

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.005

低压冷喷涂制备 Al-Ni-xCr 复合涂层及其磨损特性研究

张怡颖¹, 张留艳^{1,2*}, 韩兆康¹, 林倩¹, 袁彬凯¹, 谭桂斌²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学 广东省海洋能源装备制造重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 防腐性能较好的铝基涂层存在耐磨性不足的问题。本文设计了 Ni 粉和 Cr 粉复合沉积的方法来改善涂层的耐磨性。采用低压冷喷涂技术, 制备了一系列 Cr 含量不同的 Al-Ni-xCr 复合涂层。通过金相、扫描电镜及 X 射线衍射等方法分析了复合涂层的微观形貌和成分。采用显微硬度计和磨损仪测试了涂层的显微硬度和磨损曲线, 结合磨痕形貌分析了复合涂层的磨损机理。研究得出: 低压冷喷涂可实现 Al、Cr、Ni 三种金属粉的共沉积, 并获得致密、均匀的 Al-Ni-xCr 复合涂层。枝晶状 Ni 粉沉积率较高, Cr 粉沉积率较低。含 70 wt.%Cr 的混粉涂层中, Cr 含量约为 31 wt.%。硬质颗粒 Cr 同时起到夯实涂层的作用, 随着 Cr 含量增加, Al-Ni-xCr 复合涂层的致密性提高。Al-Ni-xCr 复合涂层的耐磨性能主要来自于 Cr 而非 Ni, 且与 Cr 含量有关。Al-Ni-70Cr 复合涂层耐磨性最佳, 磨损率仅为 Al 涂层的 1/2。其优异的耐磨性归因于摩擦界面形成了稳定的、较硬的、含 Cr 量较高的复合氧化膜, 抑制了磨损过程。

关键词: Al-Ni-Cr 复合涂层; 冷喷涂; 摩擦系数; 极化行为

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

Study on the wear characteristics of Al-Ni-xCr composite coating prepared by low pressure cold spraying

Zhang Yiyang¹, Zhang Liuyan^{1,2*}, Han Zhaokang¹, Lin Qian¹, Yuan Binkai¹, Tan Guibin²

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006,

China; 2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong Provincial Key Laboratory of

Offshore Energy Equipment Manufacturing, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Al-based coating has well corrosion resistance, but its wear resistance is poor. In this paper, mixing Ni and Cr powders was designed to improve the wear resistance of the Al-based coating. A series of Al-Ni-xCr composite coatings with different Cr content were prepared by low pressure cold spraying. Their micro-morphology and composition were analyzed by means of metallography, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. Their microhardness and wear curve were measured by microhardness tester and wear meter. Their wear mechanism was analyzed according to the microscopic characteristics. The results show that the low pressure cold spraying can achieve the co-deposition of Al, Cr and Ni metal powder. The Al-Ni-xCr composite coating is dense and uniform. Dendrite Ni powder has a higher deposition rate, while Cr powder shows a lower deposition rate. The Cr content in Al-Ni-70Cr coating is about 31 wt.%. With the increase of Cr content, the densification of Al-Ni-xCr com-

收稿日期: 2023-12-12

修回日期: 2024-01-25

作者简介: 张怡颖(2000—), 女, 研究生, 研究方向: 表面工程, email: 1041583198@qq.com

*通信作者: 张留艳(1983—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 表面工程, email: zlyjust@gdut.edu.cn

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(No. 2022A1515240004); 广州市科技计划项目(No. 2023A04J0270)

posite coating increases. The wear resistance of Al-Ni-xCr composite coating is mainly related to Cr content rather than Ni. Al-Ni-70Cr composite coating has the best wear resistance, and its wear rate is only 1/2 of that of Al coating. Its excellent wear resistance is attributed to the formation of a stable hard and high Cr-containing composite oxide film at the friction interface, which inhibits the wear process.

Keywords: Al-Ni-Cr composite coating; cold spraying; friction coefficient; polarization behavior

钢铁材料应用广泛,涂层技术是应对其耐蚀性差的最常见手段。铝基涂层因其优异的自钝化性能常用作防腐涂层。在铝基涂层的众多制备方法中(如涂覆、热浸镀、渗铝、热喷涂等),冷喷涂技术优势明显^[1]。冷喷涂的基本原理是粉末材料在超音速气流带动下,大于临界沉积速度时,通过发生塑性变形而实现在基材表面的沉积^[2]。冷喷涂方法制备的涂层具有低温、氧化小、变形应力小、结构致密、效率高、涂层厚度可控等优势,特别适合于塑性较好的金属粉末的沉积,也可以用来制备多金属或金属-陶瓷复合涂层,广泛应用在金属基防腐及耐磨涂层的制备上^[3]。

