

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.12.005

## 反应气体流量对机械传动轴表面涂层与性能的影响

杨 林<sup>1\*</sup>, 李文兵<sup>1</sup>, 赵雪飞<sup>2</sup>

(1. 四川航天职业技术学院, 四川 成都 610100;

2. 成都理工大学 材料与化学化工学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 为了提升机械传动轴的表面耐磨性和耐蚀性, 采用双辉等离子表面冶金技术在基体表面制备了SiC/Ta复合涂层, 研究了反应气体(氢气H<sub>2</sub>/四甲基硅烷TMS)流量对复合涂层显微形貌、截面形貌、物相组成、耐磨和耐蚀性能的影响。结果表明: 随着反应气体中TMS流量的增加, 表面复合涂层逐渐从致密花纹状演变为颗粒+凹坑+显微孔洞形态, 反应气体流量为10/1.0时, SiC涂层和Ta过渡层都较为致密, 且界面处未见孔洞或者裂纹等缺陷; 不同反应气体流量下制备的复合涂层都有助于减小摩擦系数, 在反应气体流量为10/1.0时, 涂层摩擦系数最小且较为稳定。不同反应气体流量的表面涂层的磨损都小于4Cr13基体, 且随着反应气体中TMS流量增加, 涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损体积和比磨损率先减小后增大, 当反应气体流量为10/1.0时, 取得最小值; 不同反应气体流量的传动轴表面涂层的腐蚀电位都相对基体发生正向移动、腐蚀电流密度减小, 在反应气体流量为10/1.0时, 取得腐蚀电位最正、腐蚀电流密度最小值, 此时复合涂层具有最佳的耐磨性能和耐蚀性能。

**关键词:** 机械传动轴; 复合涂层; 表面改性; 耐磨性能; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A

## Effect of Reaction Gas Flow on Surface Coating and Properties of Mechanical Transmission Shaft

YANG Lin<sup>1\*</sup>, LI Wenbing<sup>1</sup>, ZHAO Xuefei<sup>2</sup>

(1. Sichuan Aerospace Vocational College, Chengdu 610100, China; 2. College of Materials, and Chemistry &amp; Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In order to improve the surface wear resistance and corrosion resistance of mechanical transmission shaft, SiC/Ta composite coating was prepared on the substrate surface by double glow plasma surface metallurgy technology. The effects of reaction gas flow on the microstructure, section morphology, phase composition, wear resistance and corrosion resistance of the composite coating were studied. The results show that with the increase of tetramethylsilane (TMS) flow rate in the reaction gas, the surface composite coating gradually evolves from dense pattern to particle, pit and micro hole. When the reaction gas flow rate is 10 / 1.0, the SiC coating and Ta transition layer are relatively dense, and there are no defects such as holes or cracks at the interface; The composite coatings prepared under different reaction gas flow rates help to reduce the friction coefficient, and when the reaction gas flow rate is 10 / 1.0, the friction coefficient of the coating is the smallest and more stable. The wear degree of surface coatings with different reaction gas flow rates are less than 4Cr13 matrix. With the increase of TMS flow rate in reaction gas, the wear scar width, wear scar depth, wear volume and specific wear of coat-

收稿日期: 2022-05-21

修回日期: 2022-07-02

作者简介: 杨林(1979—), 男, 硕士, 副教授, email: 13880716834@139.com

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0077); 青年科学基金项目(51605178)

ings first decrease and then increase, and when the reaction gas flow rate is 10 / 1.0, the minimum value is obtained. The corrosion potential of the coating with different reaction gas flow moves forward relative to the substrate, and the corrosion current density decreases; When the reaction gas flow rate is 10 / 1.0, the most positive corrosion potential and the minimum corrosion current density are obtained. At this time, the composite coating has the best wear resistance and corrosion resistance.

**Keywords:** mechanical transmission shaft; composite coating; surface modification; wear resistance; corrosion resistance

