

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.08.007

## WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>增强钴基复合镀层的摩擦行为研究

吴先红, 刘灿森\*, 李锦燕, 谢慧思, 揭晓华

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 采用电沉积法制备钴-二硫化钨/二氧化钛(Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>)复合镀层。通过扫描电镜、激光共聚焦显微镜、X射线衍射仪、拉曼光谱和摩擦试验机 etc 系统研究了 WS<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub> 单独和复合添加对镀层微观形貌、相结构、硬度和摩擦行为的影响及其机理。结果表明, WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 的协同作用赋予 Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 复合镀层最高的硬度(约为 538 HV)及最好的减摩、耐磨性能, 平均摩擦系数约为 0.16, 磨损率约为  $1.01 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

**关键词:** 电沉积; Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 复合镀层; 摩擦学

中图分类号: TG178

文献标识码: A

## Study on friction behavior of WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> enhanced cobalt-based composite coatings

Wu Xianhong, Liu Cansen\*, Li Jinyan, Xie Huisi, Jie Xiaohua

(Faculty of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Cobalt-tungsten disulfide/titanium dioxide (Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) composite coatings were prepared by electrodeposition. The effects and mechanisms of individual and combined addition of WS<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> on the microstructure, phase structure, hardness and tribological behavior of resultant coatings were systematically studied by scanning electron microscope, laser confocal microscope, X-ray diffractometer, Raman spectroscopy and friction testing machine. The results show that synergistic effect of WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> endows Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> composite coating with the highest hardness of about 538 HV and the best anti-friction and anti-wear properties with an average friction coefficient of about 0.16 and wear rate of about  $1.01 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , respectively.

**Keywords:** electrodeposition; Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> composite coating; tribology

金属材料广泛应用于国民经济各领域,而金属零部件在服役过程中容易发生磨损失效。据统计,磨损造成全球约 1/3 能源损耗,经济损失超国民经济 2%<sup>[1]</sup>。磨损失效始于表面,采用表面技术对材料表面其进行防护处理,能有效解决磨损问题。在众多表面防护技术中,电沉积技术因操作简易、工艺可控和经济高效而广泛应用于金属表面制备高性能镀

层。过去,硬铬镀层因硬度高、耐磨和防腐性好而广泛用作金属防护层<sup>[2]</sup>。然而六价铬离子毒性强,不但污染环境,而且危害健康<sup>[3-4]</sup>。随着人们对环境保护和健康意识提高,具有替代硬铬镀层潜力的无毒环保镍(Ni)基镀层受到广泛关注。但 Ni 基镀层摩擦系数较高,仍未满足替代要求,而添加自润滑二维材料制备 Ni 基复合镀层是一种有效实现减摩的

收稿日期: 2023-01-10

修回日期: 2023-02-09

作者简介: 吴先红(1988—),女,硕士研究生, email: 2544412964@qq.com

\*通信作者: 刘灿森, email: liucs@gdut.edu.cn

基金项目: 广州市科技计划(202201010495);大学生创新创业训练项目(xj2022118450648)

策略<sup>[5-9]</sup>。

二硫化钨( $\text{WS}_2$ )是一种具有良好润滑性的新型固体润滑材料,应用于机械润滑设备领域并受到研究者广泛关注。He 等<sup>[10]</sup>添加  $\text{WS}_2$  进行共沉积制备具有良好减摩性能的 Ni-P- $\text{WS}_2$  镀层。Liu 等<sup>[11]</sup>发现 Ni-W/ $\text{WS}_2$  比 Ni-W 镀层具有更低的摩擦系数。Sivandipoor 等<sup>[12]</sup>在 Ni-P 涂层中加入  $\text{WS}_2$  固体润滑油颗粒提高涂层耐磨性。He 等<sup>[13]</sup>通过电沉积技术添加  $\text{WS}_2$  到 Ni-Co 基质中制备出的镀层比 Ni-Co 镀层摩擦系数低。因此,通过加入  $\text{WS}_2$  可有效提高镀层的减摩性。然而镀层在长期使用中仍会发生严重磨损,其耐磨性也需提升。

二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )是一种价廉、环保、硬度高且耐磨的硬质材料,近年来广泛用于提高镀层的硬度和耐磨性<sup>[14-16]</sup>。硬质颗粒的加入对金属基镀层起细晶强化和弥散强化作用,可提高复合镀层承载能力,从而提高复合镀层的摩擦学性能<sup>[17]</sup>。应丽霞等<sup>[18]</sup>指出, $\text{TiO}_2$  的加入有效提高了 Ni-PTFE- $\text{TiO}_2$  镀层的硬度和耐磨性。Yousefi 等<sup>[19]</sup>同样表明,Fe-Ni- $\text{TiO}_2$  比 Fe-Ni 镀层具有更低的磨损率。

上述研究表明,加入  $\text{WS}_2$  和  $\text{TiO}_2$  可提高 Ni 基复合镀层的减摩耐磨性。而  $\text{WS}_2$  和  $\text{TiO}_2$  的协同作用有望赋予复合镀层更优异的减摩耐磨性能。但有关  $\text{WS}_2$  和  $\text{TiO}_2$  协同作用增强镀层性能的研究鲜有报道。此外,Ni 为面心立方(fcc)结构,摩擦过程中易和对偶球发生粘着磨损,导致磨损率增加。钴(Co)为密排六方(hcp)结构,比 Ni 硬度高,可减少或避免粘着磨损发生<sup>[20]</sup>。因此,本文采用复合电沉积制备 Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$  镀层,评价和分析添加  $\text{WS}_2$  和  $\text{TiO}_2$  对镀层形貌、结构、硬度和摩擦行为的影响和机理。

