

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.06.008

硝酸钇对黄铜基体电沉积 Co-W-P 合金镀层性能的影响

沈丽^{1*}, 韩杰²

(1. 新乡职业技术学院, 河南 新乡 453006;

2. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 选用硝酸钇作为添加剂加到镀液中, 研究了硝酸钇添加量对黄铜基体上电沉积 Co-W-P 合金镀层的外观、微观形貌、组织结构、硬度、抗磨损性能与抗划伤性能的影响。结果表明: 改变硝酸钇添加量对 Co-W-P 合金镀层的外观、覆盖能力、衍射峰位置以及择优取向无明显影响, 但添加适量硝酸钇使 Co-W-P 合金镀层中孔洞数量减少, 表面致密性逐步改善, 硬度增大, 抗磨损性能与抗划伤性能明显提高。当硝酸钇的添加量为 3 g/L, 电沉积的 Co-W-P 合金镀层表面平整且致密, 呈现(200)晶面择优取向, 硬度达到 536.8 HV, 磨损量仅为 4.6 mg/cm² 并且表面磨损程度轻, 表现出良好的抗磨损性能与抗划伤性能。

关键词: Co-W-P 合金镀层; 电沉积; 硝酸钇; 抗磨损性能; 抗划伤性能

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

Effect of yttrium nitrate on properties of Co-W-P alloy coatings electrodeposited on brass matrix

Shen Li^{1*}, Han Jie²

(1. Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Yttrium nitrate was added to the plating solution as an additive, and the effect of the addition amount of yttrium nitrate on the appearance, microstructure, hardness, wear resistance and scratch resistance of the Co-W-P alloy coatings electrodeposited on brass matrix was studied. The results show that changing the addition amount of yttrium nitrate has no obvious effect on the appearance, covering ability, position of diffraction peak and preferred orientation of Co-W-P alloy coatings, but adding appropriate amount of yttrium nitrate can reduce the number of holes in Co-W-P alloy coating, improve the surface compactness gradually, increase the hardness and improve the wear resistance and scratch resistance obviously. The Co-W-P alloy coating electrodeposited with yttrium nitrate 3 g/L has flat and dense surface, showing a preferred orientation of (200) crystal plane. The hardness reaches 536.8 HV, the wear amount is only 4.6 mg/cm² and the surface wear degree is light, showing good wear resistance and scratch resistance.

Keywords: Co-W-P alloy coating; electrodeposition; yttrium nitrate; wear resistance; scratch resistance

收稿日期: 2024-01-16

修回日期: 2024-03-04

*通信作者: 沈丽(1979—), 副教授, 主要研究方向: 机械设计与制造、表面工程等, email: Edu_shen006@126.com

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(182300410200)

Co基合金镀层具有较低的电阻温度系数、良好的磁性能、耐腐蚀性能和高温抗氧化性能,作为一种防护性和功能性镀层在航空航天、医疗、电子和化工等领域具有重要的应用价值^[1-3]。然而,Co基合金镀层的力学性能(包括硬度、强度、抗磨损性能、抗划伤性能、疲劳性能等)不佳,导致其应用广度受到限制。近年来,国内外学者致力于提高Co基合金镀层的力学性能,从调控镀液成分、优化制备工艺参数等方面开展了一些工作。

稀土元素及稀土化合物具有特殊的电子层结构和强吸附特性,已被证实可以用作添加剂,在电沉积制备纯Ni镀层、纯Zn镀层、纯Fe镀层以及Ni基合金镀层中起到特殊作用^[4-8],如加速参与沉积过程的离子输送、净化并活化沉积面、促进形核等^[9-13],使镀层的物化性能和力学性能得到明显提高。但将稀土元素及稀土化合物用作添加剂电沉积Co基合金镀层,目前鲜见报道。鉴于Co基合金镀层在多个领域具有重要的应用价值,采取措施提高其力学性能非常必要。本文以稀土化合物硝酸钇作为添加剂,采用电沉积方法在黄铜基体上制备6种不同Co-W-P合金镀层,主要研究硝酸钇添加量对Co-W-P合金镀层的微观形貌、组织结构与力学性能的影响,旨在获得最佳的硝酸钇添加量,从而提高Co-W-P合金镀层的力学性能。

1 实验

1.1 基体预处理

实验采用黄铜作为基体,其化学组成如表1所示。基体预处理流程为:双面抛光(抛光机)→清水冲洗(去离子水)→脱脂除油(40 g/L氢氧化钠+15 g/L碳酸钠,60℃,10 min)→清水冲洗(去离子水)→酸洗(10 vol.%盐酸,常温1 min)→清水冲洗(去离子水)→烘干(吹风机)。

