

# 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层在模拟烟气中的热腐蚀行为

倪进飞<sup>1</sup>, 洪嘉<sup>2</sup>, 刘光明<sup>2</sup>, 李茂东<sup>1</sup>, 彭昱晨<sup>2</sup>, 张民强<sup>3</sup>

(1.广州特种承压设备检测研究院, 广州 510663; 2.南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063; 3.东方锅炉股份有限公司材料研究所, 四川 自贡 643001)

**摘要:** 目的 采用超音速火焰喷涂技术在 P12 钢表面制备 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层, 研究两种涂层样品的热腐蚀行为和机理。方法 将样品表面涂覆 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+25%NaCl (质量配比) 混合盐膜后, 置于 650 °C 含 0.15%SO<sub>2</sub> (体积分数) 的模拟烟气中进行腐蚀, 间隔一定时间取出样品进行质量称取, 获得腐蚀动力学曲线。采用 XRD、SEM/EDS 对喷涂层和热腐蚀产物的成分、形貌、物相进行分析。结果 采用超音速火焰喷涂制备的涂层结构致密、孔隙率低。腐蚀过程中样品整体表现为增重, 但增重过程中有失重, NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 后期失重比 45CT 严重。45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层均生成了耐蚀性良好的致密 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 而 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层样品在涂层/基体界面还生成了氧化物和硫化物层, 易导致涂层与基体界面弱结合。结论 在 650 °C 含 0.15%SO<sub>2</sub> 的模拟烟气条件下, 45CT 涂层样品表现出了比 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 更好的抗热腐蚀性能。

**关键词:** 45CT; NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 涂层; 模拟烟气; 热腐蚀

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0210-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.034

## Hot Corrosion Behavior of 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Coating in Simulated Fuel Gas

NI Jin-fei<sup>1</sup>, HONG Jia<sup>2</sup>, LIU Guang-ming<sup>2</sup>, LI Mao-dong<sup>1</sup>, PENG Yu-chen<sup>2</sup>, ZHANG Min-qiang<sup>3</sup>

(1.Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou 510663, China;

2.School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

3.Material Research Institute, Dongfang Boiler Group Co., Ltd, Zigong 643001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study hot corrosion behavior and mechanism of 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating samples by preparing the two coatings on P12 steel by adopting high velocity oxygen fuel spray technology. The samples were coated with a film of mixed salts 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+25%NaCl (mass fraction), then placed in simulated flue gas containing 0.15%SO<sub>2</sub> at 650 °C, and later taken out at certain interval to weigh mass and obtain corrosion kinetics curve. Composition, structure and phase of the sprayed coatings and hot corrosion products were analyzed with XRD and SEM/EDS. The coatings prepared by HVOF featured in compactness and low porosity. The samples experienced mass gain in the corrosion process, but both were subject to mass loss during mass gain. Mass loss of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> was worse than that 45CT subsequently. Corrosion products of 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> were identified as Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO and NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. A dense Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich scale formed on these two kind of coatings sample surface. NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating samples generated oxide and sulfide layers on the substrate/coating interface, which might easily

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-11-30

Received: 2017-10-30; Revised: 2017-11-30

作者简介: 倪进飞 (1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为特种设备无损检测。

**Biography:** NI Jin-fei(1971—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: NDT Technique for special equipment.

通讯作者: 刘光明 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

**Corresponding author:** LIU Guang-ming (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

led to weak bonding between in the coating and substrate. Corrosion resistance of 45CT coating sample is better than that of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating in the 0.15% SO<sub>2</sub> simulated flue gas at 650 °C.

**KEY WORDS:** 45CT; NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; coating; simulated flue gas; hot corrosion

火力发电锅炉的过热器管、再热器管、水冷壁管和省煤器管（简称“四管”）等部件长期在高温、烟气等恶劣环境介质中运行，易发生高温腐蚀。随着机组参数提高和容量增加，四管由于高温腐蚀导致的失效事故有上升趋势，严重影响机组安全运行<sup>[1]</sup>。采用热喷涂技术制备涂层是锅炉高温防护的重要手段<sup>[2-5]</sup>。镍铬合金涂层具有良好的抗高温腐蚀性能<sup>[6]</sup>，美国 TAF<sub>A</sub> 公司研发的 45CT 涂层已在电站锅炉受热面的高温防腐领域有广泛应用<sup>[7]</sup>。NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层具有良好的耐高温氧化、耐腐蚀性能，同时，由于涂层中含有硬度高的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粒子，其又具有良好的耐高温磨损、耐冲蚀的优点<sup>[8,9]</sup>。

