

混合生物质燃料循环流化床锅炉受热面结焦机理研究

赵小军, 孙锦余, 薛东发, 刘 义

(南电能源综合利用有限公司, 广东 广州 510670)

摘 要:某 75 t/h 生物质循环流化床锅炉长期燃用混合燃料(桉树皮、木尾、木板、竹子和工业合成板),在实际运行过程中高温过热器和低温过热器区域结焦严重。考虑到不同生物质燃料特性的差异性,了解混合生物质燃料燃烧中壁面的结焦机理尤为迫切。研究了 5 种生物质燃料的灰成分和灰熔点特性,并对该循环流化床锅炉结焦严重的高温 and 低温过热器受热面区域的结焦和积灰样品进行物理和化学特性表征。研究结果表明:该锅炉所燃用的生物质燃料中,竹、木尾和木板的钙和钾含量高,灰中 CaO 含量在 30% 左右, K_2O 含量在 10% 以上;桉树皮硅和铝含量高,灰中 SiO_2 含量高达 62.4%;工业合成板与木尾含有较多的氯元素,灰中氯含量分别为 0.670% 和 0.865%。5 种生物质除竹和工业合成板灰熔融温度较低外,其余生物质灰熔融温度高,软化温度在 1 200 $^{\circ}C$ 以上。过热器区域的结焦呈分层结构:高温过热器焦样的外层较硬,中层包含白色的 KCl 晶体和飞灰颗粒,外层以及飞灰颗粒均以 $Ca_2Al_2SiO_7$ 、 SiO_2 、KCl、 $Ca_2MgSi_2O_7$ 等为主;低温过热器焦样外层的灰成分与高温过热器侧焦样的组分相同,但白色中层的 KCl 晶体含量更高,其同烟气中 KCl 蒸气的冷凝析出密切相关。

关键词:生物质;循环流化床;结焦机理;灰熔融性

中图分类号:TK16

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)04-0117-06

Study on slagging mechanism of multiple biomass co-combustion on heating surface in a circulating fluidized bed boiler

ZHAO Xiaojun, SUN Jinyu, XUE Dongfa, LIU Yi

(Nandian Synthesis Energy Utilization Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: A 75 t/h biomass circulating fluidized bed (CFB) boiler burns mixed fuels for long time, including eucalyptus bark, wood tail, wood board, bamboo, and industrial composite board. On the high-temperature superheater and low-temperature superheater, a severe slagging phenomenon was observed during actual operation. As a result, it's critical to investigate the slagging mechanism of mixed biomass fuels while considering the characteristics of various biomass fuels. The slagging samples from a biomass CFB boiler's high-temperature superheater and low-temperature superheater were collected firstly. Following that, the physical and chemical properties of the collected samples were investigated by analyzing the ash composition and ash fusion temperatures. The results show that among the biomass used in the boiler, bamboo, wood tail and wood board have high calcium and potassium content, with approximately 30% CaO content and more than 10% K_2O content. Eucalyptus bark contains high silicon and aluminum, with an ash content of SiO_2 as high as 62.4%. Industrial composite board and wood tails have high levels of chlorine, and the chlorine content in the ash is 0.67% and 0.865%, respectively. In addition to bamboo and Industrial composite board, others have high ash fusion temperatures with a soften temperature above 1 200 $^{\circ}C$. The slagging samples from high-temperature superheater area have a layered structure: the outer layer of the slagging sample is hard, the middle layer contains white KCl crystals and fine particles, and the outer layer of slagging and ash particles are made of $Ca_2Al_2SiO_7$, SiO_2 , KCl, $Ca_2MgSi_2O_7$. The low-temperature superheater's outer slagging samples have the same composition as the high-temperature superheater's. However, white KCl crystal content in the middle layer is higher, which is related to the condensation and precipitation of KCl vapor in the flue gas.

