

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20161130003

电化学沉积镍基 MoS_2 复合镀层及其宽温域摩擦性能

李文生, 崔 帅, 何 玲, 李乾坤

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 为了降低纯镍镀层的摩擦因数, 研究镍基 MoS_2 复合镀层适用温度范围, 进一步提高金属机件在极端摩擦条件下的服役寿命。采用电化学沉积法在45钢基体表面制备不同 MoS_2 浓度的镍基固体润滑复合镀层。用复合电镀循环伏安曲线法研究复合镀层的电化学沉积规律, 采用XRD、SEM对复合镀层的组织结构及摩擦形貌进行分析探讨, 对比分析不同含量 MoS_2 复合镀层的摩擦磨损性能及机制。结果表明: MoS_2 的加入促进了阴极极化, 提高了镀层的结晶细致程度; 同时能显著降低镀层摩擦因数, 在 MoS_2 浓度为30 g/L的溶液中沉积的复合镀层在室温下的摩擦因数最低为0.02~0.03; 在400 ℃以下摩擦环境中, 复合镀层摩擦因数保持在0.02~0.05之间, 具有很好的润滑性能; 温度超过400 ℃时, MoS_2 将逐渐被氧化为 MoO_3 , 摩擦因数接近0.15, 失去润滑效果。

关键词: 自润滑复合镀层; 摩擦磨损; 宽温域

中图分类号: TG 174.44; TG 115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)03-0097-07

Electrochemical Deposited Ni- MoS_2 Composite Coatings and Its Tribological Behaviour in Wide Temperature Ranges

LI Wen-sheng, CUI Shuai, HE Ling, LI Qian-kun

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: In order to reduce the friction coefficient of pure nickel coating, and study the temperature range of Ni-based MoS_2 composite coating to extend the life of metal parts in extreme friction conditions. A kind of solid lubrication coatings with different MoS_2 contained concentrations were prepared on the 45 steel substrate by electro-chemical deposition. The cyclic voltammetry method was applied to investigate the electro-chemical depositing regulation of the composite coatings. Microstructure, wear surface, tribological properties and wear mechanism of the composite coatings with different MoS_2 were researched by XRD and SEM. The results show that the addition of MoS_2 can promote the cathode polarization and increase the crystallinity of the coating. The friction coefficient of the composite coatings significantly decreases, and the lowest friction coefficient at room temperature is about 0.02–0.03 with a MoS_2 content of 30 g/L. The friction coefficient of the composite coating changes from 0.02 to 0.05 under 400 ℃, which shows good lubrication performance. When the temperature is up to 400 ℃, the friction coefficient continuously increases to 0.15, because MoS_2 is gradually oxidized into MoO_3 , and the lubrication ability is lost.

Keywords: self-lubricating composite coatings; friction and wear; wide temperature range

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-04-19

网络出版日期: 2017-05-05 11:48; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170505.1148.004.html>

通讯作者: 李文生(1973—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 耐磨蚀材料及多功能金属陶瓷涂层; E-mail: Wensheng-li@sohu.com

基金项目: 国家国际科技合作项目(2015DFR51090); 国家自然科学基金(51674130); 国家高端外专项目(GDT20156200088)

Fund: Supported by International Science and Technology Cooperation Program of China (2015DFR51090), National Natural Science Foundation of China (51674130) and National High-end Foreign Experts Program of China (GDT20156200088)

引文格式: 李文生, 崔帅, 何玲, 等. 电化学沉积镍基 MoS_2 复合镀层及其宽温域摩擦性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 97-103.

LI W S, CUI S, HE L, et al. Electrochemical deposited Ni- MoS_2 composite coatings and its tribological behaviour in wide temperature ranges[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 97-103.

0 引言

随着国家对航空航天领域的重视与发展,拓展高精密仪器如人造卫星、航空火箭等在极端摩擦条件下的服役寿命尤为迫切。因常用的液体润滑剂在真空、极端温度条件下的局限^[1],实现真空、高温、高负荷、无油、强辐射和强腐蚀等苛刻环境下工作机械零部件耐磨表面的固体润滑非常重要^[2]。常用的固体润滑剂有MoS₂^[3-5]、WS₂^[6]、BN、PTFE^[7-9],固体润滑剂具有良好的润滑性能以及摩擦因数低等优点;镍镀层具有硬度高、耐磨损、耐腐蚀等优点,被广泛应用于汽车、电子通讯、航空航天等行业;实现镍与润滑颗粒的共沉积,赋予复合镀层金属的塑形和机械强度的同时,利用润滑颗粒的减磨性能进一步改善复合镀层的摩擦特性是有效的固体润滑方法。

