

腐蚀与防护

630 °C 煤电锅炉用 S31035 管材的高温腐蚀性能

刘宇钢^{1,2,3}, 刘银河¹, 莫春鸿^{2,3}, 潘绍成^{2,3}, 冉燊铭^{2,3}, 张民强³

(1.西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049; 2.清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731; 3.东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001)

摘要: **目的** 研究 630 °C 煤电锅炉高温级换热部件候选管材 S31035 耐高温硫腐蚀性能。**方法** 涂覆高碱、低碱两类煤灰的 S31035 试样被置于充满模拟烟气 (700 °C、SO₂ 体积分数为 0.3%) 的试验装置中进行反应。试验期间, 对样品进行多次称量, 进而绘出腐蚀动力学曲线。观察试样宏观特征, 且采用 X-射线衍射设备、电子显微镜和能谱分析设备等, 对腐蚀生成物的表面/截面微观形貌及成分进行分析。**结果** 试样在低碱煤灰中腐蚀, 表面生成了相对致密的(FeCr)₂O₃ 氧化膜, 腐蚀生成物层很薄, 腐蚀轻微。而对应高碱煤灰, 腐蚀生成物分层生长且严重剥离, 腐蚀 2 000 h 失重 27 mg/cm², 且在腐蚀层中出现了 Cr 和 S 富集, 发生了较严重的高温硫腐蚀。煤灰的碱金属含量是影响 S31035 耐高温硫腐蚀性能的关键因素。在相同的高硫环境中, 涂覆低碱煤灰时, 试样的耐高温腐蚀性能良好; 涂覆高碱煤灰时, 试样的耐高温腐蚀性能较差。**结论** S31035 可应用于 630 °C 煤电锅炉高温级换热部件, 当燃用高硫煤时, 可通过加强清除部件表面煤灰来抑制高温腐蚀。

关键词: 630 °C 锅炉; S31035; 煤灰; 高温腐蚀; 硫酸盐

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)04-0176-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.017

High Temperature Corrosion of S31035 for 630 °C
Coal-fired Power Plant BoilerLIU Yu-gang^{1,2,3}, LIU Yin-he¹, MO Chun-hong^{2,3}, PAN Shao-cheng^{2,3},
RAN Shen-ming^{2,3}, ZHANG Min-qiang³(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;
3. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Sichuan Zigong 643001, China)

ABSTRACT: The work aims to study high temperature sulfur corrosion resistance of S31035, which is used as the key candidate tube of high-temperature heating surface of 630 °C boiler. Corrosion tests were conducted by placing S31035 steel coated by high or low alkali coal ash in simulated flue gas (700 °C, SO₂ volume concentration of 0.3%). The samples were

收稿日期: 2021-06-30; 修订日期: 2021-08-28

Received: 2021-06-30; Revised: 2021-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0604403)

Fund: Supported by the National Key R & D Program of China (2018YFB0604403)

作者简介: 刘宇钢 (1983—), 男, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为高效超超临界电站锅炉及设计。

Biography: LIU Yu-gang (1983—), Male, Doctoral candidate, Senior engineer, Research focus: high-efficient ultra-supercritical coal-fired boiler study and design.

通讯作者: 刘银河 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为热能工程。

Corresponding author: LIU Yin-he (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: thermal engineering.

引文格式: 刘宇钢, 刘银河, 莫春鸿, 等. 630 °C 煤电锅炉用 S31035 管材的高温腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 176-182.

LIU Yu-gang, LIU Yin-he, MO Chun-hong, et al. High Temperature Corrosion of S31035 for 630 °C Coal-fired Power Plant Boiler[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 176-182.

weighted at intervals during the test, then corrosion kinetics curve was plotted. The macro characteristics of the samples were observed, and the surface/cross-section morphology and composition of the corrosion products were analyzed by X-ray diffraction equipment, electron microscope and energy dispersive spectrometer. The results showed that the S31035 steel undergone corrosion after coated by low alkali coal ash, with relatively dense (FeCr)₂O₃ oxide film on the surface of the sample. Meanwhile corrosion product film was very thin. However, the corrosion products grew in layer and peeled off severely in the high alkali coal ash, weight loss exceeded 27 mg/cm² after 2 000 h. Cr and S were enriched in the corrosion layer, resulting in serious high temperature sulfur corrosion. It showed that the alkali metal content of coal ash was the key factor affecting the high temperature sulfur corrosion resistance of S31035. In the same high sulfur environment, the high temperature sulfur corrosion resistance for low alkali coal ash was good, but for high alkali coal ash was poor. S31035 can be applied to the high temperature heat exchange components of 630 ℃ coal-fired boiler. When burning high sulfur coal with high alkali coal ash, the high temperature corrosion can be inhibited by strengthening the removal of coal ash on the surface of heating surface.

