

# 涂层断裂韧性的声发射辅助拉伸测量方法

杨班权<sup>1,2</sup>, 张坤<sup>1</sup>, 陈光南<sup>1</sup>, 罗耕星<sup>1</sup>, 肖京华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072)

**摘要:** 涂层的断裂韧性与界面结合强度是表征涂层/基体材料体系力学性能的重要指标。但如何准确地测量涂层的断裂韧性和强界面结合的涂层/基体材料体系的界面结合强度至今仍存在困难。以铬涂层/钢基体材料为对象,采用声发射和显微镜实时动态检测技术与拉伸实验相结合的方法,探索了铬涂层的断裂韧性以及铬涂层/钢基体的界面剪切强度。根据相关力学模型和实验测量结果,得到铬涂层在室温下的断裂韧性为  $27.41 \text{ J/m}^2$ 。同时,发现在铬涂层裂纹饱和后界面开裂都未发生,获得了该种材料体系界面剪切强度的一个下限值。

**关键词:** 材料检测与分析技术; 断裂韧性; 界面剪切强度; 拉伸实验; 声发射; 铬涂层; 钢基体材料

中图分类号: TB302.3; TG15.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1093(2008)04-0420-05

## An Acoustic Emission-Based Uniaxial Tensile Test Method for Evaluation of Fracture Toughness of a Coating on Its Substrate

YANG Ban-quan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, CHEN Guang-nan<sup>1</sup>, LUO Geng-xing<sup>1</sup>, XIAO Jing-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Fracture toughness and interfacial adhesive strength of coating on its substrate are the crucial parameters characterizing the performance and reliability of coating-substrate system. In this paper, a tensile experiment with acoustic emission signals inverse analysis and in situ observation of the cracking of the coating and interface was proposed to evaluate the fracture toughness and interfacial shear strength of the hard and brittle electroplated chromium coating on ductile steel substrate. The acoustic emission detector was attached to the specimen to check the signals of the cracking of chromium coating or interface and whether the crack density became saturated or not. The experimental results show that the strong signals belonged to the periodic cracking of the chromium coating. A mechanical model can be used to determine the fracture toughness. When the crack density of chromium coating became saturated, the steel substrate exhibited plastic deformation; however, the interface cracking could not be observed. This indicates the yield shear flow stress of the substrate can be exerted along the interface through the ductile substrate undergoing plastic deformation, and the yield shear flow stress level of the ductile steel substrate can only serve as a lower bound estimate of the ultimate shear strength of the interface.

**Key words:** material test and analysis; fracture toughness; interfacial shear strength; tensile test; acoustic emission; Cr coating; steel substrate

收稿日期: 2006-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50531060)

作者简介: 杨班权(1972→),男,讲师。E-mail: yangbq1022@sina.com;

陈光南(1948→),男,研究员。E-mail: gnchen@imech.ac.cn

## 0 引言

涂层的断裂韧性与界面结合强度是表征涂层/基体材料体系力学性能的重要指标。但如何准确地测量出涂层的断裂韧性和强界面结合的涂层/基体材料体系的界面结合强度至今仍存在困难。常用来测量涂层材料界面结合强度的方法有垂直拉伸法<sup>[1]</sup>、弯曲法<sup>[2]</sup>、划痕法<sup>[3-4]</sup>、压痕法<sup>[5-6]</sup>、应力波法<sup>[7]</sup>、激光层裂法<sup>[8]</sup>等。这些方法各有利弊,比如拉伸法中的垂直拉伸法只适合于结合强度小于 90 MPa 的涂层材料<sup>[9]</sup>,划痕法由于受到许多与结合性能无关的外在因素和内在因素的影响<sup>[10]</sup>而被认为只是一种半定量的方法<sup>[11]</sup>。

