

WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层的制备及摩擦学性能^{*}

刘乐卿¹, 单奇艺¹, 安宇龙², 侯国梁², 赵晓琴², 周惠娣², 陈建敏²

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000; 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: 针对众多运动部件存在严重的摩擦磨损问题, 使用大气等离子喷涂 (APS) 设备在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢金属基材上喷涂制备 WC-(W,Cr)₂C-Ni 和 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 两种防护涂层, 使用 CSM 摩擦磨损试验机考察两种涂层在室温下与 Si₃N₄ 球配副时的滑动摩擦磨损性能。结果表明: Ag 相的添加可明显降低涂层在干摩擦条件下的摩擦因数, 并能减轻涂层的磨损程度; APS 制备的 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层不仅具有优良的自润滑性能, 而且具有极佳的耐磨性能, 有望作为一种新型耐磨自润滑涂层材料。

关键词: 大气等离子喷涂; WC-(W,Cr)₂C-Ni; Ag; 干摩擦; 自润滑

中图分类号: TG174.442; TG115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)03-0010-07

Preparation and Tribology Properties of WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag Composite Coatings

LIU Le-qing¹, SHAN Qi-yi¹, AN Yu-long², HOU Guo-liang², ZHAO Xiao-qin², ZHOU Hui-di², CHEN Jian-min²

(1. China Air-to-Air Missile Academy, Luoyang 471000, Henan; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: Aiming at severe frictional wear problems of many moving parts, the WC-(W,Cr)₂C-Ni and WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag protective coatings were deposited on 1Cr18Ni9Ti stainless steel substrates by atmospheric plasma spray (APS) technology. The sliding friction and wear behavior of the coatings sliding against Si₃N₄ balls at room temperature was evaluated by a CSM friction and wear tester. The results show that the addition of Ag phase significantly reduces the dry sliding friction coefficient of the WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag composite coating, and obviously relieves the wear degree of the coating. The WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag composite coating prepared by APS technology not only has a low friction coefficient, but also possesses a good wear resistance, and the coating is expected to be a new wear resistant and self-lubricating coating material.

Keywords: atmospheric plasma spray (APS); WC-(W,Cr)₂C-Ni; Ag; dry sliding; self-lubricating

0 引 言

摩擦可造成巨大的能量损失, 全世界生产能源的 1/3~1/2 损失于摩擦^[1], 摩擦又使得物体摩擦接触表面产生磨损, 从而导致机械零件失去工作能力而失效。我国仅冶金、铁路机车、能源化工、汽车、船舶、航空航天、军事装备和农业装备 8 个工业

部门在 2006 年因摩擦磨损而造成的经济损失就高达 9 500 亿元^[2]。所以, 针对降低材料摩擦磨损的研究, 对于节约经济成本和建设节约型社会具有十分重要的意义。近年来, 热喷涂 WC 基金属陶瓷涂层因具有高硬度、高韧性和耐腐蚀等众多优点, 被广泛作为耐磨抗蚀材料使用^[3-10]。然

收稿日期: 2014-12-01; **修回日期:** 2015-04-24; **基金项目:** * 空空导弹研究院创新基金(2013ZJB01)

通讯作者: 安宇龙(1978—), 男(汉), 副研究员, 博士; **研究方向:** 材料的表面处理技术及其性能; **Tel:** (0931) 4968 085; **E-mail:** csuayl@sohu.com

网络出版日期: 2015-05-05 16:47; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150505.1647.002.html>

引文格式: 刘乐卿, 单奇艺, 安宇龙, 等. WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层的制备及摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 10-16.

Liu L Q, Shan Q Yi, An Y L, et al. Preparation and tribology properties of WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag composite coatings [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 10-16.

