

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.11.001

9Cr18 不锈钢表面不同耐磨镀层的微观结构及耐磨性

喻岚¹, 汪镇涛², 熊梧尧¹, 潘鹤³, 黄鑫¹, 王帅星^{2*}, 唐华¹, 杜楠²

(1. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵州 贵阳 550009; 2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063; 3. 空军装备部驻成都地区军事代表局驻贵阳地区第二军事代表室, 贵州 贵阳 550009)

摘要: 针对9Cr18不锈钢的耐磨需求, 选用硬铬镀层、Ni-P化学镀层、Ni-cBN/hBN复合镀层等3种镀层, 通过扫描电镜、划痕法、球盘磨损试验等研究了其在微观结构、结合力、常温及高温耐磨性等方面的差异。结果表明, 3种镀层的硬度均可达800 HV以上, 但Ni-cBN/hBN复合镀层的硬度略高; 经过预镀镍处理后Ni-cBN/hBN复合镀层与基体之间的结合强度高达68 MPa, 但硬铬镀层与基体的结合力较差; Ni-P化学镀层和Ni-cBN/hBN复合镀层在常温下的耐磨性相当, 但Ni-cBN/hBN复合镀层在200 °C下的耐磨性略优; 硬铬镀层在摩擦应力作用下涂层出现明显剥落、黏着磨损严重, 耐磨性较差。Ni-cBN/hBN复合镀层更宜选作9Cr18不锈钢表面的耐磨镀层。

关键词: 9Cr18 不锈钢; 硬铬镀层; Ni-P化学镀层; Ni-cBN/hBN复合镀层; 耐磨性

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

Microstructure and wear resistance of different wear resistant coatings on 9Cr18 stainless steel

Yu Lan¹, Wang Zhentao², Xiong Wuyao¹, Pan He³, Huang Xin¹, Wang Shuaixing^{2*}, Tang Hua¹, Du Nan²

(1. AECC Guizhou Honglin Aero-engine Control Technology Co. Ltd., Guiyang 550009, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. The Second Military Representative Office in Guiyang of Chengdu Military Representative Bureau of Air Force Equipment Department, Guiyang 550009, China)

Abstract: In view of the wear resistance requirements of 9Cr18 stainless steel, hard chromium coating, Ni-P electroless coating and Ni-cBN/hBN composite coating were selected. The microstructure, adhesion, room temperature and high temperature wear resistance of three coatings were studied through scanning electronic microscope (SEM), scratch method and the ball-disk wear test. The results showed that the hardness of the three coatings can reach above 800 HV, but the hardness of Ni-cBN/hBN composite coating is slightly higher. After pre-plating nickel treatment, the adhesion between Ni-cBN/hBN composite coating and the matrix is up to 68 MPa, but the adhesion between hard chromium coating and the matrix is poor. The wear resistance of Ni-P electroless coating and Ni-cBN/hBN composite coating is equivalent at room temperature, but the wear resistance of Ni-cBN/hBN composite

收稿日期: 2022-12-06

修回日期: 2022-12-23

作者简介: 喻岚(1984—), 女, 工程师, 主要从事航空材料表面处理, email: 368633879@qq.com

*通信作者: 王帅星, email: wsxxpg@126.com

基金项目: 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2020CXY026)

coating is slightly better at 200 °C. The hard chromium coating has obvious peeling and serious adhesive wear under the action of friction stress, its wear resistance is poor. Ni-cBN/hBN composite coating is more suitable for the wear-resistant coating on the surface of 9Cr18 stainless steel.

Keywords: 9Cr18 stainless steel; hard chromium coating; Ni-P electroless coating; Ni-cBN/hBN composite coating; wear resistance

9Cr18 不锈钢广泛用于制作航空发动机齿轮、活门等关键部件,在长期的高速旋转及高温使用工况下,其表面极易发生磨损失效^[1-2];因此,为了提高这些关键零组件的使用寿命和可靠性,往往需要涂覆高温耐磨涂层。电镀、化学镀、激光熔覆、热喷涂等是制备耐磨涂层的常用手段^[3-8]。其中,硬铬镀层硬度高达 700~800 HV,广泛用于齿轮、轴类零件等的耐磨处理^[7,9];化学镀 Ni-P 合金镀层经过热处理后,硬度也可达到 800 HV 以上,在不锈钢、钛合金的耐磨处理上也有广泛应用^[4]。

