



高碱煤燃烧过程中屏式过热器分层结渣机理研究

谭厚章 魏博 王学斌 王毅斌 阮仁晖 胡中发

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室 陕西 西安 710049)

摘要: 中国的准东煤储量巨大,但由于其 Na、Ca 含量较高,燃烧准东煤的锅炉炉膛出口过热器表面上结渣和沾污问题严重。为了阐明其结渣机理,对某 350 MW 锅炉出口屏式过热器(烟气温度 1 000 °C 左右)的焦样进行分析,发现焦体内部存在明显的分层结构,不同层焦样中元素含量明显不同,化合物形态也存在较大差异。这是由于在焦体发展过程中,随着沉积表面温度逐渐升高,焦体的灰颗粒之间发生差异较大的物理化学反应而形成的。通过对不同层焦样的化合物形态进行整理并详细分析,最终提出了各层不同化合物的形成机理。

关键词: 高碱煤;屏式过热器;分层结构;结渣机理

中图分类号: TM621;TQ038.7

文献标志码: A

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.2016.08.167.05

0 引言

在全世界范围内,煤炭在未来很长一段时间内仍将作为主要的一次能源,尤其是在中国,煤炭消耗量已超过全世界消耗总量的 50%,在发电耗能中煤炭比例仍超过 70%^[1]。2005 年在新疆昌吉地区发现的准东煤田是中国最大的整装煤田,也是中国未来的主要能源基地之一^[2]。准东煤易于开采,价格低廉,具有挥发分高、灰分低、着火点较低等特点,是良好的动力用煤。然而,高含量的 Na 却会引起燃用准东煤的锅炉发生严重的沾污、结渣与腐蚀等问题^[3]。

国内学者在准东煤燃烧过程中碱金属 Na 的赋存形态与迁徙规律^[4]、灰熔融特性^[5]、添加剂对结渣特性的影响^[6]及微细颗粒物的形成^[7]等方面做了很多研究。最近 Ca 和 Fe 在高碱金属煤结渣中所起的作用也引起关注^[8-9]。文献[10]指出在高碱金属煤燃烧过程中,煤中所含的易气化的碱金属化合物迅速挥发,当温度降低时凝结,粘附在受热面和炉墙上形成初始结渣层;或凝结在飞灰颗粒表面成为熔融的碱化物膜,撞击并粘附在受热面或渣层上,进而粘附较大的灰颗粒,为更加严重的结焦提供发展的条件。然而,高碱煤渣体形成过程中发生的化学反应却仍不明确。

文献[8]在燃烧准东煤的某 350 MW 锅炉中沿烟

气流程进行取样分析,发现在炉膛出口水平烟道区域(烟气温度在 1 000 °C 附近)所取灰样中 Ca 与 S 含量明显高于锅炉其他部位所取灰样,但造成这种现象的原因还不清楚。也有研究表明在燃用准东煤的锅炉中会发生燃烧器区域严重结渣,高温过热器、高温再热器沾污堵塞等问题,严重影响锅炉的安全经济运行^[11-12]。

为了解释高碱煤在煤粉炉燃烧过程中水平烟道区域严重结渣的机理,本文在某 350 MW 锅炉屏式过热器取得焦样并进行 X 射线荧光分析(X-Ray Fluorescence, XRF)与 X 射线衍射分析(X-Ray Diffraction, XRD),得到实际焦样的形貌及焦体元素含量分布,并对不同层的焦样化合物形成机理进行详细分析,提出了高碱煤的分层结渣机理。

1 锅炉现场结焦状况

由于准东煤的强结渣性,目前还没有电厂全烧准东煤。为研究准东煤锅炉炉内结焦特性,以准东地区某燃用准东煤掺混高岭土的 350 MW 锅炉作为研究对象。

1.1 燃料特性

从锅炉现场取回煤样进行分析,其工业分析、元素分析、灰成分分析及灰熔融特性如表 1 所示。

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376147,91544108,51306142)

作者简介: 谭厚章(1965—),男,江西吉安人,教授,博士生导师,从事固体颗粒燃烧的着火、结渣、污染物控制等方面的研究工作。E-mail: tanhz@mail.xjtu.edu.cn