值得关注的是,对于脆性涂层/韧性基体这类材料体系,国外学者采用拉伸法研究了多种脆性涂层/韧性基体材料的界面剪切性能<sup>[12-15]</sup>。国内学者郑小玲等<sup>[16]</sup>对拉伸法测量界面结合强度进行了适用性研究。本文以脆性铬涂层/韧性钢基体材料为研究对象,采用声发射和显微镜实时动态检测技术并与拉伸实验相结合的方法,探索了铬涂层的断裂韧性以及铬/钢基体的界面剪切性能。铬涂层广泛地应用于枪、炮身管等武器系统中,以达到防护钢基体材料的目的<sup>[17-18]</sup>。在这些身管中,铬涂层发挥着防腐、耐高温、耐磨损等重要功能。实弹射击表明,镀铬枪管比不镀铬枪管寿命可提高 5~6 倍<sup>[17]</sup>。可以说,铬涂层的寿命极大地影响着枪、炮身管的使用寿命。而在工程实际中,脆性涂层/韧性基体材料体系典型的失效过程可以这样来描述:在热、机械等载荷作用下,先是涂层本身的开裂,裂纹很快就会贯穿到界面,然后是涂层与基体的界面开裂,界面裂纹扩展到一定程度,就导致了涂层从基体上的剥落。因此,评价该种材料体系中涂层的断裂韧性和界面结合性能就显得十分重要。涂层的断裂韧性指标反映涂层抵抗裂纹扩展的能力。界面结合的力学性能指标反映涂层与基体的界面抵抗破坏的能力。对于界面结合的力学性能,本文只研究其界面的剪切强度指标,因为界面在剪切应力的作用下,能够更接近于实际的工况条件<sup>[19]</sup>。本文采用的方法的优越之处在于可以利用声发射技术记录涂层/基体材料体系在载荷的作用下开裂的事件数和区别开裂的裂纹模式的功能<sup>[20]</sup>,同时利用光学显微镜,能够实现实时动态检测涂层和界面开裂情况。本文给出的方法可以为工程实际中评价该种材料体系的涂层韧性指标和界面结合性能指标提供有价值的参考依据。

## 1 实验过程、结果及讨论

### 1.1 试件制作

实验用的基体材料为优质碳素中碳钢,按常规

工艺进行电镀锌。铬层的厚度为 50  $\mu\text{m}$ 。然后按照拉伸试件的国家标准线切割试件,试件的尺寸为 80 mm  $\times$  20 mm  $\times$  4.05 mm,其示意图如图 1 所示。试件的平行段和过度弧的侧面须经机械抛光以消除应力集中,铬涂层表面经清洗干净以便实验过程中观察铬层表面的开裂状况。

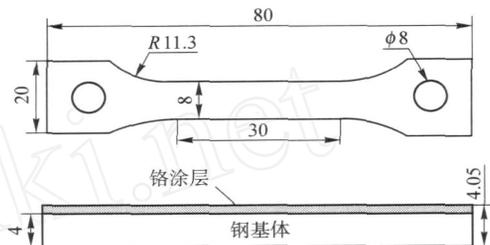


图 1 试件尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen dimensions

### 1.2 实验方案

试件制作完后,在室温下将其安放在涂层材料万能实验机上,载荷的量程设定为 50 kN,加载的速率设定为 6 N/s。声发射仪选择单通道,探头频率选定在 100~450 kHz。为了尽量避免周围环境和基体变形等产生的不利干扰,将声发射仪的声音阈值设定为 54 dB。为了使探头与铬涂层表面接触良好,可将真空润滑油涂在两者的接触面上,然后采用橡皮胶带等方式将探头固定在试件上。将光学显微镜的位置调整好,使之能够方便地观察到试件的侧面与铬涂层的表面。在载荷开始施加的同时,声发射仪也同时开启。实验装置的简单示意图如图 2 所示。

