

# 镁合金表面溅射沉积 M-TaC 多层涂层的 微观结构与性能

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.05.004

胡旭军<sup>1</sup> 张海波<sup>2</sup>  
李海洋<sup>1</sup> 李文元<sup>1</sup>  
丁泽良<sup>1</sup>

1. 湖南工业大学  
机械工程学院

湖南 株洲 412007

2. 煜邦电力智能装备(嘉兴)  
有限公司  
浙江 嘉兴 314300

**摘要:** 采用磁控溅射技术在 ZK60 镁合金表面制备了 M-TaC 多层涂层, 并以 TaC 单层涂层作为对照, 研究了涂层的微观结构、结合性能和耐腐蚀性能。结果表明, 涂层呈多孔柱状结构和亲水性, 能显著提高 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。相比于 TaC 单层涂层, M-TaC 多层涂层的表面粗糙度增大, 亲水性减弱, 结合力提高(约 60%), 耐腐蚀性能增强(腐蚀电流密度减小 2.382  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )。

**关键词:** 镁合金; 溅射沉积; TaC; 多层涂层; 结合性能; 耐腐蚀性能

**中图分类号:** TG174.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2023)05-0023-08

**引文格式:** 胡旭军, 张海波, 李海洋, 等. 镁合金表面溅射沉积 M-TaC 多层涂层的微观结构与性能[J]. 包装学报, 2023, 15(5): 23-30.

## 1 研究背景

镁合金具有良好的生物降解性和接近天然骨的力学性能, 是一种应用前景良好的生物植入材料<sup>[1-2]</sup>。但是, 镁合金在生理介质中的高腐蚀速率严重限制了它的临床应用<sup>[3-4]</sup>。表面涂层既能保留镁合金基底原有的力学性能, 又能通过沉积涂层使其表面功能化, 是控制镁合金降解速率的有效方法<sup>[5]</sup>。

碳化钽(TaC)陶瓷涂层在耐腐蚀、耐磨和生物相容性方面具有良好的综合性能, 是近年来植入体表面改性研究的热点材料。A.Poladi 等<sup>[6]</sup>采用反应磁控溅射技术制备的 TaC 涂层, 使 AISI316L 不锈钢腐蚀电流密度降低了一个数量级, 耐腐蚀性

能显著提高。陆健等<sup>[7]</sup>发现, 利用等离子喷涂技术制备的 TaC 涂层能明显提高 Ti6Al4V 钛合金在力学、电化学、摩擦学以及亲水性方面的性能。M. M. Esmaeili 等<sup>[8]</sup>通过电子束物理气相沉积法在 Ti6Al4V 表面制备的 TaC 涂层促进了细胞的黏附、生长和增殖。Du S. X. 等<sup>[9]</sup>报道, 利用直流反应溅射技术在 Ti6Al4V 钛合金表面制备的 TaC 涂层, 具有良好的润湿性和优异的耐磨性, 在模拟体液中的磨损率为  $1.44 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , 仅为 Ti6Al4V 钛合金的五分之一。

众所周知, 涂层功能实现的前提是其与基底之间结合良好。由于陶瓷涂层与金属基底之间的物性参数尤其是热膨胀系数相差较大, 涂层-基底结合

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50163); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(20A159)

作者简介: 胡旭军(1999-), 男, 湖南耒阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为表面涂层材料,

E-mail: 1262332121@qq.com

通信作者: 丁泽良(1966-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事表面涂层与特种加工的研究,

E-mail: 10176@hut.edu.cn

界面往往存在较大的残余应力,导致涂层容易开裂、曲翘甚至脱落<sup>[10]</sup>。研究表明,在涂层与基底之间引入中间过渡层可以缓解其物性参数不匹配,降低界面残余应力,改善涂层的结合性能,从而延长涂层的使用寿命<sup>[11-13]</sup>。制备涂层的方法有许多,如磁控溅射、等离子喷涂、溶胶凝胶、电化学沉积、微弧氧化等<sup>[14]</sup>。磁控溅射技术因具有高效、低温、易于控制、镀膜面积大、涂层附着力强等优点,被广泛用于微电子、光学、机械加工和电池材料等领域<sup>[15]</sup>。查阅相关文献表明,国内外对磁控溅射碳化钽多层涂层的研究鲜有报道。

本文基于功能梯度材料理论,通过磁控溅射技术在医用镁合金 ZK60 表面制备了 TaC/TaC+Mg/Mg 碳化钽多层涂层(代号 M-TaC),并以碳化钽单层涂层(代号 TaC)作为对比,研究了涂层的微观形貌、晶相结构、结合性能和耐腐蚀性能,以期对碳化钽涂层的医学应用提供参考。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

ZK60 镁合金,厚度 2 mm,东莞市帝中金属材料有限公司;硅片,厚度 250  $\mu\text{m}$ ,浙江立晶光电科技有限公司;无水乙醇,江苏吴江市仁和化工有限公司;金属镁(Mg)靶、碳化钽(TaC)靶,纯度 99.99%,规格  $\Phi 75 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,中诺新材(北京)科技有限公司;氩气,纯度 99.99%,株洲九方气体有限公司;研磨膏、砂纸,广州蔚仪金相试验有限公司。

