

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.04.006

## 齿轮钢电沉积 Ni-W/MoS<sub>2</sub> 自润滑复合镀层及性能研究

毛望军<sup>1\*</sup>, 高志廷<sup>2</sup>

(1. 河南机电职业学院 智能工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

**摘要:** 采用电沉积工艺在制造齿轮常用的 40Cr 钢表面制备掺杂 MoS<sub>2</sub> 颗粒的 Ni-W/MoS<sub>2</sub> 自润滑复合镀层, 并研究 MoS<sub>2</sub> 颗粒对复合镀层表面形貌、晶相结构、显微硬度和耐磨性能的影响。结果表明: Ni-W/MoS<sub>2</sub> 自润滑复合镀层完整覆盖 40Cr 钢表面, 主要成分为 Ni、W、Mo 和 S 元素, 存在 4 个 Ni 的衍射峰并且都呈现 (220) 晶面择优取向。镀液中 MoS<sub>2</sub> 颗粒质量浓度变化导致镀层的晶粒形态及致密性显现出差异, MoS<sub>2</sub> 颗粒含量呈现先升高后降低趋势, 造成显微硬度先增大后减小, 耐磨性能先改善后变差。当镀液中 MoS<sub>2</sub> 颗粒质量浓度为 5 g/L, Ni-W/MoS<sub>2</sub> 复合镀层中 MoS<sub>2</sub> 颗粒含量达到 4.17%, 形成条状与乳突状不同形态的晶粒, 结合更紧密, 其硬度达到 607.5 HV, 表面磨痕宽度仅为 420 μm, 表现出良好的耐磨性能, 能起到较理想的减摩作用, 从而显著提高 40Cr 钢的耐磨性能。

**关键词:** Ni-W/MoS<sub>2</sub> 自润滑复合镀层; 电沉积; 齿轮钢; MoS<sub>2</sub> 颗粒质量浓度; 耐磨性能

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

## Study on properties of Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings electrodeposited on gear steel

Mao Wangjun<sup>1\*</sup>, Gao Zhiting<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Engineering, Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings doped with MoS<sub>2</sub> particles were prepared on 40Cr steel commonly used for gear manufacturing by electrodeposition, and the effect of MoS<sub>2</sub> particles on the surface morphology, crystal structure, microhardness and wear resistance of the composite coatings was investigated. The results show that the Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coating covers the surface of 40Cr steel completely, the main components are Ni, W, Mo and S elements, and there are four Ni diffraction peaks, showing the preferred orientation of (220) crystal plane. Variation of the mass concentration of MoS<sub>2</sub> particles in the plating solution causes the difference in the grain morphology and compactness of the composite coating, and the content of MoS<sub>2</sub> particles firstly increases and then decreases, resulting in the microhardness first increases and then decreases, and the wear resistance gradually improves and then deteriorates. When the mass concentration of MoS<sub>2</sub> particles in the plating solution is 5 g/L, the Ni-W/MoS<sub>2</sub> composite coating with the highest MoS<sub>2</sub> particles content up to 4.17%, and the strip and mastoid grains of different morphology are closely bonded,

收稿日期: 2023-03-04

修回日期: 2023-03-29

\*通信作者: 毛望军(1971—), 高级实验师, 主要研究方向: 机械制造、金属表面改性、微纳加工技术等, email: mwj020926@126.com

基金项目: 河南省科学技术厅项目(162102210320)

the hardness reaches 607.5 HV, and the width of surface wear mark is only 420  $\mu\text{m}$ . The Ni-W/MoS<sub>2</sub> composite coating exhibiting good wear resistance, and it can play an ideal anti-friction effect and significantly improve the wear resistance of 40Cr steel.

**Keywords:** Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coating; electrodeposition; gear steel; mass concentration of MoS<sub>2</sub> particles; wear resistance

40Cr钢具有良好的切削加工性能和力学性能,适用于制造齿轮、轴和蜗杆等承受中等载荷的机械零件<sup>[1-4]</sup>。其中,齿轮应用广泛,可以实现增速、减速、变向和换向等功能,在机械设备中发挥着重要作用。齿轮在运转过程中若润滑油供应不足或润滑油中混有固体杂质,齿面磨损程度会加重。随着工业技术不断革新,对齿轮表面性能提出更高要求,使得40Cr钢等常用金属材料面临着更加苛刻的服役条件,亟需采取措施提高其表面性能。

