

# 钛基/TiN 涂层接触应力有限元分析

陈东<sup>1</sup>, 曾志辉<sup>2</sup>, 丁鹏<sup>1</sup>

(1. 江铃汽车股份有限公司 产品开发技术中心, 南昌 330001;

2. 江铃汽车股份有限公司 模具厂, 南昌 330001)

**摘要:** 目的 研究在接触载荷作用下, 钛基/TiN 涂层的应力变化规律。方法 利用 ABAQUS 软件建立可靠有限元模型, 分析涂层厚度不同的钛基/TiN 涂层系统在球压头作用下的接触应力。结果 钛基/TiN 涂层系统最大 Mises 应力出现在距表面约  $0.4a$  ( $a$  为接触半径) 处的亚表层或者亚表层附近的界面处。在接触应力和弯曲应力作用下, 涂层弯曲变形会影响涂层的径向应力和剪应力分布。结论 在接触载荷作用下, 涂层内存在接触应力和自身弯曲两种应力作用。分析结果有利于理解钛基 TiN 涂层的失效机理。

**关键词:** 钛基 TiN 涂层; Hertz 接触; 应力分析; 有限元

中图分类号: TG174.45; O34 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2014)06-0059-05

## Finite Element Analysis of the Contact Stress of TiN Coating/Ti Alloy Substrate

CHEN Dong<sup>1</sup>, ZENG Zhi-hui<sup>2</sup>, DING Peng<sup>1</sup>

(1. Product Development and Technology Center, Jiangling Motors Co., Ltd, Nanchang 330001, China;

2. Die Plant, Jiangling Motors Co., Ltd, Nanchang 330001, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the stress of TiN coating/Ti alloy substrate system under contact load. **Methods** A credible finite element analysis model was established based on ABAQUS, and the contact stress of TiN coating/Ti alloy substrate system with different coating thicknesses was analyzed in detail under the normal load of a sphere indenter. **Results** The maximum Mises stress of TiN coating/Ti alloy substrate system occurred at the sub-surface located about  $0.4a$  ( $a$  is the contact radius) below the surface or at the interface near the sub-surface. Because of the contact and bending stress, the bending deformation of TiN coating affected the radial and shear stress distribution of TiN coating. **Conclusion** Both contact stress and bending stress were found in the TiN coating/Ti alloy substrate system under contact load, and the results are helpful for understanding the failure mechanism of TiN coating/Ti alloy substrate system.

**KEY WORDS:** TiN coating/Ti alloy substrate; Hertz contact; stress analysis; finite element

TiN 涂层是目前工业研究和应用最为广泛的耐磨涂层材料之一, 具有硬度高、摩擦因数低、抗磨损能力高、高温稳定性好、耐氧化等特点, 被广泛用于提高飞行器、火箭等航空航天零部件的性能。钛合金是航空航天零部件最重要的结构材料之一, 但硬度较低,

摩擦系数高, 耐磨性差, 严重影响了钛合金零部件结构的可靠性, 制约了其应用。在钛合金表面制备 TiN 耐磨涂层, 是提高耐磨性能的有效手段<sup>[1-2]</sup>, 但 TiN 涂层薄, 与钛合金基体的结合强度低, 在接触载荷作用下, 可能使 TiN 涂层发生表面破坏或与钛合金基体

收稿日期: 2014-06-17; 修订日期: 2014-07-22

Received: 2014-06-17; Revised: 2014-07-22

作者简介: 陈东(1985—), 男, 江西九江人, 硕士, CAE 工程师, 主要从事计算机辅助工程及材料强度方面的研究。

Biography: CHEN Dong (1985—), Male, from Jiujiang, Jiangxi, Master, CAE Engineer, Research focus: CAE and material strength.

