

# 锅炉受热面高温腐蚀涂层技术研究和应用进展

崔崇<sup>1</sup>, 张倚雯<sup>1</sup>, 周龙<sup>2</sup>, 丁生宝<sup>3</sup>

(1. 国电锅炉压力容器检验中心, 北京市昌平区未来科技城北区国电新能源技术研究院 309 号楼 9510 室, 102209; 2. 国电泰州发电有限公司, 江苏省泰州市高港区永安洲镇, 225327; 3. 国电浙能宁东发电有限公司, 宁夏宁东化工基地马家滩工业园区国电大道 1 号, 750408)

**摘要:** 本文综述了电站燃煤锅炉受热面管常见的腐蚀类型, 并从新型纳米陶瓷涂层、热喷涂层和堆焊层三大防护涂层技术角度综述了其研究和应用进展。提出了受热面腐蚀防护涂层合理的解决方案是以成本较低的涂层技术为主, 例如新型纳米陶瓷涂层或电弧喷涂层; 针对局部腐蚀、磨损严重的部件, 可采用超音速火焰喷涂技术进行在线施工, 或者采购带有堆焊涂层的新品进行替换。本文在综述基础上提出, 具有更好防护效果、相对较高生产效率和含有技术含量的在线自动化电弧堆焊技术及相应的材料技术应该是今后的技术发展方向。

**关键词:** 受热面; 高温腐蚀; 涂层; 进展

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2018) 03-0002-07

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2018.01.002

## Progress of High Temperature Corrosion Resistance Coatings for Heating Surface Tubes in Boilers

CUI Chong<sup>1</sup>, ZHANG Yiwen<sup>1</sup>, ZHOU Long<sup>2</sup>, DING Shengbao<sup>1</sup>,

(1. Guodian Boiler and Pressure Vessel Inspection Center, Room 9510 Building 309 Guodian New Energy Technology Research Institute, Future Science Park, Changping District, Beijing City, 102209. 2. Guodian Taizhou Power Generation Co., Ltd., Yonganzhou Town Gaogang District Taizhou City, Jiangsu Province, 225327. 3. Guodian Zheneng Ningdong Power Generation Co., Ltd., No. 1 Guodian Road, Ma Jia Tan Industrial Park, Ningdong chemical base, Ningxia Province, 750408.)

**Abstract:** In this paper, the corrosion types frequently encountered in the power plants are introduced. Research and application progresses of three corrosion resistance coatings are reviewed including the new developed nano-composite ceramic coatings, thermal spray coatings and cladding coatings. It is concluded that the proper solution for heating surface tubes corrosion problem is to apply the lower-price coatings to the major protecting area, such as the new nano-composite ceramic coatings or the arc-spraying coatings, and apply the online high velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying coatings or simply replace with new products with welding coatings for the severely corroded or worn parts. The online automatic arc cladding technology with relatively higher production efficiency and higher technological content is considered to be the orientation of technological development.

**Keywords:** heating surface tubes, high temperature corrosion, coatings, progress

### 1 电站锅炉的腐蚀类型

电站锅炉的受热面主要包括水冷壁<sup>[1]</sup>、过热

器、再热器、省煤器和空气预热器。据统计, 我国约 80% 以上燃用贫煤的大型电站锅炉存在不同程度的受热面腐蚀问题。腐蚀使管壁厚度减薄或

穿孔，容易引起爆管，泄漏等事故，从而导致机组的非计划停机，严重影响火电机组运行的安全性、经济性及整个电网的安全生产和调度。上述受热面主要面临的腐蚀问题按照腐蚀机理可以分为四种类型：

### 1.1 高温还原性气氛腐蚀

为降低 NO<sub>x</sub> 排放，燃煤电站锅炉多采用典型的两级燃烧法，在主燃烧器与 SOFA (Separate Over Fire Air) 风之间的水冷壁区形成强还原性气氛<sup>[2-4]</sup>。煤中含有的硫在炉内缺氧气氛中燃烧生成大量 H<sub>2</sub>S，H<sub>2</sub>S 与 Fe 或 FeO 在高温下发生反应生成疏松的 FeS，并被缓慢氧化为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>[5,6]</sup>。

