DOI: 10.3901/JME.2018.02.117

基于纳米压痕和纳米冲击技术研究溅射功率对 Ti 薄膜力学性能的影响*

靳巧玲^{1,2} 王海斗² 李国禄¹ 张建军¹ 刘金娜^{2,3}

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院 天津 300130;

2. 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072;

3. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 控制磁控溅射工艺中的溅射功率为变量,在玻璃基体上沉积了相同厚度的纯 Ti 金属薄膜。采用原子力显微镜、X 射线衍射仪、纳米压痕仪、纳米冲击系统、电子薄膜应力分布测试仪表征薄膜表面形貌、相结构和力学性能,研究溅射功率对薄膜显微结构和力学性能的影响机制。结果表明:随着溅射功率的增加,Ti 膜晶粒尺寸和粗糙度与溅射功率呈指数函数增大,晶粒择优取向程度与薄膜硬度总体呈现上升的趋势;溅射功率较小时,薄膜延展性好,不易产生疲劳断裂;薄膜疲劳寿命受残余应力的影响程度高,残余应力最大的薄膜,疲劳寿命最短。分析原因认为溅射功率主要通过影响 Ti 原子团、Ar 离子团的能量以及靶材原子的动能,进一步影响薄膜的显微结构和残余应力;薄膜硬度受晶粒择优取向程度影响较大;残余拉应力的增加会促进裂纹的形核和生长,降低薄膜的断裂韧性并缩短疲劳寿命;纳米冲击测试结果显示溅射功率变大,薄膜破坏形式由塑性变形转变为脆性断裂,即薄膜由韧性向脆性转变。

关键词: Ti 薄膜; 溅射功率; 残余应力; 压入塑性; 抗冲击疲劳

中图分类号: TG133

Effect of Sputtering Power on the Mechanical Properties of Ti Film Based on the Nano Indentation Method and Nano Impact Method

JIN Qiaoling^{1,2} WANG Haidou² LI Guolu¹ ZHANG Jianjun¹ LIU Jinna^{2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. National Key Lab for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072;

3. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: Ti metal film with the same thickness has been deposited on glass substrate by magnetron sputtering method with different sputtering power. In order to study the influence mechanism of sputtering power on the structure and mechanical properties, surface morphology, phase structure and mechanical properties of films is studied by using atomic force microscope, X-ray diffractometer, nanoindentation, nano-impact system and electronic film stress distribution tester. The results show that with the increasing of sputtering power, the grain size and roughness increases with the sputtering power exponentially. The intensity of preferred orientation and hardness is slight increasing with the increasing of sputtering power. A lower sputtering power tend to produce higher ductility and resistance to fatigue fracture. The results also show that fatigue fracture life affected by residual stress Seriously, and the film with the biggest residual stress has the the shortest fatigue life. By analyzing the result, we know that sputtering power influences the energy of Ti radical, Ar ion-cluster and target material atoms firstly and further affects the microstructure and residual stress of the film. The hardness is mainly depended by the degree of grain preferential orientation. The residual tensile stress increases will promote the nucleation and growth of cracks, reduce the fracture toughness of thin films and shorten the fatigue life; nano-impact testing results show that with the sputtering power increasing, the film breaking form by plastic deformation to brittle fracture, which transformed from ductile to brittle film.

Key words: Ti film; sputtering power; residual stress; indentation plasticity; impact fatigue fracture resistance

0 前言

随着微机电(Micro-electro mechanical system,

MEMS)、微电子(Micro-electronics, ME), 微器件(Micro-device, MD)系统的迅速发展,金属钛薄膜由于其结构简单、功能性强以及易于集成化制造等优点得到广泛应用^[1-4]。金属钛膜不仅可以用于可见光及红外光的吸收,还用于核能技术中模拟氙衰变造成的扩散和成泡。此外,作为平面薄膜靶,钛