除此之外,复合电镀作为电镀技术的延伸,在制备耐磨镀层上更具竞争力。Ni-金刚石、Ni-Si₃N₄ 复合镀层已在军民领域有所应用^[5,10-12]。此外,鉴于立方氮化硼(cBN)颗粒具有高的硬度和良好的热稳定性,有学者制备了 Ni-cBN 耐磨涂层,提升了 GH4169 合金的高温耐磨性^[13-14];也有学者利用六方氮化硼(hBN)的良好润滑性制备了 Ni-hBN 减摩涂层,研究证实 Ni-hBN 涂层的摩擦系数最低可为 0.08^[15-16]。考虑到 cBN 颗粒的高硬度和 hBN 的润滑性,前期研究也证实 Ni-cBN/hBN 复合镀层可以实现耐磨与减摩性的协同改善,在不锈钢、钛合金等零件的耐磨处理上具有较大优势。因此,本文针对 9Cr18 不锈钢,选用硬铬镀层、化学镀镍层、Ni-cBN/hBN 复合镀层等三种镀层进行表面处理,对比其在结合力、常温耐磨性、高温耐磨性方面的性能差异;研究结果可为航空发动机中关键部件的耐磨镀层选型及表面强化提供一定的数据参考。

1 试验

1.1 基材及电镀工艺流程

采用 9Cr18 不锈钢作为基体,其尺寸为 $\Phi 20 \times 5$ mm,主要工艺流程为:除油→温水洗→冷水洗→酸洗活化→去离子水洗→预镀镍→去离子水洗→电镀(化学镀)→去离子水洗→吹干。

化学除油液组成和工艺条件为:NaOH 40~

60 g/L、Na₂CO₃ 30~40 g/L、Na₃PO₄ 35~60 g/L、Na₂SiO₃·9H₂O 10~20 g/L,温度 60~70 °C,时间 5~8 min。

活化液组成及工艺条件为:HCl 20~35 g/L,室温,时间 1~2 min。

预镀镍溶液组成及工艺条件为:NiCl₂ 400 g/L、HCl 120 g/L,电流密度 4 A/dm²,温度 60~70 °C,时间 15 min。

电镀硬铬的配方及工艺参数为:CrO₃ 250 g/L、H₂SO₄ 2.5 g/L,电流密度 40~50 A/dm²,温度 57~60 °C、时间 30 min。

化学镀镍的配方及工艺参数为:Ni₂SO₄·6H₂O 25~30 g/L、NaH₂PO₂ 15 g/L、NH₄Cl 50 g/L、柠檬酸钠 60 g/L,pH 值 8.5~9.5,温度 80~85 °C,时间 5 min。

Ni-cBN/hBN 复合电沉积的配方及工艺参数为:Ni(SO₃NH₂)₂·4H₂O 150~200 g/L、H₃BO₃ 35~40 g/L、NiCl₂ 5 g/L、十二烷基硫酸钠 0.1 g/L、cBN 颗粒 60 g/L 和 hBN 颗粒 10 g/L,电流密度 2~4 A/dm²,温度 55~60 °C、时间 60 min。

1.2 镀层结构及结合力表征

采用 Nova Nano SEM 450 场发射扫描电镜(FESEM)和 Bruker D8-Advance X 射线衍射仪(XRD)分析不同镀层的微观形貌及结构。使用 401MVD 数显显微维氏硬度计在常温下测量测试不同镀层的硬度,表面硬度测试加载载荷为 350 g,考虑镀层厚度不超过 20 μm,截面硬度测试时加载载荷设为 100 g。

采用 WS-2005 型划痕仪测试不同处理镀层与 9Cr18 不锈钢基体之间的结合力。测试时,使用金刚石探针沿镀层表面进行刻划,界面开裂瞬间所对应的载荷指定为临界载荷(L_c);其中,加载速率为 20 N/min,载荷范围为 0~40 N, L_c 由声发射信号记录。根据公式(1)可以计算出涂层与基体界面的结合强度(τ)^[17]。

$$\tau = \frac{kAH}{(R^2 - A^2)^{1/2}} \quad (1)$$

式中: R 为划针头的半径($200\ \mu\text{m}$); A 为划针头与涂层的接触半径, $A=(L_c/\pi H)^{1/2}$; L_c 为临界载荷; H 为基体的硬度; k 为无量纲常数,常取0.15。

