



Ag 含量对 NiMoAl 基涂层宽温域自润滑性能的影响

陈 杰¹, 宋 惠¹, 郑子云¹, 安宇龙², 陈建敏², 周惠娣²

(1. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 宁波 315103;

2. 中国科学院 兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 为了提高运动部件在宽温域(尤其是高温)条件下的润滑和耐磨性能, 采用大气等离子喷涂(APS)技术在不锈钢基材上喷涂制备了三种 Ag 含量分别为 0、10%和 30%(质量分数)的 NiMoAl-Ag 固体自润滑涂层。利用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、CSM 摩擦磨损试验机、三维光学轮廓仪等设备, 对涂层的组织结构和在 20~800 °C 时的摩擦磨损机制进行了分析。结果表明: NiMoAl-Ag 涂层呈现致密的显微结构和均匀的组份分布; NiMoAl-Ag 涂层在 20~800 °C 时的摩擦因数随着 Ag 含量的增加而显著下降, 含有 30%Ag 的 NiMoAl-Ag 涂层在 800 °C 的摩擦因数降至 0.12。但是, Ag 含量的增大会降低涂层在 20~400 °C 的耐磨性; 当温度进一步升高到 600 °C 和 800 °C 时, Ag 的加入却可以明显提高涂层的耐磨性。进一步分析涂层的润滑机理表明: 涂层中的 Ag 含量增大可以在高温摩擦界面形成液态 Ag 和 Ag_2MoO_4 润滑黏质层的协同润滑作用, 使得涂层具有较低的摩擦因数和磨损率。APS 制备的 NiMoAl-Ag 涂层具有优良的宽温域自润滑性能, 通过复配合适的增强相有望提高其中低温耐磨性能, 是一种极有潜力的新型宽温域耐磨自润滑涂层材料。

关键词: 大气等离子喷涂; NiMoAl; Ag; 自润滑; 宽温域; 润滑机理

文章编号: 1004-0609(2019)-11-2501-07

中图分类号: TG115.5

文献标志码: A

现代航空航天、兵器和装备制造业中的运动部件对宽温域(尤其是高温)下具有良好润滑和耐磨性能的材料及其制备技术有着巨大的需求, 如高温空气箔片轴承、燃气涡轮密封、低散热柴油机活塞环和汽缸壁润滑等。润滑涂层在不影响装备部件所具有的各种力学性能的情况下, 能够显著改善部件表面的摩擦学性能, 可以最大限度地提高其高温运动系统的可靠性、使用寿命及运行效率。因此, 宽温域自润滑涂层技术的研究一直是摩擦学和表面工程领域的研究热点^[1-5]。由于镍基合金具有高强度、抗氧化、耐腐蚀、耐磨性能好等优点, 镍基自润滑涂层在解决宽温域润滑和耐磨问题方面显示出了良好的应用前景^[6-8]。

NASA 格林研究中心率先开展了大气等离子喷涂(APS)制备宽温域自润滑涂层的研究, 其开发的 PS304(NiCr-Cr₂O₃-Ag-CaF₂/BaF₂) 涂层已经被应用于空气箔片轴承在启停阶段的润滑^[9-10]。王海斗等^[11]综述了含银单质硬质涂层的高温摩擦学性能, 并展望了未来含银硬质涂层高温摩擦学性能的研究方向。本文

作者在前期研究中报道了 NiMoAl 和 NiMoAl-Ag 涂层室温约 800 °C 的摩擦学性能^[12-13], 发现金属 Ag 作为润滑相不但保证了中低温时涂层的润滑性, 同时, 基础相中的 Mo 元素在高温时可以和 Ag 发生摩擦化学反应生成具有润滑性能的钼酸银。在此基础上, 本文研究了 Ag 含量对 APS 制备的 NiMoAl-Ag 涂层摩擦学性能的影响, 并分析了其宽温域润滑机理, 为该涂层在相关领域的应用提供进一步的实验数据和具体的理论指导。

1 实验

1.1 涂层制备

选用的喷涂粉末为雾化技术制备的 NiMoAl 合金和金属 Ag 粉末。NiMoAl 粉末为球形形貌, 粒径为 30~90 μm, 由 Oerlikon Metco 公司提供; Ag 粉末也为球形形貌, 粒径为 80~120 μm, 由北京矿冶研究总

