

镍基耐高温自润滑刷式封严 涂层研究*

张甜甜^{1,2}, 黄传兵¹, 兰 昊¹, 房师阁¹, 张伟刚¹

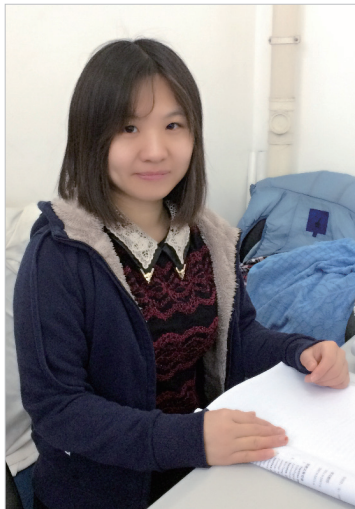
(1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 为满足先进航空发动机刷式封严对涂层材料自润滑耐磨性能的要求, 采用等离子喷涂技术制备了 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 两种复合涂层; 采用扫描电子显微镜、X 射线衍射、拉曼光谱和高温摩擦磨损试验等分析测试手段研究了涂层的物相组成、微观结构、力学性能以及摩擦磨损性能。结果表明: 研制的两种新型涂层具有较低的孔隙率、较高的显微硬度和结合强度, 从 20℃ 到 800℃ 的磨损量都在 10⁻⁵ mm³ · N⁻¹ · m⁻¹ 数量级, 显示出优异的耐磨性能; NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层在摩擦系数随着温度的升高而降低, 在 800℃ 达到最低值 0.3; NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层从 400~800℃ 的摩擦系数一直保持在 0.23 左右。对其摩擦机理的研究表明: 400℃ 时涂层与高温合金 GH4145 对磨件之间形成连续的含 Ag 润滑膜, 600℃ 以上时摩擦表面生成的 Ag₂MoO₄ 自润滑相显著降低了涂层的摩擦和磨损。

关键词: 刷式封严; 等离子喷涂; 自润滑涂层; 摩擦磨损

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.08.024



张甜甜

博士研究生, 研究方向为航空发动机高温固体润滑涂层材料的制备与性能研究。

航空发动机内部流场存在较大的温度和压强梯度, 需要系统封严技术提高发动机的热工效率, 目前先进航空发动机的高压压气机和涡轮部位已经开始采用连续接触刷式封严结构^[1-3]。与传统的篦齿封严、叶尖可磨耗封严相比, 刷式封严结构可大幅减少气体泄漏量, 提高转子运行稳定性, 并减轻发动机惰性质量^[4]。刷式封严的刷丝自由端在高温燃气环境下与转子轴表面高速摩擦接触, 发生磨损并产生动能损耗。为了降低转子轴表面与刷丝的磨损, 采用热喷涂技术在转子轴表面制备高温自润滑耐磨涂层, 技术上简单可行并具有经济性^[5]。

高温固体润滑涂层材料主要包括基体、耐磨材料和润滑剂。高温合金具有良好的高温力学性能、抗氧化

腐蚀性、与底材良好的匹配性, 可以用作涂层的基体材料, 常用的高温合金主要是 Ni 基和 Co 基合金; 氧化物陶瓷 (Cr₂O₃、Al₂O₃ 和 ZrO₂ 等) 以及碳化物陶瓷 (Cr₃C₂、SiC、WC 和 TiC 等) 为常用的耐磨材料; 润滑剂是高温固体润滑涂层材料设计的核心, 常用的固体润滑材料有石墨、六方氮化硼 (h-BN)、金属硫化物 (MoS₂、WS₂)、金属氟化物 (BaF₂、CaF₂)、金属氧化物 (MoO₃、V₂O₅) 以及软金属 (Ag、Au) 等^[6-7]。

目前, 具代表性的高温固体自润滑涂层为美国 NASA 研制的 PS 系列热喷涂高温自润滑涂层^[8-11]。其中 PS300 系列采用 NiCr 合金为基体相, Cr₂O₃ 为硬质耐磨相, Ag 和 BaF₂ · CaF₂ 共晶为润滑相。由于 NiCr 合金中 Cr 的氧化造成涂层在高温下