* 国家自然科学基金重点(51535011)和国防 973 计划(61328304)资助项目。20170327 收到初稿,20170917 收到修改稿

膜在惯性约束聚变核物理试验中具有广阔的应用前景^[5]。金属薄膜不仅作为功能薄膜需要研究其电磁光声热等方面的功能性,在力学性能以及微观结构等方面也提出了更高的要求。关于薄膜力学性能的研究在薄膜类器件的服役性能、使用寿命和工作可靠性等方面具有重要的理论指导作用^[6-9],因此研究金属钛薄膜的力学性能及微观结构是极为重要的。调查表明,关于金属钛膜的研究往往集中于沉积参数对微观结构和残余应力的影响。例如 DONG 等^[10]研究了不同沉积温度对 Ti 薄膜的微观结构和力学性能的影响,发现随着沉积温度的升高,晶粒尺寸先增大后减小,残余应力由压应力变为拉应力。段玲珑^[5]采用 X 射线衍射计算应力的方法,发现了金属 Ti 薄膜内应力随溅射功率先增大后减小的规律,并从 Ar 离子能量角度分析了内应力随溅射功率变化的原因。然而金属钛薄膜在服役过程中时常受到循环动态载荷的作用,而产生破坏或疲劳失效,并且据调查,在众多关于钛薄膜的研究工作中关于溅射功率对薄膜的压入塑性和抗冲击疲劳性能影响的研究较少。为进一步提升金属钛薄膜在微机电或微电子领域中服役安全性,本文采用纳米冲击测试技术真实地模拟了薄膜服役环境,为薄膜断裂疲劳失效提供了理论基础。采用磁控溅射的方法,通过改变溅射功率制备了四种钛膜,研究了溅射功率对 Ti 薄膜的微观结构与力学性能的影响。使用原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)获得薄膜的表面形貌及粗糙度。采用 D8 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)研究薄膜的相结构和晶粒择优生长情况,利用电子薄膜应力分布测试仪通过曲率法测量薄膜内部残余应力的分布,使用美国 MTS 公司的 XP 型纳米压痕仪和 MML 公司的 Nano Test 纳米冲击系统进行硬度、弹性模量、压入塑性以及抗冲击疲劳性能等相关力学测试。本研究通过研究溅射功率对薄膜显微结构和力学性能的影响机制,为制备性能优良能够满足不同服役环境的 Ti 薄膜提供依据。

1 薄膜的制备与表征方法

采用北仪创新真空技术有限责任公司生产的“双端高真空磁控溅射仪”在玻璃基片上,控制溅射功率分别为 60 W、80 W、110 W、200 W,在相同时间 2 h 内沉积了纯金属 Ti 膜。通过测定四种薄膜的厚度并计算得出沉积速率,分别为 0.056 nm/s, 0.076 nm/s, 0.097 nm/s 和 0.207 nm/s。根据该速率设定在 60 W, 80 W, 100 W 和 200 W 功率下的沉积时间分别为 3.5 h, 2.5 h, 2.0 h 和 1 h,最终获得

厚度为 700 nm(误差不超过±50 nm)的四种纯 Ti 金属薄膜。试验中采用直径为 80 mm,厚 6 mm,纯度为 99.99% 的 Ti 靶。进行镀膜操作前,需要使用无水乙醇清洗玻璃基片表面,利用压缩空气吹干。玻璃基片需预先贴好胶带,以获得台阶试样测膜厚,随后将基体放入腔体中再用 Ar 离子清洗 5 min。沉积过程中设定腔体内温度为 200 ℃,Ar 气流量 200 sccm,真空室压强为 0.5 Pa。

本文基于纳米压痕仪进行相关力学性能测试,硬度和弹性模量采用连续刚度(Continuous stiffness measurement, CSM)法测试,固定压深 1 μm,每个试样上压入三点取平均值。纳米压痕技术实现了低载荷量程高分辨力、动态测量,满足了薄膜样品纳米级力学测试的需求^[11-14]。纳米冲击测试采用圆形压头,每个样品冲击冲击 6 个点,为保证每个冲击点互不影响设定点间距为 12 μm,冲击距离为 10~12 μm,冲击力度为 10 mN,冲击频率由计算机精确控制在 2 s/次,冲击 300 次,冲击时间为 600 s。图 1 为其工作原理示意图。样品台上装有压电驱动器,输入信号发生器发出振动信号,样品振动信息经压针反馈给放大器。放大后的信号和发生器发出的信号合成,形成振动信号在输入给压电驱动器,从而控制样品产生振动,实现连续的冲击测试。通过采集的冲击深度与冲击次数的数据,研究动态加载条件下薄膜的疲劳损伤和变形情况^[15-19]。