### 2.2 实验设备

超声清洗机, KQ2200DE, 昆山市超声仪器有限公司;高真空磁控溅射镀膜机, JPC-450, 北京泰科诺科技有限公司;研磨抛光机(UNIPOL-810)、手动切割机(SYJH-180),沈阳科晶设备制造有限公司;场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(SU8000)、X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)(Ultima IV),日本日立公司;原子力显微镜(atomic force microscope, AFM), EasyScan 2, 瑞士 Nanosurf 公司;接触角测量仪, JC20001, 上海中晨数字技术设备有限公司;划痕仪, MFT-4000, 中国科学院兰州化学物理研究所;超景深显微镜, KH-7700, 日本 HIROX 公司;电化学工作站, SP-15/20A, 法国 Bio-Logic 科学仪器公司。

### 2.3 试样制备

#### 1) 基底预处理

首先用 800#、1200# 和 2000# 的 SiC 砂纸将 ZK60 镁合金表面打磨光滑,再用 W5 粒度的金刚石研磨膏抛光,直至镜面效果。然后,将抛光后的试样在无水乙醇中超声清洗 10 min,随后用吹风机吹干表面。

#### 2) 涂层制备

将预处理后的基底和靶材分别固定在镀膜机的基片台和靶座上。为去除表面异物,对靶材和基底分别进行等离子清洗,清洗参数为:真空度  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa,溅射功率 200 W,氩气流量 20 mL/min,清洗时间 15 min。采用直流溅射 Mg 靶的方式沉积 Mg 黏结层;通过射频溅射 TaC 靶和直流溅射 Mg 靶的共溅射方式沉积 TaC+Mg 掺杂层;TaC 功能层采用射频溅射 TaC 靶来制备。具体制备参数如表 1 所示。

表 1 涂层的制备参数

Table 1 Deposition parameters of coating

参数	TaC		M-TaC		
	1	1	2	3	3
层数	1	1	2	3	3
涂层材料	TaC	Mg	Mg	TaC	TaC
溅射功率/W	275	50	50	200	275
氩气流量/(mL·min <sup>-1</sup> )	25	20	20	25	25
沉积时间/min	420	30	245	420	420

### 2.4 涂层表征与检测

#### 1) 微观结构表征

采用场发射扫描电子显微镜观察涂层的表面与断面特征;通过原子力显微镜检测试样表面粗糙度;利用 X 射线衍射仪分析涂层材料的物相与晶体结构。

#### 2) 性能检测

润湿性能:通过接触角测量仪检测试样表面水接触角,来评价试样表面的润湿性能。

结合性能:采用划痕仪在载荷为 0~30 N,加载速率为 15 N/min,划痕长度为 6 mm 条件下,检测涂层的结合力。采用超景深显微镜观察划痕形貌。

耐腐蚀性能:采用电化学工作站测试试样的耐腐蚀性能。测试时采用三电极体系,其中试样为工作电极,铂片(Pt)为辅助电极,饱和 Ag/AgCl 为参比电极。测试前先用铜丝将试样与工作电极相连,再用热熔胶将试样密封,只留出 1 cm  $\times$  1 cm 的工作表面。然后将试样放入腐蚀溶液浸润 90 min 以保证三电极体系的稳定。腐蚀溶液的成分为 NaCl (8 g/L)、KCl (0.2 g/L) 和 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O (1.44 g/L)。极化曲线的扫



描范围为开路电位  $\pm 450$  mV, 扫描速度为 1.0 mV/s。利用 EC-Lab 软件对极化曲线进行拟合, 根据塔菲尔 (Tafel) 外推法得到试样的腐蚀电位和腐蚀电流密度等参数。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 涂层微观结构

##### 3.1.1 断面形貌

图 1 为涂层试样断面 SEM 照片。由图可知, TaC 单层和 M-TaC 多层涂层的厚度分别约为 2730 nm 和 3452 nm。根据 M-TaC 涂层的结构和单个膜层的沉积率, 可以判断 M-TaC 多层涂层中各膜层的厚度, 即外层 TaC 为 2676 nm, 中间层 TaC-Mg 为 453 nm, 黏结层 Mg 为 323 nm。两个试样的 TaC 膜层断面都呈现多孔柱状结构, 其中多层涂层的柱状和孔尺寸明显更大。这是由于多层涂层中的 Mg 层呈颗粒状, 使得沉积 Mg 层后的表面粗糙度大于抛光后 ZK60 的表面粗糙度。这一差异加剧了溅射涂层的阴影效应<sup>[16-18]</sup>, 从而导致多孔柱状尺寸加大。另外, 溅射沉积涂层的柱状呈倒锥特点, 涂层越厚柱状尺寸越大<sup>[19]</sup>。

