况下,弯曲角随扫描速率的增加而减小,而随扫描次数的增加成线性增加,实验结果经最小二乘法处理,弯曲角度与累积线能量密度的关系表述为 $\alpha = 4.1 \times 10^{-2} Pn / vd - 0.76$ 。因此激光弯曲成形可通过多次重复扫描而累积达到所需要的弯曲角度。每次激光扫描形成的弯曲角度的大小是与激光扫描的线能量密度 P/dv 有关系的。在温度梯度成形机理下, P/dv 越大,钛合金在加热过程中扫描线上激光辐照区受热膨胀形成的压缩塑性变形越大,冷却

后收缩量越大,产生的弯曲角度就越大。累积线能量密度与弯曲角度之间的关系如图 4 所示。在 P, d 为常数时,扫描速率 v 越大,累积线能量密度越小,形成的弯曲角越小,弯曲角与扫描次数的关系曲线夹角越小(图 3)。因此,在激光弯曲成形过程中控制线能量密度大小是控制成形的关键因素,而同样的线能量密度,可通过调节不同的工艺参数(如调节扫描速度及光束光斑直径、激光功率大小)来获得。

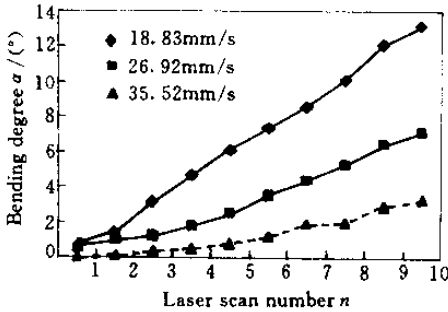


图 3 激光扫描次数与弯曲角度之间的关系曲线

Fig.3 Relation curve between bending degree and laser scan number ($P = 1200 \text{ W}, d = 3 \text{ mm}$)

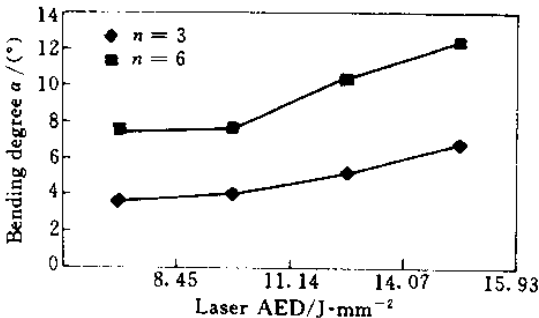


图 4 累积线能量密度(AED)与弯曲角度之间的关系曲线

Fig.4 Relationship between AED and bending degree

3.2 累积线能量密度与热影响区(HAZ)尺寸之间的关系

采用同一功率、同一光束直径及不同的扫描次数,研究了累积线能量密度与扫描线上热影响区 HAZ 尺寸之间的关系。用 L 表征 HAZ 的宽度, D 表征 HAZ 的深度。 L, D 与累积线能量密度的关系曲线如图 5 所示。由图可见,当累积线能量密度很小时,钛合金的受热区组织没有发生明显的变化。产生 HAZ 存在一个阈值,低于此值,不产生 HAZ,即没有产生组织变化。超过此阈值,则产生 HAZ。随着累积能量密度的增加, L, D 呈二次曲线增加,达到一定值后趋于稳定。由此可见,随着 AED 的增加,HAZ 形状和大小发生显著变化。钛合

