

研究简报

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161657

Shell 炉合成气冷却器分层积灰特性

韩瑞午, 谭厚章, 魏博, 王毅斌, 张朋

(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: 以某 Shell 气化炉合成气冷却器严重积灰结垢区域的灰样为研究对象, 通过 X 射线荧光光谱仪、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜等对其物化特性进行表征, 并分析积灰的形成机制。结果表明, 灰样内部存在明显的分层结构: 最底层呈红色, 结晶程度最高且质地坚硬, 主要矿物组成有 CaSO_4 、 Fe_2O_3 、 FeS 等; 中间层呈黄色, Fe、S 含量降低, 结晶程度和硬度下降; 最外层呈灰色, Fe、S 含量最低, 为非晶体结构且松软多孔。各灰层间颜色、硬度和内在矿物组分的较大差异, 主要是由于在积灰发展过程中, 沉积表面温度升高导致沉积层的黏附作用和烧结作用不同。而低熔点含铁矿物的选择性沉积和富集, 是初始灰层形成的主要原因。

关键词: 气化; 合成气冷却器; 结垢; 分层结构; 烧结; 初始灰层

中图分类号: TQ 546.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 05—2148—07

Characteristics of layered ash deposition in Shell coal gasification syngas cooler

HAN Ruiwu, TAN Houzhang, WEI Bo, WANG Yibin, ZHANG Peng

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

Abstract: Serious ash deposition and fouling from the synthetic gas cooler in Shell gasifier was studied. The physicochemical characteristics of samples were investigated by X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) respectively to explore the mechanisms of ash accumulation problem. The results showed that the deposition had an obvious layered structure. The inner layer, which presented red color, had the highest degree of crystallization and stiff structure. Its dominant mineral components were calcium sulfate, iron oxide and ferrous sulfide. The middle layer presented yellow color. The amount of Fe and S, the crystallinity and hardness all decreased. The outer layer, which presented grey color and had the lowest amount of Fe and S, was amorphous, soft and porous. The differences of color, hardness and mineral components among three ash layers are due to different interaction of adhesion and sintering as the deposition surface temperature increases with the growth of ash thickness. Ash composition, temperature, reaction atmosphere and pressure are all important factors. And the selective deposition and accumulation of iron-bearing minerals with low melting point in heat transfer surfaces are important sources of initial layer.

Key words: gasification; syngas cooler; fouling; layered structure; sintering; initial layer

引 言

Shell 干粉煤加压气化技术 (SCGP) 是目前国

际上较为先进的洁净煤技术之一^[1-2], 其具有煤种适应性强、煤转化率高、气化温度高、单炉生产能力大等优点^[3-4]。但在实际运行中, Shell 炉合成气冷

2016-11-23 收到初稿, 2017-01-17 收到修改稿。

联系人: 谭厚章。第一作者: 韩瑞午 (1994—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51376147)。

Received date: 2016-11-23.

Corresponding author: TAN Houzhang, tanhz@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51376147).

却器十字支撑架部位频繁发生积灰结垢问题,导致中压过热器的换热量减少、出口合成气温度升高,影响后续设备的安全稳定运行,严重时甚至导致机组非计划停车。企业被迫采取降低生产负荷、增大激冷气量、掺混煤种等方式以降低合成气冷却器入口的气流温度,增大其与入炉煤灰熔点的温差,从而避免严重积灰的形成^[5-7]。