我国煤炭资源丰富，煤中的硫、氯含量随煤种、煤层及产地不同而明显不同。其中，高硫煤和高氯煤占有一定比重，其在锅炉高温环境中形成的硫酸盐和氯盐呈熔融态或在积灰层中，对管壁造成了严重的热

腐蚀，腐蚀行为、机理较单纯的硫酸盐型热腐蚀更复杂。因此，研究高硫、高氯环境下锅炉向火侧的高温腐蚀及涂层的服役失效机理、服役寿命评估，具有重要意义。

本文在 P12 钢表面分别采用超音速火焰喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层，研究了这两种涂层在含硫、氯环境中的热腐蚀行为，并简要探讨了其腐蚀机理。

1 实验

1.1 实验材料

基材采用 P12 钢，成分（质量分数）为：C 0.1%，Mn 0.5%，P 0.025%，S 0.025%，Si 0.5%，Cr 1.1%，Fe 余量。涂层材料为 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>，其中，NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层中的 NiCr 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 质量比为 1:3。两种涂层材料的成分见表 1。

表 1 涂层样品 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of coating sample 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

Coatings	Cr	Ni	C	Fe	Ti	Mn	Cu	Si	O
45CT	44	54.24	0.06	0.5	0.5	0.2	0.5	—	—
NiCr	19.60	79.50	—	0.31	—	—	—	0.34	0.25
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	84.72	—	15.14	—	—	—	—	0.01	0.13

1.2 试样制备

将基材制成 25 mm×15 mm×5 mm 的块体样品，用 16<sup>#</sup>的棕刚玉以 45°的角度、200 mm 的距离对试样表面进行喷砂处理，然后采用超音速火焰对基体的 6 个面进行喷涂。试样分为两组进行喷涂，一组喷涂 45CT 涂层，另一组喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层，厚度均为 140~170 μm。喷涂两种涂层前，所有试样均先喷涂打底层 NiAl，厚度为 60 μm。

喷涂工艺参数为：O<sub>2</sub> 流量 805.0 L/min，煤油流量 0.40 L/min，载气流量（N<sub>2</sub>）10.8 L/min，送粉 60 g/min，枪距 350 mm，线速度 500 mm/s。

1.3 腐蚀实验

在试样表面涂覆 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:NaCl=3:1（质量比，全文同）的饱和水溶液。烘干后，试样表面形成一层约 2 mg/cm<sup>2</sup> 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+NaCl 混合盐膜，随后将试样置于模拟烟气的管式气氛炉中进行腐蚀。实验温度为

650 °C，模拟烟气成分（体积分数）为：SO<sub>2</sub> 0.15%，O<sub>2</sub> 3.5%，CO<sub>2</sub> 15%，N<sub>2</sub> 余量。腐蚀总时间为 200 h，样品每隔 20 h 取出一次，在沸水中清洗后称取质量，获得腐蚀动力学曲线。采用带能谱分析仪（EDS）的扫描电镜（SEM）和 X 射线衍射仪（XRD）对涂层形貌、成分和物相进行分析。

2 实验结果与讨论

2.1 热喷涂涂层结构分析

图 1 分别为 P12 钢超音速火焰喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的表面形貌图。从图中可见，两种涂层表面均凹凸不平，表面局部有小孔洞。其中，NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层表面有较多细小颗粒，能谱分析显示这些颗粒处 Cr、C 含量较高，说明在喷涂过程中发生了 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 团聚。经测定，45CT 涂层的平均孔隙率为 0.82%，NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的平均孔隙率为 0.86%。

图2为P12钢超音速火焰喷涂45CT和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层的截面形貌及对应的能谱图。从图中可见,45CT涂层致密,涂层内部未见明显孔洞,但涂层表层存在微孔。涂层中有深灰色和浅灰色两种不同相,能谱分析显示其均主要由Ni、Cr和少量O元素组成。其中,深灰色相(区域1)富Ni,而浅灰色相(区

域2)则富Cr。此外,涂层中含少量氧,说明涂层在热喷涂过程中部分发生了氧化。NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层与45CT涂层不同,其由浅灰色、深灰色和黑色三种不同的相组成。能谱分析显示暗灰色相(区域3)富Cr,浅灰色相(区域4)富Ni,黑色相(区域5)为Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>颗粒。