通过HT-1000型高温球盘磨损机测试不同镀层的摩擦学性能。摩擦副为 $\Phi 5\ \text{mm}$ 的 Si_3N_4 球,温度为室温和 $200\ ^\circ\text{C}$,转速为 $200\ \text{rad}/\text{min}$,载荷为 $5\ \text{N}$,磨损轨迹半径为 $5\ \text{mm}$,磨损时间为 $30\ \text{min}$ 。摩擦后,采用KH-7700三维视频显微镜观察磨痕形貌,拟合磨痕剖面面积 $A(\text{mm}^2)$,并按公式(2)计算比磨损率 $K(\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m})$ 。

$$K = \frac{V}{PS} = \frac{2\pi rA}{PS} \quad (2)$$

式中: r 为磨痕轨道半径(mm); V 为磨损体积

(mm^3); P 为载荷(N); S 为滑动距离(m)。

2 结果与讨论

2.1 不同耐磨镀层的微观结构

图1为9Cr18不锈钢表面不同镀层的表面及截面SEM图。由图1(a)和1(b)可知,标准硬铬镀层表面存在细而长的裂纹,且裂纹贯穿整个镀层直到基体,局部表面还有少量的铬瘤。由图1(c)和1(d)可知,化学镀Ni-P镀层表面呈胞状结构,但镀层与基体之间结合不够紧密,存在微小间隙。从图1(e)和1(f)可以看出,通过复合电沉积,cBN和hBN颗粒在电场力和机械搅拌作用下与Ni发生共沉积形成了Ni-BN复合镀层^[13, 18],镀层表面均匀弥散地分布着大量cBN和hBN颗粒,截面形貌也可以看出BN颗粒较均匀地分散在镀层中。

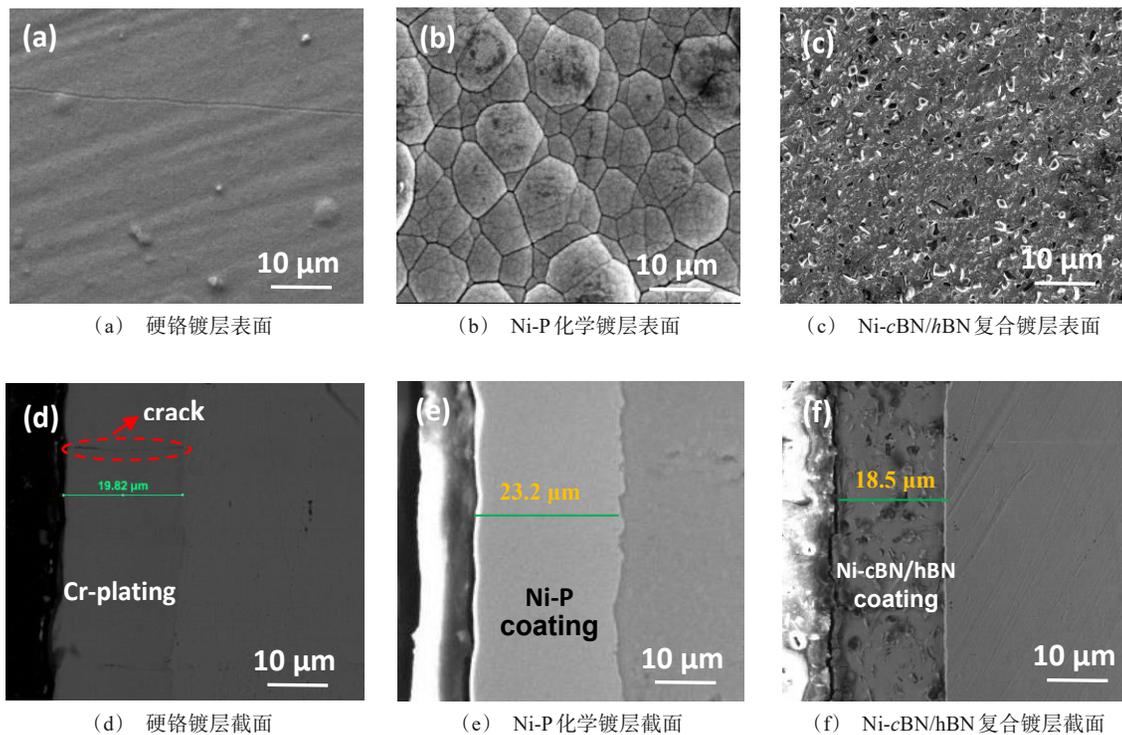


图1 9Cr18不锈钢表面不同镀层的表面及截面SEM图

Fig. 1 SEM images of surface and section of different coatings on 9Cr18 stainless steel

2.2 不同耐磨镀层的硬度及结合力

表1给出了9Cr18不锈钢表面硬铬镀层、化学镀镍层及Ni-cBN/hBN复合镀层的显微硬度,图2给出了Ni-cBN/hBN复合镀层的表面和截面硬度压痕

图。由表1和图2(a)可知,3种镀层的表面硬度均可达 $800\ \text{HV}$ 以上,但Ni-cBN/hBN复合镀层的表面硬度明显更高;由表1和图2(b)可知Ni-cBN/hBN复合镀层的截面硬度更高,可达 $907\ \text{HV}_{0.1}$,其镀层硬度还