机械传动轴在各类机械或传动系统中被广泛用来承受交变载荷或者冲击等作用<sup>[1]</sup>,因此,机械传动轴需要具有足够的强韧性及刚度等,而在具有复杂与其它物体相互接触或腐蚀性介质侵蚀工况条件下,机械传动轴还需要具有良好的耐磨性能和耐腐蚀性能,以抵御外界环境或应力等对传动轴的破坏<sup>[2]</sup>,保障机械或者传动系统的使用寿命。4Cr13 马氏体不锈钢由于具有良好的机械加工性能、较高的强度和韧塑性等,常用来加工成机械传动轴使用,但是在摩擦、腐蚀性介质存在条件下,4Cr13 不锈钢的局部区域会发生磨损或者腐蚀,影响整体结构的服役性能和使用寿命,需要对其进行表面改性处理<sup>[3]</sup>,以在不降低 4Cr13 不锈钢基体材料力学性能的前提下增强耐磨和耐腐蚀性能,从而更好的复杂工况的使用需求。虽然采用电镀、热喷涂等工艺制备的表面涂层能够在一定程度上改善不锈钢基体的表面性能<sup>[4-5]</sup>,但是这些涂层存在单一涂层耐磨性和耐腐蚀性不能满足使用要求,以及复合涂层与不锈钢基体的结合力较差等问题<sup>[6-7]</sup>。本文拟创新性地采用双辉等离子表面冶金技术在机械传动轴表面制备表面 SiC 涂层(高硬度高耐磨)+Ta 过渡层(良好强韧性)的复合涂层,研究复合涂层制备过程中反应气体(氢气+四甲基硅烷)流量对复合涂层显微形貌、耐磨和耐腐蚀性能的影响,以期通过反应气体流量控制和复合涂层制备提升机械传动轴的使用性能,为工业化生产提供必要参考。

## 1 材料与方法

采用双辉等离子表面冶金技术在机械传动轴表面制备表面 SiC 涂层+Ta 过渡层的复合涂层,基体材质为 4Cr13 不锈钢,主要元素质量分数为:0.41%C、0.60%Si、0.77%Mn、0.010%P、0.005%S、13.11%Cr,余量为 Fe。将 4Cr13 不锈钢加工成  $\phi 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$

圆片状,端面打磨、抛光并依次用清水冲洗和酒精超声清洗,吹干后备用。

试验设备为自制双辉等离子表面冶金设备,以 Ta 靶材为源极,反应气体为氢气(99.99%)+四甲基硅烷(99.99%)混合气体,激发气体和保护气体为高纯氩气(99.99%)。复合涂层的制备包括先在基体上制备 Ta 过渡层以及在 Ta 层上制备 SiC 涂层。(1) Ta 过渡层制备:Ta 靶为源极并保持 Ta 靶与基体距离为 20 mm,辉光放电至基体温度升高为 800 °C 进行预溅射,6 min 后调节源极电压至 -700 V、基体电极电压为 -450 V,保温 45 min,保护气氩气流量为 55 mL/min (sccm);(2) SiC 涂层制备:通入 H<sub>2</sub>+TMS 混合气体作为反应气体,其中, H<sub>2</sub> 流量为 10 mL/min 不变,调节 TMS 流量分别为 0.5 mL/min、1.0 mL/min、1.5 mL/min 和 2.0 mL/min,辉光放电至基体温度为 800 °C、保温 20 min, Ta 靶和基体电压分别为 -700 V 和 -450 V。

复合涂层的显微形貌采用 TESCAN VEGA3 钨灯丝扫描电子显微镜进行观察,附带能谱仪对涂层和基体局部区域进行能谱分析;物相分析采用德国 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射分析仪进行,扫描角度为 30~90°;摩擦磨损试验采用 HSR-2M 型往复摩擦磨损试验机进行,方式选用球-盘式干滑动摩擦,摩擦副为  $\phi 5 \text{ mm}$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 球,试验温度为室温、湿度 RH65%,施加载荷 2 N、滑动频率 5 Hz、滑动距离 5 mm、时间设定为 15 min;摩擦磨损试验后的磨痕尺寸使用 SmartWLI 扩展型白光干涉三维轮廓仪测量,并计算磨损体积(mm<sup>3</sup>)和比磨损率 K<sup>[8]</sup>:

$$V = lh(3h^2 + 4w^2)/6w \quad (1)$$

$$K = V/(F \cdot S) \quad (2)$$

其中: $l$ 为磨痕长度(mm)、 $h$ 为磨痕深度(mm)、 $w$ 为磨痕宽度(mm)、 $F$ 为载荷(N)、 $S$ 为滑动距离(m)。采用 Gamry-Reference 600 型号电化学工作站进行

阳极极化曲线测试<sup>[9]</sup>,基体和复合涂层试样为工作电极(被测试样面积为 $10\text{ mm}^2$ )、饱和甘汞为参比电极、铂片为辅助电极,实验温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,电解液为 $3.5\text{ wt.}\%$  NaCl溶液,扫描速度为 $0.5\text{ mV/s}$ 。