而,这类涂层在与其它材料的摩擦磨损过程中,由于硬度太高,容易“嵌入”对偶材料内部,不仅会产生较大的摩擦因数,而且会导致对偶材料磨损严重。高的摩擦因数代表高的摩擦力,这就导致机械摩擦副在摩擦过程中不仅需要消耗更多的能源,而且极易引发“咬死”现象,从而导致工程部件的运动失效;另外,对偶材料磨损严重同样能造成机械部件的过早损坏、失效,进而无法满足人们对磨控系统部件长期安全运行的要求。

同时,现代高技术装备对高精度、高可靠性、长寿命的需求不断提升,对突破原有材料综合性能极限的润滑耐磨材料及其制备技术的需求也十分迫切。美国国家航空航天局(NASA)经多年研究发现,添加具有优异润滑性能的金属单质 Ag,可有效降低以 Cr₃C₂-NiCoAl 金属陶瓷作为硬质增强相的复合涂层在室温下的摩擦因数,并能明显减轻对对偶金属材料的磨损^[11-12];但 Cr₃C₂-NiCoAl 金属陶瓷因自身的硬度不太高,因此涂层的强度也较低,这就导致该涂层的磨损率相对于 WC 基硬质涂层的磨损率高,这在一定程度上影响了 Cr₃C₂-NiCoAl 涂层的服役时间,仍不能很好地满足人们对工程部件长寿命的需求。而 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属陶瓷材料除了具有传统 WC 基金属陶瓷材料的特点外,还因涂层组分中不含有 Co 元素,而被认为是可应用于核辐射等环境中的一种新型耐磨材料。不过,到目前为止,对这类涂层材料的摩擦学性能,特别是对于掺杂固体润滑剂后的复合涂层的摩擦学性能研究还较少,对其摩擦学机理的认识也较浅显。

鉴于此,文中以 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属陶瓷作为主体增强相,以金属单质 Ag 作为减摩润滑相,利用大气等离子喷涂工艺在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢基材上制备了 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层。通过与相同工艺制备的纯 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属陶瓷涂层进行对比,详细研究了 Ag 的加入对复合涂层的显微组织、硬度、致密度、物相组成、摩擦因数、磨损率和摩擦学机理的影响;并以期制备出一种具有优异抗磨性能的自润滑耐磨涂层,为该涂层的工程化应用提供试验数据和理论依据。

1 试验部分

1.1 涂层制备

选用的喷涂粉末分别为团聚烧结技术制备的 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属陶瓷粉末和气雾化技术制备的金属 Ag 粉末,其粒径分别为 15~45 μm 和 20~80 μm;其中,WC-(W,Cr)₂C-Ni 粉末是通过烧结 WC-20%Cr-7%Ni 团聚粉末而得到。采用 APS-2000A 型大气等离子喷涂系统(北京航空制造工程研究所)在 Φ 24 mm×10 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢基材上喷涂制备涂层。为保证工艺的准确性和可重复性,喷涂过程由 IRB 2400 型六轴联动机械手(瑞典 ABB 公司)执行,具体的喷涂参数见表 1。

表 1 大气等离子喷涂参数
Table 1 Parameters for the APS spraying

Parameters	Values
Current/A	450
Voltage/V	50
Argon flow rate/(L·min ⁻¹)	50
Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	35
Gun speed/(mm·s ⁻¹)	800
Interpass spacing/mm	3
Spray distance/mm	100

为了便于对比,喷涂的纯 WC-(W,Cr)₂C-Ni 粉末制备的涂层命名为涂层 1(coating 1),喷涂的质量分数为 90% WC-(W,Cr)₂C-Ni+10% Ag 混合粉末制备的复合涂层命名为涂层 2(coating 2)。涂层制备前,用粒度为 80~120 μm 的石英砂对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢基材表面进行喷砂粗化处理,以增加基材表面的粗糙度,从而有利于提高涂层与基体的机械咬合强度;然后将已粗化的基材在丙酮溶液中超声清洗 15 min,以去除基材表面的粉尘或油垢,以此保证所制备的涂层与基材之间能具有优异的结合。最后在处理好的金属基材上进行涂层制备,且涂层的厚度均控制在 250~300 μm 内。

1.2 摩擦磨损试验

利用 CSM 摩擦磨损试验机(Switzerland)以球盘接触的方式,评价 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属

