

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的制备及性能研究

刘晓明^{1,2}, 董俊慧², 韩吉伟¹

(1. 内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: **目的** 制备纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层并对比分析结合强度、显微硬度、孔隙率, 为利用热喷涂技术治理易损部件提供有效手段。**方法** 运用自主研发的造粒系统, 成功对高活性的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂粉体实施团聚造粒。使用高速火焰喷涂方法, 在结构材料表面制备出了纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。测试了纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的基本性能, 包括结合强度、显微硬度、孔隙率。**结果** 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂材料的粒径由原始的 50 nm 团聚到最终的 114~178 μm, 团聚后的纳米颗粒呈圆形或椭圆形, 各成分比例保持原始比例, 团聚颗粒内部仍然保持纳米粉体状态。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 表面及截面元素分布均匀、致密, 纳米涂层的孔隙率、硬度和结合强度分别是微米涂层的 0.25 倍、1.39 倍和 2.43 倍。**结论** 团聚后的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 颗粒满足热喷涂材料的相关要求, 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 比微米涂层具有更精细的涂层结构和更优异的基本性能。

关键词: 纳米; Fe-Al/Cr₃C₂; 复合涂层; 团聚造粒; 微观形貌

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0224-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.035

Fabrication and Properties of Nano Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coatings

LIU Xiao-ming^{1,2}, DONG Jun-hui², HAN Ji-wei¹

(1. Inner Mongolia Electric Power Science and Research Institute, Hohhot 010020, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

ABSTRACT: The work aims to fabricate nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings, compare and analyze adhesion strength, microhardness and porosity, so as to provide an effective technical method for treating damageable parts by applying thermal spraying technology. Reunion-granulation was successfully applied to highly active nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite spraying materials by using independently developed reunion-granulation system. Nano-Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings were made on structural materials in the method of high velocity flame spraying (HVFS). Basic properties of the nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings, including adhesion strength, micro-hardness and porosity were tested. Particle size of Fe-Al/Cr₃C₂ composite spraying materials changed from 50 nm to 114~178 nm. The nano spraying particles after reunion-granulation were round or oval, proportion of ingredients in granulated particles stayed the same, inner particles of granulated particles kept nanometer state. Elements on the surface and cross section of the nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings were dense and uniformly distributed. The porosity, micro-hardness and adhesion strength of nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings was 0.25 times, 1.39 times and 2.43 times as great as micro Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings, respectively. Reunion-granulated particles meet relevant requirements of thermal spraying materials completely. Compared with micro Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings, nano coatings have finer coating structure and superior basic properties.

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2017-07-29

Received: 2017-06-19; Revised: 2017-07-29

作者简介: 刘晓明 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统微/纳米涂层材料的研发、涂层制备及应用研究工作。

Biography: LIU Xiao-ming (1978—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: development of micro/nano coating material research for electric power system, coating preparation and application study.

KEY WORDS: nano; Fe-Al/Cr₃C₂; composite coating; reunion-granulation; morphology

Fe-Al 为有序金属间化合物, 其抗氧化和抗硫化性能优良, 在多种介质中的抗腐蚀性好, 且具有高温强度较强、密度低、不含贵重合金元素、成本较低等优点, 是一种潜在的理想高温结构材料^[1-5]。随着 Fe-Al 合金材料研究的不断深入, 以 Fe-Al 系列为基体的热喷涂材料的研究也不断取得进展。田保红^[6]利用高速电弧喷涂方法, 在结构材料表面制备 Fe₃Al/WC 复合涂层并对比研究了该涂层的抗高温冲蚀性能。结果表明, 高速电弧喷涂 Fe₃Al/WC 涂层具有良好的抗高温冲蚀、抗磨损和抗氧化综合性能。朱子新^[7]采用高速电弧喷涂技术, 在结构材料上喷涂 Fe-Al/WC 金属间化合物复合涂层, 采用数值计算方法模拟了高速电弧喷涂 Fe-Al 合金雾化熔滴的动力学和热传输过程, 用数字高速摄像方法观察和分析了 Fe-Al 粉芯丝材的动态冶金过程, 为这种金属间化合物复合涂层的大规模工业应用奠定了理论基础。徐维普^[8]利用高速电弧喷涂方法制备了 Fe-Al/Cr₃C₂ 金属间化合物复合涂层, 结果表明, 对 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有较高的热震结合强度、显微硬度以及抗腐蚀性能、抗高温冲蚀性能和抗高温摩擦磨损性能。徐润生^[9]采用高速火焰喷涂方法, 对 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层的配比进行优化, 在结构材料表面制备了 Fe-15Al/45Cr₃C₂ 复合涂层, 研究了 Fe-15Al/45Cr₃C₂ 复合涂层的硬度、结合强度等常温性能以及抗高温腐蚀性能、抗高温冲蚀性能以及抗高温摩擦磨损性能。结果表明, Fe-15Al/45Cr₃C₂ 复合涂层中各组分比例最优, 其综合性能均高于同类其他复合涂层。

