

文章编号 1004-924X(2011)11-2679-06

## 微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的表面性能

周建忠\*, 卫登辉, 黄 舒, 朱 伟, 樊玉杰  
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**采用直径为 300  $\mu\text{m}$  的激光光斑对 TiN 涂层表面进行微尺度激光喷丸强化处理以进一步提高 TiN 涂层的表面性能。利用光学轮廓仪和纳米力学测试系统测量了不同激光工艺参数作用下 TiN 涂层喷丸区域的表面形貌、纳米硬度及弹性模量分布。结果表明,喷丸区域形成的圆锥形凹坑最大深度约为 1.2  $\mu\text{m}$ ,纳米硬度和弹性模量在喷丸中心处变化最大,并在一定范围内随着激光能量的增大而增大,当激光能量为 250 mJ 时,两者最大,分别达到 50.21 GPa 和 402.8 GPa,与初始状态相比分别提高了 140% 和 43.9%。

**关键词:**激光技术;激光喷丸强化;TiN 涂层;表面形貌;纳米硬度

**中图分类号:**TN249; TG156.99 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2679

## Microscale laser shock peening on TiN coatings

ZHOU Jian-zhong\*, WEI Deng-hui, HUANG Shu, ZHU Wei, FAN Yu-jie

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

**Abstract:** A TiN coating was modified by microscale Laser Shock Peening ( $\mu\text{LSP}$ ) based on the laser spot with a diameter of 300  $\mu\text{m}$  to further improve its surface properties. An optical profiler and a nanomechanical test system were used to observe and measure the surface morphology, nano-hardness and the elastic modulus of the TiN coating in a peening area with different  $\mu\text{LSP}$  parameters. Experimental results show that a conical dent is formed in the peening area after  $\mu\text{LSP}$ , and the biggest depth is about 1.2  $\mu\text{m}$ . The nano-hardness and elastic modulus are significantly changed in the center of peening area, and they are enhanced with the increase of laser energy in a certain range. When the laser energy is 250 mJ, both the nano-hardness and elastic modulus reach the maximum, which are 50.21 GPa and 402.8 GPa, respectively. Compared with the initial state of the TiN coating, they have been increased by 140% and 43.9%, respectively.

**Key words:** laser technique; laser shock peening; TiN coating; surface morphology; nano-hardness

收稿日期:2011-03-15;修订日期:2011-06-12.

基金项目:国家教育部博士学科点基金资助项目(No. 200802990004);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2009219);江苏省高校自然科学基金重大项目基金资助项目(No. 08KJA460002);江苏省六大人才高峰资助项目(2009);镇江市工业支撑项目(No. SGY20090026);江苏大学校科研项目基金资助项目(No. CX08B-06X)

## 1 引言

近年来,国内外学者对激光喷丸强化(Laser Shock Peening, LSP)技术进行了大量的研究,取得了一系列的进展和成果。目前,LSP 技术所采用的激光光斑尺寸通常在毫米量级,脉冲能量在数焦耳至数十焦耳之间,其主要是面向宏观金属结构的表面处理<sup>[1-2]</sup>。针对微机电系统中越来越多的金属微构件表面受损失效问题<sup>[3-4]</sup>, Yao 等<sup>[5-7]</sup>提出了微尺度激光喷丸强化(Microscale Laser Shock Peening,  $\mu$ LSP)的概念。 $\mu$ LSP 是在 LSP 的基础上发展而来的,但其采用的激光光斑在微米量级,脉冲能量则在微焦至毫焦范围,主要应用于各种金属微构件(包括涂层薄膜微构件)表面的强化处理。它通过在金属微结构表面层产生有益的残余压应力,有效提高微构件的抗疲劳和磨损性能,进而提高其可靠性,延长微结构器件的使用寿命。 $\mu$ LSP 与 LSP 的基本强化原理相似,但又表现出不同的特点。最明显的为  $\mu$ LSP 特有的微尺度效应,包括 2 个方面:(1)当激光光斑尺寸在微米量级时,激光能量的一维均匀分布假设不再成立,此时激光诱导的等离子体冲击波不仅沿轴向传播,还沿径向扩张,激光冲击波不仅对靶材施加轴向冲击力,还施加径向冲击力;(2)由于被处理对象的尺寸极其微小,且靶材塑性变形区的大小与一个或几个晶粒的大小相当,因而材料的许多特性与其在宏观尺寸下差别较大,材料的晶粒组织和各向异性对塑性变形行为影响严重<sup>[8-9]</sup>。

