

煤灰对铁基载氧体理化特性的影响

张帅¹,肖睿²

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司,北京 100025;

2. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室,江苏南京 210096)

摘要:以我国3种典型煤种(褐煤、烟煤和无烟煤)制备的煤灰和铁基载氧体为对象,在热重分析仪上研究了煤灰与铁基载氧体之间的相互作用,考察了煤灰对铁基载氧体反应性能、持续循环性能和物理结构的影响。结果表明,3种煤灰均能够提高还原阶段气体燃料的转化效率使得铁基载氧体的失重量显著增加,其中无烟煤煤灰对气体燃料转化率的提高最为显著,铁基载氧体失重量比未添加煤灰时提高了37%,褐煤灰和烟煤灰表现相似,铁基载氧体失重量提高约35%。未添加煤灰的铁基载氧体循环反应性能表现稳定,而添加3种煤灰后的铁基载氧体持续循环能力呈现不同程度的下降,主要原因是3种煤灰在铁基载氧体颗粒表面的沉积导致铁基载氧体颗粒发生不同程度的烧结,其中无烟煤对铁基载氧体物理结构的影响最小。

关键词:化学链燃烧;中国煤种;煤灰;铁基载氧体;相互作用

中图分类号:TK16 文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.12.013

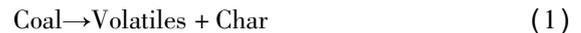
引言

化石燃料燃烧排放的CO₂是导致全球气候变化的主要原因,近年来引起世界各国的普遍关注。与现有的碳捕集技术相比,CLC(化学链燃烧)技术在实现煤炭高效利用的同时有效降低了CO₂的捕集能耗^[1],是当前最具发展前景的碳捕集技术之一。与传统的空气直接燃烧的方式相比,CLC技术避免了燃料与空气的直接接触,实现了燃料的无焰燃烧和燃料化学能的梯级利用^[2],提高了能源利用效率;燃料反应器出口气体仅有CO₂和H₂O,H₂O可以通过简单冷凝直接去除,因此不再需要传统空气燃烧技术中高耗能的CO₂分离过程;燃料与空气不直接接触可以有效抑制燃料型NO_x的生成^[3]。此外,化

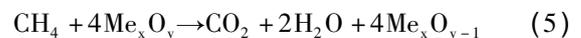
学链燃烧过程运行温度较低(一般低于1000℃),能够有效控制热力型NO_x的生成^[4]。

我国“富煤、贫油、少气”的能源结构决定了煤炭在未来很长一段时间内仍将继续占据我国能源结构的主体地位,因此发展以煤为燃料的CLC技术对于我国煤炭资源的清洁、高效利用以及能源环境的低碳、绿色、可持续发展具有重要意义。当煤作为燃料时,煤首先在燃料反应器内发生热解气化反应,生成的热解气化产物瞬间与载氧体发生还原反应生成CO₂和H₂O,在燃料反应器内被还原的载氧体颗粒随后循环进入空气反应器内,并与空气中的氧气发生反应实现载氧体的氧化再生。具体的反应如式(1)~式(8)所示。

煤热解气化反应:



燃料反应器载氧体还原反应:



空气反应器载氧体氧化反应:



在燃煤CLC过程中,煤与载氧体之间的相互作用一方面体现在载氧体对煤气化过程的促进作用^[5-6];另一方面则是煤热解气化后产生的煤灰对载氧体物理结构和化学反应性能的影响。Ruber等人在热重-质谱分析仪上研究了电厂煤灰对两种铁基载氧体理化性质的影响^[7],发现煤灰对载氧体的

收稿日期:2015-12-15; 修订日期:2015-12-22

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51525601);国家自然科学基金资助项目(51476035)

作者简介:张帅(1986-),男,河北保定人,神华国华(北京)电力研究院有限公司工程师。

通讯作者:肖睿(1971-),男,湖北监利人,东南大学教授。

物理结构没有产生不利影响;随后 Ruber 等人进一步研究了 4 种不同类型的煤灰与铁基载氧之间的相互作用^[8],发现只有褐煤灰能够提高燃料的转化程度,而其它 3 种烟煤灰对载氧体的反应性能产生不利影响;Azis 等人在小型流化床上研究了烟煤灰和褐煤灰对钛铁矿理化性能的影响^[9],发现灰分的存在能够促进燃料的转化率,但两种煤灰对载氧体的物理结构及其流化特性没有产生不利影响;Saha 等人在 TGA(热重分析仪)上研究了低灰和高灰褐煤对铁基和镍基载氧体循环反应性能的影响^[10],发现灰分对两种载氧体的理化性质没有产生明显影响,且煤灰未在铁基载氧体颗粒表面沉积;Bao 等人研究了一种褐煤灰和 3 种烟煤灰对铁基载氧体反应性能的影响^[11],发现煤灰对载氧体物理化学性能的影响取决于煤灰的化学组成。

