

超声深滚作用力对 Ti-6Al-4V 合金微观组织及表面性能的影响

官良鹏, 王卫泽

(华东理工大学, 上海 200237)

摘要: **目的** 改善 Ti-6Al-4V 合金的微观组织及表面性能。**方法** 用不同作用力 (150、250、350、450 N) 的超声深滚工艺对 Ti-6Al-4V 进行表面处理。通过金相显微镜观察、透射电镜分析、维氏硬度测试和残余应力测试, 分别评价表面处理后材料的显微组织变化、显微硬度分布和残余应力分布。**结果** 随着超声深滚作用力的增加, 表面塑性变形层厚度增大, 但增大趋势随作用力的增加而趋缓, 450 N 超声深滚作用后, 塑性变形层厚度最大。超声深滚处理后, 材料表面出现纳米晶, 随作用力的增加, 纳米晶会逐渐转为非晶态。350 N 深滚后, 距表面 220 μm 处会出现少量的孪晶及大量位错堆积。随着塑性应变的加剧, 孪晶逐渐消失, 晶粒不断细化。材料近表面硬度提高明显, 提高幅度同作用力呈正相关。材料基体的硬度为 328 HV。在 150 N 力作用后, 材料距表面 50 μm 处的硬度能达到 343 HV, 而在 450 N 力作用后可以达到 381 HV。随着超声深滚作用力的增加, 材料近表面的残余压应力总体呈现增加趋势, 最大残余应力可达到 -875 MPa; 残余应力的分布范围随力的增加, 从 0.40 mm 增长到 0.58 mm。另外, 不同作用力作用后, 材料最大残余压应力均出现在距表面 20~40 μm 处。**结论** 超声深滚作用可有效改变 TC4 合金的表面微观组织及性能, 进而影响其结构完整性和服役寿命。

关键词: Ti-6Al-4V; 超声深滚; 作用力; 微观组织; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0160-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.022

Effects of Ultrasonic Deep Rolling Force on Microstructure and Surface Properties of Ti-6Al-4V

GUAN Liang-peng, WANG Wei-ze

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: The work aims to improve microstructure and surface properties of Ti-6Al-4V. Ti-6Al-4V was treated by ultrasonic deep rolling with different rolling forces (150, 250, 350, 450 N). Microstructure, micro-hardness and residual stress of TC4 alloy after the treatment were examined with micro-hardness tester, X-ray diffractometer, optical microscope (OM) and transmission electron microscope (TEM). With the increase of ultrasonic deep rolling force, thickness of plastic deformation

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-03-20

Received: 2018-01-15; **Revised:** 2018-03-20

基金项目: 航空基金资助项目 (2015ZES7001); 国家自然科学基金项目 (51775189); 上海市科委资助项目 (16DZ2260604)

Fund: Aviation Foundation (2015ZES7001), the National Natural Science Foundation of China (51775189) and Shanghai Municipal Science and Technology Commission Foundation (16DZ2260604)

作者简介: 官良鹏 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面改性。

Biography: GUAN Liang-peng (1993—), Male, Master candidate, Research focus: surface modification.

通讯作者: 王卫泽 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面改性。

Corresponding author: WANG Wei-ze (1975—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface modification.

layer increased. However, the increasing tendency slowed down as the force increased. The maximum thickness 338 μm appeared after the 450 N ultrasonic deep rolling treatment. Nanocrystals appeared on the surface of treated samples, and gradually transformed into amorphous state as the force increased. After being treated by 350 N deep rolling, a small amount of twin crystals and massive dislocations formed at the depth of 220 μm from top surface. With the intensification of plastic strain, the twin crystals disappeared, and grains were continuously refined to reach nanometer level eventually. Near-surface hardness increased obviously, and increase amplitude was positively correlated with the force. Compared with the hardness of material matrix (328HV), final micro-hardness after 150 and 450 N treatment, at a distance of 50 μm from the surface, could reach 343 and 381HV, respectively. Residual compressive stress of near-surface, and the maximum residual compressive stress could reach -875 MPa; and distribution range of compressive stress also increased as the force increased, and depth of affected distance increased from 0.40 mm to 0.58 mm. In addition, the maximum residual compressive stress appeared at the distance of 20~40 μm from the surface. Ultrasonic deep rolling can improve surface microstructure and properties of TC4 alloy, and further influence its structure integrity and service life.