## 2 结果与分析

图1为不同反应气体流量的传动轴表面涂层的显微形貌。当反应气体流量为 $10/0.5$ 时,基体表面复合涂层呈环形花纹状,涂层整体较为平整;当反应气体流量为 $10/1.0$ 时,基体表面复合涂层的环状花纹逐渐模糊并变得杂乱,同时可见细小白色颗粒均匀分散在复合涂层中;当反应气体流量为 $10/1.5$ 时,

基体表面复合涂层为层状花纹状,平整度相对反应气体流量为 $10/0.5$ 时较差;当反应气体流量为 $10/2.0$ 时,基体表面复合涂层中可见尺寸不等的颗粒和显微凹坑,局部还可见显微孔洞。整体而言,当反应气体中 $\text{H}_2$ 流量不变,随着反应气体中TMS浓度的增加,基体表面复合涂层逐渐从致密花纹状演变为颗粒+凹坑+显微孔洞形态,表面缺陷呈现逐渐增多的趋势。这主要是因为,在 $\text{H}_2$ 流量不变条件下,增加TMS浓度会影响复合涂层中SiC的形成,而溅射在基体表面的Ta原子并不会受到显著影响<sup>[10-11]</sup>,二者共同作用下会造成基体表面SiC/Ta复合涂层形态发生变化。

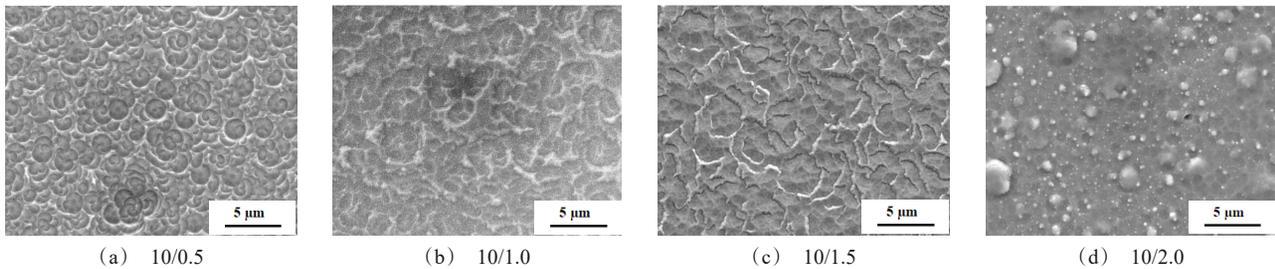


图1 不同反应气体流量的传动轴表面涂层的显微形貌

Fig. 1 Microstructure of surface coating of transmission shaft with different reaction gas flow

图2为不同反应气体流量的传动轴表面涂层的截面形貌。当反应气体流量为 $10/0.5$ 时,基体表面可见次表层Ta过渡层和表层SiC涂层,厚度分别约为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ,SiC/Ta复合涂层厚度相对较小,这主要是因为此时TMS流量较小,SiC涂层合成速率和厚度较小,但是涂层间未见明显孔洞或者裂纹等缺陷;当反应气体流量为 $10/1.0$ 时,SiC涂层和Ta过渡层都较为致密,且界面处未见孔洞或者裂纹等缺陷;当反应气体流量为 $10/1.5$ 时,基体表面也可见SiC/Ta复合涂层的双层结构,SiC涂层厚度相对有所增加,但靠近次表层区域有显微孔洞存在;在反应气体流量为 $10/2.0$ 时,SiC涂层和Ta过渡层厚度与反应气体流量为 $10/1.5$ 时相当,但界面处存在明显孔洞或者缝隙等缺陷。

图3为不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的能谱分析,复合涂层位置1~位置6在图2(a)中标注出,位置1和位置2分别在SiC涂层表层和内层,位置3和位置4分别在Ta层的近表层和近基体区域,位置5和位置6分别在基体近Ta层和基体远

