

沉积温度对 NiCrAlY/Ag 复合薄膜 结构及性能的影响

吴易谦^{1,2a,2b}, 韦春贝^{2a,2b}, 代明江^{2a,2b}, 匡同春¹,
刘敏^{2a,2b}, 林松盛^{2a,2b}, 石倩^{2a,2b}

(1.华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2.广东省新材料研究所 a.现代材料
表面工程技术国家工程实验室 b.广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要:目的 改善 GH4169 合金的表面性能, 制备摩擦学性能优良的复合薄膜。方法 采用离子源辅助直流磁控溅射技术制备 NiCrAlY/Ag 复合薄膜, 研究沉积温度分别为 60、120、180 °C 对薄膜结构和性能的影响。利用能谱仪 (EDS)、扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM)、X 射线衍射仪 (XRD) 进行薄膜元素成分含量、表面形貌、截面形貌、粗糙度和相结构的检测。采用纳米压痕仪、划痕法、球-盘式摩擦磨损试验机对薄膜的硬度、结合力、摩擦磨损性能进行分析。结果 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的表面致密度、晶粒尺寸以及表面粗糙度随沉积温度的升高而增大, 物相组成主要为 Ni₃Al、Ag 和 Cr, 薄膜的硬度在 5.67~6.41 GPa 之间。复合薄膜的膜/基结合力随沉积温度的增加而降低, 其中沉积温度为 60 °C 时的膜基结合力最佳 (33.1 N), 并且在此沉积温度下的复合薄膜具有最佳的室温摩擦学性能, 其平均摩擦系数为 0.24, 磨损率为 $3.52 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损。结论 沉积温度对 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的结构性能影响显著, 当沉积温度为 60 °C 时, 薄膜综合性能最好。

关键词: 磁控溅射; NiCrAlY/Ag 复合薄膜; 沉积温度; 摩擦系数; 磨损机制

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0211-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.025

Effects of Deposition Temperature on Structural and Properties of NiCrAlY/Ag Composite Films

WU Yi-qian^{1,2a,2b}, WEI Chun-bei^{2a,2b}, DAI Ming-jiang^{2a,2b}, KUANG Tong-chun¹,
LIU Min^{2a,2b}, LIN Song-sheng^{2a,2b}, SHI Qian^{2a,2b}

(1.School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.a.National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, b.Key Lab of Guangdong
for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a composite film with good tribological properties to improve the surface properties of

收稿日期: 2019-05-31; 修订日期: 2019-08-04

Received: 2019-05-31; Revised: 2019-08-04

基金项目: 中国航发创新基金项目 (ZGHF-ZL-2017-C068); 广东省科学院项目 (2018GDASCX-0111, 2019GDASYL-0302012, 2017GDASCX-0111); 广东省科技计划项目 (2017A070701027, 2014B070705007)

Fund: Supported by AECC Innovation Fund Project (ZGHF-ZL-2017-C068), Guangdong Academy of Sciences Projects (2018GDASCX-0111, 2019GDASYL-0302012, 2017GDASCX-0111); Guangdong Science and Technology Program (2017A070701027, 2014B070705007)

作者简介: 吴易谦 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: WU Yi-qian (1994—), Male, Master, Research focus: material surface engineering.

通讯作者: 代明江 (1964—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为表面工程。邮箱: daimingjiang@gdinm.com

Corresponding author: DAI Ming-jiang (1964—), Male, Professorate senior engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: daimingjiang@gdinm.com

GH4169 alloy. NiCrAlY/Ag composite films was prepared by ion source assisted DC magnetron sputtering at 60 °C, 120 °C, and 180 °C. Effects of deposition temperature on the structure and properties of films were investigated. The elemental composition, surface morphologies, cross-sectional morphologies, surface roughness, and phase structure of the films were analyzed with energy dispersive spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD). The hardness, adhesion strength, friction and wear properties of the films were analyzed with nanoindentation tester, scratch test and ball-on-disk friction and wear tester. With the increase of deposition temperature, the surface density, grain size and surface roughness of NiCrAlY/Ag composite films increased, phase structures of the films were mainly Ni₃Al, Ag and Cr. The hardness of the films was slightly different at the range of 5.67~6.41 GPa. With the increase of deposition temperature, the adhesion strength of the composite films decreased. The samples deposited at 60 °C showed the best adhesion strength of 33.1 N, as well as good tribological properties with friction coefficient of 0.24 and wear rate of $3.52 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The wear mechanism was oxidative wear and abrasive wear. Thus the deposition temperature has a significant effect on the structural and properties of NiCrAlY/Ag composite films. The films deposited at 60 °C shows the best comprehensive performance.