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705481, 51705482); 宁波市国际合作项目基金资助(2017D10017); 浙江省公益项目(2017C31095)

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2019-11-06

通信作者: 陈 杰, 副研究员, 博士; 电话: 0574-87902503; E-mail: chenjie0903@hotmail.com

院提供。将两种喷涂粉末置于机械混料机中充分混合得到所需的喷涂喂料粉末，喂料粉末中 Ag 粉末的质量分数分别为 0、10%和 30%，为了便于对比，将制备的涂层依次命名为涂层 1、涂层 2 和涂层 3。喷涂底材选用尺寸为 $d\ 25\ \text{mm}\times 7.75\ \text{mm}$ 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢块，喷涂前对底材表面进行喷砂粗化处理，将喷砂处理后的底材置于丙酮溶液中超声清洗 10 min，并在烘箱中预热至 150 ℃。采用 APS-2000A 型大气等离子喷涂系统制备 NiMoAl-Ag 涂层，送粉方式为枪外送粉，为保证工艺的准确性和可重复性，喷涂过程由 ABB 六轴联动机械手完成，具体的喷涂参数见表 1。

表 1 大气等离子喷涂参数

Parameter	Value
Current/A	500
Voltage/V	55
Argon flow rate/(L·min ⁻¹)	55
Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	30
Spray distance/mm	80

1.2 性能测试及组织观察

采用 JSM-5600LV 型扫描电镜(SEM)对喷涂粉末和涂层的显微形貌进行表征，加速压电为 20 kV；使用日本 Rigaku 公司 D/Max-2400 型 X 射线衍射仪分析涂层的物相组成。利用 CSM 摩擦磨损试验机 (Switzerland)以球盘接触的方式评价 NiMoAl-Ag 涂层的摩擦磨损性能，并选用 Si₃N₄ 球作为摩擦对偶。在摩擦磨损试验进行前，依次使用 2000[#] SiC 砂纸和金刚石研磨膏抛光涂层，使得表面粗糙度 R_a 在 0.15~0.20 μm 之间。具体的摩擦磨损试验条件为：载荷 5 N、滑动速度 20 cm/s、试验时间 20 min、摩擦半径 6 mm，试验温度分别为 20、200、400、600 和 800 ℃。摩擦因数由与摩擦试验机相连的电脑自动记录，磨损体积由非接触式三维轮廓仪测出 (ADE Corporation，Massachusetts，USA)。磨损率通过公式 $W=V/SF$ 计算得出，其中 V 是磨损体积，mm³； S 是总滑动距离，m； F 是载荷，N。摩擦因数和磨损率取 3 次试验结果的平均值。涂层磨痕表面的显微形貌和组成通过 SEM 和 Raman 光谱仪(Jobin-Yvon HR-800)表征。

2 结果与讨论

2.1 涂层的制备及结构表征

图 1 所示为不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 复合涂层的

截面 SEM 像，可以看出三种涂层整体都较为致密，涂层具有典型的等离子喷涂的层状，仅在局部存在一些微小孔洞。三种涂层与基底的结合都比较好，界面处没有明显的裂纹或孔隙。EDS 分析结果表明，涂层内灰部分为 NiMoAl 基础相，亮色部分为 Ag。可以看出，随着 Ag 含量的增大，Ag 在涂层 1~涂层 3 中的分布逐渐明显。与传统的 PS 系列涂层相比^[14-15]，NiMoAl-Ag 涂层是一种全金属相涂层，不存非金属相组份，两种金属粉末通过高温等离子焰流后能够得到很好的熔融，而且液态金属熔滴相互之间也具有更好的浸润性，因而所制备的涂层结构更为致密。