可随cBN颗粒含量进行调整。

表1 不同耐磨镀层的相关性能对比

Tab.1 Comparison of related properties of different wear resistant coatings

镀层类型	结合力(划格法)	临界载荷 L_c /N	结合强度/MPa	表面硬度/HV _{0.35}	截面硬度/HV _{0.1}
硬铬镀层	划格时交叉处镀层起粉、鼓泡	11.5	43.3	808	814
化学镀镍层 (热处理后)	划格时无明显剥落或起皮现象	14.3	49.4	820	826
Ni-cBN/hBN 复合镀层	镀层完整,无剥落或起皮	24.8	68.6	849	907

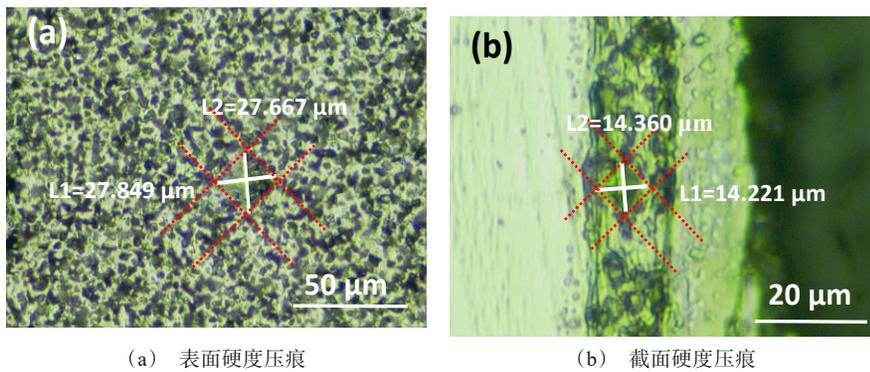


图2 Ni-cBN/hBN复合镀层的硬度压痕形貌

Fig. 2 Hardness indentation morphology of Ni-cBN/hBN composite coating

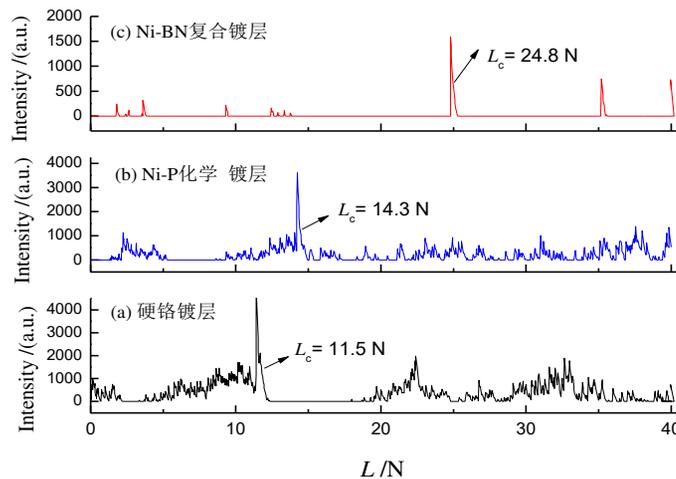


图3 9Cr18不锈钢表面不同耐磨镀层的结合强度

Fig. 3 Bond strength of different wear resistant coatings on 9Cr18 stainless steel

此外,本文通过划格法和划痕仪综合评价了三种镀层与9Cr18不锈钢的结合力,结果见图3和表1。由图3(a)可知,9Cr18不锈钢经过预镀镍处理后再进行Ni-cBN/hBN复合电镀,镀层结合力较好;划格测试时镀层完整、无剥落或起皮;划痕仪测试显

示镀层破裂临届载荷为24.8 N,经公式换算后涂层结合强度达到68 MPa,满足使用要求。然而,即使选择预镀镍处理,9Cr18不锈钢表面硬铬镀层的结合力依旧较差,划格测试时交叉处镀层起粉、鼓泡,不满足使用要求。此外,9Cr18不锈钢表面的化学

镀镍层经过热处理后虽然硬度高达800 HV,划格测试时虽然镀层无明显脱落、起皮现象,但划痕仪测试显示镀层破裂的临界载荷仅为14.3 N(见图3b),经公式换算后涂层结合强度约为49 MPa,低于镍基复合镀层与9Cr18不锈钢之间的结合力。因此,从结合力角度考虑,硬铬镀层不宜选做9Cr18不锈钢的耐磨镀层,选择Ni-cBN/hBN复合镀层更为合适。