KEY WORDS: magnetron sputtering; NiCrAlY/Ag composite films; deposition temperature; friction coefficient; wear mechanism

镍基涂层由于具有优异的力学、热稳定以及抗氧化性能,已得到了广泛的研究和应用。研究表明,在无润滑条件下,镍基涂层易发生粘着磨损和疲劳磨损而失效,一定程度上缩短了工件的服役寿命^[1-2]。由于镍与多种金属元素都有很好的相容性,这就为通过在镍基涂层中添加润滑相改善摩擦学性能提供了潜在的可能。

常用作固体润滑材料的软金属包括 Au、Ag、Cu、Pb 等,其中由于 Ag 易发生晶间滑移,剪切力较低,所以无论是单独作为润滑涂层,还是以掺杂元素的形式作为润滑剂,都已得到广泛的研究和应用。罗蓉蓉等^[3]研究发现,在常温下,纯 Ag 薄膜摩擦系数低至 0.27,具有良好的润滑性能。Sun 等^[4]通过对纯 Ag 薄膜的研究发现,具有(111)晶面取向的薄膜润滑性能最好。研究表明^[5-9],通过掺杂 Ag 作为润滑相,可以起到细化晶粒和改善薄膜在不同温度下的摩擦性能的作用。Xiong 等^[10]采用粉末冶金的方法制备了 NiCrWAlTi(Ag)块体,研究表明,Ag 在中等温度(500 °C)以下是一种热稳定性极佳的固体润滑剂,能在摩擦副表面之间形成低剪切力的转移膜,提高摩擦磨损性能。Zhang 等^[11]采用大气等离子喷涂技术,在镍基高温合金表面制备了不同 Ag 含量的镍基复合涂层,研究了不同环境温度下涂层的润滑性能。结果表明,Ag 的加入在改善涂层摩擦学性能的同时,还可以提高涂层的韧性,改善膜基结合力。

目前对于镍基掺银润滑材料的研究以喷涂、激光熔覆和粉末冶金为主^[10-15],这些方法主要是制备块体

或者厚涂层,对于精密工件的表面改性并不适用。磁控溅射技术制备的薄膜由于结构致密、表面粗糙度小、厚度易于控制且有较高的结合力^[16],适用于精密零件的表面改性,然而以磁控溅射技术制备镍基掺银薄膜的文献报告很少。本文通过采用离子源辅助直流磁控溅射技术在不同沉积温度下制得 NiCrAlY/Ag 复合薄膜,并对其表面形貌、组织结构以及常温摩擦磨损性能进行了研究。

1 实验

1.1 涂层制备

采用尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的 GH4169 合金作为基体,用砂纸打磨后,抛光至镜面效果,然后用丙酮超声清洗 30 min,吹干,放入真空室备用。GH4169 基体的主要化学成分见表 1。同时为观察薄膜的组织结构,采用单晶硅作为基体。利用中国科学院沈阳科学仪器研制中心有限公司研发的实验型多功能镀膜机-650 型设备,以离子源辅助磁控溅射技术制备 NiCrAlY/Ag 复合薄膜(NiCrAlY 合金靶中元素的原子比为 $w_{\text{Ni}} : w_{\text{Cr}} : w_{\text{Al}} : w_{\text{Y}} = 67 : 22 : 10 : 1$),NiCrAlY 合金靶和 Ag 靶都采用直流电源。在本底真空度为 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 下对基体进行 30 min 的氩离子溅射清洗,去除基体表面的附着物并活化基体表面。首先在基体表面沉积厚度为 150 nm 左右的 NiCrAlY 过渡层,然后采用 NiCrAlY 靶和 Ag 靶共溅射的方式制备 NiCrAlY/Ag 复合薄膜。工艺参数如下:离子源功率

表 1 GH4169 的主要化学成分
Tab.1 Main chemical components of GH4169

wt. %								
C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Nb	Fe
≤0.08	17.0~21.0	50~55.0	≤1.0	2.80~3.30	0.30~0.70	0.75~1.15	4.75~5.50	Bal.

为 110 W，偏压为-50 V，NiCrAlY 靶功率为 800 W，Ag 靶功率为 95 W，沉积时间为 120 min。通过设备的加热装置和配套的冷却水路系统对沉积温度进行调控，分别将沉积温度控制在 60、120、180 ℃。

1.2 表征及检测

采用 NOVA Nano SEM430 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 及配套的能谱仪 (EDS) 表征薄膜表面和截面形貌以及元素成分。采用原子力显微镜 (AFM) 表征薄膜的表面粗糙度。采用日本 Smartlab X 射线衍射仪，用小角度掠射法对薄膜的物相结构进行表征。采用 Anton Paar 公司研制的 NHT³ 型纳米压痕仪对薄膜的硬度进行表征，最大载荷为 10 mN，加载时间为 30 s，保载时间为 10 s，每个样品选取 4 个点，最后取其平均值。采用划痕法表征薄膜的膜/基结合力，检测仪器为 MFT-4000 型多功能材料表面性能实验仪，选取的洛氏压头半径为 (0.2±0.01) mm，端部圆锥角为 120°，法向载荷由 0 N 增加至 100 N，法向载荷速度为 100 N/min，划痕长度为 5 mm。然后用 Leica DMI5000M 金相显微镜放大观察划痕边缘薄膜微观形貌，确定薄膜临界载荷。采用 MTS-3000 磨损试验仪测试薄膜在室温环境下的摩擦磨损性能，摩擦条件：温度为 18~20 ℃，相对湿度为 60%~70%，对磨球采用直径 4 mm 的 Si₃N₄ 球，摩擦半径为 5 mm，转速为 200 r/min，载荷为 2 N，时间为 30 min。