离界面处,其他涂层所在位置标记相同。对比分析可知,不同反应气体流量时涂层和基体的能谱分析结果都呈梯度分布特征,其中,随着距表面涂层距离的增加,Si元素原子百分数逐渐减小,Ta元素原子百分数先增加后减小,而Fe和Cr元素原子百分数逐渐增加,尤其是在靠近传动轴基体区域时,Fe和Cr元素原子百分数增幅较大。此外,从外表面SiC涂层的能谱分析结果可见,靠近Ta层的位置2处的Si含量相较于位置1处较低,且该位置处还含有一定含量的Fe和Cr,表明在涂层制备过程中发生了从基体到SiC层的Fe和Cr元素扩散;Ta过渡层的位置3和位置4处各元素含量差异较小,只是从表至里Si元素原子百分数略有减小,而Ta、Fe和Cr元素原子百分数有所增加;基体中的位置5和位置6处主要含有Cr、Fe和C元素,并含有少量Ta,且位置5处Cr和Fe元素含量低于位置6处,而Ta元素含量高于位置6处,这主要是因为涂层制备过程中这三种元素发生了扩散所致<sup>[12]</sup>,Ta过渡层已与基体实现了紧密结合。

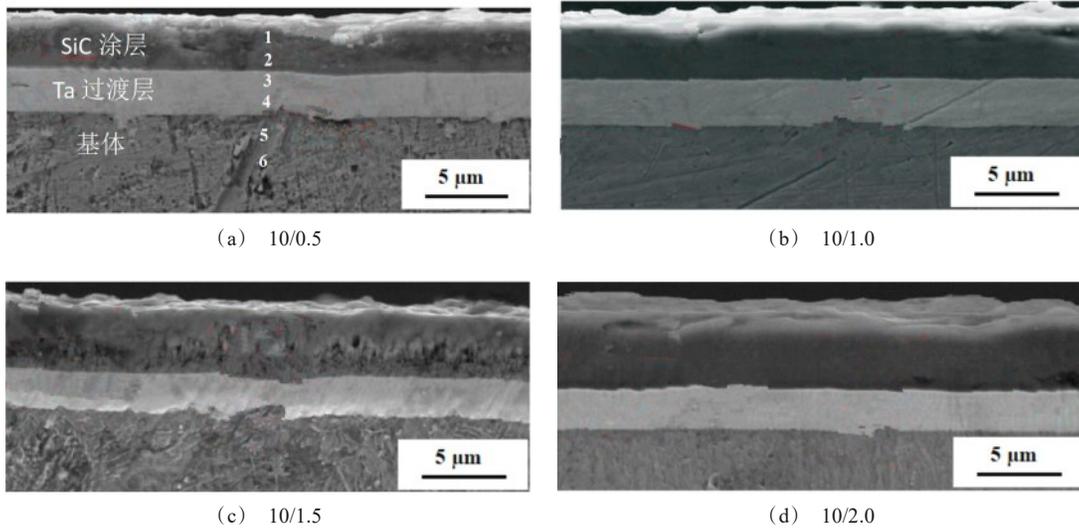


图 2 不同反应气体流量的传动轴表面涂层的截面形貌

Fig. 2 Cross sectional morphology of transmission shaft surface coating with different reaction gas flow

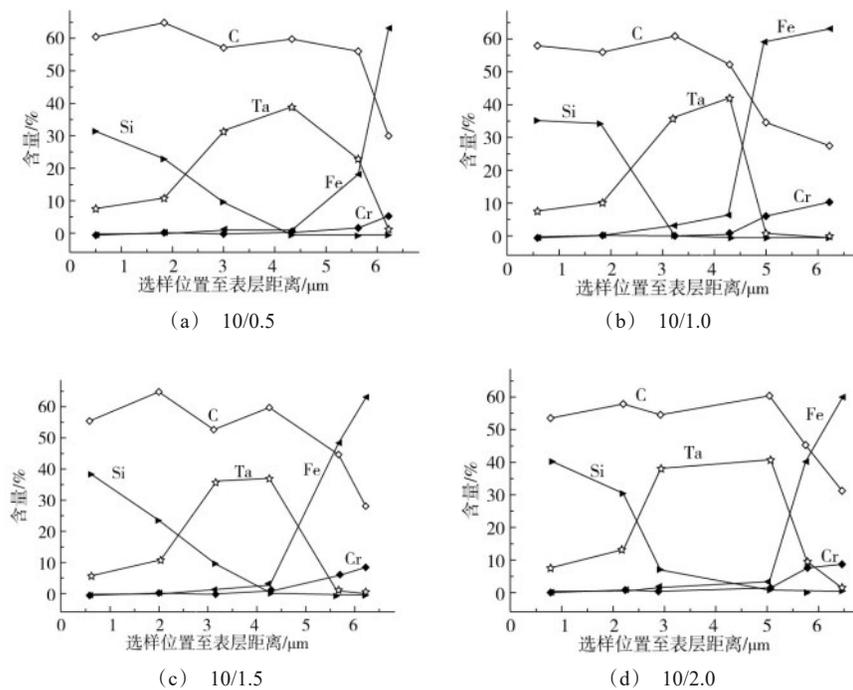


图 3 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的能谱分析

Fig. 3 Energy spectrum analysis of transmission shaft surface coating and substrate with different reaction gas flow