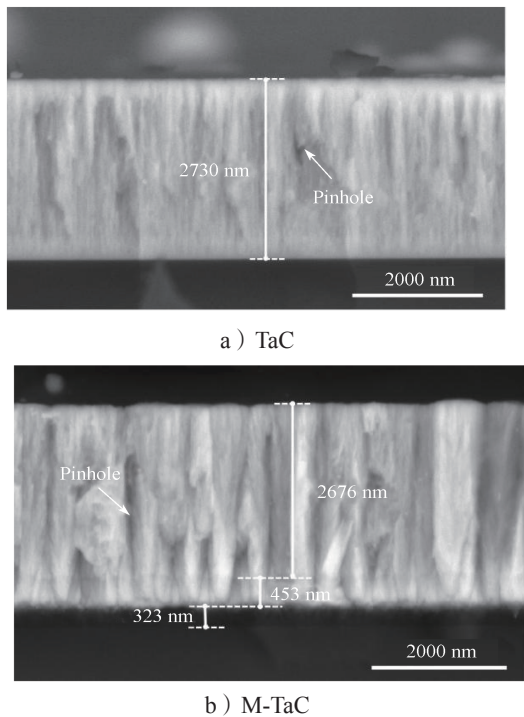
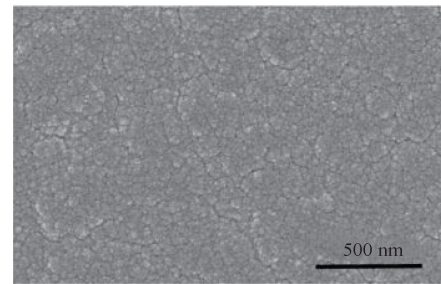


图 1 涂层试样断面 SEM 照片

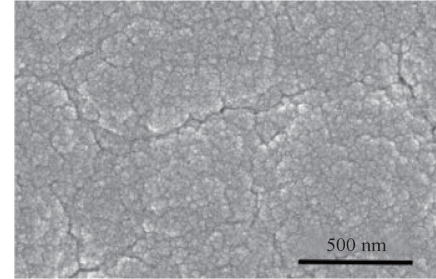
Fig. 1 Cross-sectional SEM picture of coating samples

##### 3.1.2 表面形貌

图 2~3 为涂层试样表面的 SEM 和 AFM 照片。



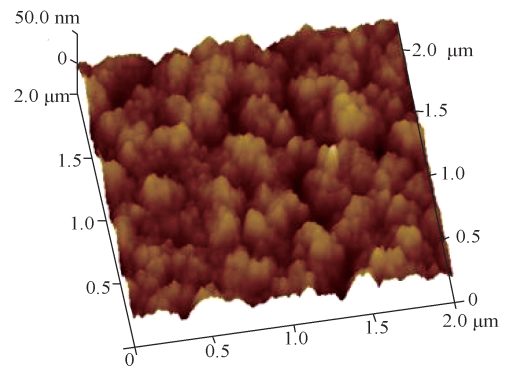
a) TaC



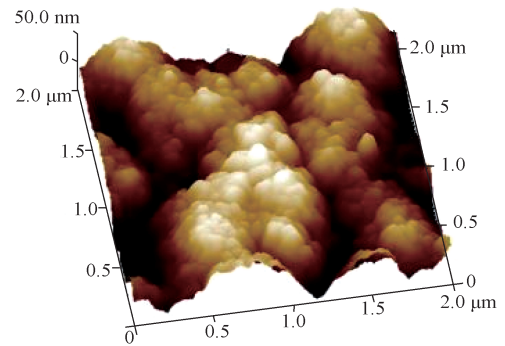
b) M-TaC

图 2 涂层试样表面 SEM 照片

Fig. 2 Surface SEM picture of coating samples



a) TaC



b) M-TaC

图 3 涂层试样表面 AFM 照片

Fig. 3 Surface AFM picture of coating samples

由图 2~3 可知, 两种涂层表面都呈颗粒状结构,

其中 TaC 单层试样的颗粒尺寸较小, 大小均匀, 粗糙度 ( $R_a$ ) 为  $(7.20 \pm 0.71)$  nm。而 M-TaC 多层试样表面颗粒尺寸较大, 团簇现象明显, 粗糙度 ( $R_a$ ) 为  $(17.80 \pm 1.50)$  nm。这是由于溅射涂层呈倒锥柱状生长模式, 厚度较大的涂层, 其表面锥帽尺寸较大, 从而导致涂层表面的粗糙度增加<sup>[20]</sup>。

### 3.1.3 物相组成

图 4 为 ZK60 镁合金、TaC 和 M-TaC 试样的表面 XRD 谱图。对照 PDF 卡片 35-0821 (Mg) 和 35-0801 (TaC), 可以发现, 在涂层试样表面  $2\theta$  为  $34.9^\circ$ 、 $40.5^\circ$ 、 $58.6^\circ$  和  $70^\circ$  处检测到了 TaC 的特征峰, 分别对应 TaC 相的 (111)、(200)、(220) 以及 (311) 晶面, 其中 (111) 晶面峰值强度最高。两种涂层试样的晶面峰值强度差别较小, 说明多层涂层中的 TaC+Mg/Mg 中间层对 TaC 晶粒的择优取向影响较小<sup>[21]</sup>。涂层试样的 XRD 谱图中均出现了 Mg 的衍射峰, 且位置与 ZK60 中的 Mg 相对应, 这可能是由于涂层为多孔结构, 基底或中间层的 Mg 元素扩散到了表面的 TaC 膜层中。