收稿日期:2021-04-09;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CE21040923

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1910000);国家自然科学基金资助项目(51761125012)

作者简介:赵小军(1967—),男,江苏兴化人,高级工程师,研究方向为节能技术。E-mail: zhaoxiaojun@csg.cn。通讯作者:孙锦余,高级工程师,研究方向为余热余压利用。E-mail: sunjy@csg.cn

引用格式:赵小军,孙锦余,薛东发,等.混合生物质燃料循环流化床锅炉受热面结焦机理研究[J].洁净煤技术,2021,27(4):117-122.

ZHAO Xiaojun, SUN Jinyu, XUE Dongfa, et al. Study on slagging mechanism of multiple biomass co-combustion on heating surface in a circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 117-122.



移动阅读

Key words: biomass; circulating fluidized bed boiler; slagging mechanism; ash fusibility

0 引言

生物质能是除煤、石油和天然气之后的第四大能源^[1]。我国每年生物质能资源可折合 15 亿 t 标准煤,主要包括农业废弃物、林业废弃物和生活垃圾等^[2]。生物质能由于具有资源丰富、可再生、分布广泛等优点,受到广泛关注^[3]。生物质发电兼具经济、生态与社会等综合效益,不仅能大大减少我国能源结构中对煤炭资源的依赖程度,而且可废物利用,有利于社会可持续发展^[4-5]。

目前循环流化床掺混多种生物质废弃物燃烧过程中,由于生物质含有较多的氯和钾等元素,导致生物质锅炉内严重结焦、积灰^[6-7]。冯砚厅等^[8]研究了某生物电站水冷壁腐蚀机理,爆管的管壁外表存在大量碱金属氯化物和少量硫化物,是造成腐蚀的主要原因。Li 等^[9]通过某生物质循环流化床高温过热器的沉积研究,发现沉积物内层主要成分为 KCl 和 K₂SO₄,大块的沉积物是由其气态在高温下黏附在受热面管壁并不断捕获灰颗粒形成。在生物质燃烧过程中,易挥发的碱金属氯化物在高温下进入气相,与烟气、飞灰共同流经锅炉受热面后,在受热面上凝结、吸附灰颗粒^[10-11]。不同生物质混燃过程中,生物质灰可能会形成低熔点物质^[12],导致更为严重的结焦^[13]。生物质燃烧中烟气的氯化物浓度不高,且腐蚀结焦的发生大多具有区域性。因此,直接的气相反应腐蚀在生物质燃烧中不是主要矛盾,而由高温导致的颗粒物黏性增大而形成的沉积层中引起的腐蚀更为关键^[14]。陈福东^[15]分析了某生物质锅炉高温过热器管腐蚀机理,提出温度区间对腐蚀程度影响很大,在管壁温度低于 450 ℃时,其管壁腐蚀较轻;温度高于 520 ℃时,整体腐蚀速度急剧上升。关注受热面温度及燃料组分至关重要,实际锅炉中是多种生物质掺烧,混燃后不同生物质灰组分之间会发生物理和化学反应,但目前鲜见混燃下对受热面结焦行为的深入研究。因此,很有必要对现运行的混合生物质燃料循环流化床锅炉中的焦样进行结焦机理分析。

本文选取某 75 t/h 生物质循环流化床锅炉燃用的 5 种生物质废弃物(竹、桉树皮、木尾、工业合成板以及木板),采用 X 射线荧光光谱仪分析其化学元素组成、HR-8000B 灰熔点测定仪测试其灰熔点,通过 X 射线衍射分析仪测定现场沿程获取的灰样和及焦样的化学组分,以此推断混合生物质燃料