电沉积技术具有操作简便、成本低廉和工艺稳定等优点,是提高金属材料表面性能的有效方法。镀层与基体结合牢固,对金属材料起到表面改性作用。但为了适应苛刻的服役条件,需要通过调控镀液成分或优化电沉积工艺参数进一步提高镀层性能。研究表明,通过电沉积将SiC、ZrO<sub>2</sub>等硬质颗粒掺杂在镀层中,使镀层表现出更高硬度<sup>[5-6]</sup>。通过电沉积将PTFE、MoS<sub>2</sub>等具有自润滑特性的颗粒掺杂在镀层中,使镀层表现出更好的耐磨性能<sup>[7-8]</sup>。通过电沉积将Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、PTFE等惰性颗粒或惰性聚合物掺杂在镀层中,使镀层表现出更好的耐腐蚀性能<sup>[9-11]</sup>。

在40Cr钢表面电沉积Ni-SiC复合镀层、Ni-TiN复合镀层和Ni-WC复合镀层等常规镀层来提高其耐磨性能已有研究报道<sup>[12-15]</sup>,而在40Cr钢表面电沉积具有自润滑功能的复合镀层鲜见报道。自润滑复合镀层具有独特性能优势,有望显著提高40Cr钢的耐磨性能。本文在制造齿轮常用的40Cr钢表面电沉积掺杂MoS<sub>2</sub>颗粒的Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层,主要研究MoS<sub>2</sub>颗粒对复合镀层表面形貌、显微硬度和耐磨性能的影响,为Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层用于提高齿轮钢表面性能提供参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 基体预处理

实验基体为52 mm×24 mm×2 mm的40Cr钢试

样,采用1600#碳化硅砂纸打磨试样表面,去除氧化膜和毛刺。然后进行化学除油,在20 g/L碳酸钠、40 g/L氢氧化钠与10 g/L磷酸钠的混合溶液中加热到65 °C浸泡6 min。除油后将试样浸在常温、体积分数15%的盐酸溶液中40 s,最后使用去离子水反复清洗,立即吹干,待用。

### 1.2 电沉积Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层

镀液由主盐、稳定剂和络合剂配制而成,然后添加不同质量浓度的纳米MoS<sub>2</sub>颗粒,成分如表1所示。将盛有镀液的烧杯置于配备磁力搅拌功能的水浴锅中,加热到60 °C,同时磁力搅拌4 h。改变镀液中MoS<sub>2</sub>颗粒质量浓度,电沉积70 min,在40Cr钢表面制备5个Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层试样。为便于表述,下文将在MoS<sub>2</sub>颗粒质量浓度分别为1 g/L、3 g/L、5 g/L、8 g/L、12 g/L条件下获得的不同复合镀层依次命名为复合镀层I、复合镀层II、复合镀层III、复合镀层IV、复合镀层V。

表1 镀液成分

Tab.1 Composition of plating solution

试剂	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
硫酸镍	45.00
钨酸钠	18.00
硼酸	30.00
柠檬酸氢二铵	100.00
十二烷基苯磺酸钠	0.06

### 1.3 Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层表征与测试

采用SUPRA55型扫描电镜及其配备的能谱仪表征并分析不同镀层的表面形貌和元素组成,根据Mo元素质量分数推算复合镀层中MoS<sub>2</sub>颗粒含量。式(1)中: $w_{\text{Mo}}$ 表示Mo元素质量分数; $w_{\text{MoS}_2}$ 表示复合镀层中MoS<sub>2</sub>颗粒含量。

$$w_{\text{MoS}_2} = \frac{160}{95.94} \times w_{\text{Mo}} \quad (1)$$

采用D8 Advance-A25型X射线衍射仪对不同镀层进行晶相结构分析,扫描速度为4 °/min,角度范围30~90°。

采用 TH763 型数显式硬度计测定不同镀层的显微硬度,在试样四周取 4 个点、中间取 1 个点,5 个点的测定结果取平均值作为被测镀层的显微硬度。

采用 MMW-1 型摩擦磨损试验机测试不同镀层在无润滑条件下的耐磨性能,摩擦副接触形式为线接触,摩擦时间 8 min,载荷 10 N,转速 150 r/min。实验结束后清理试样表面,采用 FA2004B 型电子天平称取试样磨损前后的质量,单位均为 g,获得不同镀层的磨损失重(单位为  $\text{g}/\text{cm}^2$ )。另外,采用扫描电镜表征不同镀层磨损后的表面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的表面形貌和元素组成