表1 黄铜的化学组成

Tab.1 Chemical composition of brass

元素	Cu	Fe	Pb	Ni	Sn	Zn
质量分数/%	58~60	0.70~1.50	0.40	0.05	0.01	余量

1.2 电沉积Co-W-P合金镀层

称取35 g硫酸钴、15 g钨酸钠、10 g次亚磷酸钠、28 g硫酸钠、90 g柠檬酸氢二铵和40 g硼酸,依次加入盛有适量去离子水的烧杯中。然后将烧杯放

在磁力搅拌器(ZNCL-BS型)上,持续搅拌2 h使所有试剂完全溶于去离子水并混合均匀,配成6000 mL基础镀液。将基础镀液等分6份,都用容积为1000 mL的烧杯盛放,并标号1~6。往1~5号烧杯中相对应添加1 g硝酸钇、2 g硝酸钇、3 g硝酸钇、4 g硝酸钇、5 g硝酸钇,都通过磁力搅拌使硝酸钇完全溶解与基础镀液混合均匀。

选用铅板作为阳极,预处理后的黄铜作为阴极,分别与稳压电源的正极、负极相连,然后浸入镀液中,调整铅板与黄铜的间距为3 cm。共进行6组实验,镀液温度稳定在(60±1)℃,电流密度设定2 A/dm²,电沉积用时均为80 min。制备的镀层分别标记为Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层、Co-W-P/5Y合金镀层、Co-W-P合金镀层。

1.3 表征与性能测试

在自然光照下肉眼观察不同镀层的外观,并拍摄宏观照片。利用场发射扫描电镜(MERLIN Compact型)表征不同镀层的微观形貌,并利用能谱仪(X-MAX50型)对不同镀层的化学组成进行分析。

利用精密电子天平(JC-TP50/B型,精度为10⁻⁴ g)称量裸基体的质量以及电沉积Co-W-P合金镀层后基体的质量,做差计算Co-W-P合金镀层的沉积速率,即单位时间内在单位面积上电沉积的Co-W-P合金镀层质量。

利用X射线衍射仪(D8 Advance型)分析不同镀层的组织结构,设定扫描角度为30~85°,步长为0.02°,扫描速度为4°/min。

利用维氏硬度计(HVS-30型)测试不同镀层的硬度,设定条件为:施加法向载荷0.49 N,保持10 s后卸载。遵循多次测试取平均值的原则,硬度值保留一位小数。

利用摩擦磨损试验机(UMT TriboLab型)进行干摩擦实验,参考磨损量和磨痕形貌评价不同镀层的抗磨损性能。测试条件为:直径4 mm的Si₃N₄钢球作为对磨件、往复摩擦速度10 mm/s、施加法向载荷5 N、摩擦时间10 min。实验前后均利用精密电子天平(XT120A型)称重,计算得到不同镀层的磨损量。另外,实验结束后利用扫描电镜表征不同镀层表面磨痕形貌。

利用自动划痕仪(WS-2005型)进行划痕实验,

参考施加不同法向载荷情况下产生的滑动摩擦力变化曲线评价不同镀层的抗划伤性能。测试条件为:在不同镀层表面施加变化的法向载荷0~60 N,加载速率10~100 N/min,镀层试样相对于划痕仪压头沿着水平方向移动,划痕长度6 mm。

2 结果与讨论

2.1 硝酸钇对Co-W-P合金镀层外观和微观形貌的影响

图1为不同镀层的外观。观察发现,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层都具有暗灰色外观,并且完全覆盖黄铜表面无漏镀区域。这表明改变硝酸钇添加量对Co-Mo-P合金镀层的外观及覆盖能力无明显影响,但不同镀层的微观形貌或许存在差异。

图2为不同镀层的微观形貌。可以看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层均呈现类似胞状形貌特征。但不同之处在于,常规Co-W-P合金镀层中孔洞数量多,表面凹凸程度较严重显得粗糙。Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层和Co-W-P/3Y合金镀层中孔洞数量依次减少,表面凹凸程度降

低,致密性逐步改善。尤其是Co-W-P/3Y合金镀层,其孔洞很少,表面平整且致密。而Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层中孔洞数量呈增多趋势,表面凹凸程度加重,致密性变差。孔洞是由于电沉积过程中伴随着析氢副反应形成,由于析氢副反应无法避免,这导致不同镀层中或多或少存在孔洞。但通过影响析氢副反应的程度以及析氢难易程度,可使镀层中孔洞减少。