循环流化床锅炉受热面结焦机理。

1 试验

1.1 生物质燃料特性

某 75 t/h 生物质发电厂长期混烧竹、桉树皮、木尾、工业合成板以及木板 5 种生物质,其混燃比例为:竹:桉树皮:木尾:工业合成板:木板=1:3:3:1:2,工业分析见表 1,可知,木尾水分近 50%,燃烧特性较差;竹子、工业合成板和木板挥发分高,在 70%左右,具有良好的燃烧特性;桉树皮灰分较高(46.56%),挥发分低。按比例混合后,生物质具有较为良好的燃烧特性和较低的灰分。

表 1 5 种生物质的工业分析

Table 1 Proximate analysis of five biomass %				
燃料	M_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}
竹	12.09	69.02	14.64	4.25
桉树皮	9.13	35.33	8.98	46.56
木尾	49.05	34.96	8.43	7.56
工业合成板	8.42	71.36	17.03	3.19
木板	16.29	66.08	15.63	2.00

表 2 为 5 种生物质低温灰的元素组成(氧化物形式),其制灰方法参照 GB/T 28731—2012。该方法在 550 ℃下制灰,可以保证灰中可挥发的成分损失很少。竹、木尾和木板属于木质生物质,钙含量较高,其灰中的 CaO 含量近 30%;木板的钾含量极高,其灰中的 K₂O 达 36%,高含量碱金属可使结焦更为严重;桉树皮的低温灰以硅元素为主,其灰中的 SiO₂达 62.4%。工业合成板灰中的钛含量较高,推测是板上喷钛白的白漆所致。

1.2 生物质循环流化床

循环流化床的额定蒸发量为 75 t/h,过热蒸汽温度为 540 ℃,如图 1 所示。高温过热器及低温过热器位于旋风分离器后,且高温过热器区域烟气温度的大于 500 ℃。在循环流化床内,炉膛横截面积较小、风速较大。在停炉期间可观测到炉膛内无结焦现象,说明在烟气中气相腐蚀不是构成管壁腐蚀的主要原因。在锅炉受热面底部的省煤器及空预器上也无明显堵塞和积灰现象,主要是由于该区域温度较低,灰颗粒黏性低。但高温过热器及低温过热器上的结焦现象明显,且沉积较多细灰。

1.3 受热面结焦及取样

结焦情况如图 2 所示,高温过热器中焦样硬度较大,部分地区有搭桥现象;低温过热器中搭桥现象

表 2 生物质灰的元素组成

Table 2 Elemental compositions of biomass ash

样品	Cl	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	CO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	CaO
竹	0.21	0.82	0.84	1.71	4.03	2.73	5.88	11.60	10.10	28.80	30.60
桉树皮	0.14	0.68	0.27	0.37	0.16	1.30	5.89	17.20	3.92	62.40	6.70
木尾	0.87	0.47	2.80	2.80	3.17	3.71	3.84	9.11	15.90	26.40	29.00
工业合成板	0.67	20.00	1.89	2.55	1.19	2.54	6.39	15.00	9.42	21.60	15.80
木板	0.15	0.24	9.24	3.05	6.63	2.35	2.09	2.94	36.00	7.01	28.10

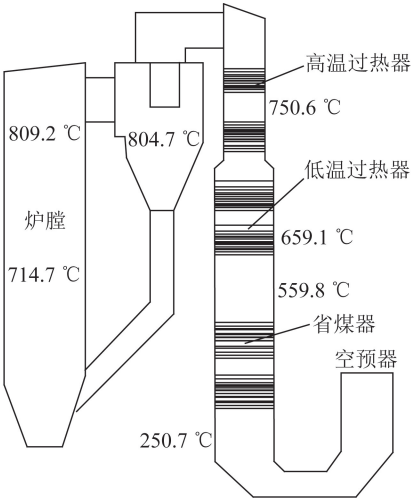


图 1 循环流化床示意

Fig.1 Schematic diagram of circulating fluidized bed boiler

明显,伴有较多细灰,细灰下为硬度不大的焦块。高温过热器和低温过热器的焦样实物如图 3 所示。



(a) 高温过热器 (b) 低温过热器

图 2 循环流化床结焦状况

Fig.2 Slagging condition of circulating fluidized bed boiler

图 3(a) 为高温过热器管壁处的焦样,外层为远离管壁侧,表层呈较规则的熔融后凝固态,表皮颜色略深,硬度较大;将焦样从中间断开,有不规则的分层现象,内含部分颗粒细小的细灰并聚集部分白色晶体。图 3(b) 为低温过热器处的焦样,外层远离管壁侧,表面附着细灰,无熔融过的痕迹,与高温过热器相比,中间白色晶体明显增多,灰焦硬度更小。