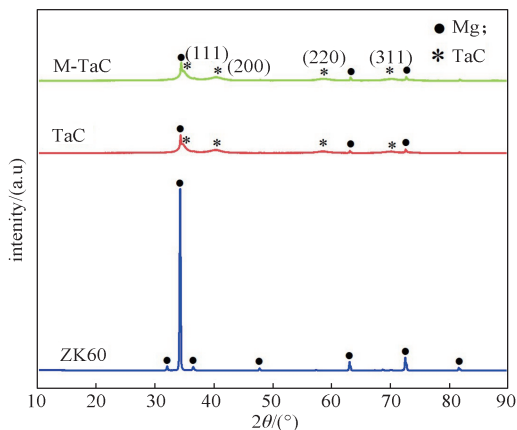


图 4 ZK60 镁合金和涂层试样的 XRD 谱图

Fig. 4 XRD images of ZK60 alloy and coating samples

## 3.2 涂层性能

### 3.2.1 涂层润湿性能

通常采用接触角来评价材料的润湿性能<sup>[22]</sup>, ZK60 镁合金和涂层试样的表面接触角测量结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 所有试样的表面接触角度都小于  $90^\circ$ , 说明其表面均呈亲水性<sup>[23]</sup>; 涂层试样的接触角比未涂层的 ZK60 镁合金的大, 表明涂层降低了 ZK60 的亲水性。相比之下, M-TaC 多层涂层试样具有最大的接触角, 说明其亲水性最弱。这是由于 M-TaC 多层试样的表面粗糙度 ( $(17.80 \pm 1.50)$

nm) 大于 TaC 单层涂层试样的表面粗糙度 ( $(7.20 \pm 0.71)$  nm), 而接触角与表面粗糙度呈正相关关系<sup>[24]</sup>。对于植入材料来说, 表面亲水性减弱不利于细胞的直接黏附, 但是有助于防止细菌的初始黏附和表面生物膜的形成<sup>[25-26]</sup>; 另外, 亲水性降低可减少体液黏附, 提高表面的耐腐蚀性能<sup>[27]</sup>。

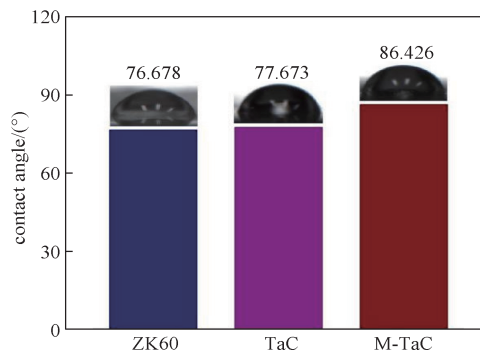


图 5 试样表面的水滴照片和水接触角数据

Fig. 5 Photos and contact angles of water drops on the surface of samples

### 3.2.2 涂层结合强度

图 6 为 TaC 单层和 M-TaC 多层试样的划痕曲线和划痕形貌照片。

由图 6a 可知, 在划痕长度 ( $d_s$ ) 为 0.75 mm 时, TaC 试样出现了涂层脱落和基底裸露, 此时的临界载荷 ( $f_l$ ) 为 3.75 N, 说明 TaC 单层涂层的结合力为 3.75 N。由图 6b 可知, M-TaC 试样在划痕长度 ( $d_s$ ) 为 1.2 mm 处出现了基底裸露, 对应的临界载荷 ( $f_l$ ) 为 6 N。相较于 TaC 单层涂层, M-TaC 多层涂层的结合力增大 60%。多层涂层结合性能的提高是由于 TaC+Mg/Mg 中间层的引入, 使 ZK60 基底与 TaC 涂层之间的成分呈梯度变化, 不同成分之间热膨胀系数不匹配的现象得到改善, 减小了涂层 / 基体系统的界面应力, 增强了涂层与基体的界面结合强度<sup>[28-32]</sup>。

为了解中间层对涂层 - 基体系统残余应力的影响, 采用 ANSYS 软件对 TaC 和 M-TaC 涂层试样的残余应力进行有限元仿真分析, 分析模型和边界条件参照文献 [33-35], 材料物性参数<sup>[29-32]</sup> 如表 2 所示, 分析结果如图 7 所示。

表 2 材料性能参数

Table 2 Performance parameters of materials

材 料	弹性模量 /GPa	泊松比	热膨胀系数 /( $10^{-6} \cdot K^{-1}$ )
TaC	294.0	0.240	6.65
50%TaC+50%Mg	169.4	0.295	9.22
Mg	44.8	0.350	26.10
ZK60	45.0	0.350	28.00

