

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.12.004

## 超声波功率对电沉积 Co-Mo-P 镀层性能的影响

刘文彦<sup>1\*</sup>, 魏媛<sup>2</sup>, 虞正鹏<sup>1</sup>, 陈欢欢<sup>1</sup>, 李帅东<sup>1</sup>

(1. 荆州理工职业学院, 湖北 荆州 434000; 2. 荆州学院, 湖北 荆州 434200)

**摘要:** 采用超声波辅助电沉积工艺在 20# 钢基体上制备 Co-Mo-P 镀层, 并研究超声波功率对 Co-Mo-P 镀层的形貌、成分、厚度、硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能和磁性能的影响规律。结果表明: 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层致密性和厚度存在差异, 导致硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能和磁性能差别较大。超声波功率为 150 W 时电沉积的 Co-Mo-P 镀层成分较均匀, 孔洞缺陷少且晶粒结合更紧密, 其厚度、硬度、电荷转移电阻、最大相位角、矫顽力和饱和磁化强度分别达到 11.4  $\mu\text{m}$ 、460.5 HV、3623.2  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、68.2°、769.3 Oe、92.7  $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ , 摩擦系数仅为 0.52, 相比于常规 Co-Mo-P 镀层表现出高硬度、优良的耐磨性能、耐腐蚀性能以及磁性能。由于在一定范围内提高超声波功率起到较好的强化扩散传质效果, 细化晶粒并促使晶粒结合更紧密, Co-Mo-P 镀层的厚度增加, 致密性逐步改善, 因此其性能提高。

**关键词:** Co-Mo-P 镀层; 超声波功率; 硬度; 耐磨性能; 耐腐蚀性能; 磁性能

**中图分类号:** TQ153

**文献标识码:** A

## Effect of ultrasonic power on properties of electrodeposited Co-Mo-P coatings

Liu Wenyan<sup>1\*</sup>, Wei Yuan<sup>2</sup>, Yu Zhengpeng<sup>1</sup>, Chen Huanhuan<sup>1</sup>, Li Shuaidong<sup>1</sup>

(1. Jingzhou Vocational College of Technology, Jingzhou 434000, China; 2. Jingzhou University, Jingzhou 434200, China)

**Abstract:** Co-Mo-P coatings were prepared on 20# steel substrate by ultrasonic-assisted electrodeposition technology, and the influence of ultrasonic power on the morphology, composition, thickness, hardness, wear resistance, corrosion resistance and magnetic properties of Co-Mo-P coating was investigated. The results show that there are differences in the compactness and thickness of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power, resulting in obvious differences in the hardness, wear resistance, corrosion resistance and magnetic properties. When the ultrasonic power is 150 W, the Co-Mo-P coating has uniform composition and fewer hole defects, and the grains are tightly bonded. The thickness, hardness, charge-transfer resistance, maximum phase angle, coercivity and saturation magnetization of the Co-Mo-P coating electrodeposited under ultrasonic power of 150 W reach 11.4  $\mu\text{m}$ , 460.5 HV, 3623.2  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 68.2°, 769.3 Oe, 92.7  $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ , respectively, and the friction coefficient is only 0.52. Compared with conventional Co-Mo-P coating, the Co-Mo-P coating electrodeposited under ultrasonic power of 150 W exhibits high hardness, excellent wear resistance, corrosion resistance and magnetic properties. The increase of ultrasonic power in a certain range plays a better effect of enhancing diffusion mass transfer, refining the grains and promoting the grains bonding more

收稿日期: 2023-01-10

修回日期: 2023-02-17

\*通信作者: 刘文彦(1981—), 男, 副教授, 主要研究方向为应用化学、功能薄膜等, email: wenyan\_liu000@163.com

基金项目: 湖北省教育厅基金项目(2019JB323)

closely, the thickness of Co-Mo-P coating increases and the compactness gradually improve, so its performance is improved.