图 4 为不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的 X 射线衍射分析结果。相较于未制备涂层的 4Cr13 基体而言,不同反应气体流量的传动轴表面涂层还出现了 TaC、Ta<sub>2</sub>C、Ta 和 SiC 衍射峰,这主要

是因为磁溅射 Ta 过程中 Ta 会与 4Cr13 基体中的 C 元素发生反应而形成 TaC、Ta<sub>2</sub>C<sup>[13]</sup>。随着反应气体流量增加, TaC/SiC、Ta<sub>2</sub>C、Ta/SiC 和 71.8° 对应的 Ta<sub>2</sub>C/SiC 衍射峰强度逐渐减弱,反映在相含量上则

表现为表层中 TaC+Ta<sub>2</sub>C 总含量减小、SiC 含量增加。

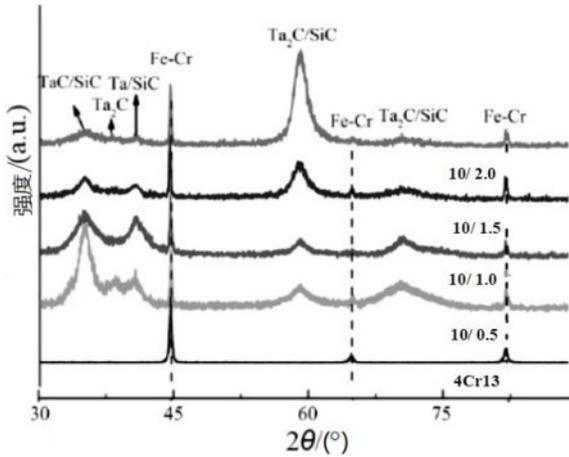


图4 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的XRD谱图

Fig.4 XRD spectra of surface coating and substrate of transmission shaft with different reaction gas flow

图5为不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的摩擦系数曲线。对比分析可知,不同反应气体流量的传动轴表面涂层的摩擦系数都小于4Cr13基体,且当反应气体流量为10/0.5时,涂层的摩擦系数较大,而反应气体流量为10/1.5时涂层的摩擦系数最小。

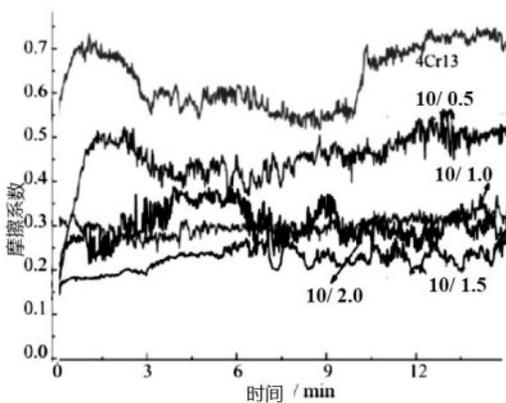


图5 不同反应气体流量下传动轴表面涂层和基体的摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of surface coating and substrate of transmission shaft with different reaction gas flow

对于4Cr13基体,摩擦开始阶段摩擦系数波动较大,这主要与基体表面氧化膜被磨穿有关,而随后摩擦副直接与4Cr13基体摩擦而使摩擦系数稳定在0.55附近,继续延长摩擦磨损时间,磨损造成的黏附作用增强会使得摩擦阻力增大、摩擦系数升高<sup>[14]</sup>;不同反应气体流量的传动轴表面涂层的摩擦系数波动幅度相对基体明显较小,且反应气体流量为10/1.0和10/1.5时涂层的摩擦系数随摩擦时间延长较为稳定,而反应气体流量为10/2.0时涂层的摩擦系数波动较大则主要与涂层表面的颗粒+凹坑+显微孔洞形态有关。整体而言,在传动轴基体表面制备不同反应气体流量的复合涂层都有助于减小摩擦系数,起到减摩作用<sup>[15]</sup>,在反应气体流量为10/1.0时涂层摩擦系数最小且较为稳定,这主要与此时涂层较为平整、致密有关<sup>[16]</sup>。