对比图2(a)~2(d)可知,添加适量硝酸钇使Co-W-P合金镀层中孔洞数量减少。其原因是添加到镀液中的硝酸钇溶解产生钇离子,具有强吸附特性,能吸附在阴极表面逐渐形成一层膜,增大阴极极化程度,提高氢离子的析出电位阻碍氢气析出^[14-15],通过抑制析氢副反应从而使Co-W-P合金镀层中孔洞数量减少。在一定范围内随着硝酸钇的添加量增多,溶解产生的钇离子在阴极表面的吸附效应越显著,形成表面膜有效抑制了析氢副反应,氢气很难析出,因此Co-W-P合金镀层中孔洞数量呈减少趋势。然而,当硝酸钇的添加量超过一定限度,由于过量硝酸钇吸附在阴极表面会造成阴极附近电流分布不均,降低阴极极化程度。镀液的分散能力主要与镀液电导率和阴极极化程度有关,虽然添加过量硝酸钇并未影响镀液中的离子浓度,但会影响镀液稳定性,导致离子迁移减慢或由定向迁移变成无方向性迁移,

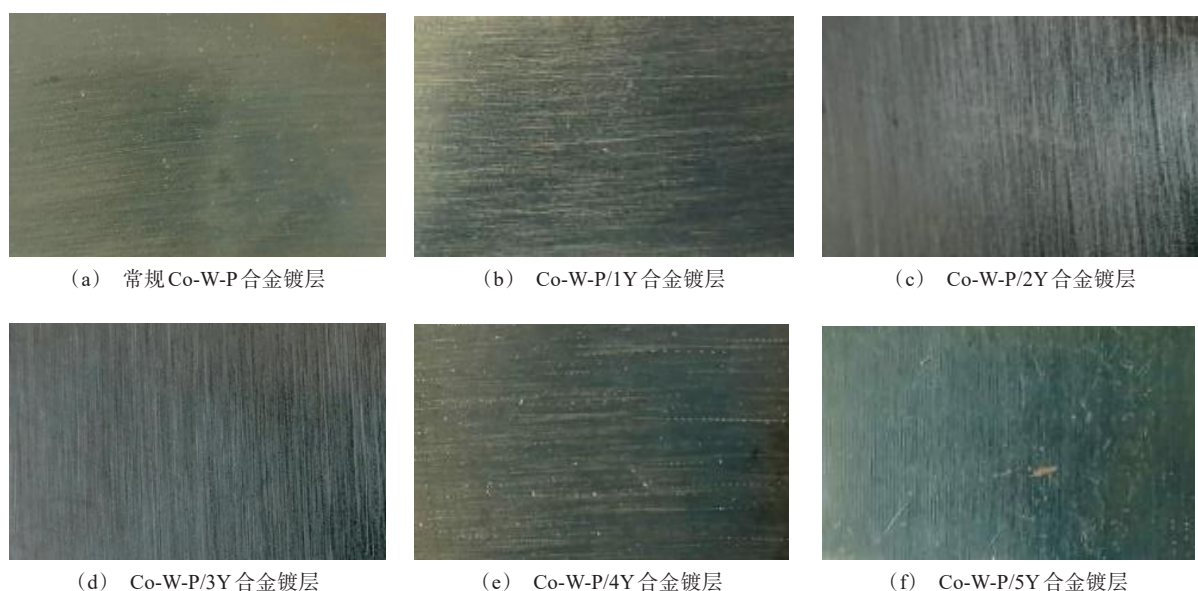


图1 不同镀层的外观

Fig.1 Appearance of different coatings

表现为镀液电导率降低。加之阴极极化程度降低,共同导致镀液分散能力下降,引起浓差极化,促使析氢副反应剧烈发生,氢气易析出且析氢量增多。因

此,当硝酸钨的添加量超过一定限度,Co-W-P合金镀层中孔洞数量增多,表面致密性逐渐变差。

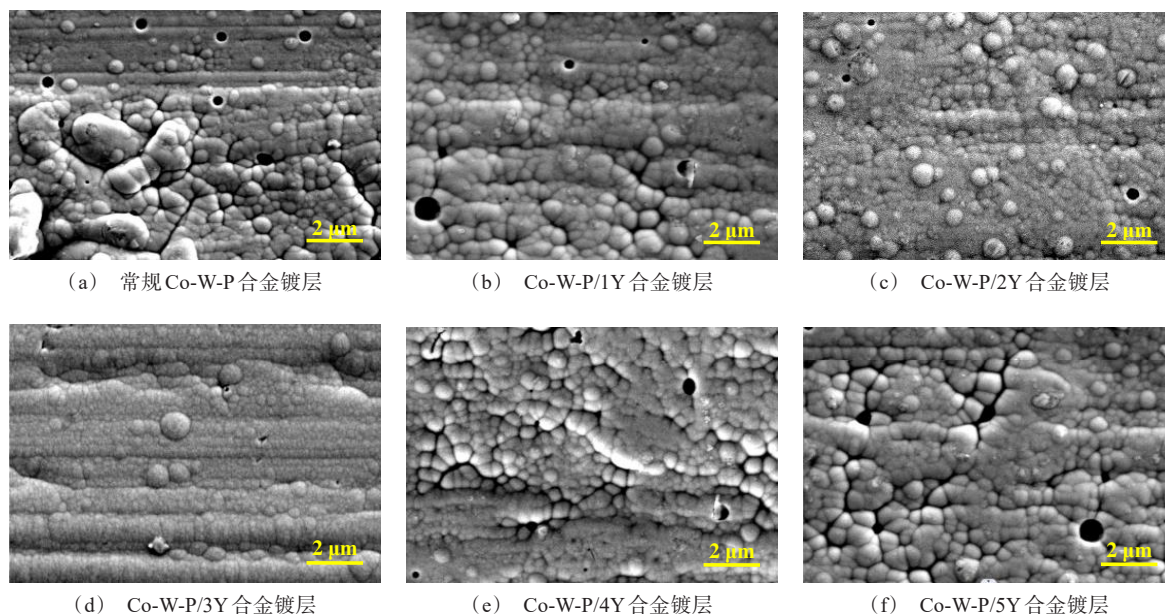


图2 不同镀层的微观形貌

Fig.2 Microstructure of different coatings

图3为不同镀层的沉积速率。从图3看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层和Co-W-P/3Y合金镀层的沉积速率依次增大,从 $37.8 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 增至 $46.5 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。这是由于添加适量硝酸钨能增大阴极极化程度从而增强镀液分散能力,参与电沉积过程的离子输送速度加快,阴极附近消耗的离子得到及时补充,保障Co-W-P合金镀层电沉积过程顺利进行。