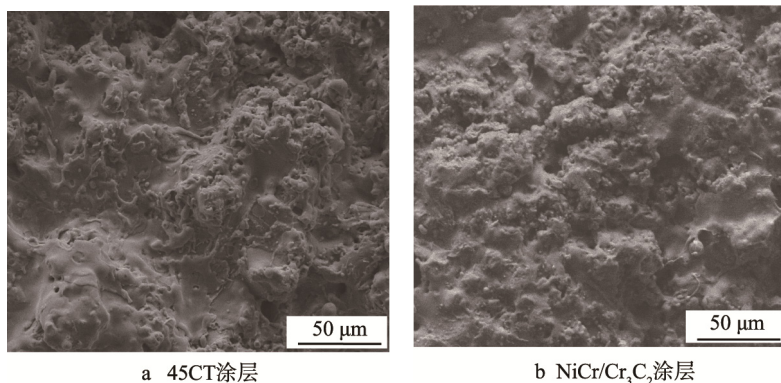


图1 超音速火焰喷涂45CT和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of 45CT (a) and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (b) coatings prepared by HVOF

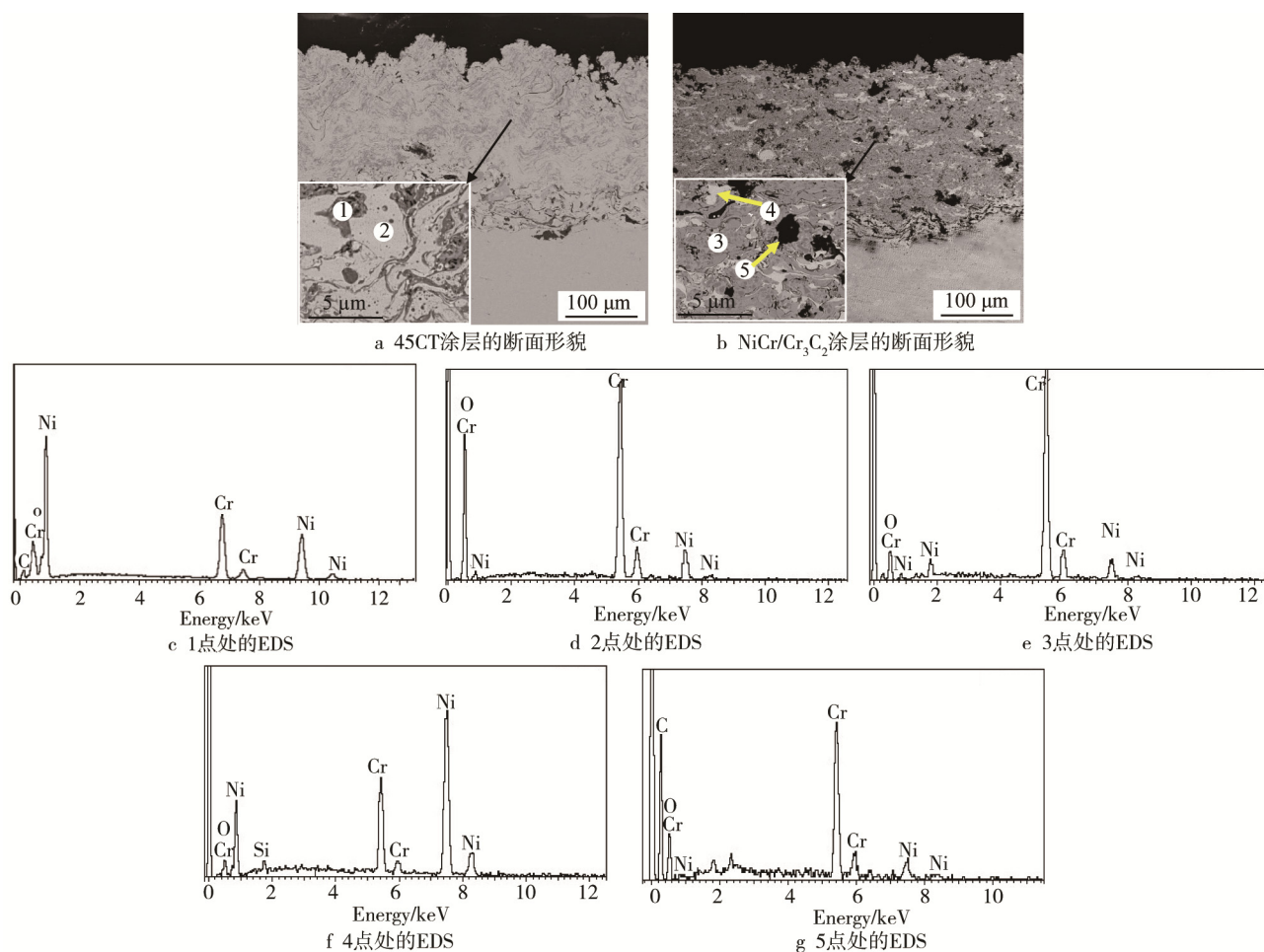


图2 超音速喷涂45CT和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层的截面形貌及对应的能谱图

Fig.2 Cross-sectional morphology of 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coatings prepared by HVOF and EDS patterns of different positions in Fig.2a, Fig.2b: a) sectional morphology of 45CT coating, b) sectional morphology of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating, c) EDS in point 1, d) EDS in point 2, e) EDS in point 3, f) EDS in point 4, g) EDS in point 5

## 2.2 热腐蚀动力学曲线

图 3 为表面涂覆 75% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25% NaCl 盐膜的 P12 钢超音速喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样在 650 °C 模拟烟气中的腐蚀动力学曲线。由图可知, 两种涂层的腐蚀动力学曲线前期变化趋势相似。即在最初腐蚀的 20 h 内, 样品质量增加较快; 20 ~ 160 h, 样品质量增加的速度减缓, 且有质量减少的现象, 总体依然表现为质量增加, 说明在腐蚀过程中有腐蚀产物的生长和剥落。其中, NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层在 160 h 后出现了质量持续减少, 说明腐蚀产物剥落较严重。