国内外学者对于锅炉受热面的积灰、沾污问题进行了大量研究,认为含 Fe、Ca、S 等元素的低熔点颗粒在受热面的黏附,是引起积灰结垢的主要原因。马飞等^[8]借助两种入炉煤的灰样分析,认为低熔点高钙颗粒在高温条件下发生表面的熔融作用,促进了颗粒间的黏附和聚集而形成积灰。李寒旭等^[9]通过 SEM-EDX 对 Shell 炉褐煤积灰样的分析发现,积灰中 Fe、S、Na、P 等元素明显高于飞灰,且 Na、Fe 元素在黏结处的富集促进了飞灰颗粒间的黏附。兰泽全等^[10]采用电子探针沿剖面不同位置分析了水煤浆炉中的渣样,认为初始灰层的形成与含 Fe、Ca、Si 的低熔点共晶体的黏附、NaCl 和 Na₂SO₄ 的凝结沉积等因素有关。赵永椿等^[11-12]通过对电厂飞灰和磁珠的研究发现,含铁量较高的低熔点铁氧化物和含硅铝的铁氧化物首先黏附在壁面形成灰沉积初始层,是产生结渣的根本原因。Song 等^[13-14]在流化床煤粉气化炉的渣样分析中发现,当壁面温度为 495℃ 时已经出现灰的沉积,而 Fe、Na 元素的存在则促进了原始灰层的形成和积灰结垢的发展。穆林等^[15]在废液焚烧余热锅炉受热面上,发现致密的烧结基底层,而这与 Na、Fe、Ni、S 元素的富集密切相关。虽然上述学者对各类受热面上飞灰和积灰的特性进行了研究,但是针对气化环境下,合成气冷却器段积灰层矿物组分演变和发展的报道依然少见。

本文通过对某 Shell 炉合成气冷却器段取样积

灰的物性表征,研究在气化环境下该区域积灰的形成和不同灰层中矿物组分的变化,最后提出积灰结垢的产生机制并给出一些缓解积灰的建议。

1 实验部分

1.1 燃料特性

该气化炉运行使用煤种为三元混煤,煤样的工业分析、硫含量及灰熔融特性温度见表 1。由表 1 可知,煤的熔融温度较低,便于液态排渣。煤样的灰成分分析见表 2。

1.2 现场积灰情况

图 1 所示为现场取样位置和灰样的剖面形貌。其中图 1(a)的取样位置在 78 m 平台附近的十字支撑架部位,正常运行时此处温度在 650℃ 左右。停炉后,发现该处积灰结垢严重,积灰情况见图 1(b)。由图可见,从激冷段流出的高速合成气在惯性力的作用下,大多先冲刷到远离气化炉一侧(即合成气冷却器外侧)的管壁才改变流动方向,而靠近气化炉一侧(即合成气冷却器内侧)的流动则主要依靠相对较弱的回流,导致外侧的流速高于内侧。因此,合成气冷却器内侧由于气流冲刷较弱,积灰层快速生长,首先堵塞流通通道^[16]。

从图 1(b)中所示区域取得部分灰样,灰样的剖面形貌见图 1(c)。由图可见,积灰内部存在明显的分层结构:底部靠近管壁的第 1 层呈红褐色,致密坚硬,灰粒相互黏结,出现明显的烧结特征;第 2 层呈黄色,具有一定的硬度,不容易捻碎;最外层呈灰色,疏松多孔,且灰层厚度较薄。

1.3 分析方法

将所取灰样按层剥离,分别利用 XRF(德国 Bruker 公司, S4-Pioneer)分析灰样的化学组成;利用 XRD(日本理学株式会社, D/max2400X)得出衍射图谱,并结合 JADE6.0 软件分析灰样的矿物组

表 1 煤的工业分析和灰熔融特性

Table 1 Proximate analysis and ash fusion temperatures of coal

Proximate analysis and sulfur content/%					Ash fusion temperatures/℃		
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	S _{t,ad}	DT	ST	FT
2.72	14.92	27.48	54.88	0.75	1230	1290	1320

表 2 煤样的灰成分分析

Table 2 Ash component analysis of coal/%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO ₂
52.0	24.0	5.1	6.0	0.8	0.4	0.5	0.8	10.5	0

