

# 微弧离子沉积阻燃涂层对 TC11 钛合金力学性能的影响

曹江<sup>1,2</sup>, 李春福<sup>1</sup>, 傅斌友<sup>3</sup>, 史萌<sup>3</sup>, 汪瑞军<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500; 2. 中国人民解放军驻四二〇厂军事代表室, 成都 610503; 3. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 为使阻燃涂层早日在我国航空发动机上得到应用, 在提高涂层阻燃性能的同时, 研究涂层对基体力学性能的影响十分必要。文中采用微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金基体上制备阻燃涂层, 研究阻燃涂层对钛合金拉伸性能、压缩性能、蠕变性能及裂纹扩展速率的影响。结果表明, 采用微弧离子表面改性技术在 TC11 基体上制备的阻燃涂层主要由  $TiC_2$ 、 $W_2C$  及 Ti 组成, 涂层结构致密, 与基体结合良好。涂层试样规定非比例延伸强度、抗拉强度以及断面收缩率有轻微降低, 降低幅值约为基体抗拉强度 5% 左右; 断后延长率基本无变化, 弹性模量随测试温度提高逐步下降, 试样抗压强度增大, 400 °C 高温蠕变性能变好, 常温裂纹扩展速率降低。综合分析表明, 在钛合金基体上制备阻燃涂层后, 试样整体力学性能变化幅值小于 5%, 符合航空发动机部件强度设计要求。

**关键词:** 微弧离子; 表面改性; 阻燃涂层; TC11 钛合金; 力学性能

**中图分类号:** TG174.44; TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)01-0051-05

## Effect of Fire-resistant Coating Deposited by Micro-arc Ion Surface Modification on Mechanical Properties of TC11 Alloy

CAO Jiang<sup>1,2</sup>, LI Chun-fu<sup>1</sup>, FU Bin-you<sup>3</sup>, SHI Meng<sup>3</sup>, WANG Rui-jun<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 2. PLA Military Representative Office Stationed 420 Factory, Chengdu 610503; 3. Beijing Golden Wheel Special Machine Co. Ltd., Beijing 100083)

**Abstract:** To make an early application of fire-resistant coatings in aero-engine, study the effect of coating on substrate mechanics performance is very necessary. In this paper, fire-resistant coatings were deposited on TC11 titanium alloys through micro-arc ion surface modification technology, the effects of the coating on tensile, compression, creep deformation and crack propagation properties have been investigated for the titanium alloy. It is found that the deposited fire-resistant coating structure is dense, well bonded to the substrate, and the coating is composed mainly of  $TiC_2$ ,  $W_2C$  and Ti. The specimens specify that disproportionate elongation strength, tensile strength and reduction of cross-section area are reduced about 5%, the fracture elongation hold the same level with the titanium alloy, Young's modulus gradually decreased with increasing test temperatures. Simultaneously, the compression strength increased, the creep deformation at 400 °C and the crack propagation properties at ambient temperature decreased. Namely, after depositing the fire-resistant coating on the TC11 titanium alloy, the specimens mechanical properties variation amplitude is less than 5%, in accordance with the requirements of the design strength for aero-engine components.

**Key words:** micro-arc ion; surface modification; fire-resistant coating; TC11 titanium alloy; mechanical property

## 0 引言

钛及钛合金由于比强度及比模量高、密度低、抗破坏能力强,作为高强轻质材料在航空、航天、船舶工业、军事工业方面已获得了广泛的应用。特别是在航空航天领域,为了提高推重比、效率以及有效承载,高性能的轻金属材料钛合金被广泛用于制作航空部件<sup>[1]</sup>。

正常情况下,航空发动机上钛合金的使用情况良好,但钛及普通钛合金存在致命的持续燃烧敏感问题,会导致“钛火”故障。“钛火”的范围可以从轻微的叶尖燃烧、后缘区燃烧,发展到大范围燃烧,有时甚至造成机匣 360°烧穿。解决“钛火”故障的方法主要有 3 种:①更改结构设计或使用替代材料;②研制阻燃钛合金;③使用阻燃涂层。相比于前 2 种方法,使用阻燃涂层是工艺相对简单且行之有效的钛合金阻燃技术,它可在不改变现有结构的基础上进行涂敷,降低设计成本,同时具有良好的使用维护性和较低的使用成本<sup>[2-5]</sup>。