图 1 纳米冲击测试系统工作原理示意图

另外,为方便快捷地测试薄膜的断裂韧度,采用了压入塑性 p 定性判断薄膜的断裂韧度的方法^[20],压入塑性由加载曲线的塑性变形量 ε_p 和完全变形量 ε 的比值表示

$$p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = \frac{OA}{OB} = \frac{\text{塑性变形量}}{\text{总变形量}} \quad (1)$$

以 60 W 功率的 Ti 膜为例,塑性变形量 ε_p 和完全变形量 ε 对应于加载卸载曲线上 OA 和 OB 的长度,如图 2 所示。这里需要说明的是压入塑性不等于断裂韧度,压入塑性是抵抗塑性变形的能力,而

断裂韧性是材料抵抗裂纹扩展的能力。

图2 载荷位移曲线中塑性变形量OA和总变形量OB示意图

此外，薄膜的残余应力对薄膜结合性能，断裂韧性等均有很重要的影响，主要测试方法有X射线法、曲率法和光谱法^[21-22]。为方便快捷地测试薄膜残余应力，本文采用电子薄膜测试仪通过曲率法测量薄膜内部残余应力的分布，其原理是薄膜沉积到基体上会造成基体表面微小的变形，通过测量基体镀膜前后表面曲率的变化来计算薄膜残余应力，应力大小由Stoney公式计算得出

$$\sigma_f = \frac{M_s t_s^2}{6t_f} (k - k_0) \quad (2)$$

式中， t_s 和 t_f 分别为基体和薄膜的厚度； k_0 和 k 分别为基体镀膜前后的曲率半径； $M_s = E_s / (1 - \nu_s)$ 为基片的二维弹性模量， E_s 和 ν_s 为基体的弹性模量和泊松比。

2 结果与分析

2.1 溅射功率对薄膜微观结构的影响

图3为四种薄膜的AFM三维表面形貌图，由图可知溅射功率较小时，薄膜表面呈现均匀分布的小岛状颗粒，并且大小均一，排列紧密。随着溅射功率的增大，薄膜表面的颗粒逐渐长大，表面岛状物呈柱状纵向生长。在功率达到110W时，薄膜表面的岛状颗粒尺寸大小不一，存在明显的超大型颗粒。功率继续增加，岛状颗粒进一步团聚长大，颗粒尺寸逐渐均匀，并且尺寸和间距变大，致使岛密度降低。为研究薄膜表面颗粒尺寸与溅射功率的关系，本文选用AFM三维图像的截面图，将每个峰的宽度作为颗粒尺寸。通过计算，晶粒尺寸和粗糙度与溅射功率均呈指数函数增大(图3)。分析认为在溅射功率较低时，钛原子团动能较小，在基体表面先以二维层状生长，随着膜厚的增加，转变为岛状生长，即先层状后岛状的复合生长(Stranski-Krastanov)模式。溅射功率增大，薄膜表面Ti原子脱附和Ar离子的刻蚀变得严重，同时由于溅射功

率的增大，靶材溅射出的原子动能增大，溅射原子在薄膜表面迁移速度增高和数量增大，在形成一定厚度时，层状生长模式转变为岛状生长模式，薄膜原子容易团聚长大形成岛状结构，所以薄膜表面粗糙度增大。当溅射功率提高到一定程度时，如图4中的110W，此时岛状结构进一步长大，Ar离子的刻蚀程度加深，岛状物密度降低，导致粗糙度增大速率逐渐变缓。

(a) 60 W

(b) 80 W

(c) 110 W

(d) 200 W

图3 不同靶功率下获得的Ti薄膜表面形貌图

图4 不同溅射功率下薄膜基本参数的变化图

图5 不同功率下Ti薄膜的XRD衍射谱

2.2 溅射功率对薄膜力学性能的影响

薄膜的硬度、残余应力、压入塑性以及抗冲击疲劳损伤等因素都是评价薄膜性能好坏的重要指标。图6为四种薄膜硬度与压入深度的关系曲线。图6a和6b显示随着压入深度逐渐增大,硬度和弹性模量逐渐接近于基体硬度。根据1/10的薄膜厚度法则,取压入深度为薄膜厚度1/10处得硬度值为薄膜硬度,分别获得薄膜的硬度和弹性模量列于表1中。将四种薄膜的硬度和弹性模量采用柱状图形式