陶瓷涂层和 $\text{WC}-(\text{W,Cr})_2\text{C}-\text{Ni}/\text{Ag}$ 复合涂层的摩擦磨损性能,并选用 Si_3N_4 球作为摩擦对偶。在摩擦磨损试验进行前,两种涂层分别用 360、600、1 000、1 500 和 2 000 号碳化硅水砂纸将其厚度打磨至约 $200\text{ }\mu\text{m}$,然后再用金刚石研磨膏(上海蔡康光学仪器有限公司)抛光涂层,其中金刚石的粒度约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。具体的摩擦磨损试验条件如下:载荷 10 N ,滑动距离 200 mm ,摩擦半径 6 mm ,温度为室温。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 K 通过公式(1)计算得出:

$$K=V/SF \quad (1)$$

其中 V 是磨损体积, mm^3 ; S 是总滑动距离, m ; F 是载荷, N 。摩擦因数和磨损率均为 3 次试验结果的平均值。

1.3 涂层表征

采用日本 JEOL 公司的 JSM-5600L 型扫描电镜(SEM)表征粉末和涂层的显微形貌,成像模式选用二次电子(SE)和背散射电子(BSE)。使用 D/Max-2400 型 X 射线衍射仪(日本 Rigaku 公司)(XRD)对粉末和涂层的相结构进行分析,所用激发源为 $\text{Cu}-\text{K}\alpha$ 射线($\lambda=1.540\,598\text{ }\text{\AA}$, 40 kV , 100 mA),扫描范围 $20^\circ\sim 70^\circ$ 。

由于 $\text{WC}-(\text{W,Cr})_2\text{C}-\text{Ni}$ 和 Ag 这两种喷涂粉末在涂层沉积过程中所形成的扁平粒子的面积较大,且二者的硬度差别也十分明显,因此用显微硬度计检测复合涂层的硬度,会因压痕面积太小而导致硬度值非常发散,无法有效对比两种

涂层硬度之间的差异。为了解决这一问题,文中采用压痕面积较大的 HBS-62.5 型布氏硬度计对其涂层进行硬度测试,具体测试条件为:压球为 $\Phi 2.5\text{ mm}$ 铸钢球,载荷为 30 kg ,保压时间为 30 s 。布氏硬度的测试原理为:在一定载荷作用下,把铸钢球压入试样表面,经一定保压时间后,卸除载荷,测量试样表面压痕的直径,用公式(2)计算出试样的布氏硬度:

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

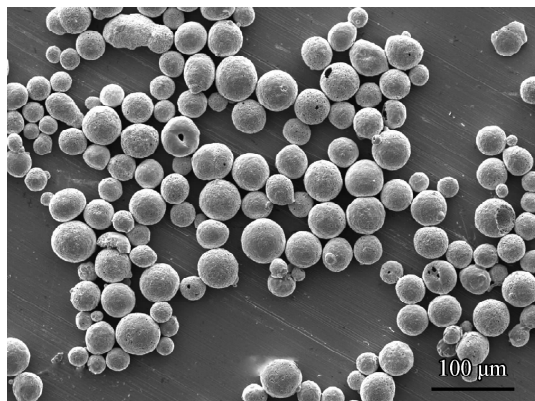
其中, F 为载荷, N ; D 为硬质合金球直径, mm ; d 为压痕的平均直径, mm 。每种涂层的硬度值为在涂层抛光表面进行 5 次随机测量的平均值。

使用的 OLYCIA m3 定量分析软件(北京 Reco 公司),通过图像法对涂层的孔隙率进行计算。通过 SEM 分析涂层摩擦试验后的表面形貌,分析其磨损机理。

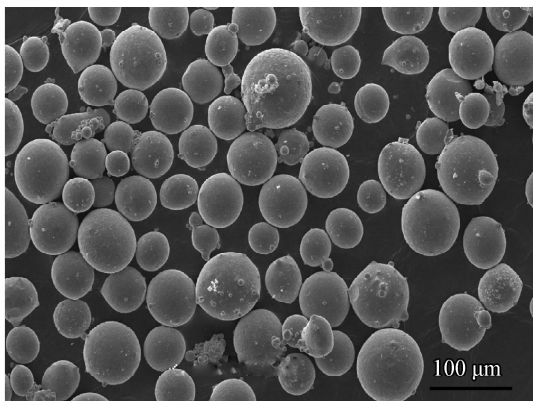
2 结果与讨论

2.1 粉末和涂层的结构

图 1 为 $\text{WC}-(\text{W,Cr})_2\text{C}-\text{Ni}$ 和 Ag 两种喷涂粉末的显微形貌。可以看出, $\text{WC}-(\text{W,Cr})_2\text{C}-\text{Ni}$ 粉末为球形,粒径分布为 $15\sim 45\text{ }\mu\text{m}$,与团聚烧结技术制备粉末的典型特征相符^[13]; Ag 粉末表面光滑,呈球形或椭圆形,粒径分布为 $20\sim 80\text{ }\mu\text{m}$,与雾化技术制备粉末的典型特征相符^[14]。两种粉末良好的球形形貌,表明它们的流动性较好,非常适合作为喂料粉末进行大气等离子喷涂。