航空发动机对安全性能要求极为严格,任何新工艺在使用前必须确保此种工艺不会对航空发动机安全性能造成影响,阻燃涂层也不例外。为了能使阻燃涂层早日在我国航空发动机上得到应用,在提高涂层阻燃性能的同时,研究涂层对基体力学性能的影响也是十分必要的。

文中采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金基体上制备阻燃涂层,研究阻燃涂层对钛合金拉伸性能、压缩性能、蠕变性能及裂纹扩展速率的影响,为阻燃涂层的可靠使用和工程化应用提供一定的依据。

## 1 试验材料及方法

试验所用基体材料为 TC11 钛合金,名义成分为:Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si,用于制造航空发动机的压气机盘、叶片、鼓筒等零件。基体材料原始形态为柱状锻件,机加工成标准拉伸、压缩、蠕变、裂纹扩展等试样,所有试样在制备阻燃涂层前,先用 75  $\mu\text{m}$ (200 目)水砂纸打磨,要求完全去除表面氧化膜,然后将试样在超声清洗池中进行超声震荡,用乙醇或丙酮清洗,将试样吹干,放在真空干燥箱内进行干燥。

采用日本 TechnoCoat 公司生产的 Spark Tron W 型表面改性设备在 TC11 钛合金表面制

备阻燃涂层,涂层制备用材料为 WC,电极尺寸为  $\Phi 6 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,涂层制备工艺参数如表 1 所示。

表 1 表面改性的工艺参数

Table 1 Parameters of surface modification process

Parameter	Value
Voltage/V	200
Power grade	II
Frequency/kHz	4
Deposition time/(min · cm <sup>-2</sup> )	2
Ar flow rate/(L · min <sup>-1</sup> )	20
Speed/(r · min <sup>-1</sup> )	2 600

采用 S-4800 扫描电镜观察阻燃涂层表面、截面形貌等。采用 Rigaku D/MAX-RB X 射线衍射仪分析阻燃涂层相结构,实现条件为 Co 靶,SC 计数,石墨单色器滤波,40 kV,100 mA,SS/DS 为 1°,RS 为 0.15 mm。

按《GB/T228-2008 金属材料室温拉伸试验》、《GB/T4338-2006 金属材料 高温拉伸试验》规定进行材料拉伸试验,试验温度:25、400、500、600  $^{\circ}\text{C}$ 。按《GB7314-2005 金属压缩试验方法》规定进行材料压缩试验,试验温度:25、500  $^{\circ}\text{C}$ ,试验速率:0.5 mm/min。按《GB/T2039-1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法》规定进行拉伸蠕变试验,试验温度:400、500  $^{\circ}\text{C}$ ,试验应力 25 MPa;按《GB/T 6339-2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》规定进行疲劳裂纹扩展试验,试验温度 25、500  $^{\circ}\text{C}$ ,载荷比 0.1,试样类型 CT。

采用 MTS809 和 MTS793 材料试验机分别测试的试样拉伸性能和压缩性能。采用 R47 试验机测试试样的高温蠕变性能,应力 25 MPa。采用 MTS NEW 810 试验机测试试样的常温裂纹扩展速率,载荷比 0.1,载荷范围 6 000~10 000 N,加载频率 20 Hz,以上试验均以同炉次 TC11 合金试样沉积涂层与未沉积涂层进行对比试验,确定涂层对基体合金力学性能的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 阻燃涂层微观组织分析

图 1 为阻燃涂层截面形貌。涂层结构致密,

无任何气孔,高温下可有效阻止氧气渗入基体表面,涂层与基体为冶金结合,无明显界面分界线。

对涂层截面 A、B 位置进行能谱分析,获得如图 2 所示的能谱检测结果。由图 2 可知,涂层中化学元素含量随涂层厚度增加而发生变化,涂层厚度最大处 A 点所在微区,W 元素的含量最高,Ti 元含量相对较低,涂层与基体界面处 B 点所在