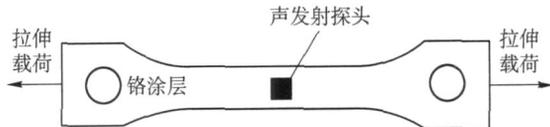


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

### 1.3 实验结果与讨论

在加载过程中,发射仪记录的每一时刻所对应的开裂事件数或振铃数如图 3 所示。在实验结束

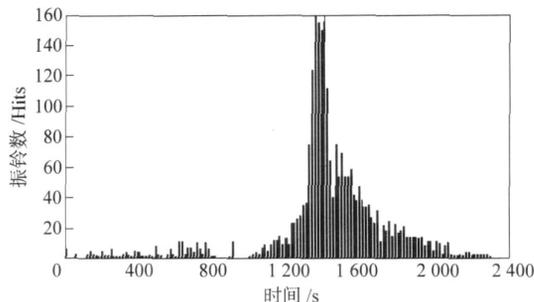


图 3 声发射仪记录的开裂事件数与加载时间关系

Fig. 3 Hits of acoustic emission vs whole test time

后,声发射仪记录的每一振幅(54 dB)所对应的事件数的总计如图 4 所示。图 3 记录了整个实验过程中试件从损伤、微裂纹的萌生、扩展到宏观裂纹的形成直至裂纹饱和过程中所产生的与声音有关的事件。从图 3 可看出,声发射仪所记录的开裂事件数有以下特征,在 0~1 200 s 之间,开裂的事件数较少,实验现场观察到的强信号也很少,在 1 200~1 800 s 之间,开裂的事件数最多,出现的强信号也最多,到 1 800 s 之后,开裂的事件数逐渐减少,出现的强信号也越来越少,到 2 200 s 之后趋于一个非常平稳的阶段。这表明在 1 800 s 之后,裂纹逐渐趋于饱和,也即裂纹的数量不再随着拉伸应变的增加而增加。从图 4 可看出,在整个实验过程中,声音振幅达到 93 dB 的开裂事件数最多,为 270 Hits。其次是振幅为 55 dB 左右的声音信号,通过对声发射信

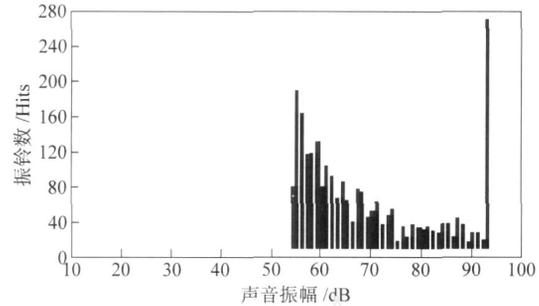


图 4 声发射仪记录的开裂事件数与振幅关系分布

Fig. 4 Hits of acoustic emission vs. amplitude

号与试件开裂特征的对应分析,得出 55 dB 左右的信号对应于微裂纹的扩展。当连续准静态的加载到 2 300 s 之后停止加载,此时通过光学显微镜观察铬层的表面与侧面情况,分别如图 5 与图 6 所示。

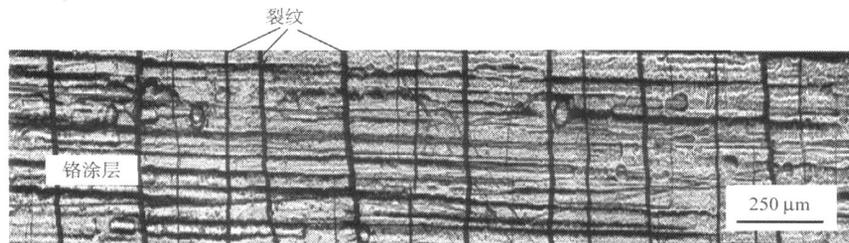


图 5 涂层裂纹饱和时涂层表面光学显微照片

Fig. 5 Optical micrograph of crack density saturation of Cr coating (surface view)

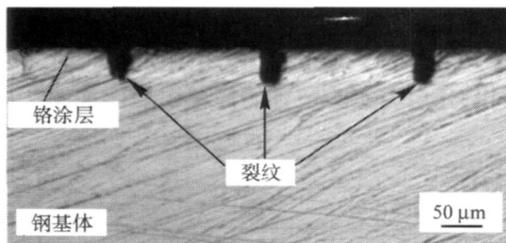


图 6 裂纹饱和后试件侧面光学显微照片

Fig. 6 Cross-section optical micrograph of crack density saturation of specimen

从图 5 可得到,铬涂层在拉伸载荷的作用下,涂层沿与垂直拉伸的方向开裂,裂纹呈现准周期性的特征。裂纹呈现准周期性的原因是脆性涂层的断裂应力或应变相对于韧性基体来说较小,因此易于先开裂,对于还粘接在基体上断开的小块涂层,由于界面剪应力的累积效应而使得涂层进一步的开裂,当界面剪应力的累积强度不超过涂层的断裂强度的时候,涂层已不再开裂,也即裂纹达到了饱和状态。从图测量出,裂纹之间的平均间距为 167  $\mu\text{m}$ ,据此也可以求得铬涂层的平均裂纹密度大约为 6 条/mm。从图 6 可看出,只有垂直于界面的铬涂层裂纹,而没有能够观察到界面开裂的情况。虽然铬涂层裂纹的张开位移最大处可达 30  $\mu\text{m}$ ,但是在整个试件的平