**Keywords:** Co-Mo-P coating; ultrasonic power; hardness; wear resistance; corrosion resistance; magnetic properties

Co基镀层具有较高硬度、优良的耐腐蚀性能和磁性能,可以用作特殊器件表面的功能性镀层受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>。目前,关于Co基镀层的研究主要集中在电沉积方式或环境变化、镀液成分调控和电沉积工艺参数优化等方面。余云丹等<sup>[5]</sup>在磁场环境中电沉积Co-W镀层,研究了磁场强度对镀层形貌和性能的影响规律。周巧英等<sup>[6]</sup>在含有柠檬酸盐的酸性镀液中电沉积Co-W镀层,通过调控镀液中 $\text{WO}_4^{2-}$ 与 $\text{Co}^{2+}$ 比值获得磁性能优良的Co-W镀层。王俊等<sup>[7]</sup>在GCr15钢表面电沉积Co-W/ $\text{ZrO}_2$ 镀层,通过调控镀液中 $\text{ZrO}_2$ 颗粒浓度实现晶粒细化,获得耐磨性能良好的Co-W/ $\text{ZrO}_2$ 镀层。王府等<sup>[8]</sup>在低碳钢基体上电沉积Co-Mo镀层,研究了电沉积机理以及工艺参数对镀层耐腐蚀性能的影响规律。关晓洁等<sup>[9]</sup>在铜基体上电沉积Co-Pd镀层,研究了电沉积工艺参数(包括电流密度、温度、镀液pH值)对镀层微观形貌和耐腐蚀性能的影响规律。总结相关学者的研究成果得知,在非常规环境中电沉积或是调控镀液成分、优化电沉积工艺参数都是改善Co基镀层性能的有效途径。

Co基三元合金镀层是在Co基二元合金镀层中引入W、Mo、Ni等元素得到,由于这几种元素在电沉积过程中可能引起晶格畸变,形成新物相同时细化晶粒,使得Co基三元合金镀层(如Co-W-P镀层、Co-Ni-P镀层)表现出更好的综合性能,具有更高应用价值<sup>[10-13]</sup>。Mo是一种耐高温、硬度高且抗腐蚀能力强的金属,研究表明将Mo元素掺入Ni基镀层中使镀层的综合性能明显提高<sup>[14-15]</sup>。参考已报道的实验结果,本文采用超声波辅助电沉积工艺将Mo元素掺入Co-P镀层中,以期利用超声波的特殊效应影响电沉积过程获得耐磨、耐腐蚀且磁性能优良的Co-Mo-P镀层,从而满足特殊场合的应用要求。

## 1 实验

### 1.1 Co-Mo-P镀层制备过程

选用20#钢板(40 mm×18 mm×2 mm)作为基

体,预处理流程如下:砂纸打磨→化学除油→清水冲洗→腐蚀活化→清水冲洗→烘干待用。化学除油采用市售的除油液,预热至60℃将基体放入其中浸泡10 min后取出。腐蚀活化采用体积分数15%的盐酸,室温条件下将基体放入盐酸中,待表面均匀的附着气泡立即取出。

预处理后的基体作为阴极,铂片作为阳极,都浸在镀液中,采用电沉积工艺制备Co-Mo-P镀层。实验采用双层夹套烧杯,置于恒频率可变功率型超声波清洗机的水浴槽中,烧杯内腔装有预热到60℃的镀液,主要成分为:CoSO<sub>4</sub> 15 g/L、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 30 g/L、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> 5 g/L、C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>Na<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 64 g/L、NH<sub>4</sub>Cl 12 g/L、C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>NaO<sub>4</sub>S 0.06 g/L,中间空腔中充满55℃的温水,烧杯最外壁与水浴接触,水浴温度为50℃。实验过程中,利用热传递效应能够调控镀液温度维持在60~65℃。电沉积工艺条件为:超声波功率0~200 W、超声波频率40 kHz、阴极电流密度2 A/dm<sup>2</sup>、电沉积时间80 min。

电沉积Co-Mo-P镀层过程中,超声波传递至镀液中,利用超声波空化效应实现搅拌镀液、促进传质等作用,在超声波功率分别为50 W、100 W、150 W、200 W的条件下制备4个Co-Mo-P镀层试样。另外,在超声波功率为0 W条件下制备1个Co-Mo-P镀层(以下简称常规Co-Mo-P镀层)试样做对比。

### 1.2 Co-Mo-P镀层性能测试

#### 1.2.1 形貌观察及成分分析

采用EV018型扫描电镜放大5000倍观察不同Co-Mo-P镀层的形貌。鉴于Co基镀层具有磁性,在扫描电镜视场下不容易聚焦,为了获得清晰图像便于分析不同Co-Mo-P镀层的形貌特征,测试前对每个试样喷金处理。另外,采用Inca X-Act型能谱仪设置面扫描模式,分析不同Co-Mo-P镀层的成分,得到各元素质量分数及分布状况。

#### 1.2.2 厚度测试

采用Dektak型台阶仪测试不同Co-W-P镀层的厚度,每个试样重复测3次取平均值。

### 1.2.3 硬度测试

采用 MV-TEST1000 型显微硬度计测试不同 Co-Mo-P 镀层的硬度,法向载荷为 0.245 N,保持 15 s 后均匀卸载。在每个试样表面呈十字交叉形选取 5 个点,测试结果取平均值。