KEY WORDS: 630 ℃ boiler; S31035; coal ash; high temperature corrosion; sulfate

近年来新能源发电日益受到人们的重视,但是煤电装机和发电量占比仍然较大,分别为 60%、70%以上^[1-2]。由于太阳能、风能等新能源发电存在随机性、波动性,煤电依然起着“托底、保供、让路”的重要作用。鉴于中国“多煤”的能源结构特点,在未来很长一段时间内,煤电将继续发挥着至关重要的作用^[3]。提升蒸汽初参数是其节能、降耗和碳减排的主要途径^[4-6]。中国大型煤电锅炉经过 20 余年的发展,目前 600 ℃与 620 ℃高效超超临界锅炉已批量应用。TP310HCbN 与 S30432 常规奥氏体作为高温换热部件管材用于超超临界参数锅炉,但这些管材不再适用于更高蒸汽参数锅炉^[7]。为进一步提升煤电机组效率,中国正在开展发电效率超过 50%的 630 ℃高效超超临界国家电力示范煤电机组的研制工作。对于 630 ℃煤电锅炉高温换热部件,工质侧的压力与温度提高,若仍然采用常规奥氏体材料,管子壁厚大幅增大,难以进行工艺加工。因此,十分迫切需要选用更高等级的新管材,满足要求的管材包括 HR6W、617B、GH984G 以及 S31035^[8-11],综合性价比选用新材料 S31035^[12-13]。

Jamrozik 等^[14]研究了 S31035 在模拟锅炉炉内燃烧产物环境、700 ℃的腐蚀行为,发现氧化物薄膜紧密黏附于材料表面;在 700 ℃高硫酸盐合成灰+高二氧化硫混合气氛中腐蚀后,材料表面出现了坑蚀。Mortazavi 等^[15]运用原位环境扫描电子显微镜在 450 ℃的 O₂/H₂O 气体环境中研究了 KCl 对 S31035 高温腐蚀萌芽阶段的影响,发现数分钟内距 KCl 颗粒较远的 Cr₂O₃ 氧化膜处发生了高温腐蚀。于明明等^[16]研究了 S31035 在不同 SO₂ 体积分数模拟烟气环境中

的腐蚀行为,发现随 SO₂ 体积分数的升高,腐蚀生成物(主要为 Fe₂O₃、Fe₃O₄、NiCr₂O₄)疏松,微裂纹增加,更易剥离。630 ℃高效超超临界锅炉高温级部件面临复杂、恶劣的烟气侧环境,对于煤电锅炉高温级部件,主要由煤中的 S 和 Cl 元素引起高温腐蚀。中国电煤的 Cl 含量低^[17],本文重点关注高温硫腐蚀。

目前报道的 S31035 高温含硫气氛中腐蚀研究成果比较零散且不完整,难以作为 630 ℃高效超超临界锅炉选材的依据。本文选取高、低碱灰两类典型的高硫煤,对 S31035 进行高温腐蚀试验研究,确保 630 ℃煤电锅炉高温级换热部件选材合理。

1 试验^[18-20]

试验材料的化学成分见表 1。将 S31035 管材切割成 10 mm×10 mm×3 mm 的片状样品,用 180、400、600、800、1 000 号系列砂纸逐级打磨,在超声波设备中分别用去离子水和酒精洗涤,冷风干燥备用。

试验模拟气体 CO₂、O₂、SO₂ 的体积分数分别为 15%、5%、0.3%,其余为 N₂。模拟含硫量为 2.5%(质量分数)的高硫煤燃烧所生成的烟气。

试验煤灰的化学成分见表 2。选取高、低碱两类典型的高硫煤灰。对煤灰进行研磨并过 200 目筛,而后用丙酮调制,将调制物涂覆于试验材料的每个面制成试验样品,涂覆量为 40 mg/cm²。试验过程中,分别在 200、500、1 000、1 500、2 000 h 取出,用精度为 0.001 mg 的天平称量,获得腐蚀动力学曲线。腐蚀测试后,使用 X 射线衍射(XRD)仪、电子显微镜(配有能谱分析设备)(SEM、EDS)等设备对腐

表 1 试验用材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of experimental material

Material	wt. %									
	Cr	Ni	W	Cu	Co	Nb	B	N	C	Fe
S31035	22.6	24.6	3.3	2.6	1.5	0.5	0.005	0.45	0.03	44.415

