

# TC4 钛合金表面渗碳复合 TiN(Ti)膜层的抗冲蚀性能

王彦峰, 李争显, 杜继红, 张长伟

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 为了改善硬质膜层的抗冲蚀性能, 采用辉光离子扩渗及等离子增强电弧离子镀技术, 在 TC4 合金表面制备了具有梯度渗碳及 TiN(Ti)膜层的复合渗镀层, 并分析了结构对于复合渗镀层性能的影响。结果表明, 相对于未强化的 TC4 基体表面单层 TiN 及 12 周期复合 Ti/TiN 膜层, 复合渗镀层的显微硬度及膜/基结合强度均得到了提高。冲蚀试验表明, TC4 基体未渗碳前, 表面单层 TiN 膜层呈现出脆性冲蚀开裂机制, 12 层复合 Ti/TiN 膜层由于多层复合结构的增韧效应, 呈现出层状剥落及“冲蚀窝”损伤形貌。渗碳后, 复合渗镀层的抗冲击韧性得到提高, 单层 TiN 膜层在冲蚀条件下的膜/基界面脆性开裂明显被抑制。渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 的复合渗镀层具有最佳的抗固体颗粒冲蚀性能, 表现出明显的韧性损伤机制, 冲蚀失重率降低了十余倍。抗冲蚀性能的提高可归结于复合渗镀层较高的表面硬度、界面强度和强韧性匹配。

**关键词:** 等离子渗碳; Ti/TiN 膜层; 固体颗粒冲蚀; 多层结构; 韧性

**中图分类号:** TG146.23; TG156.8<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)06-1878-06

作为先进航空发动机的重要构件之一, 压气机的主要功用是对流过它的空气进行压缩, 提高空气压力, 为燃气膨胀做功创造条件。压气机在高速旋转压缩空气过程中, 空气中的沙尘颗粒会对叶片产生高速冲刷, 在叶片表面产生固体颗粒冲蚀, 损害压气机叶片的结构完整性<sup>[1,2]</sup>。功能涂层材料能够提供高于基体的表面硬度, 有效保护基体不受固体颗粒的冲蚀。研究表明, 在叶片表面沉积硬质涂层, 可显著提高基体材料的表面硬度及耐磨性能, 降低沙尘对叶片的冲蚀磨损量, 提高基体抗粒子冲蚀的性能<sup>[3-8]</sup>。

单一结构硬质膜层在应对粒子的大角度冲蚀时, 更多地表现出沿膜/基界面的脆性开裂失效。这种失效方式主要是基于软基体/硬膜层体系的高脆性以及膜/基界面不匹配造成的较低的膜/基界面结合强度<sup>[9]</sup>。多层复合结构是提高膜/基界面匹配性及涂层韧性的有效途径<sup>[10,11]</sup>, 其形成的软/硬子膜层交替结构, 在膜层内部产生应力梯度, 诱使显微裂纹尖端在界面处偏转, 并在软质层内部被包裹、钝化, 抑制其扩展, 实现膜层材料的有效增韧<sup>[12,13]</sup>。Ti/TiN、TiN/TiAlN、TiN/ZrN、Zr/ZrN<sup>[14-18]</sup>等多层复合结构膜层的研究已经表明多层复合结构膜层可有效提高硬质膜层的抗冲蚀性能。

然而, 多层复合结构并未改善抗冲蚀膜层的膜/基界面匹配性, 软基体/硬膜层体系所形成的“蛋壳效

应”依然存在, 冲蚀应力与界面残余应力联合诱发的膜层沿界面脱落仍旧是抗冲蚀膜层在高速粒子冲蚀下的主要失效方式。如何提高膜层与基体的界面匹配性是提高其抗冲蚀性能的关键。本研究从基体预强化角度出发, 利用离子扩渗与等离子增强电弧离子镀复合方法在 TC4 合金表面形成从基体表面一定深度范围到表面膜层的梯度复合结构渗镀层, 改变软基体/硬膜层的复合模式, 提高硬质膜层与基体的界面匹配性, 并表征了膜层结构对其抗冲蚀性能的影响。

