

高 Cr 含量镍基合金涂层的电弧喷涂制备及其抗氧化性能研究

赵雅萱, 王少刚, 叶庆丰, 陈源, 赵礼

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: **目的** 提高高温环境下电厂设备及构件的抗高温氧化性能。**方法** 采用电弧喷涂工艺在 Q345 钢表面制备高 Cr 含量镍基合金涂层, 对涂层在 750 °C 条件下的抗氧化行为与氧化机理进行了研究, 并与未喷涂涂层的 Q345 钢基体的氧化行为进行了对比分析。**结果** 750 °C 高温循环氧化增重试验表明, 涂层试样的氧化动力学曲线呈抛物线型, 经过非线性拟合, 符合抛物线方程 $\Delta W=2.51t^{0.22}$, 而无涂层基体试样的氧化动力学曲线趋于直线式增长。对氧化前后的涂层试样进行扫描电镜和 X 射线衍射分析显示, 高温下涂层表面生成了连续的 Cr_2O_3 、 NiO 等氧化物以及具有尖晶石结构的 NiCr_2O_4 , 这些相均匀致密地分布在涂层中, 能够有效地阻碍氧原子侵入基体, 抑制氧化过程的持续进行。**结论** 采用电弧喷涂方法在 Q345 钢表面制备的高 Cr 含量镍基合金涂层, 在高温下表现出良好的抗氧化性能, 可有效提高 Q345 钢制构件的使用温度和工作寿命。

关键词: 高 Cr 镍基合金; 电弧喷涂; Q345 钢; 抗氧化性能; 微观结构

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0021-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.004

Preparation and Oxidation Resistance of Ni-based Alloy Coating with High Cr Content by Electric Arc Spraying

ZHAO Ya-xuan, WANG Shao-gang, YE Qing-feng, CHEN Yuan, ZHAO Li

(School of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: The work aims to improve high temperature oxidation resistance of power plant equipment and components in high temperature environment. Ni-based alloy coatings with high Cr content were prepared on steel Q345 by adopting arc spraying. Anti-oxidation behavior and oxidation mechanism of the coatings at 750 °C were investigated, and comparative analysis was carried out to oxidation behavior of steel Q345 substrate without coating. Cyclic oxidation weight increase test at 750 °C showed that, oxidation kinetic curve of the coated sample presented a parabola style, the curve conformed to the parabolic equation $\Delta W=2.51t^{0.22}$ through nonlinear fitting, while the oxidation kinetic curve of uncoated substrate tended grow linearly. The coated samples before and after oxidation were analyzed with SEM and XRD. Continuous constituent phases including oxides Cr_2O_3 and NiO as well as NiCr_2O_4 with spinel structure formed on the surface of coatings at high temperature. These phases

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-10-02

Received: 2017-08-17; **Revised:** 2017-10-02

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

Fund: Supported by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

作者简介: 赵雅萱 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料制备及表面工程。

Biography: ZHAO Ya-xuan(1994—), Female, Master, Research focus: metal material preparation and surface engineering.

通讯作者: 王少刚 (1966—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进材料的连接及金属材料工程。

Corresponding author: WANG Shao-gang(1966—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: joining of advanced materials, metal material engineering.

were uniformly and densely distributed in the coatings, which could effectively prevent oxygen atoms from invading the substrate and inhibit the continuous oxidation process. The Ni-based alloy coatings with high Cr content prepared on steel Q345 by arc spraying exhibits good oxidation resistance at high temperature, which can greatly improve service temperature and service life of steel Q345 components.