## 1 实验材料和方法

二硫化钨( $\text{WS}_2$ )、钛酸四丁酯(TBT)、硼酸、硫酸钴、糖精、十六烷基三甲基溴化铵、无水乙醇、硫酸和氢氧化钠均为分析纯。 $\text{TiO}_2$  包覆  $\text{WS}_2$  复合粉末制备:将 5 g TBT 加入 50 mL 无水乙醇溶液中超声搅拌 1 h。接着加入 1 g  $\text{WS}_2$  继续搅拌 12 h,期间逐滴加入 10 mL 去离子水使 TBT 完全水解。将悬浊液抽滤出粉末并用无水乙醇清洗后,80 °C 真空干燥 12 h。最后将粉末在氩气中 500 °C 煅烧 2 h,获得  $\text{TiO}_2$  包覆  $\text{WS}_2$  粉末。用同样方法但不添加  $\text{WS}_2$ ,制备  $\text{TiO}_2$  粉末。

电沉积镀液组成见表 1。选取规格为 20 mm×40 mm×2 mm 的钴片和黄铜片分别为阳极和阴极。采用 800 目至 2000 目砂纸打磨黄铜片,用表面活性剂和无水乙醇超声去除油污,用 5 vol.%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液活化 30 s,用去离子水清洗并吹干。采用 SMD-30P 智能脉冲电镀电源,磁力搅拌,电沉积前将镀液超声搅拌 12 h。电沉积后用去离子水和无水乙醇清洗样品并真空干燥备用。其工艺条件为:镀液 pH 为 4,电流密度为 4 A/dm<sup>2</sup>,镀液温度为 35 °C,搅拌速度 200 r/min,电沉积时间 30 min,阴阳极间距 20 mm。

表 1 电沉积镀液组成

Tab.1 Composition of electrodeposition bath

名称	浓度/(g L <sup>-1</sup> )
硫酸钴	56
硼酸	40
糖精	1
十六烷基三甲基溴化铵	0.3
$\text{WS}_2/\text{TiO}_2$	1

采用 S-3400N 扫描电镜(SEM)观察粉末和镀层表面和截面形貌,利用 SEM 附带的能量色散 X 射线能谱仪(EDS)表征粉末和镀层中元素的组成及其分布。通过 D/MAX-Ultimal V 型 X 射线衍射仪(XRD)分析粉末和镀层物相。用 LabRAM HR 拉曼光谱检测镀层成分。采用 VH202-10-0292 型硬度计测量镀层硬度,载荷为 0.5 N,保压时间为 10 s,实验结果取 5 次测量平均值。采用 WTM-2E 球盘摩擦试验机评价镀层摩擦行为,测试条件:室温,相对湿度 50%, $\Phi$  6 mm 的 GCr15 钢球为对磨球,半径 3 mm、载荷 2 N、转速 200 r/min,测试时间 15 min。摩擦试验后,通过 SEM 和 EDS 分析镀层和对磨球磨损形貌,利用 OLS4100 激光共聚焦显微镜测量磨痕深度和宽度,通过公式  $K = V / (S \times F)$  计算磨损率,式中  $K$  为磨损率; $V$  为磨损体积,mm<sup>3</sup>;  $S$  为摩擦总行程,m;  $F$  为载荷,N。

## 2 结果和讨论

### 2.1 粉末表征

图 1 为不同粉末的 SEM、XRD 及 EDS 元素分布图。图 1(a)显示  $\text{TiO}_2$  颗粒发生团聚并聚结成块,其 XRD 谱图与锐钛矿  $\text{TiO}_2$  标准卡片(JCPDS 21-1272)衍射峰完全吻合(图 1(b))。图 1(c)的  $\text{WS}_2$  呈现典

型的不规则层状堆叠,其XRD衍射峰与 $\text{WS}_2$ 标准卡片(JCPDS 08-0237)相匹配(图1(d))。图1(e)的 $\text{TiO}_2$ 颗粒紧密包覆在层状 $\text{WS}_2$ 表面,XRD检测到 $\text{WS}_2$ 和 $\text{TiO}_2$ 衍射峰(图1(f)),结合图1(g)至图1(j)EDS图给出的S、W、Ti和O元素的分布,说明制备出 $\text{TiO}_2$ 包覆 $\text{WS}_2$ 结构的复合粉末。