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51471159), 中国科学院青年创新促进会 (2017067) 资助。

变形严重,后续改进型 PS400 系列涂层采用 NiMoAl 合金为基体相。PS400 在 25℃ 时的摩擦系数为 0.31,在 650℃ 时为 0.22,Ag 和氧化物的润滑效果得到了很好的体现。但是该涂层在 25℃ 的磨损量较大,为 $118 \times 10^{-5} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。中科院过程所黄传兵等^[12-15]通过化工冶金技术制备包覆型 NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 复合粉体,并通过等离子喷涂、超音速喷涂和爆炸喷涂技术制备相应的高温耐磨自润滑涂层。该涂层在 800℃ 下摩擦系数为 0.28,磨损量在 25~800℃ 都保持在 $10^{-5} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 数量级,具有优异的耐磨性能。由于 BaF₂·CaF₂ 共晶的低温脆性,涂层在 500℃ 下的摩擦系数较高,且发动机在服役过程中需要经受复杂的升温降温过程,因此要求刷式封严涂层应具有一定的宽温域自润滑耐磨效果。

近年来,高温自适应润滑涂层材料得到广泛的研究。所谓“自适应”就是利用两种或几种润滑剂的协同润滑作用实现宽温度范围的润滑耐磨效果。Hu 等^[16]利用磁控溅射技术制备了 YSZ-Ag-Mo 复合涂层,该涂层在 25~700℃ 的摩擦系数稳定在 0.4 左右;500℃ 下 Ag 膜起到润滑作用;高于 500℃ 时表面生成的氧化钼可降低摩擦和磨损。中科院兰化所利用等离子喷涂制备了 NiCrAlY-

Ag-Mo 高温固体润滑涂层,并对其从室温到 800℃ 的摩擦磨损性能进行测试,结果发现涂层的摩擦系数稳定在 0.4 左右,600℃ 以上摩擦表面生成的钼酸银降低了摩擦系数^[17]。由于涂层中缺乏耐磨相,涂层的磨损量较大。

为了满足航空发动机刷式封严涂层宽温域自润滑耐磨性能的要求,本文采用等离子喷涂技术制备了 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 两种新型复合涂层,研究了涂层在 20~800℃ 的摩擦磨损性能,并且分析了涂层的摩擦磨损机理。

试验及方法

采用离心喷雾造粒以及固态合金化技术制备 NiCoCrAlY-Cr₂O₃,粉体的名义成分见表 1。Ag-Mo 复合粉体采用 Mo 粉化学镀银的方法制备,其中 Ag/Mo 的质量比为 2:1。NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 复合粉体中 Ag-Mo 的质量分数为 10%。

以高温合金 GH4169 ($\phi 25 \text{mm} \times 5 \text{mm}$) 为喷涂基体。等离子喷涂前,对基体进行喷砂处理。采用 CoNiCrAlY 合金粉沉积 0.1mm 粘结层。涂层采用 APS-2000K 型等离子喷涂设备制备,喷涂参数见表 2。

采用 Hall 流量计测量喷涂粉末

的流动性和松装密度,涂层的孔隙率采用图像法进行分析。在 WDW-100E 万能材料试验机上采用拉伸法按 GB/T 8642-2002 标准测试涂层结合强度。涂层显微硬度采用 HX-1000TM 型显微硬度计测试(载荷 200g,加载 15s)。粉体及涂层试样的表面和截面微观组织结构均采用 Quanta 200FEG (美国 FEI) 扫描电子显微镜(SEM)观察,利用背散射(BSE)探头及 X 射线能谱(EDX)分析元素分布。采用 X'Pert Pro (荷兰 Panalytical) X 射线仪(XRD)进行物相分析。采用 Via-Reflex 型(英国 Renishaw)显微共聚焦拉曼光谱仪进行表面微区物相分析。

摩擦磨损试验在 CSM-THT 型高温摩擦磨损试验机上进行,摩擦方式为销盘式,测试温度从 20℃ 到 800℃,摩擦副为高温合金(GH4145)销,载荷 10N,线速度 0.2m/s,时间 20min。通过 3D 白光干涉表面形貌仪(美国 ABE)测量磨痕截面积 A ,磨损量根据 $V=2\pi r \cdot A$ 计算,其中半径 $r=5 \text{mm}$ 。

