

激光冲击对 Ti834 合金残余应力及显微组织的影响

咎焱旭^{1,2}, 贾蔚菊², 赵恒章², 毛小南², 樊建锋¹, 周 廉²

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 采用表面粗糙度仪、X 射线衍射仪、显微硬度计分析了激光冲击前后 Ti834 合金的表面粗糙度、残余应力及显微硬度分布规律, 并采用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对冲击区域表面形貌及显微组织进行了表征。结果表明, Ti834 钛合金经激光冲击处理后表面粗糙度、显微硬度和残余压应力均随激光冲击次数的增加而增大。经 1 次冲击和 2 次冲击后形成的强化层深度分别为 170 和 265 μm 。LSP 能在材料表层残留高的压应力场, 经 1 次冲击和 2 次冲击后残余压应力峰值均出现在次表层, 分别达到 -369 和 -511 MPa。由冲击波诱导形成的塑性变形层内可观察到大量位错缠结现象, LSP 后位错密度的增加以及形变孪晶的形成有利于提升 Ti834 合金的机械性能。

关键词: 激光冲击强化; 钛合金; 残余应力; 机械性能; 显微组织

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)11-3535-06

随着航空航天的发展, 对更高性能涡轮发动机需求的提升促使了钛合金以及镍基高温合金的发展^[1]。其中, 近 α 钛合金 Ti834 由于具有良好的高温强度、抗疲劳性和蠕变性能常常用于压气机盘等关键零部件之中^[2-4]。然而, 在交变的服役载荷以及高温高压条件下, 金属构件表面会产生局部的疲劳裂纹或断裂而造成零件失效。为延长在复杂服役环境下的零部件材料的使用寿命, 提高材料的可靠性, 表面改性技术得到越来越多的关注和应用^[5-8]。

激光冲击强化(Laser shock processing, LSP)技术是一种新型的材料表面改性技术, 它是通过具有高功率密度和短脉冲宽度的激光束辐照材料表面, 利用能量吸收层吸收激光能量气化、电离产生高压等离子体, 在约束层的作用下爆炸性等离子体产生高压冲击波作用于材料表面并向内部传播。材料在短时间内以超高应变速率发生动态屈服, 产生塑性变形, 形成大量位错、孪晶等晶体缺陷, 残留高幅压应力, 显著改善材料的硬度, 抗疲劳性和耐腐蚀性等性能, 延长材料的使用寿命^[9-11]。激光冲击强化相比较于传统表面处理技术, 具有能够自由控制 LSP 参数, 获得强化层更深、高效灵活、无接触等特点, 在关键零部件中有着不可替代的作用^[12]。Chu 等^[13]研究了激光冲击对低碳钢表面显微组织和性能的影响。研究发现经 LSP 处理后显微组织和机械性能均得到了提升, 且深度可达 100 μm 。Ren 等^[14]研究了 LSP 对 GH2036 合

金位错演变和显微组织的影响。结果表明, LSP 可以提升合金的显微硬度并具有良好的热稳定性。另外 LSP 后可以显著细化 GH2036 晶粒, 其晶粒细化机制包含位错分割和孪晶交错。Rubio-González 等^[15]研究了 LSP 及其工艺参数对 6061-T6 铝合金疲劳裂纹扩展速率的影响。结果表明, LSP 处理能够抑制材料疲劳裂纹扩展并提高其断裂韧性, 显著提高合金的疲劳性能。

本研究采用近 α 型高温钛合金作为研究对象, 利用表面粗糙度仪、X 射线衍射仪和显微硬度计分析了激光冲击强化前后合金的表面粗糙度、残余应力及显微硬度分布规律, 并采用透射电子显微镜(TEM)对其强化层显微组织结构进行了表征, 研究了 LSP 对该合金表层显微组织和性能的影响。

1 实 验

试验材料采用的 Ti834 合金取自西北有色金属研究院钛合金研究所锻造和轧制获得的棒材, 该合金经过热处理(1020 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$, AC+700 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$, AC)得到均匀细小的等轴组织, 如图 1 所示。

试验采用的是直径 $d=12\text{ mm}$, 厚度 $\delta=3\text{ mm}$ 的圆片状试样。在 LSP 之前, 所有试样经不同粒度的砂纸进行研磨(150#~2000#)并且经过粗抛、细抛后成镜面, 之后再用清水冲洗干净。经 LSP 后的试样放入盛有乙醇的烧杯中用超声波清洗, 去除表面污渍。

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0301201); 国家自然科学基金(51601149)