2 试验结果与分析

2.1 灰熔融特性

根据 GB/T 219—2008 测定生物质样品的灰熔



(a) 高温过热器



(b) 低温过热器

图 3 不同区域焦样实物图

Fig.3 Slag pictures in different areas

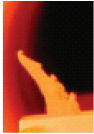
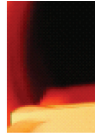
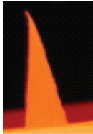
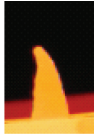
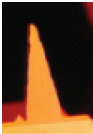
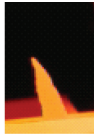
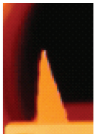
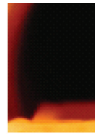
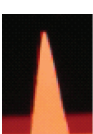
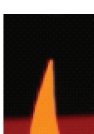
融性。灰锥随温度的升高呈现不同的特征形态,根据特征形态可分为变形温度(DT)、软化温度(ST)、半球温度(HT)和流动温度(FT)。

表 3 为 5 种生物质灰和混合灰的特征温度,为避免锅炉受热面结渣,要求炉膛出口温度应低于生物质灰变形温度的 50~100 °C^[16]。工业合成板的变形温度较低,为 1 029 °C,其余生物质灰的变形温度均高于 1 100 °C。由表 2 可知,工业合成板灰中含有较高的 K₂O 和 SiO₂,结合其较低的变形温度,可推测灰中较易生成低熔点的含 K 硅酸盐^[17-18]。除竹的软化温度为 1 179 °C 外,其余 4 种生物质软化温度均大于 1 200 °C,桉树皮的软化温度高达 1 311 °C;除竹子的流动温度较低外,其余生物质的流动温度均在 1 300 °C 以上。生物质灰的灰熔融性与多种组分有关,其均含有较高的元素,但元素含量也是重要影响因素。由于竹灰中含有较高的 Ca、K、Si、Al 元素,会形成钙长石、钙黄长石等矿物相,并在共熔作用下使其灰熔融温度降低^[12]。根据各生物质灰熔融温度,炉膛不易结焦。

结焦的产生源于不同生物灰的互相反应。从混合灰的成分上,桉树皮灰占混合灰的 80% 以上,木尾灰占 13% 左右,由于这是在试验尺度上进行的灰熔融性分析,与实际锅炉内的结焦存在差异,但仍可

表3 5种生物质的灰熔融性

Table 3 Ash fusion temperatures of five biomass

生物质	DT/℃	ST/℃	HT/℃	FT/℃
竹				
	1 139	1 179	1 196	1 216
桉树皮				
	1 170	1 311	1 439	1 500
木尾				
	1 220	1 275	1 279	1 320
工业合成板				
	1 029	1 240	1 296	1 369
木板				
	1 120	1 278	1 416	1 478
混合灰				
	1 150	1 240	1 302	1 408

以看到与桉树皮的灰熔融性相比,混合灰的灰熔融温度明显下降。由表2可知,木板灰中含有36% K_2O 和28.1% CaO ,桉树皮灰中含有62.4% SiO_2 和17.2% Al_2O_3 ,各生物质所含主要元素差异较大,但在混燃过程中,无机组分易相结合,形成钙长石、钙黄长石类的矿物相以及易挥发、易冷凝的钾盐,造成严重的结焦现象。