金在加热过程中要发生 α 固溶体到 β 固溶体的转

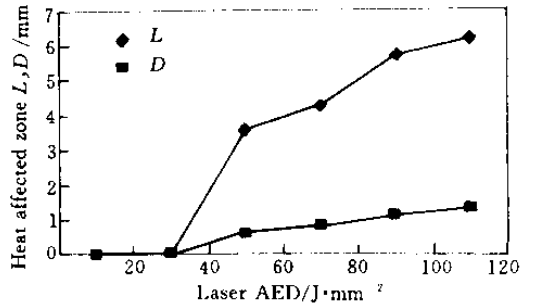


图 5 热影响区宽度 L 及热影响区深度 D 与 AED 之间的关系曲线

Fig.5 Relation between the L, D and AED

变,在平衡相图的条件下,钛合金发生 β 相变的温度在 1000°C 左右。但激光扫描加热的特点是加热速度极快,冷却速度也极快,这就使得钛合金 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变时会产生很大的过热度,临界相变温度(1000°C)大幅度向上位移^[9]。在激光弯曲成形中,所使用的累积线能量密度在阈值以下时,由于基本金属处于冷态,激光极快的加热速度使 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变上移,使得钛合金来不及相变,经过加热冷却循环后,显微组织没有发生变化,不形成热影响区,仍为退火态的等轴 α 相。累积线能量密度大于阈值后,由于前道扫描的预热效应,使得基本金属的温度升高,激光辐照扫描后,高温停留时间变长,冷却速度也相对变慢,使得钛合金有足够的时间发生 $\alpha \rightarrow \alpha'$ 的固态相变,故形成 HAZ。随着连续扫描次数的增加,累积线能量密度增加,基本金属的温度越来越高,高温停留时间就越长,冷却速度就越慢。由于热扩散和热传导的作用,使 HAZ 尺寸增加,同时也使 HAZ 中的金相组织发生变化,从而对基本金属的力学性能产生影响。在本试验条件下,产生 HAZ 的累积线能量密度的阈值为 40 J/mm^2 。HAZ 的 L, D 与累积线能量密度的关系为二次曲线关系,其趋势是当累积线能量密度达到一定程度后,HAZ 形状的变化趋缓直至趋于常数,这是不断加热和热扩散达到平衡的结果,如果再进一步提高累积线能量密度,激光辐照区域就有可能发生熔化。由此可见,在激光弯曲成形过程中,控制累积线能量密度或控制基本金属的原始温度,即控制激光扫描次数和每次扫描的时间间隔,可以控制 HAZ 的形成或控制 HAZ 尺寸的大小,以减小激光弯曲成形工艺对母材基本性能的影响。