图5为不同溅射功率下获得的纯Ti膜XRD衍射图谱,由图可知,溅射功率不同的纯Ti薄膜没有发生相结构的变化,且在 $2\theta=38.3^\circ$ 峰对应的(002)晶面方向有定向生长的特性,说明磁控溅射沉积的薄膜晶粒择优取向程度较高。与PDF卡片对比可知,四种Ti薄膜晶型结构相同,均为六方晶型。并且随着溅射功率的增加,Ti膜在 $2\theta=38.3^\circ$ 的XRD衍射峰越来越强,即Ti膜在表面自由能最小的(002)晶面方向上定向生长愈加明显,到200 W时只存在(002)方向生长的晶相,表明Ti的结晶程度越来越高。

直观地表示在图6c和6d中,由图可见四种薄膜硬度总体呈现上升趋势,但弹性模量没有明显的变化,结合XRD结果分析发现(002)晶面正是六方晶型的密排面,原子堆积紧密,距离小结合力大。所以认为四种薄膜的硬度是受晶粒择优取向的影响,呈现出上升的趋势。

薄膜应力是沉积薄膜内部状态的宏观反映,是评判薄膜性能优劣的重要指标。在薄膜生长过程中由于薄膜内部形成的应力大小不同,会对基材产生

图 6 薄膜硬度和弹性模量随压入深度的变化以及硬度和弹性模量随溅射功率的柱状变化图

不同的变形影响^[23-24]，据此采用曲率法进行薄膜应力的测试。将电子薄膜应力测试仪得到应力大小列于表 1 中，从表中可以看出薄膜内部应力随薄膜厚度的增加先减小后增大再减小，Ti 薄膜中普遍存在拉应力。从电子薄膜应力测试仪得到的残余应力分布图(图 7)，可以看出溅射功率较小时，应力分布不均匀，且应力值在较宽的范围内波动。随着功率的增大，残余应力分布逐渐均匀，应力值浮动变小，分布也较均匀。综合四种薄膜残余应力的变化趋势发现溅射功率对 Ti 膜应力有一定影响，应力先随溅射功率增大先增大后减小，在 110 W 时达到最大值为 1.313 GPa。分析认为溅射功率较小时，溅射 Ar 离子浓度和能量随着溅射功率的增加而增大，Ti 原

表 1 不同功率 Ti 薄膜力学参数

力学参数	溅射功率/W			
	60	80	110	200
硬度/GPa	3.5	6.9	6	10
弹性模量/GPa	165	156	170	175
残余应力/GPa	0.592	0.384	1.313	1.183
压入塑性	0.671	0.592	0.587	0.584

(a) 60 W

(b) 80 W

图 7 不同功率的 Ti 薄膜中残余应力分布图

子团能量也相应增大,使得原子团排列更加紧密,薄膜的内应力得不到释放而增加。随着溅射功率的进一步增大,Ar 离子和 Ti 原子团的能量继续增大,加剧了对已形成 Ti 膜的刻蚀,同时促进了在基片表面的横向迁移,Ti 膜结构的调整释放了应力,并且基片温度上升,在沉积结束后的降温起到退火的作用,降低了薄膜内应力。

薄膜的断裂韧性直接影响着薄膜的抗冲击疲劳性能和使用寿命,所以需要发展高硬度和高韧性的薄膜。压痕法不仅可以简单定性判断材料断裂韧度的好坏,还可以定量测量薄膜的断裂韧度。本文中为了简便地判断薄膜的断裂韧度,采用了压入塑性定性判断薄膜断裂韧度的方法。通过纳米压痕法获得的薄膜的载荷-位移曲线算得出 Ti 膜的压入塑性列于表 1 中。从表 1 中可以看出,薄膜压入塑性随功率的增加逐渐降低,溅射功率的增大有利于提升薄膜的硬度,但会降低薄膜的断裂韧性。压入塑性随着薄膜拉应力的增大逐渐降低,即可定性判断薄膜中残余拉应力的增加会降低断裂韧性,该结论与文献[25]的报道一致。分析认为,拉应力会促进裂纹的形核和生长,进而降低薄膜断裂韧性。