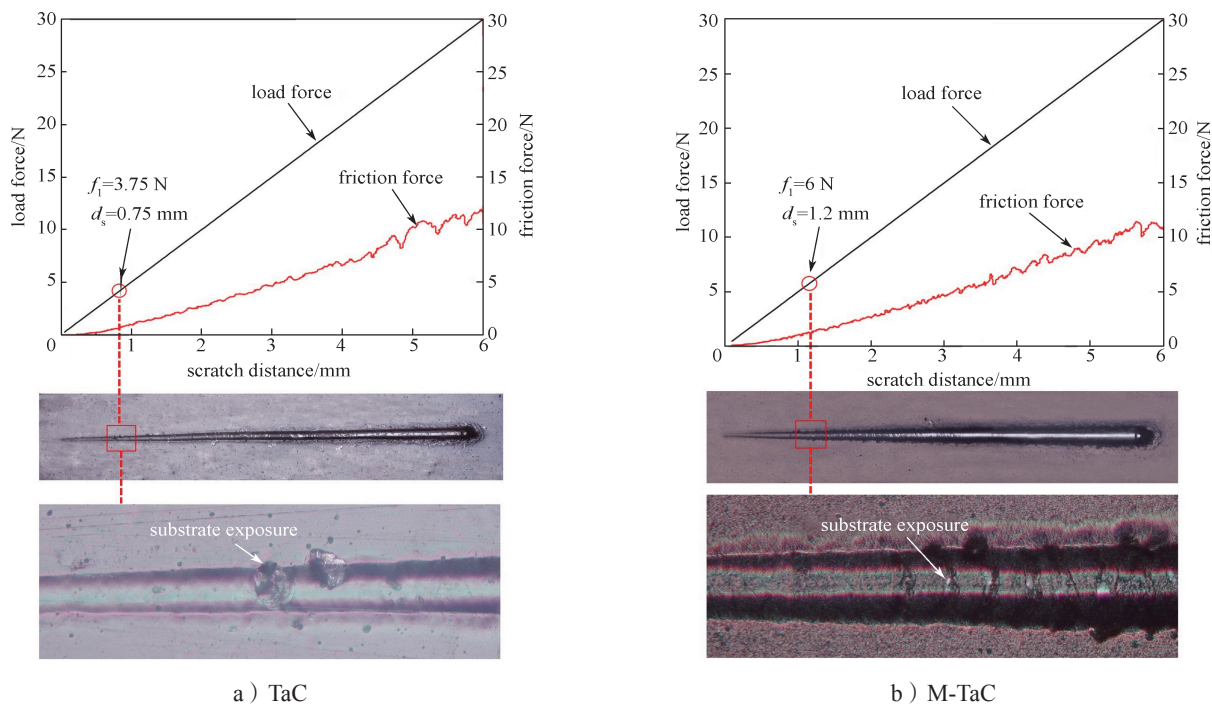


图 6 涂层试样的划痕曲线与划痕形貌

Fig. 6 Scratch curve and scratch morphology of coating samples

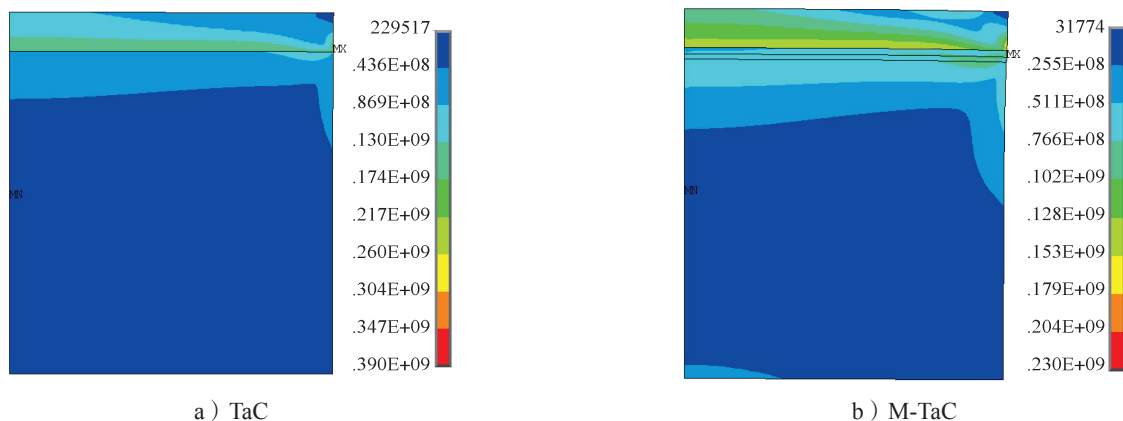


图 7 涂层试样的残余热应力云图

Fig. 7 Residual stress nephogram of coating samples

由图 7 可知, M-TaC 涂层试样的最大残余热应力为 230 MPa, 较 TaC 涂层试样的 (390 MPa) 减小 41%。

由表 2 可知, ZK60 基底的热膨胀系数为  $28.00 \times 10^{-6}/\text{K}$  与 TaC 的热膨胀系数 ( $6.65 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) 相差较大, M-TaC 试样中由于含有 Mg 和 TaC+Mg 中间层, 基底到 TaC 涂层的热膨胀系数呈梯度变化, 从而缓解了涂层 / 基体系统的残余热应力。因此, 相比于 TaC 单层试样, M-TaC 试样的最大残余热应力减小, 结合性能提高。