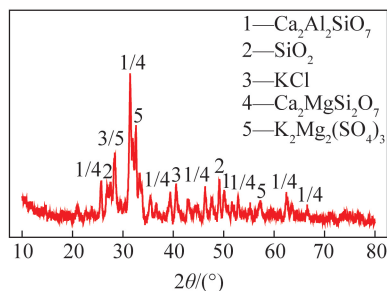
2.2 典型灰焦的化学成分

2.2.1 高温过热器结焦样品

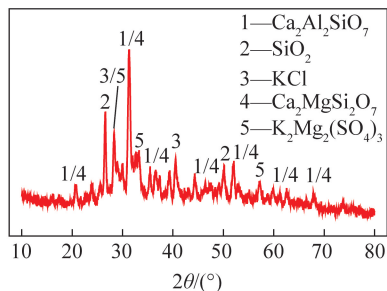
根据高温过热器焦样(图3(a))的物理特性,可分为外层坚硬部分、中间分开后灰色的细颗粒物以及白色的晶体物质。其中白色晶体由小勺刮取多块焦样得到。将3部分焦样分别磨至0.074 mm (200目)以下,在烘干箱中105℃烘干2 h。

高温过热器的XRD谱图如图4所示,可知高温过热器焦样中外层坚硬的部分与中间灰色的细颗粒物化学组成相似,均为 $Ca_2Al_2SiO_7$ 、 SiO_2 、 KCl 、 $Ca_2MgSi_2O_7$ 等,其中钙黄长石 $Ca_2Al_2SiO_7$ 易与其他长石类物质发生低温共融反应^[12]。李楠等^[19]通过相图分析得到长石类物质存在多个低温共熔点,钙长石、钙黄长石等长石类物质会形成低温共熔体。内层细颗粒灰样与外层坚硬表皮成分一致,随着焦样层变厚,传热效果变差,表层温度升高,焦样由于熔点较低,表面熔化,并进一步黏附烟气中的飞灰颗粒,焦样变大且外层坚硬、内层含有部分细灰。

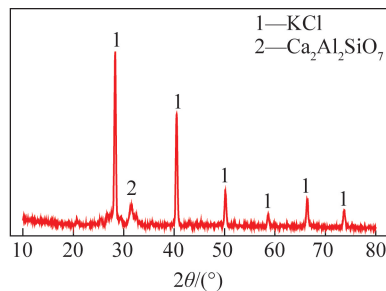
高温过热器焦样内层还存在白色晶体,其主要存在于靠近管壁侧的夹层中,与灰色细颗粒物呈分层分布。白色晶体主要为 KCl ,是燃烧过程中生物



(a) 高温过热器焦样外层



(b) 高温过热器内层细灰



(c) 高温过热器内层白色晶体

图4 高温过热器焦样XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of slag in high-temperature superheater

质以气相形式释放至烟气中^[20],在受热面冷凝析出。温度较高时,其黏性较大,与灰颗粒物构成初始黏结层。对于含氯燃料的燃烧,宋景慧等^[21]研究了某南方燃用桉树叶、桉树枝等农林废弃物的循环流化床高温受热面腐蚀问题,发现垢样是由烟气中

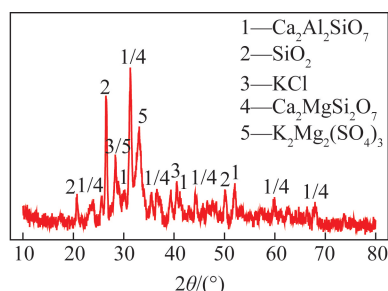
碱金属氯化物和熔化的灰颗粒接触受热面凝结并在受热面生长积聚形成,这与本高温过热器的焦样分析基本一致。