KEY WORDS: Ni-based alloy with high Cr content; electric arc spraying; steel Q345; oxidation resistance; microstructure

采用普通钢制造的设备（例如电站锅炉）在高温环境下工作时，构件表面暴露在空气中，容易氧化生成硬、脆且结构疏松的氧化物，因此在工作过程中，构件表面层会发生脱落，甚至造成断裂，导致设备不能正常工作，缩短其使用寿命^[1]。工业设备的早期失效，可能造成巨大的经济损失和严重的环境污染^[2]。目前，火电厂中的锅炉设备“四管”（水冷壁管、过热器管、再热器管和省煤器管）发生的漏泄事故，已成为火力发电机组各类非计划停运的主要原因^[3]。此外，一些冶炼设备及造纸厂中的黑液锅炉的金属内外壁也经常由于受到高温作用而损坏，严重影响设备的正常运行，同时带来很大的安全隐患^[4-5]。因此，如何提高设备在高温条件下的使用性能，延长设备的使用寿命，一直成为材料工作者关注的重点。如果将此类设备全部采用耐高温合金制造，将涉及到材料的机械加工性能、力学性能、耐高温腐蚀性能和经济性等，有时难以同时满足结构部件对材料综合性能的要求^[6]。

在工业生产中，为了满足设备零部件对材料抗高温氧化性能的要求，同时降低产品的成本，在普通钢基体表面施加适当的高温防护涂层是一种有效途径^[7]。针对锅炉管道防护，目前国内外使用的涂层材料种类较多，常用的有 FeCrAl、NiCr、NiCrTi（45CT）等。虽然 Tafaloy 45CT 涂层的抗氧化和耐腐蚀性能可满足使用要求，但其主要依赖进口，价格较昂贵，导致生产成本较高。因此通过优化成分设计，自主研发开发能够满足耐高温氧化性能要求的涂层材料，将可全面代替进口，大大降低零部件的生产成本，提高产品的市场竞争力。Q345 钢是电站锅炉、压力容器和工业管道中使用的一种常用材料，利用电弧喷涂工艺在普通钢表面制备具有抗高温氧化和耐腐蚀性能的

合金涂层，可以满足工程结构对材料的使用性能要求，大大延长零部件的工作寿命。基于此，本文采用电弧喷涂工艺，在 Q345 钢表面喷涂一层耐高温氧化的镍基合金涂层，并对涂层试样与无涂层基体材料的高温抗氧化性能进行对比分析，以期为该合金涂层在实际生产中的应用提供理论指导和技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本文的喷涂材料为自行设计制备的高 Cr 含量镍基合金丝材，该喷涂丝材是以 Cr、Ti、Al 和 Nb 为主要合金元素的沉淀强化型镍基合金，直径 $\phi 2$ mm，其化学成分见表 1。与 Tafaloy 45CT 涂层材料相比，两者的化学成分相似，该高 Cr 含量镍基合金丝材通过优化成分设计，加入了多种沉淀强化合金元素，力学性能与耐高温腐蚀性能更加优异。基体材料为电站锅炉管道与部件高温受热面常用材料 Q345 钢，它的极限工作温度为 450 ℃，材料厚度为 4 mm，化学成分见表 2。

1.2 涂层制备

采用电弧喷涂工艺在 Q345 钢表面制备耐高温合金涂层，喷涂设备为 QD8-D-400 型电弧喷涂枪。喷涂前，对 Q345 钢基体试样表面进行预处理，以去除其表面锈蚀物。随后进行喷砂处理，使基体露出新鲜清洁的活性表面，产生净化、粗化、活化效果，喷砂材料选用白刚玉，喷砂角度为 80°。随后，在 Q345 钢基体表面进行双面喷涂，制备出厚度约为 300 μm 的喷涂层。经过优化的电弧喷涂工艺参数见表 3。

表 1 高 Cr 含量镍基合金喷涂丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Ni-based alloy spraying wire with high Cr content

										wt%
4	Ti	Nb	Al	C	Fe	Mn	S	P	Ni	
42~47	0.3~1.5	1.0~3.0	3.0~5.0	≤0.01	≤0.5	≤0.2	≤0.015	≤0.02	Bal.	

表 2 Q345 钢的化学成分

Tab.2 Chemical composition of steel Q345

										wt%
Cu	Cr	Ni	Ti	V	P	S	C	Nb	Mn	Fe
≤0.30	≤0.30	≤0.50	≤0.20	≤0.15	0.025~0.035	0.020~0.035	≤0.20	≤0.07	≤1.70	Bal.