图 1 为不同 Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的表面形貌。从图 1 看出,所有镀层都完整覆盖 40Cr 钢表面,但是都存在孔洞,形貌特征显现出差异。复合镀层 I 的晶粒呈乳突状,结合紧密,孔洞数量多。随着镀液中 MoS<sub>2</sub>颗粒质量浓度增加,复合镀层的晶粒形态逐渐转变成条状晶粒与乳突状晶粒共存,并且结

合更紧密,伴随着孔洞数量减少,复合镀层的致密性逐步提高。结合电沉积机理分析<sup>[16-17]</sup>,在 Ni 与 W 诱导共沉积过程中,MoS<sub>2</sub>颗粒参与沉积过程可能进入 Ni 晶格中引起晶格畸变,打破原子间的平衡状态,致使晶格扭曲并发生位错,从而形成新形态晶粒。理论上,镀液中 MoS<sub>2</sub>颗粒质量浓度增加,颗粒进入 Ni 晶格中概率升高,引起较大程度晶格畸变,从而形成条状晶粒与乳突状晶粒共存的形貌特征,不同形态的晶粒结合很紧密,使复合镀层的致密性逐步提高。复合镀层 III 的晶粒呈条状与乳突状共存,并且不同形态的晶粒结合很紧密,其致密性最好。然而,复合镀层 V 的晶粒呈乳突状,未出现条状晶粒,并且孔洞数量较多。与复合镀层 III 相比,复合镀层 V 的致密性明显降低。可能是由于 MoS<sub>2</sub>颗粒质量浓度过高的情况下在镀液发生严重团聚现象,只有少量颗粒参与沉积过程进入 Ni 晶格中难以引起晶格畸变,导致晶粒呈现原始形态。另外,团聚态颗粒吸附在沉积面可能造成屏蔽效应降低了沉积效率,阻碍结晶形核过程,导致副反应加剧,容易形成孔洞等缺陷,因此复合镀层的致密性降低。

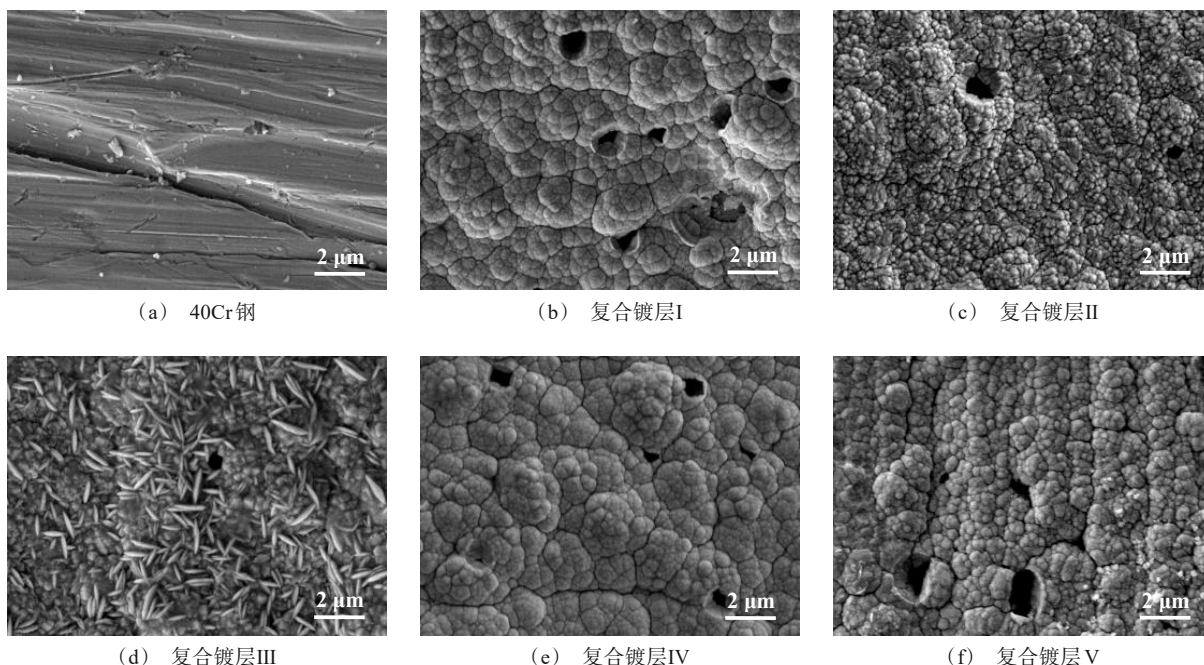


图 1 不同 Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of different Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings

图 2 为不同 Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的元素组成。从图 2 看出,所有镀层都含有 Ni、W、Mo 和 S

元素,其中 Mo 和 S 元素来源于 MoS<sub>2</sub>颗粒。Mo 和 S 元素质量分数越高,表明参与沉积过程掺杂在复合



镀层中的 $\text{MoS}_2$ 颗粒增多。根据Mo元素质量分数得到复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量分别为0.68%、2.79%、4.17%、2.26%、1.48%，随着镀液中 $\text{MoS}_2$ 颗粒质量浓度增加呈现先升高后降低趋势。当镀液中 $\text{MoS}_2$ 颗粒质量浓度为5 g/L时，复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量最高。 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量越高，颗粒参与沉积过程进入Ni晶格中概率升高，从而引起较大程度晶格畸变，与上述分析相吻合。

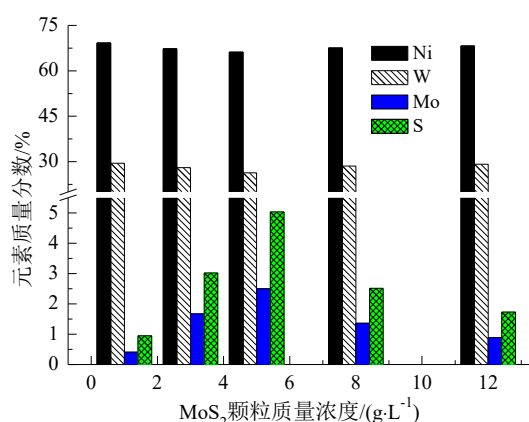


图2 不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的元素组成

Fig.2 Elemental composition of different Ni-W/ $\text{MoS}_2$  self-lubricating composite coatings

图3为不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的XRD图。

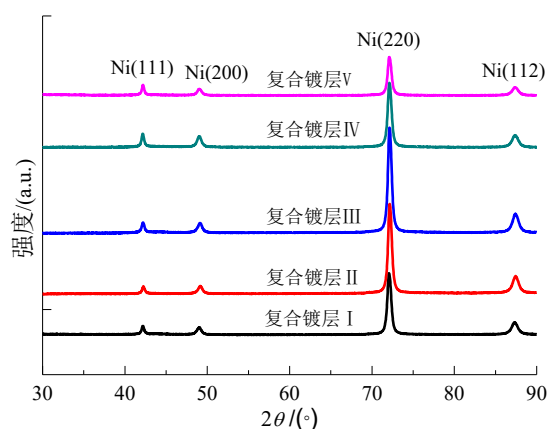


图3 不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的XRD图

Fig.3 XRD of different Ni-W/ $\text{MoS}_2$  self-lubricating composite coatings

从图3看出，所有镀层均为晶态结构，显示4个Ni的衍射峰，分别对应(111)晶面、(200)晶面、(220)晶面、(112)晶面，位置基本重叠。晶粒优先沿着(220)晶面生长，即呈现(220)晶面择优取向，表明

镀液中 $\text{MoS}_2$ 颗粒质量浓度变化对Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的晶相结构未造成显著性影响。衍射图谱中未显示W的衍射峰，表明Ni与W诱导共沉积形成Ni-W固溶体<sup>[18-19]</sup>。另外，衍射图谱中也未显示 $\text{MoS}_2$ 的衍射峰，可能由于复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量较低，低于X射线衍射仪检测极限。

## 2.2 Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的显微硬度

图4为不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的显微硬度。从图4看出，随着复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量从0.68%升至4.17%，显微硬度相应由528.4 HV增大到607.5 HV。这是由于复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量升高的情况下更多颗粒参与沉积过程，并进入Ni晶格中，引起较大程度晶格畸变，导致新形态晶粒形成，并且不同形态的晶粒结合更紧密，复合镀层中孔洞数量减少，致密性逐步提高。因此，复合镀层承受外加载荷压入能力和抗局部塑性变形能力增强<sup>[20-21]</sup>，从而表现为显微硬度增大。然而，当复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量从4.17%降至1.48%，显微硬度逐渐降低到503.7 HV。由于少量 $\text{MoS}_2$ 颗粒进入Ni晶格中，难以引起晶格畸变，并且可能降低沉积效率，导致复合镀层中孔洞等缺陷增多，致密性降低，承受外加载荷压入能力和抗局部塑性变形能力下降，从而表现为复合镀层的显微硬度减小。