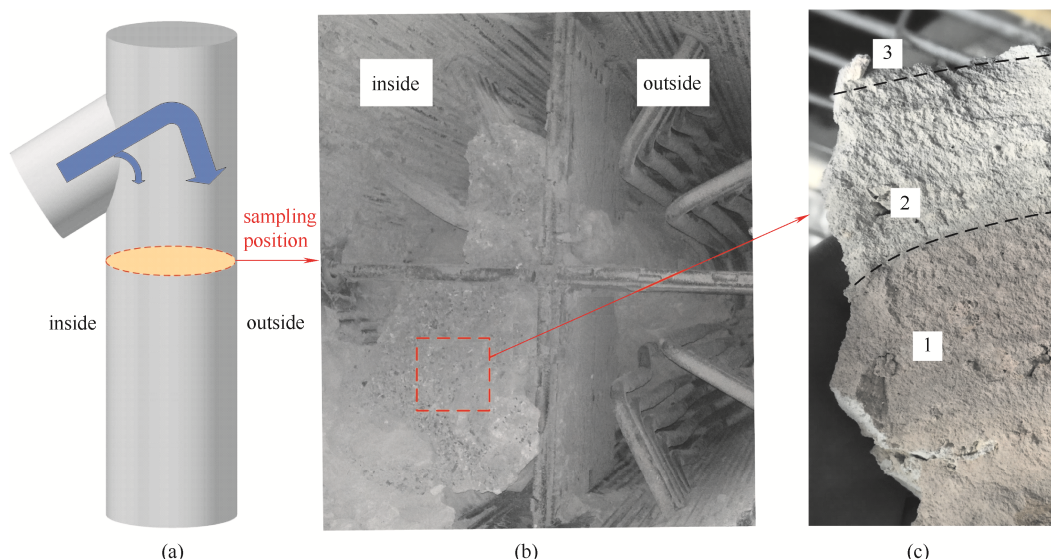


图 1 取样位置及灰样剖面形貌

Fig.1 Sectional morphology of ash deposits in sampling position

分, 其中 XRD 以铜靶为辐射源, 管电压 40 kV, 管电流 100 mA, 扫描速度为 $10 (^{\circ}) \cdot \text{min}^{-1}$, 扫描范围为 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$; 利用 SEM-EDS (日本电子株式会社, JSM-6390A) 分析灰样的微观形貌和化学成分。

2 结果与讨论

2.1 分层灰样的化学组成

利用 XRF 对炉内飞灰和 3 种灰层样品进行分析, 比较其化学组成的差异, 结果见图 2。由图可知, 除 O 以外, Si、Al、Fe、Ca 是灰中含量最多的几种元素^[17], 但各灰层元素的相对含量则存在显著差异。其中飞灰和灰色层的化学组成相似, 黄色层的 Fe、S 含量明显增多, 红色层的 Fe、S 含量则最高。说明在积灰发展过程中, 合成气中携带的含 Fe、S 的物质首先选择性地沉积黏附在积灰底层^[18], 加剧了积灰的产生。研究表明, 飞灰中 FeO 与 FeS 形

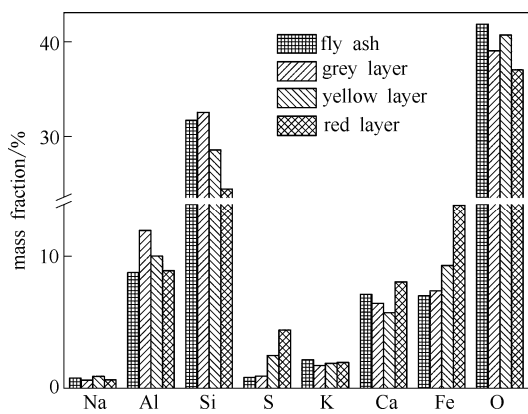


图 2 飞灰与分层灰样的化学组成

Fig.2 Chemical composition of fly ash and layered deposits

成的低温共熔体, 在运动过程中极易黏附在受热面上, 形成灰沉积初始层^[19]。推测底层灰中 Fe 和 S 含量的增多与 FeO、FeS 等物质形成的低温共熔体的富集有关。

2.2 分层灰样的矿物组成

利用 XRD 对飞灰和不同灰层的晶体矿物组成进行分析, 衍射谱图见图 3。由图可知, 飞灰和灰色层的衍射图谱均呈现玻璃态无定形结构^[20], 结合前述的两者化学组成相似, 可判断灰色层由炉内飞灰的聚集、堆积产生。而炉内高温熔融的灰渣在激冷段经过激冷气的急速冷却, 温度由 1500°C 骤降至 900°C 左右, 灰中矿物没有经过充分的时间结晶析出, 是导致飞灰中存在大量非晶体矿物的原因。