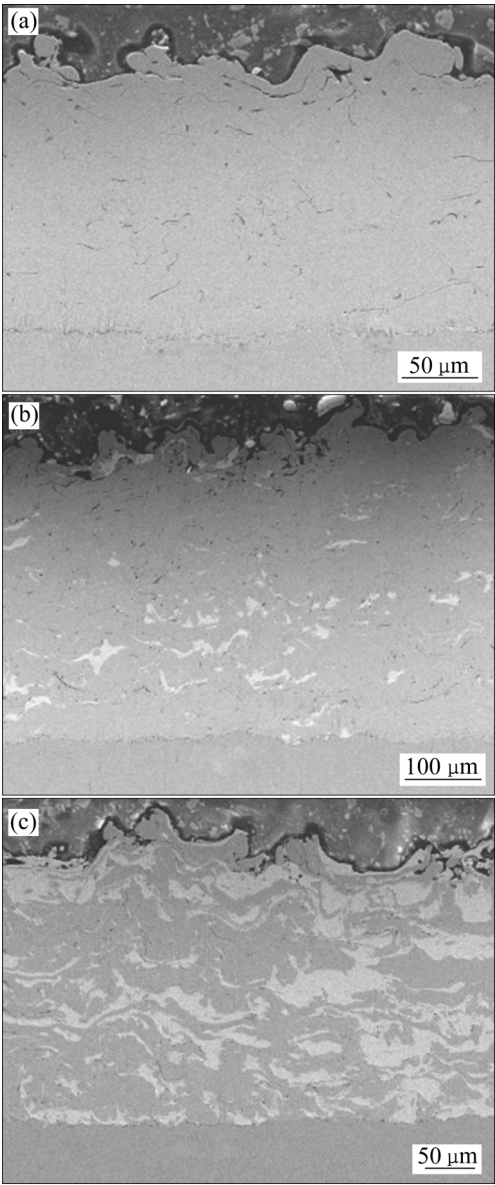


图 1 不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 复合涂层的截面 SEM 像
Fig. 1 Cross-sectional SEM images of NiMoAl-Ag composite coatings with different Ag contents: (a) Coating 1; (b) Coating 2; (c) Coating 3

图2所示为不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 复合涂层的 XRD 谱。由图2可以发现, NiMoAl 基础相以 γ -Ni 固溶相存在于涂层中; 在添加 Ag 粉末后, 涂层出现了明显的 Ag 的衍射峰, 且随着粉末中 Ag 含量的增大, 涂层中 Ag 的衍射峰也明显的增强; 此外, 复合涂层 XRD 谱中并没有其他新相的衍射峰出现, 说明两种喷涂粉末在喷涂过程中没有发生明显的氧化和分解。上述分析表明 Ag 粉末可以较好地复合沉积到 NiMoAl 基相中, 涂层中各组份含量与喷涂粉末具有很好的一致性。

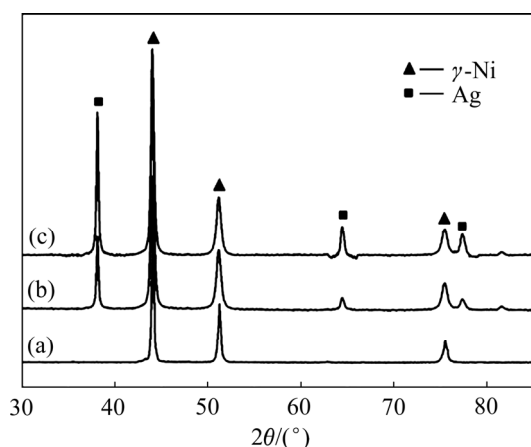


图2 不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 涂层的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of NiMoAl-Ag coatings with different Ag contents: (a) Coating 1; (b) Coating 2; (c) Coating 3

2.2 涂层的摩擦磨损性能表征

图3所示为三种不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 复合涂层在不同摩擦温度下的摩擦因数。由图3可以看到, 对三种涂层来说, 随着温度的升高涂层的摩擦因数都出现逐渐降低的趋势, 三种涂层都表现出明显的高温

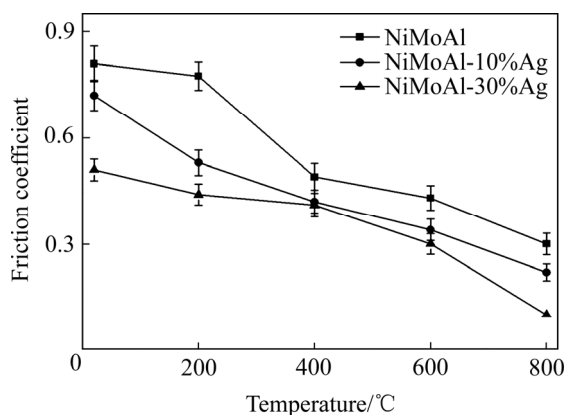


图3 不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 涂层的摩擦因数

Fig. 3 Friction coefficient of NiMoAl-Ag composite coatings with different Ag contents