在高温过热器区域,细灰颗粒与 KCl 晶体共同构成初始黏结层,进而吸附细灰颗粒,导致传热恶

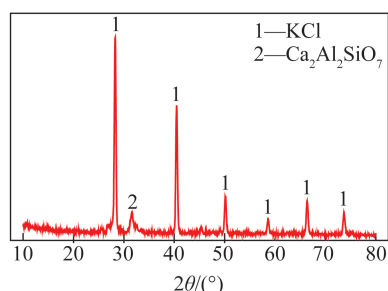
化。由于细灰颗粒物,特别是长石类物质会发生共熔反应,熔点下降,外层呈熔融态,进一步黏附细灰颗粒物,导致结焦恶化,在管壁间搭桥造成堵塞。

2.2.2 低温过热器结焦样品

图5为低温过热器外层的灰样以及内层的白色晶体样品的XRD谱图。低温过热器焦样的灰色部分由 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 SiO_2 、 KCl 、 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ 等组成,白色晶体是较为纯净的 KCl 。低温过热器焦样与高温过热器焦样最大区别在于低温过热器外层的焦样为非熔融后的凝固态(图3(b)),焦样外层较疏松,这是由于低温过热器烟温低,灰颗粒未融化的缘故。



(a) 低温过热器焦样灰色颗粒



(b) 低温过热器焦样白色晶体

图5 低温过热器焦样XRD图谱

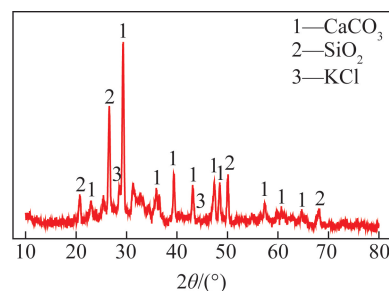
Fig.5 XRD patterns of slag in low-temperature superheater

由图2可知,低温过热器区域的结焦情况比高温过热器区域更严重。杨文等^[22]研究生物质燃烧过程中 Cl 和碱金属的析出特性时发现,在 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 燃烧时,大量 Cl 和 K 以 KCl 形式释放。由于低温过热器区域温度低于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,大量 KCl 等具有较高黏性的物质冷凝析出。对比图2(a)、(b)发现,低温过热器中白色晶体量远大于高温过热器,因此推测低温过热器烟气中大量 KCl 气体冷凝, KCl 固体在温度较高时黏性较大,进而继续吸附细灰颗粒物,导致严重的积灰结焦现象。

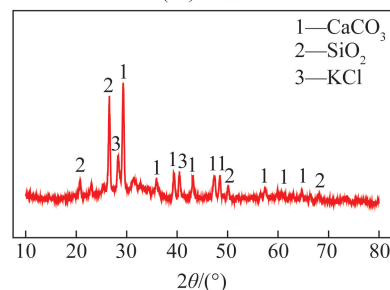
2.2.3 尾部受热面积灰样品

省煤器和空预器的飞灰的XRD图谱如图6所示。在省煤器和空预器区域,除 SiO_2 和 KCl 外,还有 CaCO_3 ,由于炉膛内温度过高, CaCO_3 会发生分解形成氧化钙;但在尾部受热面,由于温度低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,且 CO_2 浓度较高,飞灰中的 CaO 易重新生成 CaCO_3 。

研究表明^[23], CaO 在烟气冷却过程中与 CO_2 反应生成方解石(CaCO_3),由于部分木质生物质燃料 Ca 含量高,使飞灰中含有较多的 CaCO_3 。



(a) 省煤器



(b) 空预器

图6 省煤器和空预器飞灰的XRD图谱

Fig.6 XRD patterns of fly ash in economizer and air preheater

3 结 论

1) 竹、桉树皮、木尾、工业合成板和木板5种生物质灰的元素组不同:竹、木尾和木板等木质生物质 Ca 、 K 含量高,桉树皮 Si 、 Al 含量高。除竹和工业合成板灰熔融温度较低外,其他生物质灰熔融温度高,软化温度在 $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

