

S30432 在不同煤灰/烟气环境中的 高温腐蚀行为研究

张民强¹, 黄丽琴², 刘光明², 刘宇钢¹, 汪元奎¹, 毛晓飞³

(1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063; 3. 国电科学技术研究院, 武汉 430066)

摘要: **目的** 研究 S30432 涂覆信源和榆能电厂两种不同硫酸盐含量的煤灰后的腐蚀行为, 探讨 S30432 在 SO₂ 气氛/煤灰环境中的高温腐蚀机制。**方法** 将涂覆煤灰的 S30432 钢试样置于烟气/煤灰中腐蚀, 间隔一定时间取出样品称量, 获得腐蚀动力学曲线。采用扫描电子显微镜、能谱分析仪和 X-射线衍射仪等, 研究腐蚀产物的形貌、成分和物相组成。**结果** 合金发生了氧化和硫化腐蚀, 腐蚀过程中有加速腐蚀阶段。S30432 在低硫含量煤灰腐蚀后未见明显的腐蚀产物剥落, 试样表面生成相对致密且具有保护性作用的 Cr₂O₃ 膜, 腐蚀产物膜较薄。在高硫含量煤灰中, 腐蚀产物分层生长且剥落严重, 腐蚀 2000 h 后失重超过 45 mg/cm², 腐蚀产物层主要由 Fe₂O₃、(Fe,Cr)₂O₃、NiCr₂O₄ 及嵌入腐蚀层的煤灰粒子组成。在腐蚀层/基体界面形成了富 Cr 和 S 的腐蚀层。**结论** S30432 在烟气/信源煤灰环境中比在烟气/榆能煤灰环境中更耐蚀。煤灰中硫酸盐含量增加, S30432 的腐蚀速率显著增加。在高温烟气/煤灰协同作用下, 合金易发生热腐蚀, 铁、镍、铬及其氧化物在合金表面熔盐中的溶解是造成合金耐蚀性降低的原因。

关键词: S30432; 煤灰; 模拟烟气; 高温腐蚀; 硫酸盐; 剥落

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0251-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.034

High Temperature Corrosion Behavior of S30432 in Different Coal Ash/Flue Gas

ZHANG Min-qiang¹, HUANG Li-qin², LIU Guang-ming², LIU Yu-gang¹, WANG Yuan-kui¹, MAO Xiao-fei³

(1. Dongfang Boiler Group Co., Ltd, Material Research Institute, Zigong 643001, China;

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

3. Guodian Science and Technology Research Institute, Wuhan 430066, China)

ABSTRACT: The work aims to study high temperature corrosion behavior of S30432 austenitic stainless steel coated with coal-ash received from Xinyuan and Yulin power plants in 0.3% SO₂ flue gas at 700 °C. Corrosion tests were conducted by placing S30432 steel coated with coal-ash in fuel gas/coal ash. Mass change was obtained by weighting the samples at intervals during the test, and corrosion kinetics of the samples was plotted. Morphology, constituents and phase composition of the corrosion products were investigated by SEM, EDS and XRD. The S30432 steel undergone oxidation, sulfidation corrosion. The ac-

收稿日期: 2018-02-25; 修订日期: 2018-07-21

Received: 2018-02-25; Revised: 2018-07-21

作者简介: 张民强 (1984—), 男, 工程师, 主要从事电站锅炉材料腐蚀与防护应用的研究。

Biography: ZHANG Min-qiang (1984—), Male, Engineer, Research focus: the application research of corrosion and protective.

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.

celerated corrosion stage was observed during the corrosion test. After S30432 corroded in the coal ash with low sulfur content, no obvious corrosion product spallation was observed, a relatively compact and protective Cr_2O_3 film was formed on the surface of the samples, and corrosion product film was thinner. However, the corrosion products grew in layer and peeled off severely in the coal ash with high sulphur content, weight loss exceeded 45 mg/cm^2 after 2000 h. The layer of corrosion products was mainly composed of Fe_2O_3 , $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$, NiCr_2O_4 and coal ash particles embedded in the corrosion layer. Cr and S-enriched corrosion layer was formed on the corrosion layer/substrate interface. Corrosion resistance of S30432 steel in flue-gas/Xinyuan coal-ash is much better than that of S30432 in flue-gas/Yuneng coal-ash. Corrosion rate of S30432 increases significantly with the increase of sulfate content in coal ash. Alloy is susceptible to hot corrosion under the synergistic effect of high temperature flue gas/coal ash. Rapid degradation of corrosion resistance of alloy is attributed to dissolution of iron, nickel, chromium and their oxides in molten salt on the surface and alloy.