MoS₂具有层状结构、较低的摩擦因数、优良的附着性以及高的抗压强度,在低温和高真空环境中具有高效润滑性能^[10],其作为润滑添加剂改善摩擦副耐磨性已有广泛研究。查柏林^[11]等人通过超音速等离子喷涂制备了镍包二硫化钼镀层,对比分析了镍包二硫化钼镀层与基体的结合强度及镀层在室温时的摩擦性能,但由于温度高,MoS₂在喷涂过程中易于氧化,摩擦因数在0.25~0.35之间变化,摩擦因数相对较高;林翠^[12]等人采用化学镀的方法在TC4钛合金表面制备了Ni-P-MoS₂复合镀层,研究了搅拌方式、表面活性剂对复合镀层质量的影响。化学镀具有良好的均镀能力和化学稳定性,但镀液制备复杂,时间长;孙建荣^[13]等人采用溅射法制备了MoS₂/W复合薄膜,复合薄膜结构致密,降低了MoS₂对环境的敏感性。溅射法对于靶材的要求严格,不适合大面积沉积。

电化学沉积法也是提高镀层耐磨、耐蚀、润滑性能的另一有效手段,电沉积层具有高密度、低孔隙率等优点且电化学工艺方法灵活。文中采用电化学沉积法制备Ni-MoS₂复合镀层,研究了MoS₂浓度对镍离子沉积影响规律及温度对复合镀层摩擦性能的影响规律,并探讨复合镀层的适用温度范围及磨损机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用化学分析纯六水合硫酸镍、氯化镍、硼

酸作为配制瓦特光亮镀镍的主要原料,溶液溶解后采用NaOH(0.1 mol/L)和H₂SO₄(0.1 mol/L)调节PH值达到要求,将试剂1-4丁炔二醇、香豆素、糖精、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)添加到瓦特光亮镀镍浴中,充分溶解后过滤,添加MoS₂颗粒(10、20、30和40 g/L)(平均粒径3~5 μm),将混合镀液充分搅拌。配制无水碳酸钠、磷酸三钠和氢氧化钠、硅酸钠碱性溶液对纯镍片及喷砂处理后的45钢片除油,并用蒸馏水洗净待用。配制50%HCl(体积分数)溶液待用,用于去除45钢基体表面氧化皮。

1.2 镀层制备

采用CS150电化学工作站,将预先配制好的混合镀液放入电解槽中,用纯镍片作为阳极(90 mm×10 mm),喷砂45钢(90 mm×10 mm×2 mm)作为阴极,采用DF-101集热式恒温加热磁力搅拌器,在50℃水浴下磁力搅拌混合镀液,搅拌速率控制在400 r/min,通过恒电流电解法在45钢基体上制备镍基MoS₂自润滑复合镀层。混合镀液及沉积工艺参数如表1所示。

表 1 混合镀液及沉积工艺参数	
Table 1 Mixed solution and deposition process parameters	
Composition	Parameters
NiSO ₄ ·6H ₂ O / (g·L ⁻¹)	250
NiCl ₂ ·6H ₂ O / (g·L ⁻¹)	45
H ₃ BO ₃ / (g·L ⁻¹)	40
Saccharin / (g·L ⁻¹)	1
1,4-butyenediol coumarin / (g·L ⁻¹)	0.3
Coumarin / (g·L ⁻¹)	0.1
CTAB	20 mg/g MoS ₂
pH	4.0
Temperature / °C	50
Current density / (A·dm ⁻²)	4
Time / min	90
MoS ₂ / (g·L ⁻¹)	10, 20, 30, 40

1.3 镀层组织和性能检测

采用CS150电化学工作站测试纯镍和复合电镀循环伏安曲线(CV),确定还原反应发生的电位范围。工作电极为Φ 3 mm的玻碳电极,对电极是铂电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),扫描速度为10 mV/s。采用Quanta 450 FEG场发射扫描电子显

显微镜(SEM)观察镀层表面、截面以及磨损形貌。采用EDS对镀层进行元素分析。

采用HT-1000高温往复摩擦磨损试验机测试镀层在25、100、200、300和400 $^{\circ}\text{C}$ 时的摩擦磨损性能。对偶件为GCr15钢球,直径为6 mm,硬度为62~66 HRC。载荷为20 N,频率为5 Hz,摩擦时间为10 min,滑移距离为5 mm。采用体积磨损量定量表征复合镀层的耐磨性能,在同一摩擦条件下进行摩擦,测定磨痕的表面轮廓,计算磨痕的体积,重复稳定后取3次平均值,用于表示复合镀层的磨损量。