(a) $\text{WC}-(\text{W,Cr})_2\text{C}-\text{Ni}$ powder

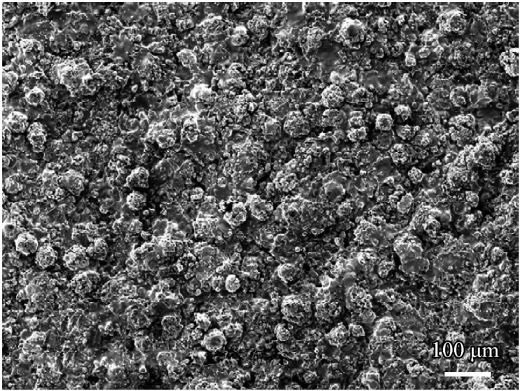


(b) Ag powder

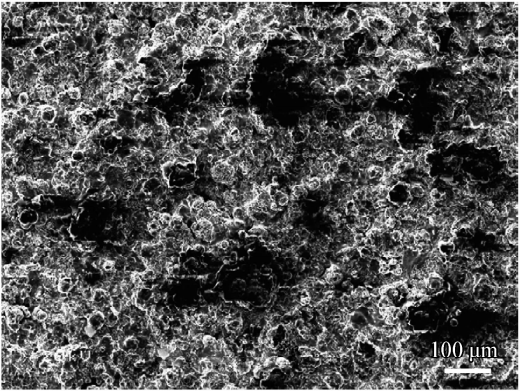
图 1 喷涂粉末的显微形貌

Fig. 1 SEM morphologies of the spraying powders

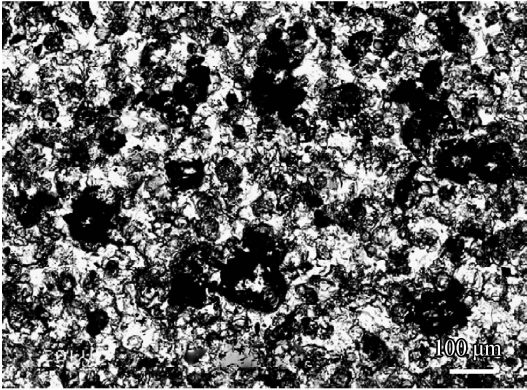
图 2 为 APS 喷涂制备的涂层 1 和涂层 2 两种涂层的 SEM 形貌。可以看出,在涂层 1 表面上存在较多的未充分熔融的颗粒,表明熔点较高的 WC-(W,Cr)₂C-Ni 金属陶瓷粉末在等离子焰流中的熔融程度不是太高。



(a) Coating 1, SE



(b) Coating 2, SE



(c) Coating 2, BSE

图 2 涂层的二次电子和背散射形貌
Fig. 2 Secondary electron and backscattered electron morphologies of the coatings

然而,在涂层 2 表面,部分熔融颗粒所占的比例则明显下降,并从其对应 BSE 形貌(图 2(c))中可以发现,亮度降低的区域为 Ag 颗粒,它们在

图 2(b)中呈片状的扁平粒子存在,表明熔点较低的 Ag 粉末在等离子焰流中已充分熔融,当其碰撞至基材或已沉积涂层表面时得到了充分的铺展沉积。

从两种涂层的 XRD 图谱(见图 3)可以看出,在 APS 喷涂过程中,不仅仅在 WC-(W,Cr)₂C-Ni 粉末所含物相之间,而且这些物相与大气中的氧气之间均发生了一系列的化学反应,致使在对应的涂层中除了含有粉末中原有的 WC 和(W,Cr)₂C 相外,还生成了 Cr₃C₂ 相、NiO 相、W 相、NiCr₂O₄ 相和 Ni_xW_y 非晶相^[15]。而添加 Ag 粉末后,在涂层 2 的 XRD 图谱中可以发现,除了涂层 1 所含有的物相外,还出现了明显的 Ag 的衍射峰,这表明 Ag 粉末很好地沉积到了复合涂层中;除此之外,复合涂层 XRD 图谱中并没有其它新相的衍射峰出现,说明 WC-(W,Cr)₂C-Ni 和 Ag 两种喷涂粉末在喷涂过程中并没有发生化学反应。