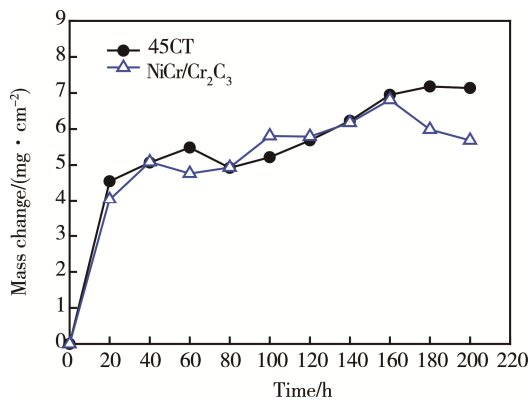


图 3 涂覆盐膜的涂层样品在 650 °C 时的腐蚀动力学曲线  
Fig.3 Corrosion kinetics curves of coating samples being corroded at 650 °C

## 2.3 腐蚀产物的成分和形貌分析

图 4 为表面涂覆 75% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25% NaCl 盐膜的

P12 钢超音速喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样在 650 °C 模拟烟气中腐蚀 200 h 后的 XRD 图。从图中分析可知, 两种涂层样品腐蚀后的产物主要由 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>、Ni 和 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 组成。

图 5 为表面涂覆 75% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25% NaCl 盐膜的 P12 钢超音速喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样在 650 °C 热腐蚀 200 h 后的表面形貌。由图可见, 两种涂层腐蚀后的表面形貌相似, 都有颗粒状腐蚀产物生成。其中, 能谱显示 45CT 涂层中区域 1 处含有 Ni、S 元素, 结合 XRD 结果, 可知此处主要为 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>。生成硫化物的 PBR 值大于氧化物的 PBR 值, 导致腐蚀产物中存在较大应力。该区域还含有 Cr 元素, 主要为 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层表面所含元素与 45CT 涂层

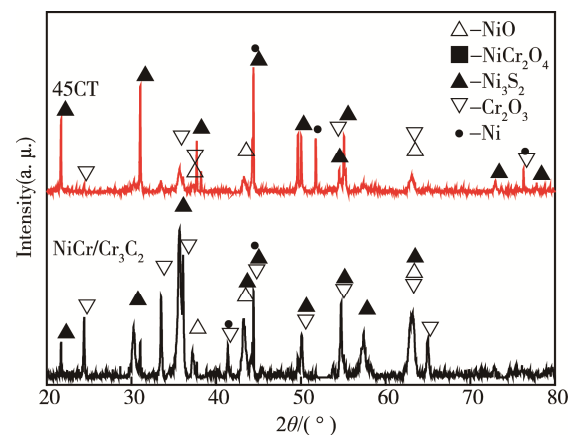
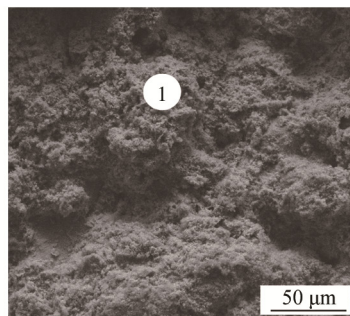
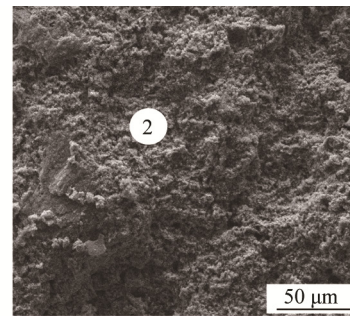