结果与讨论

1 粉体形貌与性能

图 1 为制备的等离子喷涂复合粉体的表面形貌。可以看出, NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 Ag-Mo 复合粉体颗粒呈类球状,颗粒结构致密,粒度分布均匀。其中 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 粉体的粒度分布为 45~75 μm , Ag-Mo 粉体的平均粒径为 60 μm 。两种复合粉体的粒径均符合等离子喷涂技术要求。

喷涂粉末的流动性和松装密度对喷涂工艺和涂层质量有重要影响。良好的流动性和较高的松装密度可以保证喷涂送粉的稳定性并将喷涂粉体送入等离子火焰中心充分熔化。经试验测得制备的 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 复合粉体的流动性为 48.5s/50g,松装密度为 1.53g/cm³; NiCoCrAlY-Cr₂O₃-

表1 NiCoCrAl-Cr₂O₃复合粉体成分(质量分数) %

Ni	Co	Cr	Al	Y ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
29.6	1.0	7.0	2.2	0.2	60

表2 等离子喷涂工艺参数

喷涂参数	数值
电流 /A	450
电压 /V	60
H ₂ 流量 / (L·min ⁻¹)	1.2
Ar ₂ 流量 / (L·min ⁻¹)	40
送粉率 / (g·min ⁻¹)	16~18
喷距 /mm	110

AgMo 复合粉体的流动性为 55s/50g, 松装密度为 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ 。两种粉体均具有良好的流动性和松装密度, 有利于获得均匀致密的涂层组织, 并保证涂层的结合强度。

2 涂层的结构与性能

图 2 是等离子喷涂 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 复合涂层的截面背散射图像。可看出涂层呈典型的热喷涂层状结构, 从左往右依次为基体、粘结层和面层。层与层之间结合良好, 涂层无明显的裂纹和孔隙, 灰度法测得两种涂层的孔隙率都在 3% 左右。如图 2(b) 所示, 涂层内部灰色部分为 Cr₂O₃ 相, 亮灰色部分为 Ni 基合金相, 亮色部分为 Ag 和 Mo 相。从图 3 涂层的 XRD 分析可看出, NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的主晶相为 (Ni, Cr) 合金相, Cr₂O₃ 相。NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的晶相有 (Ni, Cr) 合金相, Cr₂O₃ 相以及 Ag 和 Mo 相。两种涂层内均没有其他的杂质峰出现, 说明涂层在喷涂过程中物相没有出现明显的氧化和分解。

拉伸试验结果表明, NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的结合强度约为 (35 ± 5) MPa, NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的结合强度约为 (42 ± 2) MPa, 两种涂层的断裂都发生在涂层内部, 因此涂层与基体的结合强度要远大于这个数值。从试验数值可看出, NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的内聚强度要大于 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的内聚强度。这是由于 Ag 具有较低的熔点 (960°C), 在等离子喷涂过程中能够充分熔化, 熔化的 Ag 在涂层各相间起到粘结剂的作用, 使层间颗粒结合更加紧密, 从而提高涂层内聚强度。

涂层硬度是影响涂层耐磨性能的重要因素之一。一般来说, 材料的耐磨性与硬度成正比。涂层的显微硬度测试表明, NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的显微硬度分别为 $650\text{HV}_{0.2}$ 以及 $600\text{HV}_{0.2}$,