KEY WORDS: Ti-6Al-4V; ultrasonic surface deep rolling; rolling force; microstructure; residual stress; micro-hardness

Ti-6Al-4V (TC4) 合金具有良好的比强度和耐腐蚀性能等, 广泛应用于航空航天工业^[1]、生物工程^[2]等领域。当 TC4 应用于航空发动机叶片、风扇等部件时, 服役过程中既要承受疲劳载荷, 又受到异物冲击, 进而易于在表面形成划痕、裂纹等微观缺陷^[3]。由于疲劳裂纹一般起裂于零件的表面, 因此表面的缺陷容易导致疲劳裂纹的萌生, 从而降低零部件的使用寿命。所以, 需要关注 TC4 合金的表面性能及微观结构。

近年来, 人们提出了许多工艺来改善钛合金的表面质量及微观组织^[4-7]。机械表面强化, 例如激光冲击强化^[7]、低塑性抛光^[8]、深滚^[9-10]、等离子渗碳^[10]和机械表面研磨^[11-13]等, 均能显著改善构件的力学性能^[8-10]及微观组织^[11-13], 但这些工艺也有一定的局限性。例如喷丸处理在引入残余压应力的同时, 会损伤材料的表面^[14], 激光冲击强化则对设备要求高且处理面积小^[15]。

随着超声波的应用越来越普及, 科学工作者意识到超声波的机械作用可以在材料表面产生高幅冲击载荷, 从而达到强化金属表面的效果, 因此可以将超声波运用到材料表面强化上^[16]。现阶段使用的超声深滚强化技术就是结合超声冲击和低塑性抛光而形成的^[17]。之前的研究采用超声深滚技术对 40Cr^[18-19]以及 TC4^[20-21]等材料进行处理, 细化了表面晶粒, 修复了表面损伤。吕光义等人^[20-21]在 TC4 表面制备线形和圆形的模拟缺口, 定量分析了超声深滚对表面粗糙度和修复表面损伤的作用, 发现超声深滚能消除加工痕迹、表面微损伤等表面缺陷。加州大学伯克利分校的 Richie RO 等人^[9]采用深滚方法对 TC4 试样进行了处理, 表征了试样的微观组织、疲劳强度的变化等, 发现深滚方法可以有效地提高材料的疲劳强度, 延迟裂纹的起裂。然而系统研究超声深滚作用力对 TC4 组织及性能影响的报道并不多见, 故而本文对此进行

研究。

1 试验

1.1 材料和方法

试验采用直径为 18 mm 的 TC4 棒材 (陕西宝鸡集团有限公司), 材料为 $\alpha+\beta$ 双相等轴组织, 如图 1 所示。将 TC4 棒材车削并抛光成直径 8 mm 的圆棒。超声滚压前, 为保证试样表面的粗糙度一致, 用砂纸对表面进行抛光处理。之后将试样以及超声滚压压头固定在车床上, 在车床的主程序中输入主要参数, 调节好超声发生器的参数后, 启动车床。本试验的超声处理过程中, 超声振幅为 20 kHz, 超声深滚 50 遍, 工件的转速为 80 r/min, 轴向的进给速度 10 mm/min。超声深滚作用力为 150、250、350、450 N。

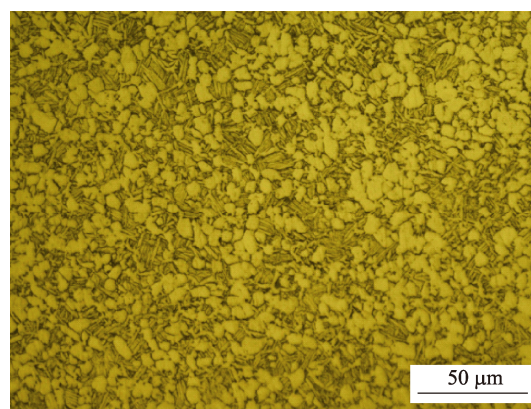


图 1 原始材料的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of original Ti-6Al-4V

1.2 性能测试及组织观察

采用光镜观察前, 将试样切成直径 8 mm、厚度 5 mm 的圆柱。试样经镶嵌、打磨和抛光后腐蚀, 腐

蚀液的配比为 $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 2 : 1 : 47$ (体积比)。通过透射电镜 (JEM-2100) 观察材料的微观结构变化。透射试样制备过程中, 首先用 400 目的砂纸将试样减薄到 $100\ \mu\text{m}$, 之后用 2000 目的砂纸继续减薄到 $30\sim 60\ \mu\text{m}$ 。将减薄好的试样压片备用, 压片直径 $3\ \text{mm}$ 。