表 1 准东煤质特性与灰的特性
Table 1 Properties of coal and ash

项目	数值	项目	数值
工业分析/%	M_{ad} 14.80	灰成分/%	$\omega(\text{SiO}_2)$ 22.98
	A_{ar} 6.92		$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 7.06
	V_{daf} 31.34		$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 12.55
元素分析/%	C_{ar} 46.26		$\omega(\text{CaO})$ 18.94
	H_{ar} 2.21		$\omega(\text{MgO})$ 4.80
	N_{ar} 0.56		$\omega(\text{Na}_2\text{O})$ 3.73
	O_{ar} 11.24		$\omega(\text{K}_2\text{O})$ 1.18
	$S_{t,ar}$ 0.65		$\omega(\text{TiO}_2)$ 0.48
			$\omega(\text{SO}_3)$ 20.44
灰熔融温度/°C	DT 1 255		
	ST 1 279		
	HT 1 283		
	FT 1 285		

从表 1 可见，该煤种灰含量较低，仅有 6.92%。灰中 SO_3 含量达到 20.44%， Na_2O 与 CaO 含量分别为 3.73% 与 18.94%， Fe_2O_3 含量 12.55%， MgO 含量 4.8%， Al_2O_3 含量较低，仅 7.06%。当综合结渣判别指数 R_z 大于 2.5 时，属于严重结渣范围，而通过煤质特性计算发现该煤种 R_z 值为 4，因此在燃烧过程中会出现严重的结渣问题。高含量的 Na 、 Ca 和 Fe 表明该煤种在燃烧过程中可能出现较强的沾污与结渣问题。

1.2 锅炉结焦状况与分析方法

为获得准东煤燃烧过程中水平烟道区域(烟气温度大约 1 000 °C)的结渣状况，在锅炉运行 9 个月停炉时进行观察，发现屏式过热器区域结渣严重，如图 1 a)所示。从炉膛出口位置受热面上取得焦样，其剖面形貌如图 1 b)和 c)所示。从图 1 c)中可见焦样具有明显的分层结构：靠近管壁的第 1 层呈白色，第 2 层呈土黄色，第 3 层呈红褐色，最表面一层呈飞灰颗粒状的土灰色。

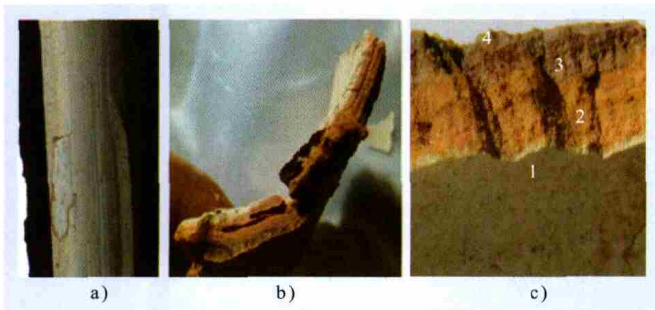


图 1 350 MW 锅炉屏式过热器焦样形貌

Fig.1 Images of the slag at platen superheater of a 350-MW boiler

为获得高碱金属煤燃烧过程中产生分层结渣的机理，将所取焦样按层剥离，分别采用德国 Bruker 公司生产的 S4-Pioneer 型 X 射线荧光光谱

仪，日本理学公司生产的 D/max2400 型 X 射线衍射仪及 JADE5 软件包获得不同层焦样的元素分布和化合物形态。

2 结果与讨论

2.1 分层焦样元素分布

焦体最外层黏附的飞灰层很薄，样品较难分离，因此，重点对靠近管壁的 3 层焦样进行 XRF 分析，定量检测各元素的比例，结果如图 2 所示。从图 2 中可见，除 O 外，含量最大的是 Si、Al、S、Ca，而在第 3 层出现较高含量的 Fe 和 Na，对应颜色也是红褐色。由于 Si、Al 是煤中除 O 外含量最高的元素，除 Na 的硅铝酸盐熔点较低外，其他含 Si 和 Al 的化合物熔点都很高，因此，焦体中高含量的 Si 与 Al 由两部分原因产生：一少部分是由于熔融的含 Na 的硅铝酸盐、硅酸盐等撞击并黏附在壁面上；更多的来自固态飞灰撞击管壁上已沉积的熔渣并被粘住而产生。为研究结渣机理，扣除 Si、Al 的质量份额，发现焦体中主要元素是 Ca、S、Na 和 Fe。S 与 Ca 容易结合，推测 3 层焦体中均含有较多的 CaSO_4 。文献[13-15]的研究表明，Na、Ca 和 Fe 都会引起结渣，但为何会出现分层结渣的现象，仍不清楚。