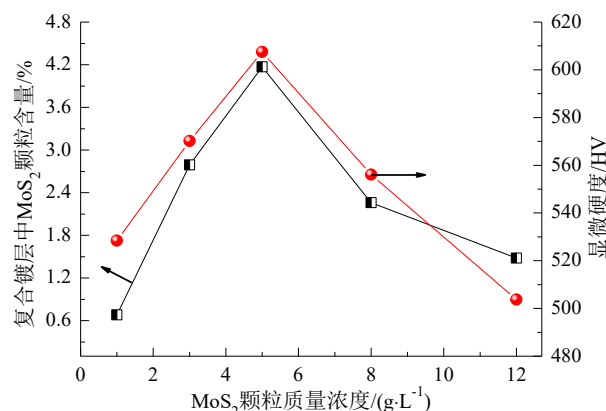


图4 不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的显微硬度

Fig.4 Hardness of different Ni-W/ $\text{MoS}_2$  self-lubricating composite coatings

## 2.3 Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层的耐磨性能

图5为40Cr钢和不同Ni-W/ $\text{MoS}_2$ 自润滑复合镀层磨损后的表面形貌，黑灰色区域为磨痕。可以看出，40Cr钢表面磨痕最宽，达到800 μm左右，在磨痕区域内出现大面积剥落，表明其磨损程度严重。复

合镀层I、复合镀层II和复合镀层III表面磨痕宽度相比于 40Cr 钢依次减小,分别为 600  $\mu\text{m}$ 、480  $\mu\text{m}$ 、420  $\mu\text{m}$  左右,剥落区域的面积也减小,这表明复合镀层I、复合镀层II和复合镀层III的磨损程度逐渐减轻,耐磨性能明显好于 40Cr 钢。其原因主要有两方面:一方面,复合镀层中含有层状结构、自润滑特性的  $\text{MoS}_2$  颗粒,在摩擦过程中, $\text{MoS}_2$  颗粒可能发生分层断裂,转移到摩擦界面,起到类似固体润滑剂的作用<sup>[22-24]</sup>,使复合镀层表面磨损程度减轻。另一方面, $\text{MoS}_2$  颗粒参与沉积过程可能引起晶格畸变,形成新形态晶粒,并且不同形态的晶粒结合更紧密,复合镀层中孔洞数量减少,致密性逐步提高。因此,复合镀

层能承受外加载荷压入,并且抗局部塑性变形能力增强,从而表现出良好的耐磨性能,对 40Cr 钢起到较理想的减摩作用。

然而,复合镀层IV和复合镀层V表面磨痕宽度与复合镀层III相比明显增加,它们的磨损程度逐渐加重。这是由于复合镀层中孔洞等缺陷增多,致密性降低,硬度减小,导致承受外加载荷挤压刮擦和抗塑性变形能力下降。另外,复合镀层中  $\text{MoS}_2$  颗粒含量降低,在摩擦过程中,少量  $\text{MoS}_2$  颗粒难以起到有效的自润滑减摩作用,从而造成磨损程度加重,复合镀层的耐磨性能变差。