产生硫化物腐蚀的必要条件为煤中含有 S 且燃烧形成强还原性气氛。煤中 S 含量越高则腐蚀越严重，当气氛中氧气体积含量大于 2% 时，硫化物腐蚀消失<sup>[7]</sup>。

硫化物腐蚀的典型特征为管表面有棕黑色 FeS 和暗黑色磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>，腐蚀层剥落后内表面有光泽的蓝黑色，剥落物可溶于酸液，并放出有臭鸡蛋气味的 H<sub>2</sub>S 气体。

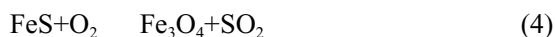


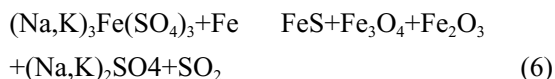
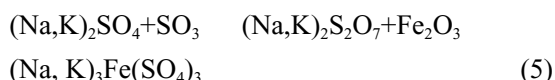
图 1 水冷壁高温硫化物腐蚀表面形貌

Figure 1 Morphology of high temperature sulfide corroded heating surface tubes

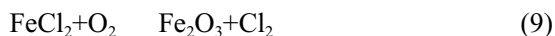
### 1.2 结渣腐蚀

结渣腐蚀发生在炉内易结渣的水冷壁高温段、折焰角、过热器和再热器的向火侧。根据腐蚀机理可分为硫酸盐腐蚀和氯化物腐蚀。

硫酸盐型腐蚀：碱金属硫酸盐与氧化铁和 SO<sub>3</sub> 反应生成低熔点硫酸盐络合物破坏了金属管壁的氧化皮（如 Na<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 熔点 624、K<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 熔点 618）以及焦硫酸盐（如 K<sub>1.5</sub>Na<sub>0.5</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 熔点 579）。反应产物在高温受热面呈熔融态与 Fe 继续反应生成氧化铁，这一循环反应称为“活化氧化”，导致金属管壁被持续腐蚀<sup>[8,9]</sup>。



氯化物型腐蚀：碱金属氯化物之间形成的低熔点共熔物（如 NaCl-CaCl<sub>2</sub> 熔点 580、ZnCl<sub>2</sub>-KCl 熔点 260）与氧化铁在 600 左右反应释放出 Cl<sub>2</sub>，Cl<sub>2</sub> 在氧化膜内不断向金属侧扩散生成易挥发的 FeCl<sub>2</sub> 导致管壁腐蚀。FeCl<sub>2</sub> 接触到高的氧分压时被氧化为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，由此形成循环的“活化氧化”反应，对管壁造成持续腐蚀<sup>[10-12]</sup>。



产生结渣腐蚀的必要条件为煤中含有碱金属，且含有 S 或者 Cl 元素。碱金属的硫酸盐或氯化物易形成的低熔点络合物，粘附在高温管壁后呈熔融态对金属造成快速腐蚀减薄。



(a)



(b)



(c)

图 2 结渣腐蚀的表面形貌 ( (a) 水冷壁折焰角, (b) 高温过热器, (c) 清除结渣后的表面形貌 )

Figure 2 Morphology of slag corroded heating surface tubes ((a) furnace arch, (b) high temperature superheater, (c) slag removed surface)

### 1.3 低温酸蚀

烟气中  $SO_3$  与水形成硫酸蒸汽, 当硫酸蒸汽含量为 50 ppm 时, 烟气露点提高至约 130-150 。当烟气中  $SO_2$  遇到  $Fe_2O_3$  或  $V_2O_5$ , 在其催化作用下会生成  $SO_3$ 。硫酸蒸汽凝结在温度低于烟气露点的空气预热器冷端蓄热元件或给水温度低的省煤器表面, 造成酸蚀<sup>[13,14]</sup>。低温酸蚀导致空气预热器穿孔漏风、蓄热元件坍塌堵塞烟道, 引风阻力增加, 锅炉出力下降, 严重时被迫停炉, 大面积更换蓄热元件, 造成巨大的经济损失。