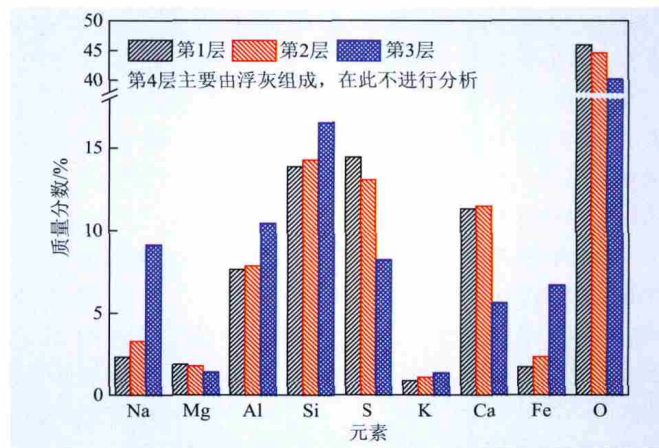


图 2 屏式过热器分层焦体元素分布

Fig.2 Element composition of layered slags at platen superheater

2.2 分层焦样化合物形态

为了分析炉膛出口(1 000 °C左右)烟气中飞灰在受热面上的沉积特性以及 Na、Ca、Fe 在结渣中的作用，对现场取得的 3 层焦样进行 XRD 分析，结果如图 3 所示。各层化合物列表见表 2。

从表 2 中可见，除 CaSO_4 外，第 1 层中化合物主要有 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Ca}_2\text{Si}_8\text{O}_{18}$ 等物质。对比第 2 层与第 1 层的 XRD 图谱发现， $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 的特征峰大幅降低，但出现了 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

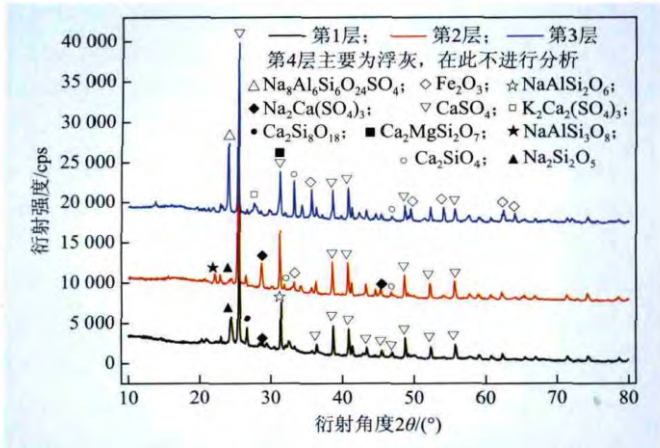


图 3 屏式过热器焦样中分层 XRD 分析图谱
Fig.3 XRD patterns of layered slags at platen superheater

表 2 层状结构中化合物及衍射强度

Table 2 Diffracted intensity of compounds in layered structure

化合物名称	衍射强度/cps		
	第 1 层 (白色)	第 2 层 (土黄色)	第 3 层 (褐红色)
Na ₂ Si ₂ O ₅	5 797	2 956	-
NaAlSi ₂ O ₆	7 594	-	-
Na ₂ Ca(SO ₄) ₃	2 393	4 890	-
CaSO ₄	22 270	25 918	22 690
Ca ₂ Si ₈ O ₁₈	4 480	-	-
NaAlSi ₃ O ₈	-	3 577	-
Ca ₂ SiO ₄	-	2 239	5 470
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	-	8 862	6 675
Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ SO ₄	-	-	10 133
Fe ₂ O ₃	-	-	4 455

的特征峰；Ca₂Si₈O₁₈的特征峰降低，但出现了Ca₂SiO₄的特征峰；另外，出现了Ca₂MgSi₂O₇。第3层的谱图中仍存在较强的CaSO₄特征峰，Ca₂SiO₄与Ca₂MgSi₂O₇仍然存在，同时发现了Na₈Al₆Si₆O₂₄SO₄和Fe₂O₃，而其余物质的峰值都很低。