润滑特性。同时, 涂层中 Ag 含量的大小对涂层的摩擦因数有明显的影 响, 涂层在整个温度区间内的摩擦因数随着 Ag 含量的增加而逐渐降低。NiMoAl 涂层在 20 °C 和 800 °C 的摩擦因数分别为 0.80 和 0.31, 而含有 30%Ag 的涂层在整个温度范围内的摩擦因数都呈现不同程度的降低, 其在 20 °C 和 800 °C 的摩擦因数分别为 0.48 和 0.12, 表现出明显的宽温域润滑特性。

图4所示为三种涂层在不同温度下摩擦试验后, 其涂层磨损率的柱状图。显然, Ag 含量对涂层的磨损率有明显的影 响, 且涂层在不同温度区间内的磨损率随着 Ag 含量的增加呈现出不同的变化趋势。在 400 °C 以下, 随着 Ag 含量的增加, 涂层的磨损率明显增大; 如, 涂层 1 在 20 °C 的磨损率为 $2.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, 而含有 30% Ag 的涂层在 20 °C 的磨损率增大到 $9.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。当试验温度升高到 600 °C 和 800 °C 时, Ag 的加入可以明显地降低涂层的磨损率, 可以看到, 涂层 1、涂层 2 和涂层 3 在 800 °C 的磨损率分别为 6.2×10^{-5} 、 3.6×10^{-5} 和 $4.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

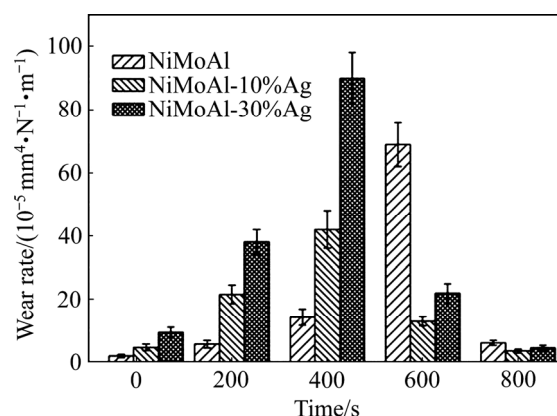


图4 不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 复合涂层的磨损率

Fig. 4 Wear rates of NiMoAl-Ag composite coatings with different Ag contents

图5所示为三种涂层在 20 °C 和 800 °C 条件下摩擦后, 其磨损表面的三维形貌。从图 5(a)~(c)可以看出, 在试验温度为 20 °C 时, 涂层 1~3 的磨损程度呈现逐渐增加的趋势, 涂层 1 具有最小的磨损体积, 但磨损表面表现出严重的磨粒磨损的迹象; 随着 Ag 含量的提高, 涂层的磨损体积大幅度增大, 涂层 3 在室温下磨痕的深度和宽度最大, 但磨损表面非常光滑。从图 5(d)~(f)可以进一步看出, 当温度升高到 800 °C 时, 涂层的磨粒磨损程度减轻, 三种涂层的磨痕表面都出现了摩擦抛光现象, 同时涂层 2 和涂层 3 的磨损体积明显小于涂层 1。上述现象主要归因于两方面原因: 一