另外,适量硝酸钨吸附能改善阴极附近电流分布,加速钴离子在阴极表面还原。因此,Co-W-P合金镀层的沉积速率增大。然而,Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的沉积速率依次减小,从 $41.9 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 降至 $38.4 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。这是由于当硝酸钨的添加量超过一定限度导致镀液分散能力下降,参与电沉积过程的离子输送减慢,阴极附近消耗的离子难以及时补充,引起浓差极化造成析氢副反应加剧,钴离子在阴极表面还原受阻,即阻碍Co-W-P合金镀层电沉积过程。另外,过量硝酸钨吸附在阴极表面造成阴极附近电流分布不均匀,也会导致Co-W-P合金镀层的沉积速率减小。通过分析不同镀层的沉积速

率,进一步表明添加适量硝酸钨能增大阴极极化程度,增强镀液分散能力,抑制析氢副反应从而促进Co-W-P合金镀层电沉积。而添加过量硝酸钨导致镀液分散能力下降,析氢副反应剧烈发生,阻碍Co-W-P合金镀层电沉积。

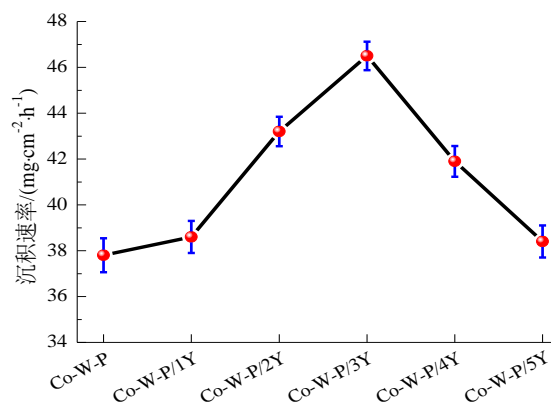


图3 不同镀层的沉积速率

Fig.3 Deposition rate of different coatings

2.2 硝酸钨对Co-W-P合金镀层组织结构的影响

图4为不同镀层的XRD图谱。由图4可知,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/

2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层都具有晶态结构,它们的XRD图谱上显示3个位置基本重叠的衍射峰,分别对应(111)晶面、(200)晶面、(220)晶面。就衍射峰强度而言,(200)晶面对应最强衍射峰,(111)晶面对应最弱衍射峰。改变硝酸钇添加量对衍射峰强度按照由高到低排序无明显影响。