行段,界面开裂并未发生。脆性涂层/韧性基体材料体系在本文的侧向拉伸载荷作用下,开裂的裂纹模式与文献[20]中的模式一样,通常有 3 种:第一种是涂层本身的开裂,一般情形是裂纹开裂的方向垂直于界面;第二种是涂层与基体界面由于拉应力作用而导致的界面张开型开裂;第三种是涂层与基体的界面由于剪应力的作用而导致的剪切滑开型界面开裂。本文的脆性铬涂层与韧性钢基体在侧向拉伸的力下,在整个试件的平行段都没有出现所谓的后两种模式的界面开裂,这表明,在整个实验过程中,声发射没有记录到界面开裂的信号,有意义的信号是记录了铬涂层开裂的信号。在 1 200~1 800 s 这段时间,开裂的事件数最多,表明在这段时间,铬涂层开裂得比较频繁和迅猛,在实验现场,可以听到铬层开裂的微弱声音。在 1 800 s 之后,已经几乎未能听见铬层开裂的声音,同时从实时采集到的信号来看,也几乎没有大振幅信号的产生。这表明在 1 800 s 之后,铬涂层的裂纹密度趋于饱和。而从图 5 与图 6 来看,涂层裂纹达到饱和之后,界面开裂都未能观察到。本文的实验结果与文献[13-15]比较起来,具有相同之处,又有不同之处。相同之处是在涂层裂纹饱和前,涂层均表现出周期性的开裂特征;不同之处是在文献[13-15]中,当涂层裂纹临近饱和之

时,可清晰地观察到界面开裂、涂层失稳直至剥落这一系列的实验现象,而本文实验并未观察到上述现象的发生。这可归结为本文中的铬涂层/钢基体材料对象属于强结合类的脆性涂层/韧性基体材料体系。界面结合太强会易于导致涂层的预先开裂或界面不易开裂与文献[21-22]中所描绘现象是一致的。

为了获得更加可靠的实验现象和实验结果,实验重复了 3 次,结果都是类似的。为了证明铬涂层在 1 200~1 800 s 这一期间开裂频繁与迅猛的事实,选择了一个只有基体材料而没有铬涂层的试件在同样的实验条件下进行对比,结果表明,当试件被拉伸至紧缩阶段,几乎都没有强信号的产生,而带涂层的试件在 1 200 s 之前和 1 800 s 之后也几乎没有强信号的产生,这表明在 1 200~1 800 s 这一期间,确实是铬层开裂频繁与迅猛的时间。

## 2 铬涂层断裂韧性的确定

在 0~1 200 s 之间,声发射仪记录了脆性铬涂层从损伤到到微裂纹的萌生、基体的变形和环境干扰等声音信号;当加载到 1 200 s 之后,声发射开始连续地捕捉到了铬层开裂的信号,此时通过光学显微镜能观察到裂纹的出现,而钢基体在此时还处于弹性阶段,根据加载到 1 200 s 之后出现的第一个最大振幅信号所对应的试件伸长应变和铬涂层在室温下的弹性模量,可以求得铬涂层的断裂强度约为 275 MPa。本文中由于涂层为脆性材料,故只考虑其弹性变形的性质。当脆性的铬涂层开裂时,钢基体还处于弹性变形阶段,此时的涂层断裂可以建立力学模型,如图 7 所示。涂层的断裂韧性的计算公式为<sup>[23]</sup>

$$G_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2 h}{E_1} g(\nu_1, \nu_2), \quad (1)$$

式中:  $\sigma_c$  为涂层的断裂强度;  $h$  为涂层的厚度;  $g(\nu_1, \nu_2)$  为取决于  $\nu_1$  和  $\nu_2$  的无量纲系数,而  $\nu_1$  和  $\nu_2$  为 Dundurs 参数<sup>[24]</sup>,对于平面应变问题,  $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \nu_1 &= \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}, \\ \nu_2 &= \frac{G_1(1 - 2\nu_1) - G_2(1 - 2\nu_2)}{2G_1(1 - \nu_2) + 2G_2(1 - \nu_1)}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:  $E_i = E_i / (1 - \nu_i^2)$ ,  $i = 1, 2$ ;  $E_1$ 、 $G_1$  和  $\nu_1$  分别为涂层的弹性模量、剪切模量和泊松比;  $E_2$ 、 $G_2$  和  $\nu_2$  分别为基体的弹性模量、剪切模量和泊松比。本文中,铬涂层的断裂强度为 275 MPa,铬涂层的厚度为 0.05 mm,铬涂层的弹性模量、剪切模量和泊松比分别为 290 GPa<sup>[25]</sup>、120 GPa 和 0.21<sup>[25]</sup>,钢基体的弹性模量、剪切模量和泊松比分别为 210 GPa、