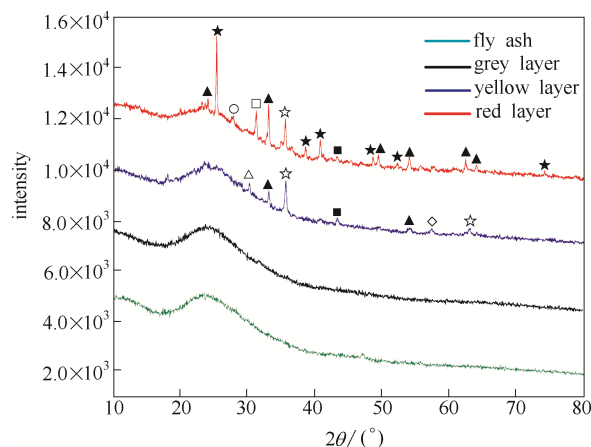


图 3 飞灰与分层灰样的 XRD 衍射谱图

Fig.3 XRD patterns of fly ash and layered deposits

★ CaSO_4 ; ☆ $\text{Fe}_{2.35}\text{Si}_{0.65}\text{O}_4$; ○ $\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$; □ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$;
▲ Fe_2O_3 ; △ $(\text{Fe}_{0.86}\text{Ca}_{0.14})\text{SiO}_3$; ■ FeS ; ◇ $\text{CaFe}^{+2}\text{SiO}_4$

黄色层中开始出现 Fe_2O_3 、 FeS 、铁的硅酸盐 $\text{Fe}_{2.35}\text{Si}_{0.65}\text{O}_4$ 等晶体的特征峰。红色层的结晶程度最高,除了有明显的 Fe_2O_3 和 CaSO_4 的特征峰外,还存在 FeS 、钠铝硅酸盐 $\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$ 、钙黄长石 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、铁的硅酸盐 $\text{Fe}_{2.35}\text{Si}_{0.65}\text{O}_4$ 等物质。可见,积灰底层中存在较多的低熔点含铁相物质,这些物质的黏附和富集导致了积灰的加剧,而 Fe_2O_3 含量的升高是底部积灰呈现红褐色的主要原因。由石灰石分解产生的 CaO 与炉内 SO_2 在 $800\sim 1100^\circ\text{C}$ 范围内将生成大量气态或熔融态的 CaSO_4 ^[21],其中气态 CaSO_4 将直接异相凝结在管壁或其他灰颗粒表面,具有一定黏性的熔融态 CaSO_4 则通过碰撞而黏附在管壁上,并随着温度的降低而凝固^[22]。

2.3 微观形貌与化学组成

为了探究黄色层和红色层的理化性质不同于炉内飞灰的原因,采用 JSM-6390A 扫描电镜对灰样进行观察,黄色层灰样和红色层灰样的微观形貌及 EDS 扫描区域分别见图 4 和图 5。由图可知,在气化炉高温下熔融积聚而形成的球形大颗粒周围,附着有众多小颗粒及絮状物质,它们因发生表面共熔而相互黏结。同时,灰层中存在烧结现象,部分灰颗粒间出现了团聚融合的趋势。粗糙的颗粒表面和颗粒间的相互黏附,增强了灰颗粒的堆积特性,更有利于积灰的生长。

图 4 和图 5 中扫描区域的化学组成如表 3 所示。其中,黄色层灰样中区域 1 的 Ca 元素含量为 26.60%,明显高于其他区域。结合各元素原子比可判断,区域 1 所在大颗粒的主要成分为钙硅铝酸盐,区域 2、3、4 所在小颗粒和絮状物质的主要成分为熔点较高的硅铝酸盐,它们因为发生表面共熔而黏结在一起。与黄色层灰样相比,红色层灰样中区域 5、6、7 出现了 Fe 、 S 的富集,区域 7 的 Fe 含量达到 28.49%。结合图 3 的 XRD 分析结果可判断,红