表 2 煤灰的化学成分
Tab.2 Chemical composition of coal ash

Coal-ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Others
Low alkali coal-ash	46.52	37.54	7.43	0.70	0.55	3.64	0.88	1.07	1.67
High alkali coal-ash	45.34	12.45	17.05	1.38	1.34	10.37	1.52	6.07	4.48

蚀生成物的表面/截面微观形貌及成分进行分析。

试验系统示意图如图 1, 高温管式炉的温控精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。试样先置于刚玉管束中, 再放入管式炉内, 随后向管式炉内充入氩气, 升温到 700°C , 继而以 20 mL/min 的速度输入混合气体, 尾气经无害化处理后再排放至周围环境中。

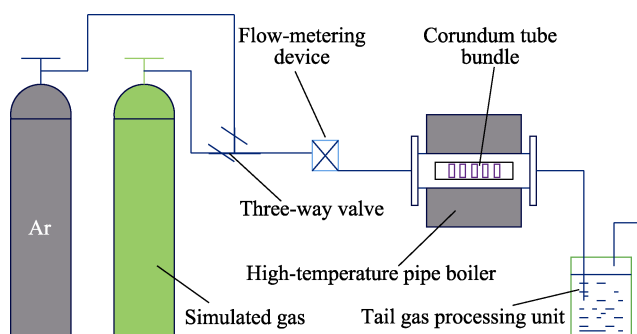


图 1 试验系统

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

2 结果与分析

2.1 腐蚀动力学曲线

图 2 为 S31035 在 700°C 、 0.3% SO_2 气氛、不同煤灰环境中的腐蚀动力学曲线。S31035 在低碱煤灰

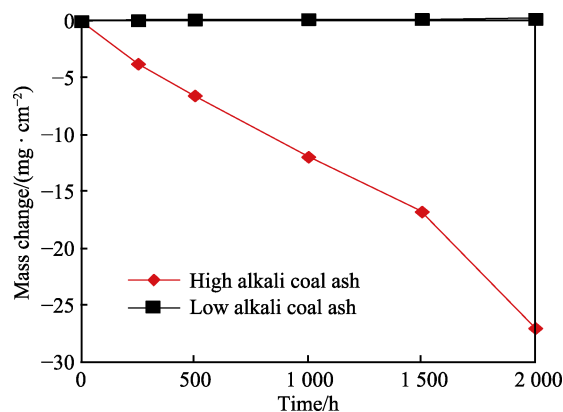


图 2 S31035 在 700°C 、 0.3% SO_2 气氛、不同煤灰环境中的腐蚀动力学曲线

Fig.2 Corrosion kinetic curves of S31035 steel coated with different coal ash at 0.3% SO_2 -containing gas at 700°C

中总体呈轻微增重的趋势; 在高碱煤灰中总体呈明显的失重趋势, 前 1500 h 腐蚀速率相当, 而后进一步增加, 表明试样表面出现了腐蚀生成物的严重剥离, 2000 h 后失重 27 mg/cm^2 。

2.2 宏观腐蚀形貌

图 3 为 S31035 在 700°C 、 0.3% SO_2 气氛、不同煤灰环境中的宏观形貌。从图 3 可见, S31035 在低碱煤灰环境中腐蚀不同时间, 试样表面完整、未见明