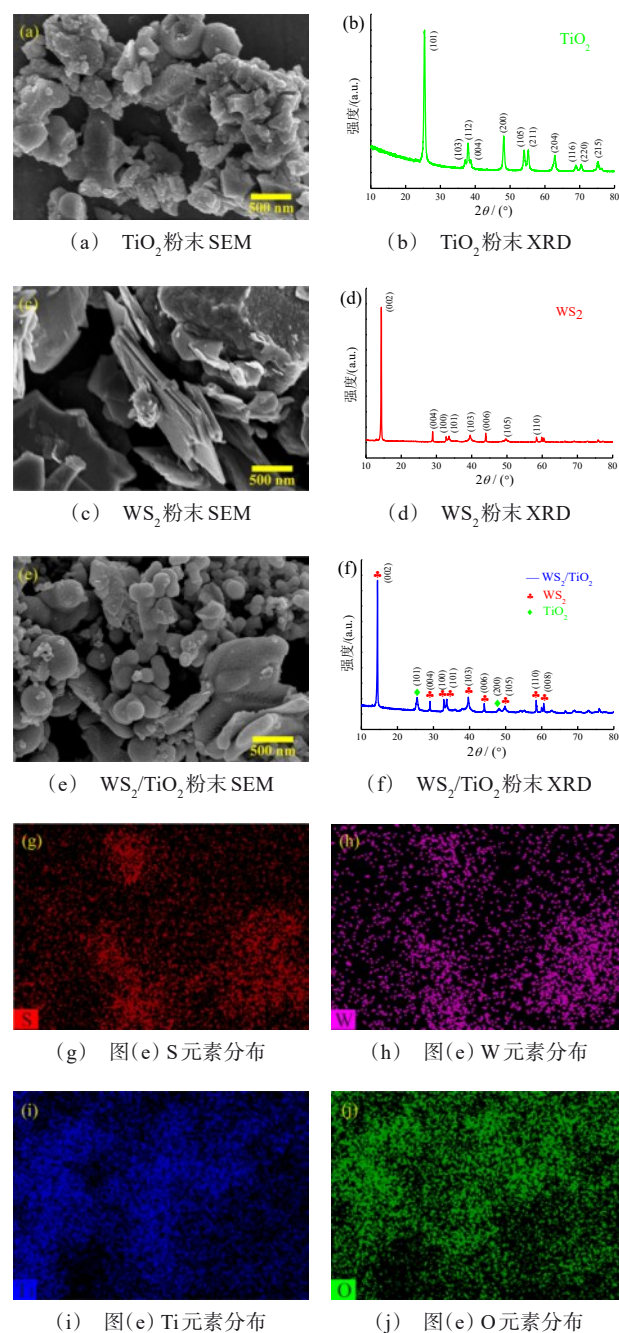


图1 不同粉末的SEM、XRD及元素分布图

Fig.1 SEM images, XRD patterns and element distribution of various powders

## 2.2 不同镀层形貌、相结构和硬度

图2是添加不同粉末制备的Co基复合镀层表面形貌SEM和拉曼光谱图。图2(a),图2(d)和图2(g)显示,各复合镀层表面均呈现结节状凸起。这是因为加入粉末会改变镀液中电流分布和增加形核点。在电流集中的粉末表面,离子优先形核并长大,并将粉末部分或全部包埋金属基质中。具体来讲,Co- $\text{TiO}_2$ 表面观察到类似 $\text{TiO}_2$ 颗粒(图2(b)),图2(c)拉曼光谱出现4个特征峰 $E_g$  ( $141.2\text{ cm}^{-1}$ )、 $B_{1g}$  ( $393.6\text{ cm}^{-1}$ )、 $A_{1g}$  ( $512.8\text{ cm}^{-1}$ )、 $B_g$  ( $634.3\text{ cm}^{-1}$ ),证实为锐钛矿 $\text{TiO}_2$ 。图2(f)出现的2个拉曼特征峰 $E_{2g}$  ( $350.1\text{ cm}^{-1}$ )、 $A_{1g}$  ( $413.8\text{ cm}^{-1}$ )也证实Co- $\text{WS}_2$ 镀层表面结节状凸起上(图2(e))观察到的层状材料为 $\text{WS}_2$ 。图2(i)拉曼光谱中检测到 $\text{TiO}_2$ 四个特征峰和 $\text{WS}_2$ 两个特征峰(图2(h)),说明 $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 复合粉末与Co发生共沉积形成Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 镀层。

图3是不同Co基复合镀层截面形貌SEM图及对应的EDS元素分布图。可见,Co基复合镀层厚度均为 $30\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ,呈现高低起伏。Co- $\text{TiO}_2$ 镀层较为平整,Co- $\text{WS}_2$ 和Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 较为粗糙。这是因为尺寸较细小的 $\text{TiO}_2$ 颗粒易嵌入金属基质中,不会引起较大凸起。 $\text{WS}_2$ 颗粒尺寸较大,一部分嵌入到基质中,金属离子优先在凸起部分形核长大<sup>[21]</sup>。从截面放大图(图3(b),图3(f)和图3(j))结合对应的Ti、O、S和W元素分布图(图3(c)至图3(d),图3(g)至图3(h),图3(k)至图3(l))可以观察到 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{WS}_2$ ,说明共沉积制备出Co- $\text{TiO}_2$ 、Co- $\text{WS}_2$ 和Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 复合镀层。

图4(a)是不同复合镀层XRD图。复合镀层均检测到Co的hcp(100)、(002)、(110)和(101)衍射峰,与标准卡片(JCPDS 05-0727)吻合。Co- $\text{TiO}_2$ 和Co- $\text{WS}_2$ 镀层还检测到锐钛矿 $\text{TiO}_2$ 的(101)和 $\text{WS}_2$ 的(002)特征峰,Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 镀层则同时出现 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{WS}_2$ 特征峰,这说明 $\text{WS}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 和两者的复合均与Co发生共沉积形成复合镀层。相对于Co- $\text{TiO}_2$ 和Co- $\text{WS}_2$ 镀层,Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 镀层衍射峰还观察到明显的宽化现象,说明晶粒尺寸有所减小。图4(b)为不同复合镀层的平均晶粒尺寸和硬度的对比。可以看出,Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 镀层Co晶粒的尺寸最小,约 $20\text{ nm}$ 。说明相比于 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{WS}_2$ 单独添加,两者复合添加可进一步细化晶粒。Co- $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 镀层还表现出最高的硬度,约 $538\text{ HV}$ ,这是因为 $\text{WS}_2/\text{TiO}_2$ 颗粒的加入