作者简介: 咎焱旭, 男, 1993 年生, 硕士生, 太原理工大学新材料工程技术研究中心, 山西 太原 030024, 电话: 029-86250729, E-mail: ZanYaouxu@126.com

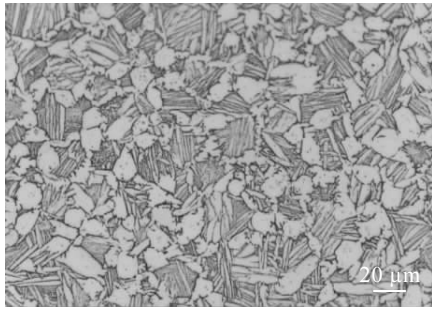


图 1 Ti834 合金原始组织

Fig.1 Microstructure of Ti834 alloy without LSP

LSP 实验采用的是 Nd:YAG 激光器，波长为 1064 nm，脉冲宽度为 10 ns，激光能量为 5 J，光斑直径为 2.6 mm，约束层采用厚度约为 1 mm 的流水层，能量吸收层则采用的是特种黑胶带，光斑搭接率为 50%，冲击路径如图 2 所示。激光光束垂直试样表面，在试样表面以相同的冲击路径进行多次激光冲击，并且每次冲击后更换新的能量吸收层。Ti834 合金试样激光冲击区域内表面粗糙度 R_a 采用 TR200 粗糙度仪进行测试，冲击区域粗糙度测量路径分为 0° 和 45° 2 个方向，每个方向上各测量 5 次，如图 3 所示。

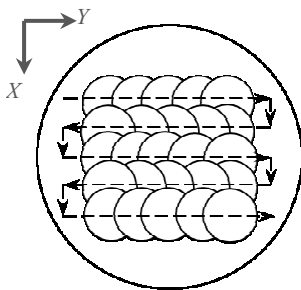


图 2 激光冲击路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of LSP impact path

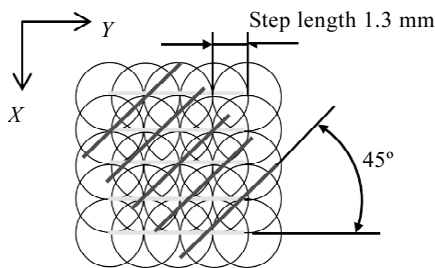


图 3 激光冲击区域粗糙度测量路径

Fig.3 Roughness measurement path of LSP impact region

显微硬度测试采用 MVS-1000JMT2 型显微维氏硬度计，测量载荷为 100 g，加载时间为 10 s。每 5 个点取平均值作为显微硬度值。在深度方向上的显微硬度测量是通过对试样的纵截面进行磨光抛光处理后，自冲击试样表面向基体每隔 50 μm 逐层进行梯度测量。采用 Proto-LXRD 型 X 射线衍射仪进行表面和深度方向上的残余应力测试；试验采用 2 mm 的圆形光斑，曝光时间 3 s，曝光次数 10 次，对冲击试样凹坑中心部位进行测量。采用化学腐蚀剥层的方法从冲击试样表面向基体每隔 50 μm 进行深度方向上的残余应力测试，通过对冲击试样表面以及深度方向上的残余应力测试确定激光冲击 Ti834 合金等轴组织的残余应力分布规律。采用 JEM-200CX 透射电子显微镜观察不同冲击次数下激光冲击处理后的显微组织变化，并结合显微硬度以及残余应力分布曲线分析其显微组织结构对其性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 激光冲击区域表面粗糙度变化

对 Ti834 合金激光冲击区域内的表面粗糙度 R_a 进行测量，设置取样长度 l_r 为 0.8 和 2.5 mm，评定长度 $l_n=5l_r$ ，粗糙度测量路径分为 0° 和 45° 2 个方向，每个方向上各测量 5 次。由于激光冲击工艺参数会影响试样表面的塑性变形区形貌，使得不同的测量路径和取样长度会对粗糙度值 R_a 产生影响，因此，试验通过不同的测量方式来反映试样经激光冲击后表面粗糙度的变化。