2 结果与讨论

2.1 复合镀层的形貌和结构

图1是 MoS_2 颗粒浓度为0、10、20、30和40 g/L条件下,与镍共沉积制备镍基自润滑复合镀层的表面及截面形貌。如图1(c₁)(c₂)所示, MoS_2 浓度为30 g/L时,镀层表面最均匀,镀层最致密。因为CTAB作为一种阳离子表面活性剂, MoS_2 颗粒在水溶液中表面带负电荷^[14],CTAB阳离子表面活性剂的加入会中和 MoS_2 表面的负电荷, Ni^{2+} 和阳离子活性剂吸附在 MoS_2 表面,使得 MoS_2 表面形成带正电的离子氛,在静电作用下,带有同种电荷的颗粒之间相互排斥,使得颗粒彼此分散,能够有效的防止微粒团聚,在电场作用下容易向阴极移动,因此随着 MoS_2 颗粒浓度的增加,复合镀层越来越致密, MoS_2 浓度为10 g/L时,复合镀层最疏松,浓度为30 g/L时,镀层最致密。但活性剂含量过多时会出现饱和吸附,颗粒表面双电层受到压缩,使得分散效果和分散稳定性变差^[15]。因此, MoS_2 颗粒浓度为40 g/L时,Ni- MoS_2 复合镀层变得疏松,表面平整性变差。

图2为纯Ni镀层和Ni- MoS_2 复合镀层在不同 MoS_2 浓度下的XRD衍射图谱。纯镍镀层为晶态结构,不含其它物质,电沉积镍镀层中Ni相为FCC面心立方结构,主要晶面有(111)、(200)、(220)和(311)。添加 MoS_2 后,XRD衍射图谱中出现 MoS_2 衍射峰,且只出现 MoS_2 和Ni的衍射峰,无其它杂质衍射峰。随着 MoS_2 浓度的不断增加,镍的(111)、(200)、(220)和(311)晶面衍射峰的强度逐渐减小,半高宽增加。衍射峰的宽化说明其晶粒尺

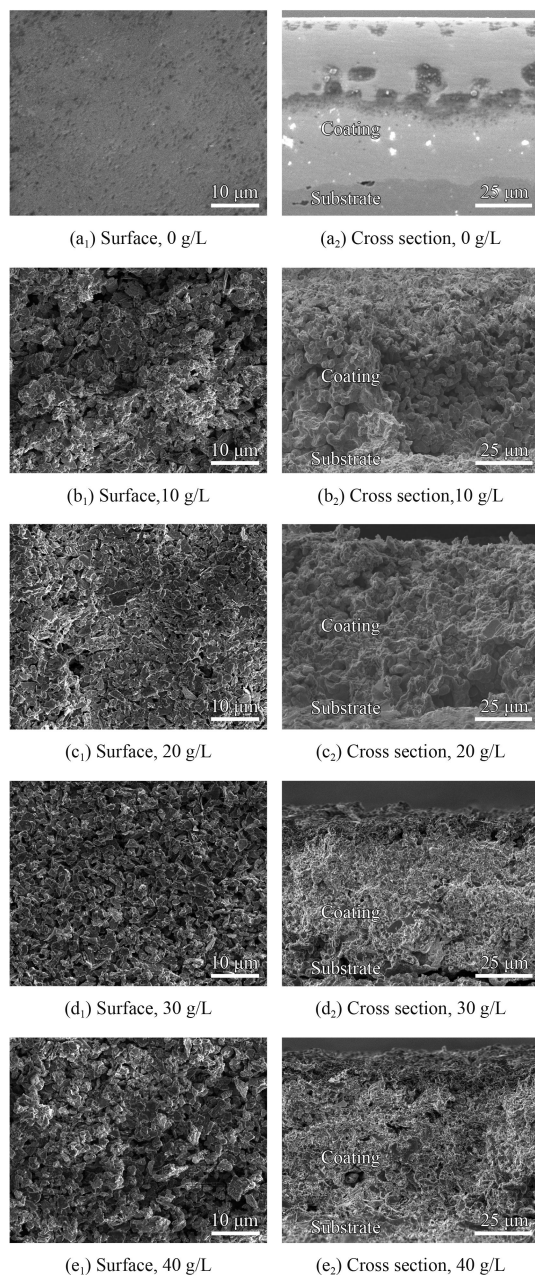


图1 Ni- MoS_2 复合镀层表面及横截面形貌

Fig.1 Surface and cross section morphologies of Ni- MoS_2 composite coatings

寸减小。当 MoS_2 浓度从10 g/L增加到30 g/L时, MoS_2 晶面衍射峰(002)强度逐渐增加,但浓度为40 g/L时, MoS_2 晶面衍射峰(002)强度稍有下降。衍射峰相对强度与各晶面之间存在对应关系。

