

文章编号 1004-924X(2018)09-2245-08

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层及其抗高温腐蚀性能

刘晓明^{1, 2*}, 杨月红¹, 韩吉伟¹, 托 娅¹

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古自治区薄膜与涂层重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 制备纳米金属间化合物 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层并测试其抗腐蚀性能, 为利用热喷涂技术治理火电站易损部件腐蚀问题提供有效手段。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; 运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, 对比测试了微米、纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的抗高温腐蚀性能, 分别采用抛物线型和幂函数型对腐蚀动力学曲线进行拟合。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 复合涂层表面致密、铺展均匀, 截面元素过渡平缓、层片细小; 运用幂函数方程对腐蚀动力学曲线的拟合效果更好。通过对腐蚀动力学拟合方程进行求导运算可推算出各复合涂层的腐蚀速率。团聚后的纳米颗粒满足热喷涂材料的相关要求, 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的抗高温腐蚀性能显著高于微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。纳米 Al、Cr 优先氧化生成具有保护作用的氧化膜机理解释了纳米涂层抗高温腐蚀性能优异的原因。

关键词: 纳米; Fe-Al/Cr₃C₂; 复合涂层; 团聚造粒; 高温腐蚀

中图分类号: TB853.29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2245

High-temperature corrosion resistance property of nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating

LIU Xiao-ming^{1, 2*}, Yang Yue-hong¹, HAN Ji-wei¹, TUO Ya¹

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

2. Inner Mongolia key laboratory of thin film and coatings, Hohhot 010051, China)

* Corresponding author, E-mail: 31535029@qq.com

Abstract: Nano composite coatings of the intermetallic compound Fe-Al/Cr₃C₂ were prepared and their high-temperature corrosion resistance was tested, in order to overcome the corrosion problems of easily corroded parts in power plants by thermal spraying. Using the reunion-granulation system we developed independently, highly active nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite spraying materials successfully underwent reunion-granulation. High-velocity flame spraying was employed to spray the nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating on the structural materials. The high-temperature corrosion resistance of the micro and nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings was tested under the same corrosion conditions. Parabolic and power function curves were used to fit the corrosion kinetic curves. The particle sizes of

收稿日期: 2018-05-15; 修订日期: 2018-07-02.

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司 2018 年第 1 批科技项目资助(No. 201801090)

the Fe-Al/Cr₃C₂ composite spraying materials changed from the nanometer scale to the micrometer scale. Post reunion-granulation, the nano-sprayed particles were spherical or elliptical, the chemical composition of the granulated particles was the same as that of the original, and the inner granulated particles maintained their nanometer sizes. The surface of the nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating was compact, and the spreading is uniform. The element transition of section is smooth and the layer is fine. The power function curves fit the corrosion kinetic equation better. The corrosion rates of the coatings were calculated by deriving the fitted corrosion kinetic equation. The characteristics of the nano-sprayed particles meet the relevant requirements after reunion-granulation. The high-temperature corrosion resistance of the nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating was significantly better than that of the micro coating. The mechanism by which the nano chromium and aluminum are preferentially oxidized and form protective oxide layers explains the excellent high-temperature corrosion resistance of the nano coating.

Key words: nano; Fe-Al/Cr₃C₂; composite coating; reunion-granulation; high-temperature corrosion resistance

1 引言

Fe-Al 有序金属间化合物具有优良的抗氧化、抗硫化性能以及抗多种介质腐蚀性能,同时具有高温强度高、密度低及制造成本低的特点,是一种潜在的理想高温结构材料^[1-5]。Fe-Al 基喷涂材料的性能潜力因其自身的脆性未被充分发掘,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实现 Fe-Al 有序金属间化合物实际应用的发展趋势。

纳米 Fe-Al 基复合涂层的制备存在两方面技术难题。一方面是纳米 Fe-Al 基的粉体材料因为飞扬和烧损问题不能直接用于喷涂,解决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^[6-9]。另一方面是纳米颗粒在热喷涂过程中的烧结长大问题。由于快速的加热和短时间的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,解决方法是采用高速喷涂方法^[10-11]。