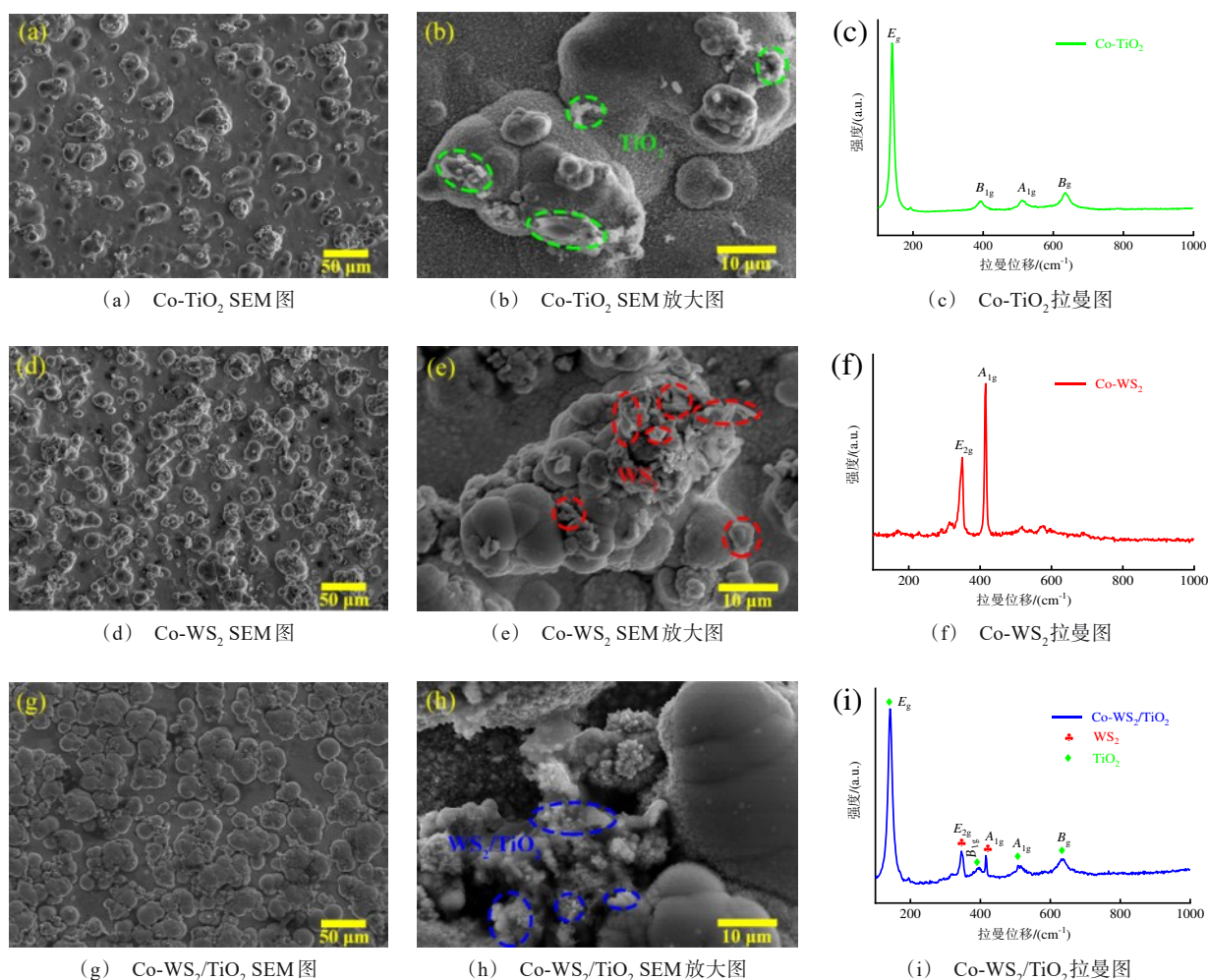


图 2 不同复合镀层表面形貌SEM和拉曼光谱图

Fig.2 SEM surface morphology and Raman patterns of various composite coatings

进一步提高形核率,晶粒的生长受到阻碍,从而细化晶粒。晶粒尺寸的减小意味着晶界的增多,从而有利于在晶界处形成位错堆积而阻挡位错运动,抵抗塑性变形的能力提升,Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>镀层硬度提高。根据Orowan方程<sup>[22]</sup>,TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>共沉积在复合镀层中也起分散强化的作用。

### 2.3 不同镀层的摩擦行为

图5(a)是不同复合镀层典型摩擦系数随时间变化曲线,图5(b)为镀层平均摩擦系数和磨损率对比。由图5(a)可见,Co-TiO<sub>2</sub>和Co-WS<sub>2</sub>镀层摩擦系数均快速升至约0.6,随后Co-TiO<sub>2</sub>摩擦系数逐渐上升而Co-WS<sub>2</sub>摩擦系数维持在0.6左右水平,大概11 min后再上升,摩擦系数维持稳定归因于低剪切强度WS<sub>2</sub>易在摩擦副间形成润滑转移膜,有效发挥其

润滑作用。随后系数上升与转移膜的失效有关。Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>摩擦系数最低,一直稳定在0.16左右,这是TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>两种颗粒结合在摩擦过程中可以起到类似微轴承作用,滑动摩擦转变为滚动摩擦,表现出优异的减摩性能<sup>[23]</sup>。由图5(b)可见,Co-WS<sub>2</sub>与Co-TiO<sub>2</sub>的硬度差不多(图4(b)),但Co-WS<sub>2</sub>表现出比Co-TiO<sub>2</sub>更低的磨损率,这是因为相比于TiO<sub>2</sub>,WS<sub>2</sub>是二维层状结构,具有自润滑性能,是良好的固体润滑材料。WS<sub>2</sub>的加入赋予Co-WS<sub>2</sub>复合镀层良好的润滑性能,更低的摩擦系数,起到减摩的作用,从而获得较Co-TiO<sub>2</sub>更低的磨损率。Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>表现出最小的磨损率,约 $1.01 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。这是因为WS<sub>2</sub>颗粒作为固体润滑材料降低摩擦系数,TiO<sub>2</sub>颗粒作为硬质颗粒承担载荷,TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>的协