为研究超声深滚对 TC4 硬度的影响, 测量距试样表面不同深度处的硬度。测试所用载荷为 $500\ \text{g}$, 加载时间 $15\ \text{s}$ 。通过 X 射线衍射 $\sin^2\psi$ 法测量残余应力 (Proto-iXRD MG40PFS), 测试靶头为铜靶, $2\theta=142^\circ$, 衍射晶面 $\{213\}$ 。为了保证试验数据的准确性, 避免引入新的残余应力, 本实验采用电解抛光逐层去除材料表面。钛合金抛光液为 5% 高氯酸+95% 冰乙酸, 电解抛光电压为 $30\ \text{V}$ 。

2 结果及分析

2.1 超声深滚作用力对 TC4 微观组织的影响

超声深滚后, 材料表面及近表面的微观结构发生了明显的变化, 从图 2 可见, 表面晶粒发生变形。当超声深滚作用力为 $150\ \text{N}$ 时, 材料总的变形层只有约 $97\ \mu\text{m}$; 而当超声深滚作用力达到 $250\ \text{N}$ 时, 总的塑性变形层增大到约 $212\ \mu\text{m}$, 相较于 $150\ \text{N}$ 深滚作用后的材料微观组织, 变形层更加明显。当继续增大作

用力到 $350\ \text{N}$ 和 $450\ \text{N}$ 后, 变形层可以分别达到约 $317\ \mu\text{m}$ 和 $335\ \mu\text{m}$ 。由此可见, 随着超声深滚作用力的增加, 表面塑性变形层厚度的增加趋势逐渐变缓。另外, 在较大的深滚力作用下, 材料塑性变形层结构变化明显。由于在不同深度上受到的冲击载荷随深度的增加而减少, 因而塑性变形程度与深度相关, 在微观组织上呈现阶梯状分布。近表面的金相组织分为三个部分: 最内层的基体、靠近基体的过渡层和靠近表面的剧烈塑性变形层, 其中剧烈塑性变形层的晶界已经无法通过光学显微镜辨认。喷丸工艺处理后, TC4 表面的塑性变形深度约为 $150\ \mu\text{m}$ ^[22]。而本研究中, 当超声深滚作用力增加到 $250\ \text{N}$ 后, 塑性变形层的深度达到 $212\ \mu\text{m}$ 。可见, 从塑性变形层的深度看, 超声深滚作用的效果更为明显, 这可能与超声深滚作用力的持续施加有关。

图 3 是施加不同超声深滚作用力后材料表层的透射电镜明场图及相应的衍射环。衍射选区为圆形, 尺寸为以图片中心为圆心, 直径大约 $200\ \text{nm}$ 的范围。可见, 随着超声深滚作用力的增大, 塑性应变逐渐加剧。 $150\ \text{N}$ 的超声深滚作用后, 材料表面可见大量的纳米晶, 尺寸在 $5\ \text{nm}$ 左右, 呈现等轴状分布。选区电子衍射也是典型的多晶衍射花样, 并且能辨认出衍射亮点。由于晶粒细化程度大, 选区内的晶粒多且取