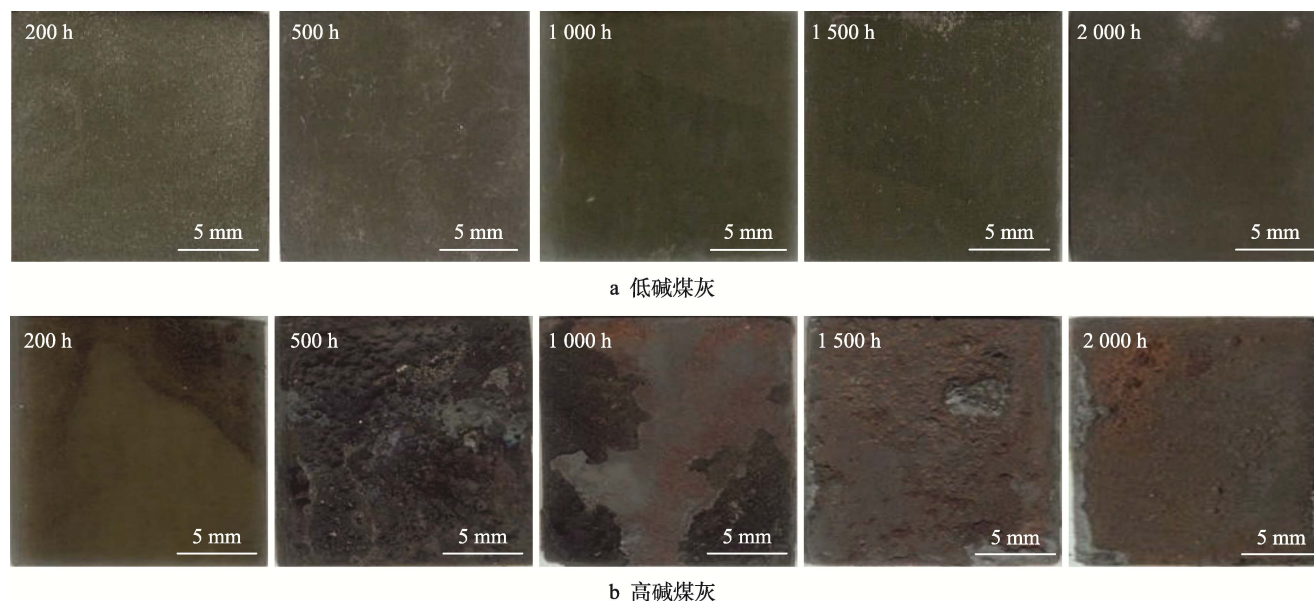


图 3 S31035 在 700°C 、 0.3% SO_2 气氛、不同煤灰环境中的宏观腐蚀形貌

Fig.3 The surface macromorphologies of S31035 steel coated with different coal ash after corrosion in 0.3% SO_2 -containing gas at 700°C : a) low alkali coal ash; b) high alkali coal ash

显的腐蚀生成物剥离, 仅表面颜色变化; 在高碱煤灰环境中腐蚀不同时间的宏观形貌显示, 500 h 后试样表面开始有明显的局部腐蚀, 可见腐蚀生成物剥离。

2.3 腐蚀生成物分析

图 4 为涂覆不同煤灰的 S31035 在 700 ℃、0.3%

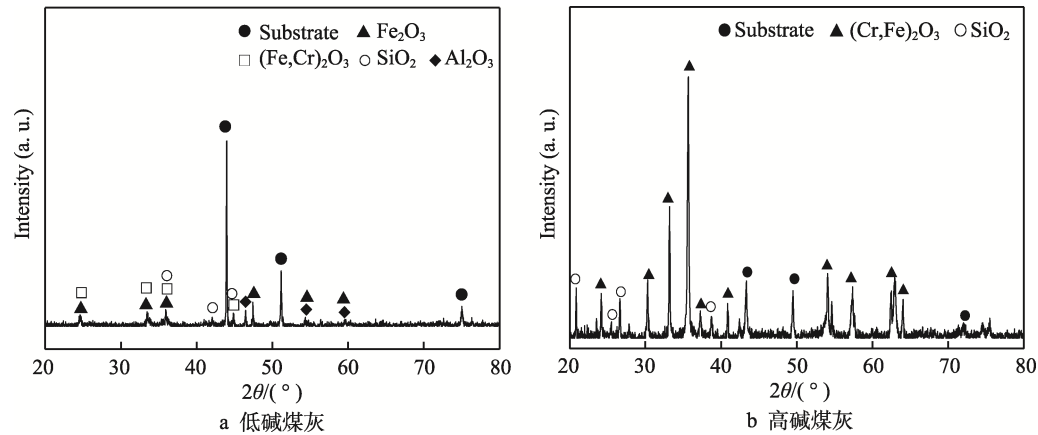


图 4 S31035 在 700 ℃、0.3% SO₂ 气氛、不同煤灰环境中腐蚀 2 000 h 后的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of corrosion products of S31035 steel coated with different coal ash after corrosion 2 000 h in 0.3% SO₂-containing gas at 700 ℃: a) low alkali coal ash; b) high alkali coal ash

2.4 微观形貌及成分分析

图 5 为 S31035 在 700 ℃、0.3% SO₂ 气氛、不同煤灰环境中腐蚀 2 000 h 的表面形貌。对应不同区域的能谱分析数据见表 3。从图 5a 可见, S31035 在低碱煤灰环境中腐蚀后, 试样表面可见球状颗粒 (区域

SO₂ 气氛中腐蚀 2 000 h 后的 XRD 图谱。S31035 试样在低碱煤灰环境中表现为基体峰显著, 表明腐蚀生成物很少, 成分主要为 Fe₂O₃ 和 (Fe,Cr)₂O₃ 以及少量的煤灰成分 SiO₂ 和 Al₂O₃; 而高碱煤灰的腐蚀生成物的衍射峰明显增强, 成分主要为 (Fe,Cr)₂O₃ 和少量的煤灰 SiO₂。