## 1 实验

实验基材选用 Ti6Al4V(TC4)钛合金, 在经过砂纸打磨、金相抛光及超声波清洗等表面处理后放入真空设备中首先进行辉光等离子渗碳, 之后在渗碳层表面采用等离子增强电弧离子镀技术制备单层 TiN 及多层复合 Ti/TiN 硬质膜层, 形成具有梯度结构、多层复合的渗镀层。

TC4 钛合金表面复合渗镀层的制备基于以下过程: 在真空及电场条件下, 高纯石墨源极利用真空及电场激发 Ar 辉光放电产生 C 等离子体, 在温度梯度及等离子体场的作用下渗入基体形成梯度渗碳层; 之后, 采用等离子增强电弧离子镀技术, 通过控制氮气的间歇式通入及 Ti 电弧靶的放电参数在梯度渗碳层

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 科技部中乌国际合作项目(2014DFR50450)

作者简介: 王彦峰, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 西北有色金属研究院腐蚀与防护研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86283410, E-mail: yfwang420@163.com

表面制备单层 TiN (沉积时间 120 min) 以及 12 周期复合 Ti/TiN (调制比为 0.2, 沉积时间 240 min) 膜层。为了便于性能对比, 在未渗碳的 TC4 基体表面相应制备了单层及 12 周期复合 Ti/TiN 多层复合膜层。

复合膜层的断面形貌用 JSM-6700F 型扫描电镜进行观察, 膜层的表面显微硬度用 HXD-1000 型显微硬度计测试 (测试参数: 压入载荷 0.245 N, 保压时间 15 s), 用 WS-97 型自动划痕仪对膜层的膜基结合强度进行表征 (测试参数: 加载速率 100 N/min, 终止载荷 100 N)。

对于复合膜层的抗沙尘冲蚀性能测试, 目前并没有统一的测试标准。而本研究侧重于基体预强化对于复合膜层抗冲蚀性能的影响, 因此, 冲蚀测试方法可相对简化: 采用固定式喷枪, 喷嘴直径为  $\Phi 2$  mm, 固体颗粒选用平均粒径为 90  $\mu\text{m}$  的氧化铝颗粒 (有棱角), 颗粒流量为 80 g/min, 喷嘴与试样距离为 5 mm, 冲蚀时间 60 s, 喷射气流压力为 0.6 MPa, 冲蚀角度设定为 30° 和 90°。通过观察冲蚀形貌及膜层破坏方式, 研究基体预强化对复合膜层冲蚀性能的影响及冲蚀损伤机制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合渗镀层结构与硬度、结合强度的相互关系

利用辉光离子渗碳与等离子增强离子镀复合技术成功在 TC4 合金表面制备了具有梯度结构的复合渗镀层, 如图 1 所示。图 1a 和图 1c 分别是 TC4 基体表面单层 TiN 以及 12 周期复合 Ti/TiN 涂层的断面形貌,

其中单层 TiN 涂层的厚度约 7  $\mu\text{m}$ , 12 周期复合 Ti/TiN 涂层的厚度达到了 15  $\mu\text{m}$  以上, 涂层与基体的结合界面紧密, 不存在任何结构缺陷。图 1b 和图 1d 则是 TC4 基体经离子渗碳后表面 TiN 以及 12 周期复合 Ti/TiN 涂层的断面形貌, 显然, 离子渗碳使得 TC4 基体在大于 50  $\mu\text{m}$  的深度范围内明显生成了组织细密、具有梯度结构的渗碳层, 渗碳层与表面单层 TiN 以及多层复合 Ti/TiN 膜层的结合依然紧密。该渗碳层的存在势必会对复合膜层的性能产生影响。

利用显微压入及划痕法, 评价了复合渗镀层的表面显微硬度及膜/基结合强度, 结果如图 2 所示。图中, 编号 No.1 代表未经任何处理的 TC4 基体, No.2 代表预渗碳后的 TC4 基体, No.3 代表 TC4 基体表面单层 TiN, No.4 代表基体表面 12 周期复合 Ti/TiN 膜层, No.5 代表基体表面渗碳复合单层 TiN 膜层, No.6 代表基体表面渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层。从图中可以看出, 在 0.245 N 外加载荷测试条件下, 渗碳后的 TC4 基体表面硬度能够提高到 9 GPa 以上。而经过复合渗镀处理后, TC4 试样的表面硬度更是显著高于渗碳层或单一 TiN 膜层体系。例如, 渗碳复合单层 TiN 膜层的表面硬度接近 20 GPa, 比 TC4 基体表面单一 TiN 膜层的 10 GPa 提高近 2 倍。渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层的表面硬度可达 25 GPa 以上, 远高于直接在 TC4 基体表面制备的 12 周期 Ti/TiN 复合膜层的表面硬度。由此可见, 基体的表面预强化能够进一步提高膜层的