2.3 不同耐磨镀层的常温摩擦学性能

图4、图5给出了9Cr18不锈钢表面不同耐磨镀

层在室温条件下的磨损形貌及摩擦曲线;表2给出了比磨损率结果。由表2和图5可知,9Cr18不锈钢基体摩擦系数 μ 较大($\mu=0.8$)且随时间剧烈波动;摩擦60 min后,其比磨损率高达 $5.24 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,基底表面布满了由黏着磨损引起的剥落坑及由磨粒磨损造成的深浅不一的犁沟,见图4(a)。施加耐磨镀层后,9Cr18不锈钢的摩擦系数均有所降低,但不同镀层的耐磨性存在较大差异。

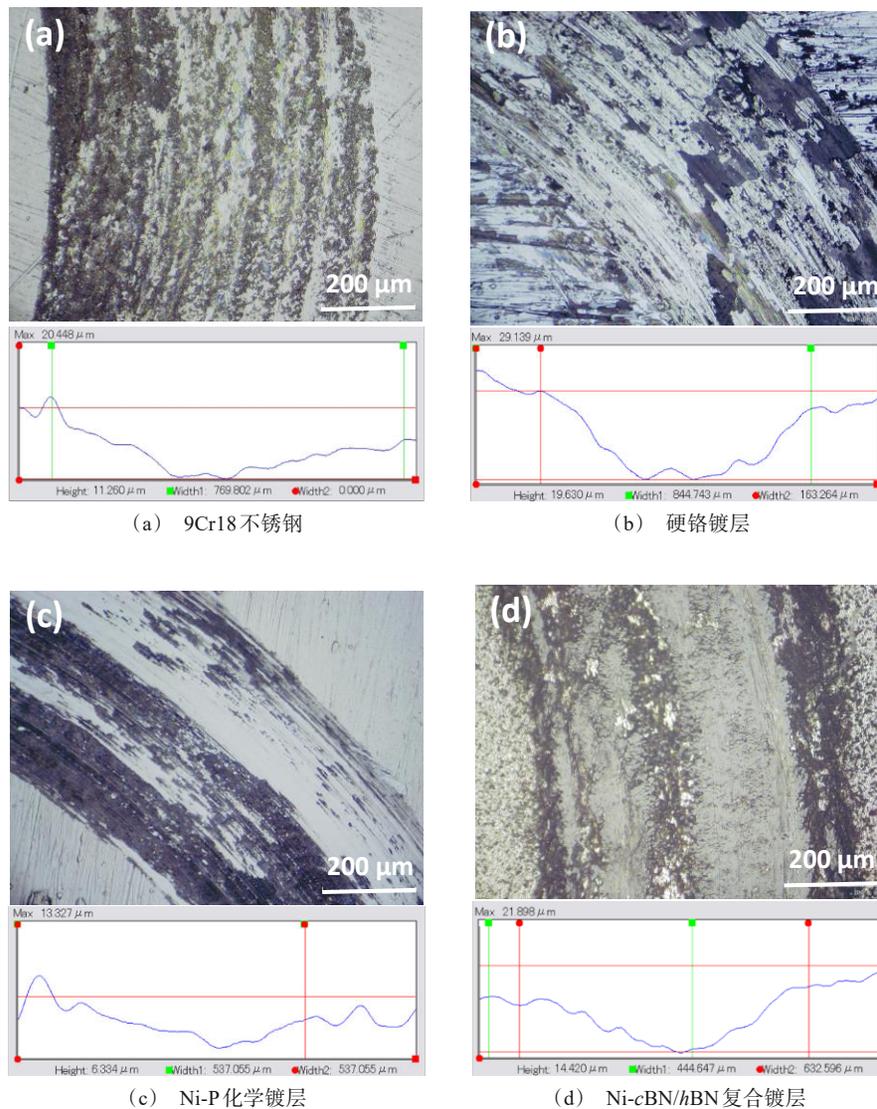


图4 9Cr18不锈钢及不同镀层的常温磨损形貌及磨损轮廓

Fig. 4 Wear morphology and wear profile of 9Cr18 stainless steel and different coatings at room temperature

表2 9Cr18不锈钢及不同镀层的常温比磨损率

Tab.2 Specific wear rates of 9Cr18 stainless steel and different coatings at room temperature

镀层类型	9Cr18 不锈钢基体	硬铬镀层	Ni-P 化学镀层	Ni-cBN/hBN 复合镀层
比磨损率/(mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)	5.24×10 ⁻⁵	3.56×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻⁵	2.87×10 ⁻⁵