KEY WORDS: S30432; coal ash; simulated fuel gas; high temperature corrosion, sulfate; spallation

近年来,随着我国火力发电技术的高速发展,火电机组运行参数不断提高,以 S30432、TP310HCbN 为代表的新型奥氏体耐热钢在超临界 (SC) 及超超临界 (USC) 火电机组中的应用越来越多^[1-2]。大容量、高参数火力发电机组在带来较高系统效率的同时,也使得高温部件的腐蚀失效问题变得更加突出,其管外气氛/煤灰腐蚀和管内水蒸汽氧化问题严重^[3]。火力发电厂中,过热器管迎火面的高温腐蚀与其工作环境的气体温度、气体成分、煤灰组成及煤粉颗粒的运动等诸多因素相关,锅炉管壁的腐蚀速率快,腐蚀区域集中,易引起突发性爆管事故,严重威胁发电站的正常安全运行^[4]。煤质(煤的含硫量、灰中碱金属含量)和管壁附近烟气成分为最主要的影响因素,这直接取决于煤的组成^[5-6]。由于地理位置的特殊性,使中国部分产区煤炭资源中的硫含量波动较大^[7],而且电站锅炉燃煤中 S 含量一般在 1%~4%,甚至高达 10%^[8-9],燃煤烟气中含有的 SO_2 (SO_3) 易引发材料高温腐蚀。本文通过研究 S30432 涂覆信源和榆能电厂两种不同硫酸盐含量的煤灰后的腐蚀行为,探讨了 S30432 在 SO_2 气氛/煤灰环境中的高温腐蚀机制。

1 实验材料及方法

将 S30432 不锈钢管材料切割成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的片状样品,其化学成分(以质量分数计)为: Cr 17%~19%, Ni 7.5%~10.5%, Cu 2.5%~3.5%, Mn $\leq 1\%$, Nb 0.2%~0.6%, C 0.07%~0.13%, Si $\leq 0.30\%$, P $\leq 0.04\%$, S $\leq 0.01\%$, N 0.05%~0.12%, Fe 余量。样品用 180#—1000# 砂纸逐级打磨,在超声波清洗机中分别用去离子水、酒精清洗,冷风吹干后保存待用。

实验使用两种不同成分的煤灰(见表 1),分别取自信源和榆能电厂过热器管壁底部渣(信源煤灰、榆能煤灰)。煤灰用研钵充分研磨,过 200 目筛,加入适量丙酮,调成黏稠浆糊状待用。试样表面涂覆的煤灰量约为 20 mg/cm^2 。将样品放置于模拟烟气(各气体成分以体积分数计,为: CO_2 15%, O_2 3.5%, SO_2

0.3%, N_2 余量)中,保持模拟烟气流量为 20 mL/min ,测试温度为 $700 \text{ }^\circ\text{C}$,腐蚀时间为 2000 h。试样在设定时间内冷却至室温后取出,清洗烘干,用精度为 0.001 mg 天平称量,获得腐蚀动力学曲线。腐蚀实验结束后,采用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜(带能谱分析仪) SEM/EDS 分析产物成分、结构和形貌。

表 1 煤灰的化学成分

Tab.1 Chemical composition of coal-ash

	wt. %					
Coal ash	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2SO_4	Na_2SO_4	Bal.
Xinyuan	47.20	38.03	6.86	0.64	0.56	6.71
Yuneng	48.24	13.36	16.11	2.55	4.15	15.59

2 实验结果

2.1 腐蚀动力学曲线

图 1 为 S30432 在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 、含 0.3% SO_2 气氛/煤灰环境中的腐蚀动力学曲线。由图 1 可见, S30432 在硫酸盐含量低的信源煤灰中,其腐蚀动力学曲线总体表现为轻微增重,前 500 h 试样的腐蚀速率非常缓慢,1000 h 后腐蚀速度增加。硫酸盐含量较高的榆能煤灰样品的腐蚀动力学曲线表现为明显失重,说明样品表面腐蚀产物出现了严重剥落,经 2000 h 腐蚀后,样品失重超过 45 mg/cm^2 。