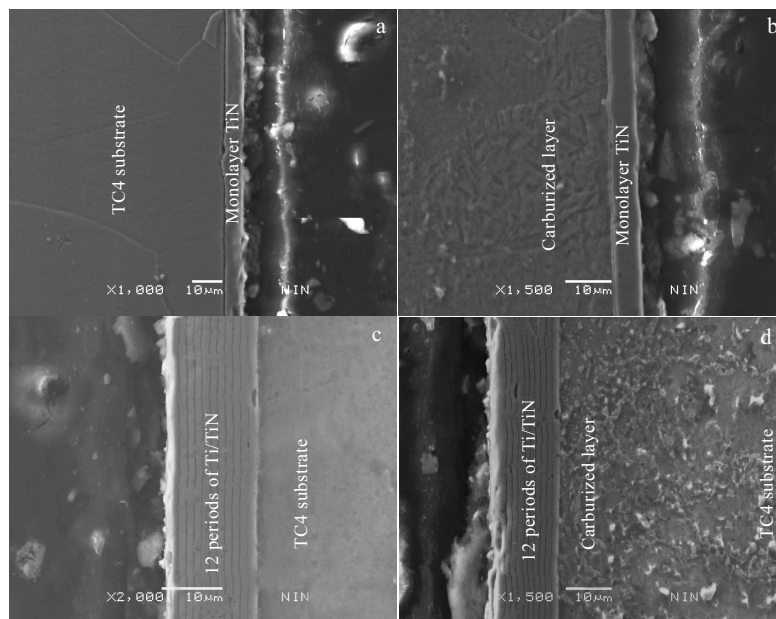


图 1 TC4 合金表面不同复合结构膜层的断面形貌

Fig.1 Cross-section morphologies of composite coating on TC4 alloy: (a) monolayer TiN, (b) composite coating with carburized layer and TiN, (c) 12 periods of Ti/TiN, and (d) composite coating with carburized layer and 12 periods of Ti/TiN

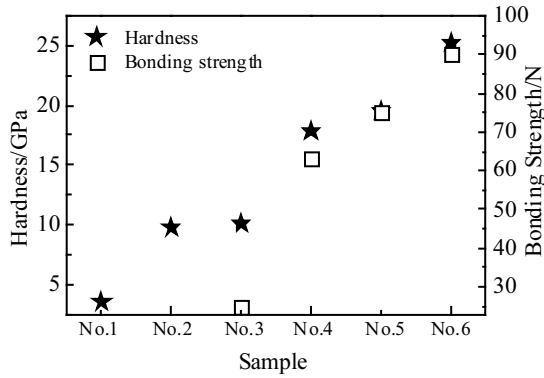


图 2 不同复合结构膜层表面硬度及膜/基结合强度

Fig.2 Hardness and bonding strength of composite coating with various structures

表面硬度。相应地，基体表面预渗碳处理后，复合渗镀层的膜/基结合强度也显著得到了提高。基体未渗碳前，表面单层 TiN 以及 12 层复合 Ti/TiN 膜层的膜/基结合强度在划痕载荷作用下，膜层从界面破裂的临界载荷分别为 25 和 63 N 左右，而基体表面预制备渗碳层后，膜/基界面破裂的临界载荷相应提高到 75 和 90 N。