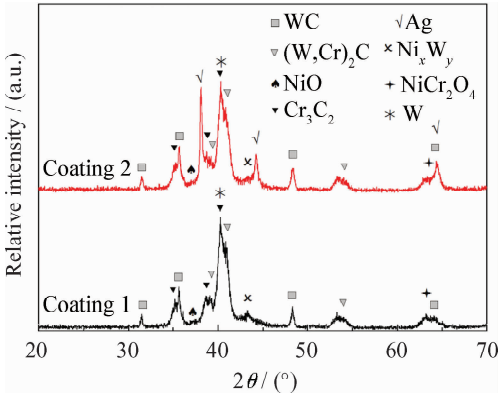


图 3 2 种涂层的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of the two coatings

2.2 涂层的硬度和孔隙率

尽管采用布氏硬度计可以形成较大的压痕面积,进而避免硬度值过于发散,但是由于涂层的厚度较薄,文中所测试的布氏硬度值在一定程度上受不锈钢基材的影响而低于涂层的真实硬度,但是仍可以作为重要参考,对两种复合涂层的硬度差别进行对比。

图 4 分别给出了两种涂层的布氏硬度值和孔隙率值,显然 Ag 的添加显著降低了涂层 2 的硬度和孔隙率。在硬度方面,主要是由于 Ag 的硬度太低最终导致涂层 2 的布氏硬度值仅为 25 HB;同时,软质相 Ag 的添加也必然会减小复合涂层的承载能力。

就孔隙率而言,在等离子喷涂制备的 $WC-(W,Cr)_2C-Ni$ 金属陶瓷涂层中,孔隙的形成原因主要有以下两个方面:① $WC-(W,Cr)_2C-Ni$ 喷涂粉末为团聚烧结技术制备的多孔型粘结粉末,在喷涂过程中,部分粉末颗粒由于熔化不完全,造成其自身的孔隙直接带入沉积的涂层中;②在喷涂粉末沉积过程中,熔化不完全的粉末无法充分铺展,进而无法与其周围的扁平粒子形成有效搭接,最终造成孔隙的生成。

当添加 Ag 后,由于雾化技术制备的 Ag 粉末为实心的,可有效减少粉末自身熔化不完全而带入涂层中的孔隙;另外,Ag 的熔点较低,在相同喷涂功率条件下,Ag 粉末可以更加充分的熔融,进而在其撞击基材表面的过程中充分铺展,易于形成形状良好的扁平粒子,并可有效改善它们与其周围的 $WC-(W,Cr)_2C-Ni$ 扁平粒子的搭接状态,同样能够减少孔隙的形成。因此,正是 Ag 在涂层中的有效沉积,最终使得涂层 2 相比于涂层 1 具有更低的孔隙率。

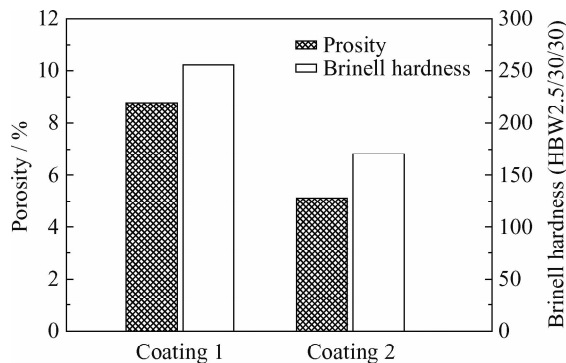


图 4 两种涂层的布氏硬度和孔隙率

Fig. 4 Brinell hardness and porosity of the two coatings

2.3 涂层的摩擦学性能

从图 5 给出的两种涂层随摩擦行程变化的实时摩擦因数曲线可以看出,涂层 1 的摩擦因数为 0.75 ± 0.021 ,而涂层 2 的摩擦因数却仅为 0.41 ± 0.015 ,说明 Ag 的添加显著降低了涂层的摩擦因数,且降幅达 45%。