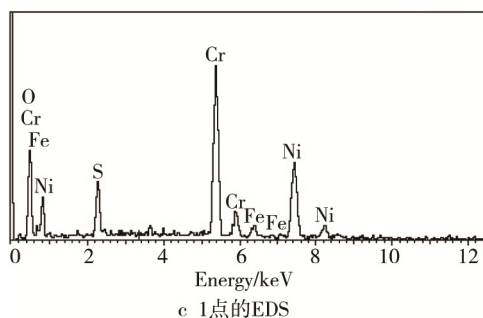
图 4 涂覆盐膜的不同涂层试样在 650 °C 腐蚀后的 XRD 图  
Fig.4 XRD patterns of 45CT and NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coatings being corroded at 650 °C



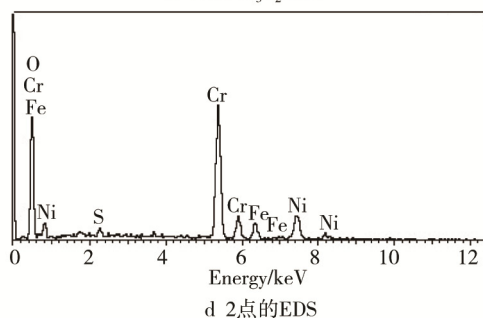
a 45CT 涂层



b NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层



c 1点的EDS



d 2点的EDS

图 5 涂覆盐膜的不同涂层试样在 650 °C 腐蚀后的表面形貌及对应 EDS 图

Fig.5 Surface morphology of different coating samples being corroded at 650 °C and EDS patterns of different positions in Fig.5a, Fig.5b: a) 45CT coating, b) NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating, c) EDS in point 1, d) EDS in point 2



基本一致,但表面疏松多孔,图中可见明显孔洞。此外,两种涂层表面均含有少量Fe。

## 2.4 截面微观形貌及成分分析

图6为表面涂覆75%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 25%  $\text{NaCl}$  盐膜的P12钢超音速喷涂45CT和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层试样在650℃热腐蚀200h后的截面形貌。由图可见,45CT涂层试样表面有一层薄的腐蚀产物,能谱分析显示其由Cr、Ni、Fe、O和S元素组成。此外,在涂层/基体界面可见少量深灰色产物,其能谱结果显示含有微量Cl元素,说明腐蚀介质已扩散到涂层/基体界面。

而NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层试样的表面仅附着非常薄的深灰色腐蚀产物,说明其表面腐蚀产物剥落较严重,与腐蚀动力学曲线结果一致。对其进行能谱分析,发现表面残留的腐蚀产物由Cr、Ni、Fe、O和S元素组成。同时,其涂层/基体界面处有暗灰色腐蚀产物带,能谱分析显示其主要由Fe、Ni、Al、O、Cl和S元素组成。这说明在腐蚀过程中,熔盐中的S、Cl通过涂层并扩散到了涂层/基体界面,导致了基体金属腐蚀。此外,NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层试样中的黑色相Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>腐蚀较严重,其周围有较明显的孔洞。