显然，复合渗镀层表面硬度和膜/基结合强度性能的提升与基体表面的渗碳层密切相关。前期研究证明，双辉等离子渗碳技术能够在 TC4 合金表面获得具有梯度结构的渗碳层，其组织以 TiC 为主相。相对于 TC4 基体，渗碳层的硬度能够达到近 10 GPa，使得其在外加载荷作用下发生弹性形变的抗力显著提高，从而增强了表面膜层的弹性恢复能力，外加载荷在膜层表面留下的压痕面积相应减小，膜层表面硬度相应提高。而渗碳层对于提高膜/基结合强度可从以下 3 个方面解释。首先，TC4 基体表面的渗碳层在热膨胀系数、表面硬度等物性参数方面与 TiN 更为接近，使得 TiN 层在沉积、冷却过程中避免由于膨胀、收缩等与基体不一致而导致的界面残余热应力产生，界面匹配性得到提高；第二，离子扩渗能够在渗碳层内部引入残余压应力，进一步与 TiN 膜层中的残余拉应力抵消，对于膜/基结合强度的提高很有意义。第三，正如图 2 中的膜/基结合强度随表面硬度的变化趋势，随硬度的升高，膜/基结合强度相应升高。高的基体表面硬度能够降低硬质膜层/软基体体系在外加划擦载荷作用下软基体变形而硬质膜层未变形导致硬质膜层脆性断裂的倾向，从而强化复合渗镀层的膜/基结合强度。复合渗镀层表面硬度及膜/基结合强度的提高必然会提高其抗固体颗粒冲蚀性能。

## 2.2 不同结构膜层的抗冲蚀性能

### 2.2.1 单层 TiN 膜层

图 3 是 TC4 基体表面单层 TiN 膜层在 30°(图 3a) 及 90°(图 3b) 冲蚀角度下膜层损伤的表面宏观形貌。可以看出，在测试条件下，冲蚀区域内的单层 TiN 膜层已发生完全剥落。对冲蚀区域进一步放大，可以清晰地观察到单层 TiN 膜层的冲蚀损伤过程。在 30°冲蚀条件下，膜层呈现出沿冲蚀方向的脆性剥落，其冲蚀可分为 2 个区域，如图 4a 所示。膜层的不连续破裂区 (A 区)：在受到颗粒冲蚀的初始阶段，部分颗粒冲击膜层表面造成不连续开裂、剥落；膜层的完全破坏区 (B 区)：在颗粒的持续冲蚀下，膜层破裂区相互连通并从基体表面剥离。而在 90°冲蚀条件下，膜层的微区损伤形貌如图 4b 所示。单层 TiN 膜层表面布满了大小不一的圆形冲蚀孔洞，这显然是由于颗粒的垂直冲蚀造成的，且较大冲蚀坑是由较小冲蚀坑在持续冲蚀下相互连通形成的。蚀坑一旦形成，在很短的时间内就会迅速扩展，引起膜层的脆性剥落。不难看出，单层 TiN 膜层由于较高的脆性在固体颗粒的冲蚀下，冲蚀缺陷会迅速形成并扩展，导致膜层的脆性剥落。

### 2.2.2 渗碳复合单层 TiN 膜层

基体预渗碳后，表面 TiN 膜层的性能得到了强化，其抗冲蚀性能也得到了相应提高，如图 5 所示。

与单层 TiN 膜层的冲蚀损伤相比，基体预渗碳后表面 TiN 膜层在 30°冲蚀角度下 (图 5a)，表面未出现明显的脆性剥落，损伤深度也小得多。而在 90°冲蚀角度下 (图 5b)，膜层的损伤与单层 TiN 膜层的冲蚀损伤一致，但损伤面积也相对较小。对损伤区域进行微区分析，如图 6 所示。可以发现，30°冲蚀并未造成 TiN 膜层的沿界面脆性开裂，而是呈现出与多层复合结构膜层一样的递进式损伤。在冲蚀颗粒作用下，复合渗镀层的损伤首先从表面 TiN (位置 C) 开始，并随冲蚀时间的延长扩展至基体渗碳层 (位置 B)，并最终延伸至基体 (位置 A)，如图 6a 所示。90°冲蚀造成的损伤则较为严重，如图 6b 所示，在粒子的持续冲蚀