图 8 为四种薄膜的抗冲击疲劳性能测试结果,功率较小的薄膜其冲击深度随着冲击次数的增加逐渐增大,最终疲劳极限深度达到 1 085 nm,在整个冲击过程中深度递增没有产生突变,说明薄膜发生塑性形变而没有发生突然的断裂。但在 80 W、110 W、200 W 下沉积的薄膜,在塑性变形的同时,冲

图 8 四种薄膜的抗冲击疲劳性能测试结果

击深度均出现明显的突进, 说明薄膜中萌生了疲劳裂纹, 严重的还会产生小面积的剥落。对比四种薄膜, 发现功率较大时薄膜的硬度较大, 而冲击试验中冲击深度较浅, 但是会产生疲劳断裂的现象; 而功率较小的薄膜虽然硬度低, 但是在承受冲击载荷的反复作用时, 不会产生断裂, 而是塑性变形程度逐渐加大最终达到极限深度达到平稳状态。并且残余应力对薄膜疲劳损伤的影响突出, 在残余应力最大的薄膜(110 W)中, 在第 7 次和第 28 次冲击时深度就产生了突进, 第二次断裂时的冲击次数最少, 疲劳寿命最短。由此可见溅射功率较小时, 薄膜更趋向于韧性材料, 延展性好; 而溅射功率增大所制备的薄膜逐渐由韧性向脆性转变。

3 结论

(1) 磁控溅射工艺制备的 Ti 膜晶粒尺寸和粗糙度与溅射功率呈指数函数增大。溅射功率较大时, 薄膜表面 Ti 原子脱附加剧, Ar 离子的刻蚀严重, 加之靶材原子动增加, 薄膜由层状生长转变为岛状生长, 所以薄膜表面粗糙度增大。当溅射功率提高到一定程度, 如 110 W, 薄膜表面岛状结构长大, Ar 离子的刻蚀程度加深, 岛状颗粒密度降低, 导致粗糙度增大速率变缓。

(2) 溅射功率增加, 晶粒择优生长程度越来越高, 并且择优取向(002)面为六方晶型的密排面。薄膜硬度总体呈现出上升的趋势, 分析认为四种薄膜的硬度是受晶粒择优取向的影响。

(3) 薄膜残余应力随溅射功率先增大后减小, 溅射功率通过影响 Ar 离子和 Ti 原子团的能量, 以及原子团的迁移速率, 进而影响薄膜的残余应力。薄膜压入塑性随功率的增加逐渐降低, 薄膜的残余拉应力的增加会降低薄膜的断裂韧性, 认为拉应力会促进裂纹的形核和生长, 进而降低薄膜断裂韧性。

(4) 冲击测试中, 功率较小的薄膜发生塑性形变而没有产生突然的断裂, 功率较高的薄膜不仅产生塑性变形, 还会出现冲击深度突进现象, 说明薄膜产生了破坏。并且残余应力最大的薄膜, 疲劳寿命最短。可见溅射功率较小时, 薄膜更趋向于韧性材料, 延展性好; 而溅射功率增大所制备的薄膜逐渐由韧性向脆性转变。

参 考 文 献

- [1] FAISAL N H, AHMED R, Fu R. Nano-impact (fatigue) characterization of as-deposited amorphous nitinol thin film[J]. *Coatings*, 2012, 2: 195-209.
- [2] 刘豪, 尚德广, 马新平, 等. 电镀铜薄膜疲劳性能与寿命预测[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(9): 261-265.
LIU Hao, SHANG Deguang, MA Xinping, et al. Tension-tension fatigue properties and life prediction of electroplated copper films[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 261-265.
- [3] FU Yongqing, DU Hejun, HUANG Weimin, et al. TiNi-based thin films in MEMS applications: A review[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2004, 112: 395-408.
- [4] 田民波, 李正操. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
TIAN Minbo, LI Zhengcao. Thin film technologies and materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [5] 段玲珑. 磁控溅射制备 Ti 膜的结构与性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
DUAN Linglong. Studies on the structure and properties of Ti films fabricated by magnetron sputtering[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [6] 董美伶, 崔秀芳, 王海斗, 等. 不同厚度纳米 Ti 薄膜的力学性能[J]. *材料工程*, 2015, 43(11): 50-56.
DONG Meiling, CUI Xiufang, WANG Haidou, et al. Effect of sputtering time on properties of nano-Ti Films [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(11): 50-56.
- [7] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
XIONG Junjiang. Fatigue and fracture reliability engineering[M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 2008.
- [8] NAPLOSZEK-BILNIK I, BUDNIOK A, LOSIEWICZ, B, et al. Electrodeposition of composite Ni-based coatings with the addition of Ti or/and Al particles [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 474: 146-153.
- [9] WANG Hefeng, SHU Xuefeng, LIU Erqiang, et al. Assessments on corrosion, tribological and impact fatigue performance of Ti- and TiN-coated stainless steels by plasma surface alloying technique[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 239: 123-131.
- [10] DONG Meiling, CUI Xiufang, WANG Haidou, et al. The effect of different substrate temperatures on the microstructure and residual stress of Ti film[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 843-848.
- [11] 孔祥霞, 孙凤莲, 杨淼森, 等. Bi 和 Ni 元素对 Cu/SAC/Cu 微焊点体钎料蠕变性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(2): 53-60.
KONG Xiangxia, SUN Fenglian, YANG Miaosen, et al.