当取样长度 l_r 为 0.8 mm 时，单次冲击和 2 次冲击凹坑内所产生的粗糙度变化如图 4a 所示。与未激光冲击处理区域 $0.072 \mu\text{m}$ 左右的粗糙度相比，单次冲击和 2 次冲击均使试样表面凹坑内的粗糙度增大。由于取样长度较短，小于激光光斑的直径大小，所以测量结果表现为冲击后所产生凹坑内粗糙度的变化。从图中可以看出，2 次冲击后凹坑内粗糙度的提升较单次冲击更大。另外，在 0° 和 45° 方向上粗糙度水平相持，说明测量路径对测量结果影响不大。当取样长度 l_r 为 2.5 mm 时，试样表面粗糙度变化如图 4b 所示。试样未冲击时表面粗糙度为 0.084 左右，经单次冲击和 2 次冲击后表面粗糙度均有明显提升。对比 0° 和 45° 两条粗糙度测试路径结果没有明显差异，同样说明测量路径对粗糙度结果几乎没有影响。在同一测量路径上对比单次冲击和 2 次冲击的结果可以发现：相比于单次冲击，2 次冲击后试样表面粗糙度有所降低。这是因为当取样长度为 2.5 mm 时，粗糙度的测量会受表面轮廓起伏的影响，也就是说测量结果反映的是宏观

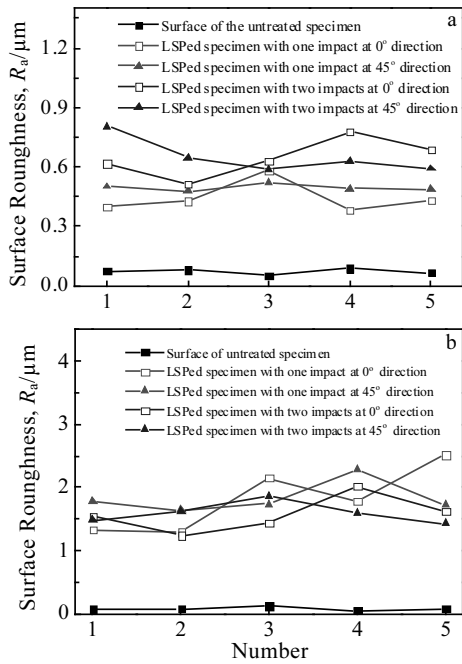


图 4 激光冲击 Ti834 合金表面粗糙度变化

Fig.4 Surface roughness variation of Ti834 alloy subjected to LSP: (a) $l_r=0.8$ mm and (b) $l_r=2.5$ mm

上凹坑轮廓的 R_a 值大小。激光冲击产生的凹坑梁脊处因 1 次冲击时发生塑性变形程度较小，应变硬化程度不及凹坑内部，因此受到第 2 次冲击时发生塑性变形程度大于凹坑内部，一定程度上降低了宏观下的轮廓起伏，表现为粗糙度的降低。表面粗糙度越大，越容易引起局部的应力集中，导致疲劳裂纹的萌生。然而，对于疲劳性能的影响一方面取决于试样的形状尺寸，表面粗糙度及使用条件等外在因素；另一方面，材料表层的残余应力状态及显微组织等内在因素也发挥着重要作用^[16]。因此，激光冲击强化对于疲劳性能的影响需要考虑以上两方面综合作用后的结果来确定。根据已有研究^[10-12]均表明激光冲击强化对于疲劳性能的提升效果显著，在一定深度内残留高幅压应力，有效减缓疲劳裂纹扩展。从研究结果来看，相较于表面形态的变化，激光冲击造成材料应力状态的改变对试样疲劳性能的影响更加显著，即 LSP 技术有利于提升材料的疲劳性能，延长材料的使用寿命。

2.2 单次和 2 次冲击后表层和深度方向上的硬度分布

图 5 为不同冲击次数下 Ti834 钛合金试样深度方向上的显微硬度分布，其中黄色带状区域为未冲击试样显微硬度的波动范围。从图中可以发现，随激光冲击次数的增加，试样表层显微硬度随之增加，且经 2 次冲击后试样表面显微硬度提升明显。另外，在深度方向上激光冲击强化后试样的显微硬度分布呈现先增

大后减小的趋势，即显微硬度峰值出现在次表层。与未冲击的试样相比，冲击一次所得的峰值硬度(HV)为 3580 MPa，提高幅度仅为 5.60%；而经过 2 次冲击后硬度峰值可以达到 3740 MPa，提升幅度为 10.32%，比单次冲击强化效果要明显。另外，可以通过与未发生塑性变形的基体的硬度相比较来确定冲击强化层深度，图中显微硬度随距表层深度的增加下降至基体区（黄色带状区域）时，此时的深度为冲击后的塑性变形影响层（即 Y 轴至虚线所示范围），可以看出 1 次冲击所得到的强化层深度约为 170 μm ，而经 2 次冲击后强化层深度提升至 265 μm ，这说明冲击次数的增加有利于提高强化层深度。