分离而脱落失效。所以,深入分析载荷作用下 TiN 涂层表面以及涂层/基体界面处的应力变化规律,有利于了解涂层的失效机理。

钛合金基体与 TiN 涂层的机械性能存在差异,使用传统的计算方法不能得到分层介质中的应力分布,有限元技术则是分析涂层/基体系统力学性能的有效手段<sup>[3-5]</sup>。文中在基于 Hertz 接触的基础上,采用有限元软件 ABAQUS 对钛基/TiN 涂层接触应力进行详细分析,以揭示涂层的失效机理。

## 1 有限元模型的建立及评估

### 1.1 有限元模型描述

分析钛基/TiN 涂层接触应力时,假定 TiN 涂层与钛合金基体为完美结合。TiN 涂层弹性模量( $E$ )为 420 Pa,泊松比( $\mu$ )为 0.25,屈服强度( $\sigma_s$ )为 6 GPa;钛合金基体弹性模量为 120 Pa,泊松比为 0.3,屈服强度为 1 GPa<sup>[6]</sup>。球压头为解析刚体,半径  $R$  为 0.1 mm,压在厚度为  $t$  的涂层上。钛基/TiN 涂层系统具有轴对称的几何形状,并且仅受接触压力的作用,边界约束条件也对称于该轴,所以可以按照轴对称空间应力问题来建立模型<sup>[7]</sup>。弹性半空间体的几何形状与接触半径  $a$  有关,有研究表明,当半空间体宽度和厚度均取大于  $20a$  时,接触区域内载荷对系统应力分布的影响可以忽略<sup>[8]</sup>。在有限元模型中,半空间体(基体)的宽度和厚度为 0.1 mm,均大于  $20a$ 。根据对称性边界条件,底边的纵向位移为 0,对称轴  $z$  边水平位移为 0,将施加载荷参考点与压头绑定,其水平位移及转角均为 0。接触区域附近网格细分,其余部分采用渐稀式划分,压头为解析刚体。利用 ABAQUS 进行有限元分析,整个计算模型全部采用 CAX4I 单元。分析的有限元模型如图 1 所示。

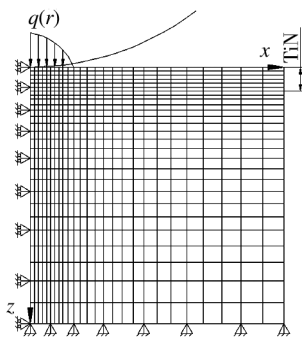


图 1 有限元分析模型

Fig. 1 The finite element analysis model

### 1.2 模型评估

由于 Hertz 接触理论只能计算无涂层的情况,通过比较无涂层时有限元方法获得的数值解与 Hertz 理论求得的解析解,验证球压头作用下模型的准确性。设球压头与基体(弹性半空间体)的接触圆域半径为  $a$ ,由球体与弹性半空间体接触的 Hertz 理论可知,其压力为椭圆分布<sup>[9]</sup>:

$$q(x) = \begin{cases} q_0 \sqrt{1 - (x/a)^2} & |x| \leq a \\ 0 & |x| > a \end{cases} \quad (1)$$

$$q_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2)$$

式中: $a$  为接触区半径( $a = \sqrt{\frac{3}{4} R \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot P}$ ),单位为 mm; $P$  为接触面上的载荷,单位为 N; $q_0$  为接触区域中心处的最大压力,单位为 MPa。在接触区域下方的基体中,沿  $z$  轴的应力分布式可由下式计算:

$$\frac{\sigma_x}{q_0} = \frac{\sigma_y}{q_0} = -(1+m) \left[ 1 - \frac{z}{a} \tan^{-1} \left( \frac{a}{z} \right) \right] + \frac{1}{2[1 + (z/a)^2]} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_z}{q_0} = -\frac{1}{[1 + (z/a)^2]} \quad (4)$$

$$t_1 = \frac{|\sigma_z - \sigma_x|}{2} \quad (5)$$

式中: $z$  为表面到基体中某点的垂直距离; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为径向、周向和法向应力,单位为 MPa。根据(3)~(5)式可绘制出接触半平面下  $z$  轴的各理论应力分布曲线,如图 2 中的实线所示。