金属材料在高温条件下工作时与沉积在工件表面的沉积盐及周围工作气体发生综合作用,Fe、Al 等元素以氧化物形式存在,K、Na 等元素以硫酸盐或硫化物形式存在,进而产生高温腐蚀现象。高温腐蚀对材料的使用寿命影响很大,对高温金属材料部件实施抗高温腐蚀治理是保证火

电站安全稳定运行的技术关键之一^[12-13]。

随着火电站机组容量的增加及煤质的持续下降,传统微米级 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层已经很难满足高温金属材料部件抗腐蚀需求。为了制备纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层以适应抗高温腐蚀新条件下的新要求,采用纳米团聚造粒技术获得纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂材料;采用高速火焰喷涂方法在结构材料表面制备纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层;采用表面涂覆硫酸盐腐蚀增重方法进行微、纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀性能对比;采用先进的分析测试手段对高温腐蚀结果进行分析。进而为纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层大规模工业应用提供理论支持。

2 试验材料及方法

喷涂材料选用自主设计的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂粉体材料。由纳米 Fe 粉、纳米 Al 粉和纳米 Cr₃C₂ 粉参照微米级 Fe-15Al/45Cr₃C₂ 中的 Fe 粉、Al 粉、Cr₃C₂ 粉的最优化比例经团聚造粒组成。

试验的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。用丙酮对试样清洗,除去表面的油污和其它附着物,然后对试样的喷涂面进行喷砂处理。喷砂的工艺为:喷砂气压为 0.7 MPa,喷砂距离为 200~300 mm,喷砂角度为 45°,棕刚玉砂料粒度为 25 目。高速火焰喷涂设备使用 CP-5000 高速火焰喷枪并配

以相应的设备。

高温腐蚀采用加热炉为箱式电炉,采用 CP214 型电子天平对试样进行称重。试验用试样的材质为 20G,试样规格为 25 mm×15 mm×5 mm。喷涂时,试样的 6 个面均需要进行喷涂且涂层的厚度为 0.5 mm。在试验前,在箱式电炉中放入即将进行试验用的白刚玉陶瓷坩埚和自制坩埚架,在 900 ℃ 状态下保温 30 min,目的是去除其中的水分和其它易挥发物质。试验选用的腐蚀介质为摩尔比 7:3 的 Na₂SO₄+K₂SO₄ 饱和水溶液。在试样六个面上分别均匀刷涂,刷涂量达到 2.0~3.0 mg/cm²,然后在高温下烘干后,拿出称重。刷涂、烘干、称重的试件放在坩埚中,连同坩埚架一起放进电阻炉中,在 650 ℃ 下加热并保温,每次保温 20 h 后取出,待冷却后重新称重。重复以上试验过程,累计腐蚀时间 140 h 计算求出单位时间试样腐蚀增重量。

腐蚀增重的数据按公式(1)进行处理^[14-15]:

$$\Delta W_i = [(W_{i+2} - W_i)/A] - [(W_{i+1} - W_i)/A] \times 0.6, \quad (1)$$

式中:W_i为第 i 次腐蚀前试件称重;W_{i+1}为第 i 次涂盐后的称重;W_{i+2}为第 i 次腐蚀后称重;A 为试件的总的表面积;0.6 为扣除盐膜结晶水的系数。

采用 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)观察涂层腐蚀面和截面的形貌。采 GENESIS 型能谱仪分析纳米涂层截面的元素分布,并观察腐蚀前后涂层表面的形貌特征及元素分布。

3 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂材料及涂层制备

3.1 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合喷涂材料制备

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合材料因其颗粒过于细小而不能直接用于喷涂见图 1,需经过团聚造粒制备成尺寸更大的颗粒来进行。经造粒后的 Fe-Al/Cr₃C₂ 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: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。一方面保证粉末喷涂过程熔融充分但不宜烧损,另一方面颗粒具有的一定的质量保证喷涂过程中不产生飞扬现象。

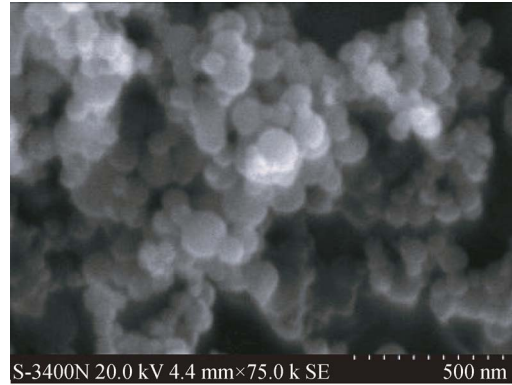


图1 纳米 Al 的微观形貌

Fig. 1 Morphology of nano Al powder

经过造粒后的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 的表面形貌见图 2,从图 2 可以看出,造粒后的纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 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在 114~178 μm,满足喷涂对喷涂材料粒径的需求。