工业中采用物理或化学气相沉积方法制备的 TiN 涂层的硬度一般在 20 GPa 左右,弹性模量在 250 GPa 左右。随着 TiN 涂层应用的广泛,人们对它的综合性能提出了越来越高的要求,随即出现了如采用多组元、多层及复合涂层等技术来进一步改善 TiN 涂层的硬度、耐磨损性以及其与基体的结合强度等性能<sup>[10-11]</sup>。微尺度激光喷丸强化技术可在不改变 TiN 涂层自身成分及相态的基础上进行涂层的改性,具有灵活性高、可控性强、柔性大等优点。本文采用直径为 300  $\mu$ m 的激光光斑对 TiN 涂层进行单点微尺度激光喷丸强化处理,分析讨论不同激光工艺参数作用下涂层喷丸区域的表面形貌、纳米硬度及弹性模量分

布,为后续大面积搭接喷丸表面完整性研究提供指导。

## 2 实验

TiN 涂层选用刀具中常用的 WC 硬质合金作为基体材料,试样尺寸为 12 mm $\times$ 12 mm $\times$ 2 mm。涂层的制备选用苏州星弧涂层科技有限公司的 Jupiter 系列 PVD(物理气相沉积)涂层设备,通过 Starsphenc-02 涂层测厚仪测得 TiN 涂层的平均厚度为 2.65  $\mu$ m。

微尺度激光喷丸强化实验装置如图 1 所示,其中激光器为 Spilight 2000 型调 Q Nd:YAG 脉冲激光器(激光波长 1 064 nm,脉冲宽度 8 ns,重复频率 10 Hz),通过会聚透镜将激光光束直径聚焦为 300  $\mu$ m 左右。采用黑漆作为能量吸收层,厚度约 10  $\mu$ m;约束层则选用 3 mm 厚的 K9 光学玻璃。实验在试样中心区域冲击 3 排,每排代表一种激光能量,同时每排冲击 5 个点以方便求取各响应值的平均值,各冲击点冲击次数为 1 次,间距为 1 mm。

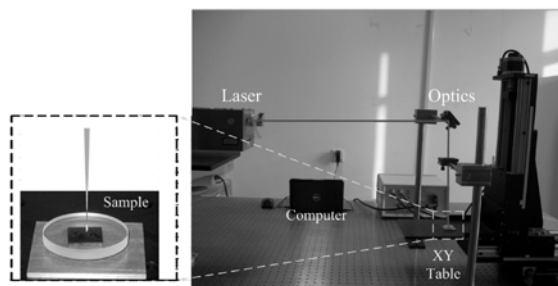


图 1 微尺度激光喷丸强化实验装置图

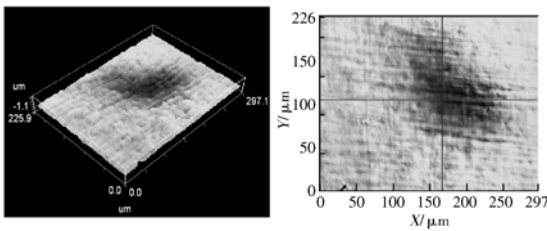
Fig. 1 Experimental setup of microscale laser shock peening

## 3 结果与讨论

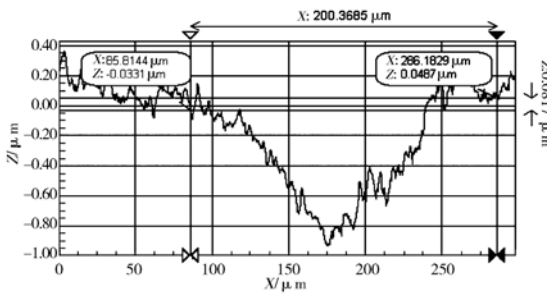
### 3.1 表面形貌

在微尺度激光喷丸强化中,当激光诱导的冲击波峰值压力超过试样材料的动态屈服强度时,试样表面就会产生塑性变形,从而形成具有一定深度的圆形凹坑。本文采用 VEECO WYKO NT1100 型非接触式光学轮廓仪,对激光喷丸后试样的表面形貌进行检测分析。运用该光学轮廓仪中的垂直扫描干涉测量法,可准确测量材料表

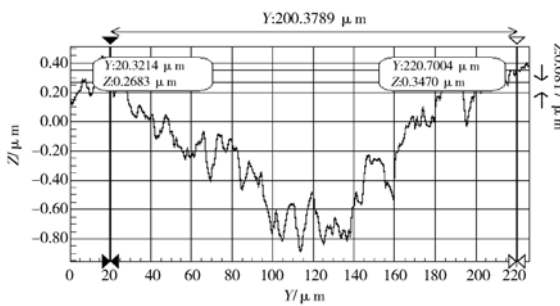
面的高度微差,并通过分析软件 Vision 3.0 计算生成扫描区域的三维形貌。