Fe-Al 系列作为基体热喷涂材料的成功研制, 使 Fe-Al 这种不含贵重金属元素的金属间化合物的应用成为可能。非晶态 Fe-Al 金属间化合物成为新世纪热喷涂涂层重要的发展方向, 为国家节约稀缺战略资源 Ni 做出很大贡献。然而, Fe-Al 基喷涂材料的性能潜力却未被充分发掘, 这是由于 Fe-Al 自身的脆性造成的。一个金属部件如果由单一的 Fe-Al 构成, 其脆性可以通过热处理的方式进行解决; 如果由表面喷涂 Fe-Al 系列涂层来复合构成, 热处理将影响到基体材料的组织结构, 因而不能大规模采用。顺应国际国内热喷涂材料的发展趋势, Fe-Al 基喷涂材料的性能潜力可以通过纳米化来进一步得到发挥。因此, 纳米级 Fe-Al 基非晶态复合涂层已成为研究的热点问题。

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的制备存在两方面技术难题。一方面是纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 的粉体材料因为飞扬和烧损问题而不能直接用于喷涂, 该问题最有效的方法是将纳米粉体通过团聚造粒制成微米级或更大颗粒, 然后进行喷涂; 另一方面是纳米颗粒在

热喷涂过程中的烧结长大问题, 因为快速加热和短时间停留可以有效抑制颗粒的长大、元素扩散、第二相的形成和长大, 因此解决该问题的有效方法是采用高速喷涂方法。

1 试验材料及方法

自主设计的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂粉体材料由纳米 Fe 粉、纳米 Al 粉、纳米 Cr₃C₂ 粉参照微米级 Fe-15Al/45Cr₃C₂ 中的 Fe 粉、Al 粉、Cr₃C₂ 粉的最优化比例组成^[9]。纳米 Fe 粉、纳米 Al 粉、纳米 Cr₃C₂ 粉纯度均为 99.9%, 粒度均为 50 nm。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂粉末材料各组分分配比后, 加入适当比例的蒸馏水以及分散剂、粘结剂等配制成纳米水基浆料, 利用自主研发的造粒系统将纳米水基浆料喷雾干燥后形成纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合团聚颗粒^[10]。

试验基体材料选用正火态的 20G 钢, 其化学成分和力学性能符合相关标准要求。用丙酮对试样进行清洗, 除去表面油污和其他附着物, 然后对试样的喷涂面进行喷砂处理。喷砂工艺为: 棕刚玉砂料粒度 25 目, 喷砂气压 0.7 MPa, 喷砂角度 45°, 喷砂距离 200~300 mm。使用 CP-5000 高速火焰喷枪并配以相应的设备。

采用对偶件拉伸试验法, 按照 GB/T 8642—2002 在 WAW-300C 微机控制电液式伺服万能压力试验机上测试涂层的结合强度。依据标准, 试样规格为 $\phi 50$ mm \times 40 mm, 涂层厚度 0.5 mm。选用 25 mm \times 16 mm \times 4 mm 的 20[#] 钢, 在一个 25 mm \times 16 mm 面上进行喷涂, 涂层厚度 0.5 mm。对涂层表面, 首先利用砂轮打磨平整, 然后用金相砂纸按金相试样要求进行磨制。在 GOCT7865-56 型显微硬度计上测试涂层表面的显微硬度。测试位置从试样中间往两边每隔 50 μ m 取一点, 共取 10 点。每种涂层的显微硬度值均取 10 个数据的平均值。采用 Axio Observer A1m 金相显微镜, 按照 GB/T 3365—2008, 用灰度法测量纳米涂层的孔隙率。