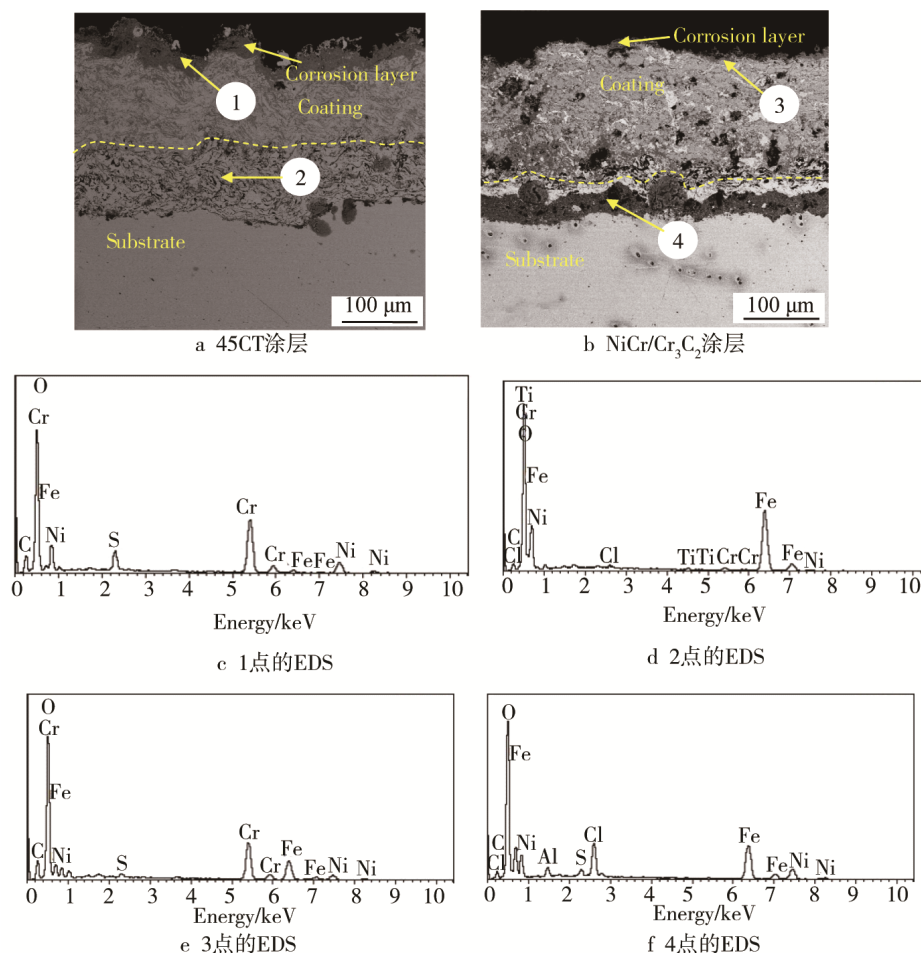


图6 涂覆盐膜的不同涂层试样在650℃腐蚀后的截面形貌及对应EDS图

Fig.6 Cross-sectional morphology of different coating samples corroded at 650 °C and EDS patterns of different positions in Fig.6a, Fig.6b: a) 45CT coating, b) NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating, c) EDS in point 1, d) EDS in point 2, e) EDS in point 3, f) EDS in point 4

## 2.5 腐蚀机理分析

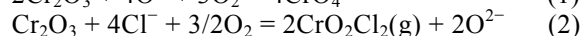
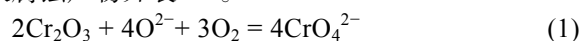
对于Ni-Cr合金而言,在低于800℃的 $\text{SO}_2$ + $\text{O}_2$ 气氛中,如果在腐蚀产物膜中形成网状 $\text{Ni}_{3+x}\text{S}_2$ ,就可以为Ni提供向外扩散的快速通道,从而使Ni在膜表面与 $\text{NiSO}_4$ 反应生成NiO和 $\text{Ni}_{3+x}\text{S}_2$  [10]。

本实验中的45CT和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层在650℃热腐蚀后的产物中均有 $\text{Ni}_3\text{S}_2$ 。 $\text{Ni}_3\text{S}_2$ 可以与Ni形成共晶,其熔点为640℃ [11,12],因此其在实验条件下呈熔

融态,这会加速涂层腐蚀,并在涂层表面形成液体流痕 [13,14]。而根据 $\text{NaCl}$ - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 相图,75% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ +25% $\text{NaCl}$ 混合盐的熔点为630℃ [15-17],所以其在腐蚀过程中也会以熔融态覆盖在样品表面。根据目前被广泛接受的酸-碱熔融模型,此时即使样品表面形成了具有保护性作用的氧化膜,其也会在沉积的液态熔盐中不断溶解而遭到破坏,最终导致涂层的腐蚀加速。

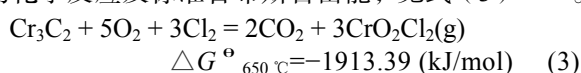
由于 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 在硫酸盐中的溶解度比较小,所以保

护性的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜可以在 SO<sub>2</sub>/硫酸盐环境中稳定存在。45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的含 Cr 量均较高, 在腐蚀过程中, Cr 易氧化生成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 因此 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层应具有较好的耐蚀性。但熔盐中的 Cl<sup>-</sup> 与 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会发生式(1—2)的反应, 生成挥发性极强的 CrO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, 导致腐蚀产物开裂<sup>[18]</sup>。