### 1.2.4 耐磨性能测试

在室温条件下进行无润滑摩擦实验,采用 CFT-I 型材料表面性能测试仪测试不同 Co-Mo-P 镀层的摩擦系数。设置往复摩擦模式(速度 100 mm/s),法向载荷为 3 N,摩擦过程持续 7 min 结束。根据摩擦系数评价不同 Co-Mo-P 镀层的耐磨性能。

### 1.2.5 耐腐蚀性能测试

配制质量分数 3.5% 的氯化钠溶液作为腐蚀介质,并以不同 Co-Mo-P 镀层试样作为工作电极,饱和甘汞电极和铂电极分别作为参比电极、辅助电极,

采用 Parstat 2273 型电化学工作站测试  $10^5$  Hz 到  $10^{-2}$  Hz 频率范围内的电化学阻抗谱。施加激励信号幅值为 10 mV,采用 ZSimp Win 软件拟合电化学阻抗谱测试数据,根据拟合结果评价不同 Co-Mo-P 镀层的耐腐蚀性能。

### 1.2.6 磁性能测试

采用 Lake Shore 8610 型振动磁强计测试不同 Co-Mo-P 镀层的磁滞回线,根据矫顽力和饱和磁化强度评价不同 Co-Mo-P 镀层的磁性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超声波功率对 Co-Mo-P 镀层形貌、成分和厚度的影响

图 1 为不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层形貌。

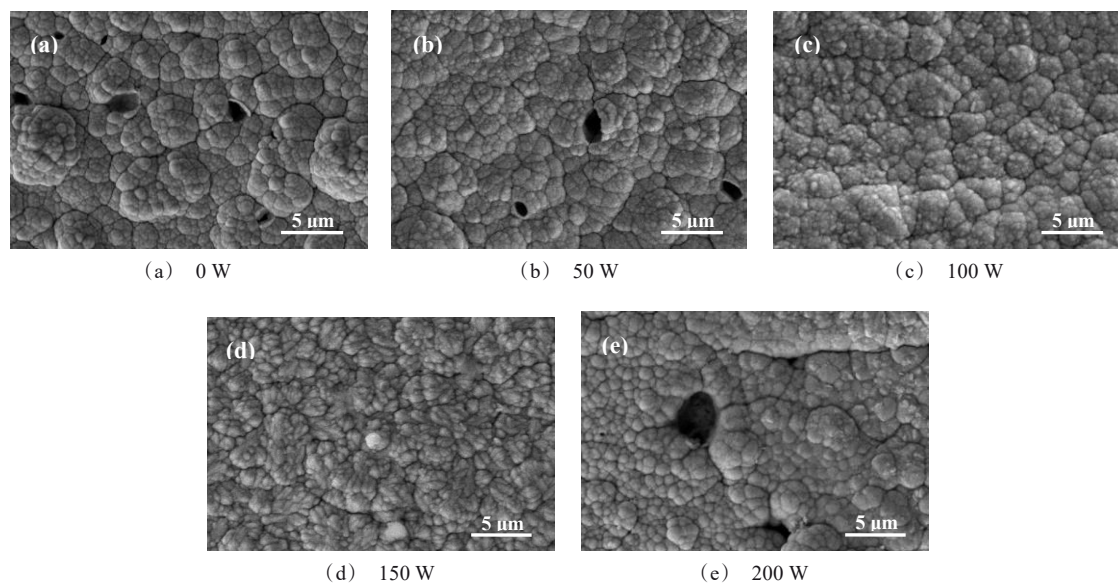


图 1 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层形貌

Fig.1 Morphology of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

从图 1(a)看出,超声波功率为 0 W 时,Co-Mo-P 镀层的晶粒呈球状团簇,不同区域晶粒尺寸差别大,并且镀层中存在一些孔洞,这是由于电沉积过程中伴随着氢气析出所致。从图 1(b)~图 1(d)看出,超声波功率分别为 50 W、100 W、150 W 时电沉积的 Co-Mo-P 镀层晶粒形态基本未变,但随着超声波功率从 50 W 提高到 150 W,晶粒趋于均匀化,不同区域晶粒尺寸差别变小,并且 Co-Mo-P 镀层中孔洞减少,晶粒结合更紧密,致密性逐步改善。这是由于超

声波功率在镀液中传递产生空化效应引起微射流和冲击波,起到减薄沉积面附近扩散层厚度和降低浓差极化的作用,同时促进参与反应过程的离子向沉积面附近输送、清洁沉积面以及促进附着在沉积面的气泡排离等作用,使极限电流密度增大。根据 Fick 定律<sup>[14]</sup>,极限电流密度增大使形核率提高,新晶核形成速度加快同时抑制已形成的晶粒生长,从而达到细化晶粒的效果。在一定范围内提高超声波功率使临界晶核半径减小,起到较好的细化晶粒效果,

