

表面强化及功能化

复合陶瓷涂层防高碱煤沾污性能研究

邵振龙, 王进卿, 池作和, 张光学

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 针对锅炉燃烧高碱煤时存在的沾污问题, 研究复合陶瓷涂层防高碱煤沾污性能。**方法** 以水冷壁材料 20G 和过热器材料 TP347 为研究对象, 采用料浆法在其表面制备复合陶瓷涂层, 利用扫描电镜及能谱图观察分析实验后试样的微观形貌, 对涂层的防 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰沾污性能进行研究。**结果** 烧结固化后的复合陶瓷涂层表面致密, 与基材结合状态良好。经过 120 h 的 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰沾污实验后, 未喷涂涂层的 20G 及 TP347 钢片试样表面沾污率分别为 20.31%、13.33%、32.31% 和 16%、10%、29%, 而喷涂涂层的两种钢片试样表面沾污率分别为 0.38%、0.26%、0.75% 和 0.26%、0.13%、0.39%, 基本为零。未喷涂涂层钢片试样表面的片状氧化膜结构容易粘附一些细微的 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰颗粒, 涂层表面的一些微裂纹也会使细微颗粒滞留在裂纹区域, 这些细微颗粒难以被压缩空气吹扫清除。**结论** 复合陶瓷涂层隔绝了沉积物与钢材基体直接接触, 自身具有较低的表面能和化学不亲和性, 使沉积物不易粘附, 具有一定的防高碱煤沾污能力。

关键词: 燃煤锅炉; 高碱煤; 复合陶瓷涂层; 料浆法; 沾污; 表面能

中图分类号: TG174.453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0254-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.035

Fouling Resistance of Composite Ceramic Coating to High-alkali Coal

SHAO Zhen-long, WANG Jin-qing, CHI Zuo-he, ZHANG Guang-xue

(School of Metrological Technology and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: The work aims to solve fouling problem existing in boiler burning high-alkali coal by studying fouling resistance of composite ceramic coating to high-alkali coal. With water wall material 20G and superheater material TP347 as study objects, composite ceramic coating was prepared on the surfaces in slurry method. SEM and EDS were used to observe and analyze microstructure of the samples after experiment, and study fouling resistance of the coating to Na_2SO_4 , K_2SO_4 and Zhundong ash. The surface of composite ceramic coating was dense after sintering and curing, and was well bonded to the substrate. After 120 h fouling test of Na_2SO_4 , K_2SO_4 and Zhundong ash, fouling rate of uncoated 20G and TP347 steel sheet samples was 20.31%, 13.33%, 32.31% and 16%, 10%, 29%, respectively, and that of coated 20G and TP347 steel sheet samples was 0.38%, 0.26%,

收稿日期: 2017-07-30; 修订日期: 2017-08-16

Received: 2017-07-30; Revised: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51408574); 浙江省教育厅科研项目 (Y201534242); 浙江省公益技术应用研究项目 (2017C31043); 浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科人才培养计划项目

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51408574), the Technology, the Department of Education of Zhejiang Province in China(Y201534242), the Public Projects of Zhejiang Province(2017C31043), and the Zhejiang Key Discipline of Instrument Science and Technology

作者简介: 邵振龙 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复合陶瓷涂层防结渣。

Biography: SHAO Zhen-long (1989—), Male, Master, Research focus: anti-slagging of composite ceramic coatings.

通讯作者: 王进卿 (1985—), 男, 博士, 主要从事锅炉受热面防护材料研究。

Corresponding author: WANG Jin-qing(1985—), Male, Doctor, Research focus: protection materials of boiler heating surface.

0.75% and 0.26%, 0.13%, 0.39%, respectively, essentially 0%. Some subtle Na_2SO_4 , K_2SO_4 and Zhundong coal ash particles might easily adhere to slice oxide film structure on the surface of uncoated sheet samples, some microcracks on the coating might also hold up fine particles in crack area. And the fine particles could hardly be removed by air blowing with compressed air. Composite ceramic coating prevented sediment from directly contacting with the steel substrate, exhibited lower surface energy and chemical incompatibility, thus the sediment was of low adhesivity and certain fouling resistance to high-alkali coal.