2.3 单次和 2 次冲击后表层和深度方向上的残余应力分布

图 6 为 Ti834 合金试样激光冲击前后残余应力分布图。从 X 射线残余应力测试结果可以看出，未冲击的试样的表面残余应力约为 4 MPa，存在轻微的拉应力。当经过 1 次冲击后，试样表面产生了 -104 MPa 的残余压应力，随着深度的增加，残余压应力呈现先增大后减小的趋势，最大残余压应力值达到 -369 MPa；而经 2 次冲击后，表面残余压应力则进一步增大，达到 -333 MPa，相比一次冲击应力提升 220.2%，其最大残余压应力值也出现在次表面，大小提升至 -511 MPa，相较于一次冲击提升 38.5%。由此可以得出，冲击次数的增加可以提高表面残余压应力和次表面最大残余压应力值，该变化规律与显微硬度分布具有良好的匹配性。关于激光冲击强化后的残余应力分布研究^[13,17]有的表现为残余压应力随深度的增加而呈现递减的趋势，最大残余应力值位于试样表面，但也有相关研究结果^[18-20]显示最大残余压应力出现在次表面。关于最大残余应力出现在试样次表面原因可能是在激光冲击强化过程中诱导产生的等离子体冲击波加载作用消失

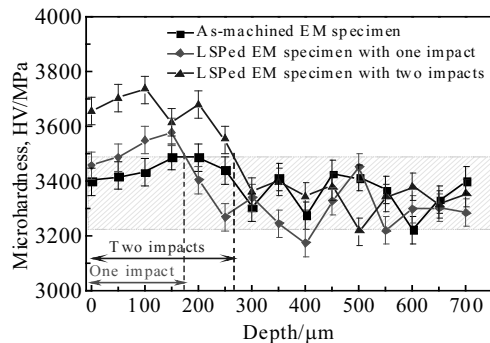


图 5 试样经激光冲击后深度方向上显微硬度分布
Fig.5 Distributions of microhardness along the depth direction after multiple LSP impacts

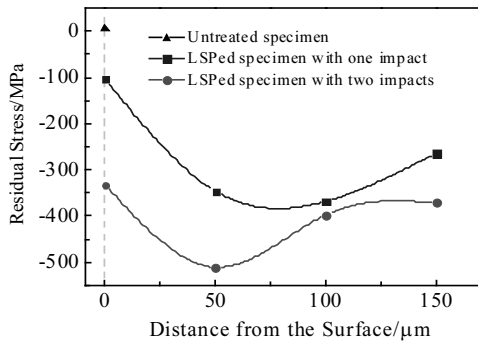


图 6 激光冲击试样表层及深度方向上残余应力分布

Fig.6 Residual stress distributions of the specimen subjected to multiple LSP impacts along the depth direction

后，表面残余压应力由于反向稀疏波产生塑性卸载作用而下降^[21]。而激光冲击强化的工艺参数（功率密度、光斑大小等）以及材料的组织结构均对残余应力分布均有着显著影响。对于 Ti834 合金在经过激光冲击强化后试样表面发生塑性变形，形成冲击凹坑。然而由于能量分布的不均匀性以及钛合金对应变速率敏感的特性^[21,22]，在等离子体爆炸产生冲击波作用于试样表面的过程中冲击凹坑心部形成了如图 7 所示的点阵冲击坑，该现象在其他研究中少有发现。图 8 为激光等离子体爆炸模型示意图。点阵冲击坑的产生一方面引入了部分残余拉应力，降低了试样表面的残余压应力值，使得残余应力最大值向试样次表层偏移。另一方面，其影响了表面的连续性，提高了试样表面粗糙度。在冲击波的作用下样品表面发生高应变速率的不均匀塑性变形，在局部造成温升，降低了表面的位错密度。因此，外表层的硬度和残余压应力较次表层偏小。残余压应力场的引入可以平衡疲劳载荷作用下产生的拉应力，能有效延缓裂纹的萌生^[10,11]。因此，激光冲击强化所产生的较深的残余应力影响层可以有效地强化