2.2 腐蚀产物分析

图 2 为涂覆不同煤灰的 S30432 在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 、含 0.3% SO_2 环境中腐蚀后的 XRD 图谱。从图 2 可知,涂覆信源煤灰的试样腐蚀后,表面相为 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 及少量的煤灰成分 SiO_2 和 Al_2O_3 。XRD 图谱中基体峰很强,说明腐蚀产物膜较薄。而涂覆榆能煤灰试样的腐蚀产物衍射峰明显增强,腐蚀产物主要为 Fe_2O_3 、 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ 和少量 NiCr_2O_4 。

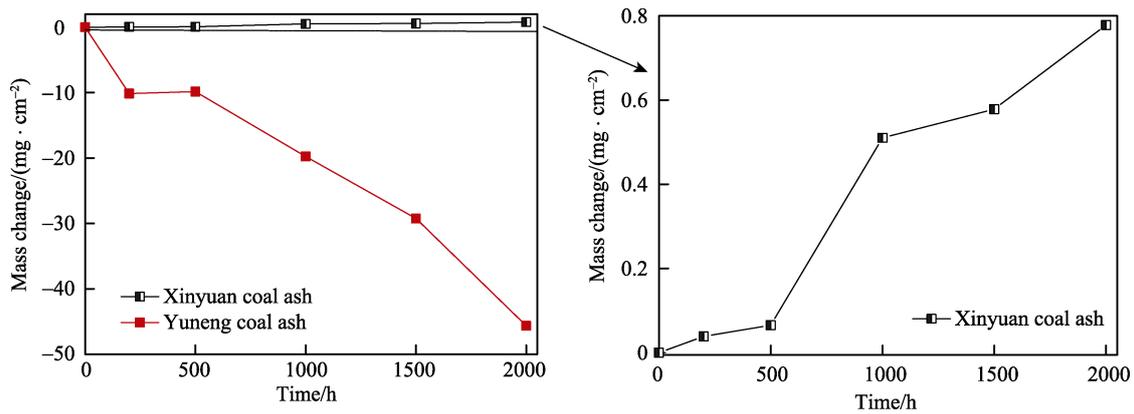


图 1 S30432 在 700 °C、SO₂ 气氛、不同煤灰环境中的腐蚀动力学曲线

Fig.1 Oxidation kinetic curves of S30432 steel in SO₂-containing gases in different ash at 700 °C

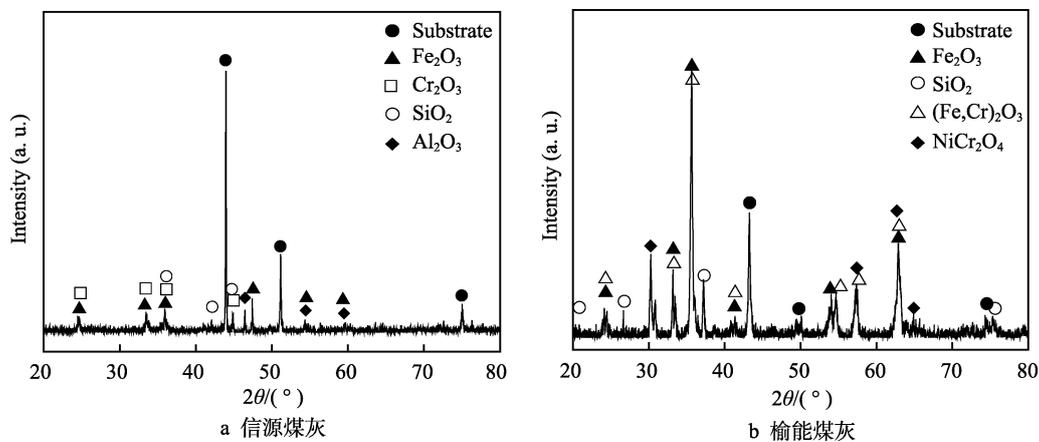


图 2 S30432 在 700 °C、SO₂ 气氛、不同煤灰环境腐蚀后的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of corroded S30432 alloys in SO₂-containing gases in different ash at 700 °C: (a) Xinyuan coal-ash; (b) Yuneng coal-ash