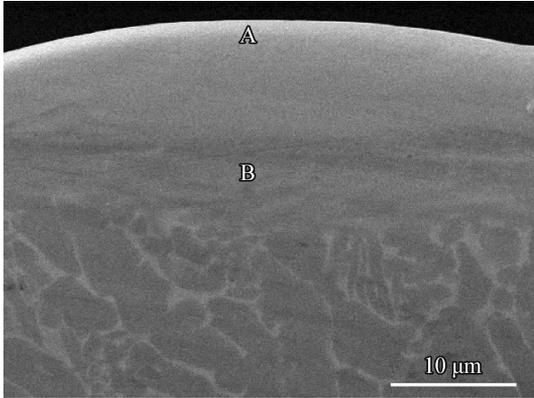
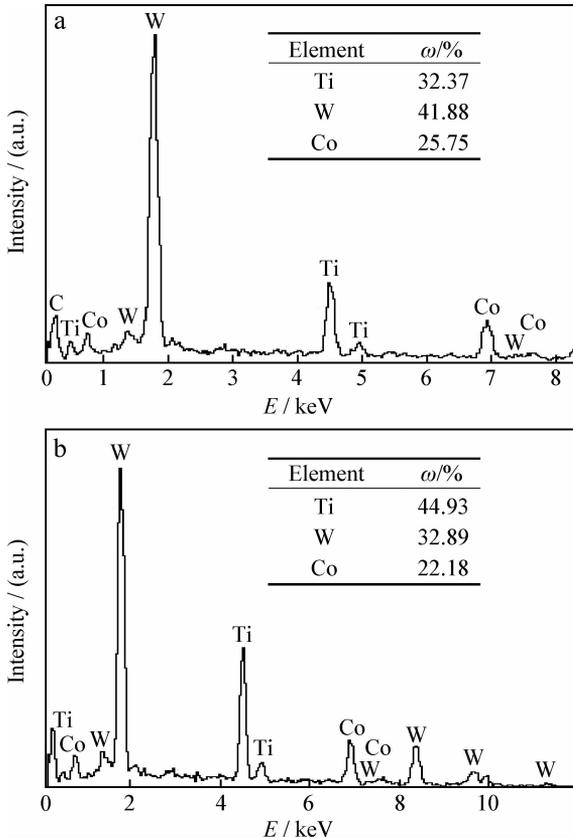


图 1 涂层的截面形貌

Fig. 1 Cross section morphology of the coating



(a) Point A (b) Point B

图 2 涂层能谱分析

Fig. 2 Energy spectrum analysis of the coating

微区,Ti 元素含量相对较高,W 元素较低。造成涂层中元素分布不均的主要原因是脉冲微弧离子改性过程中,不仅存在着电极元素向基体中的过渡,基体中的化学元素也向涂层中过渡,并且电极与基体成份的化学元素的过渡能力呈梯度形式。合金元素的过渡主要以 2 种方式进行,一种以在熔池中液态金属发生剧烈的冶金反应进行,另一种是以在固态下元素的相互扩散方式进行。前者温度高,反应剧烈,在合金元素过渡方面占据主导地位。

采用 X 射线衍射分析方法对阻燃层相结构进行分析,如图 3 所示。涂层主要由  $TiC_2$ 、 $W_2C$  及 Ti 组成,涂层中新相的生成表明在涂层制备过程中,两极间的合金化实质是电极材料与基体材料及周围的气氛发生的复杂冶金反应。

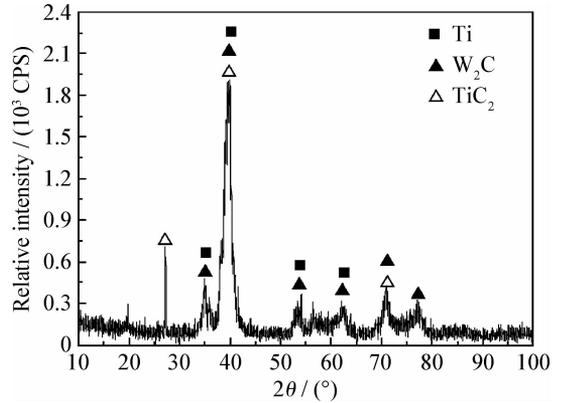


图 3 涂层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD spectra of the coating