并促使晶粒大小均匀,结合更紧密,Co-Mo-P镀层的致密性逐步改善。从图1(e)看出,超声波功率为200 W时电沉积的Co-Mo-P镀层晶粒大小不均匀,不同区域晶粒尺寸差别较大,致密性降低。另外,Co-Mo-P镀层中孔洞增多而且出现裂纹,沿着晶粒边界延伸。这是由于超声波功率过高产生强烈的微射流和冲击波,可能击碎一些初形成的细小晶粒,导致新晶核在较大晶粒表面容易形成并生长,因此镀层不同区域晶粒尺寸差别较大。形核不均匀加之沉积效率降低导致析氢量增加,Co-Mo-P镀层中孔洞增多,致密性降低。另外,超声波功率过高还可能造成镀层内应力分布不均匀,局部应力过大容易形成裂纹。

表1列出不同超声波功率下电沉积的Co-Mo-P镀层成分。由表1可知,超声波功率为0 W时,在Co-Mo-P镀层中检测到Co、Mo、P和C元素,质量分数分别为62.48%、14.91%、9.05%、13.56%,其中C元素是镀层表面发生物理吸附引入。超声波功率分别为50 W、100 W、150 W、200 W时,电沉积的Co-Mo-P镀层中都检测到Co、Mo、P和C元素,并且各元素质量分数差别不大,表明改变超声波功率对Co-Mo-P镀层的成分无显著性影响。超声波功率为150 W时,电沉积的Co-Mo-P镀层中主要元素分布状况如图2所示,从图2(a)、图2(b)和图2(c)看出,Co、Mo和P元素亮点在整个镀层表面分布均匀,表明Co-Mo-P镀层的成分较均匀。

图3为不同超声波功率下电沉积的Co-Mo-P镀层厚度。由图3可知,随着超声波功率逐渐提高到200 W,厚度呈现先增加后降低趋势。超声波功率为150 W时,电沉积的Co-Mo-P镀层最厚,达到11.4  $\mu\text{m}$ 。这是由于在一定范围内提高超声波功率使阴极面附近扩散层的厚度减小,有效地降低浓差

表1 不同超声波功率下电沉积的Co-Mo-P镀层成分

Tab.1 Composition of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

超声波功率/W	元素质量分数/%			
	Co	Mo	P	C
0	62.48	14.91	9.05	13.56
50	62.53	15.03	9.11	13.33
100	62.67	15.11	8.97	13.25
150	62.84	15.22	8.94	13.00
200	62.81	15.04	9.02	13.13

极化,从而强化扩散传质,加快电沉积速度。因此,在相同沉积时间下获得较厚的Co-Mo-P镀层。然而,当超声波功率超过一定限值,严重影响了形核及晶粒生长过程,导致沉积速度变慢,因此Co-Mo-P镀层的厚度降低。

## 2.2 超声波功率对Co-Mo-P镀层硬度和耐磨性能的影响

图4为不同超声波功率下电沉积的Co-Mo-P镀层硬度。由图4可知,改变超声波功率对Co-Mo-P镀层的硬度有较大影响。随着超声波功率逐渐提高到150 W,硬度逐渐增大。超声波功率为150 W时,电沉积的Co-Mo-P镀层具有最高的硬度460.5 HV,相比于常规Co-Mo-P镀层提高约80 HV,也高于文献[15]报道的Co-Ni镀层硬度(208 HV)和文献[16]报道的常规Co-W镀层硬度(小于450 HV)。结合上述分析,在一定范围内提高超声波功率使形核率提高,临界晶核半径减小,起到细化晶粒效果,促使晶粒结合更紧密,Co-Mo-P镀层的致密性逐步改善,抵抗局部塑性变形能力增强,因此硬度增大。然而,当超声波功率达到200 W,硬度反而减小。这是由于超声波功率过高,导致镀层中孔洞增多而且出现裂纹,抵抗局部塑性变形能力变弱。

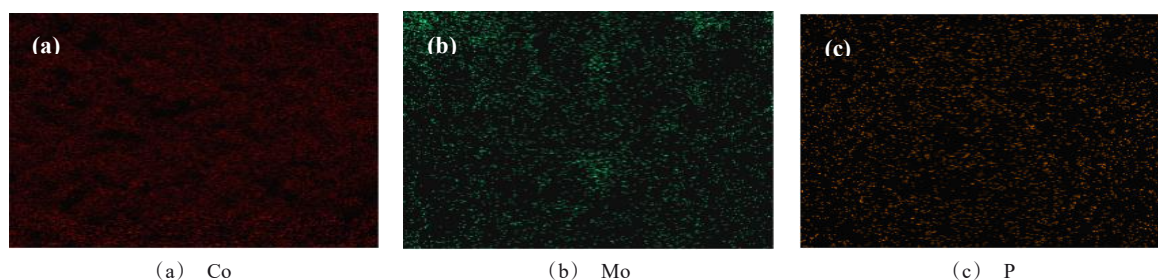


图2 超声波功率为150 W时电沉积的Co-Mo-P镀层中主要元素分布状况

Fig.2 Distribution of main elements in the Co-Mo-P coating electrodeposited under ultrasonic power of 150 W