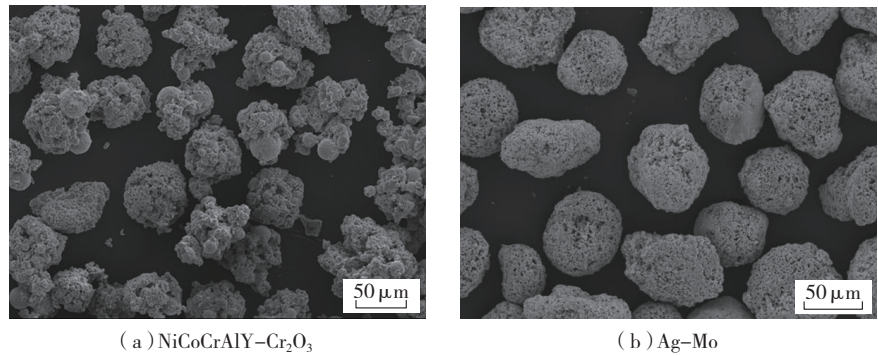


图1 等离子喷涂复合粉体表面SEM形貌

Fig.1 SEM morphologies of APS sprayed composite powders

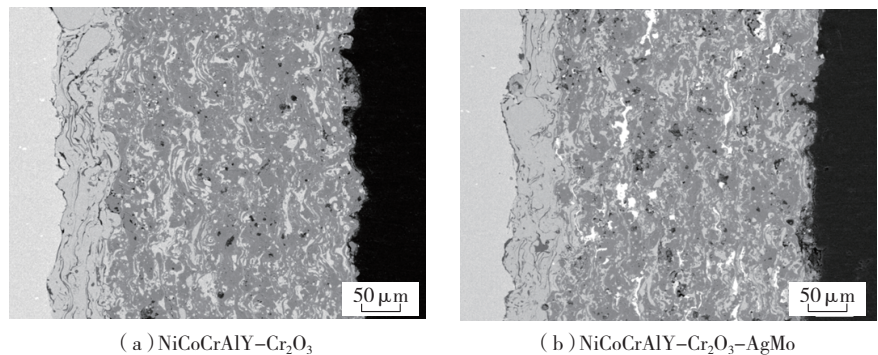


图2 等离子喷涂复合涂层截面背散射图像

Fig.2 Cross-sectional backscatter electron micrographs of the composite coatings

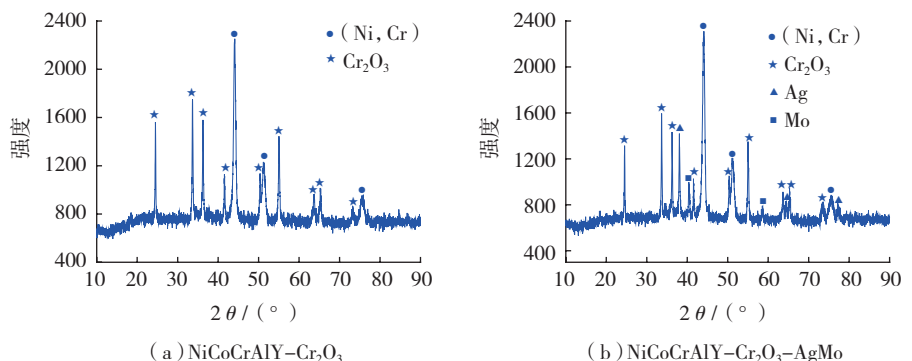


图3 等离子喷涂复合涂层XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of the as-sprayed composite coatings

较高的硬度保证了涂层的耐磨性。

3 涂层的摩擦磨损性能

图 4 是在不同温度条件下 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层摩擦系数和磨损量的变化曲线。从图 4(a) 可看出从 20~800 $^\circ\text{C}$, NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的摩擦系数都低于 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层, 尤其是在 400 $^\circ\text{C}$ 以上温度范围内; 20 $^\circ\text{C}$ 下, 两种涂层的摩擦

系数约为 0.7 和 0.8, 随着温度的升高, 两种涂层的摩擦系数都呈下降趋势。NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的摩擦系数在 800 $^\circ\text{C}$ 时降低到 0.3 左右。而 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的摩擦系数在 400 $^\circ\text{C}$ 时急剧下降至 0.23 左右, 摩擦系数发生较大改变, 此后随着温度升高到 800 $^\circ\text{C}$, 涂层的摩擦系数一直保持 0.23 左右。