2) 高温过热器区域,细灰颗粒由 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 SiO_2 、 KCl 、 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ 等组成,与 KCl 晶体共同构成初始黏结层,黏附入射细灰颗粒后导致传热恶化。由于细灰颗粒物会发生共熔反应,熔点降低,因此外层呈熔融态,进一步吸附细灰颗粒物,导致结焦恶化。

3) 低温过热器焦样的灰色部分由 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 SiO_2 、 KCl 、 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ 等组成,白色晶体较纯净的 KCl 。低温过热器烟气中大量 KCl 气体冷凝, KCl 含量较高时黏性较大,继续黏附细灰颗粒物,导致严重的积灰结焦现象。

参考文献(References):

- [1] 于运峰,吴秀芬,李卫东,等. 林业生物质能源发展趋势及现状探析[J]. 现代园艺,2019(22):188-189.
YU Yunfeng, WU Xiufen, LI Weidong, et al. Analysis on the development trend and status quo of forestry biomass energy [J]. 2019 (22):188-189.

- [2] 袁振宏,雷延宙,庄新姝,等. 我国生物质能研究现状及未来发展趋势分析[J]. 太阳能,2017(2):12-19,28.
YUAN Zhenhong, LEI Yanzhou, ZHUANG Xinshu, et al. Analysis of current and future development trends of china's biomass energy research[J]. Solar Energy, 2017(2):12-19,28.
- [3] 黄梅,吕豫辉. 我国生物质能利用现状及发展趋势[J]. 科学与财富,2017(29):104.
HUANG Mei, LYU Yuhui. Current status and development trend of biomass energy utilization in my country[J]. Science and Wealth, 2017(29):104.
- [4] 马龙海,邓宇昆,董胜亮. 我国生物质发电现状分析及研究[J]. 电力勘测设计,2012(3):70-74.
MA Longhai, DENG Yunkun, DONG Shengliang, et al. Research on current situation of biomass power plants in China[J]. Electric Power Survey & Design, 2012(3):70-74.
- [5] 蒋大华,孙康泰,元伟,等. 我国生物质发电产业现状及建议[J]. 可再生能源,2014,32(4):542-546.
JIANG Dahua, SUN Kangtai, QI Wei, et al. Development of biomass power generation industry and suggestions in China[J]. Renewable Energy, 2014,32(4):542-546.
- [6] 宋鸿伟,甄郎伟. 生物质锅炉高温过热器腐蚀机理的研究[J]. 锅炉制造,2010(5):14-18.
SONG Hongwei, ZHEN Hanwei. Study on mechanism of high temperature superheater corrosion of biomass fired boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2010(5):14-18.
- [7] 支元珍. 生物质锅炉高温过热器腐蚀原因分析及对策[J]. 科技创新与应用,2020(14):122-123,126.
ZHI Yuanzhen. Cause analysis on corrosion of high-temperature superheater of biomass boiler and the countermeasure[J]. Technology Innovation and Application, 2020(14):122-123,126.
- [8] 冯砚厅,李中伟,张东文,等. 某生物电站锅炉水冷壁腐蚀原因分析[J]. 热加工工艺,2011,40(12):202-203,206.
FENG Yanting, LI Zhongwei, ZHANG Dongwen, et al. Analysis on corrosion cause of water wall in biologic power station boiler[J]. Hot Working Technology, 2011,40(12):202-203,206.
- [9] LI Lianming, YU Chunjiang, HUANG Fang, et al. Study on the deposits derived from a biomass circulating fluidized-bed boiler[J]. Energy & Fuels, 2012,26(9):6008-6014.
- [10] 龚彬. 生物质锅炉受热面沉积机理与腐蚀特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2015:35-44.
GONG Bin. Mechanism study on deposit build-up and corrosion of heating surfaces in biomass-fired boiler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015:35-44.
- [11] 李海英,张泽,姬爱民,等. 生物质灰结渣和腐蚀特性[J]. 环境工程技术学报,2017,7(1):107-113.