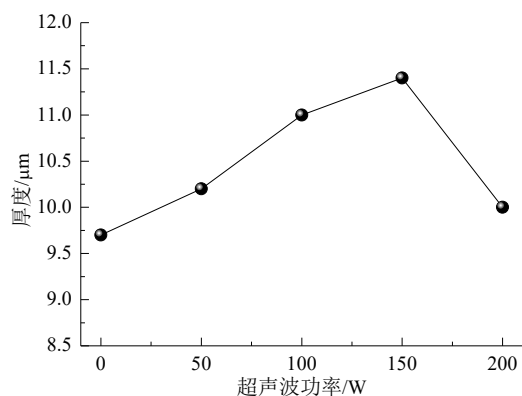


图3 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层厚度

Fig.3 Thickness of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

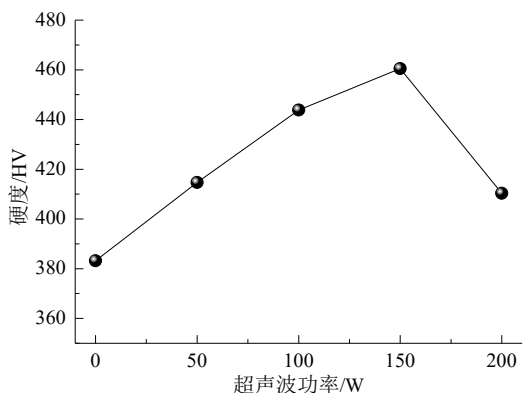


图4 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 硬度

Fig.4 Hardness of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

图5为不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层摩擦系数。从图5看出,随着超声波功率逐渐提高到200 W,摩擦系数呈现先减小后增大趋势。一般情况下,摩擦系数越小意味着镀层的耐磨性能越好<sup>[17-18]</sup>。因此,改变超声波功率同样对 Co-Mo-P 镀层的耐磨性能有较大影响。超声波功率为150 W时电沉积的 Co-Mo-P 镀层具有最低的摩擦系数0.52,相比于常规 Co-Mo-P 镀层的摩擦系数(0.63)降低约17.5%,相比于文献<sup>[19]</sup>报道的 Co-Ni-Fe 镀层的摩擦系数(0.663~0.734)降低约21.6%~29.2%。这是由于在一定范围内提高超声波功率起到较好的细化晶粒效果,促使 Co-Mo-P 镀层的晶粒结合更紧密,致密性逐步改善。镀层硬度增大,承受对磨件挤压刮擦和反复碾磨能力增强,因此摩擦系数减小。然而,超声波功率为200 W时电沉积的 Co-Mo-P 镀层摩擦系

数反而增大,达到0.61。这是由于超声波功率过高导致 Co-Mo-P 镀层内应力分布不均匀形成裂纹,其硬度减小,抵抗局部塑性变形能力变弱。在对磨件挤压刮擦和反复碾磨作用下,镀层中裂纹会进一步扩展,导致磨损程度加重,因此摩擦系数增大。

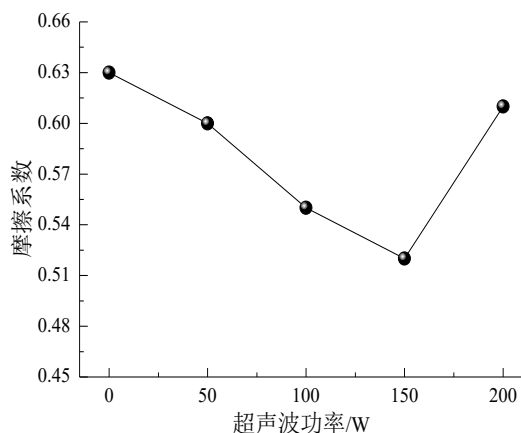


图5 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

### 2.3 超声波功率对 Co-Mo-P 镀层耐腐蚀性能影响

图6为不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层电化学阻抗谱,表2列出电化学阻抗谱拟合结果。从图6(a)看出,不同 Co-Mo-P 镀层的 Nyquist 图谱只显示一个容抗弧,并且形状相似。但随着超声波功率逐渐提高到200 W,容抗弧半径呈现先增大后减小趋势,电荷转移电阻相应地由  $2396.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$  提高到  $3623.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$  然后降低到  $2647.3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。超声波功率为150 W时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层具有最大的容抗弧半径和最高的电荷转移电阻  $3623.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,相比于常规 Co-Mo-P 镀层提高了  $1227 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