结构件的疲劳性能，延长其使用寿命。

2.4 激光冲击前后显微组织变化

图 9 为激光冲击前后 Ti834 合金显微组织照片，其中图 9a 所示为试样未冲击时的 TEM 照片。可以看出片状 α 相和残余 β 相构成的基体中几乎没有位错。当 Ti834 合金经过 1 次冲击后，试样表层位错密度大幅增加，产生了许多平行排列的位错线，同时在相界处发生有位错塞积，如图 9b 所示。而图 9c 为 2 次冲击后的显微组织。从图中可以看出基体发生大量位错缠结，位错密度进一步增加，并产生胞状位错结构。

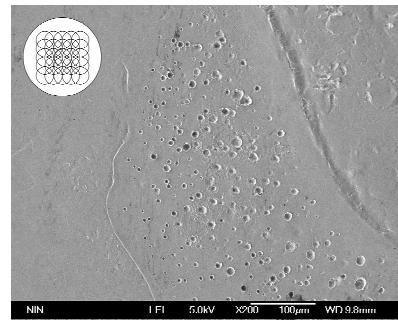


图 7 激光冲击试样表面凹坑内 SEM 照片

Fig.7 SEM image of the surface pits of specimen subjected to LSP

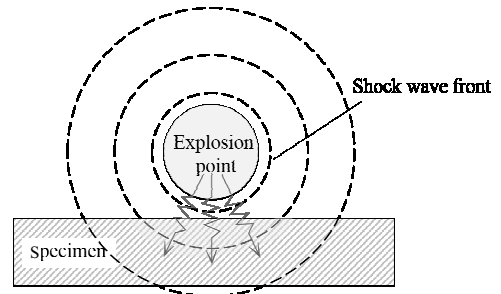


图 8 激光等离子体爆炸模型

Fig.8 Laser plasma explosion model

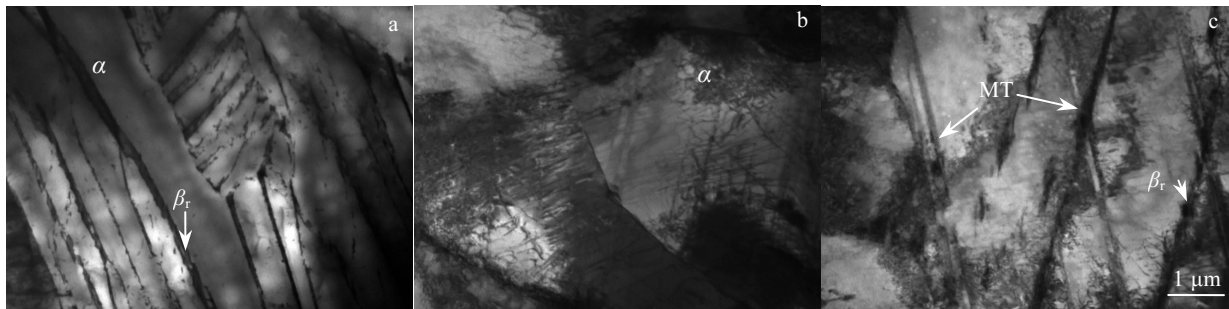


图 9 激光冲击前后 Ti834 合金显微组织照片

Fig.9 Microstructures of Ti834 alloy subjected to LSP: (a) without LSP, (b) after one LSP, and (c) after two LSP

另外, 在 β 转变组织中有形变孪晶(MT)的出现, 说明材料经 2 次冲击后变形更加严重, 加工硬化现象也更加明显, 相较于 1 次冲击有着更明显的强化效果。在激光冲击强化 Ti834 合金过程中, 材料经过塑性变形其微观组织结构发生变化, 从而造成在一定深度内力学性能的改变。激光冲击波诱导 Ti834 合金产生高幅残余压应力以及显微硬度的提升与其内部微观结构的变化密不可分, 作为一种新型的表面改性技术其强化效果表现较为明显。

3 结 论

1) Ti834 合金随着激光冲击强化次数的增加, 试样表层显微硬度逐渐增大, 且经 2 次冲击后表面显微硬度提升显著。在深度方向上, 激光冲击强化试样的显微硬度峰值出现在次表层。与未冲击的试样相比, 冲击一次所得的峰值硬度(HV)为 3580 MPa, 而经过 2 次冲击后硬度峰值可以达到 3740 MPa, 提升幅度为 10.32%。

2) 通过深度方向上显微硬度分布和微观组织结构分析, 确定 Ti834 合金经 1 次冲击所得到的强化层深度约为 170 μm , 而经 2 次冲击后强化层深度提升至 265 μm , 表明冲击次数的增加有利于提高强化层深度。