### 3.2.3 涂层腐蚀特性

图 8 为 ZK60 镁合金、TaC 和 M-TaC 试样在模拟体液环境下的动电位极化曲线, 通过 Tafel 外推法拟合极化曲线得到试样的腐蚀电位 ( $E_{\text{corr}}$ )、腐蚀电流密度 ( $I_{\text{corr}}$ )、阳极斜率 ( $\beta_a$ ) 和阴极斜率 ( $\beta_c$ ), 如表 3 所示。

由表 3 可知, ZK60 镁合金的腐蚀电位为  $-1.429$  V, 相比之下 TaC 和 M-TaC 试样的腐蚀电位分别升高  $0.462$  V 和  $0.466$  V。此外, ZK60 镁合金的腐蚀电流密度为  $8.119 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 较 TaC 试样的 ( $4.341 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ )



和 M-TaC 试样的 ( $1.959 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) 分别增大 0.87 倍和 3.14 倍。利用式 (1) [36] 计算得到各试样极化电阻 ( $R_p$ ) 由大到小的排列顺序与对应的  $E_{\text{corr}}$  排列顺序相同, 即  $R_p(\text{M-TaC}) (3875 \Omega \cdot \text{cm}^2) > R_p(\text{TaC}) (2725 \Omega \cdot \text{cm}^2) > R_p(\text{ZK60}) (1261 \Omega \cdot \text{cm}^2)$ 。

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 I_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

通常,  $E_{\text{corr}}$  越高,  $I_{\text{corr}}$  越小,  $R_p$  越大, 材料的耐腐蚀性能越强 [37]。因此, 在腐蚀溶液环境下, M-TaC 多层涂层能比 TaC 单层涂层对 ZK60 镁合金提供更好的腐蚀保护。M-TaC 试样的耐腐蚀性能高于 TaC 试样, 与其较高的涂层附着力和多层界面效应有关。结合性能越好意味着涂层 / 基体结合界面的缺陷越少, 而由 Mg 和 TaC-Mg 中间层形成的多层结构可以防止涂层中穿透性缺陷的形成, 从而延缓腐蚀性离子对基底的侵蚀, 降低基底的腐蚀速度 [38]。因此, M-TaC 试样表现出比 TaC 试样更好的耐腐蚀性能。

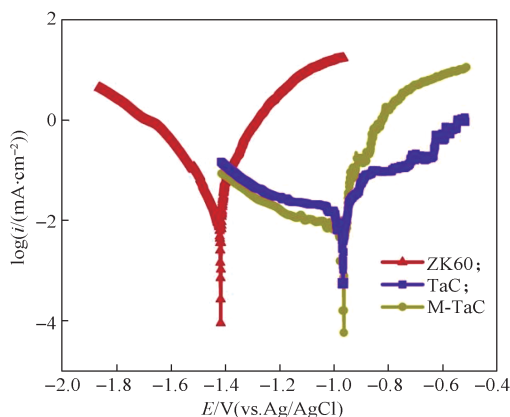


图 8 ZK60 镁合金及涂层试样的动电位极化曲线图  
Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves of ZK60 alloy and coating samples

表 3 ZK60 镁合金及涂层试样的腐蚀参数  
Table 3 Corrosion parameters of ZK60 alloy and coating samples

材料	$E_{\text{corr}}/$ V	$I_{\text{corr}}/$ ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$\beta_a/$ ( $\text{mV} \cdot \text{decade}^{-1}$ )	$\beta_c/$ ( $\text{mV} \cdot \text{decade}^{-1}$ )	$R_p/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$P_i/$ %
ZK60	-1.429	8.119	42.5	52.2	1261	
TaC	-0.967	4.341	41.8	78.0	2725	46.53
M-TaC	-0.963	1.959	23.4	68.8	3875	75.87

## 4 结论

本文采用磁控溅射技术在 ZK60 镁合金表面沉积

了 M-TaC 多层和 TaC 单层涂层, 对比研究了它们的微观结构、涂层结合力和耐腐蚀性能, 可以得到如下结论:

- 1) 两种涂层均呈多孔柱状结构和亲水性, 能显著提高 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。
- 2) 相比于 TaC 单层涂层, M-TaC 多层涂层表面粗糙度增加, 亲水性减弱。
- 3) 多层结构能明显改善镁合金表面 TaC 涂层的结合性能和耐腐蚀性能, 其中结合力提高 60%, 腐蚀电流密度减小  $2.382 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;