表 3 电弧喷涂工艺参数
Tab.3 Process parameters of arc spraying

Wire feed rate/(m·min ⁻¹)	Spraying voltage/V	Spraying current/A	Air pressure/MPa	Spraying angle/(°)	Spraying distance/mm
7	38	230	0.5	90	150

1.3 性能测试及分析

喷涂后，对涂层试样和基体进行取样。采用线切割方法把喷涂试样切割成若干尺寸为 10 mm×10 mm 的氧化试样，涂层表面不进行任何加工及处理。试样用丙酮进行超声波清洗后，在烘箱中烘干，保证其质量在常温下恒定。采用单位面积上涂层的氧化增重来衡量涂层的抗高温氧化性能。将试样和焙烧至恒重的坩埚一起放入 SXL-1200 型可编程全自动升温电炉中进行 60 h 的高温循环氧化实验，氧化温度为 750 ℃。

考虑到实际应用，氧化实验的温度根据锅炉“四管”的工作温度进行选择。正常工作时，“四管”外壁温度约为 500 ℃，锅炉运行时，若出现较严重的结渣现象或传热情况恶化，其受热面温度会超过 550 ℃，甚至可能高达 600 ℃以上。考虑到零部件工作时的温度裕量以及更广泛的工程应用，将抗氧化实验温度确定为 750 ℃，可模拟实际工作环境下的加速氧化情况。氧化实验时，每氧化 10 h 取出试样，用精确到 0.1 mg 的电子天平进行称量，计算其增重，直至氧化 60 h 为止。根据实验数据绘制高温氧化动力学曲线。采用 Quanta 650 型扫描电镜、D8 Advance 型 X 射线衍射仪、MM6 型金相显微镜，对涂层的表面与截面形貌、相结构组成进行分析，利用扫描电镜自带的能谱仪分析涂层中所形成的氧化物的化学成分，分析探讨试验条件下涂层的高温抗氧化行为与氧化机理。

2 结果及分析

2.1 高温氧化动力学曲线

图 1 为 Q345 钢涂层试样和基体试样分别在 750 ℃下氧化 0~60 h 的氧化增重曲线（考虑到 Q345 钢的抗氧化性较差，故 Q345 钢基体的氧化曲线只给出氧化至 30 h 的部分）。从图 1 可以看出，无涂层的基体试样氧化增重较快，随着氧化时间的延长呈不断增加的趋势，近似直线式上升；涂层试样的氧化速度在氧化初期相对较快，氧化后期趋于平缓。分析认为，氧化初期为氧化物的形成阶段，而氧化一定时间后的氧化物生长完成，氧化速率降低。通过对比分析可以看出，无涂层基体试样的氧化增重远高于涂层试样，说明在 Q345 钢表面喷涂合金涂层可明显提高基体的抗氧化性能，对于抑制 Q345 钢的高温氧化行为具有显著效果。

金属的氧化动力学规律可以用数学模型 $\Delta W=at^b$

来表征^[8]，其中， ΔW 表示单位时间内单位面积上的试样增重（mg）， t 表示氧化时间（h）， a 、 b 为系数。根据上述模型对实验数据进行非线性拟合，得到 Q345 钢涂层试样的氧化动力学方程为 $\Delta W=2.51t^{0.22}$ ，其相关系数为 0.99。可以看出，曲线非常接近于抛物线，且拟合度较高，说明在 Q345 钢表面喷涂涂层可明显改善基体的高温抗氧化性能。对上述氧化动力学方程进行求导，可以计算出其氧化速率 $v=0.55t^{-0.78}$ ，其中 v 单位 mg/h， t 表示氧化时间（h），可见氧化速率相对较低。这说明涂层在高温下生成的氧化物可在很大程度上抑制氧化过程的持续进行。

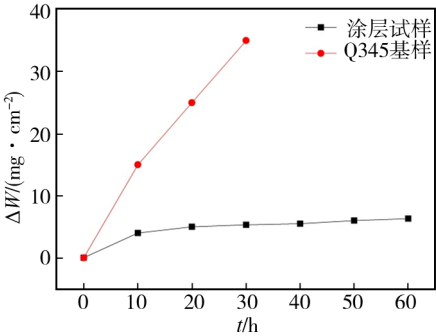


图 1 涂层试样与 Q345 钢基体试样的氧化动力学曲线
Fig.1 Oxidation kinetic curves of coating samples and Q345 substrate sample