LI Haiying, ZHANG Ze, JI Aimin, et al. Behavior of slagging and corrosion of biomass ash[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017,7(1):107-113.
- [12] 刘炎泉,程乐鸣,季杰强,等. 添加剂对高碱煤钠迁移和灰分烧结温度的影响[J]. 燃料化学学报,2018,46(11):1298-1304.
LIU Yanquan, CHENG Leming, JI Jieqiang, et al. Influence of additives on sodium release and ash sintering temperature of a high-alkali coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018,46(11):1298-1304.
- [13] 李政. 生物质锅炉过热器高温腐蚀研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2010:55-69.
LI Zheng. Study on high temperature corrosion of superheater in biomass boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2010:55-69.
- [14] 韦威,黄芳,余春江,等. 生物质燃烧设备高温腐蚀问题初探[J]. 能源工程,2011(2):23-28.
WEI Wei, HUANG Fang, YU Chunjiang, et al. Primary investigation of high-temperature corrosion problems in biomass combustion equipment[J]. Energy Engineering, 2011(2):23-28.
- [15] 陈福东. 生物质锅炉高温过热器管腐蚀机理的研究及对策[J]. 锅炉制造,2018(5):40-42.
CHEN Fudong. Study on corrosion mechanism of high temperature superheater tubes in biomass boiler and countermeasures[J]. Boiler Manufacturing, 2018(5):40-42.
- [16] 阎维平,陈吟颖. 生物质燃料结渣特性分析与判别[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2007,34(1):49-54.
YAN Weiping, CHEN Yinying. Study on slagging characteristics of biomass fuels[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2007,34(1):49-54.
- [17] ZHU Yiming, ZHANG Hao, NIU Yanqing, et al. Experiment study on ash fusion characteristics of cofiring straw and sawdust[J]. Energy & Fuels, 2018,32(1):525-531.
- [18] NIU Yanqing, WANG Zhizhou, ZHU Yiming, et al. Experimental evaluation of additives and $K_2O-SiO_2-Al_2O_3$ diagrams on high-temperature silicate melt-induced slagging during biomass combustion[J]. Fuels, 2016,179:52-59.
- [19] 李楠,姚伟,赵勇纲,等. 相图法在准东高钠煤掺烧研究中的应用[J]. 热力发电,2016,45(11):49-53.
LI Nan, YAO Wei, ZHAO Yonggang, et al. Application of CALPHAD method in cocombustion of Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2016,45(11):49-53.
- [20] JOHANSEN Joakim M, JAKOBSEN Jon G, FRANDSEN Flemming J, et al. Release of K, Cl, and S during pyrolysis and combustion of high-chlorine biomass[J]. Energy & Fuels, 2011,25(11):4961-4971.
- [21] 宋景慧,胡平. 大型生物质直燃锅炉高温受热面腐蚀问题分析[J]. 锅炉技术,2013,44(2):56-60.
SONG Jinghui, HU Ping. Analysis of high-temperature heating surface corrosion problems in large-scale biomass-fired boiler[J]. Boiler Technology, 2013,44(2):56-60.
- [22] 杨文,纪晓瑜,董凯,等. 生物质燃烧过程中 Cl 及碱金属 K、Na 的析出特性[J]. 太阳能学报,2015,36(12):3072-3075.
YANG Wen, JI Xiaoyu, DONG Kai, et al. Precipitation characteristics of Cl and alkali metals K and Na during biomass combustion[J]. ACTA Energetica Solaris Sinica, 2015,36(12):3072-3075.
- [23] 张振. 炉排燃烧生物质电厂飞灰利用的研究[D]. 南京:东南大学,2016:16-27.
ZHANG Zhen. Study on the utilization of fly ashes from biomass grate-fired power plants[D]. Nanjing: Southeast University, 2016:16-27.