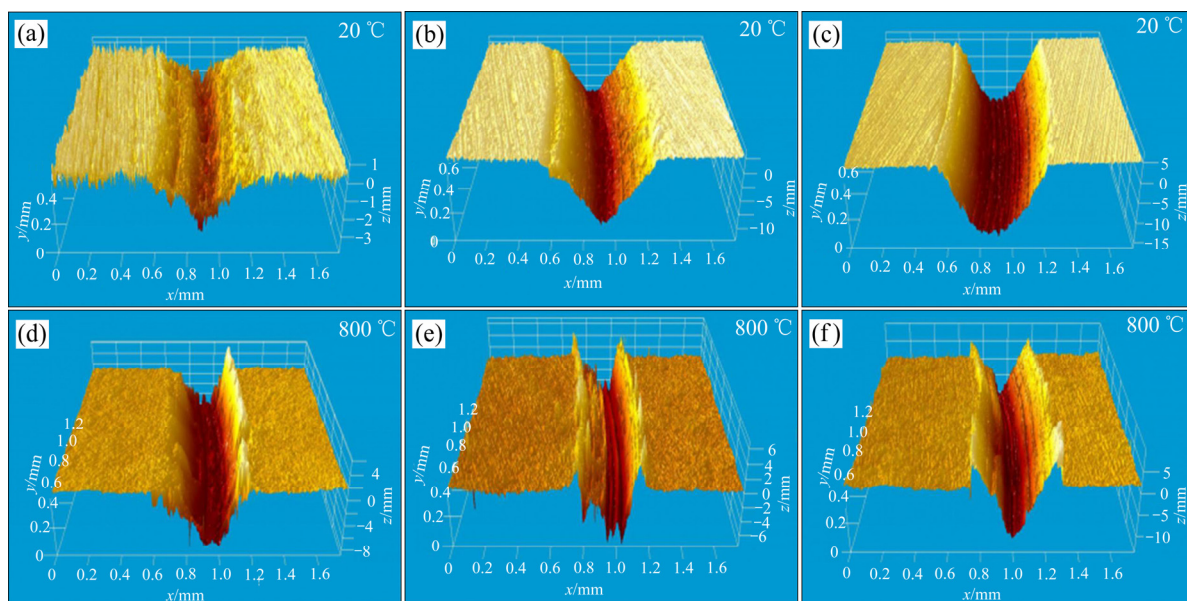


图5 NiMoAl-Ag 复合涂层在 20 °C 和 800 °C 磨痕的三维形貌

Fig. 5 3D surface mapping profiles of worn surfaces of NiMoAl-Ag composite coatings at 20 °C and 800 °C: (a), (d) Coating; (b), (e) Coating 2; (c), (f) Coating 3

是 Ag 具有较好的中低温润滑性能,随着 Ag 含量的增加,涂层在中低温条件下具有更好的自润滑性能,但是 Ag 的加入会降低涂层的硬度和承载能力,导致涂层在中低温段的磨损体积增大;二是在高温下高含量 Ag 涂层具有更好润滑性能,因而保证涂层 3 在高温下具有更好的润滑和耐磨性能。

2.3 涂层的摩擦磨损机理分析

图 6 所示为三种不同 Ag 含量 NiMoAl-Ag 涂层在 20 °C 和 800 °C 磨损表面的 SEM 像。从图 6(a)~(c) 可以看到,当试验温度为 20 °C 时,涂层 1 的磨损表面粗糙并伴有明显的犁沟和不规则剥落坑,表明涂层 1 在室温下的磨损机制为脆性断裂和磨粒磨损。随着 Ag 含量的增加,涂层的磨损表面逐渐变得光滑,涂层 3 表现出最平整的磨痕形貌,磨损表面没有明显的剥落和犁沟,表明 Ag 在 20 °C 可以起到良好的润滑作用。从图 6(d)~(f) 可以看到,当试验温度升至 800 °C 时,三种涂层的磨痕表面都呈现出较为光滑的形貌,磨损表面都产生了一层连续、致密的润滑釉质层;值得注意的是,涂层 2 在 800 °C 的磨痕表面出现了一些明显的颗粒,且涂层 3 磨损表面的颗粒覆盖范围更为明显。经 EDS 分析表明,这种磨损表面出现的细小颗粒由 Ag 元素组成,这是由于 Ag 在 800 °C 的摩擦过程中向摩擦表面富集,在摩擦过程中以一种液态的状态存在于摩擦表面,在摩擦切向力的作用下沿摩擦方向分布,