82 GPa 和 0.28。

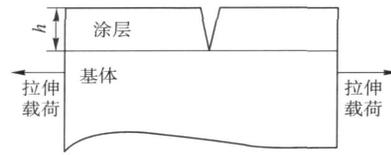


图 7 力学模型

Fig. 7 Mechanical model

根据以上的数据可求得  $\nu_1 = 0.142$ ,  $\nu_2 = 0.017$ 。由文献[23]可得  $g(\nu_1, \nu_2) = 1.40$ 。于是根据以上已知条件,可求得铬涂层的断裂韧性为  $G_c = 27.41 \text{ J/m}^2$ 。

本文采用声发射技术获取脆性涂层的断裂韧性最关键的问题是能不能准确地捕捉第一个宏观裂纹的开裂点。因此在实验前,合理地估计出涂层大概在什么时间段可能出现第一条宏观裂纹,然后在这一时间段,通过光学显微镜的仔细观察,以确信出现的信号特征与观察到开裂现象是否一致。

## 3 界面剪切强度的下限值

当加载的时间到达 2 300 s 时,裂纹已经饱和,也即裂纹的数量已不再随着拉伸应变的增加而增加。此时停止加载并缓慢卸载,卸载完后从实验机上取下试件,此时可观察到基体已经发生了较大的塑性变形,而此时界面开裂并未发生。根据文献[13]得到的理论与计算分析结果,即:对于界面结合很强而基体又是韧性的情形,界面开裂现象在涂层裂纹饱和之后都未能发生,同时基体又发生了较大的塑性变形,在这种情形下,可以将基体的剪切屈服塑性流动应力作为该种材料体系界面剪切强度的一个下限值来进行表征,基体的剪切屈服塑性流动应力可根据 Mises 的各向同性塑性理论,即材料的拉伸屈服强度(应力)为剪切屈服强度(应力)的  $\sqrt{3}$  倍,而求得。本文的钢基体材料的拉伸屈服强度为 360 MPa,于是可以计算出钢基体的剪切屈服强度为 207.85 MPa,值得强调的是该值只是作为该种材料体系界面剪切强度的一个下限值。

## 4 结束语

本文将声发射技术和光学显微镜实时动态观察技术与拉伸法相结合,研究了脆性铬涂层的断裂韧性与脆性铬涂层/韧性钢基体材料界面结合的剪切性能。本文给出的方法可以为工程实际中评价该种材料的涂层韧性指标和界面结合性能指标提供有价值的参考依据,同时也可推广到其它种类的脆性涂层/韧性基体材料中涂层的韧性指标和界面结合性能指标的测量。