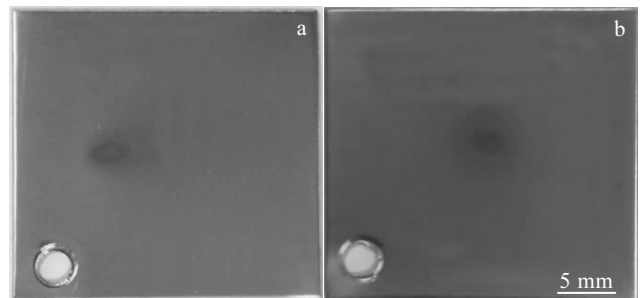


图 3 单层 TiN 膜层的冲蚀损伤形貌

Fig.3 Erosion damages of monolayer TiN coating at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

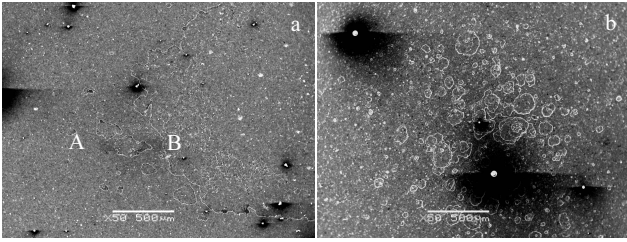


图 4 单层 TiN 膜层的冲蚀微观损伤形貌

Fig.4 Micro erosion damages of TiN coating at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

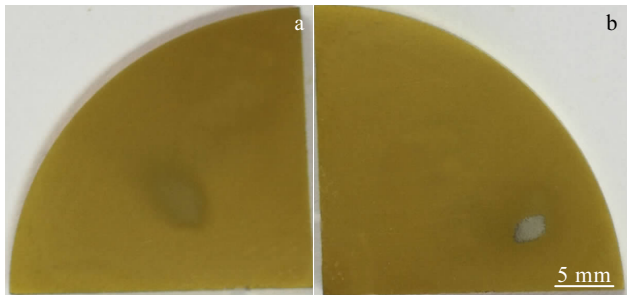


图 5 渗碳复合单层 TiN 膜层的冲蚀损伤形貌

Fig.5 Erosion damage morphologies of composite coating with carburized layer and monolayer TiN at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

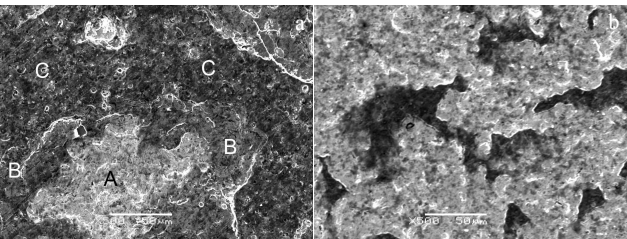


图 6 渗碳复合单层 TiN 膜层的冲蚀微观损伤形貌

Fig.6 Micro erosion damage morphologies of composite coating with carburized layer and monolayer TiN at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

下，冲蚀区域形成的小蚀坑不断扩大并相互连通导致膜层失效，与单层 TiN 膜层的冲蚀失效形式一致。不同的是，复合渗镀层在 90°冲蚀下仍旧表现出了一定的韧性，失效后，仍旧有部分膜层粘附在基体表面，膜层边缘断口呈现梯度过渡结构，并未显现出脆性断裂的特征。

分析 2 种体系下膜层冲蚀损伤的原因，不难看出，渗碳复合单层 TiN 膜层一方面提高了体系的表面硬度，使其抵抗粒子冲蚀、切削的能力得到了一定的强

化，另一方面渗碳层引入的压应力以及较好的界面匹配性避免了界面处应力的积聚及释放导致的膜层脆性开裂，从而优化了复合渗镀层的抗冲蚀性能。但是较高的体系硬度又会使得膜层在应对冲蚀粒子垂直反复冲蚀时产生疲劳裂纹，进而造成其抗 90°冲蚀性能不佳。

### 2.2.3 12 周期 Ti/TiN 复合膜层

多层复合结构能够进一步提高膜层的强韧性及膜/基结合强度<sup>[19]</sup>，降低了复合膜层在冲蚀应力下发生沿界面脆性断裂的倾向，其抗冲蚀性能也相应得到了提高。