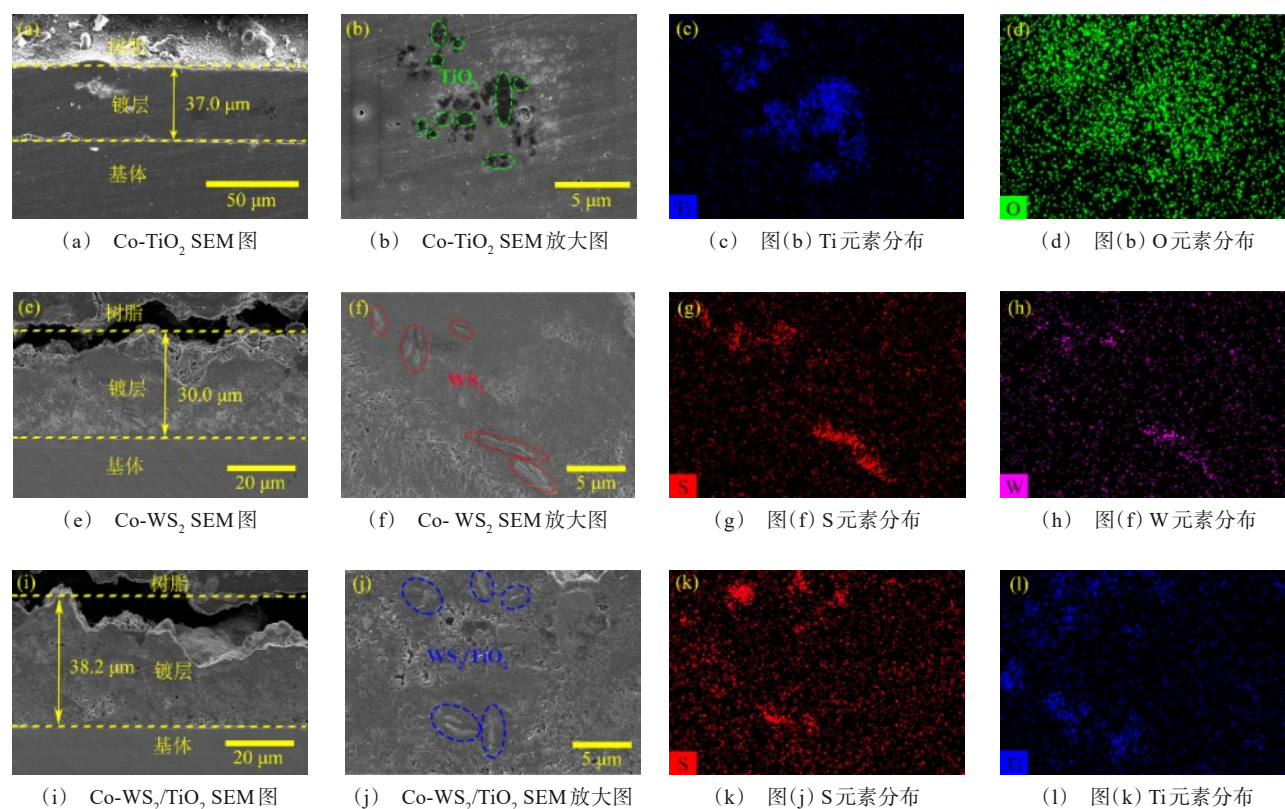


图3 不同复合镀层截面形貌SEM图及元素分布

Fig.3 Cross sectional SEM morphology and element distribution of various composite coatings

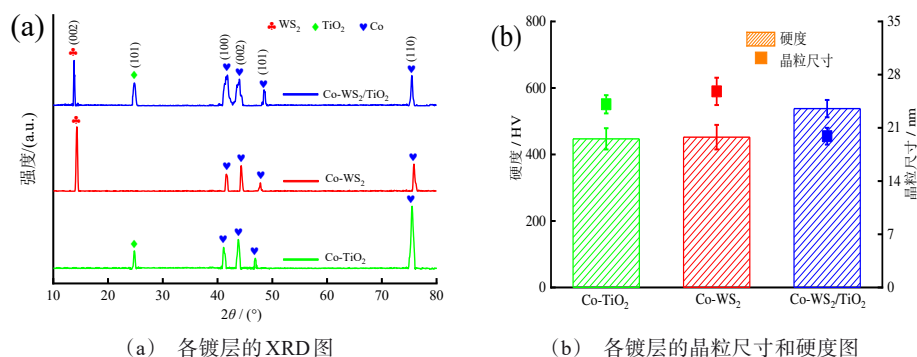


图4 不同复合镀层的XRD谱图、晶粒尺寸和硬度图

Fig.4 XRD patterns, grain size and hardness diagrams of various composite coatings

同作用赋予 Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 镀层优异的减摩和耐磨性能。

图6是不同镀层磨损表面形貌SEM和3D轮廓图。图6(a)至图6(f)可见, TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>单独添加时, Co-TiO<sub>2</sub>和Co-WS<sub>2</sub>镀层均出现一条连续且较宽的磨痕。磨痕表面较粗糙, 呈现塑性变形、分层和鱼鳞状形貌, 说明镀层在摩擦过程均发生严重的粘着磨损,