2.2 涂层形貌及其氧化产物分析

图 2 为试样氧化前后的截面金相照片。喷涂的工艺过程决定了涂层的结构和质量，通常情况下，电弧喷涂涂层中会存在一些微小孔隙^[9]。从图 2a—c 可以看出，涂层分布均匀，呈扁平波浪式层状结构，可清晰地观察到基体与涂层之间结合致密。这是由于机械热镶嵌和微冶金结合共同作用，使涂层与基体之间的结合良好。喷涂过程中，由于涂层是撞扁的微粒互相镶嵌和积叠淬冷后形成的，涂层与基体之间呈冶金结合。图 2d 中，无涂层基体试样经 60 h 氧化后，大部分被氧化，出现了许多大小不一的孔隙，此时材料的高温性能已大幅下降，可能成为引发缺陷的起源。而图 2c 所示基体材料内部基本上没有被氧化，保持了基体材料本身的性能，说明涂层对基体起到了较好的保护作用。

图 3a 和图 3b 分别为未经氧化的涂层试样表面低倍、高倍扫描电镜照片。喷涂时，涂层材料在空气压力作用下，大多数粒子呈扁平状覆盖在基体表面，小部分粒子呈半熔融颗粒状分布^[10]。从图 3a—b 可以看出，涂层组织结构致密，无明显缺陷，说明所采用的

涂层制备工艺可行。图 3c 和图 3d 分别为无涂层的 Q345 钢基体经过 60 h 高温氧化后的表面低倍、高倍扫描电镜照片。从图 3c 中可以明显看出, 涂层表面产生了较严重的层片状剥落, 表面存在孔洞。从图 3d 中可以看出, 涂层表面产生了明显的裂纹, 表面产物呈疏松多孔状, 这是由于高温作用使试样内部产

生应力, 导致应力集中而产生了裂纹等缺陷。图 3e 和图 3f 分别为涂层试样经过 60 h 高温氧化后的表面低倍、高倍扫描电镜照片。从图 3e—f 中可以看出, 与无涂层基体试样相比, 涂层试样经过 60 h 氧化后, 表面仍保持喷涂后形成的平滑表面, 并伴有来不及扁平化的半熔融状颗粒^[11]。