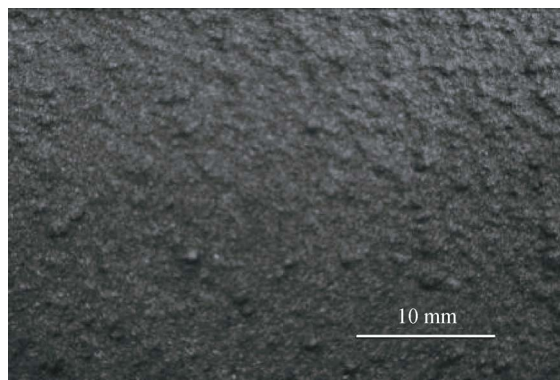
图2 单个纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 造粒后的形貌

Fig. 2 Morphology and diameter of single nano Fe-Al/Cr₃C₂ after granulation

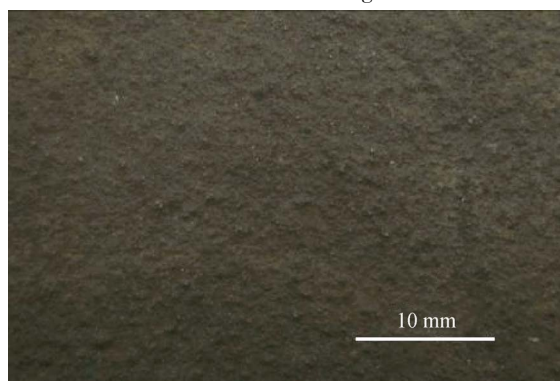
3.2 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层制备

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,在结构材料表面上制备纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层,对涂层进行精细结构分析。图 3 为纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的宏观表面形貌。从图中可以看出,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。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的截面形貌(见图 4)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,根据

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。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。

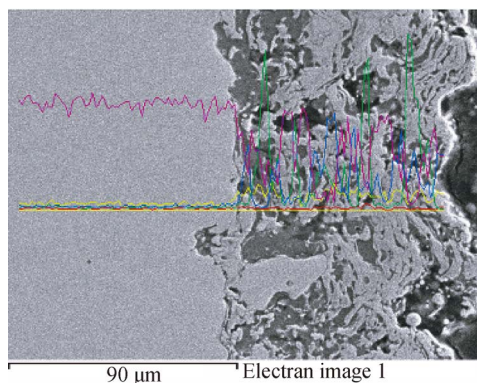


(a)微米涂层
(a)Micro coating

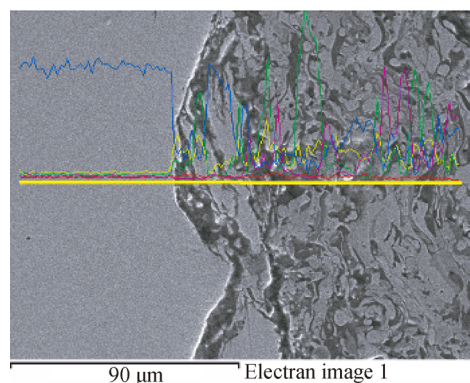


(b)纳米涂层
(b)Nano coating

图 3 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的表面宏观状态
Fig. 3 Surface morphology of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings



(a)微米涂层
(a)Micro coating



(b)纳米涂层

(b)Nano coating

图 4 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的截面线扫描图
Fig. 4 Cross-sectional line scan images of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings

4 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀试验结果

图 5 为 650 °C 时微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层和纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀动力学曲线。从图中可以看出,涂层的腐蚀动力学曲线均呈抛物线规律,微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀动力学曲线较陡,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀动力学曲线较缓。纳米涂层在经过 60 h 的腐蚀后,涂层的腐蚀增重更加缓慢,呈现近似水平趋势。腐蚀动力学曲线随腐蚀时间增加的变化规律反映涂层的抗高温腐蚀性能:曲线随时间的延长增加幅度越缓,抗腐蚀性能越好;曲线随时间延长增加幅度越陡,抗腐蚀性能越差。因此,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀性能显著高于微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层。