整体来看, Ni-P 化学镀层的摩擦系数与 Ni-cBN/hBN 复合镀层相近, 均为 0.5 左右; 硬铬镀层的摩擦系数高于前两者、约为 0.75。由图 4(b) 可知, 由于 9Cr18 不锈钢表面硬铬镀层结合力差, 在摩擦应力作用下涂层出现明显剥落, 随之出现严重的黏着磨损, 损失体积较大, 比磨损率高达 3.56×10⁻⁴ mm³/(N·m), 耐磨性较差。从图 4(c) 和 4(d) 可知, Ni-P 化学镀层和 Ni-cBN/hBN 复合镀层在磨损后表面均以轻微的犁沟为主、未出现明显的黏着剥落, 比磨损率低于硬铬镀层。因此, 在常温条件下, 二者均可选做 9Cr18 不锈钢表面的耐磨镀层。

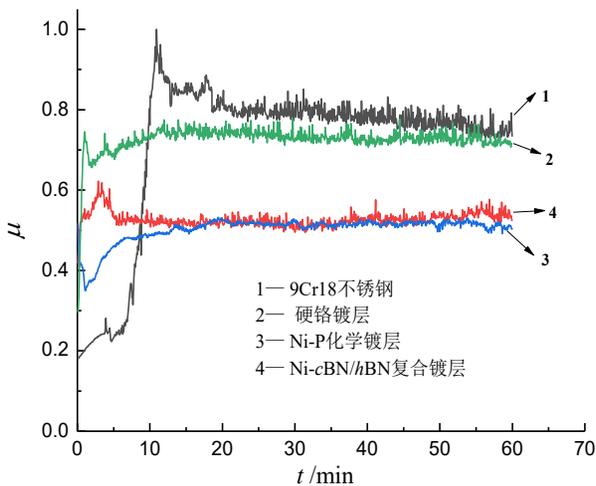


图5 常温条件下9Cr18不锈钢及不同镀层的摩擦系数曲线
Fig. 5 Friction coefficient curves of 9Cr18 stainless steel and different coating at room temperature

2.4 不同耐磨镀层的高温摩擦学性能

考虑到精密活门会在 200 °C 高温环境下使用, 因此还对比研究了 9Cr18 不锈钢表面不同镀层在 200 °C 条件下的摩擦磨损性能, 结果见图 6、图 7 和表 3。由图 4 和图 6 可知, 相比于常温条件, 200 °C 下所有镀层的摩擦系数均有所增加, 磨损程度有所加剧。分析认为, 高温可使金属软化、硬度降低, 塑性变形容易发生, 随着滑动摩擦的持续进行, 材料的连续性被破坏, 引起剥层磨损^[13, 19-20]; 同时高温环境也会造成较为严重的黏着磨损。

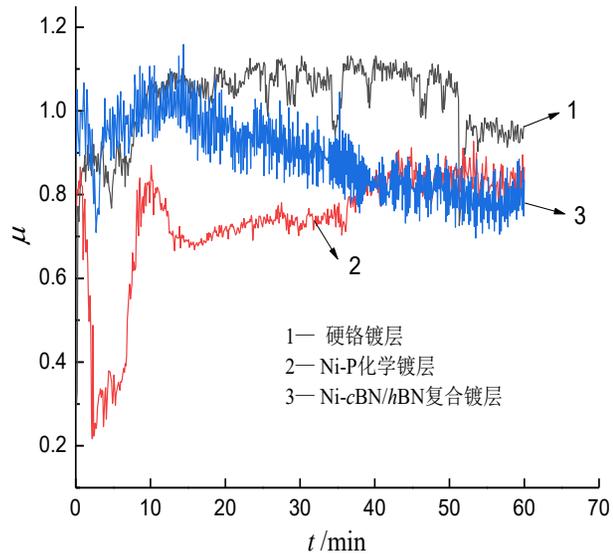


图6 200 °C下9Cr18不锈钢表面不同镀层的摩擦系数曲线
Fig. 6 Friction coefficient curves of different coatings on 9Cr18 stainless steel at 200 °C