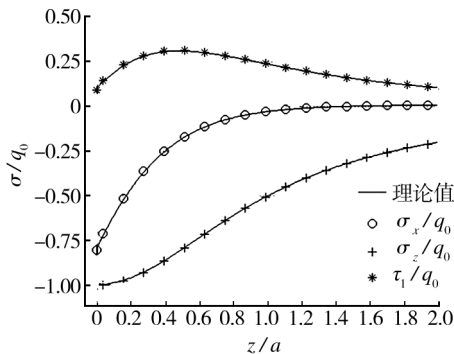


图 2 有限元模型沿  $z$  轴方向应力理论解与数值解的比较  
Fig. 2 Comparison of the stresses along the  $z$  axis calculated by theoretical method and finite element method

验证模型过程中,施加的接触载荷  $P=0.01$  N,通过 Hertz 公式算得接触半径  $a=1.785 \mu\text{m}$ ,  $q_0=1498.5$

MPa。将有限元分析的结果与解析方法 Hertz 理论计算得到的沿  $z$  轴方向的应力进行比较(图 2)可知,有限元模型分析的结果与解析理论解的结果相一致,从而验证了模型的正确性。

## 2 接触应力分析

有研究表明,最大 Mises 应力是判断涂层失效以及基体产生塑性变形的依据,拉应力是涂层裂纹产生和扩展的重要影响因素,界面处剪应力是造成涂层剥离失效的主要原因<sup>[10-12]</sup>。在实际应用过程中,钛基/TiN 涂层系统在接触载荷作用下,作为一个复杂的力学体系所表现出的应力响应是判断其失效的重要依据。

### 2.1 Mises 应力分析

在弹性接触阶段,钛基/TiN 涂层系统沿  $z$  轴有最大的 Mises 应力,对系统  $z$  轴 Mises 应力  $\sigma_m$  分布进行分析,如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着距离表面深度  $z$  的增加,各种涂层厚度的钛基/TiN 涂层系统的  $z$  轴 Mises 应力总是先增加后减小,最大 Mises 应力值一般位于表面以下约  $0.4a$  处,这就是所谓的易出现破坏的亚表层<sup>[13]</sup>。当涂层/基体界面临近亚表层时,如涂层厚度  $1.2\text{ }\mu\text{m}$ ,由于界面处的应力集中,会导致此处存在最大 Mises 应力。另外,由于涂层材料与基体材料在界面处的性能不一致,界面处的 Mises 应力会有突变,当界面位于亚表层附近时,界面处的 Mises 应力突变量较大,而界面处的应力突变容易导致涂层失效。所以在制备涂层时,应结合涂层具体情况,制备厚度合理的涂层,尽量避免涂层界面在亚表层附近,否则涂层在使用过程中很容易破坏。

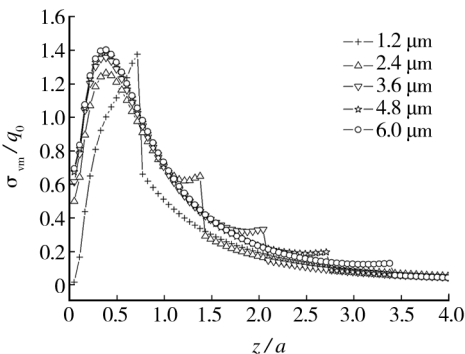
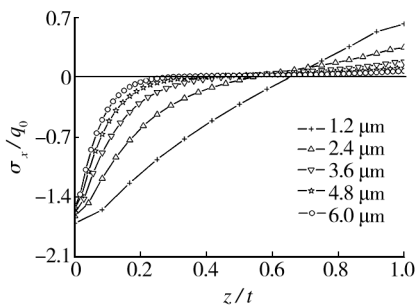


图 3 钛基/TiN 涂层系统  $z$  轴 Mises 应力分布  
Fig. 3 The Mises stress distribution of TiN coating/ Ti alloy substrate system along  $z$  axis