KEY WORDS: coal-fired boiler; high-alkali coal; composite ceramic coating; slurry method; fouling; surface energy

新疆准东地区预计煤炭储量达 3900 亿吨，占全国储量（5.56 万亿吨）的 7%，是中国目前最大的整装煤田^[1]。但由于准东煤中碱金属含量普遍高于我国其他地区动力用煤^[2]，其中的碱金属及其碱金属氧化物在燃烧过程中易发生升华、冷凝^[3]，并与烟气中的 SO_2 、 SO_3 化合形成各种硫酸盐粘结沉积物^[4-5]，从而表现出极强的沾污和结渣特性，不仅降低锅炉的换热效率，严重时甚至影响锅炉安全运行，使得大多数燃煤电站锅炉均无法长期、稳定地燃用该煤种^[6-8]。

在减轻高碱煤沾污方面，有研究者通过配煤改变煤灰熔融特性，以减轻高碱煤的强沾污结渣特性^[9-10]。也有研究者采用特殊溶剂洗煤的方法，对高碱煤进行燃烧前预处理，将其中的钙、钠、钾等洗去，从而改变煤灰的酸碱比，以减轻沾污结渣^[11-13]。也有研究者选用适合准东煤的吹灰器或尾部烟气再循环技术等方法，以减少碱金属在换热面的沉积^[14]。现在工程上解决高碱煤沾污问题主要采用掺烧沾污倾向弱的煤^[9]，这必然会导致燃煤中高碱煤的比例不能太高，从而影响高碱煤的大范围推广使用。

近几年，随着表面防护技术的发展，陶瓷涂层已广泛应用于锅炉受热面的抗高温氧化及腐蚀^[15-18]，但在减缓沾污结渣方面的研究报道较少。本文针对锅炉水冷壁常用的 20G 钢和过热器常用的 TP347 钢，采用料浆法在其表面制备复合陶瓷涂层，对喷涂及未喷涂涂层钢片试样进行 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 及准东煤灰沾污实验，以探究复合陶瓷涂层的防沾污性能及机理。

1 试验材料及方法

1.1 料浆制备

本文采用料浆法制备复合陶瓷涂层，料浆法具有工艺简单、成本低廉、不需要特殊设备、制备周期短等优点^[19]。涂层骨料选取六方氮化硼（h-BN）超细粉体（纯度>99%，平均粒径 500 nm）、石墨粉（纯度>99%，平均粒径 1 μm），采用模数为 2.7 的钾水玻璃作粘结剂。另外为了保证涂层制备、储存、喷涂及固化等工艺的可靠性，还需在搅拌过程中添加一些微量助剂，如乳化剂、分散剂、消泡剂等，按照表 1 所示配方比例，配制初始浆料并搅拌。搅拌均匀后，经

行星式球磨机湿法球磨 2 h 后形成悬浮浆料，过滤封装，制得陶瓷浆料。

表 1 料浆化学组成
Tab.1 Chemical composition of slurry

原材料	石墨	BN	钾水玻璃	去离子水	助剂
含量	1~3	12~15	15~18	59~67	5

1.2 涂层试样制备

将 20G 和 TP347 钢材切割成 20 mm×20 mm×2 mm 的方形薄片，随后采用 40~70 目石英砂对基体进行喷砂处理，使其除锈等级达到 Sa2.5~3（参照 GB 8923—88《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》^[20]），以便涂料附着和烧结。

采用喷涂法将陶瓷浆料涂覆于经喷砂处理的 20G 和 TP347 钢片表面，经室温干燥后，在马弗炉中烧结固化。20G 钢片涂层试样的固化温度从室温升到 450 ℃，升温速率为 3 ℃/min，在该温度下保温 6 h 后随炉冷却取出。TP347 钢片涂层试样的固化温度选取 600 ℃，升温速率、保温时间同 20G 钢片涂层试样。

1.3 对比钢片试样制备

考虑到实际沾污过程中沉积物是粘附在钢材经高温氧化形成的氧化膜上，因此在进行防沾污性能试验前，需制备氧化钢片。对 20G 和 TP347 钢片进行喷砂处理，达到与喷涂涂层钢片相同的除锈等级后，将其放在马弗炉中进行高温氧化，使其表面形成一层致密的氧化膜。20G 和 TP347 钢片的氧化温度与涂层试样的烧结温度一致，分别为 450、600 ℃，氧化 24 h 后取出，采用反射系数测定仪对试样表面进行反射系数测量，再将试样放入马弗炉高温氧化，如此循环，直至前后两次的反射系数测量值基本不再变化。