2.3 微观形貌和成分分析

图 3 是 S30432 涂覆不同煤灰并在 700 °C、含 0.3%SO₂ 环境中腐蚀 2000 h 后的表面形貌及能谱图。从图 3a 可见,涂覆信源煤灰的样品腐蚀后,表面较平整,大部分区域弥散分布小颗粒状产物(区域 2),机械磨痕仍然可见,表面样品腐蚀不严重,而局部区

域(区域 1)可见较大颗粒状团聚物。能谱分析(见表 2)表明,区域 1 主要含 Fe、Cr、O 及少量 Al、Si 元素,结合 XRD 分析,其相组成为 Cr₂O₃、Fe₂O₃、SiO₂ 和 Al₂O₃。从图 3b 可见,涂覆榆能煤灰的样品腐蚀严重,腐蚀产物分层剥落,区域 3 和 4 可见分层剥落形成的台阶。能谱分析表明,区域 3 主要由 Fe、Ni、Cr、O 元素组成,区域 4 主要含 Fe、O 和 Si。

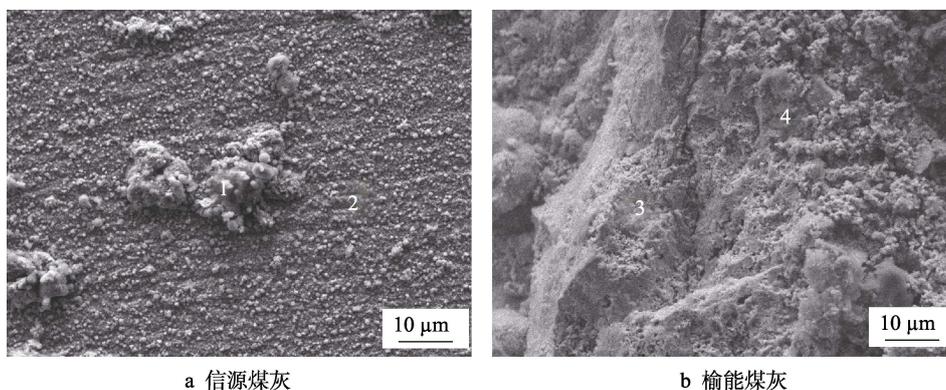


图 3 涂覆不同煤灰的 S30432 在 700 °C 含 SO₂ 烟气中腐蚀后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of S30432 coated with different coal-ash in SO₂-containing flue gases at 700 °C: (a) Xinyuan coal-ash; (b) Yuneng coal-ash

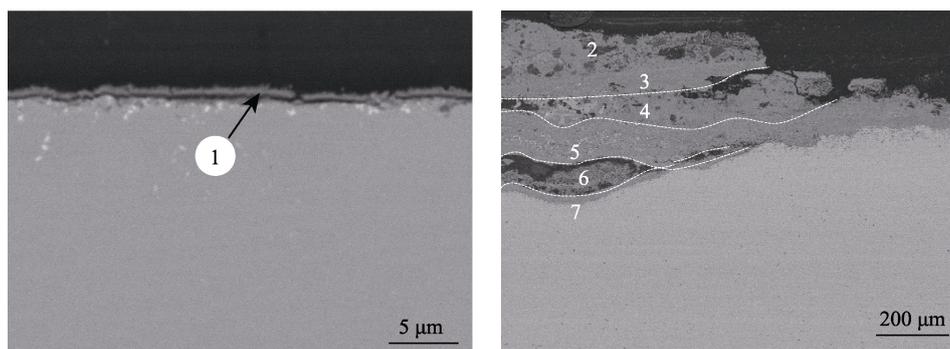
表2 图3中腐蚀对应区域的EDS结果
Tab.2 EDS results of corroded areas in Fig.3

Coal-ash	Point	O	Cr	Fe	Ni	Al	K	Si	Mn	at%
Xinyuan	1	67.17	4.19	7.90		7.57	1.98	10.19		
	2	58.77	27.31	5.03		1.72		5.31	5.31	
Yuneng	3	65.26		24.62	10.11					
	4	58.62		34.97				6.41		