### 2.2 阻燃涂层对基体力学性能影响

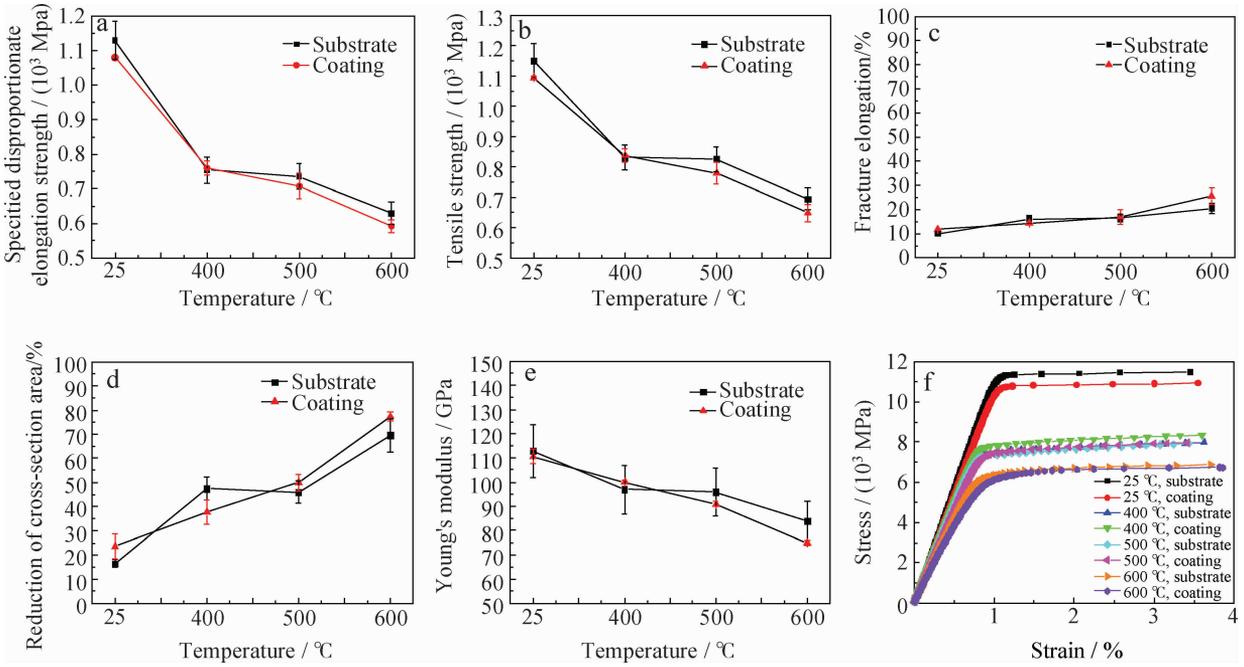
对 TC11 合金试样及沉积有阻燃涂层的 TC11 合金试样的拉伸性能进行测试,试样规定非比例延伸强度  $R_{p0.2}$ 、抗拉强度  $R_m$ 、断后延长率 A、断面收缩率 Z、弹性模量 E、应力-应变曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金表面制备阻燃涂层后,常温下试样规定非比例延伸强度、抗拉强度有轻微降低,降低幅值约为基体抗拉强度的 5% 左右;高温下试样规定非比例延伸强度、抗拉强度均无明显降低趋势;常温、高温状态下试样断后延长率基本无变化,断面收缩率有轻微波动,波动幅值在 5% 以内;常温、400 °C 时试样弹性模量基本无变化,500 °C 时弹性模量下降约 5%,600 °C 时下降