随着镀液中 MoS_2 含量的增加,镀层中Mo、S元素的质量分数的变化如图3所示。从图3中可以看出,镀层中 MoS_2 含量逐渐增加, MoS_2 颗粒会对镍结晶边界起到钉扎作用,抑制镍的结晶,进而使得镍的晶粒尺寸减小。

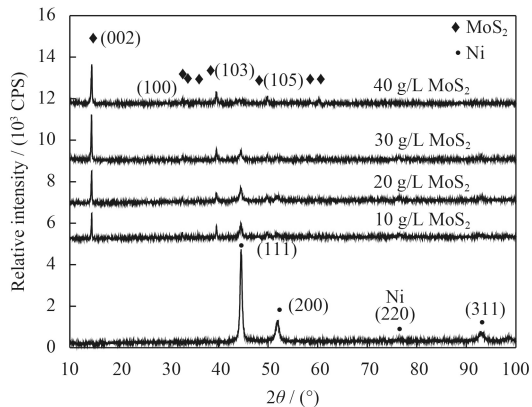


图2 纯镍镀层和不同MoS₂浓度下Ni-MoS₂复合镀层的XRD图谱
Fig.2 XRD patterns of the Ni and Ni-MoS₂ composite coatings as a function of MoS₂ bath concentration

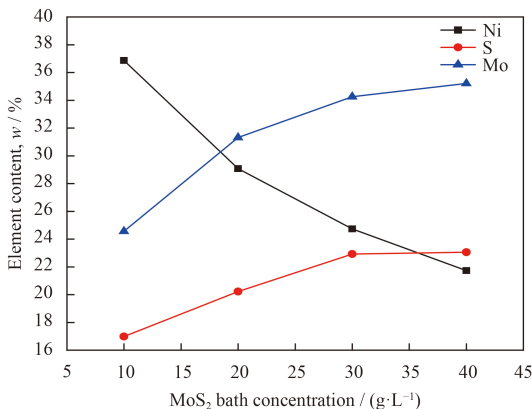


图3 不同MoS₂浓度下复合镀层的元素含量
Fig.3 Element content of the composite coatings versus the MoS₂ bath concentration

2.2 复合镀层的循环伏安曲线

图4为纯镍和Ni-MoS₂复合电镀阴极循环伏安曲线。可以看出，在电位-2.0~-0.5V范围内，随着电位的逐渐负移，电流都经历先不变后增加最后减小的趋势，出现一个还原峰，该峰为Ni²⁺被还原成Ni⁺或Ni^[16]。而MoS₂复合电镀还原峰的位置相对纯镍还原峰出现负移现象，且随着MoS₂浓度升高，电位负移程度逐渐增加，因为MoS₂颗粒的吸附与Ni的结晶生长存在竞争机制，随着MoS₂浓度的升高，有更多吸附CTAB的MoS₂颗粒优先占据Ni结晶位置，增大了电极表面的真实面积，使得电极表面局部电流密度减少，同时增大了阴极扩散长度，阻碍了镍的结晶，从而使镍离子在阴极表面沉积时需要更大的极化，所以阴极电极电位负移。但阴极极化能够提高镀层结晶细致程度，与XRD衍射图谱分析相一致。

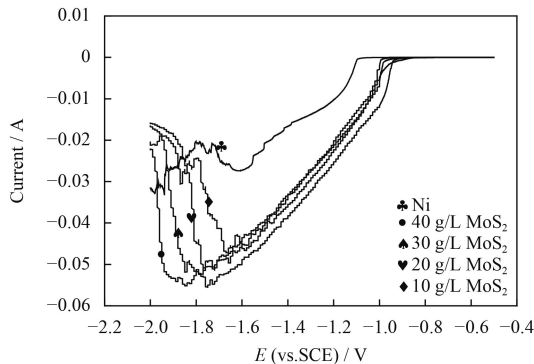


图4 纯镍和Ni-MoS₂复合镀层的阴极循环伏安曲线
Fig.4 Cathode cyclic voltammetry curves of pure Ni and Ni-MoS₂ composite coatings

2.3 复合镀层的摩擦性能

图5为纯Ni镀层和MoS₂浓度为10、20、30和40 g/L的Ni-MoS₂复合镀层在25 ℃条件下的摩擦因数曲线。可以看出，纯镍镀层的摩擦因数约为Ni-MoS₂复合镀层的10倍，且随着MoS₂浓度的增加，Ni-MoS₂复合镀层的摩擦因数先降低后增加，在MoS₂浓度为30 g/L时摩擦因数达到最低。因为随