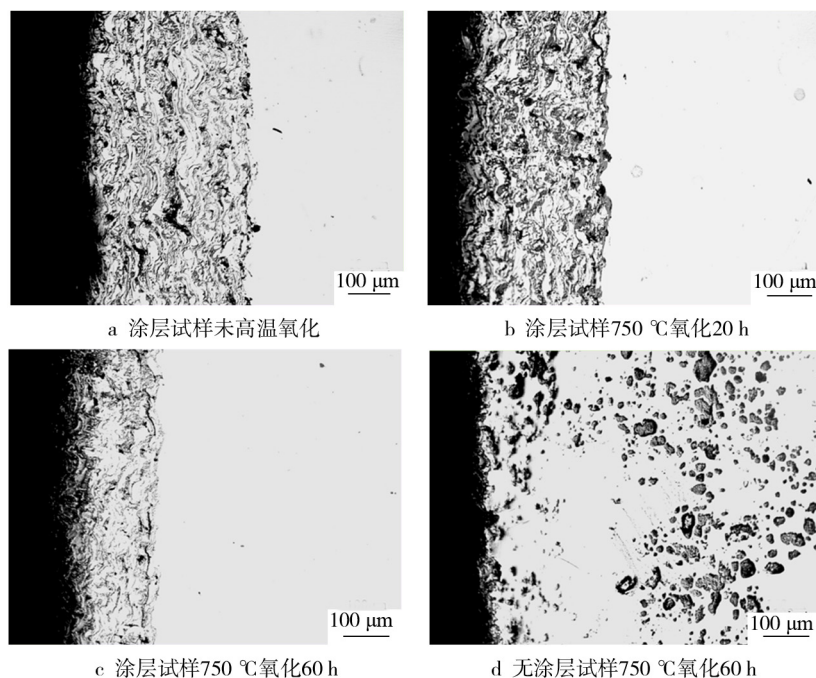


图 2 涂层试样与基体试样氧化前后的截面金相照片

Fig.2 Cross sectional metallographic images of coating samples and substrate sample before and after oxidation: (a) coated, no high-temperature oxidation; (b) coated, 750 °C, 20 h; (c) coated, 750 °C, 60 h; (d) uncoated, 750 °C, 60 h

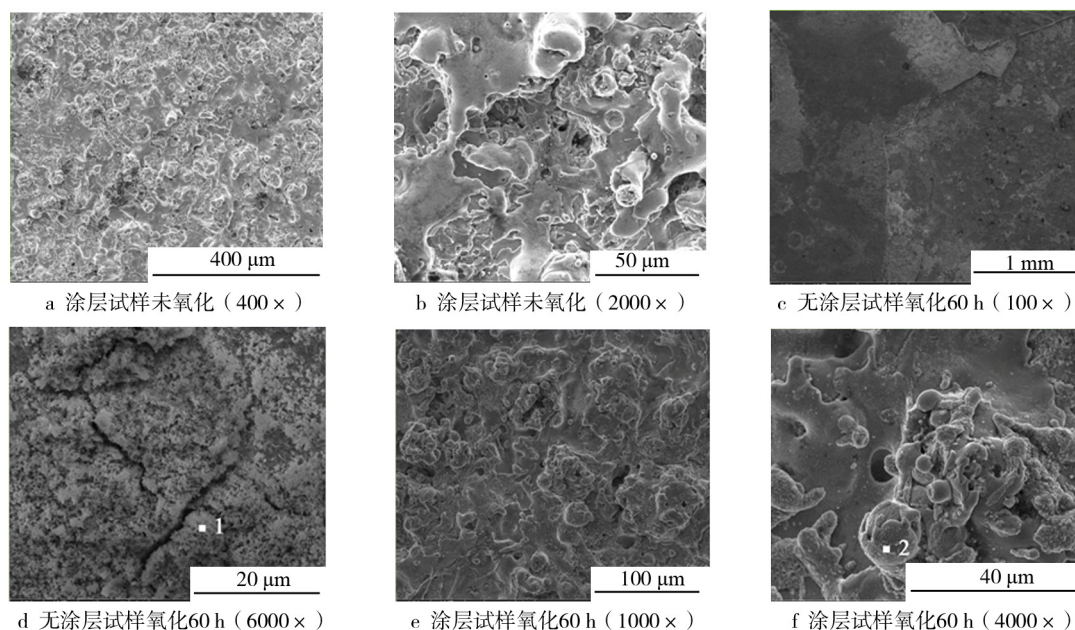


图 3 涂层试样与基体氧化前后的表面电镜照片

Fig.3 SEM images of surface morphology for coating and substrate before and after oxidation: (a) coated, no oxidation (400×); (b) coated, no oxidation (2000×); (c) uncoated, oxidation 60 h (100×); (d) uncoated, oxidation 60 h (6000×); (e) coated, oxidation 60 h (1000×); (f) coated, oxidation 60 h (4000×)

进一步对无涂层的 Q345 钢基体经过 60 h 高温氧化后（图 3c、d）的表面成分进行分析，采用 EDS 能谱分析测量涂层多个位置的元素含量，发现均只含有 O 元素和 Fe 元素。选取图 3d 中的位置 1，测得其能谱图和化学成分分别如图 4 和表 4 所示。结果显示，表面生成了脆而硬的含 Fe 氧化物，依据喷涂焊丝和基体的化学成分，初步推断应为 Fe_2O_3 。该氧化物呈疏松多孔状^[12]，在高温作用下基体表面发生开裂、剥落，不能有效抵御氧原子对基体内部的侵入。随着氧化时间的延长，Q345 钢持续被氧化，说明 Q345 钢的抗高温氧化性能不佳。