2.4 截面形貌及成分分析

图4是S30432涂覆不同煤灰并在700℃含0.3%SO₂气氛中腐蚀2000h后的截面形貌及能谱图。从图4a可见,涂覆信源煤灰试样的表面腐蚀层很薄(约为1μm),且完整致密。EDS分析结果(见表3)表明,腐蚀产物层主要由Cr、O、Si组成。结合XRD分析结果可知,表面腐蚀产物主要为Cr₂O₃。图4b为涂覆榆能煤灰样品腐蚀2000h后的截面形貌,可见试样表面腐蚀产物层剥落严重,残留腐蚀产物层较

厚且分层,腐蚀层中可见微孔和裂纹,腐蚀层/基体界面处的内层相对致密,腐蚀产物层结构复杂。EDS分析结果表明,最外层(区域3)腐蚀产物由Fe、Cr和O元素组成,腐蚀产物中嵌入深灰色煤灰颗粒(图中2所示)。最外层下部有富Fe层(图中4所示),该层主要由Fe和O组成。区域5所在的腐蚀层主要含Cr和S。在区域5和区域6层间有裂纹,且区域6主要含Fe、Cr、Ni和O。靠近基材侧的区域7中Cr和S含量高,说明硫酸盐含量高的煤灰中,S在此处参与反应。



a 信源煤灰

b 榆能煤灰

图4 S30432在700℃下烟气/不同煤灰腐蚀后试样截面图

Fig.4 Section diagram of S30432 coated with different coal-ash in SO₂-containing fuel gases at 700℃: (a) Xinyuan coal-ash; (b) Yuneng coal-ash

表3 对应图4中腐蚀对应区域的EDS结果
Tab.3 EDS results of corroded areas in Fig.4

Coal-ash	Point	O	Cr	Fe	Ni	Si	S	at%
Xinyuan	1	76.46	20.34			3.2		
	2	70.87				29.13		
	3	67.15	18.45	11.59			2.81	
Yuneng	4	65.40		32.44		2.16		
	5	64.32	29.39				6.29	
	6	55.31	16.94	9.42	18.33			
	7	59.23	38.60				2.17	

3 腐蚀行为分析讨论

锅炉烟气腐蚀是一系列复杂反应,燃煤锅炉主要为硫酸盐型腐蚀^[10-11]。Hussain等人^[12]的试验中,合成煤灰的硫酸盐含量较高,硫酸盐含量高的煤灰会加

速破坏材料表面初步形成的氧化层,进而加速腐蚀进程。实验所选两个不同发电厂的煤灰,其硫酸盐含量差别较大,实验结果表明,S30432在含不同硫酸盐煤灰中的抗腐蚀性能差异较大。硫酸盐含量较高时,合金材料快速腐蚀,而硫酸盐含量较低时,合金材料

表现出良好的耐蚀性。通常,有硫酸盐参与的热腐蚀过程经历两个阶段:初始孕育阶段,发生氧化和硫化,腐蚀速率低,与没有沉积盐的情况类似;加速腐蚀阶段,腐蚀速率快,有时甚至发生灾难性的腐蚀^[13]。

图 1 说明 S30432 更易在榆能灰中发生快速腐蚀。在热腐蚀初始阶段,气氛中的 O_2 可透过样品表面煤灰,与合金中的 Cr 反应生成 Cr_2O_3 氧化膜,在 S30432 表面形成保护膜。热力学计算表明,由于 Cr_2O_3 在 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 的硫酸盐环境中难以形成 K-Na-Cr 三元复合共晶盐^[14],因此, Cr_2O_3 膜的形成使材料在硫腐蚀过程中表现出较好的耐蚀性。