导致磨损率较高。如图6(g)至图6(i), TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>复合添加时, Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>却是一条不连续且较窄的磨痕, 表面只有凸起部分受到磨损, 出现少量刮痕, 该镀层的磨损机理主要为磨粒磨损, 这主要是因为镀层硬度较高。

图7为不同镀层摩擦后对磨球表面SEM和对应的EDS元素分布图。SEM图显示对磨球表面均



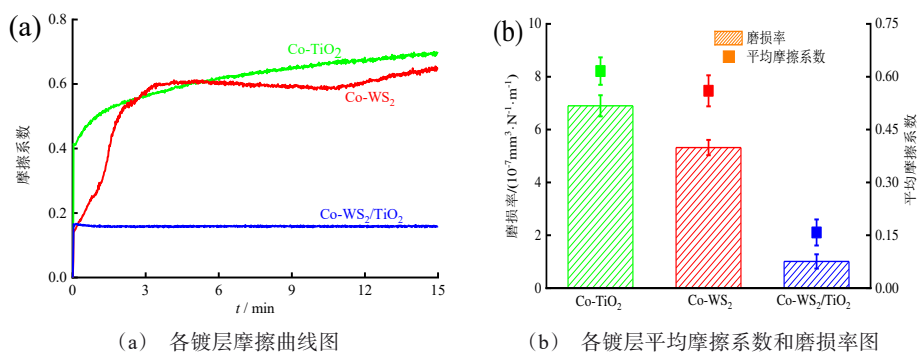


图5 不同复合镀层的典型摩擦曲线及其平均摩擦系数和磨损率图  
Fig.5 Typical friction, average friction coefficient and wear rate of various composite coatings

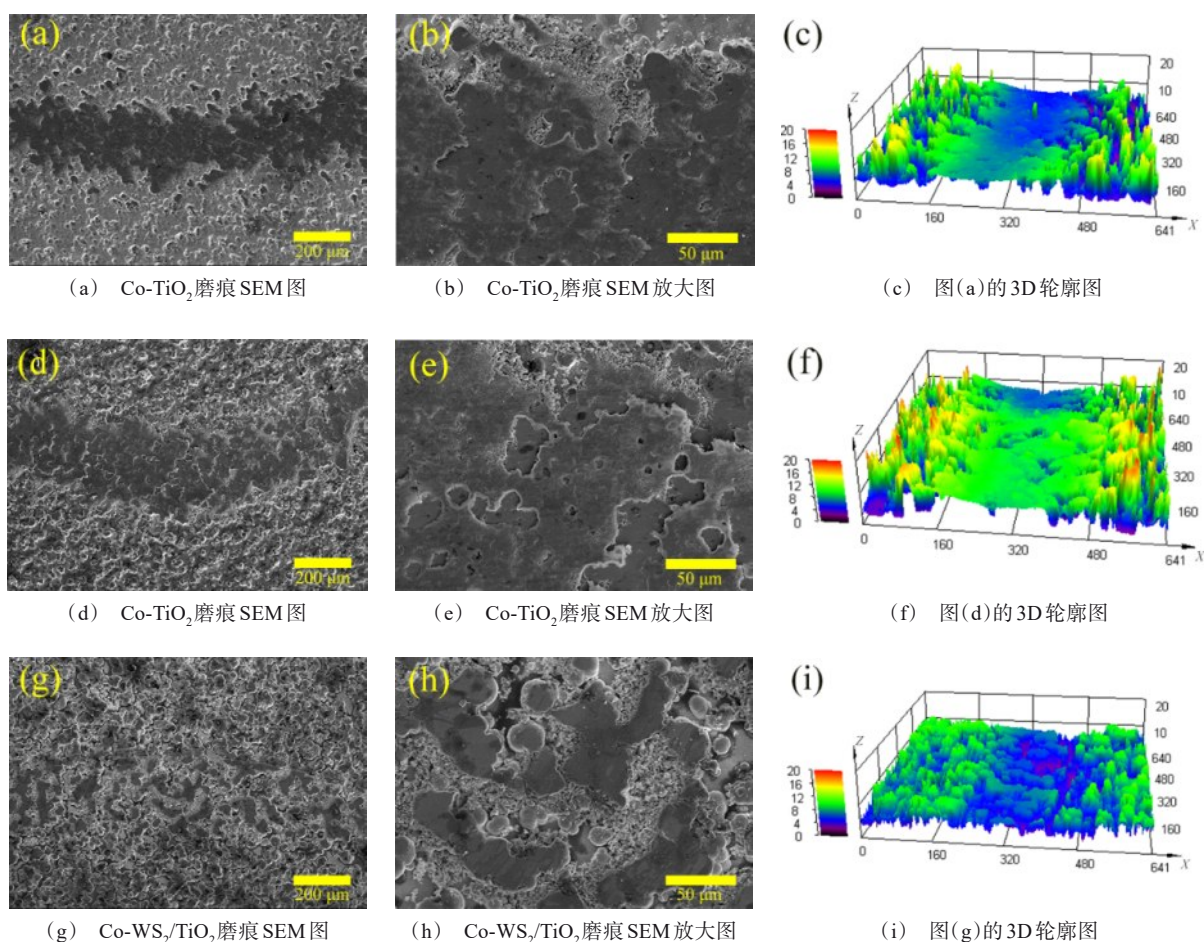


图6 不同镀层的磨痕表面形貌SEM图和3D轮廓图  
Fig.6 SEM and 3D images of wear scar morphology of various composite coatings