采用 HITACHI S-3400N 型扫描电子显微镜 (SEM) 结合 GENESIS 型 X-射线能谱仪 (EDAX), 观察纳米粉末颗粒造粒前后的颗粒尺寸及成分组成的变化。采用扫描电镜结合能谱仪分析纳米涂层表面及截面的相组成及成分, 并观察腐蚀表面及磨损表面的形貌特征及成分变化。

2 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂粉末团聚造粒结果分析

造粒前首先对造粒的纳米粉末进行验证性分析。纳米 Al 及纳米 Cr₃C₂ 的微观形貌见图 1—2。

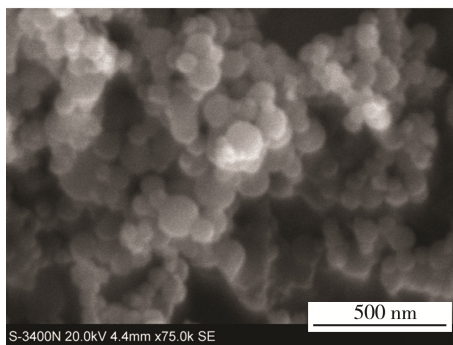


图 1 纳米 Al 的微观形貌
Fig.1 Morphology of nano Al powder

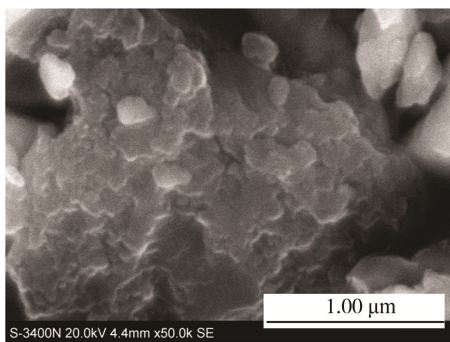


图 2 纳米 Cr_3C_2 的微观形貌
Fig.2 Morphology of nano Cr_3C_2 powder

从图 1—2 中可以看出, 纳米 Al 及纳米 Cr_3C_2 颗粒细小, 满足粒度 50 nm 的需求, 满足造粒对纳米 Al 和 Cr_3C_2 原始粉末的要求。由于纳米 Fe 常温时在空气中会剧烈氧化, 进而发生燃烧现象, 因此不方便对纳米 Fe 粉的原始状态进行观察。通过观察纳米 Fe 粉常温下的燃烧现象, 判断所提供 Fe 粉具备异于普通微米粉末的纳米特性, 满足试验对纳米 Fe 粉的相关要求。

经造粒后的 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 复合材料能够成为纳米喷涂材料的前提是满足如下技术要求: (1) 造粒后颗粒的形状为圆形或椭圆形, 充分保证粉末具有很好的流动性; (2) 造粒后颗粒的粒径在 -325~+45 目 (44~350 μm) 之间, 一方面保证粉末喷涂过程熔融充分而不易烧损, 另一方面一定质量的颗粒保证喷涂过程中不产生飞扬现象; (3) 造粒后, 颗粒内部仍然保持纳米特性, $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 各组分的百分比基本保持不变。

经过造粒后的纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 的表面形貌见图 3, 从图 3 上可以看出, 造粒后的纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 的形状为圆形和椭圆形。从粒径测量的结果来看, 纳米复合粉末的粒径为 114~178 μm , 满足喷涂对喷涂材料粒径的需求。进一步放大纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 颗粒, 发现颗粒整体团聚很好 (图 4)。将纳米颗粒表面放大至 1 万倍和 5 万倍, 发现纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 颗粒是由纳米颗粒粘结而成, 纳米颗粒保持了原来的纳米状态, 粒径在 100 nm 以内 (图 5), 而且团聚粒子内部各组分的比例经 EDAX 验证, 符合 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 的最佳比例要求 (图 6)。因此, 经过“造粒”的粉末颗粒满

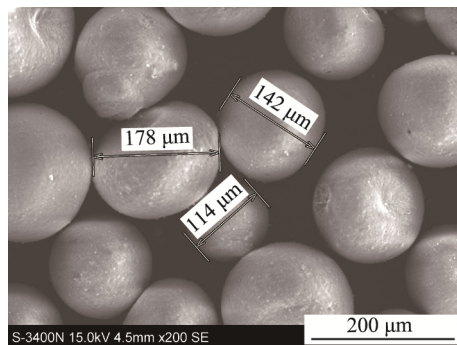


图 3 纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 造粒后的形貌及粒径
Fig.3 Morphology and particle size of nano $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ after granulation