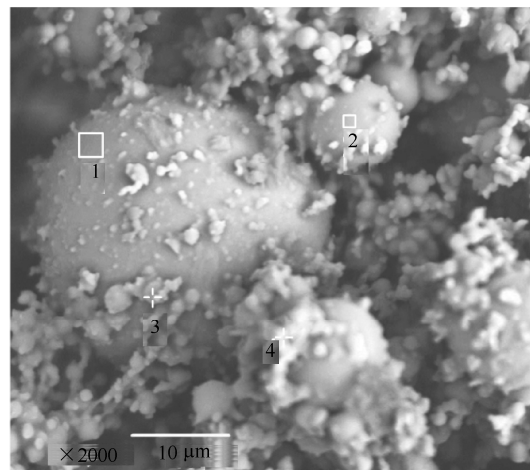


图 4 黄色层灰样的微观形貌及 EDS 扫描区域

Fig.4 Micro-morphology of yellow layer and selected areas of EDS

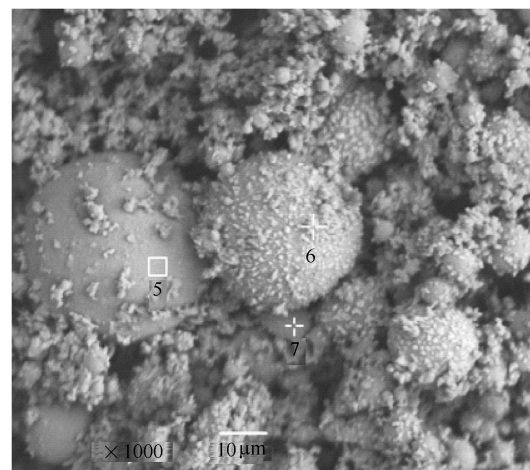


图 5 红色层灰样的微观形貌及 EDS 扫描区域

Fig.5 Micro-morphology of red layer and selected areas of EDS

色层灰样中 Fe 、 S 含量的升高与 CaSO_4 、 FeS 、铁的硅酸盐等低熔点物质的增多有关^[23]。

2.4 积灰的形成与发展机理

引起积灰各层化学组成、矿物组分不同的主要

表 3 所选区域的化学组成

Table 3 Chemical composition of selected areas

Areas	Mass fraction/%								
	O	Na	K	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	25.52	/	0.95	0.72	7.59	33.63	/	26.60	4.80
2	46.05	0.54	0.79	0.51	13.02	33.50	0.80	4.79	/
3	44.17	/	1.14	0.77	10.78	34.57	1.43	4.58	2.07
4	45.89	0.52	1.34	0.50	11.72	32.77	0.96	3.73	2.13
5	51.62	1.01	0.84	0.28	5.92	17.98	7.90	7.80	6.65
6	47.90	1.10	0.96	0.34	10.22	21.60	4.65	5.67	7.57
7	27.55	0.88	1.79	0.36	7.33	21.96	4.74	6.89	28.49

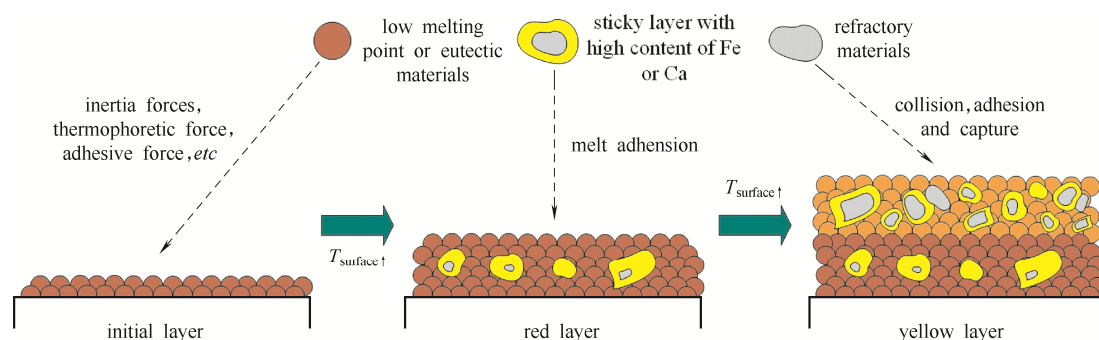


图 6 分层积灰的形成机制

Fig.6 Formation mechanism of layered ash deposition

原因在于灰沉积表面的温度变化导致的物理化学作用不同。随着换热面上灰层的加厚，粗合成气与换热管内蒸汽间的传热热阻不断增大，造成沉积表面的温度升高，并最终接近于来流的合成气温度。在不同的温度下，沉积表面上发生的黏附作用和烧结作用不同，导致积灰出现明显的分层结构。