2 结果与分析

2.1 复合薄膜的成分及形貌分析

不同沉积温度下复合薄膜的表面元素含量见表 2。由表 2 可以发现，薄膜表面元素的相对原子含量存在的差异很小，说明沉积温度对薄膜表面元素含量分布的影响并不显著。

表 2 不同沉积温度下 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的 EDS 分析
Tab.2 EDS analysis of NiCrAlY/Ag composite films
at different deposition temperature at. %

Element	60 ℃	120 ℃	180 ℃
Ni	52.38	53.24	52.36
Cr	15.96	16.18	15.60
Al	13.38	14.19	14.69
Y	0.44	0.19	0.33
Ag	17.84	16.20	17.02

不同沉积温度下的薄膜表面形貌如图 1 所示。60 ℃时，薄膜表面颗粒尺寸大小不一，且相差较大，薄膜表面有孔洞的存在 (见图 1a)。120 ℃时，薄膜表面颗粒有所长大，但仍有孔洞的存在 (见图 1b)。180 ℃时，薄膜表面颗粒尺寸长大最为明显，表面最为致密，几乎没有孔洞的存在，颗粒大小更为均匀 (见图 1c)。表明随沉积温度的增加，薄膜表面的颗粒尺寸增大。

为进一步了解薄膜表面形貌，图 2 给出了 AFM

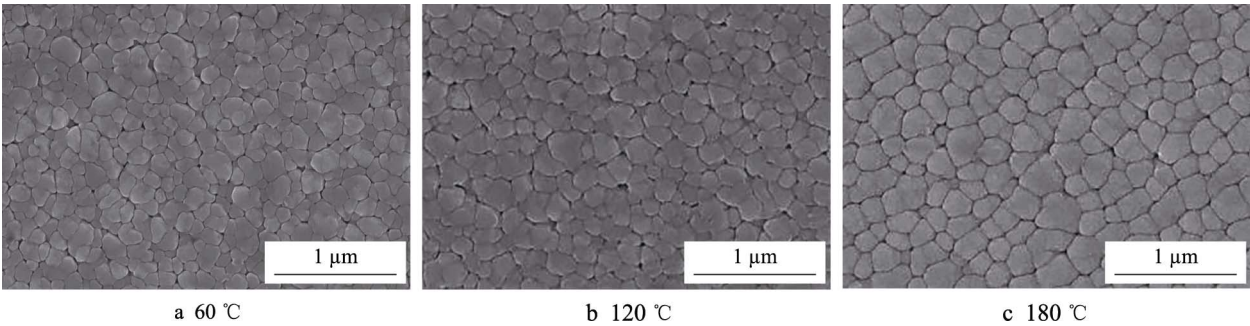


图 1 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的表面形貌
Fig.1 Surface morphologies of NiCrAlY/Ag composite films

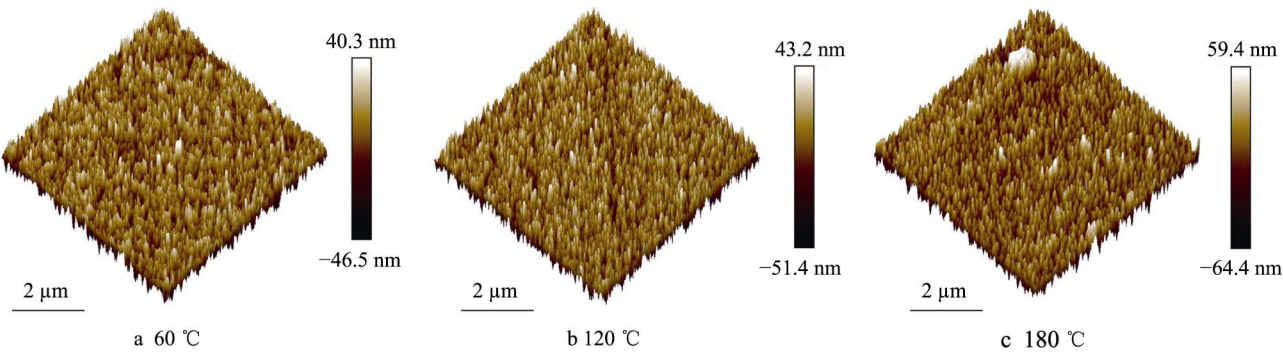


图 2 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的 AFM 图
Fig.2 AFM diagrams of NiCrAlY/Ag composite films

所测得的不同沉积温度下薄膜的图片。由检测结果可知,随着沉积温度的升高,薄膜表面的粗糙度呈上升趋势,其中 60 °C 时为 9.79 nm, 120 °C 时为 10.5 nm, 180 °C 时为 13.8 nm。这是因为随着沉积温度的增加,薄膜中晶粒的长大速率大于晶粒成核速率^[17],晶体长大,使得薄膜表面的粗糙度增加。