针对冷喷涂铝基涂层耐磨性不足的问题,采用强化相如陶瓷相、硬质金属相等进行复合强化是比较有效的简便快捷方法。Spencer等^[4]、陈金雄等^[5]、Cong等人^[6]通过掺杂 Al_2O_3 制备了Al- Al_2O_3 复合涂层,从而提高了Al涂层的耐磨性能。徐鲁杰等^[7]在铝涂层中掺入一定量的 B_4C 后,耐磨性得到显著提高。邓碧欣等^[8]用铝合金粉取代纯铝粉,并用SiC颗粒复合制备的涂层具有更优异的耐磨性。还有研究通过对铝涂层进行后续处理来增强其耐磨性。Loganathan等人^[9]采用纳米金刚石粉复合进铝基涂层后,结合后续热处理,提高了涂层的耐磨性能。Wu等人^[10]通过在铝涂层表面制备石墨烯和LDH(层状双金属氢氧化物)层提高了铝涂层的耐磨性。Ni具有优异的耐蚀和抗氧化性,冷喷头制备的Ni基涂层性能优异,应用广泛^[11]。Ni也常用来与铝进行复合,并结合热处理制备Ni-Al复合涂层,具有较好的耐高温性能^[12-13]。Cr-Ni复合涂层也被证实具有较好的耐蚀性。Bala等人^[14]在钢基体表面冷喷涂沉积了Ni-50Cr涂层,该涂层具有较好的耐高温性能。可见Ni、Cr常来制备耐蚀较好的铝基复合涂层,但其磨损特性报道匮乏。

本文拟优选不同金属粉末进行铝基复合涂层的制备,以发挥各组分的优势,强化涂层性能。研究以

铝合金粉末取代铝粉作为原材料,采用自身硬度较高且耐蚀的Ni粉和Cr粉复合,来强化铝基涂层,研究Cr含量对涂层组织结构和磨损特性的影响规律。

1 实验材料和方法

1.1 基体前处理及原材料

以A3低碳钢板材,采用线切割法加工成尺寸为15 mm×15 mm×3 mm的块材,对其进行除油、脱脂和喷砂前处理,使其表面粗糙度达到2.5,备用。将铝合金粉、高纯Ni粉、高纯Cr粉、氧化铝粉按照比例配粉,采用机械搅动法混合均匀,备用。使用的铝合金粉为球形,平均粒径40 μm ;Cr粉为块状,平均粒径30 μm ;Ni粉为枝晶状,平均粒径25 μm 。添加的氧化铝粉为纯度99.9%的球形粉末,平均粒径为20 μm ,主要起到改善混合粉末的流动性、原位夯实涂层的作用^[15]。在喷涂过程中,少量保留在涂层中,大部分反弹出涂层。

1.2 涂层制备

采用俄罗斯OCPS公司研发的DYMET-423冷喷涂设备。工艺参数为:喷枪压力0.5~0.8 MPa,气体预热温度500 $^{\circ}\text{C}$,喷嘴移动速度1000 mm/min。通过调控原始粉末成分制备Al-Ni-xCr复合涂层,其中Cr粉在Al、Ni、Cr混粉中的占比分别为0 wt.%、30 wt.%、40 wt.%、50 wt.%、70 wt.%,Al粉为Ni粉的3倍,氧化铝粉占有所有粉末的20 wt.%。制备的涂层分别命名为Al-Ni-0Cr、Al-Ni-30Cr、Al-Ni-40 Cr、Al-Ni-50Cr、Al-Ni-70Cr。另外,制备不添加Ni和Cr的Al涂层作为对比样,各涂层成分设计如表1所示。

1.3 涂层表征

采用扫描电镜(SU-8010)对制备涂层的原始粉末进行形貌观察,对涂层的表面及截面组织进行显微观察。采用X射线衍射仪(D/MAX-Ultima IV)对涂层物相进行分析。参照GB4342-84“金属显微维氏硬度试验方法”,对涂层显微硬度进行测试。采用摩擦磨损试验机(WTE-2E)的旋转模块对涂层进行

表1 所制备的每种涂层的成分

Tab.1 The composition of each coating prepared

涂层种类	Al含量/wt.%	Ni含量/wt.%	Cr含量/wt.%	Al ₂ O ₃ 含量/wt.%
Al	80	0	0	20
Al-Ni-0Cr	60	20	0	20
Al-Ni-30Cr	42	14	24	20
Al-Ni-40Cr	36	12	32	20
Al-Ni-50Cr	30	10	40	20
Al-Ni-70Cr	18	6	56	20

摩擦磨损测试,载荷2 N,对磨材料是直径为6 mm的GCr15小球,转速200 r/min,旋转半径为3 mm,摩擦运行时间为15 min。先记录摩擦系数随时间的演变曲线,后采用金相显微镜和扫描电镜观察磨痕特征,并采用3D激光共聚焦显微镜计算磨损率。