从图 4(b) 可以看出,

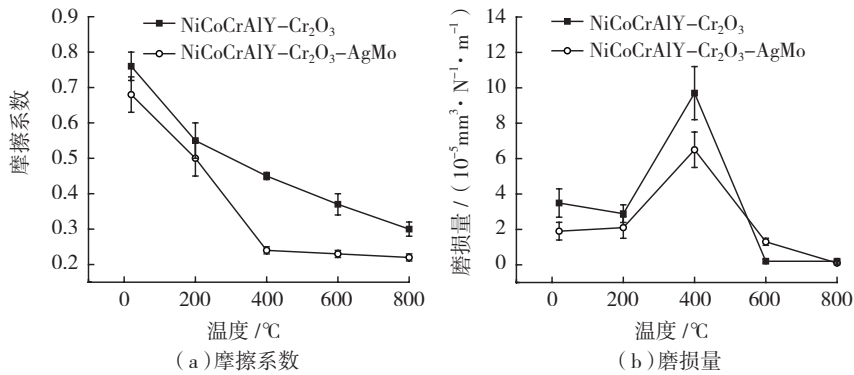


图4 涂层从20°C到800°C的摩擦系数和磨损量

Fig.4 Friction coefficient and wear rate of the composite coatings from 20°C to 800°C

NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层在整个测试温度范围内磨损量都保持在 $10^{-5} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 数量级,说明两种涂层都具有较好的耐磨性能。涂层在 20°C 和 200°C 时磨损量较低,温度升高到 400°C 时磨损量上升较快,分别达到 $6.5 \times 10^{-5} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 以及 $9.5 \times 10^{-5} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。这可能是由于随着温度的升高,涂层硬度降低,涂层的基体材料镍基合金塑性变形严重,由于表面缺少有效的润滑剂,当受到反复的剪切力作用时,会发生挤压变形以及切削磨损,增加了涂层的磨损量。当温度上升到 600°C 时,涂层的磨损量又急剧下降,低于 20°C 的磨损量。在 800°C 时两种涂层的磨损量低至 $10^{-6} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 数量级。说明高温下表面形成的高温润滑相在摩擦过程中对涂层起到了保护作用。

4 摩擦机理分析

图 5 是 20°C、400°C 和 800°C 时 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 和 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层的磨痕形貌。20°C 下,两种涂层表面粗糙,存在很多凹坑和磨屑,呈典型的脆性断裂和磨粒磨损特征。这是由于低温下表面尚未形成润滑膜,在摩擦剪切力的作用下,涂层表面的气孔和微裂纹等缺陷逐渐扩展和断裂,形成磨屑。形成的磨屑不能够及时排出而停留在摩擦轨道上造成磨粒磨损。

随着温度升高到 400°C,涂层表

面变得光滑,呈现出沿滑动方向的磨痕条纹和凹坑。磨损机制为轻微的塑性变形和微切削。从图 4 (a) 的结果可看出, NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层在 400°C 时摩擦系数仅为

0.23,大大低于 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的摩擦系数。因此为了进一步探究涂层在 400°C 的润滑耐磨机理,对摩擦副 GH4145 销摩擦表面进行观察,如图 6 所示。

图 6 (a) 为 GH4145 销与 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层在 400°C 对磨后表面形貌,摩擦表面存在凹坑以及磨屑;而与 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层对磨后的 GH4145 销表面形成一层连续光滑的膜层。EDX 分析表明, GH4145 销表面除了含有自身的 Ni、Cr 和 Fe 元素外,还存在 Ag 元素,各种元素含量如表 3 所示。