1.4 防沾污性能测试

考虑到 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 是主要的沾污介质^[4,12]，另外在锅炉运行过程中，一些微细煤灰也会在受热面表面沉积，因此本文采用 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 及高碱准东五彩湾煤灰作为沾污介质，分别对复合陶瓷涂层的防沾污性能进行研究，五彩湾煤灰成分及熔融性数据如

表 2。试样表面附着沾污介质时，会引起表面反射系数的变化，反射系数的变化越大，沾污率越高。通过

测定试样沾污前后反射系数的变化来评定涂层的防沾污性能。

表 2 五彩湾煤灰成分及熔融性数据
Tab.2 Ash composition and fusibility data of multicolored bay ash

煤灰成分/wt%									变形	软化温	流动温
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	温度/℃	度/℃	度/℃
35.65	11.40	14.50	4.45	10.70	10.69	0.02	1.84	7.40	1200	1251	1226

对上述过程制备的涂层钢片及氧化钢片表面进行反射系数测量，记录下沾污前的反射系数初始值。随后在试样表面用毛刷分别涂覆 0.2 g 的 Na₂SO₄、K₂SO₄ 和准东煤灰细粉颗粒，将涂覆后的 20G 和 TP347 试样在马弗炉中灼烧 24 h 后取出，自然冷却后，采用压力为 0.4 MPa 的压缩空气对试样表面进行吹扫，喷枪孔径为 5 mm，喷枪出口与试样距离为 20 cm，吹扫时间为 1 min。将吹扫后的试样进行反射率测量，随后再分别涂覆 0.2 g 的 Na₂SO₄、K₂SO₄ 细粉颗粒和准东煤灰，放入马弗炉灼烧，如此循环，实验进行 5 次后结束。试样的防沾污性能按公式（1）计算：

$$X=\frac{|A_0-A_i|}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：X 为试样表面反射系数的变化率，即试样表面的沾污率；A₀ 为试样沾污前的反射系数；A_i 为试样第 i 次沾污后的反射系数。

对 Na₂SO₄、K₂SO₄ 和准东煤灰细粉颗粒的沾污率数据取三个样品数据的平均值，并采用扫描电镜（SEM，Zeiss Supra 55S）对沾污实验前后的试样进行微观形貌分析。

2 实验结果及分析

2.1 涂层形貌

图 1a 为烧结后复合陶瓷涂层的表面形貌，可以看出，由于料浆成分中含有水玻璃，涂层烧结后呈玻璃质，紧密粘结超细陶瓷粉体骨料，因此涂层表面较致密。但也发现少量气孔及微裂纹，烧结过程中水分的蒸发、涂料中助剂的分解及涂层与钢基材之间热膨胀系数不一致等因素，都会使涂层表面产生气孔和裂纹。图 1b 为烧结后复合陶瓷涂层的截面形貌，可以看出，涂层与基材之间相互嵌合紧密，两者形成冶金镶嵌结构，涂层与基体间具有较好的结合状态，涂层不易剥落。

2.2 沾污性能

图 2 为未喷涂及喷涂涂层的 20G、TP347 钢片试样表面 Na₂SO₄ 沾污率的变化曲线。可以看出，未喷

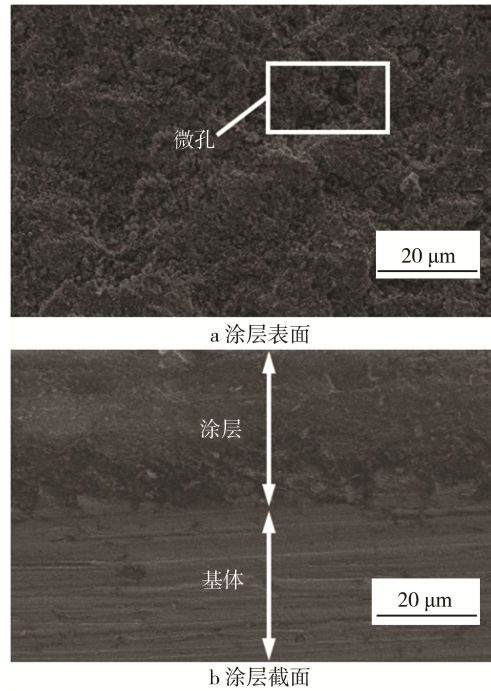


图 1 复合陶瓷涂层形貌

Fig.1 Surface (a) and cross-sectional (b) morphologies of composite ceramic coating