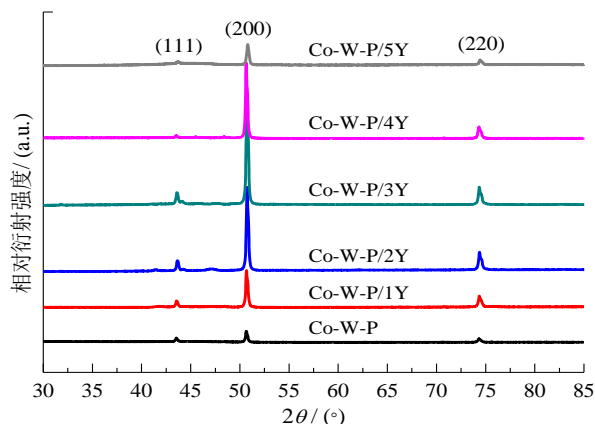


图4 不同镀层的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of different coatings

图5为不同镀层各晶面的织构系数。从图5看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的(200)晶面织构系数 $TC_{(200)}$ 均最大,分别为50.24%、65.15%、64.24%、66.01%、75.08%、52.37%。研究表明,某一晶面的织构系数 $TC_{(hkl)}$ 大于 $1/n$ (n 为晶面数量),意味着镀层的晶面取向是有序的,并且 $TC_{(hkl)}$ 越大反映出(hkl)晶面的择优取向程度越强^[16-17]。常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的 $TC_{(200)}$ 均超过50%(大于33.3%),表明它们均呈现(200)晶面择优取向。

2.3 硝酸钇对Co-W-P合金镀层硬度的影响

图6为不同镀层的硬度。从图6看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层和Co-W-P/3Y合金镀层的硬度依次增大,相应从440.2 HV增至536.8 HV。而Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的硬度依次减小,相应从483.6 HV降至450.3 HV。这表明添加适量硝酸钇使Co-W-P合金镀层的硬度明显提高,其原因是适量硝酸钇凭借强吸附效应有效抑制电沉积过程中

氢气析出,使Co-W-P合金镀层中孔洞数量减少,表面致密性逐步改善,受外力情况下抵抗局部变形能力增强。但当硝酸钇的添加量超过一定限度,过量硝酸钇导致电沉积过程中氢气易析出,Co-W-P合金镀层中孔洞数量增多,表面致密性变差,受外力情况下抵抗局部变形能力下降,所以Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的硬度相对减小。

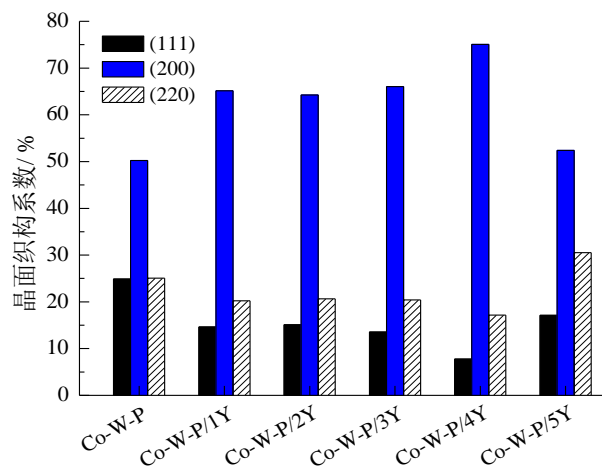


图5 不同镀层各晶面的织构系数

Fig.5 Texture coefficient of each crystal surface of different coatings

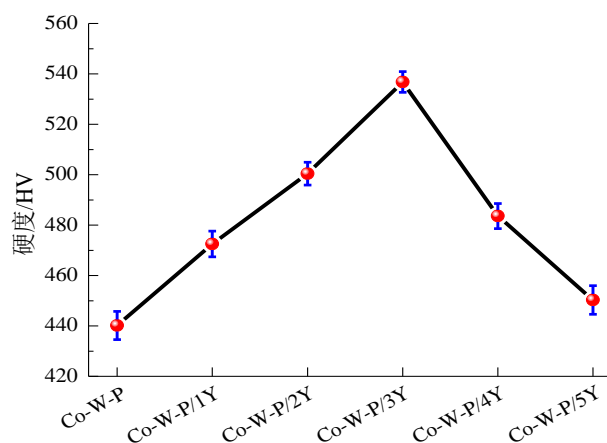


图6 不同镀层的硬度

Fig.6 Hardness of different coatings

2.4 硝酸钇对Co-W-P合金镀层抗磨损性能的影响

图7为不同镀层的磨损量。从图7看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层和Co-W-P/3Y合金镀层的磨损量依次降低,分别为8.5 mg/cm²、7.2 mg/cm²、5.4 mg/cm²、4.6 mg/cm²,这表明它们的抗磨损性能逐步增强。其原因是添加适量硝酸钇使得Co-W-P合金镀层中