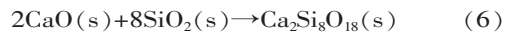
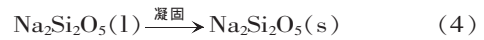
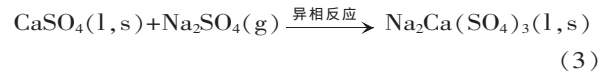
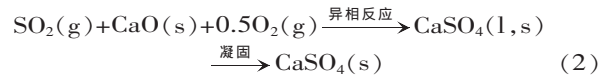
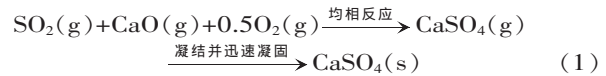
3 分层结渣机理分析

造成焦样中3层化合物成分不同的主要原因在于：焦体形成时，随着焦体发展生长，热阻增大，沉积物表面的温度逐渐升高；不同的温度下，沉积物表面发生不同的物理化学反应，形成不同焦体成分，从而导致焦样出现明显的分层结构。焦样各层的形成推测如下。

第1层：燃烧过程中一部分Ca以气态CaO的形式释放至烟气中，剩余部分以固态CaO、硅酸盐、硅铝酸盐等形式残留在灰中^[16-20]。SO₂与

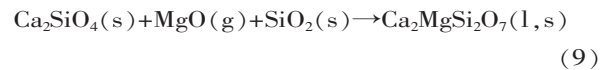
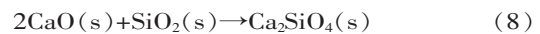
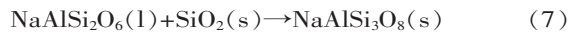
CaO在800~1 000℃范围内将生成大量气态或熔融态的CaSO₄，其中气态CaSO₄将在管壁直接凝结，进而迅速凝固，如式(1)所示；而熔融态CaSO₄将碰撞并粘附在管壁上后由于温度降低而凝固，如式(2)所示。熔融态的CaSO₄可与气相Na₂SO₄反应形成熔融态的Na₂Ca(SO₄)₃，如式(3)所示。硅酸钠(Na₂Si₂O₅)熔点仅为874℃，硬玉(NaAlSi₂O₆)熔点为900~1 000℃，这2种物质本身熔点较低^[17]，在1 000℃的烟气环境下可直接粘附管壁并凝固，如式(4)和式(5)所示。如式(6)所示，固相CaO与SiO₂在接触时会发生反应形成Ca₂Si₈O₁₈，在撞击熔融的沉积表面时被捕捉。低熔点的Na₂Si₂O₅、NaAlSi₂O₆、熔融态CaSO₄、Na₂Ca(SO₄)₃及硅酸钙絮状气溶胶Ca₂Si₈O₁₈在管壁的粘附形成了第1层焦体，是焦体呈现出白色的主要原因。

第1层焦体形成机理推测如下：



第2层：第2层中也存在大量的CaSO₄、Na₂Ca(SO₄)₃、Na₂Si₂O₅和NaAlSi₂O₆，其形成机理与第1层相同，如式(1)~(5)所示。而熔融态的硬玉(NaAlSi₂O₆)与撞击它的灰颗粒中的SiO₂继续反应可生成熔点为1 100℃左右的钠长石(NaAlSi₃O₈)，如式(7)所示。如式(8)所示，CaO与SiO₂反应可生成Ca₂SiO₄，该物质熔点较低，能直接在壁面上粘附。渣样中形成的熔融态Ca₂SiO₄在有气相MgO参与的情况下，可与SiO₂继续反应生成熔点较低的透辉石(Ca₂MgSi₂O₇)，如式(9)所示。

第2层焦体形成机理推测如下：

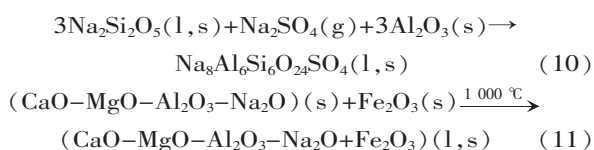


第3层：随着焦体增厚，第3层焦体所处温度升高并接近烟气温度。在第3层中，CaSO₄、Ca₂SiO₄、Ca₂MgSi₂O₇的形成机理与第1、2层相同。在第3层中新出现的蓝方石(Na₈Al₆Si₆O₂₄SO₄)，推测是在较高的烟气温度环境下(1 000℃左右)由熔融态Na₂Si₂O₅与气相Na₂SO₄及灰中Al₂O₃反应生成，如式(10)所示。在第3层中出现了较多的Fe₂O₃，Fe₂O₃是一种广泛应用的助熔剂^[18]。烟气中的Fe₂O₃