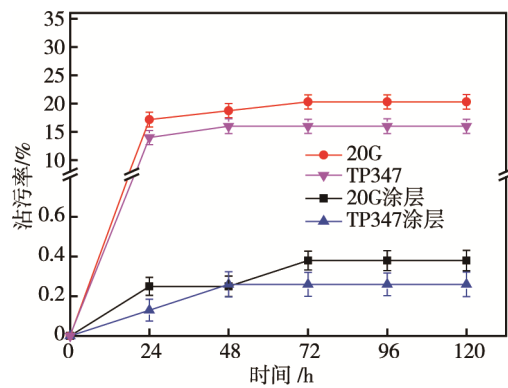


图 2 Na₂SO₄ 沾污率变化曲线

Fig.2 Variation curves for fouling rate of uncoated and coated steel sheet samples when being exposed to sodium sulfate with the number of fouling cycles

涂复合陶瓷涂层的 20G、TP347 钢片试样在进行沾污实验 24 h 后，表面沾污率分别迅速上升至 17.2%和 14%，随后沾污率随实验时间缓慢增加，到 72 h 后基本不再变化，此时沾污率分别为 20.31%和 16%。相

比之下, 喷涂复合陶瓷涂层的 20G、TP347 钢片试样经过相同时间的沾污实验后, 表面沾污率分别为 0.38% 和 0.26%, 基本为零, 说明经过多次沾污实验后, 涂层表面状况仍和沾污实验前基本一致, 复合陶瓷涂层具有一定的防 Na_2SO_4 沾污能力。

图 3 和图 4 为未喷涂及喷涂涂层的 20G、TP347 钢片试样表面 K_2SO_4 、准东煤灰沾污率的变化曲线。未喷涂涂层的 20G、TP347 钢片试样沾污实验 120 h 后, 试样表面 K_2SO_4 、准东煤灰沾污率分别为 13.33%、10% 和 32.31%、29%, 与 Na_2SO_4 沾污类似, 喷涂涂层的钢片试样沾污实验后的表面沾污率基本为零, 说明复合陶瓷涂层具有一定的防 K_2SO_4 和准东煤灰沾污能力。

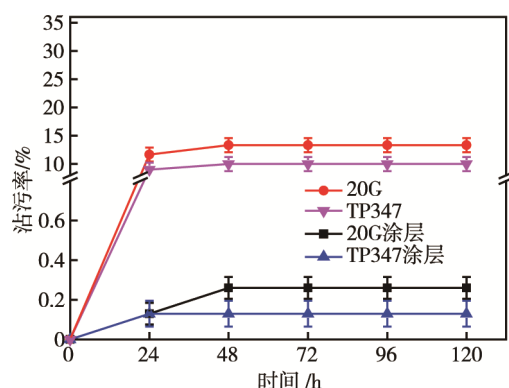


图 3 K_2SO_4 沾污率变化曲线

Fig.3 Variation curves for fouling rate of the uncoated and coated steel sheet samples when being exposed to potassium sulfate with the number of fouling cycles

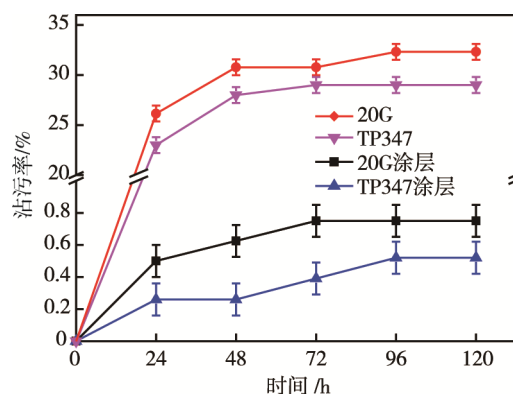


图 4 准东煤灰沾污率变化曲线

Fig.4 Variation curves for fouling rate of the uncoated and coated steel sheet samples when being exposed to Zhundong ash with the number of fouling cycles