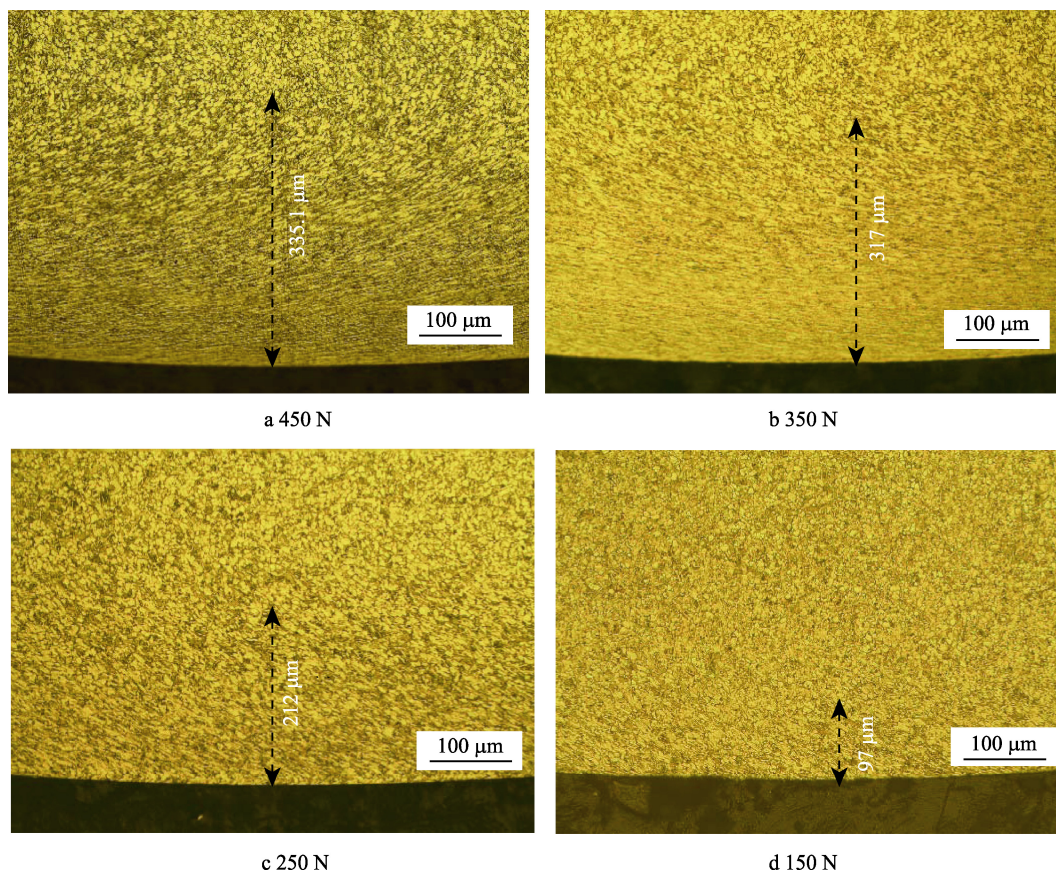


图 2 不同作用力超声深滚后的材料表面微观组织

Fig.2 Surface microstructure of TC4 with different ultrasonic surface deep rolling force applied