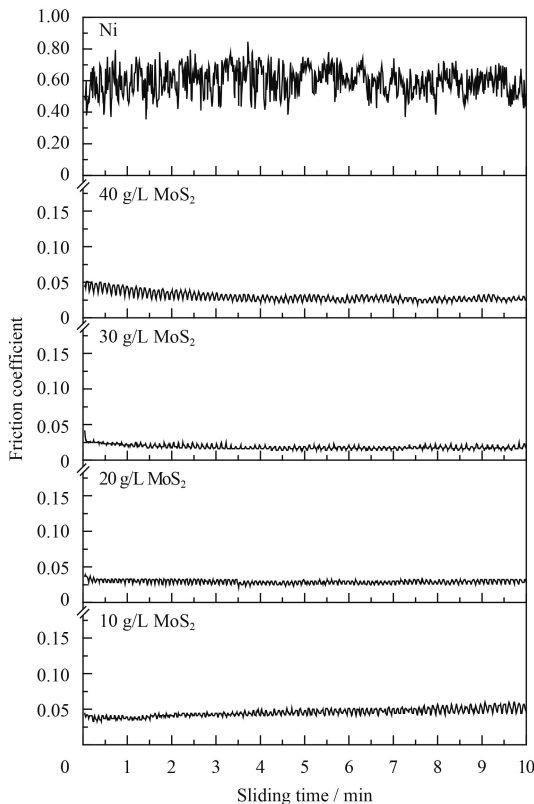


图5 纯镍镀层和不同MoS₂浓度下Ni-MoS₂复合镀层在25 ℃下的摩擦因数曲线
Fig.5 Friction coefficient of Ni and Ni-MoS₂ composite coatings as a function of MoS₂ bath concentration at 25 ℃

着MoS₂浓度的增加, 镀层中MoS₂含量增加, 在摩擦过程中, 摩擦副首先与镀层上的微凸体高点接触, 微凸体高点磨损产生的MoS₂微屑填充轮廓, MoS₂能够形成转移膜, 即在镀层与对磨件之间形成一层润滑膜, 避免了金属之间的直接接触, 使得摩擦发生在转移膜之间, 进而降低摩擦因数。但MoS₂过量时, 摩擦过程中润滑膜厚度增加, 会出现润滑剂分子堆积, 产生粘弹性摩擦阻力, 因此摩擦因数升高^[17]。另外, MoS₂浓度为30 g/L时, Ni-MoS₂复合镀层表面最光滑, 气孔率最小。

图6为MoS₂含量对复合镀层硬度及磨损率的影响曲线。可以看出, 随着MoS₂浓度的增加, 复合镀层硬度逐渐减小; Ni-MoS₂复合镀层的磨损率先减少后增加, MoS₂浓度为20 g/L时, 复合镀层的磨损率最小, 40 g/L时磨损率最大。因为MoS₂含量过少时, 不足以保证润滑膜的形成和稳定, 复合镀层虽具有很高的硬度, 但摩擦因数最大, 导致镀层具有很大的磨损率; MoS₂含量过高时, 镀层中起支撑和粘结作用的Ni相含量相应降低, 镀层硬度过低, 导致磨损率增大^[18]。

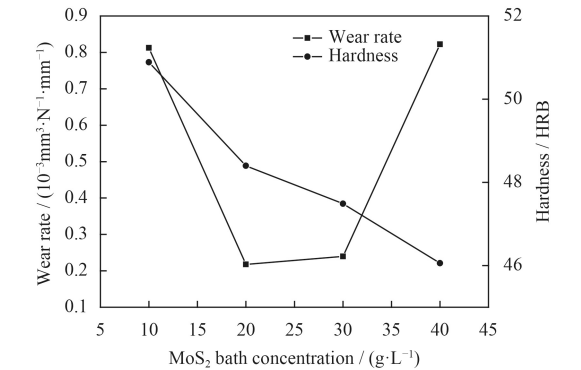


图6 MoS₂含量对复合镀层硬度及磨损率的影响

Fig.6 Effects of MoS₂ content on hardness and wear rate of composite coatings

图7是MoS₂浓度为30 g/L时Ni-MoS₂复合镀层在25、100、200、300和400 ℃的摩擦因数。从图中可知, 随着温度的升高, 在25~200 ℃之间, 摩擦因数显著降低, 在300~400 ℃之间, 随着温度升高, 摩擦因数逐渐升高。

图8为复合镀层在25、100、200、300和400 ℃温度下的摩擦形貌。随着温度的升高, 复合镀层表面裂纹、脱落快速扩展。在25、100和200 ℃下, 复合镀层表面光滑, 镀层表面只有轻微的裂纹、犁沟和细小划痕。但100 ℃和200 ℃摩擦表面