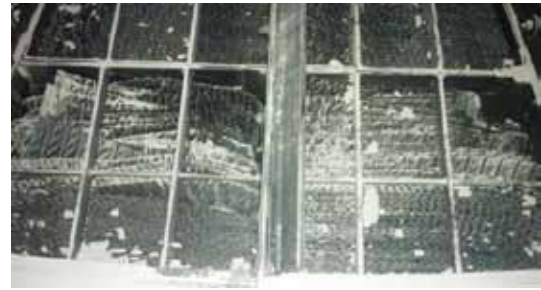


图 3 坍塌的回转容克式空预器蓄热元件  
Figure 3 Collapsed heat storage elements of an air preheater

## 2 抗腐蚀涂层研究进展

### 2.1 新型纳米陶瓷涂层

通过热化学反应法在经过喷砂预处理的基材上制备纳米陶瓷涂层, 是一种上世纪 80 年代开始进行实验室研究的防护涂层技术<sup>[15,16]</sup>。该方法以水基悬浮浆料为原材料 (包含有分散剂、粘结剂以及多种纳米陶瓷颗粒) 采用 0.3-0.6 MPa 的压缩空气雾化后均匀涂覆于管子表面, 经过室温阴干和启炉加热固化后, 最终在金属基材表面形成厚度约 0.05-0.15mm 的纳米陶瓷涂层。

穆柏春、陈健康等<sup>[17,18]</sup>采用碱金属及过渡族金属的氧化物为陶瓷添加颗粒, 并以水基无机盐溶液为粘结剂制备了纳米陶瓷涂层, 发现碳钢基体上 1000 热固化的涂层与基体的剪切强度达 17.41MPa, 耐蚀性提高 53 倍。马壮等<sup>[19]</sup>采用  $SiO_2$  为陶瓷添加颗粒、以磷酸二氢铝为粘结剂, 并添加了 Al 粉, 所制备的纳米陶瓷涂层内聚强度以及涂层与基体结合强度分别为 2.6MPa 和 7.7MPa。

华隽石等人<sup>[20]</sup>对一种新型的复合陶瓷涂层进行抗高温腐蚀性能研究, 对带涂层及不带涂层的 20G 样片分别在 450 温度下进行模拟  $SO_2$  气氛、 $H_2S$  气氛以及熔盐腐蚀 3 种情况的高温腐蚀试验研究。研究发现喷涂涂层的试样片抗  $SO_2$ 、 $H_2S$  腐蚀效果明显优于未喷涂涂层的 20G 钢, 分别较后者增强约 6 倍和 10 倍; 进行高温熔盐腐蚀, 喷涂涂层的试样片抗腐蚀能力约为未喷涂的 20G 钢的 2 倍。

将纳米陶瓷涂层防护技术尝试用于腐蚀条件严苛的石化管道、压力容器等已有近10年时间。最近5年,该方法也尝试用于电站锅炉受热面管的防腐蚀。但由于原材料配方保密且可调整空间非常大、陶瓷与金属之间热物理性能差异过大等原因,导致原材料配方优化不足,初期的应用效果不够理想,虽然取得了一些应用成果<sup>[21,22]</sup>,但也明显存在涂层与基材结合强度低在锅炉运行期间容易剥落失效、抗磨损能力差等问题<sup>[23,24]</sup>。

国电锅炉压力容器检验中心近期对自主研发的一种新型纳米陶瓷涂层防护性能进行了研究。其耐腐蚀性能、抗结渣性能优异。该原材料配方选择轻质非金属纳米陶瓷颗粒为添加物,主要包括SiC、B<sub>4</sub>C、SiO<sub>2</sub>、BN等,利用其硬度高、高温稳定性好、表面能低的特点,成功制备了防结渣、抗腐蚀的纳米陶瓷涂层。并对涂层进行了模拟电站锅炉还原性气氛的腐蚀性能试验以及模拟携带飞灰的高温烟气冲刷的试验,取得了良好的测试结果。目前已由国电集团下属的几家电厂选择水冷壁、过热器管子进行技术示范项目研究。



(a)



(b)

图4 新型纳米陶瓷涂层表面形貌((a)高温过热器喷涂纳米陶瓷涂层,(b)水冷壁)

Figure 4 New developed nano-composite ceramic coatings ((a) high temperature superheater, (b) water wall)