(a) 三维云图 (b) 平面云图  
(a) 3D image (b) 2D image



(c) X 方向表面凹坑轮廓  
(c) Dent profile in X direction



(d) Y 方向表面凹坑轮廓  
(d) Dent profile in Y direction

图 2 典型 TiN 涂层喷丸区域表面形貌图

Fig. 2 Typical peening area morphology of TiN coating

图 2 所示为 TiN 涂层试样经单点微尺度激光喷丸强化后喷丸区域的典型表面形貌图,所用激光能量为 200 mJ。图 2(a)、(b)分别为试样喷丸区域三维及平面云图,其中扫描区域为 226 μm × 297 μm,由图可以发现,凹坑近似为一个圆形,只是在右上角有所缺失,这与激光光束的不稳定性及黑漆喷涂不均匀有关。图 2(c)、(d)为试样喷丸区域任一横截面处 X 和 Y 方向的表面轮廓

图,由图可知,凹坑变形直径约为 200 μm,小于激光光斑直径,这是由于激光能量在空间为高斯分布,而 TiN 涂层的材料屈服强度又很高,在激光光斑边缘处激光能量较小,材料表面不足以产生塑性变形。同时,由图中还可以发现,试样喷丸区域塑性变形沿光斑中心处近似为对称分布,并在喷丸区域中心处塑性变形达到最大,随着与喷丸区中心距离的增大,塑性变形逐渐减小并在凹坑边缘处出现轻微的凸起。由于图中单位在微米量级,因而曲线波动较大,但总体趋势较为理想。

图 3 所示为不同激光能量下试样表面喷丸区域的凹坑轮廓。由图中可以发现,随着激光能量的增大,凹坑塑性变形范围与变形深度也随之增大,在激光能量为 250 mJ 时,凹坑最大塑性变形深度达到 1.2 μm。

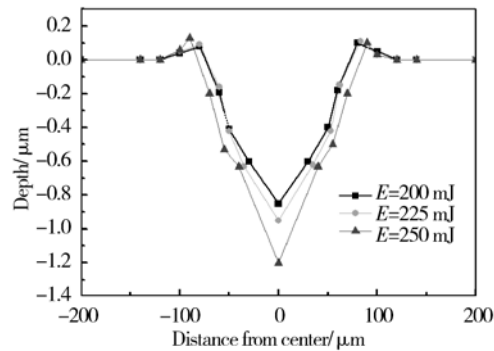


图 3 不同激光能量下凹坑轮廓

Fig. 3 Dent profiles under different pulse energies

### 3.2 纳米硬度

微尺度激光喷丸强化通过使 TiN 涂层表面产生塑性变形,并形成一定深度有益的残余压应力分布,从而提高其表面的硬度及耐磨损性能,因此如何正确表征涂层试样经冲击后表面硬度的变化,是研究微尺度激光喷丸 TiN 涂层表面强化的一个关键问题。本文采用 triblab 原位纳米力学测试系统,对试样表面进行纳米压痕测试,最终获得不同激光能量下 TiN 涂层表面的硬度及弹性模量值。试验选用原位成像模式进行加载,施加最大载荷为 1 500 μN,以恒定速率 150 μN/s 进行加载,达到最大载荷后保载 10 s,以减小蠕变对卸载位移的影响,最后以同样速率卸载至最大载荷的 10%,恒定载荷保持 60 s,同时监测位移用于修正温度漂移。图 4 所示为 Berkovich 金刚石压头在试样表面所形成的压痕三维形貌图,从图

中可以看出,压痕的接触半径约为  $0.2 \mu\text{m}$ ,压入深度约为  $50 \text{ nm}$ ,远小于涂层厚度的  $1/8$ ,因而测试不会受到基体的影响。

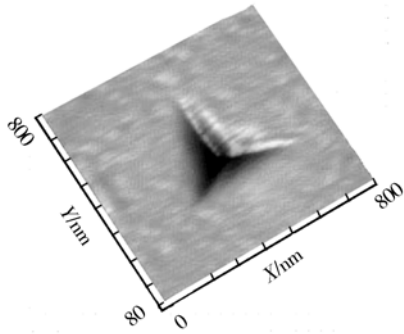
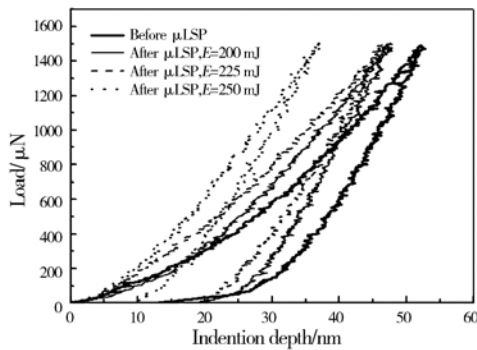