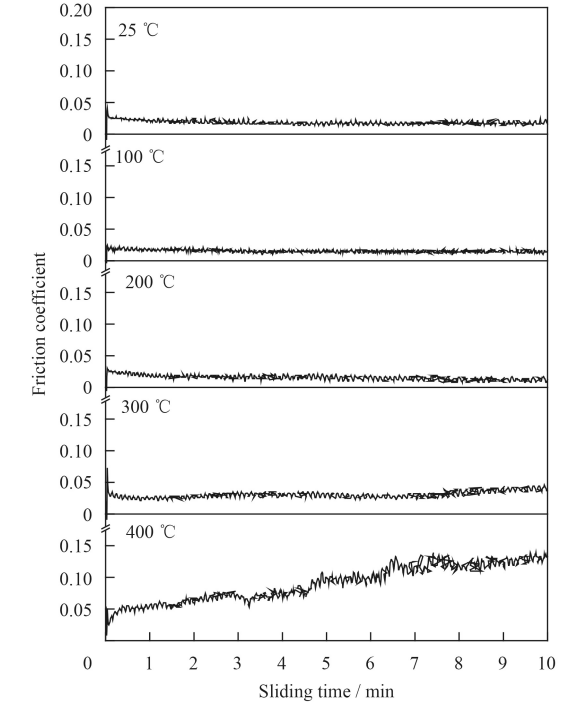


图7 MoS₂浓度为30 g/L时, Ni-MoS₂复合镀层在不同温度下的摩擦因数曲线

Fig.7 Friction coefficient curves of the Ni-MoS₂ composite coatings at different temperatures with MoS₂ bath concentration of 30 g/L

要比室温下的摩擦表面平滑, 在300 ℃和400 ℃下, 摩擦表面出现了较大裂纹、犁沟和大面积的脱落现象。

在25~200 ℃之间摩擦因数显著降低, 主要是因为随着温度的升高, 会促进分子间的运动, 从而加快在镀层与对偶件之间形成转移膜, 使得摩擦发生在MoS₂镀层之间, 阻止金属与金属之间的直接接触, 进而降低摩擦因数^[19]; 另外室温时空气湿度较高, 在室温时空气湿度达到56%, MoS₂在潮湿环境中润滑性能下降^[20], 随着温度升高, 空气中的水分蒸发, 空气湿度降低, 因此摩擦因数降低; 在300~400 ℃之间摩擦因数逐渐升高, 因为在315 ℃以上, MoS₂逐渐被氧化成MoO₃, 并且随着温度升高, 氧化程度逐渐增加。图9为复合镀层在不同温度下的XRD衍射谱图, 在400 ℃时, MoS₂晶面衍射峰(002)强度下降, 并且衍射图中出现了MoO₃、Ni₃S₂、NiO衍射峰, 说明随着温度的升高, MoS₂颗粒逐渐被氧化, 进一步反映出镀层中MoO₃的存在和复合镀层中MoS₂含量的变化趋势。同样对400 ℃摩擦表面进行EDS能谱分析得出, 磨削中氧的含量增加, MoS₂逐渐被氧化,