不同沉积温度下的薄膜截面形貌如图 3 所示。在薄膜底部过渡层附近,晶体结构致密细小,而随着薄膜不断沉积,晶粒亦逐渐长大。沉积温度低时,晶粒长大不明显。当沉积温度增加时,薄膜晶粒度长大明显,由底层细小的晶粒逐渐到表层粗大的晶粒结构,

且柱状晶结构遭到破坏。晶粒长大与柱状晶结构的破坏与沉积温度的增加和 Ag 的掺杂有关,在过渡层附近,随着温度的增加,晶粒变化不明显。可见在沉积温度范围内,增加温度对 NiCrAlY 薄膜的晶粒尺寸影响不大。当 NiCrAlY 薄膜内掺杂 Ag 后,温度对薄膜晶粒度影响明显,沉积温度的增加使单质 Ag 易于扩散聚集形成纳米颗粒,最终偏析成为较大的晶粒,阻碍柱状晶的生长^[18-20],从而形成 Ag 和柱状晶的竞争性生长,最终形成柱状晶结构遭到破坏的现象(如图 3b、c 所示)。

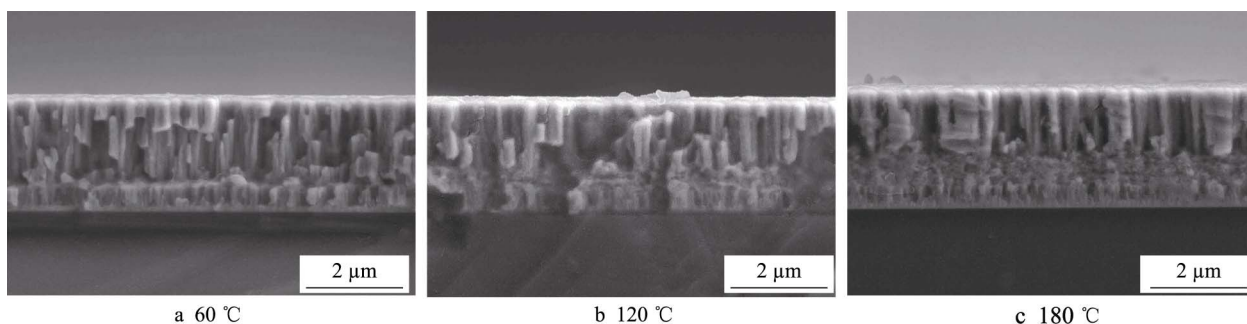


图 3 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的截面形貌

Fig.3 Cross-sectional morphologies of NiCrAlY/Ag composite films

2.2 XRD 物相结构分析

60 °C 下的 NiCrAlY 薄膜和不同沉积温度下复合薄膜的 XRD 图谱比较如图 4 所示。NiCrAlY 薄膜物相组成为 Ni₃Al 和 Cr, 复合薄膜的物相为 Ag、Cr 和 Ni₃Al。从整体来看,复合薄膜的相衍射峰宽化,说明 Ag 的存在起到了细化晶粒的作用^[5-7]。部分的 Ni₃Al 和 Cr 的衍射峰消失,说明 Ag 的存在可能还导致了 Ni₃Al 相的非晶化转变和薄膜的内应力增加,导致衍射峰消失^[13,21]。沉积温度增加时,复合薄膜相衍射峰有所增强。这是因为随着沉积温度的升高,晶体缺陷降低,晶粒长大,结晶度升高。由表 2 可知,复合薄膜中 Ni 和 Al 的原子比大致为 3 : 1,薄膜中镍

铝的化合物主要是 Ni₃Al 相,而非 NiAl 相,这与原子比有关^[22-23]。由于 Cr 在镍铝化合物中溶解度极低,所以 Cr 元素以单质的形式存在于薄膜中。

2.3 硬度和结合力的分析

GH4169 基体和不同沉积温度下复合薄膜的硬度如图 5 所示。可以看出,相较于基体的硬度,复合薄膜的硬度下降,在 5.67~6.41 GPa 之间。由此可知,沉积温度对复合薄膜的硬度影响较小。

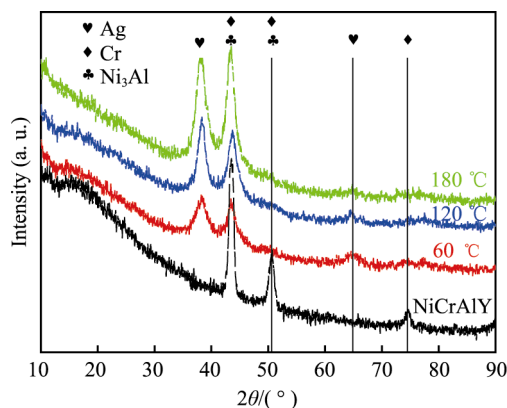


图 4 NiCrAlY 薄膜和 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of the NiCrAlY and NiCrAlY/Ag composite films