## 参考文献:

- [1] CHEN J X, TAN L L, YU X M, et al. Mechanical Properties of Magnesium Alloys for Medical Application: A Review[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 87: 68-79.
- [2] LI H F, ZHENG Y F, QIN L. Progress of Biodegradable Metals[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2014, 24(5): 414-422.
- [3] KUŚNIERCZYK K, BASISTA M. Recent Advances in Research on Magnesium Alloys and Magnesium-Calcium Phosphate Composites as Biodegradable Implant Materials[J]. Journal of Biomaterials Applications, 2017, 31(6): 878-900.
- [4] JAFARI S, HARANDI S E, SINGH RAMAN R K. A Review of Stress-Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue of Magnesium Alloys for Biodegradable Implant Applications[J]. JOM, 2015, 67(5): 1143-1153.
- [5] LI N, ZHENG Y F. Novel Magnesium Alloys Developed for Biomedical Application: A Review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(6): 489-502.
- [6] POLADI A, MOHAMMADIAN SEMNANI H R, EMADODDIN E, et al. Nanostructured TaC Film Deposited by Reactive Magnetron Sputtering: Influence of Gas Concentration on Structural, Mechanical, Wear and Corrosion Properties[J]. Ceramics International, 2019, 45(7): 8095-8107.
- [7] 陆健, 吕晨, 吴盾, 等. 等离子喷涂 TaC 和 NbC 涂层的结构和耐磨耐蚀性能[J]. 材料保护, 2018, 51(12): 1-5.  
LU Jian, LÜ Chen, WU Dun, et al. Microstructures, Abrasion Resistance and Corrosion Resistance of Plasma-Sprayed TaC and NbC Coatings[J]. Materials Protection, 2018, 51(12): 1-5.

- [8] ESMAEILI M M, MAHMOODI M, IMANI R. Tantalum Carbide Coating on Ti-6Al-4V by Electron Beam Physical Vapor Deposition Method: Study of Corrosion and Biocompatibility Behavior[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2017, 14(3): 374–382.
- [9] DU S X, ZHANG K, WEN M, et al. Optimizing the Tribological Behavior of Tantalum Carbide Coating for the Bearing in Total Hip Joint Replacement[J]. *Vacuum*, 2018, 150: 222–231.
- [10] 刘海浪, 王宝健, 刘永丹, 等. 热障涂层的研究现状与进展 [J]. *新技术新工艺*, 2008(5): 92–95.  
LIU Hailang, WANG Baojian, LIU Yongdan, et al. Research Status and Progress of Thermal Barrier Coatings[J]. *New Technology & New Process*, 2008(5): 92–95.
- [11] HONG Y S, KWON S H, WANG T G, et al. Effects of Cr Interlayer on Mechanical and Tribological Properties of Cr-Al-Si-N Nanocomposite Coating[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(S1): s62–s67.
- [12] SOLA A, BELLUCCI D, CANNILLO V. Functionally Graded Materials for Orthopedic Applications: An Update on Design and Manufacturing[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(5): 504–531.
- [13] CAO H S, QI F G, OUYANG X P, et al. Effect of Ti Transition Layer Thickness on the Structure, Mechanical and Adhesion Properties of Ti-DLC Coatings on Aluminum Alloys[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1742.
- [14] SATHISH M, RADHIKA N, SALEH B. A Critical Review on Functionally Graded Coatings: Methods, Properties, and Challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225: 109278.
- [15] MA Y T, LI L, QIAN J, et al. Materials and Structure Engineering by Magnetron Sputtering for Advanced Lithium Batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 39: 203–224.
- [16] MAO S D, YANG H X, SONG Z L, et al. Corrosion Behaviour of Sintered NdFeB Deposited with an Aluminium Coating[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(5): 1887–1894.
- [17] MUKHERJEE S, GALL D. Structure Zone Model for Extreme Shadowing Conditions[J]. *Thin Solid Films*, 2013, 527: 158–163.
- [18] ROSSNAGEL S M, CUOMO J J. Ion Beam Bombardment Effects During Films Deposition[J]. *Vacuum*, 1988, 38(2): 73–81.
- [19] 丁子戩. 镁合金表面氧化铌基涂层的制备与性能研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- DING Ziyu. Preparation and Performance of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Based Coatings on Magnesium Alloys[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2022.
- [20] THORNTON J A. High Rate Thick Film Growth[J]. *Annual Review of Materials Science*, 1977, 7: 239–260.
- [21] 陈招科, 熊翔, 李国栋, 等. 化学气相沉积 TaC 涂层的微观形貌及晶粒择优生长 [J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1377–1382.  
CHEN Zhaoke, XIONG Xiang, LI Guodong, et al. Surface Morphology of TaC Coating Prepared by Chemical Vapor Deposition and Preferential Growth Mechanism of TaC Grains[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1377–1382.
- [22] SUBRAMANIAN B, THANKA RAJAN S, MARTIN P J, et al. Biomineralization of Osteoblasts on DLC Coated Surfaces for Bone Implants[J]. *Biointerphases*, 2018, 13(4): 041002.
- [23] 张茂, 易川云, 杨化雨, 等. 激光纹理化调控材料表面疏水性能研究进展 [J]. *精密成形工程*, 2023, 15(4): 153–163.  
ZHANG Mao, YI Chuanyun, YANG Huayu, et al. Research Progress on Hydrophobicity of Material Surfaces Regulated by Laser Texturing[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(4): 153–163.
- [24] PRAJITNO D H, MAULANA A, SYARIF D G. Effect of Surface Roughness on Contact Angle Measurement of Nanofluid on Surface of Stainless Steel 304 by Sessile Drop Method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 739: 012029.
- [25] HYDE F W, ALBERG M, SMITH K. Comparison of Fluorinated Polymers Against Stainless Steel, Glass and Polypropylene in Microbial Biofilm Adherence and Removal[J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1997, 19(2): 142–149.
- [26] MOLDOVAN M, WEYANT C M, JOHNSON D L, et al. Tantalum Oxide Coatings as Candidate Environmental Barriers[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, 13(1): 51–56.
- [27] DING Z Y, HE Q G, DING Z L, et al. Fabrication and Performance of ZnO Doped Tantalum Oxide Multilayer Composite Coatings on Ti6Al4V for Orthopedic Application[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(5): 685.
- [28] 姜宇, 陈虎魁. 医用镁合金表面改性研究进展 [J]. *材料保护*, 2020, 53(11): 113–121.  
JIANG Yu, CHEN Hukui. Research Progress on the Surface Modification of Biomedical Magnesium Alloy[J]. *Materials Protection*, 2020, 53(11): 113–121.