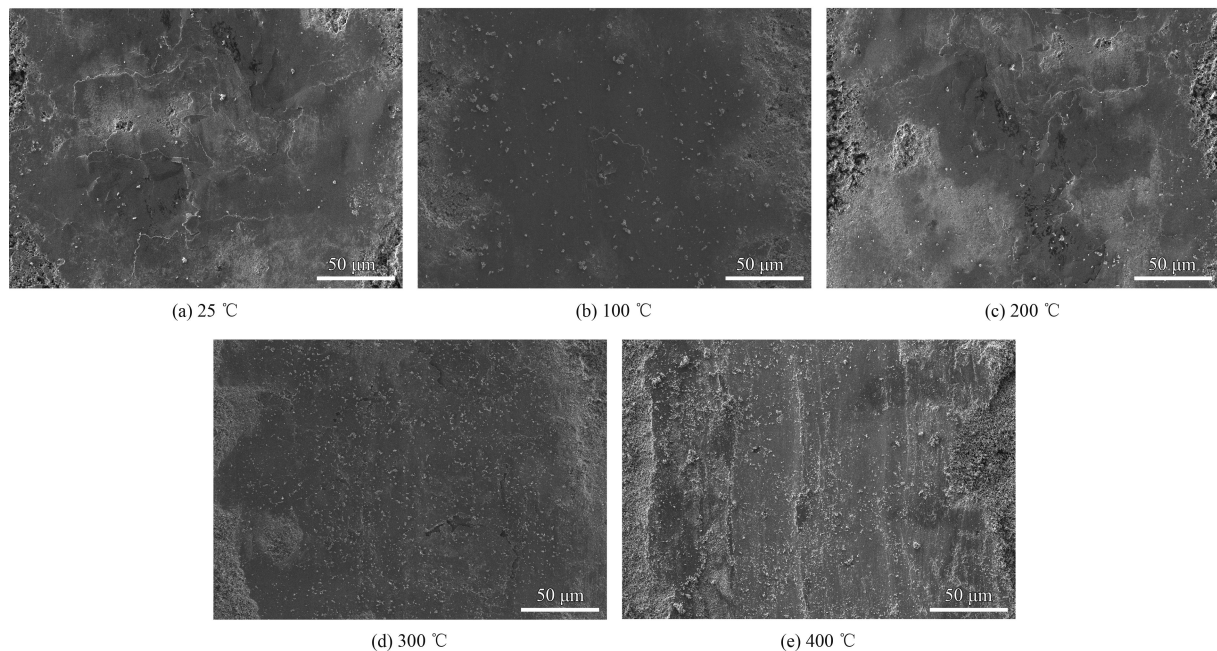


图 8 MoS_2 浓度为30 g/L时, Ni- MoS_2 复合镀层在不同温度下的摩擦形貌

Fig.8 Worn morphologies of the Ni- MoS_2 composite coatings at different temperatures with MoS_2 bath concentration of 30 g/L

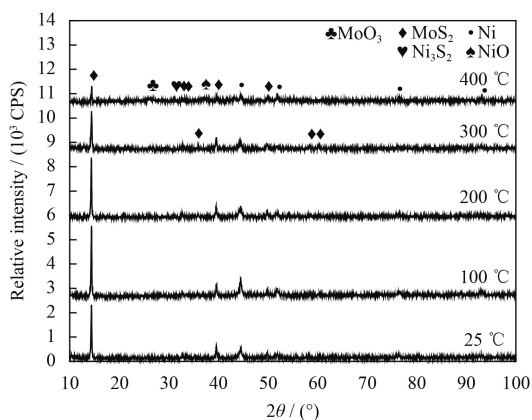


图 9 MoS_2 浓度为30 g/L时, Ni- MoS_2 复合镀层在不同温度下的XRD图谱

Fig.9 XRD patterns of the Ni- MoS_2 composite coatings under different temperatures with MoS_2 bath concentration of 30 g/L

氧化成了 MoO_3 , MoO_3 是硬质颗粒^[21], 附着于摩擦表面将成为磨粒, 在摩擦过程中会撕裂镀层表面, 产生犁沟。从摩擦形貌可以得出复合镀层磨损机理主要是氧化磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

3 结 论

(1) 电化学沉积法制备的Ni- MoS_2 自润滑复合镀层, 在对偶件GCr15, 20 N载荷条件下摩擦因数在0.02~0.05变化, 相比纯镍镀层具有很好的自润滑效果。当 MoS_2 浓度为30 g/L时, 复合镀层表面

形貌最为平整, 摩擦因数最低为0.02~0.03。

(2) 添加 MoS_2 能够使得Ni离子还原电位产生负移, 且随着浓度增加, 还原电位逐渐负移, 反映了 MoS_2 颗粒在复合沉积体系中促进了阴极极化, 可提高镀层结晶细致程度。

(3) Ni- MoS_2 复合镀层400 °C以下摩擦因数维持在0.02~0.05之间, 仍然具有很好的润滑效果。随着温度继续升高, MoS_2 将逐渐被氧化成 MoO_3 , 摩擦因数达到0.15, 润滑效应降低。

参考文献

- [1] 王海斗, 徐滨士, 刘家浚. 微纳米硫系固体润滑[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
WANG H D, XU B S, LIU J J. Micro and nano sulfide solid lubrication[M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese).
- [2] 潘蛟亮. 二硫化钼和石墨添加剂对镍基涂层组织和性能的影响[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
PAN J L. Effects of MoS_2 and graphite on microstructure and properties of ni-based coating[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008 (in Chinese).
- [3] 张丽丽, 蒲吉斌, 张广安, 等. 类石墨烯二硫化钼的制备及其真空摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 746-753.
ZHANG L L, PU J B, ZHANG G A, et al. The preparations of graphene-like molybdenum disulfide and research in tribological properties in high vacuum[J]. Tribology, 2015, 35(6): 746-753 (in Chinese).