## 2.2 热喷涂涂层

### 2.2.1 电弧喷涂

国内燃煤电站锅炉普遍采用超音速电弧喷涂技术制备NiCr-AlTi成分的PS45涂层,用于水冷壁的抗高温腐蚀。PS45是一种NiCr基的实心丝材,形成的喷涂层表面存在连续、致密且与涂层结合牢固的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>薄膜,阻断或阻碍了SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、O<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>等腐蚀性介质向内部的扩散。涂层具有较高的韧性和硬度(45-50 HRC),与基材的结合强度可达35MPa以上,具有良好的抗烟气冲刷性能<sup>[25,26]</sup>。

其它在电站锅炉受热面管获得应用的电弧喷涂材料还有抗Cl<sup>-</sup>点蚀性能优异的Inconel 625合金<sup>[27]</sup>,以及以Fe代替Ni的FeCr基陶瓷颗粒复合线材,牺牲了部分抗腐蚀性能,但提高了涂层耐磨性能<sup>[28,29]</sup>。Inconel 625合金的主要成分为Ni-20Cr-8Mo,其中Mo元素的加入一方面增强了涂层Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的致密度,另一方面增强了涂层在熔盐体系的钝化性能。研究表明单一Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜不能抵抗氯离子腐蚀,在高温下与氯化物盐反应生

成沸点约 500 的铬酸盐，导致氧化膜破坏，金属基材产生点蚀。



目前电站锅炉防腐蚀电弧喷涂层应用中普遍存在的问题在于恶性低价竞争以及电厂相关技术人员对电弧喷涂技术理解不够深入，常见到合同价格极低的 PS45 合金涂层。导致其防护效果极差、每年都要重复喷涂。相关技术监督单位应及时开展热喷涂技术支持、指导和服务，对喷涂材料和喷涂质量进行全面的监督检查，以保证腐蚀、磨损的防护效果，降低机组的爆管停炉风险。

### 2.2.2 超音速火焰喷涂

超音速火焰喷涂 (HVOF/HVAF) 技术是上世纪 80 年代末发展起来的一种以粉末颗粒射流速度高，涂层氧化物、气孔含量低，涂层与基材结合强度高 (>60MPa) 为特色的先进热喷涂技术。该技术以煤油或丙烷为燃料，以氧气或空气为助燃气，经燃烧室和拉瓦尔喷管加速的粒子射流速度可达 600-700m/s。由于火焰相对电弧、等离子弧热源温度低、粒子飞行速度快，特别是喷涂金属陶瓷粉末材料时，多数粉末颗粒呈半熔融状态撞击基材形成涂层，降低了碳化物的脱碳分解以及包覆金属的氧化，使涂层质量相对于电弧喷涂层和普通火焰喷涂层有极大的提高<sup>[30-32]</sup>。

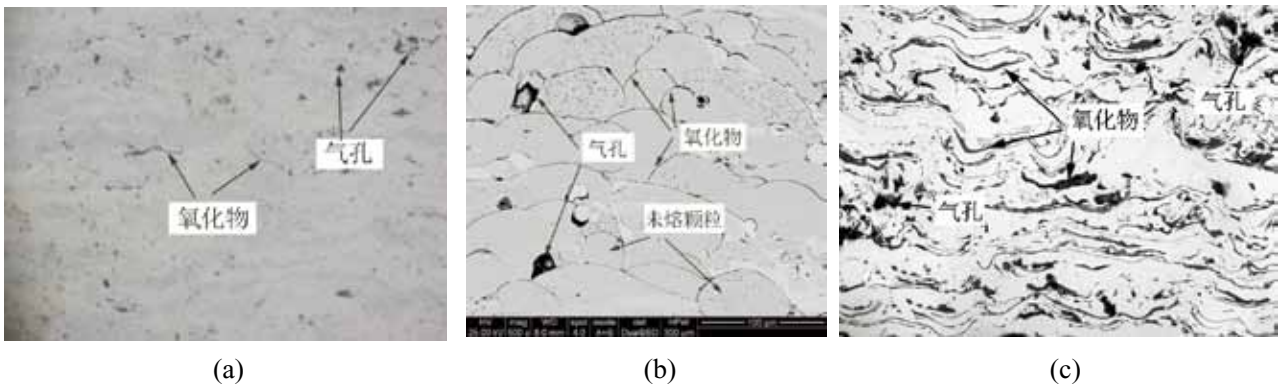


图 5 三种热喷涂层横截面对比

( ( a ) 超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层, ( b ) 普通火焰喷涂 Ni60 涂层, ( c ) 电弧喷涂 PS45 合金涂层 )