出现不同程度的磨屑堆积。EDS元素分布图证实磨屑主要元素为Co,来源于摩擦过程中镀层材料转移。对磨球(GCr15)的硬度约700 HV,高于不同复合镀层的硬度。摩擦过程中,高的摩擦应力会使硬

度较低的镀层发生剥落、分层,并转移到对磨球上<sup>[24]</sup>。由图7(a)至图7(d)可见Co-TiO<sub>2</sub>对磨球表面有大量松散的磨屑和刮痕,因为Co-TiO<sub>2</sub>硬度较低,摩擦过程中镀层易发生脱落,TiO<sub>2</sub>硬质颗粒在摩擦

副间形成磨粒磨损产生刮痕。图7(e)至图7(h)显示Co-WS<sub>2</sub>对磨球表面的磨屑呈层状堆积,出现分层和塑性变形。因为Co-WS<sub>2</sub>硬度也较低,WS<sub>2</sub>虽有自润滑性但不耐磨,容易粘着并堆积在对磨球的表面。Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>对磨球表面磨屑堆积较小,出现Co-TiO<sub>2</sub>和Co-WS<sub>2</sub>对磨球的松散磨屑和塑性变形现象,但其数量和程度远远减少(图7(i)至图7(l)),表现出更为优异的摩擦学性能,这是因为镀层中低剪切强度的WS<sub>2</sub>受到外加载荷作用形成的润滑膜不断嵌入磨损轨迹凹陷处修复损坏的表面,以及高硬度

的TiO<sub>2</sub>颗粒有效减少镀层与对磨球的接触面积<sup>[25]</sup>。总而言之,WS<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>的加入一方面增加形核位点,细化晶粒,起到细晶强化作用,提高复合镀层的硬度。另一方面,WS<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>分布在复合镀层中起到分散强化作用,阻碍位错的运动,进一步提高镀层的硬度。此外,二维层状结构WS<sub>2</sub>的加入起到润滑作用,降低摩擦系数。硬质的TiO<sub>2</sub>加入起到了强化作用,提高了耐磨性。TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>的协同作用赋予了Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>高硬度和优异的减摩耐磨性能。

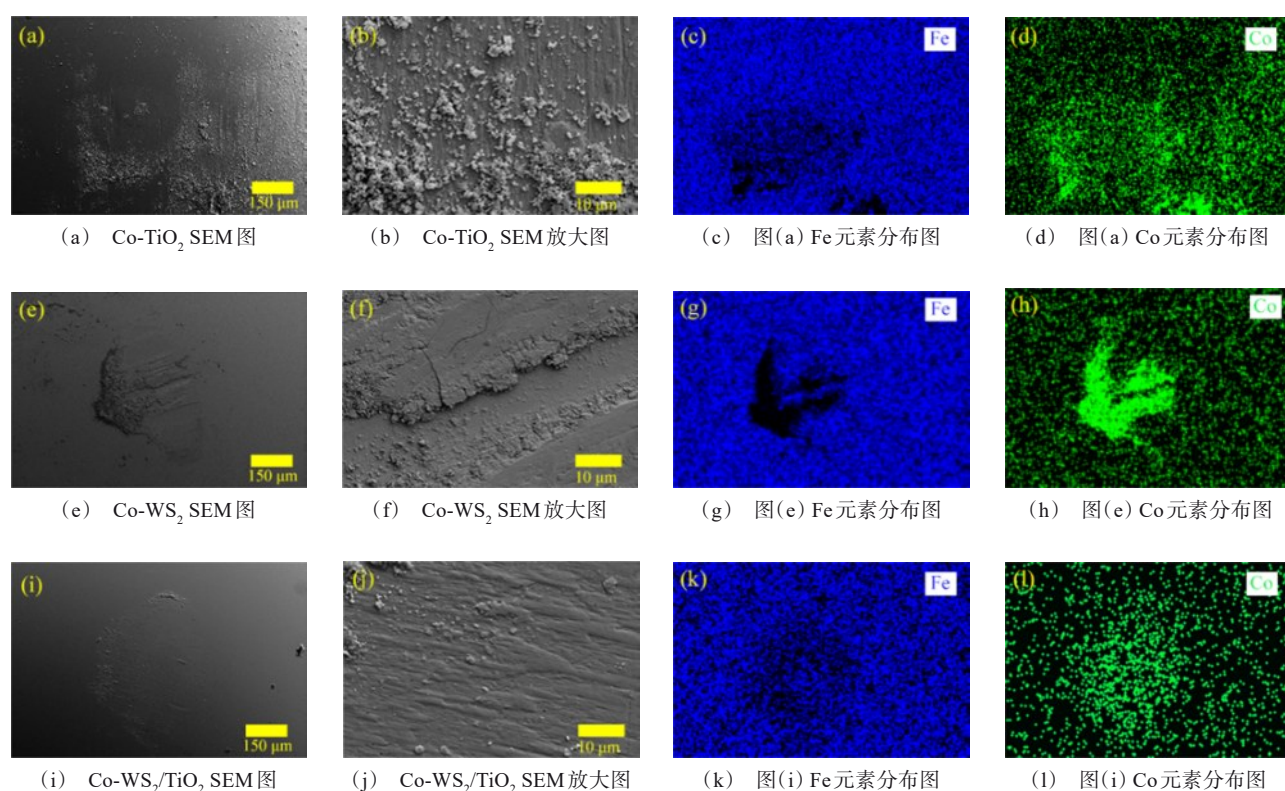


图7 与不同复合镀层摩擦后对偶球表面SEM图和元素分布

Fig.7 SEM morphology and element distribution of counterpart balls after sliding against various composite coatings