图6为不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的磨损形貌,表1列出了相应的摩擦磨损实验结果。4Cr13基体表面可见较深的犁沟和沟内颗粒物,磨痕宽度和深度分别为848 μm和15.79 μm,磨损机制为磨粒磨损+黏着磨损;当反应气体流量为10/0.5时,涂层表面可见较浅的磨痕和边缘处磨屑,磨痕宽度和深度分别为363 μm和8.68 μm,磨损机制为轻微磨粒磨损+黏着磨损;当反应气体流量为10/1.0时,涂层表面未见犁沟、磨屑等存在,磨痕宽度和深度分别为265 μm和1.89 μm,磨损机制为轻微磨粒磨损;反应气体流量为10/1.5时涂层表面磨损形貌与反应气体流量为10/1.0时相似,只是磨痕相对较深、较宽,磨损机制为轻微磨粒磨损;当反应气体流量为10/2.0时,涂层表面可见较深的犁沟、磨痕宽度较小(327 μm),磨损机制为黏着磨损+轻微磨粒磨损。此外,不同反应气体流量的传动轴表面涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损体积和比磨损率都小于4Cr13基体表面,且随着反应气体中TMS流量增加,涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损体积和比磨损率先减小后增大,当反应气体流量为10/1.0时取得最小值,这主要与此时涂层SiC含量较高,且涂层平整、致密与基体结合良好等有关<sup>[17-18]</sup>,抵抗摩擦磨损的能力增强。

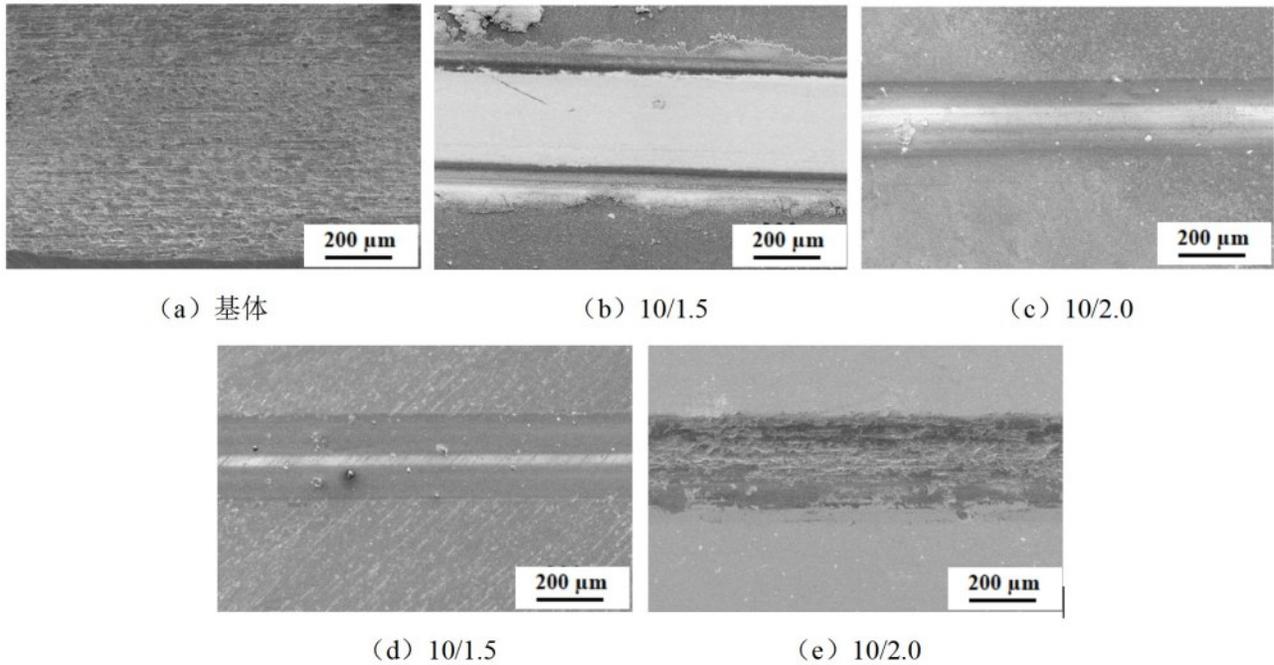


图6 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的磨损形貌

Fig. 6 Wear morphology of surface coating and substrate of transmission shaft with different reaction gas flow