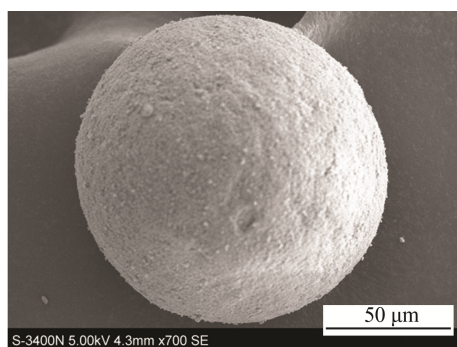
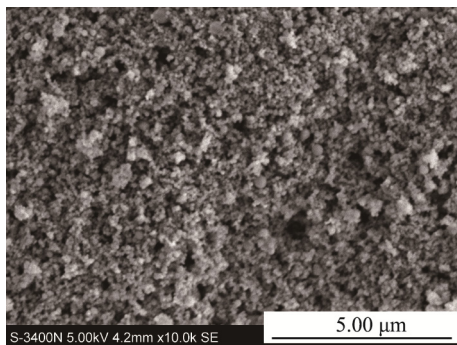
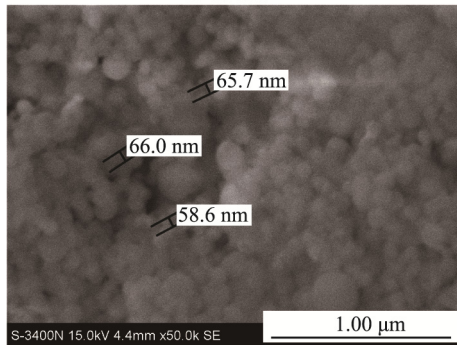


图 4 单个纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 造粒后的形貌
Fig.4 Morphology and particle size of single nano $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ after granulation



a 10 000×



b 50 000×

图 5 纳米 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 团聚颗粒表面的形貌
Fig.5 Surface morphology of nano $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ after granulation

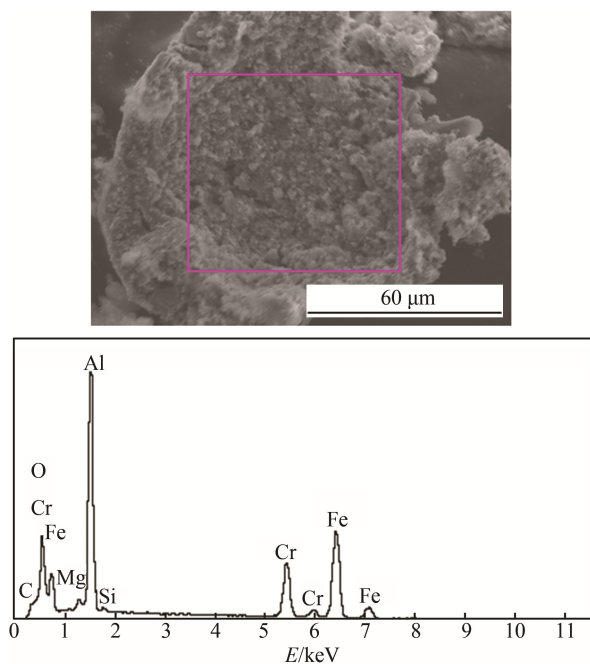


图 6 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 团聚颗粒内部的 EDAX 分析
Fig.6 EDAX analysis of inner nano Fe-Al/Cr₃C₂ particles after granulation

足热喷涂工艺对喷涂材料的形状、粒径以及组分的相关要求,且颗粒内部仍然由纳米粉体组成,符合纳米喷涂材料的相关要求。

3 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层制备结果分析

采用 CP-5000 型高速火焰喷枪对经过造粒的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合团聚颗粒进行喷涂,在结构材料表面制备纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层,并对涂层进行精细结构分析。图 7 为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层及纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的宏观表面形貌,可以看出纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面质量显著高于普通微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面呈灰白色,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表面的颜色呈黑色,主要是由于纳米颗粒较小,已经细到小于可见光波长,对光的吸收率较高,宏观表现即颜色为黑色。上述纳米涂层的光学性能使其有可能成为太阳能的吸收材料以及雷达波的吸收材料。微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表面起伏较大,孔洞较多、较深,涂层表面可见熔滴经撞击后的飞溅情况。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表面较致密,几乎看不见孔洞,也很少看见熔滴撞击产生的飞溅。复合涂层表面元素的面分布(图 8)表明,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表面元素的分布更加均匀,涂层的表面质量更好。较高的涂层表面质量使纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在性能方面高于微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。