2 结果与分析

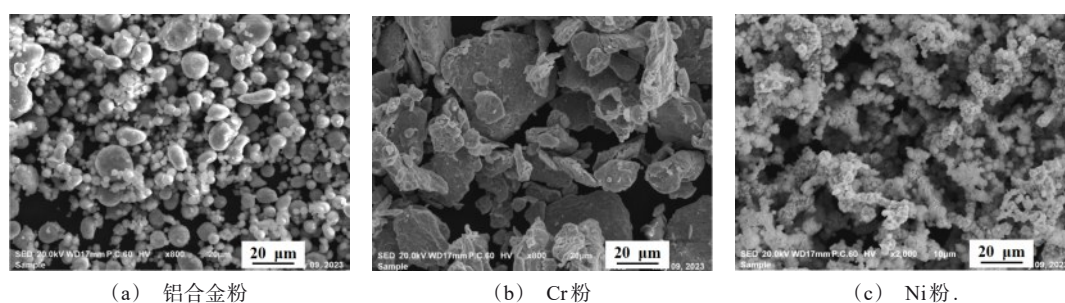
2.1 复合涂层的结构与成分

图1为Al-Ni-xCr涂层制备时所用粉末的原料形貌图。从图1(a)可见铝合金粉呈现球形,表面平整光滑,平均粒径40 μm。图1(b)可见,Cr粉呈现不规则的块状,平均粒径30 μm。从图1(c)可观察到Ni粉为电解枝晶状,由细小颗粒沉积团聚而成,平均粒径25 μm。

图2为Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层的表面微观形貌。从图2(a)可见,未添加Ni和Cr的铝涂层表面由均一的铝相和少量球形氧化铝颗粒组成。由图2(a1)的高倍形貌可见,涂层内部缺陷较少,局部存在微孔隙。从图2(b)可见,Al-Ni涂层中主要由白色和黄色两种物质和球形氧化铝组成,两相相间,均匀分布。另外可观察到涂层内部存在微孔隙,降低了涂层的致密性。从图2(c)~(f)可见,Al-Ni-Cr

涂层由三相组成,随着Cr添加量的增加,涂层中Cr的体积分数也明显增多,宏观上三种金属分布相对均匀。高倍观察时,不同金属物相之间界面清晰,不存在明显的孔隙等缺陷,涂层致密性较好。由此可见,低压冷喷涂混合粉末可以获得组成相分布均匀、结构致密的Al-Ni-xCr复合涂层。

图3(a)~(f)为Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层的横截面微观形貌。由图可见,几种涂层均未观察到明显的孔隙,且涂层与基体界面处结合较好,不存在开裂现象。另外,对比基体界面的变形程度可见,在相同的前处理工艺下,图3(a)的Al涂层沉积后,钢基体表面保持平整。而从图3(b)~(f)观察到,Al-Ni-xCr复合涂层沉积后,基体与涂层的界面高低起伏,粗糙度明显增大,其受混合粉末撞击时发生了较大的塑性变形。同样,Al-Ni-xCr复合涂层截面也呈现出明显的塑性变形流变现象,表明Ni和Cr的添加使得混合粉末在喷涂加速过程中获得了更高的动能。粉末粒子自身也发挥了原位夯实的作用,其在沉积过程中发生了更大程度的塑性变形^[16],从而使Al-Ni-xCr混粉复合涂层沉积后获得了更致密的结构。