在整个测试时间内,涂层 2 摩擦因数的变化幅度明显小于涂层 1 的变化幅度,这是因为 Ag 是一种性能优异的固体润滑材料,它的加入可以促使摩擦副在相互运动过程中,在摩擦表面形成连续的润滑膜,促使摩擦副的摩擦发生在润滑膜的内部,这一方面能够隔开直接接触的摩擦表

面,另一方面能减小摩擦过程中所需的剪切力,因而显著降低了摩擦副之间的摩擦因数,并促使其摩擦曲线的波动更加平稳。

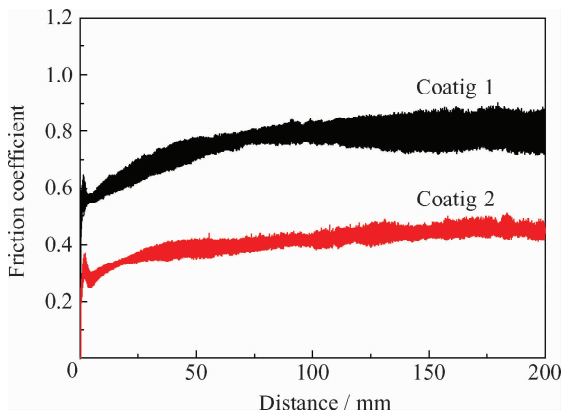


图 5 两种涂层的摩擦因数

Fig. 5 Friction coefficient of the two coatings

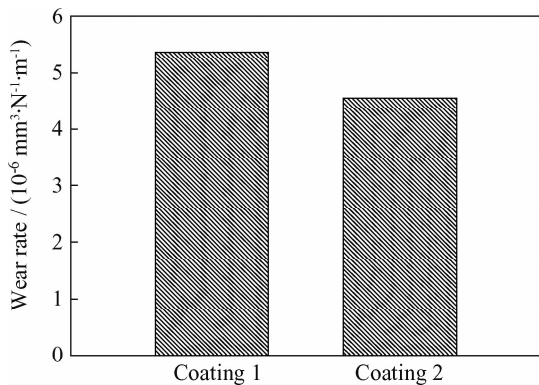


图 6 两种涂层的磨损率

Fig. 6 Wear rates of the two coatings

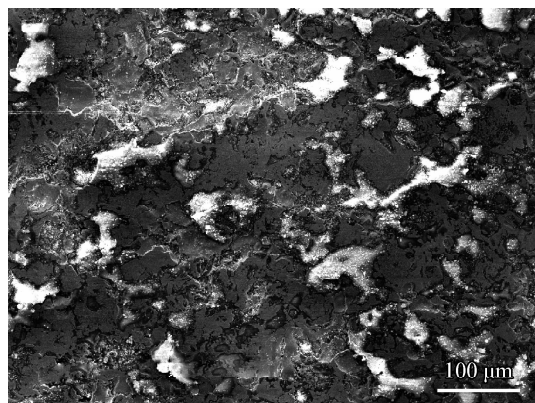
大量研究表明:热喷涂 WC 基金属陶瓷涂层主要因具有非常高的硬度,才表现出极低的磨损率^[16-20]。而文中制备的复合涂层的硬度因添加了软质 Ag 相而明显下降,所以需要考察该因素对涂层耐磨性能的影响。图 6 为两种涂层的磨损率柱状图,可以看出 Ag 的添加不仅没有破坏涂层的抗磨损性能,反而进一步提高了 WC 基复合涂层的耐磨性,这主要归因于金属 Ag 具有优良的延展性和韧性,可有效阻止在摩擦过程中裂纹的产生和扩展,进而能够大幅提高涂层的抗疲劳磨损性能。

图 7 为两种涂层摩擦试验后的磨损表面。不难发现,涂层 1 的磨损表面上存在十分严重的脆性剥落,说明涂层的磨损机理主要为疲劳磨损;而涂层 2 的磨损表面则相对光滑,即脆性剥落的现象得