孔洞数量减少,表面趋于致密,硬度明显提高赋予Co-W-P合金镀层较强的抵抗局部变形和外力破坏的能力。Co-W-P/3Y合金镀层具有最低的磨损量,其抗磨损性能良好。然而,Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层的磨损量依次增加,它们的抗磨损性能与Co-W-P/3Y合金镀层相比变差。其原因是添加过量硝酸钇导致Co-W-P合金镀层中孔洞数量增多,表面致密性变差,抵抗局部变形和外力破坏的能力下降。

图8为不同镀层表面磨痕形貌。从图8(a)看出,常规Co-W-P合金镀层表面出现较严重的撕裂和剥落现象,在磨损面附着许多形态各异且大小不等的碎屑。从图8(b)、8(c)和8(d)看出,Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层和Co-W-P/3Y合金镀层表面都出现撕裂和剥落现象,在磨损面也附着一些形态各异且大小不等的碎屑。但与常规Co-W-P合金镀层相比,它们的磨损程度依次减轻。其原因是添加适量硝酸钇使Co-W-P合金镀层表面凹凸程度降低,致密性逐步改善并且硬度明显提高,承受外力能力以及在外力作用下抵抗变形和破坏的能力

增强。Co-W-P/3Y合金镀层表面磨损程度最轻,进一步表明其抗磨损性能良好。从图8(e)和8(f)看出,Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层表面撕裂和剥落程度依次加重,在磨损面附着的碎屑增多。与Co-W-P/3Y合金镀层相比,它们的抗磨损性能较差。