表1 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的摩擦磨损实验结果

Tab.1 Friction and wear test results of surface coating and substrate of transmission shaft with different reaction gas flow

| 反应气体流量/ [(mL·min <sup>-1</sup> )/(mL·min <sup>-1</sup> )]  | 基体                    | 10/0.5                | 10/1.0                | 10/1.5                | 10/2.0                |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 磨痕宽度/ μm   | 848                   | 363                   | 265                   | 283                   | 327                   |
| 磨痕深度/ μm   | 15.79                 | 8.68                  | 1.89                  | 3.36                  | 3.40                  |
| 磨损体积/ mm <sup>3</sup>                                      | 4.44×10 <sup>-2</sup> | 0.98×10 <sup>-2</sup> | 1.73×10 <sup>-3</sup> | 3.29×10 <sup>-3</sup> | 3.84×10 <sup>-3</sup> |
| 比磨损率/ (mm <sup>3</sup> ·N <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ) | 9.01×10 <sup>-4</sup> | 2.33×10 <sup>-4</sup> | 0.41×10 <sup>-4</sup> | 0.74×10 <sup>-4</sup> | 0.86×10 <sup>-4</sup> |

图7为不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的极化曲线,对应的腐蚀电位和腐蚀电流密度拟合结果如表2。4Cr13基体的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为-0.482 V和 $4.40 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ,不同反应气体流量的传动轴表面涂层的腐蚀电位都相对基体发生正向移动,且腐蚀电流密度减小,在反应气体流量为10/1.0时取得腐蚀电位最正、腐蚀电流密度最小值。

热力学参数-腐蚀电位越正,表示材料的腐蚀倾向越小,而动力学参数-腐蚀电流密度越小则材料的腐蚀速率越低<sup>[19]</sup>,由此可见,不同反应气体流量的传动轴表面涂层的耐腐蚀性能都优于4Cr13基体,且反应气体流量为10/1.0时涂层具有最佳耐腐蚀性能。

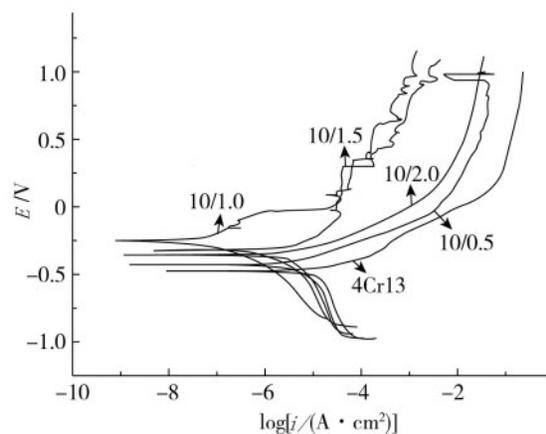


图7 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of transmission shaft surface coating and substrate with different reaction gas flow

这主要是因为涂层中无论是表面 SiC 涂层还是次表层 Ta 过渡层都具有良好的耐腐蚀性能<sup>[20]</sup>,且反应气体流量为 10/1.0 时涂层最为平整、致密,与基体

结合良好,耐腐蚀性能较好,而反应气体中 TMS 流量过小或者过大时涂层中都存在孔洞等缺陷,腐蚀介质更容易进入涂层而降低耐蚀性<sup>[21]</sup>。

表 2 不同反应气体流量的传动轴表面涂层和基体的极化曲线拟合结果

Tab.2 Polarization curve fitting results of transmission shaft surface coating with different reaction gas flow and substrate

| 反应气体流量/[(m·min <sup>-1</sup> )/(m·min <sup>-1</sup> )] | 基体     | 10/0.5 | 10/1.0 | 10/1.5 | 10/2.0 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 腐蚀电位 $E/V$   | -0.482 | -0.450 | -0.253 | -0.332 | -0.353 |
| 腐蚀电流密度 $i/[(10^{-6}A \cdot cm^{-2})]$                  | 4.40   | 4.25   | 0.06   | 0.52   | 1.59   |

### 3 结论

(1)当反应气体中 H<sub>2</sub> 流量不变,随着反应气体中 TMS 浓度的增加,基体表面复合涂层逐渐从致密花纹状演变为颗粒+凹坑+显微孔洞形态,表面缺陷呈现逐渐增多的趋势。相较于未制备涂层的 4Cr13 基体而言,不同反应气体流量的传动轴表面涂层还出现了 TaC、Ta<sub>2</sub>C、Ta 和 SiC 衍射峰。