### 3 结语

采用水解法制备TiO<sub>2</sub>包覆WS<sub>2</sub>复合粉末并将其与Co进行共沉积制备Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>复合镀层。所制备的Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>镀层比TiO<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>单独添加制备的Co-TiO<sub>2</sub>和Co-WS<sub>2</sub>镀层具有更小的晶粒尺寸和更高的硬度。具有高硬度的TiO<sub>2</sub>和自润滑性的WS<sub>2</sub>协同作用赋予Co-WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>镀层优异的摩擦学行为,摩擦系数和磨损率最低,表现出最好的减摩耐磨

性能。

### 参考文献

- [1] 雒建斌. 超滑与摩擦起源的探索[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 2967-2978, 2966.
- [2] Okonkwo B O, Jeong C, Jang C. Advances on Cr and Ni electrodeposition for industrial applications-A review[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1555.
- [3] Fathi M, Safavi M S, Mahdavi S, et al. Co-P alloy matrix

- composite deposits reinforced by nano-MoS<sub>2</sub> solid lubricant: An alternative tribological coating to hard chromium coatings[J]. Tribology International, 2021, 159: 106956.
- [4] Akram A, Tara N, Khan M A, et al. Enhanced remediation of Cr<sup>6+</sup> in bacterial-assisted floating wetlands[J]. Water and Environment Journal, 2020, 34: 970-978.
- [5] Cardinal M F, Castro P A, Baxi J, et al. Characterization and frictional behavior of nanostructured Ni-W-MoS<sub>2</sub> composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(1-2): 85-90.
- [6] 安娜, 花珂, 史洪源, 等. TC4 钛合金表面电沉积 Co-W/MoS<sub>2</sub> 复合镀层及摩擦磨损性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(9): 63-70.
- [7] Zhang H, Zhang N, Fang F. Fabrication of high-performance nickel/graphene oxide composite coatings using ultrasonic-assisted electrodeposition[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 62: 104858.
- [8] 高辉, 刘伟杰. 2A12 铝合金电沉积 Ni-Co-MoS<sub>2</sub> 复合镀层的耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(10): 1-5.
- [9] Chen Z, Wagner J, Turq V, et al. Surfactant-assisted electrodeposition of Au-Co/WS<sub>2</sub> self-lubricating coating from WS<sub>2</sub> suspended cyanide electrolyte[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 829: 154585.
- [10] He Y, Sun W T, Wang S C, et al. An electrodeposited Ni-P-WS<sub>2</sub> coating with combined super-hydrophobicity and self-lubricating properties[J]. Electrochimica Acta, 2017, 245: 872-882.
- [11] Liu B, Yan S, He Y, et al. Research for electrodeposited superhydrophobic Ni-W-WS<sub>2</sub> coating and its anticorrosion and wear resistance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 655: 130236.
- [12] Sivadiipoor I, Ashrafizadeh F. Synthesis and tribological behaviour of electroless Ni-P-WS<sub>2</sub> composite coatings [J]. Applied Surface Science, 2012, 263: 314-319.
- [13] He Y, Wang S, Sun W, et al. Synthesis and properties of electrodeposited Ni-Co/WS<sub>2</sub> nanocomposite coatings[J]. Coatings, 2019, 9(2): 148.
- [14] 赵龙志, 王怀, 赵明娟, 等. TiO<sub>2</sub> 包覆 CNTs 复合纳米线的制备研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(2): 1-5.
- [15] 王小红, 刘豪, 蒋焰罡, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒对 Ni-W-P 合金镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 86-92, 104.
- [16] 牛犇, 易耀勇, 易江龙, 等. TiO<sub>2</sub> 添加对高锰钢堆焊层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(12): 52-57.
- [17] 李长春, 姜新华, 肖祥定, 等. Ni-P-WC 和 Ni-P-SiC 复合镀层的耐磨和耐蚀性能比较[J]. 材料保护, 2021, 54(9): 59-62.
- [18] 应丽霞, 李正辉, 刘冠男, 等. TiO<sub>2</sub> 纳米粒子对 Ni-PTFE 镀层微观组织结构和性能的影响研究[J]. 功能材料, 2015, 46(6): 6031-6034.
- [19] Yousefi E, Sharafi S, Irannejad A. The structural, magnetic, and tribological properties of nanocrystalline Fe-Ni permalloy and Fe-Ni-TiO<sub>2</sub> composite coatings produced by pulse electro co-deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 753: 308-319.
- [20] Wang L, Gao Y, Xu T, et al. A comparative study on the tribological behavior of nanocrystalline nickel and cobalt coatings correlated with grain size and phase structure [J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 99(1): 96-103.
- [21] Liu C S, Wei D D, Xu R S, et al. Electroplated Co-Ni/WS<sub>2</sub> composite coating with excellent tribological and anticorrosion performance[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(5): 857-866.
- [22] Safavia M S, Tanhaei M, Ahmadipour M F, et al. Electrodeposited Ni-Co alloy-particle composite coatings: A comprehensive review[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 382: 125153.
- [23] Luo T, Wei X W, Zhao H Y, et al. Tribology properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposites as lubricant additives[J]. Ceramics International, 2014, 40(7): 10103-10109.
- [24] Zhang Y L, Chen F, Zhang Y, et al. Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy[J]. Tribology International, 2020, 146: 106135.
- [25] Gustavsson F, Jacobson S. Diverse mechanisms of friction induced self-organisation into a low-friction material -An overview of WS<sub>2</sub> tribofilm formation[J]. Tribology International, 2016, 101: 340-347.