1), EDS 分析表明 (见表 3), 较大球状产物富含 Fe、Cr、O, 以及部分 Al 和 Si, 是现场煤灰腐蚀特征。部分区域分布的小颗粒产物 (区域 2) 富含 Cr 和 O。结合 XRD 可知, 试样表面产生了 Cr₂O₃ 保护膜。从图 5b 可见, S31035 在高碱煤灰环境中腐蚀后, 试样表面腐蚀严重, 腐蚀生成物分层剥离, 区域 3 与

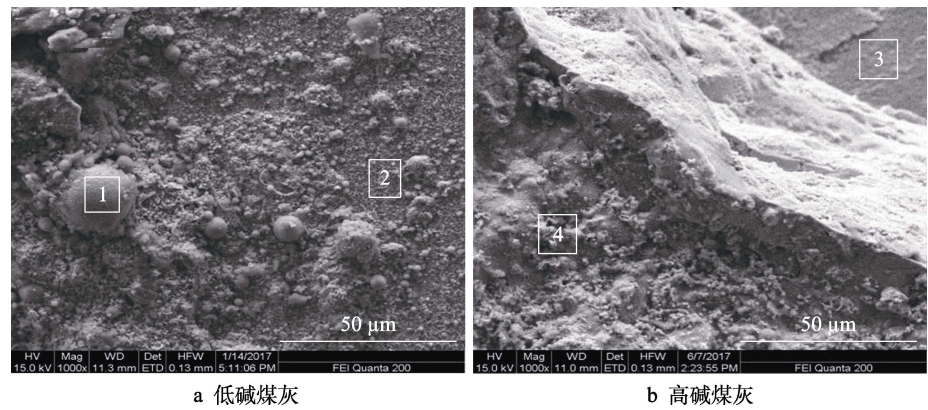


图 5 S31035 在 700 ℃、0.3% SO₂ 气氛、不同煤灰环境中的表面腐蚀形貌
Fig.5 The surface morphologies of S31035 steel coated with different coal ash after corrosion in 0.3% SO₂-containing gas at 700 ℃: a) low alkali coal ash; b) high alkali coal ash

表 3 图 5 中腐蚀对应区域的 EDS 结果
Tab.3 EDS results of corroded areas in fig.5

Coal-ash	Point	wt. %								
		O	Cr	Fe	C	Al	S	Si	Mn	W
Low alkali coal-ash	1	32.69	10.01	47.79		3.98		5.54		
	2	32.91	52.51	7.89				1.77	4.93	
High alkali coal-ash	3	36.01	35.89	14.99			3.59			6.52
	4	38.34		48.68	9.37			3.62		

区域 4 形成了分层剥离的台阶。在未剥离的腐蚀生成物最外层（区域 4）大部分由 Fe 和 O 构成；而在剥离区（区域 3）大部分由 Fe、Cr、O、S 构成，表明腐蚀生成物有硫化物产生，且出现 W 富集。

2.5 截面形貌及成分分析

S31035 在 700 °C、0.3% SO₂ 气氛、不同煤灰环境中腐蚀 2 000 h 后的截面形貌及能谱分析结果，分别见图 6 和表 4。从图 6a 可见，S31035 在低碱煤灰环境中腐蚀后，试样基体截面平直，腐蚀生成物膜层非常薄，未观察到明显的腐蚀生成物剥离。能谱分析

（见表 4）表明，外层（区域 1）主要包含 Fe、Cr、O 元素和少量的 Si。

由图 6b 可知，S31035 试样在高碱煤灰环境中生成了很厚的腐蚀生成物层，并且与基体之间存在显著的横向裂纹，在腐蚀生成物层内发现纵向裂纹，这类纵横交织的裂纹极易导致腐蚀生成物剥离。能谱分析（见表 4）表明，腐蚀生成物层中夹杂着煤灰颗粒，在靠近基体处腐蚀生成物（区域 6）中的 Cr 和 S 含量高；腐蚀层由外向里，Cr 和 S 占比逐渐增大，Fe 占比逐渐减少。在基材附近出现 W 和 Cr 元素的富集。