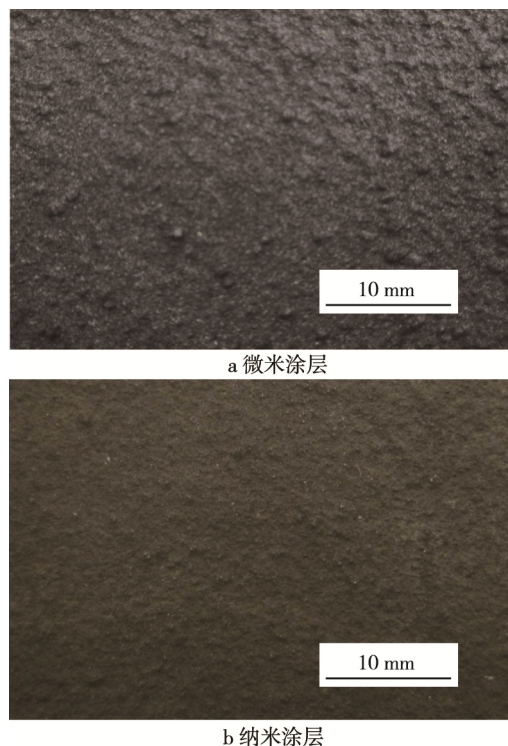


图 7 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面宏观状态
Fig.7 Surface morphology of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings:
(a) micro coating; (b) nano coating

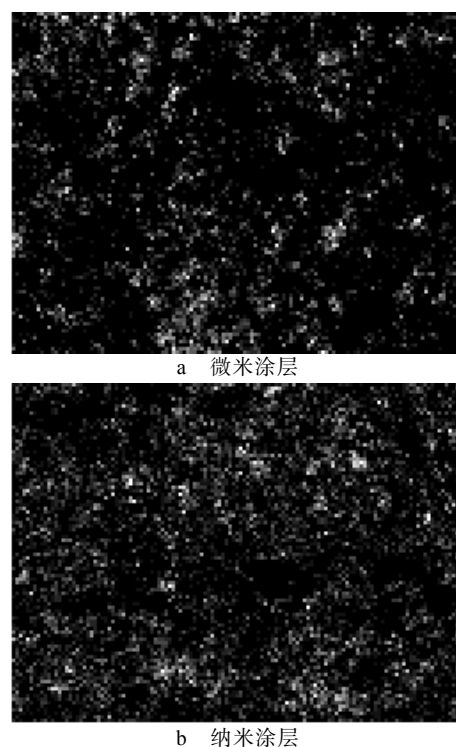


图 8 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面 Cr 元素面分布图
Fig.8 Cr element distribution diagram of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings: (a) micro coating; (b) nano coating

从纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的截面形貌(图 9)可以看出,纳米涂层具有典型的层状结构。涂层层片之间铺展均匀,层片较小。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂

层内部存在细小颗粒,用扫描电镜进行颗粒尺寸测量,发现灰色基质相内部颗粒依然保持纳米颗粒特性。比较微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层可以看出,微米涂层不仅截面中存在孔隙、未熔化颗粒、层与层之间的界面裂纹,表面还存在一些细小的层裂,灰色基质相不存在其他颗粒,产生增强相分布不均匀的现象。对微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层及纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层进行截面线扫描分析,发现涂层与基体之间以及涂层层片间的元素过渡平缓,进一步验证了涂层与基体间良好的结合性能以及层面间的致密性。纳米涂层较薄的层片结构以及基质相内部的纳米颗粒增加了涂层的内聚力,使涂层更难产生层片间的滑动而失效。