对比 3 种镀层的摩擦系数和磨损形貌发现, 硬铬镀层的摩擦系数仍然最高, 约为 1.0 左右, 磨损后表面出现严重的粘着剥落坑, 且镀层脱落严重, 其比磨损率高达 5.67×10⁻⁴ mm³/(N·m)。Ni-P 化学镀层与 Ni-cBN/hBN 复合镀层的稳定摩擦系数、磨损形貌均较为接近, 说明二者耐磨性相当; 但从图 6 可以看出, Ni-cBN/hBN 复合镀层的摩擦系数随摩擦时间延长一直呈下降趋势, 在长期摩擦过程中, 其耐磨性会更优。分析认为, Ni-cBN/hBN 复合镀层表面可能存在部分凸起的 cBN 颗粒、表面粗糙度较高; 磨损初期, 镀层中 cBN 颗粒与 Si₃N₄ 对磨小球发生磨损造成摩擦系数略高, 但由于镀层中存在 hBN 颗粒, 在磨损后期, hBN 可在膜层表面形成一层润滑膜, 使得摩擦系数逐渐下降并在后期趋于稳定^[15, 21]; 因此, 其综合比磨损率(1.26×10⁻⁴ mm³/(N·m))略低于化学镀镍层。

因此, 综合考虑三种耐磨镀层的结合力、常温耐磨性及高温耐磨性, Ni-cBN/hBN 复合镀层更宜选作 9Cr18 不锈钢表面的耐磨镀层。

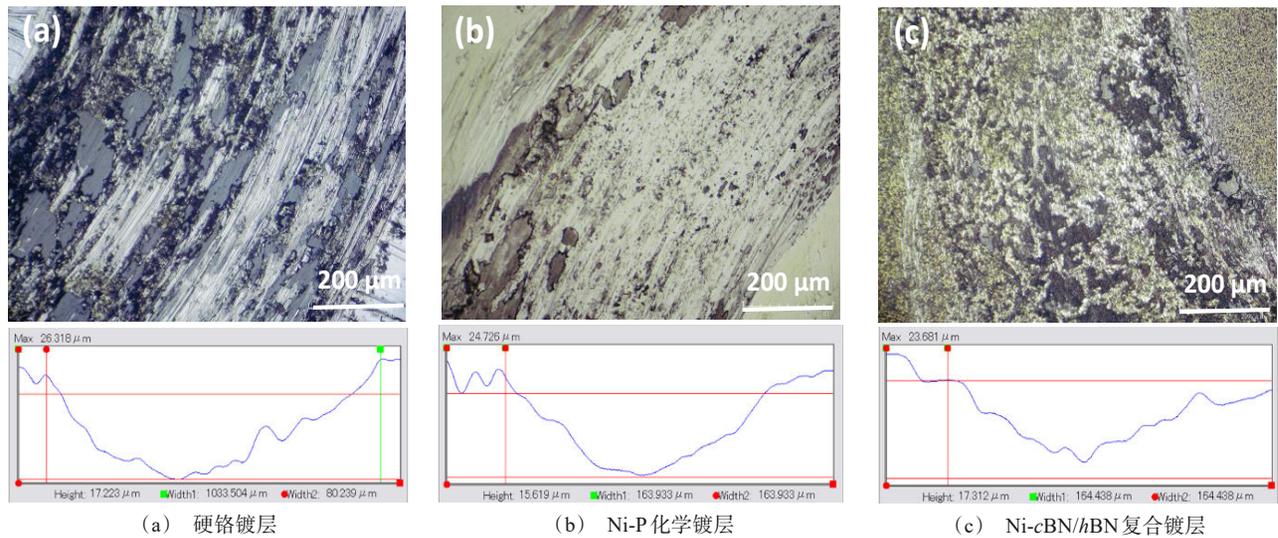


图7 9Cr18不锈钢表面不同镀层在200 °C下的磨损形貌及磨损轮廓

Fig. 7 Wear morphology and wear profile of different coatings on 9Cr18 stainless steel at 200 °C

表3 9Cr18不锈钢表面不同镀层在200 °C下的比磨损率

Tab.3 Specific wear rate of different coatings formed on 9Cr18 stainless steel at 200 °C

镀层类型	硬铬镀层	Ni-P化学镀层	Ni-cBN/hBN复合镀层
比磨损率/($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	5.67×10^{-4}	1.32×10^{-4}	1.26×10^{-4}

3 结论

(1)硬铬镀层存在贯穿整个镀层的微裂纹、且表面存在少量铬瘤;Ni-P化学镀层表面呈胞状结构,但镀层与基体之间结合不够紧密;Ni-cBN/hBN复合镀层表面及镀层中均匀弥散地分布着大量cBN和hBN颗粒;3种镀层的硬度均可达800 HV以上,且Ni-cBN/hBN复合镀层的硬度略高。

(2)即使经过预镀镍处理,9Cr18不锈钢表面硬铬镀层的结合力依旧较差;Ni-P化学镀层虽然划格测试时镀层无明显脱落,但结合强度只有49 MPa;而经预镀镍处理后再进行复合电镀,Ni-cBN/hBN复合镀层结合力较好、结合强度大于68 MPa。