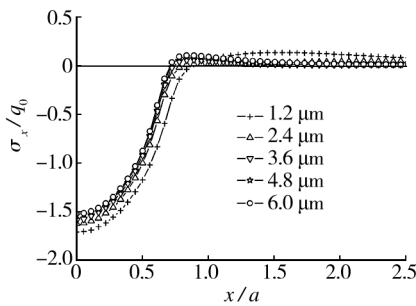
### 2.2 径向应力分析

图 4a 为钛基/TiN 涂层系统中 TiN 涂层  $z$  轴径向应力  $\sigma_x$  分布图,横轴  $z/t$  为距离表面的深度  $z$  与涂层厚度  $t$  的比值。从图 4a 可以看出,涂层沿  $z$  轴径向应力  $\sigma_x$  会产生压拉变化:在涂层表面接触中心处( $z/t=0$ ),涂层受径向压应力作用;约在涂层中间位置处( $z/t\approx 0.5$ ),径向应力由压应力变为拉应力;在涂层/基体界面处( $z/t=1$ ),涂层受径向拉应力作用。沿  $z$  轴径向应力产生这种上压下拉变化的原因是,涂层在接触载荷作用下产生了相应的弯曲变形。这种压拉变化极可能导致 TiN 涂层产生裂纹。此外还可以看出,当涂层薄,如涂层厚度  $1.2\text{ }\mu\text{m}$  时,涂层沿  $z$  轴的  $\sigma_x$  线性化的趋势比涂层厚时更加明显。这是因为涂层较薄,发生弯曲变形时,弹性力学的非线性修正项影响小,可以忽略<sup>[14]</sup>;随着涂层厚度增加,如  $t\geq 2.4\text{ }\mu\text{m}$  时,应考虑弯曲变形时弹性力学的非线性修正项,此时涂层在接触应力和弯曲应力作用下,沿  $z$  轴的径向应力  $\sigma_x$  呈非线性分布。

图 4b 为钛基/TiN 涂层表面径向应力  $\sigma_x$  分布图。可以看出,在接触中心处( $x/a=0$ ),径向应力为负值,在接触区域内涂层承受较大的压应力。在接触区边缘( $x/a\rightarrow 1$ ),径向应力的性质发生了变化,由压应力



a 涂层中  $z$  轴径向应力分布



b 涂层表面径向应力分布

图 4 钛基/TiN 涂层系统径向应力  $\sigma_x$  分布

Fig. 4 The radial stress  $\sigma_x$  distribution of TiN coating/Ti alloy substrate system

变为拉应力,最大的径向拉应力出现在接触区域边缘。接触表面径向应力的拉压变化是脆性 TiN 涂层表面产生裂纹及失效的主要原因。在接触区域外部 ( $x/a > 1$ ),随着距离接触中心处的位移增大,拉应力逐渐减小。

比较图 4a 和 b 可以看出,涂层薄(如  $1.2\ \mu\text{m}$ )时,涂层/基体界面处有最大的径向应力;涂层厚(如  $6.0\ \mu\text{m}$ )时,涂层表面处有最大的径向应力。可见涂层在接触载荷作用下,不仅表面处会产生径向拉应力,而且受涂层弯曲应力的影响,界面处也会存在径向应力,并且薄涂层中界面处的径向应力大于表面处的径向应力。

### 2.3 剪应力分析

在接触载荷作用下,涂层会发生弯曲变形,弯曲变形必然对涂层厚度方向上的剪应力  $\tau$  产生影响。图 5a 为钛基/TiN 涂层系统中 TiN 涂层沿  $z$  向的剪应力分布图。可以看出,随着涂层厚度的增加,涂层内的剪应力峰值呈逐渐减小趋势;随着距离表面深度  $z/t$  增加,剪应力先增大后减小。当涂层薄,如厚度  $t = 1.2\ \mu\text{m}$  时,由于薄涂层的弯曲变形,导致涂层  $z$  向剪应力呈抛物线形分布,在  $z/t \approx 0.5$  处出现最大剪应力,这与圆板承受横向载荷作用而发生弯曲变形时内

部剪应力的分布形式是一致的<sup>[14]</sup>。当涂层厚度  $t \geq 2.4\ \mu\text{m}$  时,涂层最大剪应力出现在  $z/t$  为  $0.1 \sim 0.2$  处,剪应力达到峰值后,随着距离接触表面的深度增加,逐渐减小至趋于 0,这与 Johnson 所得接触载荷作用下物体的剪应力分布规律相似<sup>[9]</sup>。