待样品冷却至室温,扩散到摩擦表面的 Ag 则发生凝固,形成了一系列沿摩擦方向分布的 Ag 颗粒。

为了进一步分析涂层在高温下的摩擦磨损机理,图 7 中给出了含有 30% Ag 的涂层 3 在 800 °C 摩擦后,其磨损表面的 Raman 谱。从图 7 可以看到,涂层 3 磨痕表面的 Raman 谱图中出现了明显的 Ag_2MoO_4 的吸收峰。这表明,在高温摩擦作用下,涂层中的 Ag 元素和 Mo 元素可以发生摩擦化学反应,其摩擦化学反应所生成的 Ag_2MoO_4 是一种具有层状晶体结构的钼酸银类物质,其弱的 O—Ag—O 化学键在高温下容易断裂,从而具有优异的高温润滑性能。而从图 6(f) 可以看到,涂层 3 的磨损表面出现明显的 Ag 颗粒,由于 Ag 的熔点只有 962 °C,因此可以推断,在 800 °C 摩擦过程中,在环境温度和摩擦热的共同作用下 Ag 以液态的形式存在于磨损表面。根据文献[16–17]报道,液态金属一般都具有较低的剪切强度,是一种良好的润滑材料。因而可以确定,在摩擦表面存在的液态 Ag 可以进一步降低涂层在 800 °C 的摩擦因数。这可以较好地解释,含有 30% Ag 的 NiMoAl-Ag 涂层在 800 °C 具有极低摩擦因数和较小磨损体积的原因。综合以上分析可以发现,Ag 的加入可以显著降低 NiMoAl 涂层在宽温域范围内的摩擦因数,但是在一定程度会降低涂层的耐磨性,在后续研究中通过向涂层中复配合适的增强相有望大幅改善其耐磨性能,使之成为一种较有潜力的新型耐磨自润滑涂层材料。

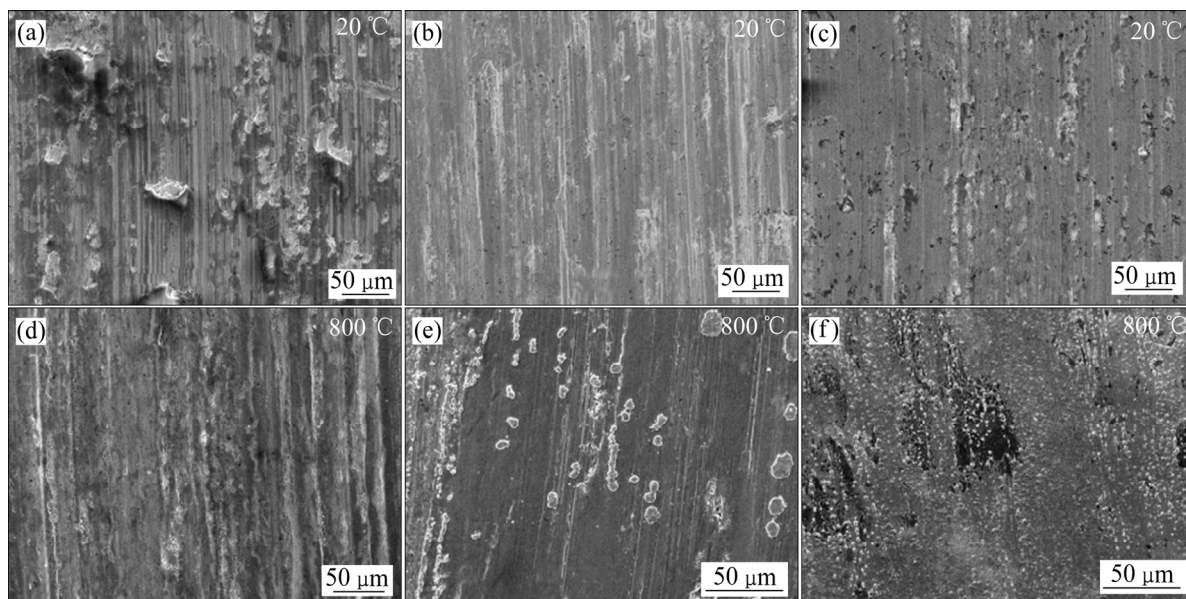


图 6 NiMoAl-Ag 复合涂层在 20 °C 和 800 °C 磨痕的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of worn surfaces of NiMoAl-Ag composite coatings at 20 °C and 800 °C: (a), (d) Coating; (b), (e) Coating 2; (c), (f) Coating 3