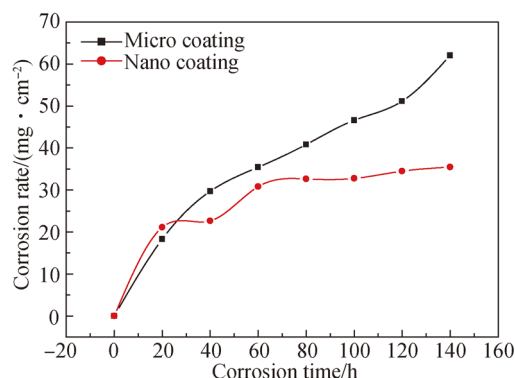


图 5 650 °C 时各涂层的高温腐蚀动力学曲线
Fig. 5 High-temperature corrosion kinetic curves of coatings at 650 °C

5 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀结果分析

腐蚀动力学曲线可方便直观地反应出各涂层在高温腐蚀环境条件下腐蚀产物的增长情况,但是不能直观地反应出腐蚀产物的增长速度以及增长方式。为了能够更加深入地分析纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层的腐蚀速率以及腐蚀产物的增长方式,需要对涂层的腐蚀动力学曲线进行拟合分析并求出每种涂层的腐蚀动力学方程。

以 y 代表腐蚀产物的厚度或单位面积质量的变化量, x 代表腐蚀的时间、 a 代表腐蚀速度常数, b 为常数。金属材料腐蚀速度规律可被描述成直线型、抛物线型、对数型以及立方型 4 种类型的动力学方程。

通过对涂层高温腐蚀的曲线分析,发现曲线的形式与直线型规律、对数型规律以及立方型规律相差比较大,与抛物线型形状比较接近。因此,初步选定纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层的腐蚀动力学曲线进行抛物线型拟合。在实际拟合的过程中发现,另一种幂函数规律(式(2))对曲线的拟合效果更好:

$$y = ax^b (a > 0, 0 < b < 1). \quad (2)$$

涂层的腐蚀动力学曲线的腐蚀动力学方程列于表 1 并比较抛物线型拟合方程和幂函数型拟合方程的标准误差和相关系数。结果表明,幂函数拟合方程与实际值的标准误差均低于抛物线型拟合方程;幂函数拟合方程与实际值的相关系数均高于抛物线型拟合方程。因此,幂函数型拟合方程更适合纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层腐蚀动力学曲线的拟合。

表 1 纳米涂层的腐蚀动力学方程

Fig. 1 Corrosion kinetic equation of nano coatings

涂层	曲线形式	拟合方程	标准误差	相关系数
微米涂层	抛物型	$-8.5672 \times 10^{-6} x^2 + 2.8475 \times 10^{-3} x$	0.015 7	0.982 6
	幂函数型	$0.012 1 x^{0.599 7}$	0.008 0	0.995 5
纳米涂层	抛物型	$-13.2167 \times 10^{-6} x^2 + 2.778 \times 10^{-3} x$	0.016 4	0.947 2
	幂函数型	$0.035 6 x^{0.284 4}$	0.006 6	0.991 5

幂函数 $y = ax^b$ 拟合纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层腐蚀动力学曲线后各参量的物理意义:

自变量 x 为腐蚀时间,因变量 y 为腐蚀增重。腐蚀增重 y 对腐蚀时间 x 求导即可得出腐蚀增重速率方程,按照腐蚀速率方程绘制的曲线见图 6。

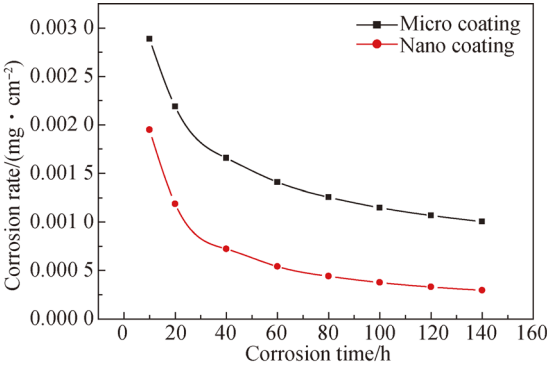
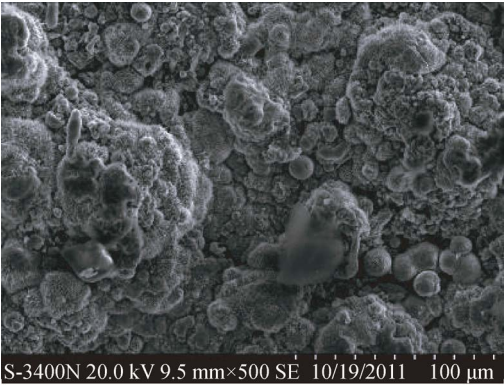


图 6 涂层动力学曲线拟合方程的腐蚀速率

Fig. 6 Corrosion velocity rate of fitting corrosion kinetic equation of coatings

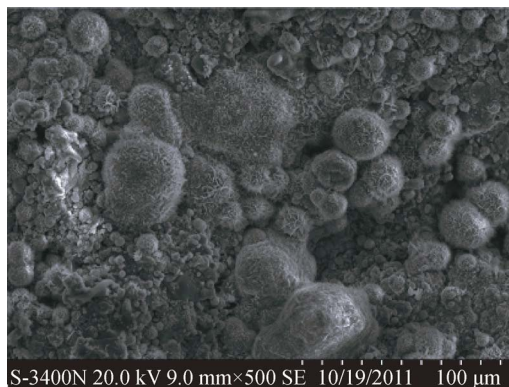
从图 6 中可以看出,复合涂层的腐蚀速率随时间的增加而下降,可见复合涂层都能够起到保护基体的效果。比较而言,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 系列复合涂层的腐蚀速率更低。以腐蚀时间 140 h 为例,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀速率分别是微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的 0.295 倍。如果假定微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀速率为 100%,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀速率为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的 29.5%。

图 7 为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层和微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在 650 ℃、腐蚀时间 140 h 时的表面形貌照片。为了最大限度保持腐蚀表面的原始形貌及腐蚀产物成分,未对腐蚀试样进行清洗。从图 7 中可以看出,涂层表面在腐蚀过程中生成了大量凸起的氧化物。



(a)微米涂层

(a)Micro coating

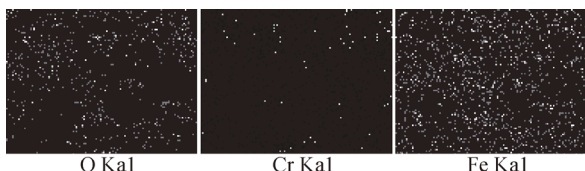
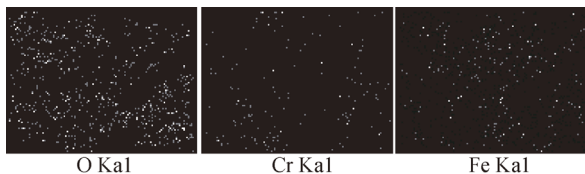


(b) 纳米涂层

(b) Nano coating

图 7 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层腐蚀后的表面 SEM 照片Fig. 7 Surface morphology of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings after corrosion

结合图 8、图 9 涂层表面的 EDS 分析表明,在被腐蚀的涂层表面,明亮发光的表面致密处为腐蚀过程中生成的铬的氧化物,而其它区域主要为铁的氧化物。比较而言,微米涂层表面 Fe 的氧化物所占比例更大,纳米涂层 Cr 的氧化物所占比例更大,即纳米涂层表面 Cr₂O₃ 氧化膜更加致密,对内部的保护效果更好。

图 8 微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层腐蚀后的表面 EDSFig. 8 EDS of micron Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings after corrosion图 9 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层腐蚀后的表面 EDSFig. 9 EDS of nanometer Fe-Al/Cr₃C₂ composite coatings after corrosion