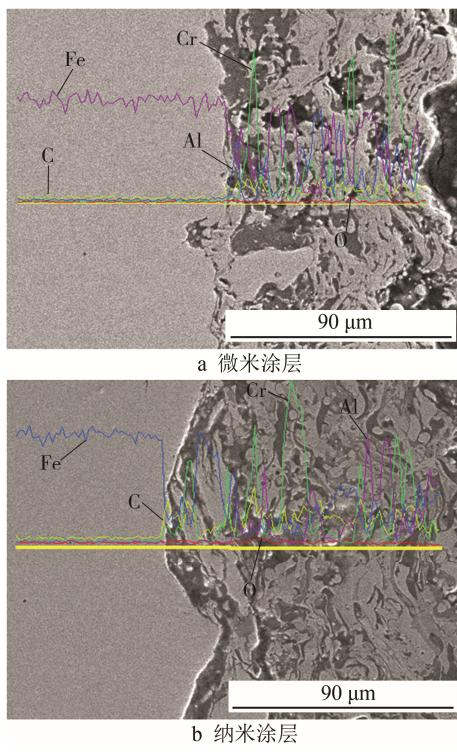


图 9 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的截面线扫描图
Fig.9 Cross-sectional line scan images of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings: (a) micro coating; (b) nano coating

4 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层基本性能测试结果分析

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的孔隙率、硬度以及结合强度的测量结果见表 1。从表 1 可以看出,微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的孔隙率为 2.3%, 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的孔隙率为 0.5%, 后者约为前者的 1/5。微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的维氏硬度为 457HV, 约为 HRC46.0; 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的维氏硬度为 787HV, 约为 HRC63.9。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的洛氏硬度约为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的 1.39 倍。硬度增加的主要原因是纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层中, Cr₃C₂ 的弥散分布更加均匀。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合

涂层的结合强度约为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的 2.43 倍,这是由于纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层粉末在喷涂过程中的表面能显著高于微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层粉末,从而显著降低了涂层与基材表面的 Gibbs 自由能 ΔG_{surf} 值,进而提高了涂层与基材之间的结合强度^[11-18]。

表 1 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的基本性能
Tab.1 Basic properties of nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings

涂层	孔隙率/%	显微硬度 (HV _{0.1})	结合强度/MPa
微米涂层	2.3	457	10.41
纳米涂层	0.5	787	25.23

5 结论

1) 采用自主研发的惰性气体保护纳米造粒系统,成功实施纳米复合粉末的团聚造粒,能够将复合粉末由粒径 50 nm 团聚到粒径为 114~178 μm。团聚后的粉末颗粒呈圆形或椭圆形,各成分比例保持原始比例,团聚颗粒内部颗粒仍然保持纳米颗粒状态,完全满足纳米喷涂材料的相关要求。

2) 采用 CP-5000 型高速火焰喷枪,成功地在结构材料表面制备出纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面质量较好,没有孔洞及裂纹,各元素在涂层表面及界面分布均匀、致密。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层截面的层片较薄,增加了涂层与基体的结合强度。基质相内部均匀分布纳米颗粒,较薄的层片结构以及基质相内部的纳米颗粒增加了涂层的内聚力,使涂层更难产生层片间的滑动而失效。

3) 与普通微米级 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层相比,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的基本性能得到显著提高:孔隙率、硬度和结合强度分别提高 0.25 倍、1.39 倍和 2.43 倍。较高的结合强度拓宽了纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的应用范围,较高的硬度提高了纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的抗磨损性能,较低的孔隙率提高了纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的抗腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 刘晓明,高云鹏,闫侯霞. 载荷和温度对 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 55-61.
LIU Xiao-ming, GAO Yun-peng, YAN Hou-xia. Effects of Load and Temperature on the Frictional Wear Resistance of Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coating [J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 55-61.
- [2] 廖凯,揭晓华,姚远,等. 基于机械合金化及热处理制备 Fe₃Al 金属间化合物粉体材料[J]. 金属热处理, 2015(2): 23-25.
LIAO Kai, JIE Xiao-hua, YAO Yuan, et al. Preparation of Fe₃Al Intermetallic Compound Powder by Mechan-