- [4] WANG L M. Effect of surfactant BAS on MoS₂ codeposition behaviour[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2008, 38(2): 245-249.
- [5] 张保森, 张凯, 周衡志. 激光织构化表面MoS₂薄膜的减摩擦抗磨性能[J]. 热加工工艺, 2015, 2(44): 150-153.
- ZHANG B S, ZHANG K, ZHOU H Z. Friction reduction and anti-wear performance of MoS₂ film coated on laser textured surface[J]. Hot Working Technology, 2015, 2(44): 150-153 (in Chinese).
- [6] TUDELA I, ZHANG Y, PAL M, et al. Ultrasound-assisted electrodeposition of thin nickel-based composite coatings with lubricant particles[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 276: 89-105.
- [7] LIEW K W, KONG H J, LOW KO, et al. The effect of heat treatment duration on mechanical and tribological characteristics of Ni-P-PTFE coating on low carbon high tensile steel[J]. Materials & Design, 2014, 62(10): 430-442.
- [8] RAMALHO A, MIRANDA J C. Tribological characterization of electroless nip coatings lubricated with biolubricants[J]. Wear, 2007, 263(1): 592-597.
- [9] GUTSEV D, ANTONOV M, HUSSAINOVA I, et al. Effect of SiO₂ and PTFE additives on dry sliding of NiP electroless coating[J]. Tribology International, 2013, 65(3): 295-302.
- [10] 张亨. 二硫化钼的性质、生产和应用[J]. 中国铝业, 2014, 38(1): 7-10.
- ZHANG H. Properties, production and application of molybdenum disulfide[J]. China Molybdenum Industry, 2014, 38(1): 7-10 (in Chinese).
- [11] 查柏林, 王汉功, 江礼, 等. 超音速火焰喷涂Ni-MoS₂涂层结构与性能研究[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 15-18.
- ZHA B L, WANG H G, JIANG L, et al. Microstructure and tribological performance of HVOF sprayed nickel coated MoS₂ coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(2): 15-18 (in Chinese).
- [12] 林翠, 吴群英, 赵晓斌. TC4钛合金表面化学镀Ni-P-MoS₂复合镀层[J]. 腐蚀与防护, 2015, 5(36): 412-418.
- LIN C, WU Q Y, ZHAO X B. Electroless Ni-P-MoS₂ composite coating on TC4 titanium alloy[J]. Corrosion & Protection, 2015, 5(36): 412-418 (in Chinese).
- [13] 孙建荣, 李长生, 唐华, 等. 磁控溅射MoS₂/W 复合薄膜的微结构与摩擦学性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 2(33): 171-175.
- SUN J R, LI C S, TANG H, et al. Microstructures and tribological property of magnetron sputtered MoS₂/W coatings[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 2(33): 171-175 (in Chinese).
- [14] 赵杰. 表面活性剂对复合镀(Ni-P)-MoS₂中MoS₂颗粒分散性的影响[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(4): 1-4.
- ZHAO J. Effect of surfactant on dispersity of MoS₂ during composite plating of (Ni-P) -MoS₂[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(4): 1-4 (in Chinese).
- [15] 惠骏, 朱永伟, 朱昌洪, 等. 金刚石颗粒在水体系中的分散性能研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(3): 15-18.
- HUI J, ZHU Y W, ZHU C H, et al. Dispersion characteristics of mirco diamond particle in aqueous system[J]. , 2011, 31(3): 15-18 (in Chinese).
- [16] 谭澄宇. Ni、Cu基复合镀层制备及其电化学基础研究[D]. 湖南: 中南大学, 2008.
- TAN C Y. Fabrication of nickel, copper matrix composite coatings and their electrochemical behaviors[D]. Hunan: Central South University, 2008 (in Chinese).
- [17] 赵运才, 熊宏杰, 张正旺. 润滑相MoS₂对等离子喷涂Ni60A复合涂层摩擦学特性的影响[J]. 中国陶瓷, 2008, 44(12): 29-31.
- ZHAO Y C, XING H J, ZHANG Z W. The influence of iubricating phase MoS₂ on Ni60A composite coating's frictional charactristics[J]. China Ceramics, 2008, 44(12): 29-31 (in Chinese).
- [18] 李方坡, 王引真, 潘蛟亮, 等. MoS₂含量对Ni基固体润滑涂层性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(4): 135-138.
- LI F P, WANG Y Z, PAN J L, et al. Influence of MoS₂ content on properties of self-lubricating nickel-base coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(4): 135-138 (in Chinese).
- [19] 王新平, 肖金坤, 张雷, 等. 银合金粉末粒度对Ag-MoS₂复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2811-2817.
- WANG X P, XIAO J K, ZHANG L, et al. Effect of silver alloy particle size on friction and wear properties of Ag-MoS₂ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2811-2817 (in Chinese).
- [20] LI H, ZHANG G, WANG L. Low humidity-sensitivity of MoS₂/Pb nanocomposite coatings[J]. Wear, 2016, S350-S351: 1-9.
- [21] 石森森. 固体润滑材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- SHI M S. Solid lubrication material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)