(a) 铝合金粉

(b) Cr粉

(c) Ni粉

图1 涂层制备使用粉末的SEM形貌

Fig.1 SEM morphology of powder used for preparation of coating

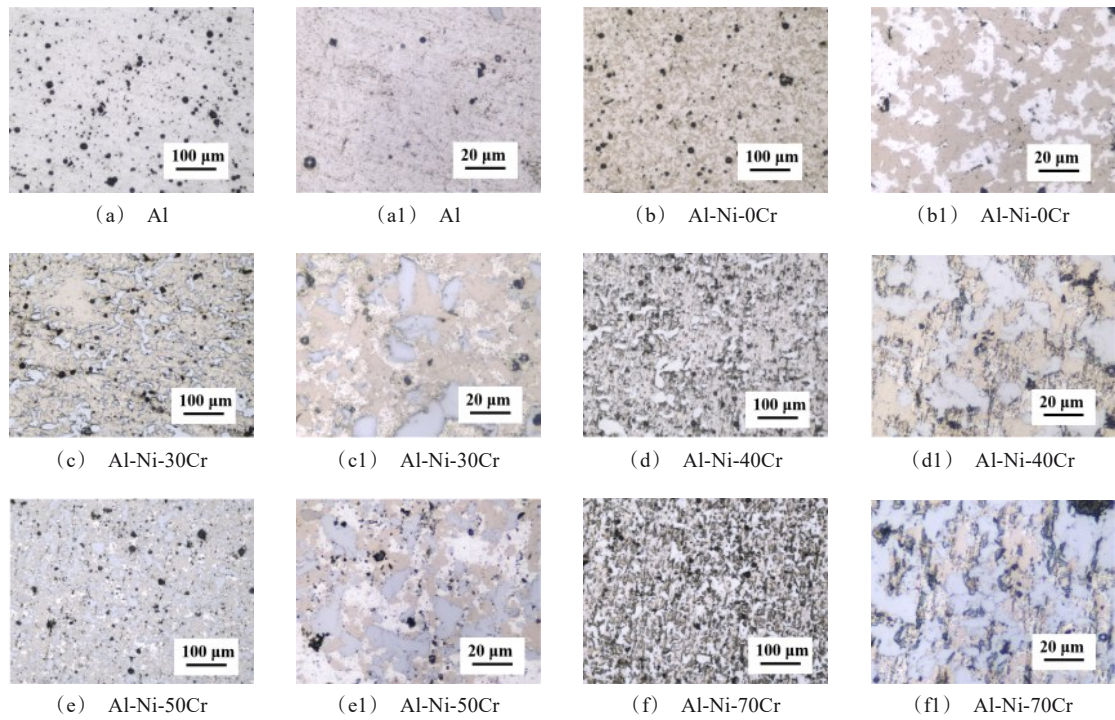


图 2 Al 涂层及 Al-Ni-xCr 复合涂层的表面微观形貌

Fig.2 Surface microstructure of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating

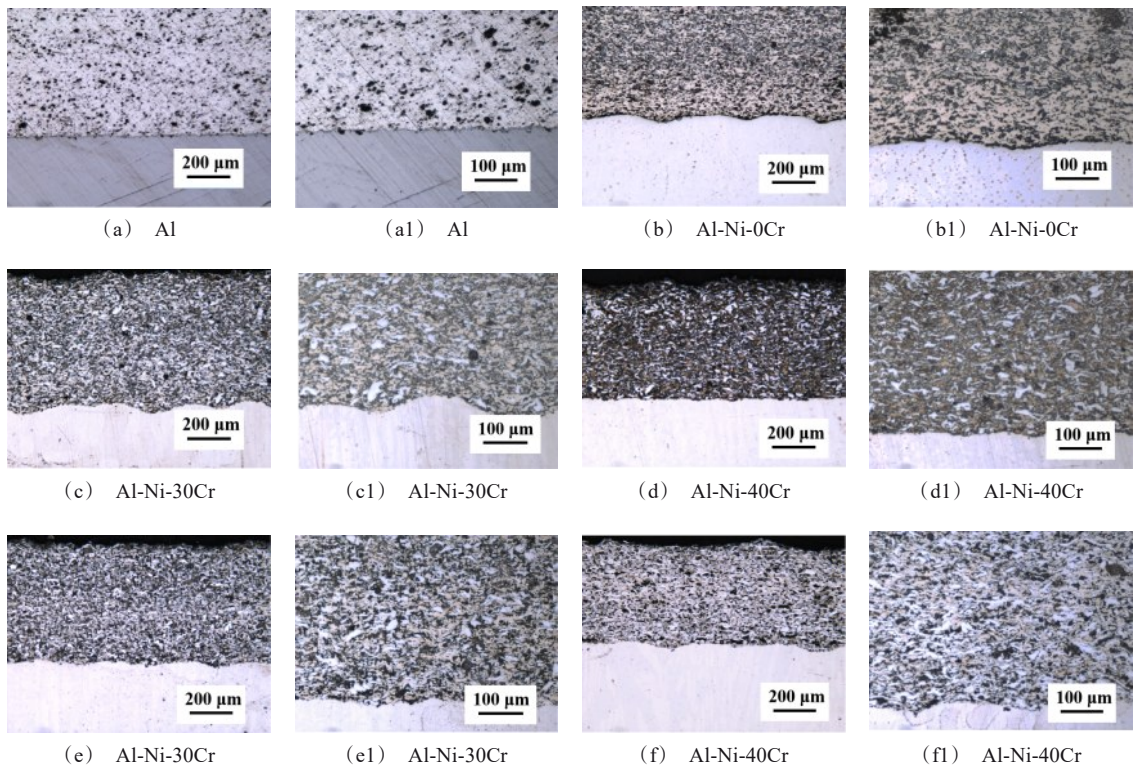


图 3 Al 涂层及 Al-Ni-xCr 复合涂层的横截面微观形貌

Fig.3 Microstructure of cross section of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating

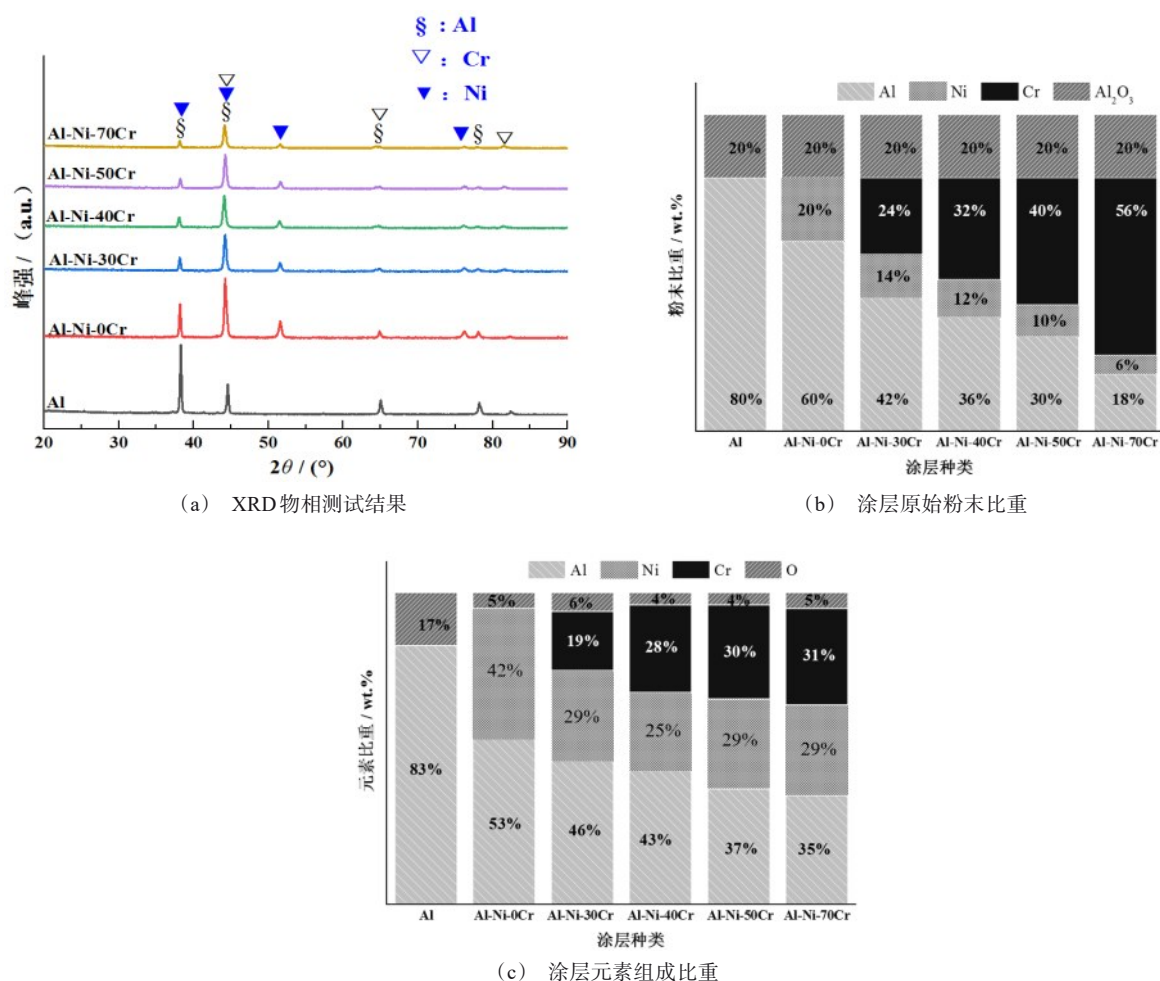


图4 Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层的物相及成分
Fig.4 Phase and composition of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating

图4(a)为Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层表面物相的XRD检测结果。从图4(a)可见,检测到的涂层组成与喷涂用的原始粉末种类有关。Al-Ni-xCr涂层主要由Al、Cr、Ni三种成分组成,这与冷喷涂涂层的沉积原理有关。喷涂粉末经过冷喷涂设备加速后,发生塑性变形沉积到基体表面形成涂层,此过程温度较低,涂层内几乎不发生相变^[17]。在喷涂过程中,氧化铝粉末部分因为反弹没有进入涂层中,残留的少量氧化铝颗粒,在XRD检测过程中难以显示出特征峰。氧化铝的沉积特征与文献报道的一致^[18]。

图4(b)为涂层制备时所采用原始粉末的配比,由于不同金属粉末沉积率存在差异,实际涂层的组成与原始粉末配比会有差距。图4(c)为实际涂层中主要元素的质量比。从图4(c)可见,Al-Ni-xCr复合涂层中氧化铝残留量较少,在4 wt.%~6 wt.%,Ni

的沉积率明显高于Al和Cr,Cr的沉积率最低。而且当混粉中Cr含量从40 wt.%增加到70 wt.%,涂层中Cr量增加较缓慢,Al-Ni-70Cr复合涂层中Cr量约为31 wt.%,表明过多Cr粉的添加并没有进入涂层中,大多被反弹损耗。冷喷涂过程中,粉末实现沉积的前提是达到临界沉积速度并发生塑性变形,无塑性变形能力或者塑性差的粉末很难单独沉积,其往往只可以与塑性好的粉末一起共沉积。不同粉末的沉积率与粉末临界沉积速率有关,从而与粉末的硬度、形状、尺寸、流动性等因素有关,通常硬度高的粉末临近沉积速率较大^[16]。枝晶Ni的塑性变形能力较好,冷喷涂过程中具有较大的沉积率。此外,Ni具有较好的耐蚀性能,掺杂Ni制备的金属基复合涂层具有更好的耐蚀性^[19],且枝晶状镍粉对Cr粉的夹带效果也有利于提高Cr的沉积率。Cr粉本身的硬度