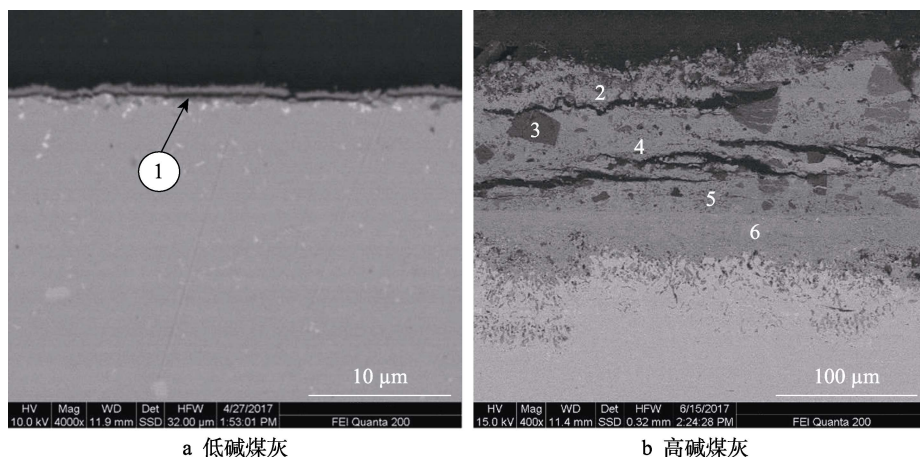


图 6 S31035 在 700 °C、0.3% SO₂ 气氛、不同煤灰环境中的截面腐蚀形貌

Fig.6 The section diagram of S31035 steel coated with different coal ash after corrosion in 0.3% SO₂-containing gas at 700 °C: a) low alkali coal ash; b) high alkali coal ash

表 4 图 6 中腐蚀对应区域的 EDS 结果
Tab.4 EDS results of corroded areas in fig.6

									wt. %
Coal-ash	Point	O	Cr	Fe	C	S	Si	Ca	W
Low alkali coal-ash	1	59.58	19.65	18.11			2.66		
	2	35.40		52.32	10.38		1.89		
	3	57.96					42.04		
High alkali coal-ash	4	36.25	17.34	39.29		3.29		3.83	
	5	36.56	36.25	24.90			2.28		
	6	34.03	54.08			4.58			7.3

3 分析讨论

630 °C 煤电锅炉高温级部件管 S31035 外壁温度可达 700 °C，处于第二煤灰高温腐蚀区域，且腐蚀速率接近峰值^[21]。然而 S31035 在相同的 SO₂ 浓度和温度下，对应高、低碱两类煤灰的腐蚀情况差异很大。结合图 2、图 3，可知 S31035 在高碱煤灰中更易腐蚀，腐蚀生成物剥离严重，而在低碱煤灰中表现为缓慢增重的轻微腐蚀。对于煤电锅炉，高温换热部件炉内段的腐蚀以硫酸盐型为主^[22]。在高温腐蚀初期，O 穿过

煤灰与金属中的 Cr、Fe 发生反应，在 S31035 表面形成(Fe,Cr)₂O₃ 氧化膜。由于 Cr₂O₃ 难与硫酸盐形成低熔点的复合共晶体^[23]，在材料表面能够起到抑制高温腐蚀的作用。而 Fe₂O₃ 易与煤灰中的硫酸盐(Na₂SO₄、K₂SO₄) 以及气体中的 O₂、SO₂ 反应，形成复合型硫酸盐(Na/K)₃Fe(SO₄)₃，其熔点在 700 °C 以下^[24]。由图 4 可知，涂覆 2 种煤灰的试样都产生了铁铬氧化物，腐蚀时间进一步延长，Fe₂O₃ 的消耗和合金基体出现了 Cr 贫化区域，其保护性降低。

本试验温度为 700 °C，复合型硫酸盐呈熔融态，会向试样内部渗透，可不断溶解 Fe₂O₃ 导致试样表层

产生裂纹和腐蚀生成物剥离。涂覆低碱煤灰的试样基体表层出现了非常薄的腐蚀层(见图 6a), 且在表面和截面均未探测到 S 元素(见表 3 和表 4), 表明 S31035 在该腐蚀环境中具备良好的抗腐蚀能力。而涂覆高碱煤灰的试样表面有明显的腐蚀层剥离(见图 5b), 且形成了较厚的分层腐蚀层(见图 6b), 同时表面和截面均发现 S 元素(见表 3 和表 4), 表明涂覆有高碱煤灰的试样产生了高温硫腐蚀。由表 1 可知, 高碱煤灰中的碱金属 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 含量均是低碱煤灰的 2 倍以上, 高碱煤灰加速了复合型硫酸盐的形成。从涂覆低碱煤灰的腐蚀试验结果可知, 为形成复合型硫酸盐或其形成量相当少, 未明显熔化金属表面所形成的氧化膜。