然而 S30432 合金的 Cr 含量有限(17%~19%),随着腐蚀时间的延长,合金基体中产生贫 Cr 区域,使得试样表面的煤灰与基体其他合金组元发生反应,形成了其他不连续的氧化物(如 Ni、Fe 的氧化物 NiO 、 Fe_2O_3),O 与 S 元素能够渗入到合金基体内部,并与合金基体中的成分发生反应,而且 NiO 还会和 Cr_2O_3 发生固相反应,形成尖晶石物质 $NiCr_2O_4$,降低原有 Cr_2O_3 氧化层对合金的保护性^[15]。与此同时, Fe_2O_3 易与煤灰中的硫酸盐(Na_2SO_4 和 K_2SO_4)及气氛中的 SO_2 、 O_2 发生反应,生成复合硫酸盐(Na/K) $_3Fe(SO_4)_3$ 。其中, $Na_3Fe(SO_4)_3$ 和 $K_3Fe(SO_4)_3$ 的熔点分别为 624 °C 和 618 °C^[14],在 700 °C 下复合硫酸盐呈熔融态,熔融盐向内渗透,最初形成的氧化膜不断溶解导致氧化层内产生裂纹和剥离,该过程又不断地加剧着上述过程的进行,如此重复,产生了疏松多孔的 Fe_2O_3 膜层,此时氧化物膜层的保护性能差。除了 Fe 的氧化物, Ni 的氧化物同样会硫酸盐化,形成 K-Na-Fe-Ni 多元复合硫酸盐共晶液相,促进腐蚀的发展,使合金氧化膜遭到破坏^[16]。

本实验中,合金在气氛/榆能煤灰环境中腐蚀后,在氧化膜与基体界面处(图 4b 中的区域 5 和区域 7)有硫富集,由于煤灰中硫酸盐的含量较高会促进复合硫酸盐的形成,当 SO_3 分压超过形成硫酸盐所需的分压时,金属反应速率会明显增大^[4],同时较高的 S 分压会加速 S 向基体扩散,渗入基材与 Fe、Cr、Ni 等元素反应生成金属硫化物,在靠近金属-膜界面区域出现较多的金属硫化物^[11],当 Cr 浓度下降后,难以继续形成保护性 Cr_2O_3 膜。此外在产物内,层氧分压较低时,硫化物更易于被氧化,同时释放出活性 S(例如 $4CrS+3O_2 \rightarrow 2Cr_2O_3+4S$)^[17],生成的 S 沿晶界向合金内部扩散,并与金属元素重新形成硫化物,同时硫化物又被氧化释放出活性 S,此过程循环进行,因此腐蚀过程界面处始终有硫化物的存在。通常情况下,硫化物阳离子空位浓度大,金属原子在硫化物中具有更高的扩散速率,同时其分子体积较大,氧化层中夹杂的硫化物会增加膜层内应力^[18],导致氧化膜开裂,这为腐蚀性气体和合金元素提供快速扩散通道,进一步加快了氧化和硫化速度。而信源煤灰由于硫酸盐含

量低,腐蚀过程中 Cr 消耗量少,因此表面生成了较致密的保护性 Cr_2O_3 层,抑制了 Fe_2O_3 与煤灰中的硫酸盐(Na_2SO_4 和 K_2SO_4)反应形成低熔点共晶盐,因此 S30432 在信源煤灰环境中表现出良好的耐蚀性。

4 结论

1) S30432 在 700 °C、信源低硫酸盐煤灰环境中的腐蚀动力学表现为轻微增重,腐蚀速率较小;而在榆能煤灰中腐蚀速率明显加快,腐蚀产物层大量剥落。

2) S30432 在硫酸盐含量较低的信源煤灰中形成相对致密、保护性良好的 Cr_2O_3 氧化膜,而在硫酸盐含量较高的榆能煤灰中,腐蚀产物分层剥落严重,腐蚀产物层主要由 Fe_2O_3 、 $(Fe,Cr)_2O_3$ 、 $NiCr_2O_4$ 及嵌入腐蚀层的煤灰粒子组成,在腐蚀层/基体界面形成了富 Cr 和 S 的腐蚀层。

3) 煤灰中硫酸盐含量升高会导致 S30432 中的 Cr 快速消耗,样品生成的 Fe_2O_3 与 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 形成低熔点共晶盐,加速了 S30432 的腐蚀。

参考文献:

- [1] 潘家栋. S30432、HR3C 耐热钢管高温老化规律的研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2013.
PAN Jia-dong. Studies on high-temperature aging of the S30432 and HR3C heat resistant steels[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2013.
- [2] 黄丽琴, 刘光明, 张民强, 等. S30432 和 HR3C 奥氏体钢在模拟锅炉高硫气氛中的腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(9): 155-161.
HUANG Li-qin, LIU Guang-ming, ZHANG Min-qiang, et al. Corrosion behavior of S30432 and HR3C austenitic steels in simulated flue gas boiler environment with high sulfur concentration[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(9): 155-161.
- [3] LIU Guang-ming, YANG Hua-chun, LIANG Qin, 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.
- [4] 杨华春, 梁勤, 杨小川, 等. 镍-铬-铁基高温合金 GH984G 在不同 SO_2 浓度烟气中的腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(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 SO_2 content[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(1): 83-88.
- [5] 赵双群, 谢锡善. 粉煤燃烧环境中过热器管材的高温腐蚀[J]. 特殊钢, 2004, 24(6): 36-39.
ZHAO Shuang-qun, XIE Xi-shan. High temperature corrosion of superheater tube materials in pulverized coal-

- fired environment[J]. *Special steel*, 2004, 24(6): 36-39.
- [6] 任善平. 三种奥氏体钢在模拟气氛/煤灰环境中的腐蚀行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
REN Shan-ping. Study on corrosion behavior of three kinds of austenitic steels in simulated flue-gas/coal-ash environments[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [7] 吴正发. 700 °C 超超临界锅炉过热器管候选材料的高温腐蚀试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WU Zheng-fa. Research on high temperature corrosion of candidate alloy of 700 °C candidate: ultra-supercritical boiler superheater[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [8] 周一工. 我国动力用煤特点和燃煤电站锅炉环保措施[J]. *上海电机学院学报*, 2007, 10(1): 38-44.
ZHOU Yi-gong. Features of chinese coal used for drive and environmental protection for coal-fuel power plant boilers[J]. *Journal of Shanghai Dianji University*, 2007, 10(1): 38-44.
- [9] 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, 7(3): 217-220.
LIN Mao-jun. Study on high temperature corrosion mechanism and properly of NiCr coatings boiler heating surface[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering(natural science)*, 2011, 7(3): 217-220.
- [10] 张允书. 热腐蚀的盐溶机理及其局限性[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1992, 12(1): 1-9.
ZHANG Yun-shu. Fluxing mechanism of hot corrosion and limitation[J]. *Journal of Chinese society for corrosion & protection*, 1992, 12(1): 1-9.
- [11] ZENG Z, NATESAN K, CAI Z, et al. Effect of coal ash on the performance of alloys in simulated oxy-fuel environments[J]. *Fuel*, 2014, 117(1): 133-145.
- [12] HUSSAIN T, SYED A U, SIMMS N J. Trends in fireside corrosion damage to superheaters in air and oxy-firing of coal/biomass[J]. *Fuel*, 2013, 113(6): 787-797.
- [13] STEIN-BRZOZOWSKA G, NORLING R, VIKLUND P, et al. Fireside corrosion during oxyfuel combustion considering various SO₂ contents[J]. *Energy procedia*, 2014, 51: 135-147.
- [14] BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. Introduction to the high-temperature oxidation of metals[J]. *Cambridge Univ Pr*, 2006, 2013(1): 273-282.
- [15] LUTHRA K L. Low temperature hot corrosion of cobalt-base alloys: Part I morphology of the reaction product[J]. *MTA*, 1982, 13(10): 1843-1852.
- [16] 刘光明, 刘康生, 毛晓飞, 等. T91 钢在 KCl+Na₂SO₄+K₂SO₄ 熔融盐中的热腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀防护学报*, 2017, 37(1): 23-28.
LIU Guang-ming, LIU Kang-sheng, MAO Xiao-fei, et al. Hot corrosion of T91 steel in molten mixture of KCl+Na₂SO₄+K₂SO₄[J]. *Journal of Chinese society for corrosion & protection*, 2017, 37(1): 23-28.
- [17] 赵虹, 章勤, 吴广君, 等. 锅炉水冷壁在不同浓度 SO₂ 气氛下高温腐蚀的热分析动力学研究[J]. *电站系统工程*, 2006, 21(6): 32-35.
ZHAO H, ZHANG Q, WU G J, et al. Study of thermal analysis kinetics for high temperature corrosion of water wall tube at different density SO₂[J]. *Power system engineering*, 2006, 21(6): 32-35.
- [18] 杨波, 李茂东, 刘光明, 等. 超音速喷涂 Inconel625/NiCr 合金涂层的热腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护报*, 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]. *Journal of Chinese society for corrosion & protection*, 2016, 36(5): 483-488.