摩擦副 GH4145 表面出现了 Ag 元素,表明在滑动摩擦过程中涂层表面的元素转移到 GH4145 销表面。

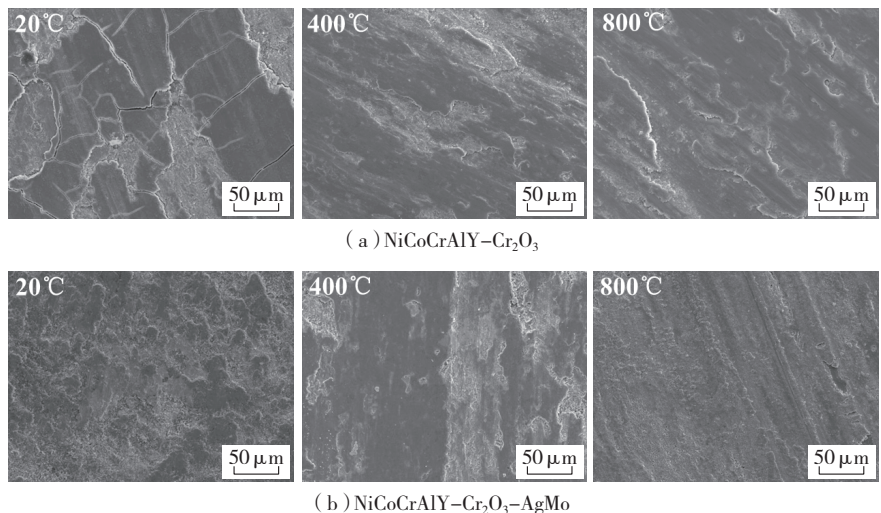


图5 不同温度下的涂层磨痕表面形貌

Fig.5 Worn surface morphologies of the composite coatings at different temperatures

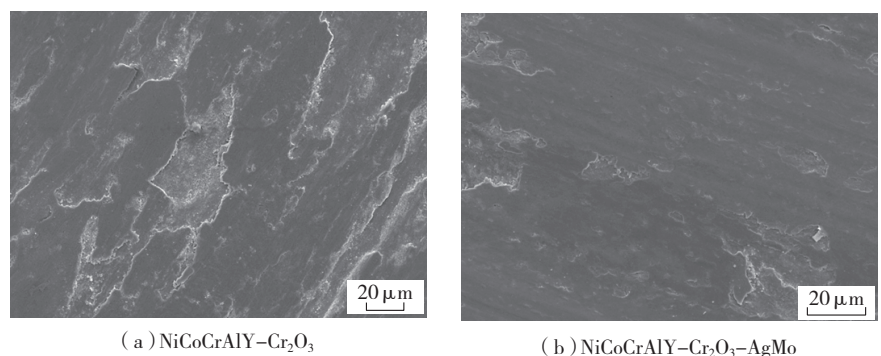


图6 GH4145销表面在400°C下与涂层对磨后形貌

Fig.6 Worn surface morphologies of the counterpart GH4145 sliding against the composite coatings at 400°C

表3 400℃与NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo涂层对磨GH4145销表面EDX分析

元素	Ni	Cr	Fe	Ag	O	Pt
质量比 /%	57.65	16.12	4.13	2.27	15.89	15.89

注: Pt 为提高导电性所镀覆在 EDX 样品表面元素。

作为一种软金属, Ag 在 400℃ 下剪切强度会比室温时显著降低, 涂层表面的 Ag 在摩擦力的作用下被剪切、铺展形成润滑膜并部分粘附到对偶件表面, 从而使得摩擦发生在转移膜与涂层之间, 降低了摩擦系数。

图 5 中在 800℃ 时, NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层摩擦表面与 20℃ 和 400℃ 相比时变得光滑, 生成连续铺展的润滑膜。EDX 分析润滑膜的主要成分为 Ni、Cr 和 O, 表明润滑膜的成分主要为一些金属氧化物。同时一些金属氧化物转移到对偶件的表面, 形成了氧化物与氧化物之间的摩擦, 降低了涂层的摩擦与磨损。由于高温下金属的塑性变形更为严重, 因此在 800℃ 下 NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的磨损主要是由氧化磨损和塑性变形共同造成的。对于 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层, 在 800℃ 摩擦后, 表面出现了连续致密的润滑膜, 并且润滑膜表面有絮状颗粒出现。为了分析表面润滑膜的组成, 对涂层进行拉曼微区物相分析。图 7 是 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层在 600℃ 和 800℃

摩擦后表面拉曼物相分析曲线。

从拉曼分析的结果可看出, 在 600℃ 和 800℃ 摩擦后, 表面都出现了 Ag₂MoO₄ 的拉曼特征峰, 因此推测 NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层在 600℃ 和 800℃ 优异的润滑性能是由摩擦表面生成的 Ag₂MoO₄ 造成的。前人的研究结果^[18-20]显示, Ag₂MoO₄ 是一种低熔点层状化合物, 由于 Ag-O 键键能较低(560kJ/mol), 在高温下容易被剪切而具有较低的摩擦系数。600℃ 时, Mo 与 O₂ 反应生成 MoO₃, Ag 和 MoO₃ 进一步反应生成 Ag₂MoO₄。随着温度升高, 摩擦表面生成大量 Ag₂MoO₄, 有效降低摩擦系数。