与此同时, 熔盐中的 NaCl 通过氧化膜中的缺陷到达涂层/腐蚀层界面, 与金属反应生成挥发性的金属氯化物 MCl<sub>2</sub>。当气态氯化物 MCl<sub>2</sub> 聚集到一定程度时, 就会引起氧化膜开裂、剥落。气态氯化物 MCl<sub>2</sub> 在较高氧压下与 O<sub>2</sub> 反应形成氧化物 MO, 并释放出 Cl<sub>2</sub>。因此, 在涂层/基体界面处生成了含 O、S 和 Cl 的暗灰色腐蚀产物带。

NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层中的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相含 Cr 量较高, 利用软件 HSC Chemistry 5 计算得出 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 在 Cl<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 环境中的化学反应及标准吉布斯自由能, 见式(3)<sup>[19,20]</sup>。



由于 CrO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 的熔点为 -95 ℃, 沸点为 117 ℃<sup>[10]</sup>, 其在实验条件下的反应产物都以气态形式挥发。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 在此环境下发生腐蚀后会留下孔洞, 所以图 6b 涂层中的黑色相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 腐蚀较严重, 并在其周围有较明显的孔洞。

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 腐蚀后可在涂层中形成大量缺陷, 为熔盐向涂层中扩散以及涂层中的金属向外扩散提供了快速通道, 最终导致涂层/基体界面处形成深灰色的腐蚀产物带。与 Fe、Cr 的氧化物相比, Ni 在氯化物熔盐中表现得最稳定。NiCl<sub>2</sub> 具有较高的熔点(1030 ℃)<sup>[13]</sup>, 很容易在氯化物熔盐中达到饱和状态, 并且表现出优于 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的耐蚀性。

因此, 在氯盐存在的条件下, 45CT 涂层比 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层具有较好抑制 Cl 腐蚀的性能。

### 3 结论

1) 650 ℃时, 涂覆 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+25%NaCl 盐膜的 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层在腐蚀过程中总体表现为质量增加, 但 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层在 160 h 时有失重现象, 腐蚀产物剥落。

2) 表面涂覆 75% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25% NaCl 盐膜的 P12 钢超音速喷涂 45CT 和 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样在 650 ℃模拟烟气中腐蚀 200 h 后的腐蚀产物均由 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>、Ni 和 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 组成。

3) NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 腐蚀后形成气态生成物, 使涂层中形成孔洞。这些孔洞成为了熔盐向内和金属离子向外扩散的快速通道, 在涂层/基体界面

处形成深灰色腐蚀产物带, 从而导致 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的耐蚀性不如 45CT 涂层。

### 参考文献:

- [1] LIU G M, YANG H C, LIANG Q, et al. Corrosion Behavior of Ni-Cr-Fe Base Superalloy GH984G in the Synthetic Coal Ash and Flue Gas Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(9): 863-868.
- [2] 鲁金涛, 谷月峰, 杨珍. 3 种 700 ℃级超超临界燃煤锅炉备选高温合金煤灰腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(3): 205-210.  
LU Jin-tao, GU Yue-feng, YANG Zhen. Coal Ash Induced Corrosion of Three Candidate Materials for Superheater Boiler Tubes of Advanced Ultra-supercritical Power Station[J]. Journal of Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(3): 205-210.
- [3] 邢娜, 黄宝, 何立波. 超临界超超临界锅炉管品种的开发现状[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 17-21.  
XING Na, HUANG Bao, HE Li-bo. Present Status of Development of Supercritical and Ultra-supercritical Boiler Tubes[J]. Journal of Special Steel, 2016, 37(1): 17-21.
- [4] 刘炳伟. 锅炉钢材腐蚀破坏及机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.  
LIU Bing-wei. Research of the Causes and the Way of Boiler Corrosion of Steel [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [5] 杨波, 李茂东, 刘康生, 等. 超音速喷涂 45CT 涂层在 KCl+K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 熔融盐中的热腐蚀行为[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 178-183.  
YANG Bo, LI Mao-dong, LIU Kang-sheng, et al. Hot Corrosion Behavior of 45CT Coating Prepared by HOVF in KCl+K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Molten Salt[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 178-183.
- [6] 杨波, 李茂东, 刘光明, 等. 超音速喷涂 Inconel 625/NiCr 合金涂层的热腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护学报, 2016, 36(5): 483-488.  
YANG Bo, LI Mao-dong, LIU Guang-ming, et al. Hot Corrosion Behavior of Inconel 625/NiCr Coating Prepared by HOVF[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2016, 36(5): 483-488.
- [7] 肖宏博, 邱质彬, 谢明均, 等. NiCrTi 系高温防硫腐蚀喷涂材料 45CT 与 PS45 的对比研究[J]. 华电技术, 2012, 34(10): 18-20.  
XIAO Hong-bo, QIU Zhi-bin, XIE Ming-jun, et al. Comparative Study of 45CT and PS45 for High Temperature and Sulfur Resistant Corrosion Spraying NiCrTi Materials[J]. Huadian Technology, 2012, 34(10): 18-20.
- [8] GUILMANY J M, MIGUEL J M, VIZCAÍNO S, et al.