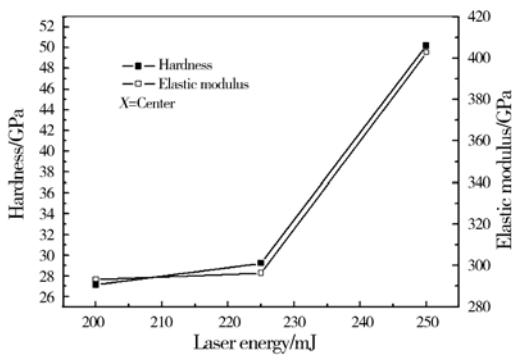
图 4 压痕三维形貌图

Fig. 4 3D image of indentation



(a) 载荷-位移曲线

(a) Load-depth curves



(b) 硬度与弹性模量值

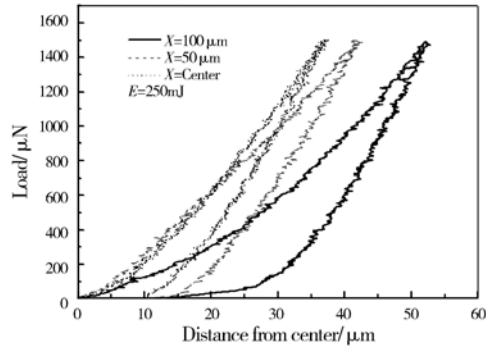
(b) Hardness and elastic modulus

图 5 不同激光能量下喷丸中心处纳米压痕测试图

Fig. 5 Nano-indentation test under different laser energies

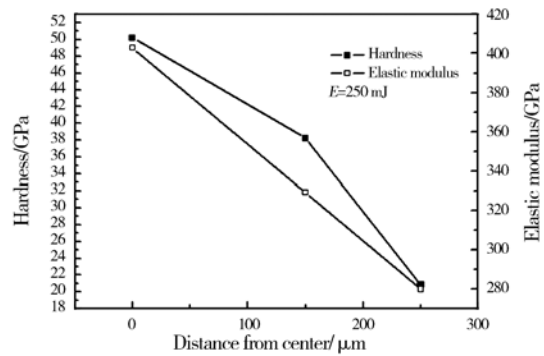
图 5(a)所示为不同激光能量下 TiN 涂层表面激光喷丸中心处的载荷-位移曲线,图 5(b)为根据上述曲线计算所得的硬度与弹性模量值,

TiN 涂层在未经激光喷丸前硬度与弹性模量分别为  $20.85 \text{ GPa}$  和  $279.92 \text{ GPa}$ ;经过激光喷丸后,其硬度与弹性模量均随着激光能量的增大而增大,在激光能量为  $250 \text{ mJ}$  时,硬度与弹性模量达到最大,分别为  $50.21 \text{ GPa}$  和  $402.8 \text{ GPa}$ ,分别提高了  $140\%$  和  $43.9\%$ ,达到了金刚石、C-BN 及  $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$  等三类传统超硬质涂层 ( $>50\text{GPa}$ ) 的硬度。涂层喷丸区域内硬度与弹性模量的增大主要有三方面原因:一是材料表层晶粒在激光冲击波压力作用下发生大量位错运动和孪晶,从而引起材料表面晶粒细化;二是剧烈塑性变形引起材料表面的加工硬化效应;三是激光喷丸在喷丸区域内诱导了一定的残余压应力分布,这都有利于提高涂层表面的硬度等力学性能。



(a) 载荷-位移曲线

(a) Load-depth curve



(b) 硬度与弹性模量值

(b) Hardness and elastic modulus

图 6 喷丸区域内纳米压痕测试

Fig. 6 Nano-indentation test within peening area

图 6(a)所示为激光能量为  $250 \text{ mJ}$  时喷丸区域内不同位置处的载荷-位移曲线,从左到右依次为喷丸中心处、距中心  $50 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  处。图 6(b)为根据上述曲线计算所得的硬度与弹性模量

值,可以看出,TiN 涂层在经过激光喷丸后,喷丸区域内的硬度与弹性模量均有了一定程度的提高。其中喷丸中心处的变化最大,随着与喷丸中心距离的增大,硬度与弹性模量依次降低,在距离喷丸中心 100  $\mu\text{m}$  处,硬度与弹性模量达到最小,接近涂层未处理前的状态。这与之前所得的试样表面喷丸区域塑性变化的变化趋势相一致(图 3),即硬度与弹性模量值随着塑性变形的增大而增大。