- ical Alloying and Heat Treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2015(2): 23-25.
- [3] 周丽, 徐振, 薛冰, 等. 高能反应球磨法制备 Fe₃Al/ α -Al₂O₃ 纳米复合粉体[J]. 热加工工艺, 2014, 43(6): 126-127.
ZHOU Li, XU Zhen, XUE Bing, et al. Preparation of Nanocrystalline Fe₃Al/ α -Al₂O₃ Composite Powders by High-energy Reaction Ball Milling[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(6): 126-127.
- [4] KRZYSZTOF K, WOJCIECH J S, MICHAL C, et al. Crystalline Oxalic Acid Aided FeAl Intermetallic Alloy Sintering. Fabrication of Intermetallic Foam with Porosity above 45%[J]. Materials Letters, 2016, 164(1): 32-34.
- [5] FURUSHIMA R, KATOU K, MIKAMI M, et al. Effect of Eta-phase and FeAl Composition on the Mechanical Properties of WC-FeAl Composites[J]. Intermetallics, 2015, 66: 120-126.
- [6] 田宝红. 高速电弧喷涂 Fe₃Al/WC 复合涂层高温冲蚀行为研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2000.
TIAN Bao-hong. High Temperature Wear Behavior of Fe₃Al/WC Composite Coating by High-velocity Arc Spraying[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, 2000.
- [7] 朱子新. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 涂层形成机理及高温磨损特性[D]. 天津: 天津大学, 2002.
ZHU Zi-xin. Formation Mechanism and High Temperature Wear Behavior of Fe-Al/WC Coating by High-velocity Arc Spraying[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [8] 徐维普. 高速电弧喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层研究及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
XU Wei-pu. Research and Application of High-velocity Arc Spraying Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coating[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005.
- [9] 徐润生. 高速火焰喷涂 Fe-15Al/45Cr₃C₂ 复合涂层研究及应用[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2006.
XU Run-sheng. Research and Application of High-velocity Flame Spraying Fe-15Al/45Cr₃C₂ Composite Coating[D]. Beijing: Armored Force Engineering Institute, 2006.
- [10] 刘晓明, 辛勇, 高云鹏. 一种纳米金属复合涂层材料的制备方法和装置: 中国, 201610001871.4[P]. 2016-02-26.
LIU Xiao-ming, XIN Yong, GAO Yun-peng. A Kind of Preparation Method and Equipment for Nano Metal Composite Coating Material: China, 201610001871.4 [P]. 2016-02-26.
- [11] 张秦梁, 梁秀兵, 张志彬, 等. 铝基非晶纳米晶复合涂层的喷涂工艺[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 104-110.
ZHANG Qin-liang, LIANG Xiu-bing, ZHANG Zhi-bin, et al. Spraying Process of Al-based Amorphous and Nanocrystalline Composite Coatings[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 104-110.
- [12] 蒋艳林, 邱长军, 刘赞. CrFeAlTi 复合涂层抗高温氧化及耐铅铋合金腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 84-86.
JIANG Yan-lin, QIU Chang-jun, LIU Zan. High-temperature Oxidation Resistance and Corrosion Resistance of CrFeAlTi Composite Coatings[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 84-86.
- [13] 赵龙志, 焦宇. Al 含量对 Al-Fe-Si/Al 原位复合材料的影响[J]. 材料工程, 2014(4): 7-12.
ZHAO Long-zhi, JIAO Yu. Effect of Aluminum Content on Al-Fe-Si/Al In-situ Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(4): 7-12.
- [14] 冯永宝, 唐传明, 丘泰. Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} 合金的制备、表征及其低频吸波性能[J]. 材料工程, 2014(2): 1-12.
FENG Yong-bao, TANG Chuan-ming, QIU Tai. Preparation, Characterization and Microwave Absorbing Properties of Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} Alloys in the Low Frequency Range[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(2): 1-12.
- [15] 赵龙志, 焦宇, 赵明娟, 等. 保温时间对 Al-Fe-Si/Al 原位复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2014(1): 35-46.
ZHAO Long-zhi, JIAO Yu, ZHAO Ming-juan, et al. Effect of Holding Time on Mechanical Properties of Al-Fe-Si/Al In-situ Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(1): 35-46.
- [16] JINSUB C, HYEONSEOK Y, WOJCIECH J S, et al. Quantitative Fast Fourier Transform Based Arrangement Analysis of Porous Anodic Oxide Formed by Self-organized Anodization of FeAl Intermetallic Alloy[J]. Materials Letters, 2016, 164(1): 176-179.
- [17] KWAK B W, KIM D K, KIM B SU, et al. Effect of FeAl on Mechanical Properties and Consolidation of Nanostructured (W,Ti)C by the High Frequency Induction Heating[J]. Materials Transactions, 2015, 56(11): 1915-1918.
- [18] MASMOUDI M, MHADHBI M, ESCODA L, et al. Microstructural Evolution and Corrosion Behavior of Nanocrystalline FeAl Synthesized by Mechanical Alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 330-335.