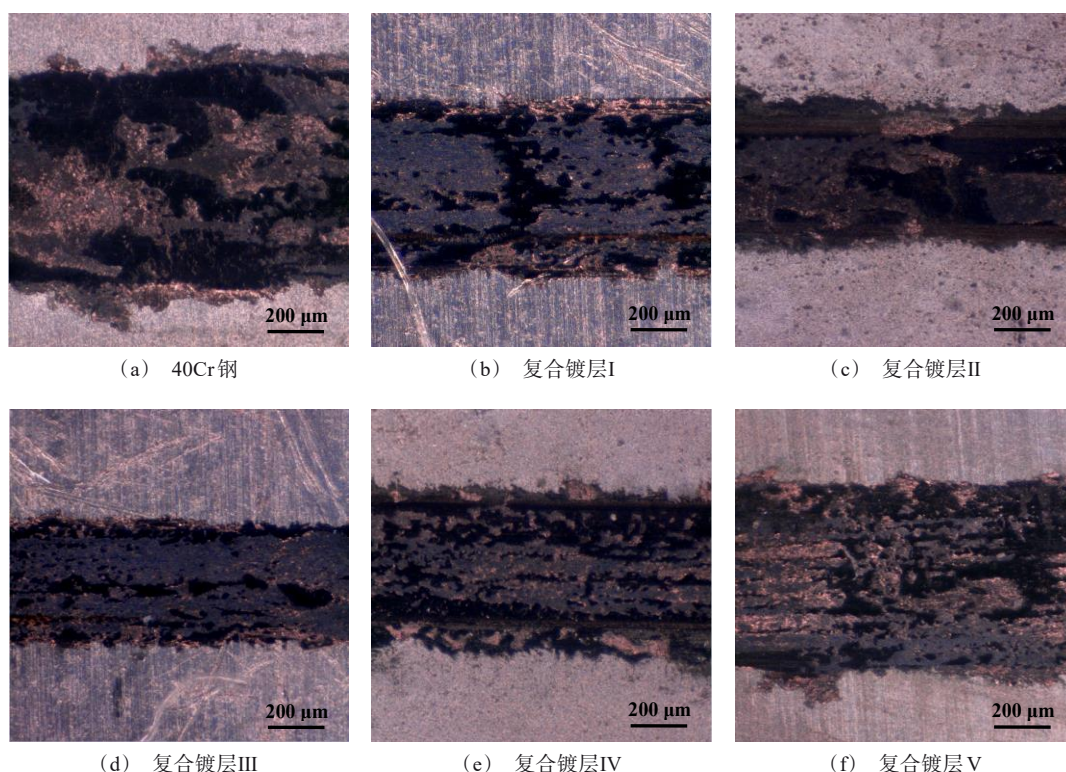


图 5 40Cr 钢和不同 Ni-W/ $\text{MoS}_2$  自润滑复合镀层磨损后的表面形貌

Fig.5 Surface morphology of 40Cr steel and different Ni-W/ $\text{MoS}_2$  self-lubricating composite coatings after abrasion

图 6 为 40Cr 钢和不同 Ni-W/ $\text{MoS}_2$  自润滑复合镀层的磨损失重。从图 6 看出,40Cr 钢的磨损失重最高,达到 9.1  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,表明其耐磨性能较差。复合镀层I、复合镀层II和复合镀层III的磨损失重依次降低,并且均低于 40Cr 钢的磨损失重。其中,复合镀层III具有最低的磨损失重 2.4  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,约为 40Cr 钢的 1/4,其耐磨性能最好。结合上述分析,复合镀层III的晶粒

呈条状与乳突状共存,并且不同形态的晶粒结合很紧密,具有致密结构和高硬度,能更好地承受外加载荷挤压刮擦,并且抗局部塑性变形,因此表现出优异的耐磨性能。然而,复合镀层IV和复合镀层V的磨损失重依次增加,它们的耐磨性能与复合镀层III相比明显变差。其原因是掺杂在复合镀层中的  $\text{MoS}_2$  颗粒减少,在摩擦过程中少量  $\text{MoS}_2$  颗粒发生分层断

裂,并转移到摩擦界面,起到的润滑减摩作用有限,导致磨损程度加重。另外,掺杂在复合镀层中的 $\text{MoS}_2$ 颗粒减少导致复合镀层致密性降低,硬度随之减小,承受外加载荷挤压刮擦和抗塑性变形能力下降,也造成磨损程度加重,因此复合镀层IV和复合镀层V的耐磨性能较差。

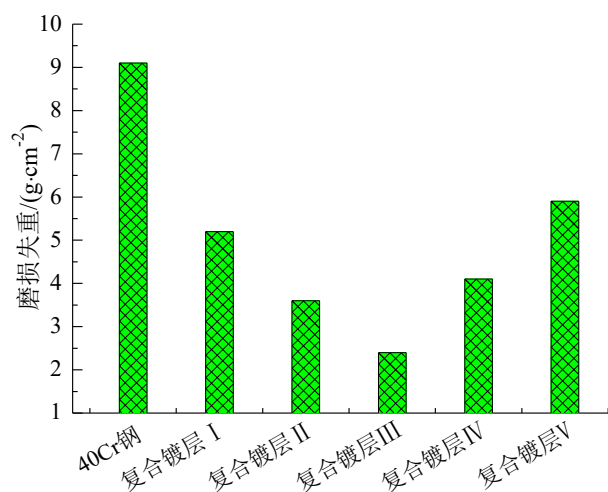


图6 40Cr钢和不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的磨损失重

Fig.6 Wear loss of 40Cr steel and different Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings