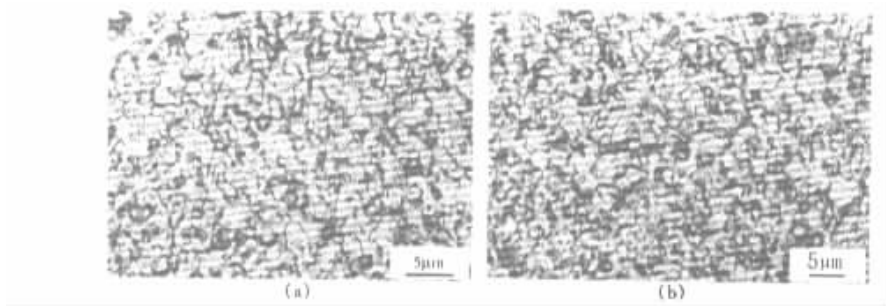


图 6 AED 小于临界值时的扫描区显微组织

Fig.6 Microstructure with the AED less than the critical value

(a) AED = 20 J/mm² ; (b) AED = 40 J/mm²

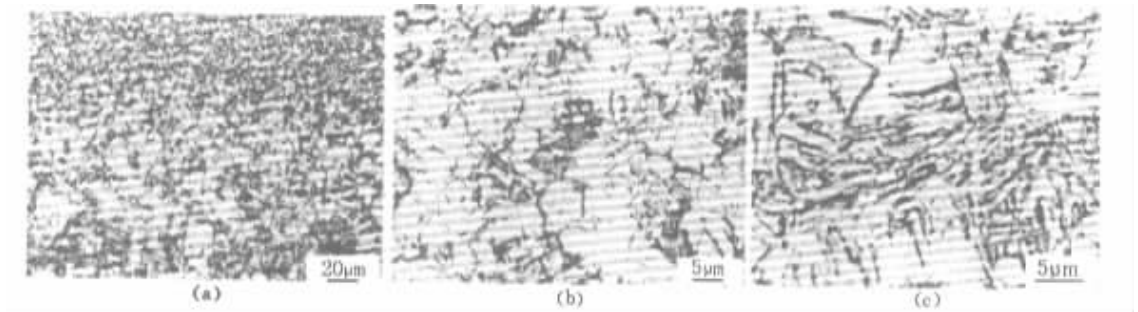


图 7 AED = 80 J/mm² 时热影响区(HAZ)的显微组织

(a) 热影响区全貌 (b) 粗晶区 (c) 硬化区

Fig.7 Microstructure of HAZ with AED = 80 J/mm²

(a) HAZ ; (b) coarse grained region ; (c) hardened zoon

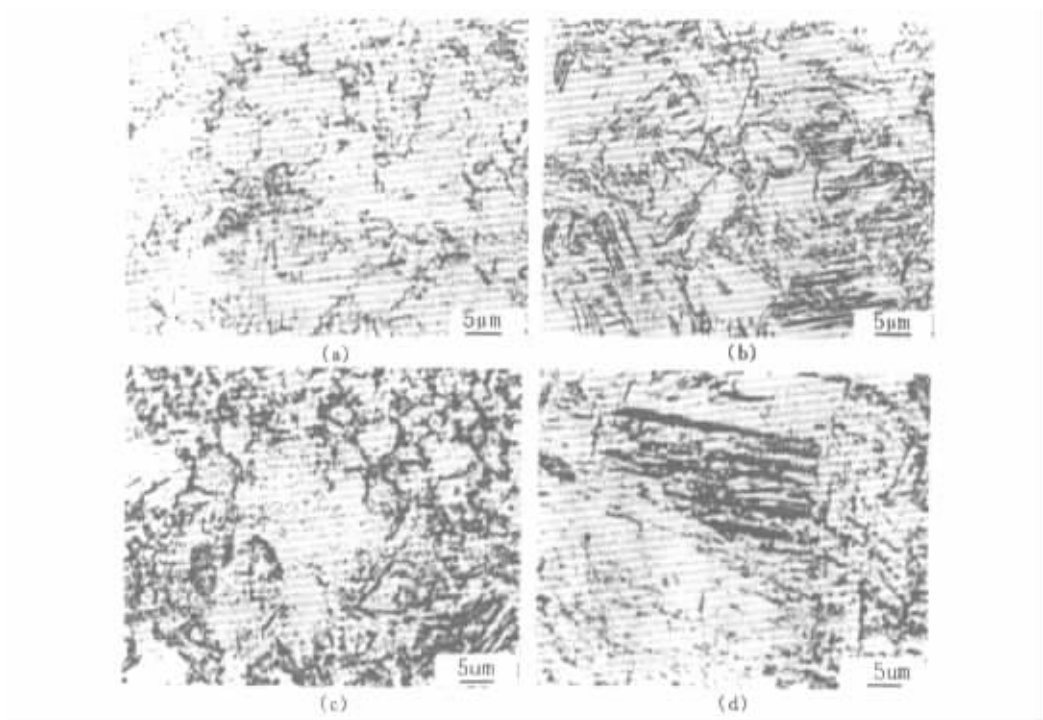


图 8 不同 AED 值时热影响区(HAZ)显微组织的比较

Fig.8 Comparison of microstructure of HAZ with difference AED

(a) The microstructure of coarse grained region with AED = 60 J/mm² ; (b) The microstructure of hardened zoon with AED = 60 J/mm² ;
(c) The microstructure of coarse grained region with AED = 200 J/mm² ; (d) The microstructure of hardened zoon with AED = 200 J/mm²

3.3 累积线能量密度对显微组织和维氏硬度的影响

如图 1 所示,钛合金原始显微组织为近 α 固溶体组织, α 为退火态的等轴晶粒,其平均晶粒尺寸为 $10\ \mu\text{m}$,沿晶界分布着少量 β 固溶体。

对于激光弯曲扫描试样,在累积线能量密度门槛值以下,在刚性条件下,加热母材到 150°C 就足以使钛合金产生压缩性塑性变形,导致弯曲角。虽然产生了弯曲角度,而母材的显微组织没有发生明显组织变化,仍为等轴的近 α 固溶体。图 7(a)(b) 分别为累积线能量密度在门槛值以下,激光辐照区的金相图,可见显微组织与母材差别不大,显微组织为等轴 α 相,图 7 为连续激光扫描产生热影响区的显微组织。其累积线能量密度为 $80\ \text{J}/\text{mm}^2$ 。图 7(a) 上部为母材显微组织,下部为热影响区,它由粗晶区和相变区两部分组成,接近母材下表面处为相变区,冷却后组织为 α' ,晶粒尺寸是原 α 晶粒的十几倍,且晶粒形状不规则(图 7(c)),相变区和母材之间是晶粒长大区(图 7(b))。比较可见,晶粒长大区的晶粒尺寸比原始母材晶粒要高得多,相变区产生的组织是与母材完全不同的粗大板条状 α' 组织。随着累积线能量密度的增加,热影响区的显微组织的形貌和晶粒发生变化,图 8 分别是累积线能量密度为 $60\ \text{J}/\text{mm}^2$ 和 $200\ \text{J}/\text{mm}^2$ 时热影响区的显微组织形貌。可见,随着累积线能量密度的增加,热影响区尺寸增大,其相变区组织晶粒变得粗大(图 8(b),(d)),粗晶区 α 晶粒尺寸也增大(图 8(a),(c))。