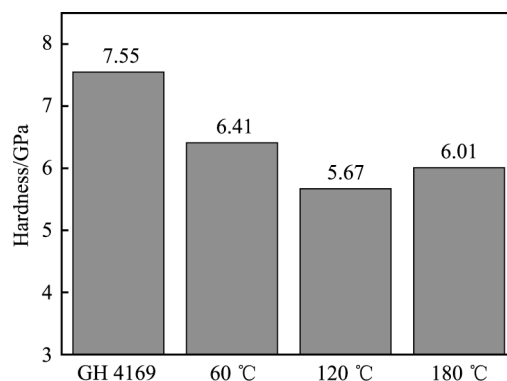
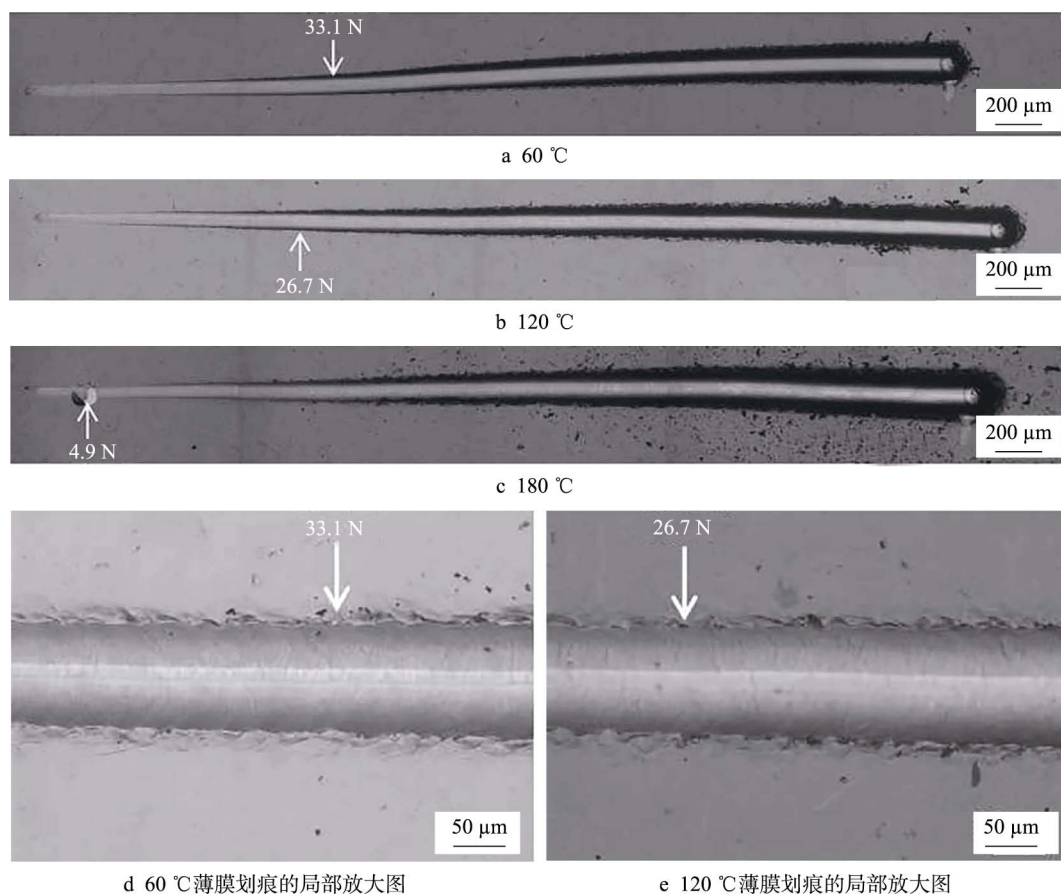


图 5 基体和 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的硬度
Fig.5 Hardness of substrate and NiCrAlY/Ag composite films

不同沉积温度下,薄膜的整体划痕形貌如图 6a—c 所示。由图 6a 及其箭头处的局部放大(图 6d)可知,60 °C 沉积的薄膜划痕随着法向载荷的增加,边缘逐渐由弹性变形向塑性变形转换,但仍与基体保持良好的膜/基结合力^[22]。随着法向载荷的进一步增

加, 塑性变形程度逐渐加深, 直至划痕边缘的涂层发生破损^[24], 将此时的法向载荷记为膜/基结合力, 为 33.1 N。由图 6b 及其箭头处的局部放大 (图 6e) 可知, 120 °C 沉积的薄膜划痕边缘也经历了弹性变形、塑性变形、破损的过程, 但膜/基结合力有所下降, 为 26.7 N。由图 6c 可知, 180 °C 沉积的薄膜划痕并没有经历弹、塑性变形阶段, 而是在法向载荷为 4.9 N