可与硅钙镁铝体系 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 形成低温共熔物^[9], 共熔温度在 $1\ 000\sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 。焦体本身是硅钙镁铝 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 体系, 当 Fe_2O_3 颗粒或气溶胶撞击到 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右焦体表面时, 由于其助熔作用就会形成新的熔融态, 从而形成新的焦体, 如式(11)所示。所以只有在最外层焦体中才能捕捉到较多的 Fe_2O_3 , 并且 Fe_2O_3 使第 3 层灰样呈现出红褐色。

第 3 层焦体形成机理推测如下:



4 结论

本文在某 350 MW 锅炉炉膛出口屏式过热器管壁面现场取焦样, 并对不同层焦样中元素成分及化合物形态进行检测, 通过对不同层的焦样化合物形成机理进行详细分析, 最终提出了高碱煤的分层结渣机理, 主要结论如下:

(1) 从现场取样焦体中, 发现在燃烧高碱金属煤的锅炉炉膛出口(烟气温度 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右)烟气环境下, 屏式过热器壁面的结焦焦体呈现出明显的分层结构, 且各层焦体成分有较大区别。这是由于随着焦体厚度的增加, 焦体表面温度不断升高, 在表面会发生不同的物理化学反应。

(2) 靠近管壁的第 1 层焦体, 接近壁面温度, 主要是低熔点的 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 及 CaSO_4 熔融粘附, 使焦体呈现出白色; 第 2 层焦体温度比第 1 层稍高, 除了 CaSO_4 外, 飞灰颗粒撞击焦样表面时形成透辉石($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), 钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 等物质, 更多的 SiO_2 被捕促使焦体颜色呈现出土黄色; 第 3 层温度接近烟气温度, 该层出现了由硅酸钠与硫酸钠及氧化铝反应形成的蓝方石($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4$)。 Fe_2O_3 对硅钙钠体系具有助熔作用, 可以使体系共熔温度下降到 $1\ 000\sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$, 并在焦体表面形成新的熔融态, 所以最外层焦体中捕捉到了较多的 Fe_2O_3 , 外层焦体中 Fe_2O_3 组分是造成该层为红褐色致密结构的主要原因。

参考文献:

[1] BLOCH H, RAFIQ S, SALIM R. Economic growth with coal, oil and renewable energy consumption in China: Prospects for fuel substitution [J]. *Economic Modelling*, 2015, 44: 104-115.

[2] ZHOU J, ZHUANG X, ALASTUEY A, *et al.* Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal

field in the Junggar basin, Xinjiang province, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(1-2): 51-67.

[3] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 1-12.

ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, SHI Dazhong, *et al.* Situation of Combustion Utilization of High sodium coal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5): 1-12.

[4] 魏博, 王学斌, 张利孟, 等. 掺烧废弃硅粉对准东煤钠迁徙及灰熔融影响的实验研究[J]. *中国电力*, 2014, 47(10): 98-102.

WEI Bo, WANG Xuebin, ZHANG Limeng, *et al.* Experimental research on the impacts of zhundong coal blending waste silicon powder on sodium transformation and ash fusion [J]. *Electric Power*, 2014, 47(10): 98-102.

[5] 范建勇, 周永刚, 李培, 等. 准东煤灰熔融温度表征结渣特性的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S2): 478-482.

FAN Jianyong, ZHOU Yonggang, LI Pei, *et al.* Research on Zhundong coal's ash melting temperature characterizing its slagging characteristics [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S2): 478-482.

[6] 刘敬, 王智化, 项飞鹏, 等. 准东煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的迁移规律实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2014, 42(3): 316-322.

LIU Jing, WANG Zihua, XIANG Feipeng, *et al.* Modes of occurrence and transformation of alkali metals in Zhundong coal during combustion [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42(2): 316-322.

[7] LI G, LI S, HUANG Q, *et al.* Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace [J]. *Fuel*, 2015, 143: 430-437.

[8] WANG X, XU Z, WEI B, *et al.* The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium: A study from ash evaporating to condensing [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 150-159.