- [29] LÓPEZ-DE-LA-TORRE L, WINKLER B, SCHREUER J, et al. Elastic Properties of Tantalum Carbide (TaC)[J]. *Solid State Communications*, 2005, 134(4): 245–250.
- [30] SAMSONOV G V, GREBENKINA V G, KLIMENKO V S. Coefficient of Thermal-Expansion of Refractory Compounds[J]. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1971, 10(8): 643–647.
- [31] 王双雄. 镁合金 ZK60 表面 Ta-O/Mg 复合涂层的制备与性能研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.  
WANG Shuangxiong. Preparation and Properties of Ta-O/Mg Composite Coating on Magnesium Alloy ZK60 Surface[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019.
- [32] JIANG S Q, XU H G. Numerical Study on Strengthening Effect of Laser Shot Peening for Wrought Magnesium Alloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217/218/219: 2234–2237.
- [33] 董健, 窦炳胜, 贺飞羽, 等. 不锈钢表面渗铝层/ZrO<sub>2</sub> 复合涂层残余应力模拟 [J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 221–228.  
DONG Jian, DOU Bingsheng, HE Feiyu, et al. Residual Stress Simulation of Aluminized Layer/ZrO<sub>2</sub> Composite Coating on Stainless Steel[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 221–228.
- [34] 孙戩, 徐颖强, 李万钟, 等. 热生长下热障涂层残余应力及失效分析 [J]. *中国表面工程*, 2016, 29(1): 25–31.  
SUN Jian, XU Yingqiang, LI Wanzhong, et al. Residual Stress and Failure Analysis of Thermal Barrier Coatings with Thermal Growth[J]. *China Surface Engineering*, 2016, 29(1): 25–31.
- [35] 袁乾鸿, 丁子戩, 王皓, 等. AZ31 和 Ti6Al4V 表面 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 涂层的微观结构与性能研究 [J]. *包装学报*, 2022, 14(4): 20–27.  
YUAN Qianhong, DING Ziyu, WANG Hao, et al. Microstructure and Performance of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Coatings on AZ31 and Ti6Al4V[J]. *Packaging Journal*, 2022, 14(4): 20–27.
- [36] GHAVIDEL N, ALLAHKARAM S R, NADERI R, et al. Corrosion and Wear Behavior of an Electroless Ni-P/Nano-SiC Coating on AZ31 Mg Alloy Obtained Through Environmentally-Friendly Conversion Coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 382: 125156.
- [37] SRINIVASAN A, SHIN K S, RAJENDRAN N. Influence of Bicarbonate Concentration on the Conversion Layer Formation onto AZ31 Magnesium Alloy and Its Electrochemical Corrosion Behaviour in Simulated Body Fluid[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(55): 49910–49922.
- [38] DING Z Y, TANG Y H, LIU L, et al. Improving the Adhesive, Mechanical, Tribological Properties and Corrosion Resistance of Reactive Sputtered Tantalum Oxide Coating on Ti6Al4V Alloy via Introducing Multiple Interlayers[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 5983–5994.

(责任编辑: 邓光辉)

## Microstructure and Properties of Sputtering Deposited M-TaC Multilayer Coatings Deposited on Magnesium Alloys

HU Xujun<sup>1</sup>, ZHANG Haibo<sup>2</sup>, LI Haiyang<sup>1</sup>, LI Wenyuan<sup>1</sup>, DING Zeliang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Yubang Power Intelligent Equipment (Jiaxing) Co., Ltd., Jiaxing Zhejiang 314300, China)

**Abstract:** M-TaC multilayer coatings were prepared on the surface of ZK60 magnesium alloy with magnetron sputtering technology. The layer's microstructure, adhesion performance, and corrosion resistance were investigated with TaC single-layer coating as the control. The results indicated the coatings exhibiting a porous columnar structure and hydrophilicity, which could significantly improve the corrosion resistance of ZK60 magnesium alloy. Compared to TaC single-layer coatings, M-TaC multilayer coatings showed increased surface roughness, decreased hydrophilicity, improved adhesion (about 60%), and enhanced corrosion resistance (with a corrosion current density of 2.944  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  lower).

**Keywords:** magnesium alloy; magnetron sputtering; TaC; multilayer coating; adhesion performance; corrosion resistance