如图 6 所示，基于灰样的物性表征和分析，可推测管壁上矿物质选择性沉积的机制，进而解释分层积灰的形成过程。

(1) 红色层

气化过程中，外在黄铁矿首先受热分解为磁黄铁矿，随着温度的升高和氧气的扩散逐渐被氧化成 FeO-FeS 共熔体，并最终经过冷凝、析晶、氧化等过程形成稳定的赤铁矿 Fe_2O_3 ^[19]。内在黄铁矿则大多与煤中硅铝酸盐结合，形成熔点较低的含铁硅铝酸盐相和富铁硅铝酸盐相^[24]。还原性气氛下，铁氧硫共熔体 (Fe-O-S)_{melt} 和富铁硅铝酸盐等在较低的温度时仍可发生熔融且具有黏性^[25]。当高速流动、温度约 700℃ 的富铁颗粒撞击在合成气冷却器的水平挡板上时，由于被阻流而产生的较强惯性力、颗粒与换热管壁之间存在的热泳力以及熔融灰粒与金属表面间的黏结力等^[26]共同作用，导致低熔点的富铁颗粒首先黏附在换热面上，形成灰沉积初始层。随着沉积层的不断积累，合成气与换热面间的传热热阻增大，沉积表面的温度升高，其他低熔点、在该温度范围内仍具有黏性的含铁硅铝酸盐、含铁硅酸盐等也能够黏附在初始层上，加速了灰层的生长。

研究表明，影响灰烧结特性的因素有压力、气氛、矿物组分等^[27-28]。在还原性气氛下，由于 Fe 的存在降低了矿物质的熔点， Fe-O-S 共熔体、富铁硅酸盐、富铁硅铝酸盐等易形成低温共熔体，导致灰层的烧结温度降低。而气化炉内 4MPa 的高压环境将增强灰层的致密性，促进助熔矿物的熔融聚团，

更有利于烧结的发生。因此，当灰沉积表面的温度升高至烧结温度时，相邻的灰颗粒在过量表面自由能的作用下发生烧结，颗粒间相互黏结、体积收缩，灰层的密度和硬度不断增加。同时，在烧结过程中，灰层内发生析晶和晶粒的长大，晶相组织排列更加紧密，因此红色层的结晶程度不断升高。

(2) 黄色层

除引起初始沉积的含铁矿物继续在沉积层黏附外，由于沉积表面的温度已接近来流温度，这将增加熔融态物质的黏性，促进沉积表面对粗合成气中其他颗粒的捕捉。例如，在飞灰的旋转流动过程中，CaO 容易与硅铝酸盐结合形成低熔点的钙长石类物质。当其流经灰沉积层，灰颗粒撞击在已经沉积的含铁熔融物上，通过发生表面共熔而被黏附、捕获^[29]。随着更多种类矿物的沉积，该层含铁矿物的比例逐渐降低，最终呈现黄色。同时，铁含量下降将导致灰层的烧结温度不断升高。此时沉积表面的温度逐渐开始低于灰层的烧结温度，因此烧结作用减弱，黄色层的结晶程度和硬度下降。

(3) 灰色层

当机组停车或积灰堵塞部分气体流通截面时，会造成通道内局部流速过低、气流扰动较弱^[30]。此时，所有飞灰颗粒都能够沉积并聚集在灰层表面，形成疏松多孔的灰色层。

3 结 论

本文对某 Shell 炉合成气冷却器严重积灰结垢部位的灰样进行了详细的物性表征和分析，最终提出分层积灰的形成机制。主要结论如下。

(1) 合成气冷却器外侧由于气流流速高、冲刷剧烈而不易积灰，内侧则因气流冲刷较弱而首先形成灰层。可适当调整吹灰器的角度，避免局部流速过低而产生积灰。

(2) 低熔点含铁矿物的选择性沉积和富集, 是初始灰层形成的主要原因, 造成底部红色层出现了 Fe、S 的富集。随着灰层的积累和沉积表面温度的升高, 其他有黏性的含铁硅酸盐、含铁硅铝酸盐、钙硅铝酸盐等也能够黏附在沉积层上, 加速了积灰的生长。建议在保证液态排渣的前提下, 通过配煤等方式, 尽量降低入炉煤的铁含量, 以缓解积灰。