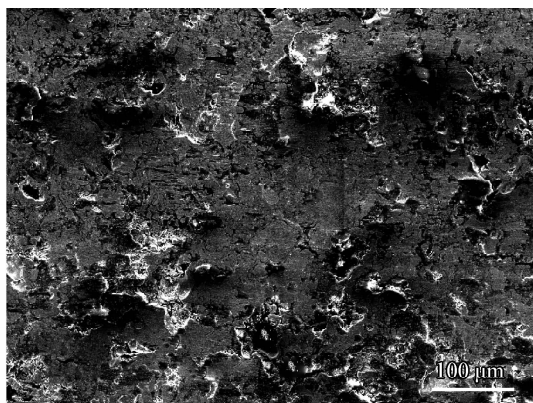
到明显抑制,疲劳磨损也变得十分轻微,这与对两种涂层磨损率的测试结果相一致(见图6)。

通过对比研究 WC-(W,Cr)₂C-Ni 和 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 两种涂层的摩擦学性能,可以

得出 APS 制备的 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层不仅具有十分优异的自润滑性能,而且具有较好的抗磨损性能,可以作为一种自润滑耐磨涂层材料使用。



(a) Coating 1



(b) Coating 2

图7 涂层的磨损表面形貌

Fig. 7 Surface worn morphologies of the coatings

3 结 论

(1) 在 APS 喷涂过程中,WC-(W,Cr)₂C-Ni 中各物相之间以及它们与大气中的氧气之间发生了较为强烈的化学反应;但在 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层中,WC-(W,Cr)₂C-Ni 与 Ag 之间并没有发生化学反应;且金属单质 Ag 有效地沉积到了该复合涂层中。

(2) 实心的具有低熔点的 Ag 粉在喷涂过程中能够充分铺展,这不仅减少了来自喷涂粉末自身的孔隙,而且促进了涂层中扁平粒子之间的搭接程度,最终明显降低了 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层的孔隙率。

(3) Ag 的添加降低了涂层的硬度,但由于其具有良好的延展性、韧性和自身优异的自润滑性能,使得所制备的 WC-(W,Cr)₂C-Ni/Ag 复合涂层不仅具有更低的摩擦因数,而且其耐磨性能也优于 WC-(W,Cr)₂C-Ni 涂层的,因此该涂层有望作为一种自润滑抗磨涂层材料在航空航天、机械等领域得到应用。

参考文献

- [1] Fuller D D. Theroiy and practive of lubrication for engi-neers [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1984.
- [2] 谢友柏, 张嗣伟. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

- Xie Y B, Zhang S W. Study on application situation and development strategy of tribological science and engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009 (in Chinese).
- [3] Chen H, Xu C, Zhou Q, et al. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings [J]. Wear, 2005, 258 (1/2/3/4): 333-338.
- [4] Basak A K, Matteazzi P, Vardavoulas M. Corrosion-wear behaviour of thermal sprayed nanostructured FeCu/WC-Co coatings [J]. Wear, 2005, 261 (9): 1042-50.
- [5] Shipway P H, McCartney D G, Sudaprasert T. Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings [J]. Wear, 2005, 259 (SI): 820-827.
- [6] Magnani M, Suegama P H, Espallargas N, et al. Influence of HVOF parameters on the corrosion and wear resistance of WC-Co coatings sprayed on AA7050 T7 [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (19): 4746-57.
- [7] 耿哲, 段德利, 刘阳, 等. 超音速火焰喷涂 WC-Co 层的高温氧化对摩擦磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2013, 33 (4): 329-336.
- Geng Z, Duan D L, Liu Y, et al. The effect of oxidation at elevated temperature on tribological behavior of WC-Co HVOF spraying coatings [J]. Tribology, 2013, 33 (4): 329-336 (in Chinese).
- [8] 雷强, 李文亚, 袁建辉, 等. 亚微米 WC 添加对超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层磨损性能影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25 (2): 43-48.
- Lei Q, Li W Y, Yuan J H, et al. Effects of submicro WC particles addition on wear performances of HVOF sprayed WC-Co coatings [J]. China Surface Engineering, 2012, 25 (2): 43-48 (in Chinese).