2.3 微观形貌及机理分析

通过扫描电镜 (SEM) 观察 20G 钢片试样表面沾污试验后的微观形貌, 如图 5。在 1000 倍放大倍数下 (图 5a), 喷涂涂层的试样表面存在一些微裂纹和气孔, 分布有极少量的 Na_2SO_4 颗粒; 在相同放大倍数下 (图 5b), 未喷涂涂层的试样表面分布着粒径相对较大的 Na_2SO_4 颗粒, 这些粘附的 Na_2SO_4 颗粒使涂层钢片和氧化钢片的表面沾污率上升。

在 5000 倍放大倍数下 (图 5c), 观察到有 Na_2SO_4 颗粒滞留在涂层表面的微裂纹和气孔中, 而在涂层其他致密区域并未检测到。在 10 000 倍放大倍数下 (图 5d), 观察到未喷涂涂层的 20G 钢试样表面经高温氧

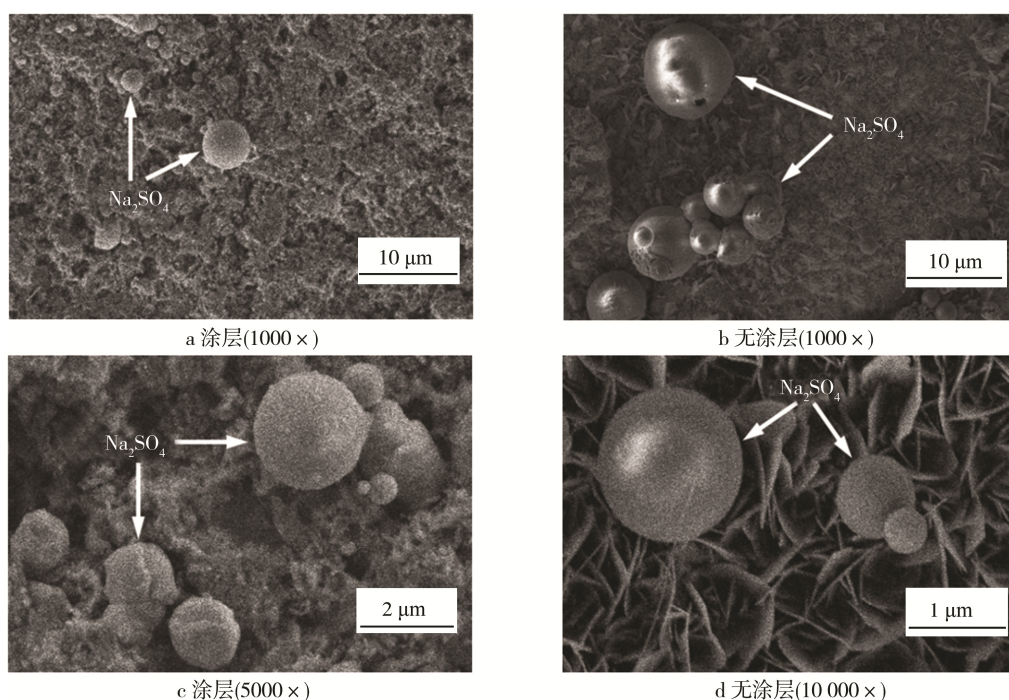


图 5 20G 钢试样表面 Na_2SO_4 沾污微观形貌

Fig.5 Microstructure of Na_2SO_4 fouling on 20G steel: (a) coated (1000×), (b) uncoated (1000×), (c) coated (5000×), (d) uncoated (10 000×)

化后形成片状结构的氧化膜, Na_2SO_4 颗粒与该结构强力结合, 经压缩空气吹扫仍结合在一起, 经扫描电镜观察, 20G 和 TP347 钢片试样在 K_2SO_4 、准东煤灰沾污实验后有类似的微观形貌。

前面的实验结果表明, 喷涂复合陶瓷涂层的钢片具有较好的防高碱煤灰沾污性能。究其原因, 主要是复合陶瓷涂层具有致密的涂层表面、较低的表面能以及与高碱煤灰中碱金属硫酸盐的化学不亲和性。

由于陶瓷骨料采用了超细粉体, 因此烧结之后的涂层表面较为致密, 有效阻止了涂层表面孔隙的生成, 仅有一些微裂纹产生, 使大部分细微颗粒不能粘附于涂层表面, 只有较少部分进入并滞留在气孔微裂纹区域, 而这部分细微颗粒则较难清除。