(3) 高压环境、还原性气氛和易熔融含铁矿物的富集等原因, 都降低了灰层的烧结温度, 促进了烧结作用。使得灰颗粒间相互黏结、体积收缩并发生析晶, 积灰底层的密度和硬度增加, 结晶程度提高。

References

- [1] MINCHENER A J. Coal gasification for advanced power generation [J]. *Fuel*, 2005, **84** (17): 2222-2235.
- [2] ESMAILI E, MOSTAFAVI E, MAHINPEY N. Economic assessment of integrated coal gasification combined cycle with sorbent CO₂ capture [J]. *Applied Energy*, 2016, **169**: 341-352.
- [3] 高原. Shell 粉煤气化装置合成气冷却器积灰结垢的分析与对策 [J]. *化工技术与开发*, 2012, **41** (10): 62-64.
GAO Y. Analysis and solution measures for ash deposition and fouling of synthetic gas cooler in Shell pulverized coal gasification plant [J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2012, **41** (10): 62-64.
- [4] 张晋, 段远源, 李政. 气化剂配比对气化炉性能的影响 [J]. *化工学报*, 2003, **54** (12): 1740-1744.
ZHANG J, DUAN Y Y, LI Z. Effect of gasifying agent mixing ratio on polygeneration system gasifier performance [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2003, **54** (12): 1740-1744.
- [5] 牛玉奇, 段志广, 沈小炎. Shell 气化炉合成气冷却器积灰原因及应对策略 [J]. *化肥设计*, 2009, **47** (4): 22-25.
NIU Y Q, DUAN Z G, SHEN X Y. Ash deposition reason and its countermeasure for syngas cooler of Shell gasifier [J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2009, **47** (4): 22-25.
- [6] 李亚东. Shell 煤粉气化装置合成气冷却器积灰结垢的控制 [J]. *化肥设计*, 2010, **48** (2): 27-32.
LI Y D. Control for ash deposition and fouling of synthetic gas cooler in Shell pulverized coal gasification plant [J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2010, **48** (2): 27-32.
- [7] 闵文伟, 刘军. 贫瘦煤对 Shell 粉煤气化过程积灰影响研究 [J]. *天津化工*, 2015, **29** (6): 24-27.
MIN W W, LIU J. Effect of PSM coal on fly ash deposition in Shell coal gasification process [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2015, **29** (6): 24-27.
- [8] 马飞, 李寒旭, 盛新, 等. Shell 煤气化飞灰粘附特性及沉积机理分析 [J]. *煤炭科学技术*, 2010, **38** (10): 114-117.
MA F, LI H X, SHENG X, *et al.* Study on fly ash adhesion features and sedimentation mechanism of Shell coal gasification [J]. *Coal Science and Technology*, 2010, **38** (10): 114-117.
- [9] 李寒旭, 梅乐, 纪明俊, 等. 褐煤 SHELL 气化飞灰黏附影响因素的研究 [J]. *燃料化学学报*, 2015, **43** (12): 1409-1413.
LI H X, MEI L, JI M J, *et al.* Influencing factors on fly ash adhesion features in Shell lignite gasifier [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, **43** (12): 1409-1413.
- [10] 兰泽全, 曹欣玉, 饶魁, 等. 电子探针分析炉内沾污结渣动态过程 [J]. *化工学报*, 2005, **56** (1): 24-29.
LAN Z Q, CAO X Y, RAO S, *et al.* Fouling and slagging dynamic processes in boiler with electron probe microanalyzer [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2005, **56** (1): 24-29.
- [11] ZHAO Y C, ZHANG J Y, SUN J M, *et al.* Mineralogy, chemical composition, and microstructure of ferrospheres in fly ashes from coal combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2006, **20** (4): 1490-1497.
- [12] 赵永椿, 张军营, 高全, 等. 燃煤飞灰中磁珠的化学组成及其演化机理研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, **26** (1): 82-86.
ZHAO Y C, ZHANG J Y, GAO Q, *et al.* Chemical composition and evolution mechanism of ferrospheres in fly ash from coal combustion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, **26** (1): 82-86.
- [13] SONG G L, QI X B, SONG W J, *et al.* Slagging behaviors of high alkali Zhundong coal during circulating fluidized bed gasification [J]. *Fuel*, 2016, **186** (15): 140-149.
- [14] SONG W J, SONG G L, QI X B, *et al.* Transformation characteristics of sodium in Zhundong coal under circulating fluidized bed gasification [J]. *Fuel*, 2016, **182**: 660-667.
- [15] 穆林, 赵亮, 尹洪超. 化工废液焚烧炉内积灰结渣特性 [J]. *化工学报*, 2012, **63** (11): 3645-3651.
MU L, ZHAO L, YIN H C. Fouling and slagging characteristics in wastewater incinerator [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63** (11): 3645-3651.
- [16] 郭德铭, 郭会敏. 壳牌气化炉配煤研究 [J]. *化工设计通讯*, 2015, **41** (3): 15-16.
GUO D M, GUO H M. Shell gasifier of coal blending [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2015, **41** (3): 15-16.
- [17] 宋文佳, 唐黎华, 朱学栋, 等. Shell 气化炉中灰渣的熔融特性与流动特性 [J]. *化工学报*, 2009, **60** (7): 1781-1786.
SONG W J, TANG L H, ZHU X D, *et al.* Fusibility and flow properties of Shell gasifier slag [J]. *CIESC Journal*, 2009, **60** (7): 1781-1786.
- [18] BENSON S A, SONDRAL E A, HURLEY J P. Status of coal ash behavior research [J]. *Fuel Processing Technology*, 1995, **44** (1): 1-12.
- [19] 赵永椿, 张军营, 高全, 等. 燃煤含铁矿物的迁移转化特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2006, **27** (3): 511-514.
ZHAO Y C, ZHANG J Y, GAO Q, *et al.* Transformation of iron-bearing minerals during coal combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, **27** (3): 511-514.
- [20] 张冬梅. Shell 气化炉中大块渣形成机理及析铁过程研究 [D]. 合肥: 安徽理工大学, 2012.
ZHANG D M. Study on the formation mechanism and the ferrite eutectoid process of the slag lumps in Shell gasifier [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2012.
- [21] WANG X B, XU Z X, 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** (5): 150-159.
- [22] QI X B, SONG G L, SONG W J, *et al.* Effects of wall temperature on slagging and ash deposition of Zhundong coal during circulating fluidized bed gasification [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **106** (4): 1127-1135.