- [9] 陈辉, 苟国庆, 涂铭旌. 等离子喷涂纳米粒子混合 WC-Co 涂层性能研究 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 20-25.
Chen H, Gou G Q, Tu M J. Research on the properties of nano-particle doped WC-Co coatings prepared by plasma spraying [J]. China Surface Engineering, 2008, 21(2): 20-25 (in Chinese).
- [10] 叶雄林, 马世宁, 李长青, 等. 超音速等离子喷涂 WC/Co 纳米结构涂层性能研究 [J]. 中国表面工程, 2004, 17(1): 31-34.
Ye X L, Ma S N, Li C Q, et al. Study on properties of WC/Co nanostructured coatings prepared by supersonic plasma spraying [J]. China Surface Engineering, 2004, 17(1): 31-34 (in Chinese).
- [11] Dellacorte C, Sliney H E. Composition optimization of self-lubricating chromium-carbide-based composite coatings for use to 760 °C [J]. ASLE Transactions, 1987, 30(1): 77-83.
- [12] Wagner R C, Sliney H E. Effects of silver and group II fluoride solid lubricant additions to plasma-sprayed chromium carbide coatings for foil gas bearings to 650 °C [J]. Lubrication Engineering, 1986, 42(10): 594-600.
- [13] Stewart D A, Shipway P H, McCartney D G. Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: Comparison between nanocomposite and conventional starting powders [J]. Acta Materialia, 2000, 48(7): 1593-604.
- [14] 刘文胜, 彭芬, 马运柱, 等. 工艺条件对气雾化制备 SnAgCu 合金粉末特性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1074-9.
Liu W S, Peng F, Ma Y Z, et al. Effect of procedure conditions on characteristics of SnAgCu alloyed powder prepared by gas atomization [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(6): 1074-9 (in Chinese).
- [15] Hou G L, An Y L, Liu G, et al. Effect of atmospheric plasma spraying power on microstructure and properties of WC-(W,Cr)₂C-Ni coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(6): 1150-60.
- [16] Zhu Y C, Yukimura K, Ding C X, et al. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying [J]. Thin Solid Films, 2001, 388(1/2): 277-282.
- [17] 赵辉, 丁彰雄. 超音速火焰喷涂纳米结构 WC-12Co 涂层耐泥沙冲刷性能研究 [J]. 热加工工艺, 2009(10): 84-88.
Zhao H, Ding Z X. Research on slurry erosion resistance of nano-structured WC-12Co coatings deposited by HVOF [J]. Hot Working Technology, 2009(10): 84-88 (in Chinese).
- [18] 范毅, 丁彰雄, 张云乾. 纳米 WC/12Co 涂层在轴流式引风机叶片防磨上的研究 [J]. 武汉大学学报, 2006(3): 135-139.
Fan Y, Ding Z X, Zhang Y Q. Study on WC/12Co nano-structured coatings in erosion resistance of axial flow induced draft fan's blade [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006(3): 135-139 (in Chinese).
- [19] 李长久, 王豫跃, 大森明. 粉末结构对超音速火焰喷涂 WC 系金属陶瓷涂层结合强度的影响 [J]. 中国表面工程, 2000, 13(2): 1-4.
Li C J, Wang Y Y, Akira O. Effect of powder structure on the adhesive strength of HVOF sprayed WC cermet coatings [J]. China Surface Engineering, 2000, 13(2): 1-4 (in Chinese).
- [20] 简中华, 马壮, 王富耻, 等. 超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层耐磨性研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 90-92.
Jian Z H, Ma Z, Wang F C, et al. Study on wear resistance of WC-Co coatings sprayed by high velocity oxy-fuel spraying [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(1): 90-92 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)

• 常任理事介绍 •

孙正福, 1963 年 7 月出生。1985 年毕业于沈阳航空工业学院飞机制造专业, 大学本科。1986~1987 年在解放军管理干部学院培训班学习企业管理, 1988 年在国家经委、解放军后勤部管理干部班培训, 2005 年在上海财经大学研究生班学习工商管理, 2006~2009 年在空军工程大学攻读管理科学与工程硕士, 获硕士学位。曾担任中国人民解放军 5706 工厂飞机车间技术主任、质量管理处处长、副总工程师兼技术处处长、总工程师等职务, 现任中国人民解放军 5701 工厂技术副厂长兼总工程师。主要研究各型飞机、直升机维修工程和表面工程工程, 为航空装备修理技术的发展做出了突出贡献。