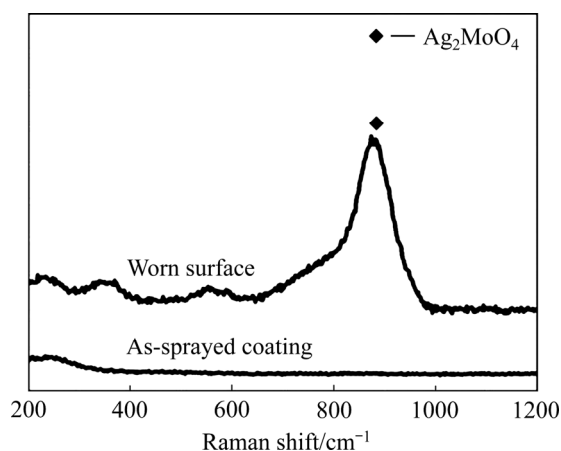


图 7 涂层 3 在 800 °C 磨损前后的 Raman 谱

Fig. 7 Raman spectra of coating 3 at 800 °C before and after wear

3 结论

1) NiMoAl-Ag 涂层 20~800 °C 的摩擦因数随着 Ag 含量的增加而显著下降; 涂层 20~400 °C 的磨损率随着 Ag 含量的提高而增大, 但在 600 °C 和 800 °C 时, Ag 可以提高涂层的耐磨性。

2) NiMoAl-Ag 涂层在不同的温度区间内表现不同的润滑机理: 在中低温段, 涂层由低剪切强度的 Ag 提供润滑作用; 在高温段, 涂层磨痕表面生成具有高

温润滑作用的钼酸银类物质。

3) 涂层 3 在 800 °C 具有极低摩擦因数和较低磨损率的原因是: 高温摩擦界面存在液态 Ag 和在环境温度及摩擦过程共同作用下所形成的钼酸银润滑釉质层, 这两者产生了协同润滑作用。

REFERENCES

- [1] 陈建敏, 卢小伟, 李红轩, 周惠娣. 宽温域固体自润滑涂/覆层材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 592-600.
CHEN Jian-min, LU Xiao-wei, LI Hong-xuan, ZHOU Hui-di. Progress of solid self-lubricating coating over a wide range of temperature[J]. Tribology, 2014, 34(5): 592-600.
- [2] 李博雅, 曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 32-38.
LI Bo-ya, CAO Zhi-qiang. Metal-based solid self-lubricating composite coating and its preparation technology[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 32-38.
- [3] 刘二勇, 贾均红, 高义民, 曾志翔, 乌学东. 宽温域连续润滑材料的研究进展[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 1-13.
LIU Er-yong, JIA Jun-hong, GAO Yi-min, ZENG Zhi-xiang, WU Xue-dong. Progress of continuous lubricating materials over a wide temperature range[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 1-13.