3) 随激光冲击强化次数的增加, 试样表层残余压应力逐渐增大, 经 1 次冲击和 2 次冲击后残余压应力峰值均出现在次表层, 分别达到-369 MPa 和-511 MPa。激光冲击次数的增加可以提高表面残余压应力和次表层最大残余压应力值, 且深度方向上残余应力分布和显微硬度分布良好的匹配性也表明性能的变化与影响层内微观结构的变化密切相关。

4) 相较于单次激光冲击, Ti834 合金经 2 次冲击后塑性变形程度更加剧烈, 产生的强化效果更好。材料表层位错密度的增加以及形变孪晶的形成是材料性能提升的主要原因。

参考文献 References

- [1] Wanjara P, Jahazi M, Monajati H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 396: 50
- [2] Bache M R, Cope M, Davies H M *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 1997, 19(93): 83
- [3] Zhao Yongqin(赵永庆). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2001, 18(1): 33
- [4] Spence S H, Evans W J, Medwell N. *International Journal of Fatigue*[J], 1997, 19(1): 33
- [5] Hatamleh O, Lyons J, Forman R. *International Journal of Fatigue*[J], 2007, 29(3): 421
- [6] Tao N R, Wang Z B, Tong W P *et al.* *Acta Materialia*[J], 2002, 50(18): 4603
- [7] Gao Y K, Yao M, Li J K. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2002, 33(6): 1775
- [8] Wang Z B, Tao N R, Li S *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2003, 352(1): 144
- [9] Yang J M, Her Y C, Han N *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2001, 298(1): 296
- [10] Kattoura M, Mannava S R, Dong Q *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2017, 102: 121
- [11] King A, Steuwer A, Woodward C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2006, 435(4): 12
- [12] Montross C S, Wei T, Ye L *et al.* *International Journal of Fatigue* [J], 2002, 24(10): 1021
- [13] Chu J P, Rigsbee J M, Banaś G *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 1999, 260(1-2): 260
- [14] Ren X D, Zhou W F, Ren Y P *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 654: 184
- [15] Rubio-González C, Ocaña J L, Gomez-Rosas G *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2004, 386(1): 291
- [16] Cellard C, Reira D, François M *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2012, 532(1): 362
- [17] Peyre P, Fabbro R, Merrien P *et al.* *Material Science & Engineering A*[J], 1996, 210(1-2): 102
- [18] Morales M, Ocaña J L, Molpeceres C *et al.* *European Conference on Lasers & Electro-optics*[C]. Munich: IEEE, 2007
- [19] Benedetti M, Fontanari V, Scardi P *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2009, 31(8): 1225
- [20] Li Y, Zhou L, He W *et al.* *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2013, 14(5): 055 010
- [21] Li Yinghong(李应红). *Theory and Technology of Laser Shock Processing*(激光冲击强化理论与技术)[M]. Beijing: Science Press, 2013: 185
- [22] Zhao Yongqing(赵永庆), Chen Yongnan(陈永楠), Zhang Xuemin(张学敏) *et al.* *Phase Transformation and Heat Treatment of Titanium Alloys*(钛合金相变及热处理)[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 15

Effect of Laser Shock Processing on Residual Stress and Microstructure of Ti834 Titanium Alloy

Zan Yaoxu^{1,2}, Jia Weiju², Zhao Hengzhang², Mao Xiaonan², Fan Jianfeng¹, Zhou Lian²

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Laser shock processing (LSP), also known as laser shot peening, is a novel surface strengthening treatment technology. The surface roughness, residual stress and microhardness distribution of Ti834 alloy before and after LSP were analyzed by surface roughometer, X-ray diffraction and microhardness tester, respectively. And the surface morphology and microstructure of the impact area were characterized by scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results show that the surface roughness, microhardness and residual compressive stress of Ti834 titanium alloy increase after LSP. Moreover, the depth of the strengthening layer formed after one impact and two impacts is 170 and 265 μm , respectively. After LSP treatment, a high compressive stress field is produced on the surface of Ti834 alloy. The peak value of residual compressive stress, after one impact and two impacts, appears in the subsurface layer, and reaches -369 and -511 MPa, respectively. A large amount of dislocation entanglement can be observed in the plastic deformation layer induced by laser shock wave. The increase of dislocation density and the formation of deformation twins are conducive to improvement of mechanical properties of Ti834 alloy subjected to LSP.

Key words: laser shock processing; titanium alloy; residual stress; mechanical property; microstructure

Corresponding author: Jia Weiju, Ph. D., Senior Engineer, Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: diana_1025@126.com