图 5b 为 TiN 涂层/基体界面处的剪应力分布图。由图 5b 可知,随着离接触中心距离  $x/a$  的增大,界面处剪应力先增大,后减小。涂层基体间界面处的剪应力峰值随涂层厚度增加而减小,考虑到涂层制备过程中,涂层越厚,涂层/基体间界面处的结合力越差<sup>[15]</sup>,所以厚涂层界面处的剪应力同样值得关注。比较图 4b 和图 5b 可以看出,涂层基体间界面处的剪应力峰值小于其径向应力的峰值,但在涂层的使用过程中,由于涂层/基体结合强度差,界面处的剪应力往往可能导致涂层在界面处撕裂、剥落而失效,所以虽然剪应力相对小,但在涂层的使用过程中必须引起足够的重视。

### 3 结论

1) 钛基/TiN 涂层系统沿  $z$  轴 Mises 应力分布随距离表面深度  $z$  的增加,呈先增大、后减小的趋势,最大 Mises 应力位于表面以下  $0.4a$  处的亚表层或者亚表层附近的界面处。涂层/基体间的界面处会产生 Mises 应力突变,当界面在亚表层附近时,界面处的应力突变量较大。

2) 在接触应力和弯曲应力的共同作用下,涂层表面和沿轴的径向应力均会有压拉变化。在薄涂层中,涂层/基体间界面处的径向拉应力峰值比表面的径向拉应力峰值大。

3) 由于弯曲应力的作用,薄涂层  $z$  向的剪应力呈抛物线形分布,并在  $z/t \approx 0.5$  处出现最大的剪应力峰值。随着涂层厚度增加,涂层中的剪应力出现在距离表面  $z/t$  为  $0.1 \sim 0.2$  处。涂层/基体间界面处的剪应力随着离接触中心距离  $x/a$  的增大而先增大后减小。随着涂层厚度的增加,界面处的剪应力峰值逐渐减小。

### 参考文献

[1] 王利捷,杨军胜. 钛合金表面  $\text{MoS}_2/\text{TiN}$  复合涂层的摩擦性能研究[J]. 表面技术,2010,39(2):11—13.

WANG Li-jie, YANG Jun-sheng. The Study on Tribological

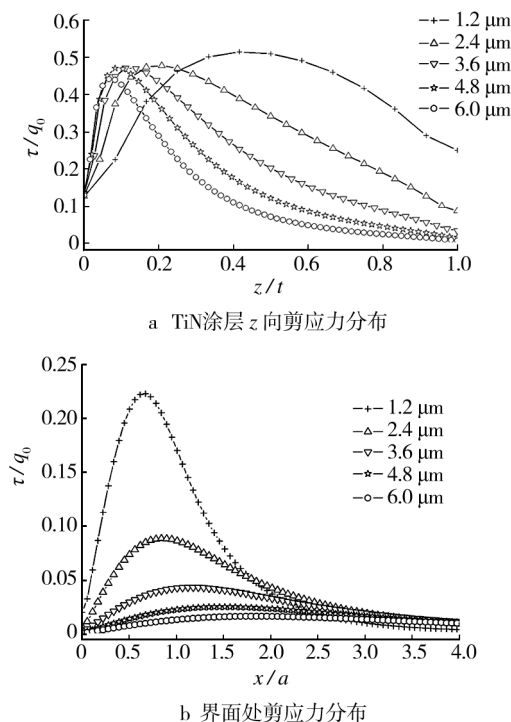


图5 钛基/TiN 涂层系统剪应力  $\tau$  分布

Fig. 5 The shear stress  $\tau$  distribution of TiN coating/Ti alloy substrate system