图 6b 显示涂覆高碱煤灰的试样在氧化层和基体界面之间的区域 4 和区域 6 产生了硫富集。硫酸盐含量高, 有大量的 CrS 形成, 在腐蚀生成物内层氧分压较低的情况下, CrS 易于被氧化^[25], 同时释放出活性 S 沿晶界向金属内部迁移并与向外扩散的 Cr 元素重新形成 CrS, 如此循环导致腐蚀过程在腐蚀生成物层内一直有硫化物存在。由于 CrS 阳离子空位浓度和分子占位较大, 腐蚀层中掺杂 CrS 会使内应力增大^[26], 进而导致腐蚀层开裂, 为气相腐蚀物和合金成分的迁移供给了畅通的扩散渠道, 加剧高温腐蚀。

以上分析说明在 700 °C、0.3% SO_2 气氛下, 涂覆煤灰中碱金属含量显著影响了 S31035 高温硫腐蚀。因此, 630 °C 煤电锅炉燃用高硫煤时, 若高温级部件选用 S31035, 则应将煤灰中的碱金属含量作为判断发生高温腐蚀的重要依据。若煤灰中碱金属含量高, 可通过清除部件表面煤灰的方式来抑制高温腐蚀。

4 结论

1) S31035 在 700 °C、含 0.3% SO_2 气氛的低碱煤灰中腐蚀动力学表现为轻微增重, 腐蚀速率很小; 但在高碱煤灰中腐蚀动力学表现为严重失重, 腐蚀速度明显加大, 并伴有腐蚀生成物的大量剥离。

2) S31035 在 700 °C、含 0.3% SO_2 气氛的低碱煤灰中腐蚀, 氧化层平整完好, 可起到抑制进一步高温氧化腐蚀的作用; 而在高碱煤灰腐蚀层中有 Cr 和 S 富集, 发生了高温硫腐蚀。

3) 燃用高硫煤的 630 °C 煤电锅炉时, 若高温级部件选用 S31035, 则应重点关注煤灰中的碱金属含量。若煤灰中碱金属含量高, 可通过加强清除部件表面煤灰的方式来抑制高温腐蚀。

参考文献:

[1] 蒋敏华, 黄斌. 燃煤发电技术发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 1-8, 19.

JIANG Min-hua, HUANG Bin. Prospects on Coal-Fired Power Generation Technology Development[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 1-8, 19.

[2] 朱宝田, 赵毅. 我国超超临界燃煤发电技术的发展[J]. 华电技术, 2008, 30(2): 1-5.

ZHU Bao-tian, ZHAO Yi. Development of Ultra-Supercritical Power Generation Technology in China[J]. Huadian Technology, 2008, 30(2): 1-5.

[3] 徐敏杰, 胡兆光, 谭显东, 等. 中国中长期能源和电力需求及碳排放情景分析[J]. 中国电力, 2012, 45(4): 101-107.

XU Min-jie, HU Zhao-guang, TAN Xian-dong, et al. Scenario Analysis on Mid-Long Term Energy and Electricity Demand and Carbon Emission in China[J]. Electric Power, 2012, 45(4): 101-107.

[4] 陈辉, 王文祥, 严毅. 当前 1 000 MW 超超临界锅炉的主要技术特点[J]. 锅炉制造, 2009(1): 10-14.

CHEN Hui, WANG Wen-xiang, YAN Yi. The Currently Main Technical Characters of 1 000 MW Ultra-Supercritical Boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2009(1): 10-14.

[5] 徐炯, 周一工. 700 °C 高效超超临界技术的发展[J]. 中外能源, 2012, 17(6): 13-17.

XU Jiong, ZHOU Yi-gong. The Development of 700 °C USC Technology[J]. Sino-Global Energy, 2012, 17(6): 13-17.

[6] 周慧云, 洪嘉, 黄健航, 等. 超临界锅炉用材料的高温腐蚀研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 145-152.

ZHOU Hui-yun, HONG Jia, HUANG Jian-hang, et al. Research Progress on the High Temperature Corrosion of Supercritical Boiler Materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 145-152.

[7] 冯伟忠. 我国超临界机组的发展[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(5): 417-422.

FENG Wei-zhong. Development of China's Supercritical Coal Fired Power Generation Unit[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(5): 417-422.

[8] 林富生, 谢锡善, 赵双群, 等. 我国 700 °C 超超临界锅炉过热器管用高温合金选材探讨[J]. 动力工程学报, 2011, 31(12): 960-968.

LIN Fu-sheng, XIE Xi-shan, ZHAO Shuang-qun, et al. Selection of Superalloys for Superheater Tubes of Domestic 700 °C A-USC Boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 960-968.

[9] 毛健雄. 700 °C 超超临界机组高温材料研发的最新进展[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 69-76.

MAO Jian-xiong. Latest Development of High-Temperature Metallic Materials in 700 °C Ultra-Supercritical Units[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 69-76.