进一步观察分析涂层试样经过 60 h 高温氧化后

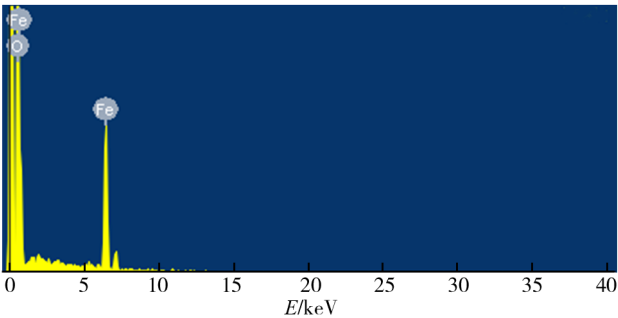
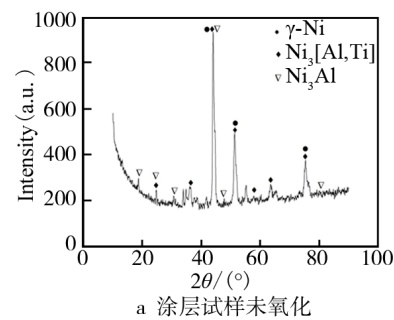


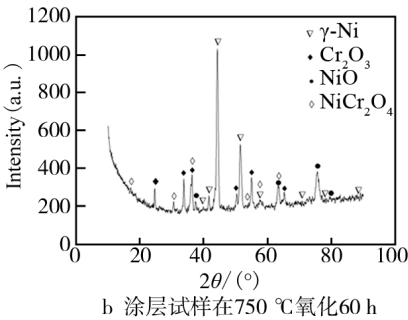
图 4 图 3d 中位置 1 的能谱图
Fig.4 Energy spectrum of point 1 in Fig.3d

表 4 图 3d 中位置 1 的化学成分
Tab.4 Chemical composition of point 1 in Fig.3d

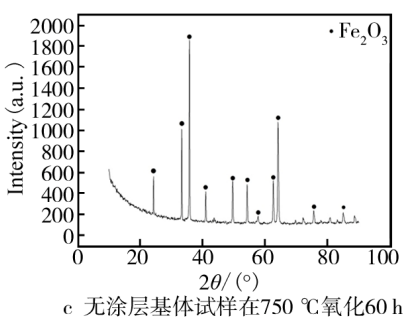
Element	wt%	at%
O K	37.78	67.95
Fe K	62.22	32.05
Total	100.00	100.00



a 涂层试样未氧化



b 涂层试样在 750 °C 氧化 60 h



c 无涂层基体试样在 750 °C 氧化 60 h

图 6 涂层试样与基体试样的 XRD 分析图谱

Fig.6 XRD spectra of specimens for coating and substrate: (a) coated, no oxidation; (b) coated, 750 °C, 60 h; (c) uncoated, 750 °C, 60 h

由图 6a 可知，未氧化时，涂层相结构组成主要以 γ -Ni 固溶体为主，并且含有共格结构的 γ' 相 $\text{Ni}_3[\text{Al,Ti}]$ ，具有析出强化作用。此外，还检测到了 Ni_3Al 等金属间化合物，可起到晶界强化和弥散强化的作用。由图 6b 可知，涂层试样经过 60 h 氧化后，在表面生成了 Cr_2O_3 、 NiO 、 NiCr_2O_4 等氧化物。通常，

（图 3e、f）的表面成分，涂层表面生成了尖晶石状的氧化物。对图 3f 中的位置 2 进行能谱分析，结果如图 5 和表 5 所示，可以看出该点含有 Ni 和大量的 Cr 元素，推测形成了以 Ni、Cr 元素为主的氧化物。