- Properties of MoS<sub>2</sub>/TiN Composite Coating on the Surface of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 11—13.
- [2] 郝建军, 彭海滨, 黄继华, 等. 钛合金表面反应电火花沉积 TiN/Ti 复合涂层[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 69—73.
- HAO Jian-jun, PENG Hai-bin, HUANG Ji-hua, et al. TiN/Ti Composite Coating Deposited on Titanium Alloy Substrate by Reactive Electric-spark[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 69—73.
- [3] DJABELLA H, ARNELL R D. Finite Element Analysis of the Contract Stresses in an Elastic Coating on an Elastic Substrate[J]. Thin Solid Films, 1992, 213(2): 205—219.
- [4] DJABELLA H, ARNELL R D. Finite Element Comparative Study of Elastic Stresses in Single, Double Layer and Multilayered Coated Systems[J]. Thin Solid Films, 1993, 235(1/2): 156—162.
- [5] 谢华, 陈东, 黄健萌. 双涂层界面接触应力分析[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 1—5.
- XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng. Analysis of the Contact Stress at Interface of Double Coatings[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 1—5.
- [6] SUN Y, BLOYCE A, BELL T. Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Various TiN Coating/Substrate Systems under Normal Contact with a Rigid Sphere[J]. Thin Solid Films, 1995, 271(1/2): 122—131.
- [7] 傅永华. 有限元分析基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- FU Yong-hua. Finite Element Analysis Basis[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [8] STEPHENS L S, LIU Y, MRTEIS E I. Finite Element Analysis of the Initial Yielding Behavior of a Hard Coating/Substrate System with Functionally Graded Interface under Indentation and Friction[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(2): 381—387.
- [9] JOHNSON K L. Contact Mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [10] TANGENA A G, WIJNHOFEN P J M, MUJJDERMAN E A. The Role of Plastic Deformation in Wear of Thin Films[J]. Tribology, 1988, 110(4): 602—608.
- [11] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Tribological Analysis of TiN and DLC Coated Contacts by 3D FEM Stress Modeling and Fracture Toughness Determination[J]. Wear, 2008, 264(9/10): 877—884.
- [12] 朱有利, 马世宁, 徐滨士, 等. 法向接触时涂层界面剥离行为的有限元分析[C]//第六届全国摩擦学学术会议论文集(上册). 西安: [出版者不详], 1997: 112—114.
- ZHU You-li, MA Shi-ning, XU Bin-shi, et al. Finite Element Analysis of Interfacial Debonding in Normal Contact[C]//Proceedings of the Sixth National Tribology Conference (Volume I). Xi'an: [s. n.], 1997: 112—114.
- [13] ELSHARKAWY A A. Effect of Friction on Subsurface Stresses in Sliding Line Contact of Multilayered Elastic Solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(26): 3903—3915.
- [14] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- LU Ming-wan, LUO Xue-fu. Elastic Theory Basis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [15] 马占吉, 武生虎, 肖更竭, 等. 电弧离子镀多层 Ti/TiN 薄膜组织和力学性能研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(3): 26—29.
- MA Zhan-ji, WU Sheng-hu, XIAO Geng-jie, et al. Study on the Structure and Mechanical Properties of Arc Ion Plating Ti/TiN Thick Multilayers[J]. Chinese Surface Engineering, 2008, 21(3): 26—29.
- .....
- (上接第 36 页)
- [12] 张承庆, 胡小萍, 朱景森. 功率密度对中频磁控溅射制备 AZO 薄膜性能的影响[J]. 光谱实验室, 2011, 28(4): 1629—1634.
- ZHANG Cheng-qing, HU Xiao-ping, ZHU Jing-sen. Effects of Power Density on the Properties of AZO Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(4): 1629—1634.
- [13] MARTIN B, MARTIN F. Three-dimensional Thickness and Property Distribution of TiC Films Deposited by DC Magnetron Sputtering and HIPIMSr[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 250(1): 37—43.
- [14] 程丙勋, 吴卫东, 何智兵. 溅射功率对直流磁控溅射 Ti 膜结构的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 961—964.
- CHENG Bing-xun, WU Wei-dong, HE Zhi-bing. Effects of Sputtering Power on Structure and Properties of Ti Films Deposited by DC Magnetron Sputtering[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 961—964.
- [15] 赵齐, 代明江, 韦春贝. 厚钛过渡层缓解铜基上热丝 CVD 金刚石薄膜内应力[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 19—23.
- ZHAO Qi, DAI Ming-jiang, WEI Chun-bei. Thick Titanium Interlayer Remitting Stress in Diamond Films Deposited on Copper Substrate by Hot Filaments Chemical Vapor Deposition[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 19—23.