图 7 是 12 周期复合 Ti/TiN 膜层在 30°(图 7a)及 90°(图 7b)冲蚀下膜层表面的冲蚀形貌。相比于单层 TiN 膜层，其损伤区域及损伤程度明显小了很多，表面膜层几乎不存在肉眼可见的宏观损伤。对冲蚀区域进一步放大，如图 8 所示。在 30°冲蚀条件下，膜层表面仅出现了表层剥落，并未完全失效(图 8a)，而在 90°冲蚀条件下(图 8b)，膜层表面出现了“冲蚀窝”状冲蚀形貌，这种窝坑结构显然是由于颗粒冲蚀作用下表面膜层发生塑性变形造成的，仔细观察还发现“窝坑”周围未出现任何形式的脆性开裂现象，这表明复合膜层的韧性也显著得到了强化。

由此可见，多层复合结构能够提高 TiN 膜层的抗冲蚀性能，这主要归结于膜层整体强韧性的同步提高。在多层复合结构的调制作用下，膜层整体的硬度得到

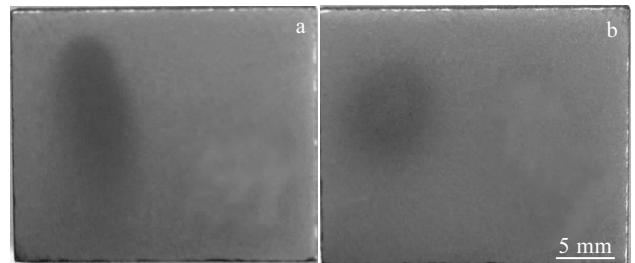


图 7 12 层复合 Ti/TiN 膜层的宏观损伤形貌

Fig.7 Macro erosion damage morphologies of Ti/TiN coating with 12 periods at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

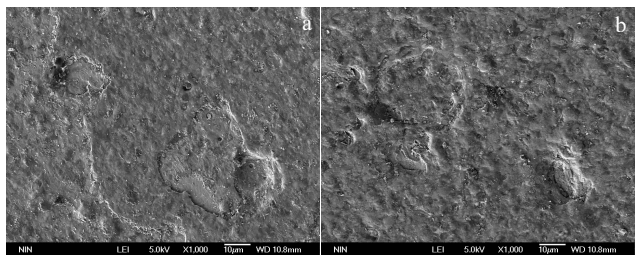


图 8 12 层复合 Ti/TiN 膜层的微观损伤形貌

Fig.8 Micro erosion damage morphologies of Ti/TiN coating with 12 periods at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

提升,且内部较低的残余应力以及软质 Ti 调制层的协调作用使得其抵抗脆性裂纹扩展的能力得到加强,当冲蚀裂纹扩展至 TiN 层与 Ti 层的调制界面时,软质 Ti 层会更多地吸收裂纹尖端的能量,钝化裂纹并使其发生偏转,沿 Ti 调制层界面扩展,从而出现膜层的层状剥落损伤,也就避免了后续膜层受到损伤或延长损伤时间。因此,可以认为多层复合 Ti/TiN 膜层的冲蚀损伤呈现出一种渐进式剥落的韧性损伤机制。

### 2.2.4 渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层

图 9 是 TC4 合金表面渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层在 30°及 90°冲蚀下膜层表面的冲蚀形貌。经过渗碳层强化后,12 周期 Ti/TiN 复合膜层的抗冲蚀性能进一步得到了提高。30°冲蚀下,高的表面硬度使得膜层并未在粒子切削作用下发生剥落,而较好的强韧性匹配使得其抵抗 90°粒子的冲蚀能力进一步得到强化,膜层表面未见明显的冲蚀剥落等损伤。

图 10 是 30°和 90°冲蚀角度下渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层的表面微观损伤形貌。30°角度冲蚀下,膜层表面局部出现了微小的层状剥落,如图 10a 中白色圆圈所示,但相对于图 8a 所示的 12 周期 Ti/TiN 在 30°冲蚀下