6 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀机理讨论

计算纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层各组元氧化

后生成氧化物的 Gibbs 自由能。根据计算结果, 650 °C 时 Fe、Al 以及 Cr 元素氧化物的生成 Gibbs 自由能由低到高顺序为: $\Delta G_{\text{Al}_2\text{O}_3} < \Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3} < \Delta G_{\text{Fe}_2\text{O}_3} < \Delta G_{\text{Fe}_3\text{O}_4} < \Delta G_{\text{FeO}} < 0$ 。可见, 纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层氧化膜在 650 °C 温度下具备了热力学生成条件。Al、Cr 元素的氧化反应 Gibbs 自由能变化最低, 这是 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 生成的前提条件。Al 和 Cr 元素的氧化反应 Gibbs 自由能变化均小于 Fe 的氧化反应 Gibbs 自由能变化, 这为 Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 氧化物对 Fe 基体的保护提供了可能。一方面, Al 和 Cr 元素与 Fe 元素共存时, Al 和 Cr 元素要优先氧化, 使 Fe 元素免受腐蚀, 保护了 Fe 基体, 另一方面, 即使 Fe 元素部分被氧化生成氧化物, 由于 Cr 和 Al 元素的存在也变得不稳定, 氧化过程中要不断被分解还原出 Fe 元素, 保持了基体 Fe 成分含量。生成致密的膜可以阻止高温腐蚀的进行。当致密的氧化膜在金属表面形成时, 氧化膜把反应物质与金属基体隔离开来, 阻止腐蚀介质的进一步深入, 从而增强了涂层的抗腐蚀性能。

Al₂O₃ 与 Cr₂O₃ 氧化膜的生长过程中, 既有 Al、Cr 元素的向外扩散又有 O 元素的向内扩散且晶界扩散起了很大作用, 新的氧化物通常在晶界处生成。此外, 外层 O 的高浓度促使 Al、Cr 向外扩散作用更大大, 致使新的氧化物通常形成在氧化膜内靠涂层的外表面生长, 从而形成更加均匀完整、保护性更好的氧化膜。

纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层中, 喷涂粉末内部由纳米颗粒组成, 颗粒极细。与微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层相比, 进一步缩小了颗粒之间的距离, 增加了颗粒的表面积, 使得包括晶界在内的界面数量显著增加。因此, 纳米 Al、纳米 Cr 元素从涂层内部扩散到涂层表面的速度明显加快。文献[4-5]中亦证实了晶粒细化可使组元的扩散以晶界扩散为主, 从而降低了活泼组元发生选择性氧化的浓度。纳米 Al、纳米 Cr 元素的含量随纳米粉体加入量的增加而不断增加, 相同腐蚀条件下, Al₂O₃ 与 Cr₂O₃ 氧化物保护膜的形成厚度以及形成速度随着纳米加入量的增加而增加, 因此, Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的高温腐蚀性能随纳米加入量的增加而提高。

7 结 论

采用自主研发地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。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。采用 CP-5000 型高速火焰喷枪,成功在结构材料表面制备出纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层。纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表面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

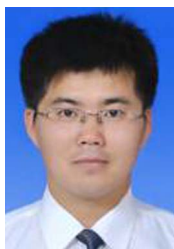
质相内部的纳米颗粒增加了涂层的内聚力,使涂层更难产生层片间的滑动而失效。与微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层相比,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有较高的抗高温腐蚀性能。运用幂函数方程对腐蚀动力学曲线的拟合效果更好。通过对腐蚀动力学拟合方程进行求导运算可推算出各复合涂层的腐蚀速率。以腐蚀时间 140 h 为例,纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀速率为微米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的 29.5%。根据纳米 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的腐蚀动力学测试结果,从热力学的角度出发对纳米涂层的高温腐蚀机理进行讨论。结果表明,纳米 Al、Cr 优先氧化生成具有保护作用的氧化膜机理解释了纳米涂层抗高温腐蚀性能优异的原因。