40Cr钢和不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的磨损区域元素分析结果如表2所示。由表2可知,在40Cr钢的磨损区域检测到Fe、C、O元素和少量Cr元素,Fe、C和Cr元素是40Cr钢的主要成分,而O元素是由于40Cr钢在摩擦过程中发生表面氧化引入。在不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层的磨损区域都检测到Ni、W、Mo、S、O和C元素,Mo和S元素存在证实了 $\text{MoS}_2$ 颗粒在摩擦过程中转移到摩擦界面,起到润滑减摩作用,O元素也是复合镀层在摩擦过程中发生表面氧化引入,C元素可能是复合镀层发生表面吸附现象引入。因此,40Cr钢和不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层的磨损机制均为磨粒磨损和氧化磨损。研究表明,O元素质量分数越高,意味着氧化磨损程度越严重<sup>[25-27]</sup>。由此推断Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层的磨损程度与40Cr钢相比减轻,进一步表明复合镀层的耐磨性能好于40Cr钢。复合镀层III的磨损区域检测到O元素质量分数最低,表明其耐磨性能最好。

表2 40Cr钢和不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>自润滑复合镀层的磨损区域元素分析结果

Tab.2 Analysis results of elements in wear areas of 40Cr steel and different Ni-W/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings

试样	元素质量分数/%							
	Fe	C	O	Cr	Ni	W	Mo	S
40Cr	81.14	6.83	10.42	1.61	—	—	—	—
复合镀层I	—	3.23	6.01	—	64.25	25.68	0.26	0.57
复合镀层II	—	2.76	4.85	—	62.78	26.42	1.15	2.04
复合镀层III	—	2.45	4.13	—	62.51	25.15	1.84	3.92
复合镀层IV	—	3.04	5.24	—	62.56	26.37	0.92	1.87
复合镀层V	—	3.70	6.47	—	62.32	25.49	0.60	1.42

### 3 结论

(1)改变镀液中 $\text{MoS}_2$ 颗粒质量浓度制备的不同Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层都完整覆盖40Cr钢,主要成分为Ni、W、Mo和S元素,存在4个Ni的衍射峰,并且都呈现(220)晶面择优取向,但是形貌特征及 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量存在差异。复合镀层中 $\text{MoS}_2$ 颗粒含量升高可能引起较大程度晶格畸变,形成不同形态的晶粒结合更紧密,使复合镀层的致密性逐步提高,硬度增大且耐磨性能提高。

(2)当镀液中 $\text{MoS}_2$ 颗粒质量浓度为5 g/L,Ni-W/MoS<sub>2</sub>复合镀层形成条状与乳突状晶粒共存,结合很紧密,其致密性最好, $\text{MoS}_2$ 颗粒含量和显微硬度分别达到4.17%、607.5 HV,表面磨痕宽度和磨损失重仅为420  $\mu\text{m}$ 、2.4 g/cm<sup>2</sup>,表现出良好的耐磨性能,能起到较理想的减摩作用,从而显著提高40Cr钢的耐磨性能。

### 参考文献

- [1] 韩二锋,黄瑞.机械结构钢化学镀Ni-W-P/PTFE复合镀层的耐蚀阻垢性能[J].电镀与精饰,2022,44(9):9-14.
- [2] 岳佳宏,孟璇,姚小卫,等.渗氮后氧化处理40Cr钢的耐蚀性能[J].金属热处理,2021,46(4):217-219.
- [3] Yang Z, Wu G S, Shao J G. Enhanced hardness and friction behaviour of 40Cr steel by laser surface texturing after ultrasonic surface rolling[J]. International Journal of Surface Science and Engineering, 2021, 15(3): 202-220.
- [4] Yao Y L, Xiu S C, Sun C, et al. Investigation on grinding-induced dynamic recrystallization behavior of 40Cr