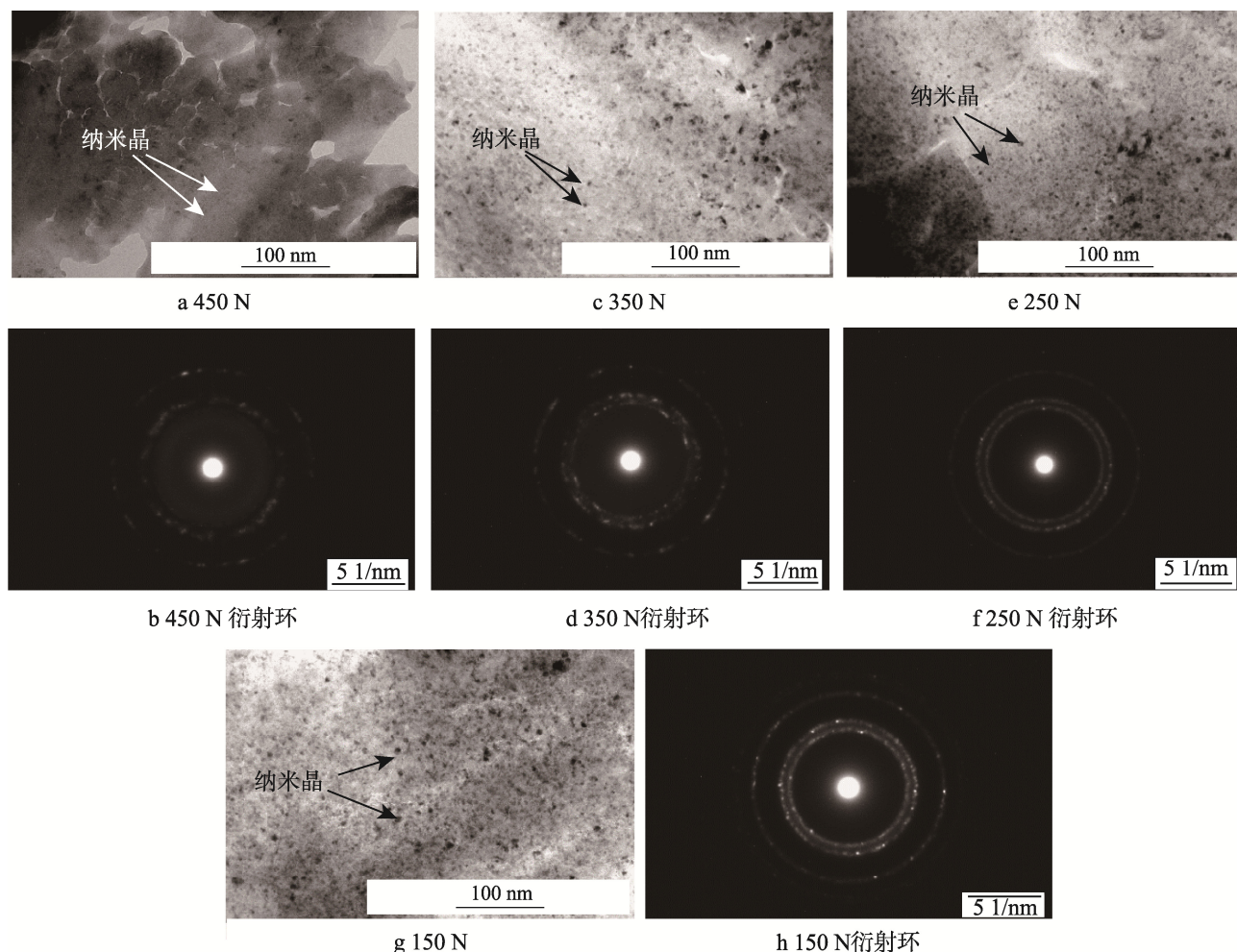


图 3 不同作用力处理后材料表面的明场图及其衍射花样
Fig.3 TEM images and diffraction patterns on top surface of samples with different force applied

向差大,所以衍射花样呈现环状。继续增大作用力到 250 N 和 350 N 后,表面的纳米晶尺寸更加细小,并且出现了非晶态的组织。由于非晶中夹杂着纳米晶,选区电子衍射图呈现出多晶衍射花样和非晶衍射花样的交叠。当深滚作用力达到 450 N 后,材料表面的非晶态组织增多,衍射环也呈现出弥散的“光晕”。另外对初始材料和经过超声深滚后的材料表面进行 EDS 分析发现,成分无明显变化。

不同的超声深滚作用力造成材料表面的微观组织不同,表明了塑性变形程度的差异。而在不同的作用力下,表面处材料的晶粒尺寸均达到了纳米尺度。为深入了解晶粒的演变过程,针对 350 N 超声深滚作用后的试样,在不同深度处取样进行透射电镜分析。之前通过光镜可见,350 N 超声深滚后的细化层深度在 300 μm 左右,所以采用透射电镜观察时,沿深度方向的取样位置分别为 30、80、150、220 μm 。图 4 为距表面不同深度处材料的明场图及孪晶衍射花样。距离表面 220 μm 处,可观察到位错堆积和少量的孪晶。

TC4 为两相组织, β 相为 bcc 结构,主要以滑移

方式变形; α 相具有密排六方结构,层错能高;材料溶质含量高,同时有 Ti_3Al 的析出;这些因素均对孪生系统的开动起到抑制作用^[23]。但另一方面,六方系结构对称性低,独立的滑移系统较少,这使得 α 相在滑移时会伴随孪生的出现^[24]。所以在塑性应变较小的区域上,如 220 μm 深度处,可见少量的孪晶以及大量的位错。当孪生系统开动后,晶体取向发生改变,使得不利于取向的滑移系统转变为有利于滑移的取向,至此所有因素都有利于滑移的产生。并且随着塑性应变的增加,之后的变形机制也主要以滑移为主。

图 4c 到图 4e 反映了这种随塑性变形程度的加剧,孪晶消失,位错密度不断增加的变化。位错的大量堆积、缠结形成了高密度的位错墙,位错墙进一步吸收位错,对原有晶粒进行分割,形成小角度的亚晶界。亚晶界的取向差逐渐增加,向大角度晶界转变,形成晶粒。随着应变的增加,这种位错分割模式不断重复,从而使材料完成从粗晶到纳米晶的转化。图 4e 为距表面 30 μm 处的形貌,此处晶粒尺寸达到了 80 nm 左右。该处晶粒尺寸虽然比表面处的晶粒 (<5 nm) 大,但与原始粗晶相比,细化明显。