相对较高,临界沉积速度大,塑性变形能力小,低压冷喷涂时其沉积率较低。尽管进入涂层中的Cr粉量减少,但是较多的Cr粉在沉积过程中发挥了很好的原位夯实作用,可以提高涂层的致密性。通过调节粉末配比,可以使Al-Ni-50Cr、Al-Ni-70Cr复合涂层中Al、Ni、Cr三种成分的含量接近,且Al-Ni-70Cr

复合涂层中,Al、Ni、Cr含量接近且均匀相间分布,具有更大的塑性变形程度和更致密的结构。采用几种不同金属粉进行混粉喷涂制备的复合涂层具有均匀致密的结构,与文献报道结果一致^[20-21]。

图5为Al涂层及Al-Ni-xCr涂层的平均显微硬度、摩擦系数及磨损率数据图。

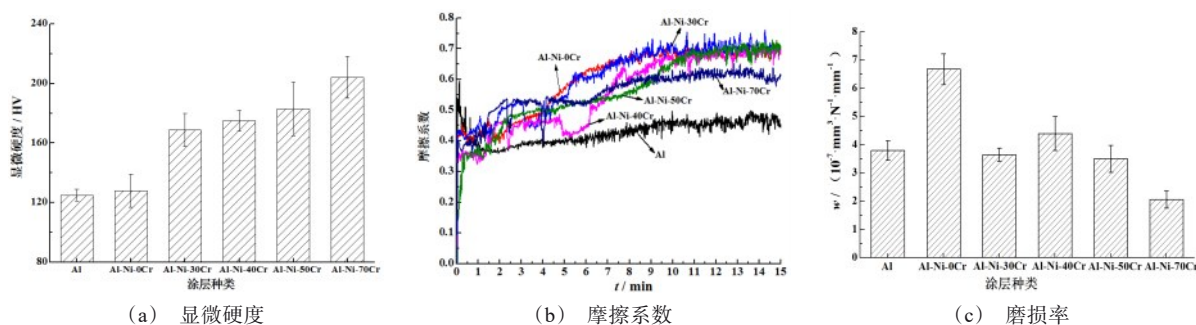


图5 Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层的显微硬度、摩擦系数及磨损率

Fig.5 Microhardness, friction coefficient and wear rate of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating

从图5(a)可见,未复合处理的铝涂层的平均硬度相对较低,约为125 HV;掺杂Ni之后,涂层的硬度稍有提高;在Al-Ni涂层基础上添加Cr之后,涂层的平均硬度显著提高。Al-Ni-30Cr涂层的平均显微硬度值约为170 HV,随着Cr含量的增加,涂层的硬度仍然呈现增大趋势,Al-Ni-70Cr涂层的平均显微硬度值超过200 HV。另外,图中复合涂层硬度的误差棒数值相对较大,复合涂层的硬度测试值的分散度相对较大。这是因为设计的涂层成分中,Cr本身硬度高于Al,软硬相复合涂层的显微硬度值与测试位置有关,但是硬质金属粉末复合改性后,可以明显整体提高涂层的平均硬度。涂层的硬度高低对其耐磨性有较大的影响。

图5(b)为涂层在200 g载荷下磨损15 min过程中,摩擦系数的变化曲线。可图可见,Al涂层稳定后的平均摩擦系数约为0.4,Al-Ni-xCr复合涂层的平均摩擦系数高于Al涂层;Al-Ni-0Cr、Al-Ni-30Cr、Al-Ni-40Cr、Al-Ni-50Cr涂层在稳定后的摩擦系数基本接近,约为0.7,然而Al-Ni-70Cr涂层的平均摩擦系数明显较低,约为0.6。这表明当Cr含量增加到一定值后,有利于涂层表面润滑性能的改善。摩擦系数的大小反映涂层表面的润滑性,软、硬质相复合的涂层并不一定具备优异的减摩特性,反而出现明显的阻摩效果。这与摩擦过程中硬质金属相的阻碍

作用有关。

摩擦系数的高低与涂层的耐磨性并不存在直接的关系。图5(c)给出了Al涂层及Al-Ni-xCr涂层磨损率的对比结果。从图可见,未复合处理的铝涂层的磨损率相对较低,只复合Ni的Al-Ni-0Cr涂层的磨损率明显增大,说明单纯混合Ni会降低Al涂层的耐磨性。这与涂层制备时采用枝晶状镍粉有关,枝晶状镍粉硬度不高,其复合不会明显改变涂层的硬度,反而减弱了Al的减摩性能,使涂层磨损率增大。添加Cr复合后,Al-Ni-xCr涂层的磨损率同时受到涂层硬度和润滑性能影响。Cr含量30 wt%~50 wt.%的Al-Ni-30Cr、Al-Ni-40Cr、Al-Ni-50Cr复合涂层,磨损率出现波动,但与铝涂层磨损率差异不大。说明Cr含量低时没有明显提高涂层的耐磨性。而Cr含量较高的Al-Ni-70Cr涂层的磨损率最低,其数值接近铝涂层的一半。这与Al-Ni-70Cr涂层同时具有较高的硬度和相对较低的摩擦系数有关。