- [23] WU X J, ZHANG Z X, PIAO G L, *et al.* Behavior of mineral matters in Chinese coal ash melting during char-CO₂/H₂O gasification reaction [J]. *Energy & Fuels*, 2009, **23** (5): 2420-2428.
- [24] MATSUOKA K, YAMASHITA T, KURAMOTO K, *et al.* Transformation of alkali and alkaline earth metals in low rank coal during gasification [J]. *Fuel*, 2008, **87** (6): 885-893.
- [25] BROOKER D D, OH M S. Iron sulfide deposition during coal gasification [J]. *Fuel Processing Technology*, 1995, **44** (1): 181-190.
- [26] LI H X, MA F, SHENG X, *et al.* Study on fly ash adhesion characteristics and deposition mechanism in Shell coal gasification process [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **233/234/235**: 789-793.
- [27] 景妮洁. 加压流化床气化条件下灰熔融特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- JING N J. Ash Fusion behaviors of coal and biomass during pressurized fluidized bed gasification process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [28] JING N J, WANG Q, CHENG L, *et al.* Effect of temperature and pressure on the mineralogical and fusion characteristics of Jincheng coal ash in simulated combustion and gasification environments [J]. *Fuel*, 2013, **104** (2): 647-655.
- [29] 周志杰, 李德侠, 刘霞, 等. 煤灰熔融黏温特性及对气流床气化的适应性 [J]. *化工学报*, 2012, **63** (10): 3243-3254.
- ZHOU Z J, LI D X, LIU X, *et al.* Characteristic of cohesiveness-temperature of coal molten ash and its adaptability to entrained flow gasifier [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63** (10): 3243-3254.
- [30] BROOKER D. Chemistry of deposit formation in a coal gasification syngas cooler [J]. *Fuel*, 1993, **72** (5): 665-670.