结论

为满足我国先进航空发动机刷式封严技术对高温固体润滑耐磨涂层材料的需求, 本文采用离心喷雾造粒、固态合金化以及化学镀的方法制备出具有良好流动性和松装密度的 NiCoCrAlY-Cr₂O₃、NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 粉末, 结合等离子喷涂

制备相应的固体自润滑涂层。对涂层的组织结构、力学性能以及摩擦磨损性能进行了研究。主要结论如下:

(1) 研制的两种新型涂层均具有较低的孔隙率、较高的显微硬度和结合强度。

(2) NiCoCrAlY-Cr₂O₃ 涂层的摩擦系数从 20~800℃ 逐渐减小, 在 800℃ 达到最低值 0.3。这是由于在 800℃ 时摩擦表面生成氧化物润滑膜, 有效降低了摩擦系数。

(3) AgMo 的加入可显著改善涂层的宽温域润滑性能。NiCoCrAlY-Cr₂O₃-AgMo 涂层从 400~800℃ 的摩擦系数一直保持 0.23 左右, 磨损量在 10⁻⁵mm³·N⁻¹·m⁻¹ 数量级。摩擦机理研究表明: 400℃ 时, 涂层与 GH4145 销之间形成连续的含 Ag 润滑膜。600℃ 以上摩擦表面生成的 Ag₂MoO₄ 润滑剂降低了涂层的摩擦和磨损。

参考文献

- [1] RAJENDRAN R. Gas turbine coatings — an overview[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 26: 355-369.
- [2] STEINETZ B, HENDRICKS R, MUNSON J. Advanced seal technology role in meeting next generation turbine engine goals[R]. Ohio: NASA, 1998.
- [3] 黄传兵, 杜令忠, 张伟刚. NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ 高温自润滑耐磨涂层的制备与摩擦磨损特性[J]. 摩擦学报, 2009(1): 68-74.
HUANG Chuanbing, DU Lingzhong, ZHANG Weigang. Preparation and tribological properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ high temperature self-lubricating wear-resistant coating[J]. Tribology, 2009(1): 68-74.
- [4] CONNER K, CHILDS D. Rotordynamic and leakage characteristics of a 4-stage brush seal[R]. Ohio: Wright Laboratory, 1992.
- [5] ATKINSON E, BRISTOL B. Effects of material choices on brush seal performance[J]. Lubrication Engineering, 1992, 48(9): 740-746.
- [6] DONNET C, ERDEMIR A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 180: 76-84.