约 10%。综合考虑试样测试过程中试样直径偏差、制样过程中涂层厚度、均匀性误差、测试环境误差等因素,可以认为采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金表面制备阻燃涂层后对 TC11 钛合金拉伸性能无显著影响。结合涂层微观形貌分析可知,采用微弧离子改性工艺在钛合金表面制备阻燃涂层后,涂层与基体呈冶金结合状态,结合区域界限分明,无明显元素互扩散区,即制备的阻燃涂层对基体本身无影响,不影响基体结构及性能;其次,制备的阻燃涂层结构致密,内部无孔隙、夹渣及微裂纹等缺陷存在,因此,在

拉伸试验测试过程中不会因为涂层内部微观缺陷产生裂纹扩展等影响,试样整体拉伸性能无明显变化。

试样在常温、高温状态下压缩曲线如图 5 所示,抗压强度如图 6 所示。沉积有阻燃涂层的 TC11 合金试样抗压强度在常温及高温状态下均高于 TC11 合金试样的抗压强度,分析认为这主要是因为制备的阻燃涂层相对于基体材料硬度高、强度大,对试样基体材料起到一定表面强化作用,因此试样整体抗压强度提高;由图 5、图 6 还可以发现两种试样高温状态下的抗压强度均



(a) Specified disproportionate elongation strength (b) Tensile strength (c) Fracture elongation (d) Reduction of cross section area (e) Young's modulus (f) Stress-strain curves

图 4 试样的拉伸性能

Fig. 4 Tensile performance of the samples

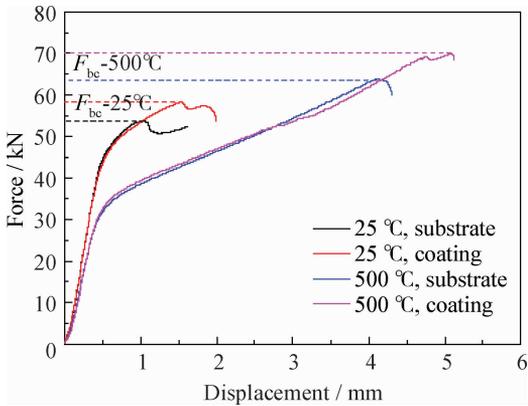


图 5 试样压缩曲线

Fig. 5 Compression curves of the samples

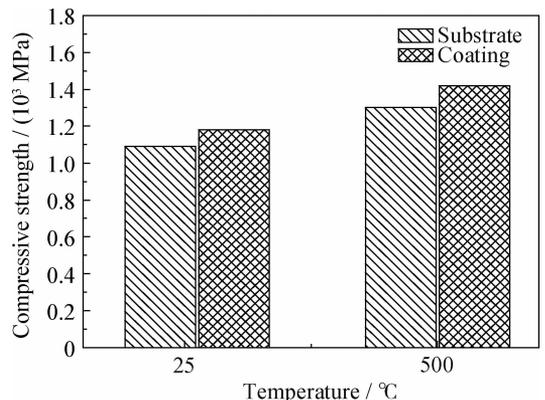


图 6 试样的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of the samples

显著高于常温下的抗压强度,这主要是因为试样在高温状态下脆性降低、塑性变好,导致试样抗压强度增大。

图 7 为试样的高温蠕变曲线。TC11 基体试样在整个高温蠕变试验过程中试样伸长率保持恒定的增长速度,试验 170 h 后试样伸长率达到 0.43%。带有阻燃涂层的 TC11 钛合金试样在高温蠕变试验力加载时试样伸长率相比 TC11 基体试样较小,在高温蠕变试验前 100 h 内,沉积有阻燃涂层的试样伸长率增长速度高于基体试样,高温蠕变试验 100 h 后,沉积有阻燃涂层的试样伸长率趋于平缓,基本维持在 0.44 左右,试样具有良好的高温蠕变性能。分析认为在相同试验条件下,带有阻燃涂层试样由于表面硬度高,具有表面强化作用,因此初始试样延伸率较小。但涂层本身抗蠕变性能小于钛合金抗蠕变性能,因此,在试验前期,带涂层试样延伸率增长较快;试验后期,由于制备的涂层较薄(小于 30  $\mu\text{m}$ ),相对于试样截面直径(10 mm)几乎可以忽略不计,因此,带涂层试样延伸率逐步趋向于不带涂层试样延伸率,延伸率趋于平缓,基本维持在 0.44 左右。