[9] DAI B, WU X, DE GIROLAMO A, *et al.* Inhibition of lignite ashslagging and fouling upon the use of a silica-based additive in an industrial pulverised coal-fired boiler: Part 2. Speciation of iron in ash deposits and separation of magnetite and ferrite [J]. *Fuel*, 2015, 139: 733-745.

[10] 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.

[11] LI G, WANG C, YAN Y, *et al.* Release and transformation of sodium during combustion of Zhundong coals [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2016, 89(1): 48-56.

[12] WANG C, JIN X, WANG Y, *et al.* Release and Transformation of Sodium during Pyrolysis of Zhundong Coals [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(1): 78-85.

[13] FERNANDEZ-TURIEL J L, GEORGAKOPOULOS A, GIMENO



- D, *et al.* Ash deposition in a pulverized coal-fired power plant after high-calcium lignite combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18(5): 1512–1518.
- [14] VAN EYK P J, ASHMAN P J, ALWAHABI Z T, *et al.* The release of water-bound and organic sodium from Loy Yang coal during the combustion of single particles in a flat flame [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(6): 1181–1192.
- [15] LI H, XIONG J, TANG Y, *et al.* Mineralogy study of the effect of iron-bearing minerals on coal ash slagging during a high-temperature reducing atmosphere [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(11): 6948–6955.
- [16] MATSUOKA K, ROSYADI E, TOMITA A. Mode of occurrence of calcium in various coals [J]. *Fuel*, 2002, 81(11): 1433–1438.
- [17] 俞海森, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 高碱灰渣烧结熔融过程中的物相变化[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(12): 1316–1319.
- YU Haimiao, CAO Xinyu, ZHOU Junhu, *et al.* Phase transformation of high alkaline ash residue on the process of sintering and fusion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1316–1319.
- [18] XUAN W, WHITTY K J, GUAN Q, *et al.* Influence of Fe_2O_3 and atmosphere on crystallization characteristics of synthetic coal slags [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(1): 405–412.
- [19] ZHANG Z, WU X, ZHOU T, *et al.* The effect of iron-bearing mineral melting behavior on ash deposition during coal combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2853–2861.

(责任编辑 韩峰)

Study on Layered Slagging Mechanism at Platen Superheater during High Alkali Coal Combustion

TAN Houzhang, WEI Bo, WANG Xuebin, WANG Yibin, RUAN Renhui, HU Zhongfa

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The reserves of Zhundong (ZD) coal in China are huge. However, due to its high contents of Na and Ca, slagging and fouling are serious on the surface of the platen superheater at the furnace outlet area (at the flue gas temperature of around 1 000 °C). In this paper, to explore the mechanism of the slagging in the high alkali coal combustion process, study is conducted on the slag samples from the platen superheater of a 350-MW boiler. With the study, an obvious layered structure is observed in the slag, and the element compositions and compounds in each layer are very different. This is because in the developing of slags, with the deposit temperature rising, different physical-chemical reactions happen in the ash particles. Through the classification and the detailed analysis on the compounds in each layer, the formation mechanisms of those different compounds are proposed.

This work is supported by National Natural Science Fund of China (No. 51376147, No. 91544108, No. 51306142).

Keywords: high alkali coal; platen superheater; layered structure; slagging mechanism

(上接第 156 页)

ZHANG Yanqi, TAN Qing, WANG Weimin, *et al.* The application of the WESP for the flue gas dedusting of power plant

[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2013(12): 34–37.

(责任编辑 刘明)

The Formation and Control of SO_3 in Coal-Fired Flue Gas

GUO Yanpeng¹, DI Huajuan², PAN Danping³, YANG Linjun³

(1. Sinoma International Environmental Engineering Co., Ltd, Beijing 100102, China;

2. Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of The Patent Office, SIPO, Suzhou 215000, China;

3. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The SO_3 in coal-fired flue gas is harmful to the operating conditions in coal-fired power plants, the environment and the human health. To effectively reduce the SO_3 content in flue gas, based on the in-depth analysis on the sources of SO_3 and the formation of sulfuric acid mist, the control measures employed both at home and abroad to inhibit the formation of SO_3 and reduce its emissions are presented. Meanwhile, the pros and cons of the technologies are analyzed. With the technology analysis, the denitration operation condition optimization and the wet electrostatic precipitator are considered the better ones in effectively controlling SO_3 .

Keywords: coal-fired power plant; flue gas; SO_3 ; pollution control