- Role of Heat Treatments in the Improvement of the Sliding Wear Properties of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2002, 157(2-3): 207-213.
- [9] WANG B Q, LEE S W. Elevated Temperature Erosion of Several Thermal-sprayed Coatings under the Simulated Erosion Conditions of In-bed Tubes in a Fluidized Bed Combustor[J]. Wear, 1997, 203(96): 580-587.
- [10] 李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- LI Mei-shuan. High Temperature Corrosion of Metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [11] 王剑. 45CT 涂层高温性能及其机理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- WANG Jian. Study on High-temperature Property and Principle of 45CT Coating [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [12] 曲彦平, 于欣, 王岩峰, 等. 电弧喷涂 Al, 45CT 及其复合涂层的抗高温氧化性能与机理[J]. 材料保护, 2012, 45(1): 7-9.
- QU Yan-ping, YU Xin, WANG Yan-feng, et al. High Temperature Oxidation Resistance and Mechanism of Arc Sprayed Al, 45CT and Its Composite Coating [J]. Materials Protection, 2012, 45(1): 7-9.
- [13] 李学锋. 镍基合金涂层抗热腐蚀性能和机理研究[J]. 材料保护, 2003, 36(7): 19-21.
- LI Xue-feng. Influences of Cr Content on High Temperature Oxidation Behavior of Two Nickel-based Alloy Coatings[J]. Materials Protection, 2003, 36(7): 19-21.
- [14] 翟金坤. 金属高温腐蚀[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.
- ZHAI Jin-kun. Metal High Temperature Corrosion[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994.
- [15] 陈晓洪, 傅崇说, 郑蒂基. 镍硫化物在酸性氯化物水溶液中的腐蚀溶出( I )  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  溶出[J]. 中南矿冶学院学报, 1992(2): 163-167.
- CHEN Xiao-hong, FU Chong-shuo, ZHENG Di-ji. CEU-Couple Corrosion Dissolution of Nickel Sulfide in the Acidic Chloride Solution ( I )  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  Dissolution[J]. Journal of Central South University, 1992(2): 163-167.
- [16] SIDHU B S, PURI D, PRAKASH S. Characterisations of Plasma Sprayed and Laser Remelted NiCrAlY Bond Coats and Ni3Al Coatings on Boiler Tube Steels[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 368(1-2): 149-158.
- [17] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. TiAl 合金表面激光重熔 MCrAlY 涂层热腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 17-20.
- WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Study on Hot Corrosion Behavior of Plasma-sprayed MCrAlY Coating on TiAl Alloy Surface [J]. Journal of Welding, 2014, 35(8): 17-20.
- [18] 谢兆钱, 黄华元, 卢飞, 等. 超音速等离子喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层高温性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, S2: 726-730.
- XIE Zhao-qian, HUANG Hua-yuan, LU Fei, et al. Study on High Temperature Performances of NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Coatings by Supersonic Plasma Spraying[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, S2: 726-730.
- [19] 程晓农, 王荣荣, 李冬升, 等. 800H 合金的高温抗氧化性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(6): 95-99.
- CHEN Xiao-nong, WANG Rong-rong, LI Dong-sheng, et al. Oxidation Resistance of Alloy 800H at Elevated Temperature[J]. Transactions of Materials Heat Treatment, 2012, 33(6): 95-99.
- [20] 杨华春, 梁勤, 杨小川, 等. 镍-铬-铁基高温合金 GH984G 在不同  $\text{SO}_2$  浓度烟气中的腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2017(1): 83-88.
- YANG Hua-chun, LIANG Qin, YANG Xiao-chuan, et al. Corrosion Behavior of Ni-Cr-Fe Base Superalloy GH984G in Flue Gas Atmosphere with Different  $\text{SO}_2$  Content[J]. Transactions of Materials Heat Treatment, 2017(1): 83-88.