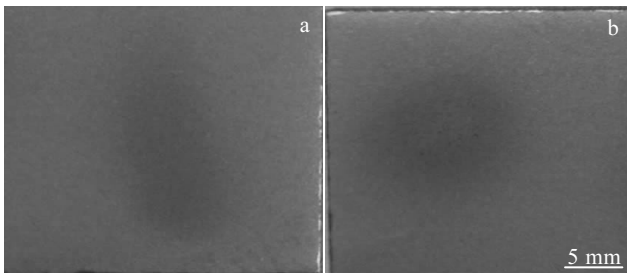


图 9 渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层的宏观损伤形貌

Fig.9 Macro erosion damage morphologies of composite coating with carburized layer and 12 periods of Ti/TiN at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

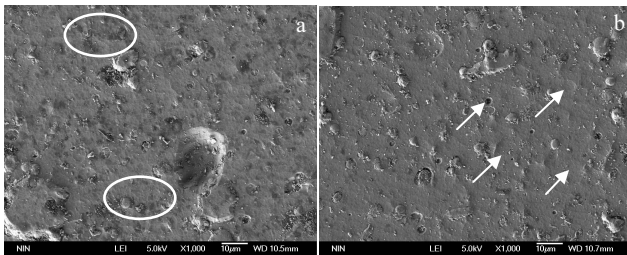


图 10 渗碳复合 12 周期 Ti/TiN 膜层微观损伤形貌

Fig.10 Micro erosion damage morphologies of composite coating with carburized layer and 12 periods of Ti/TiN at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

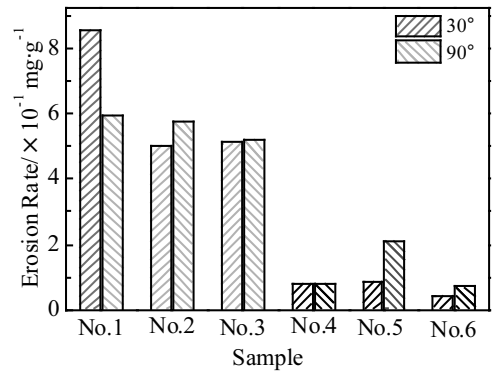


图 11 不同复合结构 TiN 涂层的冲蚀率

Fig.11 Erosion rate of TiN coating with various microstructure at erosion angle of 30° (a) and 90° (b)

的损伤形貌,其损伤面积要小得多,损伤也更浅。而在 90°角度冲蚀下,表面出现了更为细小的冲蚀窝坑(图 10b 中箭头所示),膜层的抗冲击韧性进一步得到了提高。可以认为,通过基体表面预渗碳并复合沉积 12 周期 Ti/TiN 膜层,TC4 基体获得了更优越的抗冲蚀性能,复合渗碳层完全呈现出一种韧性损伤机制。

### 2.3 复合结构渗镀层的冲蚀失重率

对渗碳前后 TC4 表面单层 TiN 及 12 层复合 Ti/TiN 膜层的冲蚀失重率进行了对比,结果如图 11 所示。

从图中可以看出,复合渗镀层结构变化对 TC4 钛合金抗冲蚀性能的影响。基体材料由于较好的塑性使得其 90°冲蚀失重小于 30°冲蚀失重 (No.1); 硬质膜层的存在相应提高了 TC4 钛合金的抗冲蚀性能,但改善程度与膜层的结构有关。例如基体单独渗碳 (No.2) 以及基体表面单层 TiN (No.3) 表现出了较高的冲蚀失重率。随着基体的预渗碳强化及多层复合结构的优化,其抗 30°和 90°粒子冲蚀的能力显著增强,尤其是 No.6 样品,在渗碳对基体和膜/基界面的强化以及多层复合增韧的作用下,表现出了最佳的抗大、小攻角粒子冲蚀性能,其冲蚀失重率相比于单层 TiN 膜层,降低了十余倍。

分析认为,渗碳层提高了基体的刚性,相应增强了复合渗镀层的表面硬度,强化了其抗小角度冲蚀粒子微切削的能力,同时渗碳层优化了 TiN 层与基体的界面匹配性,缓解了界面应力,再加上多层复合结构特有的层状增韧效应使得复合渗镀层具备了较高的抗冲击韧性,在应对大角度粒子的反复冲蚀时能够有效抑制疲劳裂纹的产生,避免或推迟膜层的冲蚀损伤。