Figure 5 Cross-sectional images of three kinds of thermal spraying coatings

((a) HVOF sprayed WC-Co cermet, (b) flame sprayed Ni60 alloy, (c) arc sprayed PS45 alloy)

目前仅有少数电站锅炉采用了超音速火焰喷涂技术进行腐蚀和磨损的防护<sup>[33,34]</sup>，李太江等人<sup>[35,36]</sup>的研究和实践表明：超音速火焰喷涂技术制备的金属陶瓷涂层比电弧喷涂层具有更优异的抗高温硫酸盐腐蚀及硫化物腐蚀性能；封孔处理可显著提高涂层抗腐蚀性能。但结合应用实际来看，超音速火焰喷涂只适用于电站锅炉局部磨损、腐蚀问题较为严重区域的防护，其主要原因如下：

1) 喷涂生产效率低，由于送粉速率偏低，且粉末沉积速率约 40-50%，其生产效率只相当于电弧喷涂的 1/3。

2) 国产超音速火焰喷涂设备价格约为国产超音速电弧喷涂设备的 3~4 倍，但易堵塞枪管，设

备长时稳定工作性能不理想；进口设备生产稳定性高，但价格是国产设备的 3-4 倍，一次性投资成本高。

3) 喷涂成本高，喷涂金属陶瓷涂层的成本约为电弧喷涂的 5~7 倍。但涂层性能不一定能实现同比的提高。

### 2.3 堆焊涂层

堆焊涂层是指涂层与基材为冶金结合的防护涂层，区别于热喷涂涂层，该类涂层具有与基材间为机械结合的特征。堆焊的热源可以为氧乙炔火焰、也可以为电弧、等离子弧或者激光等；堆焊材料可以为复合粉芯丝材、实心焊丝、药芯焊丝以及各种粉末，材料来源广泛。堆焊涂层由于

与基材形成冶金结合,涂层全部熔化消除了气孔,涂层耐磨、抗腐蚀防护性能比热喷涂层有较大提高(可达3-5倍)<sup>[37,38]</sup>。

目前在电站锅炉受热面防护领域的应用,美国、日本等发达国家现已普遍采用电站锅炉在线自动化电弧堆焊技术进行水冷壁的腐蚀、磨损防护。国内主要采用在工厂制作新品的堆焊层、向电厂提供水冷壁或过热器带涂层成品的方式。受限于国内Ni基、Co基粉芯丝材的研制水平,电弧堆焊涂层的性能相比于采用粉末作为原材料的激光熔覆和火焰喷焊涂层性能要低一些,但电弧堆焊的成本更低、生产效率要比后者高2-3倍。

以下因素限制了堆焊在国内电厂检修现场的应用:

1) 激光熔覆的设备体积大、施工精度要求高,单台设备生产效率低且投资成本很高,基本不具备在线施工可行性。

2) 火焰喷焊热输入量过大,施工效率极低,易导致水冷壁变形和工期延迟。

3) 国外电弧自动化堆焊设备技术处于保密阶段,国内尚未研制出适用于电站锅炉现场的自动化堆焊施工设备和技术,相应的喷涂材料也较为单一,未形成系列化和标准化。

### 3 结论与展望

本文综述了现阶段电站燃煤锅炉受热面管腐蚀防护研究与应用的进展。将受热面常见的腐蚀分为高温还原性气氛腐蚀、结渣腐蚀和低温酸蚀三大类。实际受热面部件多是以其中一种腐蚀类型为主,兼有其它腐蚀。本文从新型纳米陶瓷涂层、热喷涂层和堆焊层三大防护涂层技术角度综述了材料及应用现状,根据各自的技术特点,电站燃煤锅炉受热面腐蚀防护涂层合理的解决方案应该是以成本较低涂层技术为主,例如新型纳米陶瓷涂层或电弧喷涂层,结合具体情况针对局部腐蚀、磨损严重的部件可采用超音速火焰喷涂技术进行在线施工,或者采购带有堆焊涂层的新品进行替换。其中具有更好防护效果、相对较高生产效率和技术含量的在线自动化电弧堆焊技术及相应的材料技术应该是今后的发展方向。