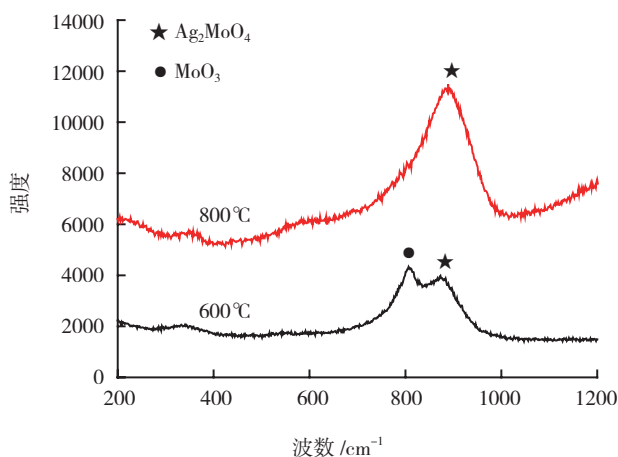


图7 涂层摩擦表面拉曼分析

Fig.7 Raman spectra of the worn surface

- [7] DONNET C, ERDEMIR A. Solid lubricant coatings: Recent developments and future trends[J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 389–397.
- [8] DELLACORTE C, STANFORD M K, THOMA F, et al. The effect of composition on the surface finish of PS400: A new high temperature solid lubricant coating[R]. Ohio: NASA, 2010.
- [9] DELLACORTE C, EDMONDS B J. NASA PS400: A new high temperature solid lubricant coating for high temperature wear applications[R]. Ohio: NASA, 2009.
- [10] DELLACORTE C, LASKOWSKI J A. Tribological evaluation of PS300: A new chrome oxide-based solid lubricant coating sliding against Al_2O_3 from 25 °C to 650 °C [J]. Tribology Transaction, 1997, 40(1): 163–167.
- [11] SLINEY H E, DELLACORTE C, LUKASZEWICZ V. The tribology of PS212 coatings and PM212 composites for the lubrication of titanium 6Al–4V components of a stirring engine space power–system[J]. Tribology Transaction, 1995, 38(3): 497–506.
- [12] HUANG C, DU L, ZHANG W. Preparation and characterization of atmospheric plasma-sprayed $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(20–21): 3058–3065.
- [13] HUANG C B, DU L, ZHANG W. Effects of solid lubricant content on the microstructure and properties of $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ composite coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 479(1–2): 777–784.
- [14] HUANG C B, DU L, ZHANG W. Friction and wear characteristics of plasmasprayed self-lubrication coating with clad powder at elevated temperatures up to 800 °C [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(3): 463–469.
- [15] 黄传兵, 杜令忠, 张伟刚, 等. 三种热喷涂工艺制备 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ 涂层的结构与性能 [J]. 航空材料学报, 2009, 29(6): 70–76.
- HUANG Chuanbing, DU Lingzhong, ZHANG Weigang, et al. Microstructure and properties of $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2\text{-BaF}_2 \cdot \text{CaF}_2$ coatings prepared with three kinds of thermal sprayed technologies[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 70–76.
- [16] HU J J, MURATORE C, VOEVODIN A A. Silver diffusion and high-temperature lubrication mechanisms of YSZ-Ag-Mo based nanocomposite coatings[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3–4): 336–347.
- [17] CHEN J, AN Y, YANG J, et al. Tribological properties of adaptive NiCrAlY-Ag-Mo coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 235: 521–528.
- [18] ZHANG T, LAN H, HUANG C, 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.
- [19] ZHANG T, HUANG C, LAN H, et al. Tribo-logical properties and lubrication mechanisms of a Ag-Mo composite[J]. Lubrication Science, 2016, 28(3): 141–156.
- [20] AOUADI S M, PAUDEL Y, SIMONSON W J, et al. Tribological investigation of adaptive $\text{Mo}_2\text{N/MoS}_2/\text{Ag}$ coatings with high sulfur content[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(10–11): 1304–1309.

通讯作者: 张伟刚, 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室研究员, 主要研究方向为高温复合材料与涂层技术, E-mail:wgzhang@ipe.ac.cn.

Investigation of Ni-Based Brush Seal Coatings With Self-Lubricating Property at Elevated Temperature

ZHANG Tiantian^{1,2}, HUANG Chuanbing¹, LAN Hao¹, FANG Shige¹, ZHANG Weigang¹

(1. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] In order to meet the requirement of self-lubricating and wear resistant properties of brush seal coatings for advanced aeroengines, two kinds of novel composite coatings, $\text{NiCoCrAlY-Cr}_2\text{O}_3$ and $\text{NiCoCrAlY-Cr}_2\text{O}_3\text{-AgMo}$, were prepared with plasma spray technology. Microstructures, phase compositions, mechanical properties, friction and wear performances of the above coatings were characterized and analyzed with scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy and CSM high-temperature tribometer. The results show that both coatings exhibit very low porosity, high microhardness and tensile strength. The wear rates of two coatings are all at the order of $10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, indicating the excellent wear resistance. The friction coefficient of the coating $\text{NiCoCrAlY-Cr}_2\text{O}_3$ decreases with temperature increasing, which shows a minimum value of 0.3 at 800 °C. $\text{NiCoCrAlY-Cr}_2\text{O}_3\text{-AgMo}$ coating keeps a lower friction coefficient of about 0.23 from 400 °C to 800 °C. Investigation of friction and wear mechanisms show that at 400 °C, a lubricating film containing Ag is formed between the coating and the counterpart, while Ag_2MoO_4 formed above 600 °C effectively reduces the friction and wear at high temperatures.

Keywords: Brush seal; Plasma spray; Self-lubricating coating; Friction and wear

(责编 大漠)