## 4 结 论

本文采用微尺度激光喷丸强化技术对 TiN 涂层表面进行处理,TiN 涂层试样经单点微尺度激光喷丸强化后,喷丸区域形成了具有微小深度的圆锥形凹坑,凹坑直径约为激光光斑直径的 2/3;随着激光能量的增大,凹坑塑性变形范围与

变形深度也随之增大,在激光能量为 250 mJ 时,凹坑最大塑性变形深度达到 1.2  $\mu\text{m}$ 。

TiN 涂层试样经单点微尺度激光喷丸强化后,试样表面喷丸区域内的硬度和弹性模量均有了很大程度的提高,二者在喷丸中心处变化最大且随着与喷丸中心距离的增大而减小;同时喷丸中心处的硬度和弹性模量在一定范围内随着激光能量的增大而增大,当激光能量为 250 mJ 时,两者最大值分别为 50.21 GPa 和 402.8 GPa,与初始状态相比分别提高了 140% 和 43.9%。

采用本文提出的方法,可在不改变涂层自身成分及相态的基础上进一步提高了涂层的表面硬度、弹性模量等力学性能,该方法提供了一种改善薄膜涂层表面性能的新途径,有助于拓展激光技术在薄膜涂层表面改性领域的应用。

## 参考文献:

- [1] 黄舒,周建忠,蒋素琴,等. 激光连续喷丸强化过程中应力的动态分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 256-260.  
HUANG SH, ZHOU J ZH, JIANG S Q, *et al.*. Dynamical analysis on stresses in metal caused by laser shot peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 256-260. (in Chinese)
- [2] YTRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, *et al.*. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 221-227.
- [3] 胡光伟,刘译文,侯智昊,等. 用于制备高机械可靠性 RF MEMS 开关的新型工艺[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1213-1217.  
HU G W, LIU Z W, HOU ZH H, *et al.*. Novel process for fabrication of RF MEMS switch with high mechanical reliability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1213-1217. (in Chinese)
- [4] 汪红,汤俊,刘瑞,等. 单轴微拉伸 MEMS 材料力学性能测试的系统集成[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1204-1211.  
WANG H, TANG J, LIU R, *et al.*. Integrated uniaxial tensile test system for measuring mechanical properties of MEMS materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1204-1211. (in Chinese)
- [5] ZHANG W W, YAO Y L. Microscale laser shock processing of metallic components[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2): 369-378.
- [6] ZHANG W W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126: 10-17.
- [7] ZHANG W W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: experiment, modeling and simulation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126: 18-24.
- [8] WEI D H, ZHOU J Z, HUANG S, *et al.*. Progress in theory and application research on microscale laser shock peening[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 135: 194-199.
- [9] GEERS M G D, BREKELMANS W A M, JANSSEN P J M. Size effects in miniaturized polycrystalline FCC samples: strengthening versus weakening [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43:7304-7321.
- [10] 王亮,许晓磊,许彬等. 离子氮碳共渗与离子镀 TiN 复合处理研究[J]. 金属热处理学报, 1999, 20(3): 52-55.  
WANG L, XU X L, XU B, *et al.* Study on com-

plex treatment of ion nitrocarburizing and TiN ion plating[J]. *Transaction of Metal Heat Treatment*, 1999, 20 (3): 52-55. (in Chinese)

- [11] 董瑜亮, 闫旭波, 赵升升, 等. (Ti, Al)N/Ti<sub>2</sub>AlN 涂层的制备[J]. *金属学报*, 2010, 46(6): 743-

747.

DONG Y L, YAN X B, ZHAO SH SH, *et al.*. Preparation of (Ti, Al)N/Ti<sub>2</sub>AlN coating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(6): 743-747. (in Chinese)

#### 作者简介:



**周建忠** (1964—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事先进激光制造技术及微塑成形理论与微细加工技术等方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn



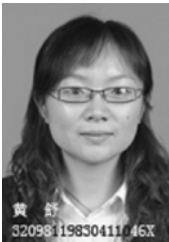
**朱伟** (1987—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事微尺度激光喷丸强化技术等方面的研究。E-mail: zw461832110@163.com



**卫登辉** (1986—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事微尺度激光喷丸强化技术等方面的研究。E-mail: weidhui@126.com



**樊玉杰** (1983—), 女, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事微尺度激光喷丸强化技术等方面的研究。E-mail: fanyujie@tom.com



**黄舒** (1983—), 女, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事激光新技术应用方面的研究。E-mail: huangshu11@sina.com