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 X M, GAO Y P, YAN H X. Effects of load and temperature on the frictional wear resistance of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating [J]. *Surface Technology*, 2016, 45(11): 55-61. (in Chinese)
- [2] 刘晓明,高云鹏,闫侯霞,等. 3 种表面技术在轴磨损修复中的应用研究综述[J]. 表面技术,2015,44(8):103-109,125.
LIU X M, GAO Y P, YAN H X, *et al.*. Application research review on three kinds of surface technology in repairing of worn-out axles [J]. *Surface Technology*, 2015, 44(8): 103-109, 125. (in Chinese)
- [3] 范建文,梁秀兵,张志彬,等. AlNiZr 基非晶纳米晶复合涂层组织与性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2017(3): 94-99,110.
FAN J W, LIANG X B, ZHANG ZH B, *et al.*. Investigations on microstructure and property of AlNiZr-based amorphous and nanocrystalline composite coating [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2017(3): 94-99, 110. (in Chinese)
- [4] 丁翔,程旭东,丁彰雄,等. 超音速火焰喷涂微纳米 WC-CoCr 涂层的性能与空蚀行为 [J]. 中国有色金属学报,2017(8): 1679-1686.
DING X, CHENG X D, DING ZH X, *et al.*. Properties and cavitation erosion behavior of micro-nano WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017(8): 1679-1686. (in Chinese)
- [5] 周羊羊,王海斗,马国政,等. 等离子喷涂纳米粉体制备技术及涂层性能研究现状[J]. 功能材料,2016(z1):23-30.
ZHOU Y Y, WANG H D, MA G ZH, *et al.*. The research status of plasma spraying nano powder preparation technology and coating properties [J]. *Journal of Functional Materials*, 2016(z1): 23-30. (in Chinese)
- [6] 刘晓明,董俊慧,韩吉伟. 纳米 Fe-AlCr₃C₂ 复合涂层的制备及性能研究[J]. 表面技术,2018,47(1): 224-229.
LIU X M, DONG J H, HAN J W. Fabrication and properties of nano Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 224-229. (in Chinese)
- [7] 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[P]. 申请号:201610001871.4, 2016-02-26.
LIU X M, XIN Y, GAO Y P. A kind of preparation method and equipment for nano metal composite coating material [P]. *Application Number*: 201610001871.4, 2016-02-26. (in Chinese)
- [8] 何庆兵,李忠盛,吴护林,等. 等离子喷涂 ZrO₂ 基纳米涂层研究进展[J]. 兵器装备工程学报,2016(11):128-132.
HE Q B, LI ZH SH, WU H L, *et al.*. Research

- progress of plasma sprayed ZrO_2 -based nano-coatings [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016(11):128-132. (in Chinese)
- [9] 于鹤龙, 张伟, 王红美, 等. 火焰喷涂 NiCrBSi 涂层的纳米力学性能[J]. *材料工程*, 2018(2): 78-83.
YU H L, ZHANG W, WANG H M, *et al.*. Nano mechanical properties of flame sprayed NiCrBSi coating [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018(2): 78-83. (in Chinese)
- [10] LASKA N, BRAUN R. Oxidation and fatigue behaviour of gamma titanium aluminides coated with yttrium or zirconium containing intermetallic Ti-Al-Cr layers and thermal barrier coating [J]. *Materials at High Temperatures*, 2015, 1/2 (1/2): 221-229.
- [11] CHENG J B, LIANG X B, XU B SH, *et al.*. Microstructure and wear behavior of FeBSiNbCr metallic glass coatings [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2009(5): 687-690.
- [12] YAZDANI A, ISFAHANI T. A facile method for fabrication of nano-structured Ni/ Al_2O_3 graded coatings: Structural characterization [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, (1): 77-87.
- [13] 田浩亮, 王长亮, 汤智慧, 等. 高速电弧喷涂 FeNi-CrAl 涂层制备工艺对涂层性能影响[J]. *航空材料学报*, 2016(6): 40-47.
TIAN H L, WANG CH L, TANG ZH H, *et al.*. Effect of high velocity arc spraying parameters on properties of FeNiCrAl coating [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016(6): 40-47. (in Chinese)
- [14] WANG Y, LIU Y, LIU S Y, *et al.*. From nanoparticles to nano-structured thermal spray coatings [J]. *DVS-Berichte*, 2016, (TN. 324): 663-669.
- [15] BABU P, SURESH R D, SRINIVASA K L. Weibull analysis of hardness distribution in detonation sprayed nano-structured WC-12Co coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 319: 394-402.

作者简介:



刘晓明(1978—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,高级工程师,2004年、2012年于内蒙古工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事电力系统微/纳米涂层材料的研发、涂层制备及应用的研究。
E-mail: 31535029@qq.com



杨月红(1971—),女,内蒙古巴彦淖尔人,本科,高级工程师,2000年于华北电力大学获得学士学位,主要从事电力设备材料检测及监造的研究。E-mail: 1246970143@qq.com