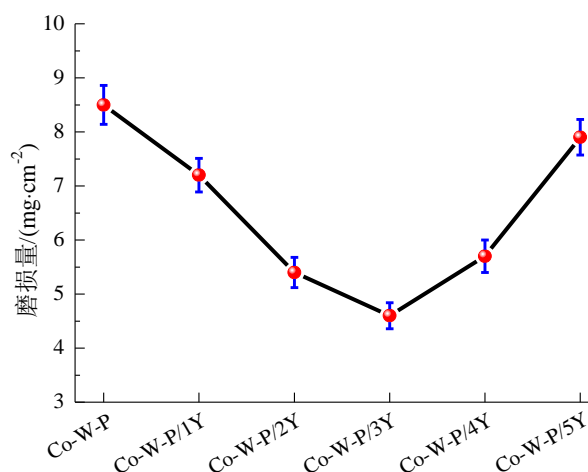


图7 不同镀层的磨损量

Fig.7 Wearing quality of different coatings

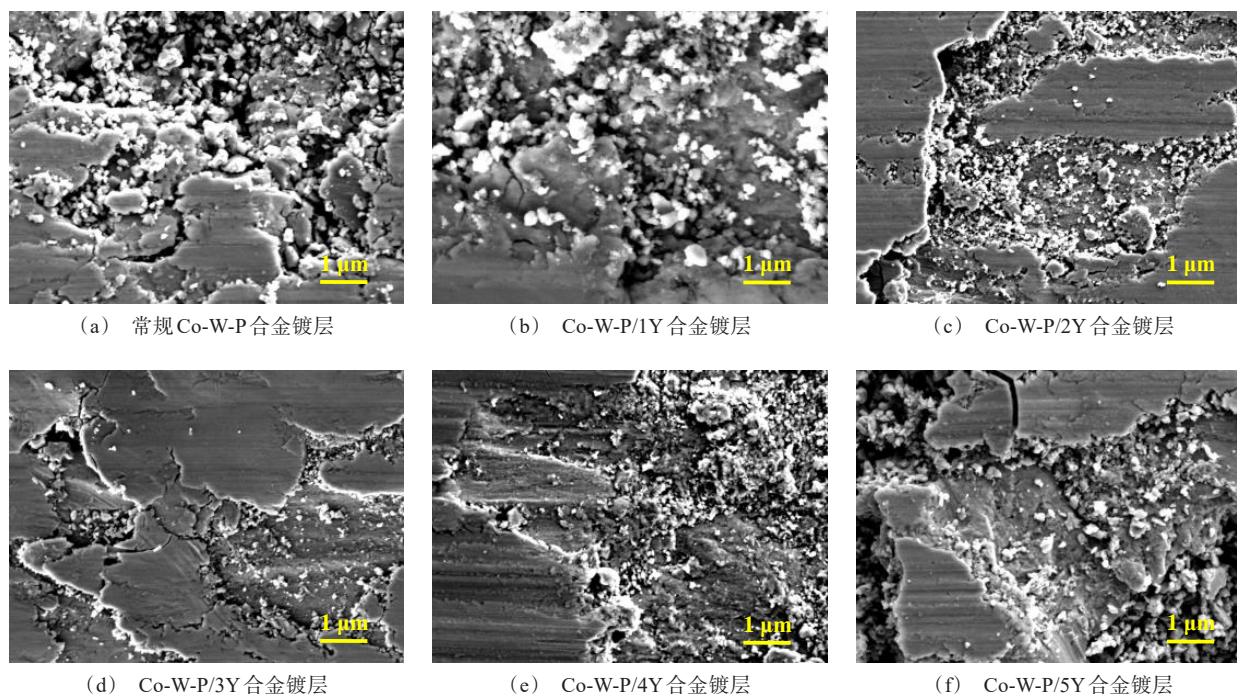


图8 不同镀层表面磨痕形貌

Fig.8 Surface wear morphology of different coatings

2.5 硝酸钕对Co-W-P合金镀层抗划伤性能的影响

图9为施加不同法向载荷情况下不同镀层产生的滑动摩擦力变化曲线。从图9看出,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层产生的滑动摩擦力均随着施加的法向载荷增大呈现增大趋势。但滑动摩擦力的变化幅度不同,反映出不同镀层的抗划伤性能存在差异。滑动摩擦力是法向载荷与滑动摩擦系数的乘积,滑动摩擦系数主要与相互接触的表面状况(包括表面凹凸程度、致密性等)有关。当施加相同的法向载荷时,镀层表面凹凸程度越低,致密性越好,其滑动摩擦系数一般较低,产生的滑动摩擦力自然较小^[18-21]。

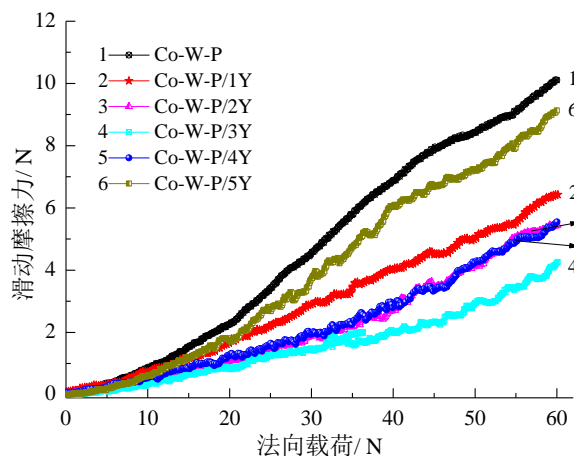


图9 施加不同法向载荷情况下不同镀层产生的滑动摩擦力变化曲线

Fig.9 Variation curves of sliding friction of different coatings generated under different normal loads

以施加40 N法向载荷为例,常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层、Co-W-P/2Y合金镀层、Co-W-P/3Y合金镀层、Co-W-P/4Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层在划痕实验过程中产生的滑动摩擦力分别为6.9 N、4.1 N、2.7 N、2.1 N、2.8 N、6.0 N。其中,Co-W-P/3Y合金镀层在划痕实验过程中产生的滑动摩擦力最小,可以反映出该镀层不易被划伤,抗划伤性能良好。原因归结为Co-W-P/3Y合金镀层表面凹凸程度低,致密性好并且硬度达到536.8 HV,赋予其较强的抵抗外力破坏能力。而常规Co-W-P合金镀层、Co-W-P/1Y合金镀层和Co-W-P/5Y合金镀层由于表面凹凸不平,致密性较差,加

之硬度较低导致抵抗外力作用下引起的局部变形能力弱,所以它们的抗划伤性能明显不如Co-W-P/3Y合金镀层。

3 结论

(1)采用电沉积方法在黄铜基体上制备出6种不同Co-W-P合金镀层,改变硝酸钕添加量对Co-W-P合金镀层的外观、覆盖能力、衍射峰位置以及择优取向无明显影响,但会影响Co-W-P合金镀层表面平整度和致密性,导致其硬度、抗磨损性能与抗划伤性能存在差异。当硝酸钕的添加量为3 g/L,电沉积的Co-W-P合金镀层表面平整且致密,呈现(200)晶面择优取向,硬度达到536.8 HV,并且表现出良好的抗磨损性能与抗划伤性能。