- [4] 华希俊, 孙建国, 张培耘, 丁积霖, 郝静文, 刘 凯. 激光微织构固体润滑表面高温摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 112–118.
HUA Xi-jun, SUN Jian-guo, ZHANG Pei-yun, DING Ji-lin, HAO Jing-wen, LIU Kai. Tribological properties of the laser micro-texture surface filled with solid lubricant at elevated temperature[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 112–118.
- [5] VOEVODIN A A, MURATORE C, AOUADI S M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: Review[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 257: 247–265.
- [6] DU L Z, HUANG C B, ZHANG W G, LI T G, LIU W. Preparation and wear performance of NiCr/Cr₃C₂-NiCr/hBN plasma sprayed composite coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(12), 3722–3728.
- [7] 杨素兰, 马 勤, 王文珍, 贾均红. Mo 含量对镍基合金力学及摩擦学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(11): 2267–2275.
YANG Su-lan, MA Qin, WANG Wen-zhen, JIA Jun-hong. Effect of molybdenum content on mechanical and tribological properties of nickel-base alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(11): 2267–2275.
- [8] ZHANG T T, LAN H, HUANG C B, YU S Q, DU L Z, ZHANG W G. Preparation and characterizations of nickel-based composite coatings with self-lubricating property at elevated temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 294(25): 21–29.
- [9] DELLACORTE C, FELLESTEIN J A. The effect of compositional tailoring of the thermal expansion and tribological properties of PS300: A solid lubricant composite coating[J]. Tribology Transactions, 1997, 40(4): 639–642.
- [10] DELLACORTE C. The evaluation of a modified chrome oxide based high temperature solid lubricant coating for foil gas bearings[J]. Tribology Transactions, 2000, 43(2): 257–262.
- [11] 何鹏飞, 王海斗, 马国政, 雍青松, 陈书赢, 徐滨士. 含银硬质涂层高温摩擦学性能的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 2962–2974
HE Peng-fei, WANG Hai-dou, MA Guo-zheng, YONG Qing-song, CHEN Shu-ying, XU Bin-shi. Research progress of high-temperature tribological properties of silver-containing hard coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 2962–2974
- [12] CHEN J, ZHOU H D, ZHAO X Q, CHEN J M, AN Y L, YAN F Y. Microstructural characterization and tribological behavior of HVOF sprayed NiMoAl coating from 20 to 800 °C[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(3): 348–356.
- [13] CHEN J, ZHAO X Q, ZHOU H D, CHEN J, AN Y, YAN F. HVOF-sprayed adaptive low friction NiMoAl-Ag coating for tribological application from 20 to 800 °C[J]. Tribology Letters, 2014, 56(1): 55–66.
- [14] DELLACORTE C, FELLESTEIN J A, BENOY P A. Evaluation of advanced solid lubricant coatings for foil air bearings operating at 25 and 500 °C[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(2): 338–342.
- [15] DELLACORTE C, EDMONDS B J. NASA PS400: A new high temperature solid lubricant coating for high temperature wear applications[R]. NASA/TM-2009-215678, E-17044. Washington D C: NASA Technical Reports Server, 2009.
- [16] 温诗铸, 黄 平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [17] WILD E, MACK K J. Lubrication of nuclear reactor components friction systems in liquid sodium and argon[J]. Tribology International, 1978, 11(6): 321–324.

Effect of Ag content on lubrication behavior of NiMoAl based coating in wide temperature range

CHEN Jie¹, SONG Hui¹, ZHENG Zi-yun¹, AN Yu-long², CHEN Jian-min², ZHOU Hui-di²

(1. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This work aims to satisfy the urgent need for materials that possess good lubrication and wear resistance under the wide temperature range (especially high temperature) for many industrial moving parts. Three kinds of NiMoAl-Ag solid lubricating coatings were prepared on stainless steel substrate by atmospheric plasma spraying (APS), using the composite powders that contained 0%, 10% and 30% Ag in mass fraction as feedstock powders. Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), CSM tribometer and 3D optical profiler were used to evaluate the microstructure and tribological properties of as-sprayed coatings at temperatures from 20 °C to 800 °C. The experimental results show that friction coefficients of NiMoAl-Ag coating decreases significantly with the increase of Ag content, and the coating containing 30% Ag has the lowest friction coefficient of 0.12 at 800 °C. However, the increase of Ag content reduces the wear resistance of the coating at 20–400 °C. When the temperature further increases to 600 °C and 800 °C, the addition of Ag can obviously reduce the wear volume of the coating. Further analysis of the lubrication mechanism indicates that when the Ag content in the coating increases, the synergistic lubrication effect of liquid Ag and molybdate silver lubricating enamel layer can be formed at the high temperature friction interface, so that the coating has low friction coefficient and wear rate. Therefore, NiMoAl-Ag composite coating prepared by APS has excellent self-lubricating properties in wide temperature range. It is also expected that the suitable reinforcement phase may greatly improve its low temperature wear resistance, thus NiMoAl-Ag coating is a potential new wear-resistant and self-lubricating coating material in wide temperature range.

Key words: atmospheric plasma spraying; NiMoAl; Ag; self-lubricating; wide temperature range; lubrication mechanism

Foundation item: Projects(51705481, 51705482) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2017D10017) supported by the Ningbo International Cooperation Project, China; Project (2017C31095) supported by the Public Welfare Project of Zhejiang Province, China

Received date: 2018-04-10; **Accepted date:** 2019-11-06

Corresponding author: CHEN Jie; Tel: +86-574-87902503; E-mail: chenjie0903@hotmail.com

(编辑 何学锋)