电荷转移电阻表征镀层表面发生电荷转移过程的难易程度,越高意味着镀层的耐腐蚀性能越好<sup>[20-22]</sup>。在一定范围内提高超声波功率使 Co-Mo-P 镀层中孔洞减少,晶粒结合更紧密,阻挡腐蚀介质侵蚀能力增强,增大了腐蚀反应阻力从而阻碍电荷转移。因此,Co-Mo-P 镀层的耐腐蚀性能逐步提高,超声波功率为150 W时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层表现出优良的耐腐蚀性能。然而,超声波功率过高导致 Co-Mo-P 镀层中孔洞增多并且出现裂纹,为腐蚀介质较快侵入镀层内部提供了通道,使得腐蚀反应阻

力减小,电荷转移电阻降低,表现为镀层的耐腐蚀性能变差。

从图 6(b)看出,在  $10^5$  Hz 到  $10^2$  Hz 频率范围内,不同 Co-Mo-P 镀层的频率-相位角图谱只显示一个宽化峰,但最大相位角存在差异。随着超声波功率逐渐提高到 200 W,最大相位角呈现先增大后减小趋势。研究表明,最大相位角能表征材料发生腐蚀的难易程度,一般情况下,最大相位角越高意味着材料的耐腐蚀性能越好<sup>[23-24]</sup>。超声波功率为 150 W

时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层最大相位角达到  $68.2^\circ$ ,相比于常规 Co-Mo-P 镀层增大了约  $10^\circ$ ,这进一步表明在一定范围内提高超声波功率有助于 Co-Mo-P 镀层的耐腐蚀性能逐步提高,并且超声波功率为 150 W 时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层表现出优良的耐腐蚀性能。然而,超声波功率为 200 W 时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层最大相位角减小到  $59.7^\circ$ ,这是由于超声波功率过高导致 Co-Mo-P 镀层中孔洞增多而且出现裂纹,容易发生腐蚀,因此耐腐蚀性能变差。

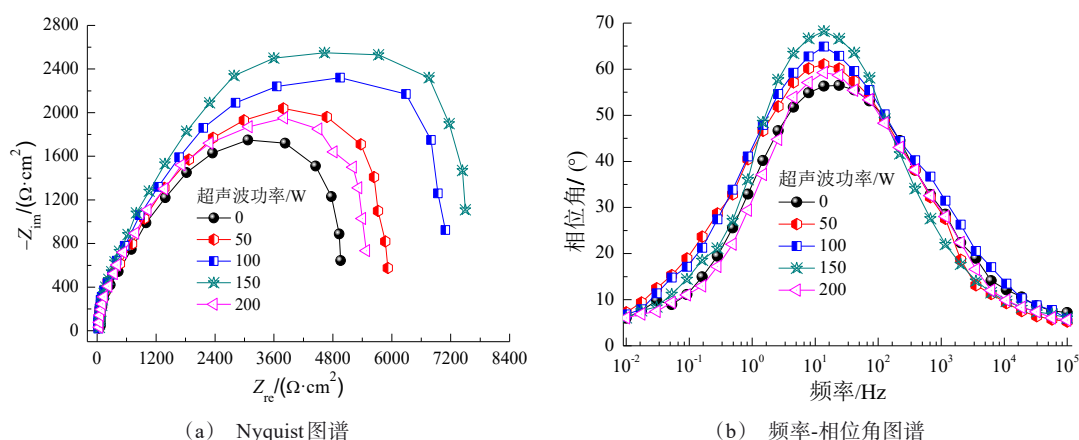


图 6 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层电化学阻抗谱

Fig.6 Electrochemical impedance spectroscopy of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

表 2 电化学阻抗谱拟合结果

Tab.2 Electrochemical impedance spectroscopy fitting results

超声波功率/W	电荷转移电阻/ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	最大相位角/( $^\circ$ )
0	2396.2	58.1
50	2860.0	61.0
100	3425.1	64.9
150	3623.2	68.2
200	2647.3	59.7

## 2.4 超声波功率对 Co-Mo-P 镀层磁性能的影响

图 7 为不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层磁滞回线,图 8 为根据磁滞回线得到的矫顽力和饱和磁化强度。由图 8 可知,随着超声波功率逐渐提高到 200 W,矫顽力和饱和磁化强度都呈现先增大后减小趋势。超声波功率为 150 W 时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层具有最大的矫顽力 769.3 Oe 和饱和磁化强度  $92.7 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ,相比于常规 Co-Mo-P 镀层分别