各种累积线能量密度条件下的维氏硬度分布如图 9 所示,母材的维氏硬度为 Hv_5 150 左右,其沿板厚方向分布见图 9,可见硬度分布比较均匀一致。相变区的 Hv_5 为 250 左右,粗晶区 Hv_5 为 170。因此,仅从维氏硬度分析,激光辐照热影响区的强度有

所提高,由于显微组织晶粒变得粗大,且发生 α' 相变,其塑性、韧性可能有所下降。

由上分析,激光弯曲成形工艺中,累积线能量密度的选择非常重要,不仅对弯曲角度有重要影响,而且对母材的基本性能有影响,那些对热效应敏感的材料尤其如此。但其也可通过调整扫描顺序来调节每次扫描前的温度和时间间隔加以控制。

4 结 论

通过对钛合金激光弯曲成形的基本试验,研究了线能量密度对成形角以及显微组织、维氏硬度的影响规律,得到在成形过程中累积线能量密度对母材性能的影响,得出如下结果:1) 钛合金的激光弯曲成形角与线能量密度成正比,与扫描次数成正比,可表述为 $\alpha = 4.1 \times 10^{-2} Pn/vd - 0.76$ 。2) 钛合金的激光成形过程中,存在累积线能量密度的门槛值,本试验条件下门槛值为 $40\ \text{J}/\text{mm}^2$,高于此值,热效应会产生热影响区,热影响区尺寸呈二次曲线增加,HAZ 尺寸经一定扫描次数后会趋于稳定,低于累积线能量密度门槛值,则不会产生热影响区。3) 热影响区由相变区和晶粒长大区组成。相变区的组织为与母材完全不同的板条状 α' 组织,其 Hv_5 为 250 左右,比母材要高。

参 考 文 献

- Gareth Thomson, Mark Pridham. Improvements to laser forming through process control refinements[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**:141~146
- J. Magee, K. G. Watkins, W. M. Steen. Advance in laser forming[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, **10**(6):235~246
- H. Arnet, Dipl Ing, F. Vollertsen et al.. Extending laser bending for the generation of convex shapes[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 1995, **209**:433~442
- A. Stto, V. Brandt. Closed loop control for laser bending of extrusions[C]. *Advanced Technology of Plasticity*, 2:19~24. Proceedings of the 6th ICTP. Germany, 1999
- Kevin Scully. Laser line heating[J]. *Journal of Ship Production*, 1987, **3**(4):237~246
- Thomas Hennige. Development of irradiation strategies for 3D-laser forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **103**:102~108
- C. L. Yau, K. C. Chan, W. B. Lee. Laser bending of leadframe materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **82**:117~121
- Jorge A. Ramos, J. Magee, K. G. Watkins. Microstructure and microhardness study of laser bent Al-2024-T3[J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, **13**(1):32~40
- Liu Wenjin, Zhong Minglin. Research of laser quenching principle of steel and cast iron[J]. *Journal of China Surface Engineering* (中国表面工程), 2001, **50**(1):36~39 (in Chinese)

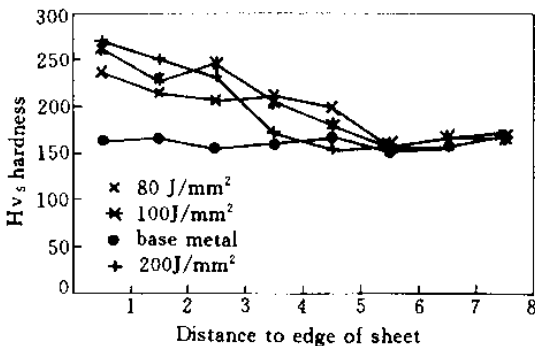


图 9 不同 AED 值激光弯曲试样和基本金属的显微组织硬度分布

Fig.9 Microhardness of base metal and laser bent sample under different kinds of AED