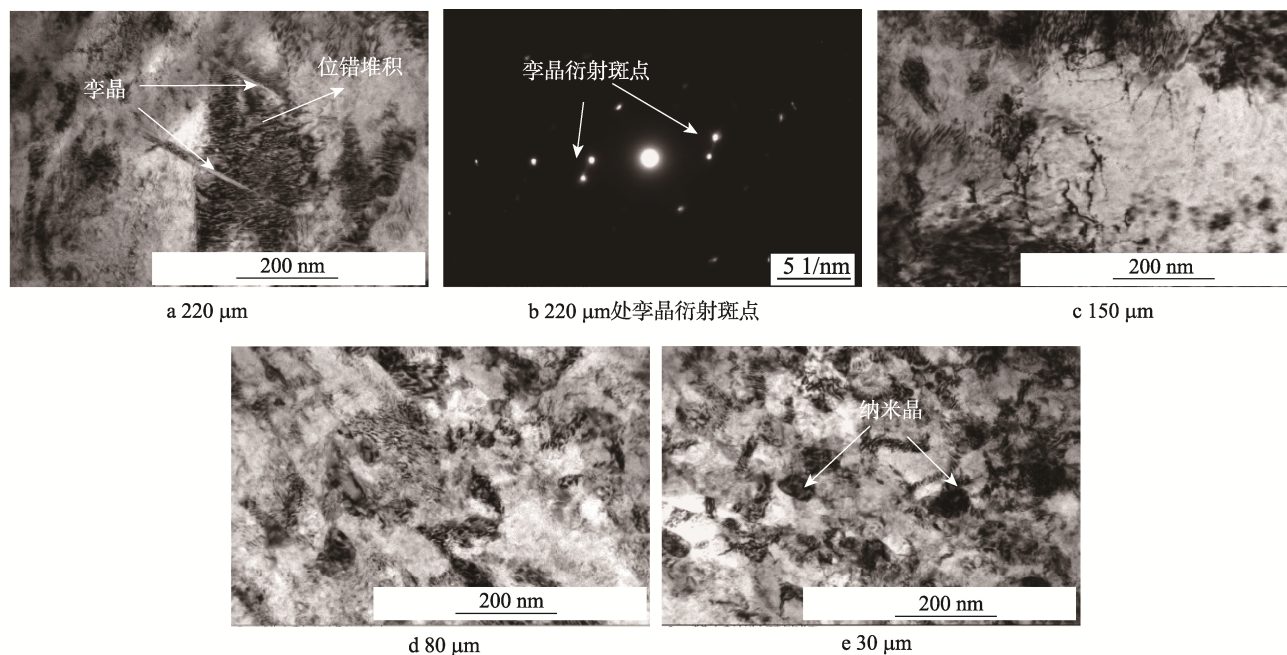


图4 350 N 超声深滚处理后 TC4 在不同深度处的透射电镜图
Fig.4 TEM images of samples at different depth with rolling force of 350 N applied

2.2 超声深滚作用力对 TC4 显微硬度分布的影响

塑性变形能够使得表层产生加工硬化,同时晶粒的细化也使表层硬度值提高。图5为超声深滚作用力对 TC4 表面硬度的影响,可见同一位置处的硬度值随着超声深滚力的增加而增加。基体的硬度值为 328 HV,当深滚压力为 150、250 N 时,距离表面 50 μm 处的硬度值分别能达到 343、356 HV,影响硬度值的强化层分别能够达到约 180、300 μm。将深滚压力升高到 350、450 N 后,距离表面 50 μm 处的硬度分别可达到 373、381 HV,硬度增加层的厚度超过 400 μm。同等离子渗碳和深滚等^[10]工艺相比,硬度值的提高范围不仅更大,且硬度的增长趋势更加平稳,这得益于工艺形成的梯度纳米结构。

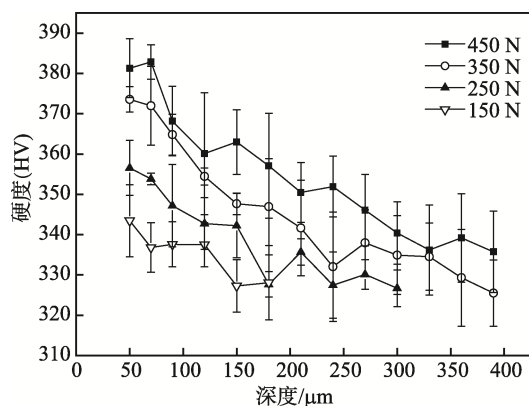


图5 超声深滚作用力对 TC4 表面硬度的影响
Fig.5 Effects of ultrasonic surface deep rolling force on surface hardness of TC4

2.3 超声深滚作用力对 TC4 残余应力分布的影响

残余应力对材料的性能有很重要的影响^[25]。图6为不同超声深滚作用力施加后材料沿深度方向上残余应力的分布。经过精车、抛光处理后,TC4 表面残余压应力的平均值为 150 MPa。表1是不同超声深滚作用力作用后,最大残余压应力值以及材料表面残余压应力值,两者与超声深滚作用力的大小呈正相关。当超声深滚作用力为 350、450 N 时,最大残余压应力值超过 800 MPa。尽管超声深滚作用力不同,但最大残余应力的出现位置均在次表面,这可能与表面的残余应力的释放有关。