提高 467.7 Oe、 $31.3 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ,也明显高于文献[25]报道的 Co-Fe 镀层的矫顽力(100.3 Oe)和饱和磁化强度( $41.77 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ )以及文献[26]报道的 Co-P 镀层的矫顽力(12.82~13.52 Oe)和饱和磁化强度( $18.93 \sim 28.02 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ),表现出优良的磁性能。根据磁化理论,材料的矫顽力主要与晶粒大小及致密性有关,饱和磁化强度则与材料中磁性元素(钴、镍等)含量有关。

结合上述分析,在一定范围内提高超声波功率起到较好的细化晶粒效果,促使晶粒大小趋于均匀,结合更紧密,Co-Mo-P 镀层的致密性逐步改善,因此矫顽力增大。另外,在一定范围内提高超声波功率有助于 Co-Mo-P 镀层增厚,Co 元素总量升高,因此饱和磁化强度增大。然而,当超声波功率达到 200 W,矫顽力和饱和磁化强度都明显减小。这是由于超声波功率过高导致 Co-Mo-P 镀层的晶粒大小不均匀,致密性降低,并且镀层变薄,Co 元素总量

降低,因此矫顽力和饱和磁化强度都明显减小,磁性能下降。

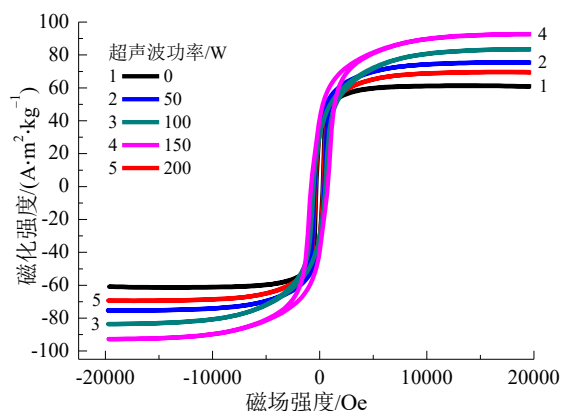


图 7 不同超声波功率下电沉积的 Co-Mo-P 镀层磁滞回线

Fig.7 Hysteresis loop of Co-Mo-P coatings electrodeposited under different ultrasonic power

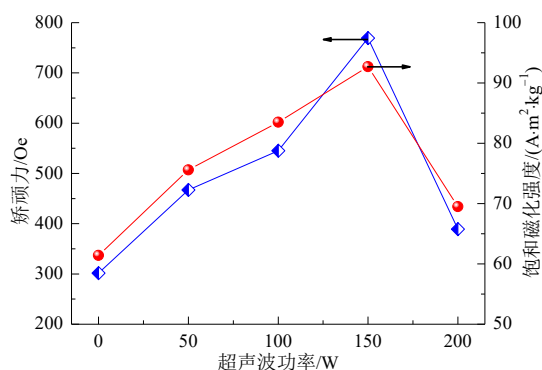


图 8 不同 Co-Mo-P 镀层的矫顽力和饱和磁化强度

Fig.8 Coercivity and saturation magnetization of different Co-Mo-P coatings

### 3 结论

(1)改变超声波功率对 Co-Mo-P 镀层的形貌、厚度、硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能和磁性能都有较大影响,但是对镀层成分无显著性影响。超声波功率为 150 W 时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层成分较均匀,孔洞缺陷少且晶粒结合更紧密,其厚度达到 11.4  $\mu\text{m}$ ,表现出高硬度、优良的耐磨性能、耐腐蚀性能以及磁性能。与常规 Co-Mo-P 镀层相比,超声波功率为 150 W 时,电沉积的 Co-Mo-P 镀层硬度提高约 80 HV,摩擦系数降低约 17.5%,电荷转移电阻提高了 1227  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,最大相位角增大了约 10°,矫顽力和饱和磁化强度分别提高了 467.7 Oe、31.3  $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 。

kg。

(2)在一定范围内提高超声波功率起到较好的强化传质效果,使沉积速度加快且临界晶核半径减小,晶粒大小均匀且结合更紧密,Co-Mo-P 镀层的致密性逐步改善同时厚度增加。因此,Co-Mo-P 镀层阻碍局部塑性变形能力、承受对磨件挤压刮擦和反复碾磨能力以及抑制腐蚀反应能力增强,并且镀层中 Co 元素总量升高,从而表现为性能提高。然而,超声波功率过高导致 Co-Mo-P 镀层中孔洞增多且出现裂纹,致密性和厚度降低,其性能变差。