图6为Cr含量不同的Al-Ni-xCr涂层在磨损测试后的磨痕形貌。图7为图6中相应的圆圈指示位置的能谱检测结果。从图6可见,几种涂层的磨损机理基本表现为黏着磨损和磨粒磨损的复合磨损失效形式。较软的基体与较硬的钢质摩擦球之间进行滑动摩擦时,对磨的钢球表面存在的微观凸起点会压入涂层表面,引起涂层表面发生局部的塑性变形,

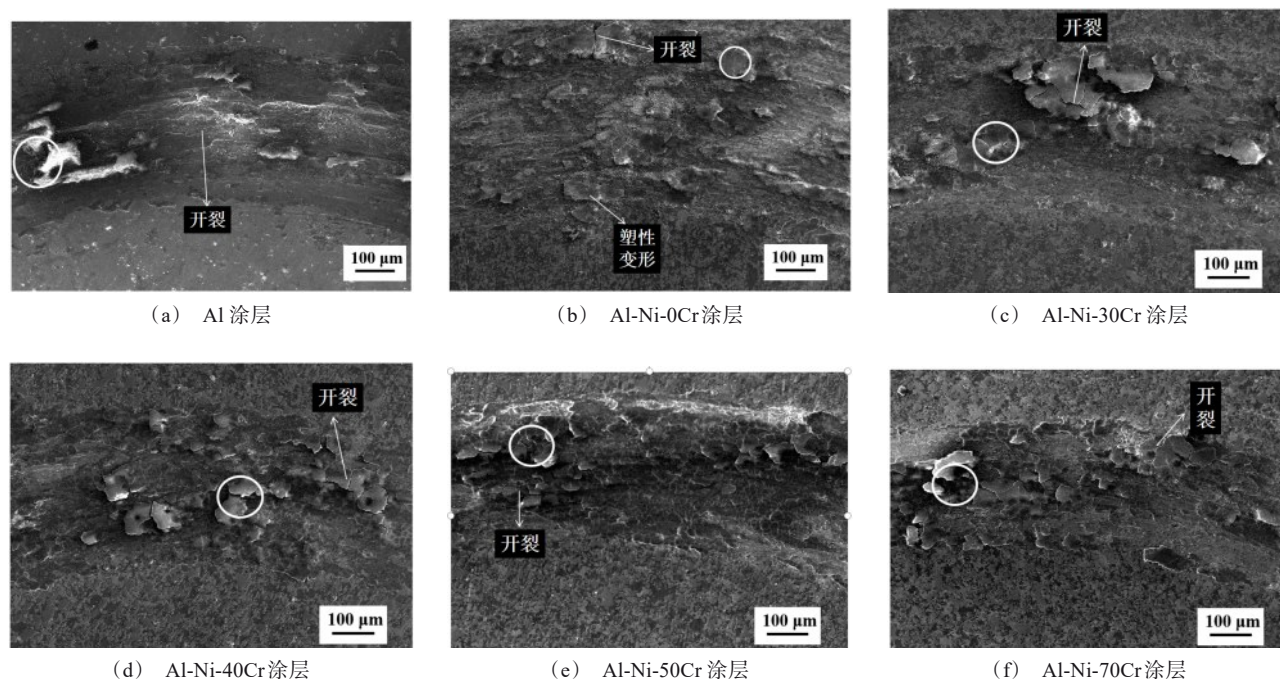


图6 Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层的磨痕SEM形貌

Fig.6 SEM morphology of wear marks of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating

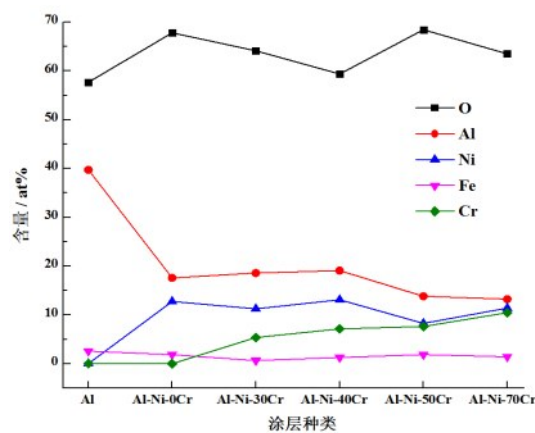


图7 Al涂层及Al-Ni-xCr复合涂层在图6中圆圈所示位置的能谱分析结果

Fig.7 The results of energy spectrum analysis of Al coating and Al-Ni-xCr composite coating at the positions shown in circles in Fig. 6

并产生强烈黏着。后续滑动中,黏着点被剪断,后续继续产生新的黏着点,如此往复损耗材料。黏着剪断常常发生在软的涂层一侧,磨损后的涂层表面表现出较为粗糙的特征,这是界面处较多的局部黏着点发生剪断后产生的大量切口导致的。如图6(a)所示,铝涂层表面呈现出黏着剪断后的粗糙颗粒形态,磨屑残留量相对较少。从图6(b)~(f)可见,几种