- alloy steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867: 158773-158785.
- [5] 李浪, 谢发勤, 吴向清, 等. 镀液循环流量对封闭循环电沉积 Ni-SiC 复合镀层的影响[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(8): 87-93.
- [6] 王基月, 张曦, 郑喜贵, 等. 机器臂缸套表面电沉积 Ni-P-xZrO<sub>2</sub> 纳米复合镀层性能表征[J]. *材料保护*, 2021, 54(7): 97-101.
- [7] Guan C S, Fu J J, Cui Z C, et al. Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 209: 104933-104942.
- [8] Boakye G O, Ormsdottir A, Gunnarsson B G. The effect of polytetrafluoroethylene (PTFE) particles on microstructural and tribological properties of electroless Ni-P+PTFE duplex coatings developed for geothermal applications[J]. *Coatings*, 2021, 11(6): 670-686.
- [9] 张银, 康敏, 李恒征, 等. Ni-Co-P-BN(h)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 二元纳米复合镀层润湿性及耐蚀性[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(10): 2321-2333.
- [10] 叶萍, 周倩, 董良. 屏蔽罩超声辅助电镀 Ni-Co/SiO<sub>2</sub> 复合镀层的耐蚀性研究[J]. *电镀与精饰*, 2021, 43(2): 28-33.
- [11] 李孝坤, 刘抒影, 刘忻. 钎铁硼化学镀防护及在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(1): 29-34.
- [12] 夏华丹. 40Cr 钢汽车传动轴表面电沉积 Ni-SiC 纳米复合镀层的研究[J]. *电镀与精饰*, 2018, 40(7): 10-13.
- [13] 兰宏宇, 马春阳, 李洋, 等. 电沉积工艺参数对 Ni-TiN 纳米复合镀层粒子复合量的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2015, 38(3): 52-54.
- [14] 彭绪山, 李永平, 章晓敏, 等. 基于 BP 神经网络的 Ni-TiN 镀层腐蚀速率预测研究[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(10): 2556-2560.
- [15] Tripathi M, Singh D K, Singh V B. Electrocodeposition and characterization of Ni-WC composite coating from non aqueous bath[J]. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2013, 2(2): 68-73.
- [16] 肖琦, 陈蔚清, 陈杨连, 等. 电流密度对 Ni-W-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 复合镀层耐腐蚀性能的影响[J]. *稀有金属*, 2022, 46(10): 1298-1305.
- [17] 林立, 韩华. Ni/WC 复合镀层与 Ni-W 合金镀层力学性能比较[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(8): 7-12.
- [18] 周琼宇. 低碳钢表面 Ni 基 W 系合金层制备及其性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [19] 陈颖, 羊建高, 李金辉, 等. 电沉积晶态钨基合金镀层组织及磨损性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2014, 4: 553-558.
- [20] 李兵, 陈喆, 刘兰徽, 等. 石墨烯增强相对镍基复合镀层的强化作用及镀层制备[J]. *材料保护*, 2022, 55(4): 40-45.
- [21] Singh S, Samanta S, Das A K, et al. Tribological investigation of Ni-graphene oxide composite coating produced by pulsed electrodeposition[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2018, 12: 61-70.
- [22] 刘勇, 苏峰华, 孙建芳, 等. MoS<sub>2</sub>-Ti 自润滑复合薄膜的高温摩擦学性能研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(2): 20-28.
- [23] Banday S, Wani M F. Nanomechanical and nanotribological characterization of multilayer self-lubricating Ti/MoS<sub>2</sub>/Si/MoS<sub>2</sub> nanocoating on aluminium-silicon substrate[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2019, 51(6): 649-660.
- [24] Yao Y H, Wu Y C, Zhang Z Y, et al. Enhancement of frictional properties of Ni-MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings by microgroove arrays[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 605: 154635-154645.
- [25] 戴媛静, 邹洋, 张紫铜, 等. Ni-P-Nano PTFE 镀层的制备及摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(12): 7-18.
- [26] Wang Y, Sun W C, Wang C A, et al. Microstructure, friction, and wear properties of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoS<sub>2</sub> composite coatings[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2017, 14(5): 889-898.
- [27] 张丽, 沙明红, 纪良浩, 等. Ti 元素对激光熔覆 Al-CoCrFeNiTi(0.5) 合金涂层组织和耐磨性的影响[J]. *材料保护*, 2022, 55(10): 24-30.