另外, 陶瓷材料的表面能一般显著低于金属材料, 较低的表面能使其他物质不易于粘附, 所以现在应用于其他领域的不粘材料基本都采用低表面能物质。本文采用的陶瓷材料由于具有低于金属材料的表面能, 使得高碱煤灰不易粘附于表面, 从而使喷涂涂层的钢片试样具有较好的防高碱煤灰沾污性能。

涂层具有防高碱煤灰沾污性能的另外一个主要原因是涂层与碱金属硫酸盐的化学不亲和性。20G 和 TP347 钢材主要成分为铁, 其与碱金属 M 的硫酸盐在高温下会发生如下反应: $\text{Fe} + \text{M}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{FeS} + \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4 / \text{FeO} + \text{M}_2\text{O}$ 。因此, 碱金属硫酸盐颗粒与钢片表面具有一定的化学亲和性, 使得两者之间的粘附力较强, 压缩空气不足以将沾污在钢片上面的碱金属硫酸盐清除。而复合陶瓷涂层主要成分为六方氮化硼, 六方氮化硼的化学性质懒惰, 不易于与其他物质发生化学反应, 因而涂层表面与高碱煤灰的粘附力较小, 通过压缩空气吹扫即可清除大部分高碱煤灰颗粒。

3 结论

1) 经过 120 h 的 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰沾污实验后, 未喷涂涂层 20G 钢片试样表面的沾污率分别为 20.31%、13.33%、32.31%, 喷涂涂层 20G 钢片试样表面的沾污率分别为 0.38%、0.26%、0.75%, 未喷涂涂层 TP347 钢片试样表面的沾污率分别为 16%、10%、29%, 喷涂涂层 TP347 钢片试样表面的沾污率分别为 0.26%、0.13%、0.39%。喷涂涂层 20G、TP347 钢片试样表面的沾污率均远小于未喷涂涂层钢片表面的沾污率, 基本没有沾污, 复合陶瓷涂层具有一定的防 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰沾污性能。

2) 未喷涂涂层钢片试样表面的氧化膜容易粘附一些细微的 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰颗粒, 涂层烧结过程中产生的一些微孔、微裂纹也同样会使细微颗粒进入并滞留在裂纹区域, 这些细微颗粒难以被外力清除。

3) 复合陶瓷涂层具有较好的防 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰沾污性能的原因主要是: 涂层有较低的表面能, 表面较致密, 且与 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 、准东煤灰存在化学不亲和性。

参考文献:

- [1] 严陆光, 夏训诚, 吕绍勤, 等. 大力推进新疆大规模综合能源基地的发展[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(1): 1-7.
YAN Lu-guang, XIA Xun-cheng, LYU Shao-qin, et al. Great Promotion of Development of Large Scale Integrative Energy Base in Xinjiang[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(1): 1-7.
- [2] 贾明生, 张乾熙. 影响煤灰熔融性温度的控制因素[J]. 煤化工, 2007, 35(3): 1-5.
JIA Ming-sheng, ZHANG Qian-xi. Key Factors Affecting Fusion Temperature of Coal Ash[J]. Coal Chemical Industry, 2007, 35(3): 1-5.
- [3] WEBER R, MANCINI M, SCHAFFEL-MANCINI N, et al. On Predicting the Ashbehaviour Using Computational Fluid Dynamics[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 105: 113-128.
- [4] RADHAKRISHNAN P, ZAKKAY V, AGNONE A. Alkali and Gas Emissions from PFB Combustion of Lignite[J]. Combustion Science and Technology, 1986, 50(4-6): 271-281.
- [5] 姜剑锋, 钱静. 锅炉受热面的结灰机理和吹灰器的设置[J]. 锅炉制造, 2003(4): 25-26.
JIANG Jian-feng, QIAN Jing. Cause of Slagging on Furnace and Footblower Arrangement[J]. Boiler Manufacturing, 2003(4): 25-26.
- [6] 董明钢. 高钠煤对锅炉受热而结渣、沾污和腐蚀的影响及预防措施[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 35-39.
DONE Ming-gang. Influence of High-sodium Coal upon Slagging, Contamination, and Corrosion on the Heating Surface of Boilers[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(9): 35-39.
- [7] 樊冲, 汪军, 倪昊. 生物质与煤共燃结渣特性的研究[J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(3): 213-218.
FAN Chong, WANG Jun, NI Hao. Study on Slagging Characteristics of Co-combustion of Biomass and Coal[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2010, 32(3): 213-218.
- [8] 徐晓光, 李水清, 熊刚, 等. 烟气中钾含量对锯屑燃烧过程积灰的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 61-67.
XU Xiao-guang, LI Shui-qing, XIONG Gang, et al. Influence of Potassium on Ash Deposition During Sawdust Combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 61-67.
- [9] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 配煤对降低高灰熔融性煤的三元相图分析[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(3):