另外,当深滚作用力由 150 N 增加到 450 N 时,压应力的深度约为 400、500、450、580 μm。可见,随着深滚作用力的增加,残余应力分布深度呈逐渐增加的趋势。这说明深滚作用力的增大,不仅可以增大表面残余压应力和残余压应力的最大值,还可以使残余压应力的影响范围扩大到离表面更远的深度。

与超声深滚作用力对表面塑性层深度的影响(塑性层深度随作用力增大而不断增大,但增大幅值不断趋缓)相比,最大残余应力随作用力增大而不断增加,增大幅值未呈现趋缓态势。在深滚过程中,不断发生塑性变形,靠近表面的材料将作用力不断传递到更深的材料处,诱发塑性变形。但随着作用力的增加,深度上诱发塑性变形的程度减缓。停止施加超声深滚作用后,已发生塑性变形的材料的晶格尺寸发生变化,呈现出压缩残余应力。而最大残余应力的数值与超声深滚作用力正相关,说明在次表面处塑性变形的变化

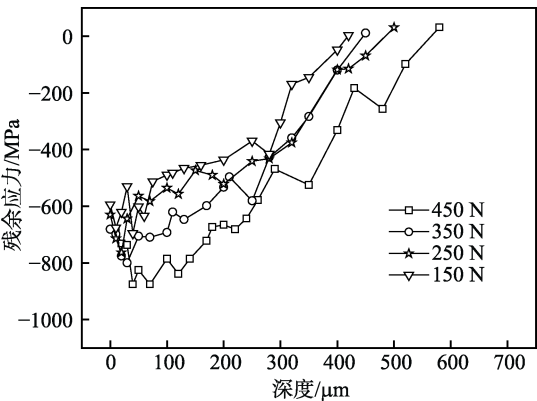


图 6 超声深滚作用力对 TC4 表面残余应力的影响
Fig.6 Effects of ultrasonic deep rolling force on surface residual stress of TC4

表 1 超声深滚作用力和不同位置残余应力大小的关系
Tab.1 Relationship between ultrasonic deep rolling force and residual stress in different locations

Force/N	150	250	350	450
The surface residual compressive stress/MPa	-594.1	-629.8	-680.7	-689.1
Maxmium residual compressive stress/MPa	-695.7	-763.3	-800.1	-875.2

幅度与作用力也呈现正相关趋势。

3 结论

- 1) 超声深滚处理后，表面塑性变形层的厚度随作用力增加而增大，但增大趋势逐渐变缓。在 450 N 和 350 N 的作用力下，塑性层的厚度均超过 300 μm。
- 2) 超声深滚处理后，材料表面出现纳米晶，随作用力增加，纳米晶会逐渐转为非晶态。350 N 深滚后，距表面 220 μm 处会出现少量的孪晶及大量位错堆积，孪晶在塑性应变不断加剧后逐渐消失，总体上晶粒的细化机制遵循位错分割模式。
- 3) 近表面的硬度同作用力呈现正相关趋势。材料基体的硬度为 328 HV，在 150 N 力作用后，材料距表面 50 μm 处的硬度能达到 343 HV，而在 450 N 力作用后可以达到 381 HV。在 450 N 力处理后，影响硬度值强化层的厚度超过 400 μm。
- 4) 最大残余应力位于次表面位置，均出现在距表面 20~40 μm 处。表面残余应力最大值及表面残余应力的分布范围均随超声深滚作用力增加而增大，最大残余应力达到-875 MPa。

参考文献：

[1] LÜTJERING G. Property Optimization through Microstructural Control in Titanium and Aluminum Alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 263(2): 117-126.

[2] JELLITI S, RICHARD C, RETRAINT D, et al. Effect of Surface Nanocrystallization on the Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 224(224): 82-87.

[3] 杜东兴. 表面改性 with 完整性对钛合金疲劳行为的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

DU Dong-xing. Effects of Surface Modification and Integrity on Fatigue Behaviors of Titanium Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

[4] FAN A, MA Y, YANG R, et al. Friction and Wear Behaviors of Mo-N Modified Ti6Al4V Alloy in Hanks' Solution[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(228): S419-S423.

[5] TANG J G, LIU D X, TANG C B, et al. Surface Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Cathode Assisting Discharge Setup and Conventional Plasma Nitriding Methods[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1858-1864.

[6] ZANKOVYCH S, DIEFENBECK M, BOSSERT J, et al. The Effect of Polyelectrolyte Multilayer Coated Titanium Alloy Surfaces on Implant Anchorage in Rats[J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9(1): 4926.