### 参考文献

- [1] 叶林,尹嵩,黄科峰,等.热喷涂技术在循环流化床锅炉中的运用与质量控制[J].热喷涂技术,2010,2(1):49-50.
- [2] 秦明,姜文婷,吴少华.空气分级燃烧炉内壁面硫化物分布的数值模拟[J].动力工程学报,2016,36(2):91-98.
- [3] 邓中乙,马斌,余永生,等.660MW超超临界锅炉高温腐蚀数值模拟[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2012,17(3):71-75.
- [4] Yang JG, Zhang QF, Yang Y, et al. The Transformation Mechanism of H<sub>2</sub>S Beside the Waterwall Under Reducing Condition[J]. Advanced Materials Research, 2012(512-515):2471-2474.
- [5] 宋凯,袁鹤,尤坤坤.1000MW机组炉内受热面腐蚀的原因以及治理方案[J].华电技术,2016,38(2):9-10.
- [6] 刘杰,白宁,潘晴川,等.超临界锅炉末级过热器管外壁腐蚀膜的微观分析[J].失效分析,2014,31(增刊一):125-128.
- [7] 魏道君.1000 MW 锅炉侧墙水冷壁防止高温腐蚀[J].华电技术,2016,38(2):1-5.
- [8] 张拓,赵现华,詹树新,等.电站锅炉煤灰的高温腐蚀介绍[J].锅炉制造,2014,6:20-24.
- [9] 段红玲,孟奇.浅谈锅炉水冷壁高温磨损和高温腐蚀的解决措施[J].价值工程,2012,12(077):276-277.
- [10] 孔祥思,刘猛,桑胜欢.不同过热器金属材料的高温腐蚀特性研究[J].锅炉技术,2014,45(3):47-52.
- [11] 李灼贤,王准,余春江.生物质锅炉典型过热器金属材料表面钝化膜腐蚀特性研究[J].新能源及工艺,2015,3:34-37.
- [12] 何玉武,李宇春,张宏亮.T91钢在碱金属氯化物介质中的高温腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2015,36(11):1021-1025.
- [13] 顾雪梅,蔡昌忠.搪瓷管空气预热器的应用[J].发电设备,2003,4:54-57.
- [14] 侯勇,徐钢,和圣杰,等.电站锅炉空气预热器严重腐蚀的原因[J].腐蚀与防护,2015,36(10):995-999.
- [15] 曹开玉,于红智,孙启明.薄层保温防腐涂料的研制与应用[J].涂料工业,2007,37(2):36-38.
- [16] 马壮,孙方红,李智超,等.热化学反应法制备纳米复合陶瓷涂层及性能研究[J].陶瓷学报,2007,28(2):112-116.
- [17] 穆柏春,张丽娟,谷志刚.化学反应制备陶瓷涂层的

研究[J]. 新技术新工艺, 1997, 16(6): 43-44.

[18] 陈健康, 屠平亮, 周建初. 用热化学反应法制备金属陶瓷涂层-涂层技术值得重视的新发展[J]. 材料工程, 1991, (4): 17-20.

[19] 马壮, 黄圣玲, 李威, 等. 固相反应型 SiO<sub>2</sub> 基陶瓷涂层耐磨性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 16-20.

[20] 华隽石, 王进卿, 池作和, 等. 锅炉受热面复合陶瓷涂层抗高温腐蚀性能试验研究[J]. 电站系统工程, 2016, 32(1): 9-16.

[21] 齐佶, 王红军, 郭晓峰. 纳米陶瓷覆层在华电红雁池电厂#4 锅炉的应用[J]. 发电与空调, 2015, 36(164): 16-20.

[22] 冉蜀勇, 陈涛, 汤敏, 等. 先进复合材料在加热炉及输送管道中的应用研究[J]. 2014, 25(3): 25-27.

[23] 董世知, 闫翠娟, 周鹏. 热化学反应陶瓷涂层技术研究进展[J]. 材料热的处理技术, 2011, 40(22): 130-136.

[24] 刘志平, 范海陆, 李辰. 电站锅炉沾污结渣的处理方法比较[J]. 合成材料老化与应用, 2015, 44(1): 122-124.