- 64-67.
WU Xiao-jiang, ZHANG Zhong-xiao, PLAO Gui-lin, et al. Analysis of Coal Ash Fusion Characteristics of High Fusibility Coal Blending with Low's with Ternary Phase Diagram[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13 (3): 64-67.
- [10] 李寒旭, 陈方林. 配煤降低高灰熔融性淮南煤灰熔点的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 529-533.
LI Han-xu, CHEN Fang-lin. Coal Blending to Reduce the Ash Fusion Temperature of High (Usability Huainan Coal)[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 529-533.
- [11] BESON S A, LLOLM P L. Comparison of Inorganic Constructer in Three Low Rank Coals[J]. Chem Prod Res Dev, 1985, 24(1): 145-149.
- [12] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状田[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 1-12.
ZHANG Shou-yu, CHEN Chuan, SHI Da-zhong, et al. Current Status of the Combustion and Utilization of Coal with a High Sodium Content[J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(5): 1-12.
- [13] 蔡昕. 宁煤烯烃锅炉结渣原因分析及解决方案[J]. 能源工程, 2012(6): 65-68.
CAI Xin. Analysis of the Causes and Solutions to the Slugging of Ningxia-originated Coal-fired Alkene Boiler[J]. Energy Source Engineering, 2012(6): 65-68.
- [14] 阎维平, 梁秀俊, 周健, 等. 300 MW 燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 84-88.
YAN Wei-ping, LIANG Xiu-jun, ZHOU Jian, et al. Ash Monitoring and Soot Blowing Optimization of a 300 MW Coal-fired Utility Boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 84-88.
- [15] 贾中华. 料浆法制备钕合金和钼合金高温抗氧化涂层[J]. 粉末冶金技术, 2001, 19(2): 74-76.
JIA Zhong-hua. High-temperature Oxidation-resistant Coatings for Columbium Alloy and Molybdenum Alloy with Slurry Method[J]. Powder Metallurgy Technology, 2001, 19(2): 74-76.
- [16] 张鲲, 何业东, 孔祥华, 等. 溶胶-凝胶复合料浆热压滤法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 复合涂层[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 94-98.
ZHANG Kun, HE Ye-dong, KONG Xiang-hua, et al. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ Composite Coatings Prepared by Thermal Pressure Filtration of Sol-Gel Paints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28 (6): 94-98.
- [17] 黄敏, 李克智, 王宇. 料浆法制备碳/碳复合材料 Al-Si 合金抗氧化涂层[J]. 材料热处理技术, 2010, 39 (18): 87-89.
HUANG Min, LI Ke-zhi, WANG Yu. Oxidation Resistance of Al-Si Method on Alloy Coating Prepared by Slurry C/C Composite[J]. Material & Heat Treatment, 2010, 39(18): 87-89.
- [18] HA J S, KIM C S, CHEONG D S. Processing and Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ Nanocomposite Coated Alumina by Slurry Dip Coating[J]. Journal of Materials Science Letters, 1998, 17(9): 747-749.
- [19] 马刘宝, 黄志荣. 无机耐高温陶瓷涂层配方研究[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(3): 108-109.
MA Liu-bao, HUANG Zhi-rong. Application of Uniform Design to Mixing Experiments of Inorganic High-temperature Ceramic Coatings[J]. Corrosion & Protection, 2005, 26(3): 108-109.
- [20] GB/T 8923.1—2011, 涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级[S].
GB/T 8923.1—2011, Rust Grades and Preparation Grades of Uncoated Steel Substrates and of Steel Substrates after Overall Removal of Previous[S].