## 3 结 论

1) 离子渗碳获得的表面梯度渗碳层对于提高复合

渗镀层的表面显微硬度及膜/基界面结合强度大有裨益。

2) 离子渗碳复合多层 Ti/TiN 膜层形成的复合渗镀层结构增加了膜/基体系的刚性, 强化了膜/基界面, 具备最佳的强韧性匹配。

3) 高的表面硬度抵御了小角度冲蚀粒子的切削作用, 良好的韧性匹配又抵抗了大角度粒子的反复冲蚀, TC4 合金表面渗碳复合 Ti/TiN 膜层具有理想的抗冲蚀性能。

#### 参考文献 References

- [1] Kumar A, Keane A J, Nair P B *et al.* *Journal of Mechanical Design*[J], 2006, 128(4): 864
- [2] Pepi M, Squillaciotti R, Pfluederer L. *Journal of Failure Analysis and Prevention*[J], 2012, 12(1): 96
- [3] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. *Surface and Coatings Technology*[J], 2014, 257: 165
- [4] Lin J L, Jang J, In-wook Park *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2016, 287: 44
- [5] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. *Surface and Coatings Technology*[J], 2013, 235: 383
- [6] Wolfe D E, Gabriel B M, Reedy M W. *Surface and Coatings Technology*[J], 2011, 205(19): 4569
- [7] Reedy M W, Eden T J, Potter J K *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2011, 206(2-3): 464
- [8] Yang Q, Zhao L R, Cai F *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2008, 202(16): 3886
- [9] Sue J A, Troue H H. *Surface and Coatings Technology*[J], 1991, 49(1-3): 31
- [10] Lin S S, Zhou K S, Dai M J *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(2): 451
- [11] Li C, Yu X X. *Materials & Design*[J], 2016, 106: 1
- [12] He M Y, Evans A G, Hutchinson J W. *Int J Solids Struct*[J], 1994, 31(24): 3443
- [13] Holleck H, Schulz H. *Surface and Coatings Technology*[J], 1988, 36(3-4): 707
- [14] Yu X X, Li C, Pei F *et al.* *Surface and Coatings Technology* [J], 2016, 304: 512
- [15] Borawski B, Todd J A, Singh J *et al.* *Wear*[J], 2011, 271(11-12): 2890
- [16] Wei Y Q, Gong C Z. *Applied Surface Science*[J], 2011, 257(17): 7881
- [17] Voglia E, Tillmann W, Selvadurai-Lassl U *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2011, 257(20): 8550
- [18] Payán-Díaz S, Cruz W D L, Talamantes-Soto R *et al.* *Ceramics International*[J], 2016, 42(16): 18 806
- [19] Wang Yanfeng(王彦峰), Li Zhengxian(李争显), Wang Hao-nan(王浩楠) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(5): 1219

## Solid Particle Erosion of Composite Coating of Gradient Carburized Layer and TiN(Ti) Coating Synthesized on TC4 Alloy

Wang Yanfeng, Li Zhengxian, Du Jihong, Zhang Changwei  
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** In order to improve the hard coatings' solid particle erosion (SPE) resistance, combining the plasma ion diffusion and arc ion plating technology, a series of composite coatings with gradient carburized layer and TiN(Ti) coating were synthesized on TC4 alloy. And the influence of structure on composite coating's properties was studied. The results show that the hardness and bonding strength of composite coatings are enhanced remarkably, compared with those of the monolayer TiN and 12 periods of Ti/TiN hard coatings deposited on TC4 alloy without plasma carburization. The monolayer TiN shows a mechanism of brittle cracking after sand erosion, and the 12 periods of Ti/TiN coating presents morphologies of flaking and erosion pit due to the multilayer toughening effect. After carburization, the coating's impact toughness is enhanced. The interface fracture of monolayer TiN is restrained. And the composite coating with gradient carburized layer and 12 periods of Ti/TiN coating possesses the best SPE resistance with erosion mass loss rate decreasing by more than ten times and shows a mechanism of tough damage, which can be attributed to its higher interface strength and better match of hardness and toughness.

**Key words:** plasma carburization; Ti/TiN coating; solid particle erosion; multilayered structure; toughness

Corresponding author: Wang Yanfeng, Ph. D., Senior Engineer, The Corrosion and Protection Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86283410, E-mail: yfwang420@163.com