(2)向镀液中添加适量硝酸钕可以通过抑制电沉积过程中析氢副反应使Co-W-P合金镀层中孔洞数量减少,表面致密性逐步改善,硬度增大并且受外力情况下抗磨损和划伤能力增强。但添加的硝酸钕过量会导致电沉积过程中析氢副反应加重,Co-W-P合金镀层表面致密性变差,硬度呈减小趋势,并且受外力情况下抗磨损和划伤能力下降。

参考文献

- [1] 吕凯. 超声场中电沉积Co基合金镀层及相关工艺参数预测模型的建立[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [2] Nan X, Wang F, Xin S S, et al. Effect of process parameters on electrodeposition process of Co-Mo alloy coatings [J]. Coatings, 2023, 13(4): 665-680.
- [3] Rahman A, Chowdhury M A, Hossain N, et al. A review of the tribological behavior of electrodeposited cobalt (Co) based composite coatings[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 9: 100307.
- [4] 张庆, 谭俊, 谢凤宽, 等. 电流密度对喷射电沉积Co-Ni-Cr₃C₂复合镀层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 191-199.
- [5] Zamani M, Amadeh A, Baghal S M L. Effect of Co content on electrodeposition mechanism and mechanical properties of electrodeposited Ni-Co alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (2): 484-491.
- [6] Su F H, Liu C S, Huang P. Establishing relationships between electrodeposition techniques, microstructure and properties of nanocrystalline Co-W alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 557: 228-238.

- [7] Liu C S, Su F H, Liang J Z. Nanocrystalline Co-Ni alloy coating produced with supercritical carbon dioxide assisted electrodeposition with excellent wear and corrosion resistance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 292: 37-43.
- [8] 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.
- [9] 王炳英, 余俊, 牛庆玮, 等. 稀土元素对电沉积 Ni-W 镀层组织结构的影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(20): 93-95.
- [10] Chen H X, Wang K, Wang Z S. Effect of rare-earth (Ce, La) compounds on the microstructure, mechanical and electrochemical corrosion characteristics of electroplated Ni films[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2023, 11(2): 025010.
- [11] Zhou P W, Li W, Li Y, et al. Fabrication and corrosion performances of pure Ni and Ni-based coatings containing rare earth element Ce and graphene by reverse pulse electrodeposition[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(2): 75-81.
- [12] Zhang P Y, Xu Z Y, Zhang B, et al. Enhanced inhibition on hydrogen permeation during electrodeposition process by rare earth (RE=Ce) salt additive[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(29): 13803-13814.
- [13] Jin G, Lu B W, Hou D D, et al. Influence of rare earths addition on residual stress of Fe-based coating prepared by brush plating technology[J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(3): 336-340.
- [14] 孙万昌, 冯佩, 侯冠群, 等. 稀土钇对 Ni-W-ZrO₂ 复合镀层性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(6): 600-605.
- [15] 徐仰涛, 王雅宁. 稀土对金属电沉积过程及沉积层性能影响的研究现状[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(5): 1310-1319.
- [16] 王红星, 毛向阳, 沈彤. 纳米 SiC 颗粒对微米 Ni-SiC 复合镀层性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(6): 1560-1566.
- [17] 吕成斌, 吕鹏, 魏亚平, 等. 环保无氰电镀银镀层在人工汗液中的耐腐蚀性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(12): 88-92.
- [18] Shi G Q, Yu X D, Meng H, et al. Effect of surface modification on friction characteristics of sliding bearings: A review[J]. *Tribology International*, 2023, 177: 107937.
- [19] Wu H, Zhang S, Wu C L, et al. Electrochemical corrosion behavior in sulfuric acid solution and dry sliding friction and wear properties of laser-cladded CoCrFeNiNb_x high entropy alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 460: 129425.
- [20] 肖居鹏, 杨学锋, 李万洋, 等. 大型液压阻尼器销头激光熔覆 WC/Co06 涂层耐磨抗蚀性能研究[J]. *表面技术*, 2023, 52(3): 217-227.
- [21] Buzio R, Gerbi A, Bernini C, et al. Sliding friction and superlubricity of colloidal AFM probes coated by tribo-induced graphitic transfer layers[J]. *Langmuir*, 2022, 38(41): 12570-12580.