- Effect of Bi and Ni concentration on the creep behavior of the bulks of Cu/SAC/Cu micro solder joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 53-60.
- [12] MA Xiangdong, GUAN Yingping, YANG Liu. Determination of elastoplastic mechanical properties of the weld and heat affected zone metals in tailor-welded blanks by nanoindentation test[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 911-918.
- [13] 鲁春朋, 高航, 滕晓辑, 等. 磷酸二氢钾单晶体纳米压痕的力学行为[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 192-198.
- LU Chunpeng, GAO Hang, TENG Xiaoji, et al. Mechanical response of KDP single crystal using nanoindentation technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 192-198.
- [14] 朱丽娜. 基于纳米压痕技术的涂层残余应力研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- ZHU Lina. Research on residual stresses of coatings by nanoindentation technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [15] 刘金娜, 徐滨士, 王海斗, 等. 薄膜疲劳失效预测方法与损伤机制的研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 26-34.
- LIU Jinna, XU Binshi, WANG Haidou, et al. Research progress of fatigue failure prediction methods and damage mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 26-34.
- [16] 张泰华. 微纳米力学测试技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- ZHANG Taihua. The micro/nano mechanical testing technology and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [17] BEAKE B D, LI N, GEY C. Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 279: 118-125.
- [18] FRUTOS E, GONZALEZ-CARRASCO J L, POLCAR T. Repetitive nano-impact tests as a new tool to measure fracture toughness in brittle materials[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36: 3235-3243.
- [19] KUPTSOV K A, KIRYUKHANTSEV-KORNEEV P V, SHEVEYKO A N, et al. Comparative study of electrochemical and impact wear behavior of TiCN, TiSiCN, TiCrSiCN, and TiAlSiCN coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 216: 273-281.
- [20] ZHANG S, ZHANG Xiaomin. Toughness evaluation of hard coatings and thin films [J]. Thin Solid Films, 2012, 520: 2375-2389.
- [21] 陈天瑞, 项延训, 陈虎. 基于相位-频率测量的材料残余应力超声表征方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 9-14.
- CHEN Tianrui, XIANG Yanxun, CHEN Hu. Ultrasonic characterization of residual stress in materials based on phase-frequency relationship[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 9-14.
- [22] SONG Wentao, XU Chunguang, PAN Qinxue. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 365-371.
- [23] FREUND L, SURESH S. 薄膜材料: 应力、缺陷的形成和表面演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- FREUND L, SURESH S. Thin film materials: Stress, defect formation, and surface evolution[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [24] 王海斗, 朱丽娜, 邢志国. 表面残余应力检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- WANG Haidou, ZHU Lina, XING Zhiguo. Surface residual stress testing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [25] ZHANG Liqiang, YANG Huisheng, PANG Xiaolu, et al. Microstructure, residual stress, and fracture of sputtered TiN films[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 224: 120-125.
-
- 作者简介: 靳巧玲, 女, 1992 年出生。主要研究方向为薄膜材料及纳米压痕技术。
E-mail: 15222778206@163.com
- 王海斗(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为再制造产品寿命预测及摩擦学。
E-mail: wanghaidou@aliyun.com