Al-Ni-xCr复合涂层的表面磨损形貌更为接近,表面均存在片状压扁的磨削,且片层局部存在开裂现象。Al-Ni-70Cr涂层的磨痕宽度也最小。从图7的能谱检测结果可知,图6(a)中Al涂层上的白亮磨削为铝的氧化物,黏附有微量来自于对磨磨的Fe;图6(b)中涂层表面的片状磨削主要是Al和Ni的氧化物;图6(c)~6(f)中的Al-Ni-xCr涂层表面的片状磨

削主要是Al、Ni和Cr的氧化物,在Al-Ni-xCr涂层界面形成的片状氧化膜层阻碍了涂层与对磨球的直接接触,抑制了磨损的加重。而且随着Cr量的增加,在Al-Ni-xCr涂层表面的磨损层内,Cr量也呈增大趋势。Al-Ni-70Cr涂层与对磨球的磨损界面形成了Cr含量更高且稳定的硬质氧化膜,其发挥了更优异的耐磨性。

3 结论

(1)低压冷喷涂可以实现三种Al、Cr、Ni金属粉的共同沉积,获得致密、三相均匀分布的Al-Ni-xCr复合涂层;枝晶状Ni粉沉积率较高,Cr粉沉积率较低,含70 wt.% Cr的混粉中Cr含量约31 wt.%;硬度较大的Cr同时起到夯实涂层的作用,随着Cr含量的增加,Al-Ni-xCr复合涂层的致密性提高。

(2)Al-Ni-xCr复合涂层的耐磨性能主要来自于Cr而非Ni,且与Cr含量有关。Al-Ni-70Cr复合涂层耐磨性最佳,其磨损率仅为Al涂层的1/2。其优异的耐磨性归因于磨损界面形成了稳定的、硬质含Cr氧化膜层,抑制了磨损过程。

参考文献

- [1] 潘波涛,李园园,王锦霞,等. 铝防护涂层制备方法的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 171-179.
- [2] 钟厉,王昭银,张华东. 冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 15-20.
- [3] 任子阳,汤嘉昊,殷世铜,等. 冷喷涂制备铝基涂层研究进展及应用现状分析[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(8): 74-80.
- [4] Spencer K, Fabijanic D M, Zhang M X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(3): 336-344.
- [5] 陈金雄,王群,罗丝丝,等. AZ31镁合金冷喷涂Al-Al₂O₃复合涂层组织及性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1720-1729.
- [6] Cong D, Li Z, He Q, et al. Wear behavior of corroded Al-Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spray[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 326: 247-254.
- [7] 徐鲁杰,韩超,黄国胜. 不同B₄C含量对冷喷涂Al/B₄C复合涂层防腐与耐磨性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 90-102.
- [8] 邓碧欣,孙澄川,何超,等. 冷喷涂Al6061/SiC复合涂层的制备及性能研究[J]. 材料保护, 2023, 56(11): 1-12.
- [9] Loganathan A, Rengifo S, Hernandez A F, et al. Effect of nanodiamond reinforcement and heat-treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of cold sprayed aluminum coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 412: 127037.
- [10] Wu H, Zhang Y, Shao L, et al. Tribological behavior of graphene anchored Mg-Al layered double hydroxide film on Mg alloy pre-sprayed Al coating[J]. Applied Surface Science, 2020, 530: 146536.
- [11] 李文亚,张正茂,徐雅欣,等. 冷喷涂Ni及镍基复合涂层研究进展[J]. 金属学报, 2022, 58(1): 1-16.
- [12] 李旭,王强,牛文娟,等. 热处理对冷喷涂Al-Ni沉积体组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2020, 44(11): 1153-1162.
- [13] 刘志凯,沈耿哲,刘灿森,等. 低压冷喷涂热处理复合处理制备Ni₂Al₃金属间化合物涂层及其滑动磨损特性研究[J]. 材料保护, 2023, 56(3): 1-5.
- [14] Bala N, Singh H, Prakash S. Accelerated hot corrosion studies of cold spray Ni-50Cr coating on boiler steels[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 244-253.
- [15] 吴畏. 热加工对低压冷喷涂7075铝合金复合材料组织与性能的影响研究[D]. 广州: 广东工业大学材料与能源学院, 2021.
- [16] 杨景文,李文亚,邢词皓,等. 冷喷涂铜涂层研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 58-70.
- [17] 钟厉,王昭银,张华东. 冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 15-19.
- [18] Koivuluoto H, Vuoristo P. Effect of powder type and composition on structure and mechanical properties of Cu+Al₂O₃ coatings prepared by using low-pressure cold spray Process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(5): 1081-1092.
- [19] 杨水梅,张留艳,詹浩芝,等. 掺杂镍对镁合金表面冷喷涂锌基涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 217-224.
- [20] Koivuluoto H, Lagerbom J, Vuoristo P. Microstructural studies of cold sprayed copper, nickel, and nickel-30% copper coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(4): 488-497.
- [21] 杨康,李文亚. 冷喷涂Cu/Ni/Al复合涂层内部粒子间的结合特性研究[J]. 焊管, 2018, 41(1): 15-19.