(2)在传动轴基体表面制备不同反应气体流量的复合涂层都有助于减小摩擦系数,起到减摩作用,在反应气体流量为 10/1.0 时,涂层摩擦系数最小且较为稳定。不同反应气体流量的传动轴表面涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损体积和比磨损率都小于 4Cr13 基体表面,且随着反应气体中 TMS 流量增加,涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损体积和比磨损率先减小后增大,当反应气体流量为 10/1.0 时,取得最小值。

(3)传动轴 4Cr13 基体的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 -0.482 V 和  $4.40 \times 10^{-6} A/cm^2$ ,不同反应气体流量的传动轴表面涂层的腐蚀电位都相对基体发生正向移动,且腐蚀电流密度减小,在反应气体流量为 10/1.0 时,取得腐蚀电位最正、腐蚀电流密度最小值。

### 参考文献

[1] 崔以刚. 机械传动轴基体化学镀 Ni-P 合金镀层[J]. 电镀与环保, 2020, 40(1): 31-33.  
 [2] Kong Y, Kwon T, Lee T, et al. Development and performance verification of Korean mechanical power transmission shaft and multi-stage mechanical fuse device[J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2018, 21(8): 755-766.

[3] 王吉强, 崔新宇, 熊天英. 冷喷涂金属基复合涂层及材料研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(4): 51-67.  
 [4] 王晓强, 刘佳, 卜敏, 等. 滚动轴承表面强化技术发展趋势[J]. 轴承, 2017, 5: 49-53.  
 [5] 张秀丽, 尹忠慰, 郭前建. 轴表面 DLC 涂层对滑动轴承润滑承载性能的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(8): 26-31.  
 [6] Prasad B K. Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters[J]. Tribology International, 2011, 44(5): 660-667.  
 [7] Zou K, Zou J P, Deng C M, et al. Preparation and properties of supersonic atmospheric plasma sprayed TiB<sub>2</sub>-SiC coating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 243-254.  
 [8] 郭宝会, 李海龙. 纳米 Ni-SiC 复合涂层对 TA15 合金磨擦磨损性能的影响[J]. 有色金属工程, 2016, 6(6): 29-34.  
 [9] 谢艳艳, 王荣, 胡艳华. SiC 复合涂层的制备及对机电传动轴耐磨性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2019, 55(7): 9-15.  
 [10] 李参, 张仲欣. 转动轴等离子喷涂 MoS<sub>2</sub>/Ag 润滑涂层的摩擦性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(4): 72-76.  
 [11] 周丽娜, 杨晓峰, 刘明, 等. 8Cr4Mo4V 高温轴承钢热处理及表面改性技术的研究进展[J]. 轴承, 2021, 8: 1-10.  
 [12] Cao G, Zhang X, Tang G, et al. Microstructure and corrosion behavior of Cr coating on M50 steel fabricated by electrospark deposition[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(7): 4086-6094.  
 [13] 刘琪, 桑可正, 曾德军. 多孔 SiC 表面 WC+W<sub>2</sub>C 涂层的制备及其结构研究[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 226-233.  
 [14] Idamayanti D, Nurhakim I L, Bandanadjaja B, et al. Improvement of erosion resistance of alumina-phosphate ceramic coating on mild steel by SiC addition[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 541: 12027-12033.  
 [15] 张诗怡, 刘秀波, 刘一帆, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆 Co-Cu/Ti3SiC<sub>2</sub> 复合涂层组织与摩擦学性能[J]. 中国表

- 面工程, 2021, 34(6): 124-133.
- [16] Long X, Zhang F, Yang Z, et al. Study on microstructures and properties of carbide-free and carbide-bearing bainitic steels[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 715(7): 10-16.
- [17] 王荣, 刘小萍, 郑可, 等. 4Cr13钢基表面SiC/Ta复合涂层的制备及摩擦磨损性能[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(2): 128-133.
- [18] 吴林. 汽车半轴40Cr钢表面溅射W-Si-N涂层的力学性能和室温摩擦磨损性能[J]. *材料保护*, 2016, 49(11): 9-12.
- [19] Lin S P, Nie Z R, Hui H, et al. Annealing behavior of a modified 5083 aluminum alloy[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(3): 1607-1612.
- [20] 王波, 徐颖梅, 赵东宏, 等. 双辉等离子涂层对机械曲轴耐磨耐腐蚀性能的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(3): 241-247.
- [21] Xu L, Du HL, Liu J, et al. Microstructure, mechanical, and electrochemical properties of SiC particle reinforced CoCrFeNiCu high-entropy alloy coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(4): 519-519.