[25] 魏琪, 刘旭, 李辉, 等. 抗氧化耐氯腐蚀电弧喷涂铁基粉芯线材[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 92-96.

[26] 林茂峻. 锅炉受热面 NiCr 涂层抗高温热腐蚀机制与性能的研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 07(3): 1603-1673.

[27] 王明怡. 不同 Mo 含量 NiCrMo 系耐蚀合金的制备及特性研究[D], 华北电力大学(北京): 2011 年.

[28] 张小辉, 毛萍莉, 刘正. 锅炉受热面 3 种电弧喷涂层的抗高温腐蚀性能与机理[J]. 材料保护, 2010, 43(10): 58-60.

[29] 王建平, 徐连勇, 许永泰, 等. FeCrAl 和高镍铬合金涂层的抗高温腐蚀性能研究[J]. 中国电力, 2007, 40(4): 54-58.

[30] 崔崇, 胡江, 陆冠雄, 等. 超音速火焰喷涂焰流和粒子流的数值模拟研究[J]. 2010, 2(3): 18-23.

[31] 叶福兴, 崔崇, 杨雪, 等. Microstructures and properties of submicron structural WC-12Co coatings deposited by HVOF[J]. China Welding, 2011, 20(4): 22-27.

[32] V. SENTHILKUMAR, B. THIYAGARAJAN, M. DURAISLVAM, et al. Effect of thermal cycle on Ni-Cr based nanostructured thermal spray coating in boiler tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, (25): 1533-1542.

[33] 张展宇, 常宇, 薛海霞. NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 超音速火焰喷涂的涂层性能[J]. 焊接, 2004, (12): 25-28.

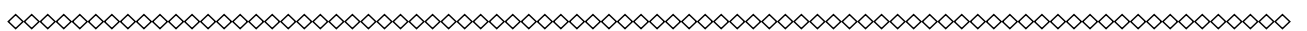
[34] 贾永昌. CFB 锅炉金属受热面的防磨技术[J]. 机械工人热加工, 2007, 5: 40-43.

[35] 李太江, 李巍, 刘宇. 超音速火焰喷涂 NiCr 金属陶瓷涂层的高温硫腐蚀性能[J]. 材料保护, 2011, 11(20): 9-12.

[36] 李太江, 李巍, 李勇. 超音速火焰喷涂制备 NiCr 金属陶瓷涂层的抗高温硫腐蚀与冲蚀磨损性能[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 120-125.

[37] 李贵智, 崔兴国, 孙允利. 热喷焊在锅炉膜式水冷壁中的应用[J]. 焊接, 2000, 11: 29-31.

[38] 孙焕焕, 刘爱国, 孟凡玲. 堆焊 Inconel625 合金的锅炉膜式水冷壁组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(S2): 96-99.



(上接 28 页)

度由原来的 4.94g/cm<sup>3</sup> 提高到 10.84 g/cm<sup>3</sup>, 增加了一倍多。

参考文献:

[1] 难熔金属文集编辑组. 难熔金属文集[M]. 第三分册. 上海: 上海科学技术情报研究所, 1976: 23-26.

[2] 彭志辉, 力汉广. 钨粉局部优先重氧化行为的研究[J]. 矿冶工程, 1999, 19(2): 61-65.

[3] 白智辉. 不同粒度碳化钨的 WC-17Co 等离子涂层组织及摩擦学特性研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(3): 48-53.

[4] Raghunathan S, Bourell D L. Synthesis and evaluation of advanced nanocrystalline tungsten based materials[J]. P/

M Science & Technology Briefs, 1999, 1(1): 9-14.

[5] White G D, Gurwell W E. Freeze dried tungsten heavy alloys[J]. Advances in Powder Metallurgy, 1989, (1): 355-368.

[6] Smith R W, Kim M, Kappor D. Structure and properties of spray formed tungsten base composite[C]. // Advanced Particulate Materials and Process. Princeton, NJ:MPIF, 1997:219-225.

[7] Smith RW, Kim M, Kappor D. Structure and Properties of Spray Formed Tungsten Base Composite[C].//Advanced Particulate Materials and Process. Princeton, NJ:MPIF, 1997: 219 ~ 225.