处产生了薄膜的脱落失效, 膜/基结合力最差。由于低温沉积时薄膜晶粒细小, 承载力较好, 所以 60 °C 下沉积的薄膜膜/基结合力最佳。随着沉积温度增加, 薄膜柱状晶尺寸增加, 在外加作用力下, 易被挤压破碎, 所以膜/基结合力减小。当沉积温度为 180 °C 时, 薄膜的柱状晶尺寸进一步长大, 且连贯的柱状晶进一步遭到破坏, 所以膜/基结合力最差。



d 60 °C 薄膜划痕的局部放大图

e 120 °C 薄膜划痕的局部放大图

图 6 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的表面划痕形貌

Fig.6 Morphologies of surface scratch of NiCrAlY/Ag composite films

2.4 摩擦学性能分析

基体和不同沉积温度下 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的摩擦系数曲线如图 7 所示。可以看出, 基体的摩擦系数曲线波动较大, 摩擦系数最高, 平均摩擦系数为 0.67。60 °C 沉积的薄膜摩擦系数曲线在磨损初期波动较大, 随着磨损的进行, 逐渐趋于稳定, 平均摩擦系数为 0.24。120 °C 沉积的薄膜摩擦系数曲线起初波动较大, 在 15 min 之后波动变小, 但一直呈逐渐上升的趋势, 平均摩擦系数为 0.26。180 °C 沉积的薄膜摩擦系数曲线在摩擦起初就产生较大的波动, 10 min 后, 开始急速上升, 并于 15 min 开始呈峰峦状变化, 说明薄膜已经失效。

基体和不同沉积温度的 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的磨损形貌如图 8 所示, 不同磨损表面所选区域的 EDS 分析见表 3。由表 3 可知, 无论是基体, 还是不同沉

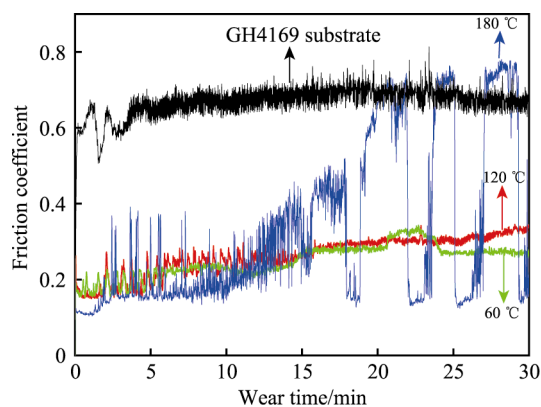


图 7 基体与 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的摩擦系数曲线

Fig.7 Friction coefficient curve of substrate and NiCrAlY/Ag composite films

积温度的薄膜, 磨损表面均发生了不同程度的氧化磨损。从图 8a 可以发现, 基体磨损表面存在着犁沟,

同时磨痕内粘着有撕裂块,应是发生了较严重的粘着磨损,使得基体表面被撕拽出表面。图 8b 是沉积温度为 60 °C 的薄膜磨损形貌图,在磨痕中部可以看到有大小不一的脱落层和磨屑,两侧有磨粒和犁沟的存在,磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。由图 8c 可知,沉积温度为 120 °C 的薄膜在磨损载荷作用下已经破碎,但仍有部分破碎的薄膜没有完全脱离基体,而薄膜内的 Ag 仍然可以起到润滑的作用,因而摩擦系数仍然保持在较低的水平。随着摩擦磨损的进行,残余

的薄膜逐渐脱离基体,所以摩擦系数呈现缓慢上升的趋势。图 8d 是沉积温度为 180 °C 时薄膜的磨痕形貌,磨损表面的薄膜已经失效,且磨痕内部存在犁沟。从表 3 可知,磨痕内的 Fe 元素含量接近基体含量,且 Ag 含量极低,说明薄膜已经剥离基体。由此可见,沉积合适的 NiCrAlY/Ag 复合膜可以降低表面的摩擦系数,提高镍基合金表面的耐磨性能。沉积的薄膜结合力不足时,在磨损载荷作用下薄膜很快失效,薄膜破碎产生的磨粒磨损反而会加速基体的磨损。