[7] LU Ke, LU Jian. Surface Nanocrystallization (SNC) of Metallic Materials-presentation of the Concept behind a New Approach[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1999, 15(3): 193-197.

[8] PREVÉY P S, CAMMETT J T. The Influence of Surface Enhancement by Low Plasticity Burnishing on the Corrosion Fatigue Performance of AA7075-T6[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(9): 975-982.

[9] ALTENBERGER I, NALLA R K, SANO Y, et al. On the Effect of Deep-rolling and Laser-peening on the Stress-controlled Low- and High-cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V at Elevated Temperatures up to 550 °C[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 292-302.

[10] TSUJI N, TANAKA S, TAKASUGI T. Evaluation of Surface-modified Ti-6Al-4V Alloy by Combination of Plasma-carburizing and Deep-rolling[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 488(1-2): 139-145.

[11] ZHU K Y, VASSEL A, BRISSET F, et al. Nanostructure Formation Mechanism of α-titanium Using SMAT[J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4101-4110.

[12] WANG Z B, TAO N R, TONG W P, et al. Diffusion of Chromium in Nanocrystalline Iron Produced by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Acta Materialia, 2003, 51(14): 4319-4329.

[13] TAO N R, WANG Z B, TONG W P, et al. An Investigation of Surface Nanocrystallization Mechanism in Fe Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Acta Materialia, 2002, 50(18): 4603-4616.

[14] 孟宪伟. 凸轮轴材料的空化水喷丸强化及接触疲劳性能[D]. 大连: 大连交通大学, 2011.

MENG Xian-wei. Water Cavitation Peening and Contact Fatigue Properties of Camshaft Materials[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011

[15] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.

LI Wei, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Development

- and Application of Laser Shock Processing[J]. *Laser & Optoelectronics*, 2008, 45(12): 15-19.
- [16] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展[J]. *制造技术与机床*, 2012(10): 32-36.
ZHENG Jian-xin, LUO Ao-mei, LIU Chuan-shao. Development of Ultrasonic Surface Enhancement Technique[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(10): 32-36.
- [17] TANG J, LUO H Y, ZHANG Y B. Enhancing the Surface Integrity and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V Titanium Alloy through Cryogenic Burnishing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9-12): 2785-2793.
- [18] 王婷. 超声表面滚压加工改善 40Cr 钢综合性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
WANG Ting. Improvement of Comprehensive Properties of 40Cr Steel by Ultrasonic Surface Rolling[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [19] 龚宝明. 金属超声表面滚压加工纳米化研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
GONG Bao-ming. The Research of Metal Ultrasonic Surface Rolling Processed Nanocrystallization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [20] 吕光义, 朱有利, 李礼, 等. TC4 钛合金超声深滚表面强化技术的研究[J]. *中国表面工程*, 2007, 20(4): 38-41.
LV Guang-yi, ZHU You-li, LI Li, et al. Study on Ultrasonic Deep Rolling Surface Mechanical Enhancement Technique of TC4 Titanium Alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2007, 20(4): 38-41.
- [21] 李礼, 朱有利, 吕光义. 超声深滚对 TC4 钛合金表面形貌和表面粗糙度的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(2): 339-341.
LI Li, ZHU You-li, LV Guang-yi. The Effect of Ultrasonic Deep Rolling (UDR) on Surface Topography and Surface Roughness of TC4 Titanium Alloy Enhancement Technique of TC4 Titanium Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(2): 339-341.
- [22] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(9): 1536-1539.
GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(9): 1536-1539.
- [23] 张聪惠, 解钢, 王耀勉, 等. 表面纳米化 TC4 合金微观组织的演化[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(11): 2682-2686.
ZHANG Cong-hui, XIE Gang, WANG Yao-mian, et al. Microstructure Evolution of TC4 Alloy during Nanocrystallization Process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(11): 2682-2686.
- [24] 郭周强, 葛利玲, 袁航, 等. 钛合金 TC4 表面纳米化及其热稳定性[J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(3): 114-118.
GUO Zhou-qiang, GE Li-ling, YUAN Hang, et al. Surface Nano-crystallization of TC4 Titanium Alloy and Its Thermal Stability[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33(3): 114-118.
- [25] 虞付进, 赵燕伟, 张克华. 超声检测表面残余应力的研究与发展[J]. *表面技术*, 2007, 36(4): 72-75.
YU Fu-jin, ZHAO Yan-wei, ZHANG Ke-hua. Research and Development of Surface Residual Stress Testing Based on Ultrasonic[J]. *Surface Technology*, 2007, 36(4): 72-75.