[10] 郭岩, 王博涵, 侯淑芳, 等. 700 °C 超超临界机组用 Alloy 617 MOD 时效析出相[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(14): 2314-2318.

GUO Yan, WANG Bo-han, HOU Shu-fang, et al. Aging Precipitates of Alloy 617 MOD Used for 700 °C Ultra Supercritical Unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,

- 34(14): 2314-2318.
- [11] SMITH G D, SIZEK H W. Introduction of an Advanced Superheater Alloy for Coal-Fired Boilers[C]//Corrosion 2000. Houston: NACE International, 2000: 1-11.
- [12] 莫春鸿, 刘宇钢, 王冬平, 等. 更高参数二次再热超超临界锅炉关键技术探讨[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 73-77.
- MO Chun-hong, LIU Yu-gang, WANG Dong-ping, et al. Discussion on Critical Technologies of Double-Reheat Ultra-Supercritical Boiler with Higher Steam Parameters[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 73-77.
- [13] 张晓鲁, 张勇, 李振中. 高效宽负荷率超超临界机组关键技术研发与工程方案[J]. 动力工程学报, 2017, 37(3): 173-178.
- ZHANG Xiao-lu, ZHANG Yong, LI Zhen-zhong. R & D of Key Technologies for a High-Efficient Wide-Load-Range Ultra-Supercritical Unit and the Engineering Schemes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(3): 173-178.
- [14] JAMROZIK P, SOZAŃSKA M. Evaluation of the Applicability of Sanicro 25 Steel in Supercritical Boilers[J]. Solid State Phenomena, 2013, 212: 201-204.
- [15] MORTAZAVI N, INTISO L, ISRAELSSON N, et al. In-Situ Investigation of the Initial Stages of KCl-Induced Corrosion of a Chromia-Forming Steel at 450 °C Using an Environmental Scanning Electron Microscope[J]. Corrosion, 2015, 56: 1874.
- [16] 于明明, 刘光明, 杨华春. 奥氏体耐热钢 Sanicro25 在不同 SO₂ 体积分数模拟烟气中的腐蚀研究[J]. 发电设备, 2019, 33(3): 193-196.
- YU Ming-ming, LIU Guang-ming, YANG Hua-chun. Corrosion Behavior of Austenitic Heat-Resistant Steel Sanicro25 in Flue Gas with Different SO₂ Concentrations[J]. Power Equipment, 2019, 33(3): 193-196.
- [17] 徐通模, 袁益超, 陈干锦, 等. 超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J]. 动力工程, 2003, 23(3): 2363-2369.
- XU Tong-mo, YUAN Yi-chao, CHEN Gan-jin, et al. Developmental Trend of Super-Large Capacity and Ultra Supercritical Boilers[J]. Power Engineering, 2003, 23(3): 2363-2369.
- [18] 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.
- [19] 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]. 中国腐蚀与防护学报, 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 and Protection, 2017, 37(1): 23-28.
- [20] 成丁南, 张知翔, 边宝, 等. 5 种电站锅炉过热器用材料高温腐蚀试验研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 891-897.
- CHENG Ding-nan, ZHANG Zhi-xiang, BIAN Bao, et al. Experimental Study on High Temperature Corrosion of Five Superheater Materials for Power Plant Boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(11): 891-897.
- [21] 赵双群, 谢锡善, SMITH G D. 新型镍基高温合金在模拟燃煤锅炉环境中的腐蚀[J]. 金属学报, 2004, 40(6): 659-663.
- ZHAO Shuang-qun, XIE Xi-shan, SMITH G D. Corrosion of a New Nickel Base Superalloy in Coal-Fired Boiler Environments[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(6): 659-663.
- [22] 周慧云, 洪嘉, 黄健航, 等. 超临界锅炉用材料的高温腐蚀研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 145-152.
- ZHOU Hui-yun, HONG Jia, HUANG Jian-hang, et al. Research Progress on the High Temperature Corrosion of Supercritical Boiler Materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 145-152.
- [23] 赵钦新, 朱丽慧. 超临界锅炉耐热钢研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- ZHAO Qin-xin, ZHU Li-hui. Study on Supercritical Boiler Heat-Resistant Steels[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [24] BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [25] 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, 2005, 21(6): 32-34.
- ZHAO Hong, ZHANG Qin, WU Guang-jun, et al. A Study of Thermal Analysis Kinetics for High Temperature Corrosion of Water Wall Tube at Different Density SO₂ [J]. Power System Engineering, 2005, 21(6): 32-34.
- [26] 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]. 中国腐蚀与防护学报, 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]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(5): 483-488.

责任编辑: 万长清