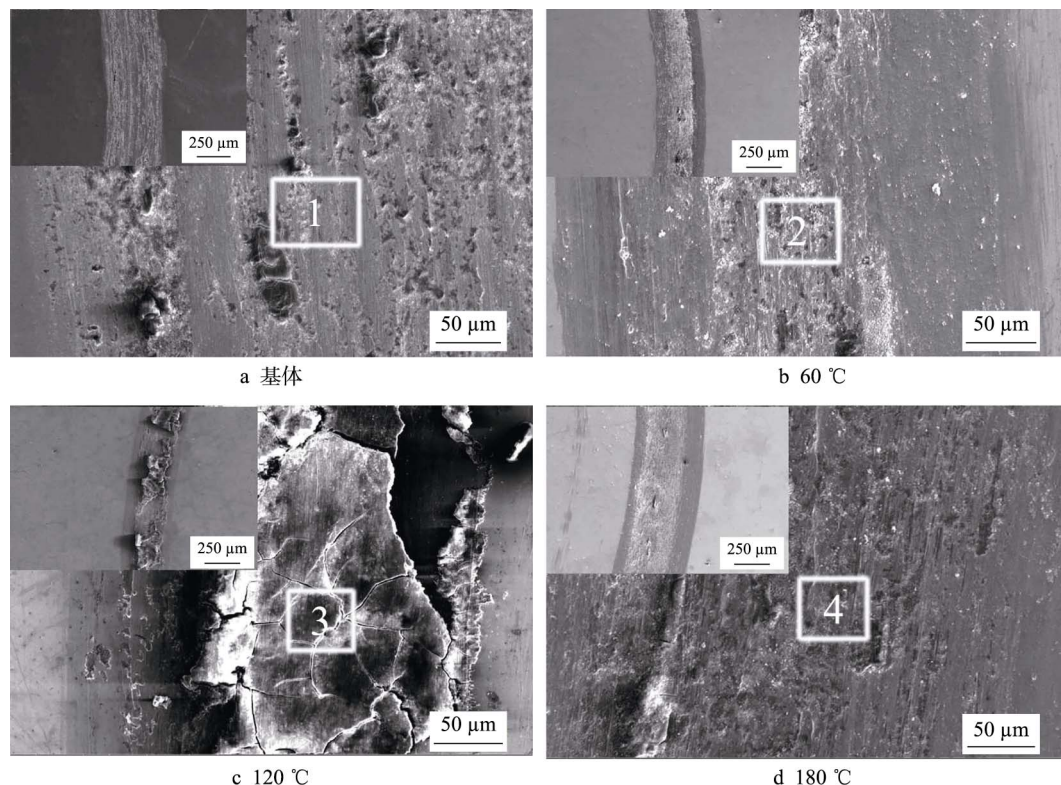


图 8 基体与 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的磨痕形貌

Fig.8 Wear morphologies of substrate and NiCrAlY/Ag composite films

表 3 基体与 NiCrAlY/Ag 复合薄膜磨痕的 EDS 结果

Tab.3 EDS result of substrate and NiCrAlY/Ag composite films

	wt. %								
Area	Ni	Cr	Al	Ag	Fe	O	Si	Nb	Ti
1	41.84	17.31	0.22	—	15.40	17.96	2.74	3.51	1.02
2	45.22	17.44	4.41	15.51	3.66	13.76	—	—	—
3	39.72	15.05	4.37	20.15	2.84	17.87	—	—	—
4	39.62	16.50	2.72	5.15	19.02	16.40	0.95	—	—

基体和复合薄膜磨损率如图 9 所示。由图 9 可知,随着沉积温度的增加,磨损率随之增加,60 °C 沉积的薄膜的磨损率最低。综合来看, NiCrAlY/Ag 复合薄膜在一定程度上能够提高表面的耐磨性能,其中 60 °C 沉积的薄膜摩擦磨损性能最好, 180 °C 沉积的薄膜则最差。

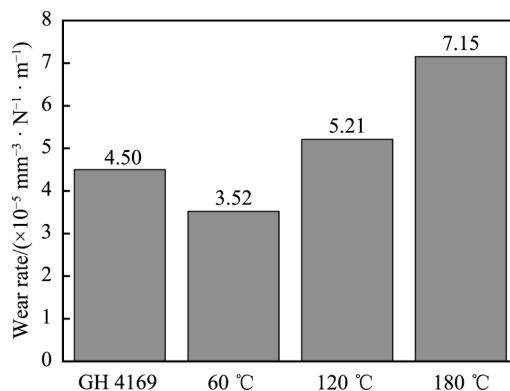


图 9 基体和 NiCrAlY/Ag 复合薄膜的磨损率

Fig.9 Wear rate of substrate and NiCrAlY/Ag composite films

3 结论

1) 采用离子源辅助直流磁控溅射技术制备的

NiCrAlY/Ag 复合薄膜, 物相组成主要是 Ni_3Al 、Ag 和 Cr。随沉积温度的升高, 薄膜表面颗粒尺寸、致密度和粗糙度随之增加。

2) 在所选取的沉积温度下, 沉积温度对薄膜表面硬度影响较小, 但温度的升高使得膜/基结合力变差, 其中 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 沉积的薄膜结合力最好, 膜/基结合力为 33.1 N 。

3) 在所选取的沉积温度下, 薄膜的摩擦磨损性能随沉积温度的升高而变差。 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 沉积的薄膜摩擦磨损性能最好, 其平均摩擦系数为 0.24 , 磨损率为 $3.52 \times 10^{-5}\text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

参考文献:

- [1] 马超. 激光熔覆镍基复合涂层组织与性能研究[D]. 大连, 大连理工大学, 2013.
MA Chao. Microstructure and properties of Ni-based composite coatings prepared by laser cladding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [2] 贾鹏, 宫劭佳. 两种不同成分 NiAl 涂层性能的对比研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(2): 32-35.
JIA Peng, GONG Shao-jia. Contrastive study of two different compositional NiAl coating properties[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(2): 32-35.
- [3] 罗蓉蓉, 李鹏远, 张腾, 等. 银固体润滑涂层低温下摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 114-119.
LUO Rong-rong, LI Peng-yuan, ZHANG Teng, et al. Friction and wear properties of silver solid lubrication coatings under low temperatures[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(11): 114-119.
- [4] GAO Xiao-ming, HU Ming, FU Yan-long, et al. Low temperature deposited Ag films exhibiting highly preferred orientations[J]. Materials letters, 2018, 213: 178-180.
- [5] GULBINSKI Witold, SUSZKO Tomasz. Thin films of $\text{Mo}_2\text{N}/\text{Ag}$ nanocomposite—the structure, mechanical and tribological properties[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(3): 1469-1476.
- [6] HAN Jeon G, MYUNG Hyun S, LEE Hyuk M, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-Ag-N and Ti-Cr-N superhard nanostructured coatings[J]. Surface & coatings technology, 2003, 174: 738-743.
- [7] CAVALEIRO D, CARVALHO S, CAVALEIRO A, et al. $\text{TiSiN}(\text{Ag})$ films deposited by HiPIMS working in DOMS mode: Effect of Ag content on structure, mechanical properties and thermal stability[J]. Applied surface science, 2019, 478(174): 426-434.
- [8] KELLY P J, LI H, BENSON P S, et al. Comparison of the tribological and antimicrobial properties of CrN/Ag, ZrN/Ag, TiN/Ag, and TiN/Cu nanocomposite coatings[J]. Surface & coatings technology, 2010, 205(5): 1606-1610.
- [9] JU Hong-bo, YU Dian, YU Li-hua, et al. The influence of Ag contents on the microstructure, mechanical and tribological properties of ZrN-Ag films[J]. Vacuum, 2018, 148: 54-61.
- [10] LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng, WU Hong-yan, et al. Tribological properties of molybdenized silver containing nickel base alloy at elevated temperatures[J]. Tribology international, 2009, 42(11): 1722-1729.
- [11] ZHANG Tian-tian, LAN Hao, HUANG Chuan-bing, et al. Preparation and characterizations of nickel-based composite coatings with self-lubricating property at elevated temperatures[J]. Surface & coatings technology, 2016, 294: 21-29.
- [12] CHEN Jie, AN Yu-long, YANG Jie, et al. Tribological properties of adaptive NiCrAlY-Ag-Mo coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Surface & coatings technology, 2013, 235(22): 521-528.
- [13] LIU Er-yong, WANG Wen-zhen, GAO Yi-min, et al. Tribological properties of Ni-based self-lubricating composites with addition of silver and molybdenum disulfide[J]. Tribology international, 2013, 57: 235-241.
- [14] ZHU Sheng-yu, BI Qin-ling, YANG Jun, et al. Ni_3Al matrix high temperature self-lubricating composites[J]. Tribology international, 2011, 44(4): 445-453.
- [15] TYAGIA Rajnesh, XIONG Dang-sheng, LI Jian-liang. Effect of load and sliding speed on friction and wear behavior of silver/h-BN containing Ni-base P/M composites[J]. Wear, 2010, 270(7): 423-430.
- [16] 欧文敏. 磁控溅射制备掺杂二硫化钼固体润滑复合膜的性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
OU Wen-min. Properties of doped MoS_2 solid lubricating composite films by magnetron sputtering method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [17] 王铁钢, 李柏松, 张姣姣, 等. 沉积温度对高功率脉冲磁控溅射 AlCrSiN 涂层结构和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 2578-2583.
WANG Tie-gang, LI Bai-song, ZHANG Jiao-jiao, et al. Influence of deposition temperature on microstructures and mechanical properties of the Al-Cr-Si-N coatings deposited by HiPIMS technique[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(8): 2578-2583.
- [18] MULLIGAN C P, BLANCHET T A, GALL D. CrN-Ag nanocomposite coatings: Effect of growth temperature on the microstructure[J]. Surface & coatings technology, 2008, 203(5): 584-587.
- [19] MULLIGAN C P, PAPI P A, GALL D. Ag transport in CrN-Ag nanocomposite coatings[J]. Thin solid films, 2012, 520(22): 6774-6779.
- [20] MULLIGAN C P, BLANCHET T A, GALL D. CrN-Ag nanocomposite coatings: Tribology at room temperature and during a temperature ramp[J]. Surface & coatings technology, 2010, 204(9): 1388-1394.
- [21] DING C H, LI P L, RAN G, et al. PM304 coating on a Ni-based superalloy rod for high temperature lubrication[J]. Ceramics international, 2008, 34(2): 279-284.
- [22] 李义兵, 王小军, 周继承. 磁控共溅射 Ni_3Al 合金薄膜的微观结构及电阻特性[J]. 功能材料, 2006(1): 40-42.
LI Yi-bing, WANG Xiao-jun, ZHOU Ji-cheng. Microstructure and resistance properties of Ni_3Al alloy thin films by magnetron co-sputtering[J]. Journal of functional materials, 2006(1): 40-42.
- [23] 王明, 邢永燕, 马拥军, 等. 金属间化合物 Ni_3Al 薄膜的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2012, 43(11): 1410-1413.
WANG Ming, XING Yong-yan, MA Yong-jun, et al. Investigation on the fabrications and properties of Ni_3Al thin film of intermetallic compounds[J]. Journal of functional materials, 2012, 43(11): 1410-1413.
- [24] 黄珂, 杨伏良, 陈力学, 等. 划痕法测定 TiAlN 涂层结合强度的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 107-111.
HUANG Ke, YANG Fu-liang, CHEN Li-xue, et al. Study on the adhesion strength of a TiAlN coating by scratch tester[J]. Surface technology, 2013, 42(5): 107-111.