### 参考文献

- [1] 张乐怡, 苏勇, 孙雅茹, 等. Co-Fe-B 合金共沉积电结晶行为和性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(10): 38-43.
- [2] Zhang Y G, Sun W C, Ma M, et al. Electrodeposition, microstructure and property of Co-WC composite coatings[J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 126-138.
- [3] Wang G R, Hung P S, Chang S Y. Conformal electrodeposition of Co-Ni to improve the mechanical properties of three dimensional ordered macroporous Ni films[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(2): 1-7.
- [4] 刘健健. 连铸结晶器表面 Co-Ni-石墨烯(G/GO)复合镀层的制备及性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [5] 余云丹, 孙丽侠, 楼俊尉, 等. 磁场下电沉积制备 Co-W 合金镀层[J]. 电镀与环保, 2012, 32(4): 1-3.
- [6] 周巧英, 葛洪良, 卫国英, 等. 电沉积 Co-W 合金薄膜的性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(z2): 155-158.
- [7] 王俊. 机械轴承表面电沉积制备 Co-W/ZrO<sub>2</sub> 复合镀层[J]. 电镀与环保, 2019, 39(6): 23-25.
- [8] 王府. 电沉积制备 Co-Mo 复合镀层及其耐腐蚀性能研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- [9] 关晓洁, 钟美娥, 肖耀坤, 等. 电沉积条件对 Pd-Co 合金微观相结构和耐蚀性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(3): 378-383.
- [10] Oladapo B I, Zahedi S A, Awe A O, et al. Analysis on corrosion resistant of electrodeposited ternary Co-W-P alloy[J]. Applied Surface Science, 2019, 475: 627-632.
- [11] Liu C S, Su F H, Liang J Z. Fabrication of Co-Ni-P film with excellent wear and corrosion resistance by electroplating with supercritical CO<sub>2</sub> emulsion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28: 2489-2498.

- [12] Ma C, Wang S C, Wang L P, et al. The electrodeposition and characterisation of low-friction and wear-resistant Co-Ni-P coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235(25): 495-505.
- [13] Ma C, Wang S, Walsh F C. The electrodeposition of nanocrystalline Cobalt-Nickel-Phosphorus alloy coatings: a review[J]. The International Journal of Surface Engineering and Coatings, 2015, 93(5): 275-280.
- [14] 王雷, 姜秉元. 电沉积Ni-Mo-P合金镀层的组织结构与耐腐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(6): 246-248.
- [15] Han J X, Bian Y X, Su X, et al. Investigation of Ni-Mo-P coating electrodeposition under stabilized magnetic field and its hydrogen evolution activity[J]. Advanced Materials Research, 2011, 399-401: 1403-1407.
- [16] 杨艳玲, 申勇峰, 陈进耿, 等. 超声波搅拌-脉冲电沉积法制备纳米镍[J]. 金属学报, 2007, 43(8): 883-888.
- [17] 侯峰岩, 路庆华, 谭兴海, 等. Co-Ni合金镀层组织结构及性能研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 123-126.
- [18] 吕臣凯, 盛敏奇, 钟庆东. 超声波作用下电沉积纳米晶Co-W合金镀层[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(2): 192-196.
- [19] Chang K, Dong Y, Zheng G, et al. Friction and wear properties of TiAlN coated tools with different levels of surface integrity[J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 4433-4443.
- [20] Tian H L, Wang C L, Guo M Q, et al. Microstructures and high-temperature self-lubricating wear-resistance mechanisms of graphene-modified WC-12Co coatings [J]. Friction, 2021, 9: 315-331.
- [21] 林兰芳, 戴品强, 林绿波. 载荷对纳米晶Co-Ni-Fe合金镀层摩擦磨损性能的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(4): 293-296.
- [22] 朱庆军, 汪彬彬, 赵霞, 等. 工作电压对微弧氧化6061铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(4): 274-278.
- [23] 王建利, 裴娟, 袁姣娜, 等. Sn元素对生物医用镁合金Mg-4.5Zn-Sn显微组织和耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(6): 26-34.
- [24] 周光波, 彭湘桂, 陈加辉, 等. 光电子器件外壳脉冲电镀镍钴合金工艺及其耐蚀性[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 356-363.
- [25] 周小卫. 钛基金属表面双脉冲电沉积纳米CeO<sub>2</sub>增强镍基镀层的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2014.
- [26] 王丹, 钟庆东, 杨健, 等. 3种成分中碳合金钢的显微组织及在含Cl<sup>-</sup>环境下的耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2022, 46(9): 16-23.
- [27] 王子涵, 杨滨, 马岩, 等. 脉冲频率对电沉积CoFe合金镀层组织和磁性能的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 10-14.
- [28] 赵钦兰. 电沉积钴基合金镀层的制备及其性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.