## 参考文献 (References)

- [1] 何贤昶, 沈挺, 沈荷生, 等. 用垂直拉伸法测定金刚石薄膜的附着强度[J]. 机械工程材料, 1998, 22(5): 7-9.  
HE Xian-chang, SHEN Ting, SHEN He-sheng, et al. Measurement of diamond film adhesion by using direct tensile test [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1998, 22(5): 7-9. (in Chinese)
- [2] 刘长清, 李美栓, 金柱京, 等. 精细 TiN 陶瓷薄膜的抗拉强度和界面结合强度[J]. 金属学报, 1992, 28(9): 423-426.  
LIU Chang-qing, LI Mei-shuan, JIN Zhu-jing, et al. Tensile and adhesive strength of fine TiN on Ti substrate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1992, 28(9): 423-426. (in Chinese)
- [3] 蔡琦, 顾剑锋, 周平南, 等. 离子束增强沉积 TiN 薄膜界面结合强度的研究[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(2): 30-35.  
CAI Qun, GU Jian-feng, ZHOU Ping-nan, et al. The interfacial bonding strength of TiN films prepared by IBED[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1997, 18(2): 30-35. (in Chinese)
- [4] 冯爱新, 张永康, 谢华琨, 等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 15-19.  
FENG Ai-xin, ZHANG Yong-kang, XIE Hua-kun, et al. Characterization of interfacial adhesion and bond strength between thin film coating and substrate by scratch testing[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003, 24(2): 15-19. (in Chinese)
- [5] 李河清, 蔡殉, 马峰, 等. 压痕法测定薄膜(涂层)的界面结合强度[J]. 机械工程材料, 2002, 26(4): 11-13.  
LI He-qing, CAI Xun, MA Feng, et al. Determination of the interfacial bonding strength of thin films and coatings using indentation method[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(4): 11-13. (in Chinese)
- [6] 韦习成, 李健, 袁成清. 磁控溅射 TiN 界面结合强度的压痕法测试[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(3): 229-231.  
WEI Xi-cheng, LI Jian, YUAN Cheng-qing. Measurement of bonding strength of magnetic sputtered TiN coatings by indentation method[J]. Tribology, 2000, 20(3): 229-231. (in Chinese)
- [7] 侯振德, 汤灵霞, 富东慧, 等. 利用应力波测量涂层的结合强度[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 306-309.  
HOU Zhen-de, TANG Ling-xia, FU Dong-hui, et al. Measurement of bond strength of coating using stress wave[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 306-309. (in Chinese)
- [8] 周明, 张永康, 蔡兰. 激光层裂法定量测定薄膜界面结合强度[J]. 中国科学: E 辑, 2002, 32(1): 28-36.  
ZHOU Ming, ZHANG Yong-kang, CAI Lan. Research of measurement of film interface adhesion strength by the laser spallation technique[J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2002, 32(1): 28-36. (in Chinese)
- [9] Qi H F, Fernandes A, Pereira E, Grácio J. Adhesion of diamond coatings on steel and copper with a titanium interlayer[J]. Diamond and Related Materials, 1999, 8(8-9): 1549-1554.
- [10] Steinmann P A, Tardy Y, Hintermann H E. Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic and extrinsic parameters on the critical load[J]. Thin Solid Films, 1987, 154(1-2): 333-349.
- [11] Bull S J, Berasetegui E G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing [J]. Tribology International, 2006, 39(2): 99-114.
- [12] Agrawal D C, Raj R. Measurement of the ultimate shear strength of a metal-ceramic interface [J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(4): 1265-1271.
- [13] Xie C J, Wei T. Cracking and decohesion of a thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on a ductile Al-5% Mg substrate [J]. Acta Materialia, 2005, 53(2): 477-485.
- [14] Chen B F, Hwang J, Yu G P, et al. In situ observation of the cracking behavior of TiN coating on 304 stainless steel subjected to tensile strain[J]. Thin Solid Films, 1999, 352(1-2): 173-178.
- [15] Shieu F S, Shiao M H. Measurement of the interfacial mechanical properties of a thin ceramic coating on ductile substrates[J]. Thin Solid Films, 1997, 306(1): 124-129.
- [16] 郑小玲, 游敏. 拉伸法测定涂层界面强度的适用性研究[J]. 粘接, 2003, 24(2): 7-9.  
ZHENG Xiao-ling, YOU Min. The adaptability of tensile method in determination of interfacial strength of coating layer and metal substrate [J]. Adhesion, 2003, 24(2): 7-9. (in Chinese)
- [17] 卓穗如. 机枪枪管寿命预测技术论文集[M]. 北京: 中国兵器工业第 208 研究所, 1996.  
ZHUO Sui-ru. Collections of the life prediction for gun tube [M]. Beijing: No. 208 Research Institute of China Ordnance Industry, 1996. (in Chinese)
- [18] 陈光南, 罗耕星, 张坤, 等. 提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(增刊): 6-10.  
CHEN Guang-nan, LUO Geng-xing, ZHANG Kun, et al. A new laser strengthening method for improving the life of the gun tub electroplated with chromium coating[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(supplementary): 6-10. (in Chinese)
- [19] Guo S Q, Mumm D R, Karlsson A M, et al. Measurement of interfacial shear mechanical properties in thermal barrier coating systems by a barb pullout method[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(9): 1043-1048.
- [20] Ma X Q, Cho S, Takemoto M. Acoustic emission source analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings during four-point bend tests [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 139(1): 55-62.
- [21] Evans A G, Marshall D B. The mechanical behavior of ceramic matrix composites[J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(10): 2567-2583.
- [22] Gupta V, Yuan J, Martinez D. Calculation, measurement, and control of interface strength in composites [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1993, 76(2): 305-315.
- [23] Beuth J L. Cracking of thin bonded films in residual tension [J]. International Journal of Solids and Structures, 1992, 29(13): 1657-1675.
- [24] Dundurs J. Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges [J]. Journal of Applied Mechanics, 1969, 36: 650-652.
- [25] 马庆芳, 方荣生, 项立成, 等. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.  
MA Qing-fang, FANG Rong-sheng, XIANG Li-cheng, et al. A practical handbook of thermal physical properties [M]. Beijing: Agricultural and mechanical Press of China, 1986. (in Chinese)