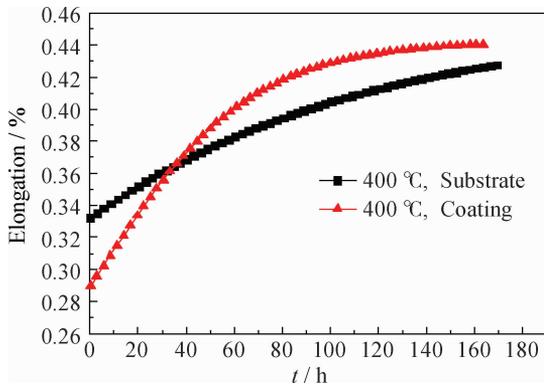


图 7 试样的高温蠕变曲线

Fig. 7 High temperature creep curves of the samples

试样常温裂纹扩展速率曲线如图 8 所示。采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 基体上制备阻燃涂层后,试样裂纹扩展速率大幅降低,分析认为这主要是因为制备的阻燃涂层主要由  $\text{TiC}_2$ 、 $\text{W}_2\text{C}$  及 Ti 组成,相对于基体材料,阻燃涂层硬度高、强度大,当 TC11 基体表面包覆一层阻燃涂层以后,试样形成一种类似于“鸡蛋”结构,试样整体强度提高,抗裂纹扩展速率能力提高。

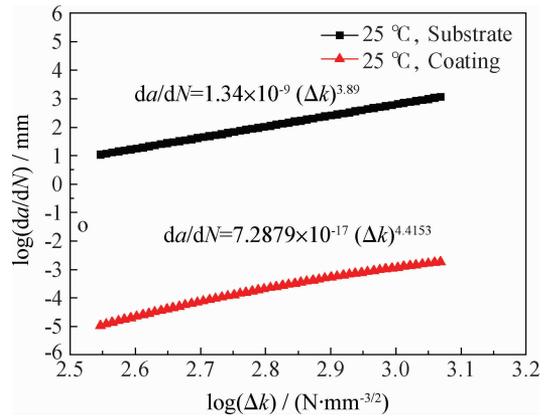


图 8 试样裂纹扩展速率

Fig. 8 Crack propagation rate of the samples

### 3 结论

(1) 采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金基体上制备阻燃涂层后,涂层试样规定非比例延伸强度、抗拉强度、断后延长率、断面收缩率及弹性模量相比基体试样变化幅值很小,在基体材料允许变化范围内,试样抗压强度增大、400  $^{\circ}\text{C}$  高温蠕变性能变好,常温裂纹扩展速率降低。

(2) 采用脉冲微弧离子表面改性技术在 TC11 钛合金基体上制备阻燃涂层后,试样整体力学性能变化幅值小于 10%,符合航空发动机部件强度设计要求。

### 参考文献

- [1] 谢惠茹. 我国钛及钛合金研发与进展 [J]. 稀有金属快报, 2007, 26(8): 7-9.
- [2] 孙护国, 霍武军. 航空发动机钛合金机件的阻燃技术 [J]. 航空制造技术, 2003(1): 45-49.
- [3] 张乐, 谢旭霞, 占焕校, 等. 等离子喷涂阻燃涂层性能研究 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 20-33.
- [4] 谢旭霞, 张乐, 张鑫, 等. 航空用钛合金阻燃技术 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2008: 150-153.
- [5] 张乐, 于月光, 任先京, 等. 钛合金基体上阻燃涂层的研究进展 [J]. 钛工业进展, 2008, 25(6): 6-10.

作者地址: 北京市德胜门外北沙滩 1 号 100083  
中国农机院  
Tel: (010) 6488 3291  
E-mail: fu13810438407@163.com(傅斌友)