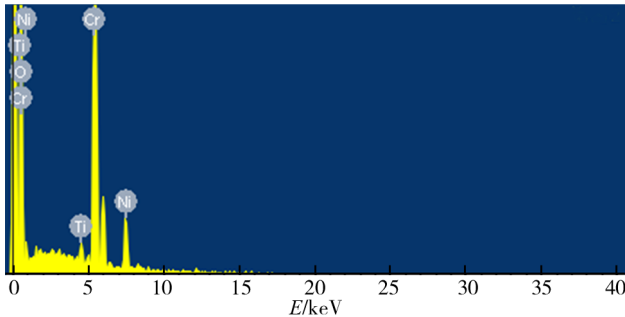


图 5 图 3f 中位置 2 的能谱图
Fig.5 Energy spectrum of point 2 in Fig.3f

表 5 图 3f 中位置 2 的化学成分
Tab.5 Chemical composition of point 2 in Fig.3f

Element	wt%	at%
O K	32.92	61.87
Ti K	1.43	0.90
Cr K	54.66	31.60
Ni K	10.99	5.63
Total	100.00	100.00

2.3 涂层相结构分析

图 6 为涂层试样与 Q345 钢基体试样的 X 射线衍射分析图谱，据此了解涂层试样经高温氧化后氧化物的生成情况，并与无涂层基体试样氧化后的相结构组成进行对比。

Cr 含量较低的合金涂层（ $<30\%\text{Cr}$ ）在氧化初期尚且能够抵御氧原子的侵入，但随着氧化时间的延长，氧化物的析出将使合金表面的 Cr 元素贫化，导致抗氧化效果降低。当涂层中的 Cr 质量分数高于 40% 时，在高温条件下能够形成连续分布的 Cr_2O_3 ，起到提高抗高温氧化性的目的。这也是本文使用的喷涂焊丝

Cr 含量较高 (42%~47%) 的主要原因。此外,形成的 NiCr_2O_4 相晶粒细小且结构致密,与 Cr_2O_3 都是能够抵御氧原子侵入的主要氧化物^[13-14]。Ni 和 Cr 的氧化物是通过阳离子向外扩散而形成的,尽管 Cr 比 Ni 活泼,但 Ni 的扩散速度大于 Cr,所以优先生成 NiO,随后生成 Cr_2O_3 ,随着氧化过程的持续进行, Cr_2O_3 逐渐覆盖住先前生成的 NiO^[15]。由图 6c 可知,无涂层的 Q345 钢基体试样经过 60 h 氧化后,表面主要形成 Fe_2O_3 ,与前述的 EDS 分析结果相吻合(图 4、表 4)。 Fe_2O_3 为日常铁锈的主要成分,结构疏松且易产生裂纹、孔隙,空气中的氧会通过其疏松的孔隙进入基体,导致基体发生持续氧化,对基体难以起到有效的保护作用。对比分析图 6b 和图 6c 可以得出,Q345 钢表面喷涂的涂层在高温作用下会生成 Cr_2O_3 、 NiCr_2O_4 、NiO 等化合物,可有效隔绝氧原子的进一步作用,因此对基体材料的耐高温氧化起到了良好的促进作用。

3 结论

1) 采用电弧喷涂工艺,在 Q345 钢表面喷涂高 Cr 含量的镍基合金涂层,合适的电弧喷涂工艺参数为:喷涂电压 38 V,喷涂电流 230 A,喷涂距离 150 mm,空气压力 0.5 MPa。

2) 在 750 °C 下对试样进行 60 h 的高温抗氧化实验,得到的高温氧化动力学曲线表明,无涂层的基体试样的氧化增重曲线趋于直线式上升。对涂层试样的高温氧化动力学曲线进行非线性拟合,符合抛物线方程 $\Delta W = 2.51t^{0.22}$,涂层试样的高温抗氧化性良好。

3) X 射线衍射相结构分析结果显示,高温氧化后,高 Cr 含量镍基合金涂层中形成了 Cr_2O_3 、 NiCr_2O_4 、NiO 等氧化物,这些相均匀分布在涂层中,组成相致密,能够有效阻碍氧原子侵入基体,表现出良好的高温抗氧化性能。

参考文献:

- [1] 曲彦平,王剑. 45CT 涂层抗高温氧化性能及机理[J]. 材料保护, 2011, 44(12): 27-29.
QU Yan-ping, WANG Jian. High-temperature Oxidation Resistance Mechanism of 45CT Coating[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(12): 27-29.
- [2] 汪刘应,王汉功,刘顾,等. 热喷涂镍-铬基涂层的高温氧化性能[J]. 电镀与涂饰, 2010, 29(10): 56-59.
WANG Liu-ying, WANG Han-gong, LIU Gu, et al. High-temperature Oxidation Behavior of Ni-Cr Based Thermal-sprayed Coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29(10): 56-59.
- [3] 郑欣. 火力发电厂锅炉“四管”泄露的原因及防止措施[J]. 电力科技, 2012(8): 257-258.
ZHENG Xin. Cause and Prevention Measures of "Four Pipes" Leakage in Boiler of Thermal Power Plant[J]. Power Technology, 2012(8): 257-258.
- [4] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 42-45.
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. Theories and Technologies on Surface Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 42-45.
- [5] YAMADA K, TOMONO Y, MORIMOTO J, et al. Hot Corrosion Behavior of Boiler Tube Materials in Refuse Incineration Environment[J]. Vacuum, 2002, 65(3-4): 533-540.
- [6] MATTHEWS S, SCHWEIZER M. Optimization of Arc-sprayed Ni-Cr-Ti Coatings for High Temperature Corrosion Applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22(4): 538-550.
- [7] REZAKHANI D. Corrosion Behaviours of Several Thermal Spray Coatings Used on Boiler Tubes at Elevated Temperatures[J]. Anti-corrosion Methods and Materials, 2007, 54(4): 237-243.
- [8] 陈丽艳,吴玉萍,郭文,等. 高速电弧喷涂 Ni-50Cr 合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 理化检验-物理分册, 2015, 51(4): 251-255.
CHEN Li-yan, WU Yu-ping, GUO Wen, et al. High Temperature Oxidation Resistance of Ni-50Cr Alloy Coating Deposited by High Velocity Arc Spray[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2015, 51(4): 251-255.
- [9] 王海军. 热喷涂技术问答[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG Hai-jun. Thermal Spraying Technology Q & A[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [10] 袁子良,莫亚武. 电弧喷涂工艺参数对涂层组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2005, 34(3): 40-42.
YUAN Zi-liang, MO Ya-wu. Effect of Technological Parameter of Arc Spraying on Microstructures and Properties of Coating[J]. Surface Technology, 2005, 34 (3): 40-42.
- [11] MORKS M F, BERNDT C C. Corrosion and Oxidation Properties of NiCr Coatings Sprayed in Presence of Gas Shroud System[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(13): 4322-4327.
- [12] 贺定勇,王晓芳,蒋建敏. 铁基高铬涂层热腐蚀行为的研究[J]. 热喷涂技术, 2009, 1(1): 63-66.
HE Ding-yong, WANG Xiao-fang, JIANG Jian-min. Hot Corrosion Behavior of Iron-based Coating with High Chromium Content[J]. Thermal Spray Technology, 2009, 1(1): 63-66.
- [13] 刘谦,马世宁. 电弧喷涂层高温氧化行为[J]. 金属热处理, 2002, 27(8): 27-30.
LIU Qian, MA Shi-ning. Oxidation Behavior of Arc Spraying Coatings at High Temperature[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(8): 27-30.
- [14] BAUER R, BACCALARO M, JEURGENS L P H, et al. Oxidation Behavior of Fe-25Cr-20Ni-2.8Si during Isothermal Oxidation at 1286 K: Life-time Prediction [J]. Oxidation of Metals, 2008, 69(3-4): 265-285.
- [15] 丁彰雄,王群,詹旺滨. NiCr 基锅炉管道涂层材料抗高温氧化性能的研究[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(4): 151-153.
DING Zhang-xiong, WANG Qun, ZHAN Wang-bin. Performance of High Temperature Oxidation Resistance of NiCr-based Coating Materials for Boiler Tubes[J]. Corrosion & Protection, 2003, 24(4): 151-153.