(3)无论常温还是200 °C下,9Cr18不锈钢表面硬铬镀层的摩擦系数均较高,且在摩擦应力作用下涂层出现明显剥落、黏着磨损严重,耐磨性较差。常温下,Ni-P化学镀层和Ni-cBN/hBN复合镀层的摩擦系数、磨损形貌、比磨损率均较为接近,耐磨性相当;200 °C下,Ni-cBN/hBN复合镀层的摩擦系数随磨损时间延长呈下降趋势,在长期摩擦过程中其耐

磨性更优。

(4)综合考虑3种耐磨镀层的结合力、常温耐磨性及高温耐磨性,Ni-cBN/hBN复合镀层更宜选作9Cr18不锈钢表面的耐磨镀层。

参考文献

- [1] 古乐,王黎钦,郑德志,等.液氮介质中 $\text{Si}_3\text{N}_4/9\text{Cr18}$ 配副摩擦磨损性能研究[J].润滑与密封,2007(11):48-50,27.
- [2] Lemoine E, Nelias D, Thouvere F, et al. Influence of fretting wear on bladed disks dynamic analysis[J]. Tribology International, 2020, 145:106148.
- [3] 刘峰斌,李景林,金杰,等.氮离子注入9Cr18Mo不锈钢的表面结构与力学性能[J].稀有金属材料与工程,2013,42(9):1833-1843.
- [4] 包翠敏,庄春瑜,陈蕊,等.压缩机叶轮用不锈钢化学镀Ni-P工艺及镀层性能[J].材料保护,2015,48(6):7-11,6.
- [5] 徐雨生,丁慧,向莉,等.Ni-金刚石复合涂层的厚膜化及其耐磨性研究[J].表面技术,2019,48(4):223-229.
- [6] 王跃明,唐求豪,夏运朝,等.超音速火焰喷涂

- TiB₂-50Ni 复合涂层的高温摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 89-98.
- [7] 杨堃, 张明, 孙小岚. TC2、TC6 表面喷涂 WC-17Co 与电镀铬耐磨性能对比[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(10): 26-30.
- [8] Irissou E, Dadouche A, Lima R S. Tribological characterization of plasma-sprayed CoNiCrAlY-BN abradable coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(1-2): 252-261.
- [9] 胡忠卿, 王帅星, 柳鑫, 等. 不同镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 高强钢疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 184-191.
- [10] 苑博旭, 马春阳, 张思栋. 超声-射流电沉积 Ni/Co-TiN 纳米镀层的工艺参数优化及性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 92-98, 133.
- [11] Zhou H, Du N, Zhu L, et al. Characteristics investigation of Ni-diamond composite electrodeposition[J]. Electrochimica Acta, 2015, 151:157-167.
- [12] Jin P, Sun C, Zhou C, et al. Effect of SiC particle size on structures and properties of Ni-SiC nanocomposites deposited by magnetic pulse electrodeposition technology [J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 20155-20164.
- [13] 刘静, 王帅星, 王万成, 等. cBN 微粒粒径及含量对 Ni-cBN 复合镀层结构及高温耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 250-259.
- [14] Liu Y D, Liu J H, Gu W S, et al. Oxidation, mechanical and tribological behaviors of the Ni/cBN abrasive coating-coated titanium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(7): 1007-1020.
- [15] 杨芳儿, 蔡晨宾, 黄寅迪, 等. 不同 h-BN 含量 Ni-P-WS₂-BN 化学镀层的组织结构及磨损性能[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 284-290.
- [16] 王檬, 朱志云, 冯艳, 等. Ni-Cr/hBN 自润滑复合材料的摩擦学性能研究[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(6): 37-42.
- [17] 杨班权, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基体材料界面结合强度测量方法的现状与展望[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 67-79.
- [18] 詹中伟, 葛玉麟, 田礼熙, 等. 搅拌速度和颗粒尺寸对复合电沉积 Ni-cBN 复合量的影响及机理分析[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 1-5.
- [19] 汤金钢, 刘道新, 唐长斌, 等. Ti6Al4V 钛合金表面 Zr-N 合金化层的抗高温摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(2): 331-335.
- [20] 秦峰, 迟新宇, 袁建军, 等. Fe-Al 基复合材料及其涂层高温耐磨性的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(9): 148-152.
- [21] 王琪超, 王帅星, 杜楠, 等. HBN 粒径对 7075-T6 铝合金 PEO 膜结构和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(11): 2459-2470.