通过对上述文献的分析可以发现,目前选取的煤灰主要来源于国外煤种,而针对我国煤灰与载氧体之间相互作用研究的报道很少。众所周知,我国煤炭资源种类多,煤质多变且高灰、高硫、高灰熔点煤占比大^[12],因此获得的煤灰与国外的煤灰在理化性质方面会存在一定的差异,而且不同煤种(褐煤、烟煤和无烟煤)得到的煤灰在化学组成、灰熔点特性等方面也会存在不同。基于此,本文选取了我国不同煤种制得的煤灰,在 TGA 上研究了煤灰对铁基载氧体反应性能、持续循环性能以及微观结构的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验采用的载氧体为人工合成的铁铝复合载氧体 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的比例为 1:1,其中 Al_2O_3 粉末为 10 nm 级粉末,目的是提高 Fe_2O_3 的分散度和载氧体颗粒的孔结构特性。采用的制备方法为双辊挤压造粒法,挤压成型的载氧体颗粒在温度为 950 °C 下煅烧 2 h 以提高载氧体的机械强度。对煅烧后的成型颗粒进行破碎筛分获得粒径为 0.10 ~ 0.35 mm 的颗粒用于后续的实验研究,制备的铁铝复合载氧体记作 Fe-Al(10 nm)。

实验采用的煤灰为我国典型(Lignite,简称 L)褐煤、(Bitumite,简称 B)烟煤和(Anthracite,简称 A)无烟煤 3 种原煤在温度为 950 °C、时间为 2 h 的煅

烧条件下制得。虽然煤燃烧制得的煤灰与煤气化反应后的煤灰在某些物理化学性能方面可能存在差异,但两种灰分的化学组成比较相似^[13-14]。在研究煤灰对载氧体物理结构和化学反应性能方面的影响时,可以采用煤燃烧产生的灰分替代煤气化反应后的灰分^[11]。3 种煤灰的化学成分分析如表 1 所示。褐煤灰、烟煤灰和无烟煤灰分别用 L_ash、B_ash 和 A_ash 进行标记。

表 1 三种煤灰的化学成分分析(wt%)

Tab. 1 Chemical composition analysis of three coal ashes

	褐煤灰 L_ash	烟煤灰 B_ash	无烟煤灰 A_ash
SiO_2	44.34	52.93	30.01
CaO	26.16	15.14	18.60
Al_2O_3	12.04	14.93	25.11
Fe_2O_3	3.69	5.48	11.06
MgO	5.59	1.62	3.23
SO_3	6.53	6.26	7.19
Na_2O	0.65	0.48	2.72
TiO_2	0.32	0.66	0.67
K_2O	0.08	1.65	0.36
P_2O_5	0.05	0.31	0.54
Cl	0.01	0.04	0.00
其它	0.54	0.50	0.51

1.2 实验步骤及工况

所有实验均在北京精仪高科仪器有限公司生产的 ZRT-1 型 TGA 上进行,其反应系统流程如图 1 所示。采用 H_2 、CO、 CO_2 (55%、20%、25%) 模拟煤气作为还原性气体,空气作为氧化性气体。实验开始前,首先将 Fe-Al(10 nm)与煤灰的颗粒混合物(载氧体 20 mg,煤灰 6 mg)加入到天平坩埚内,两种颗粒的粒径均为 0.10 ~ 0.35 mm。然后在空气气氛下对 TGA 进行加热,升温速率为 10 °C/min,其中空气和保护气(N_2)流量分别控制在 10 和 50 mL/min。当 TGA 温度达到 900 °C 时关闭反应气体(空气)管路,并在 N_2 下进行吹扫 5 min,待所有实验条件稳定后,切换反应气体管路为模拟煤气,此时还原阶段开始。为了模拟燃煤 CLC 的实际过程控制防止 Fe_2O_3 深度还原到 FeO,整个还原阶段持续 2 min。随后关闭反应气体管路,并在 N_2 下吹扫 5 min 后切换反应气体管路为空气,开始进行载氧体氧化再生实验,氧化阶段的时间确保载氧体能够实现完全氧化再生,

根据实验初期的探索确定氧化阶段反应时间为 8 min。每组实验进行 25 个还原/氧化循环。实验结束后关闭 TGA 和反应气体管路,保留 N_2 管路直至 TGA 温度降至室温,然后收集反应后的样品用于后续表征分析。

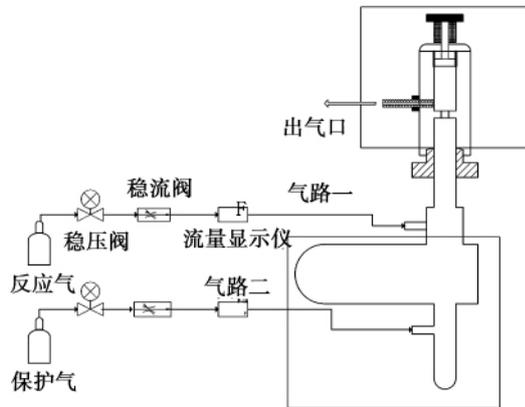


图 1 热重分析仪反应系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of TGA reaction system

2 结果与讨论

2.1 煤灰对载氧体反应性能的影响

图 2 为还原气氛下添加和未添加煤灰时 Fe - Al(10 nm) 载氧体反应性能的失重曲线。还原阶段的时间设定为 2 min,以保证 Fe_2O_3 的还原产物主要为 Fe_3O_4 。

由图可知,在 3 种煤灰存在的条件下,气体燃料转化率均得到明显提高,使得反应过程中的失重量显著增加。但 3 种煤灰的促进程度不同,添加 A_ash 时的失重量增加最明显,且在整个还原阶段始终保持最大的失重量,比未添加煤灰时的失重量提高了 37%,而 L_ash 和 B_ash 表现相似,对 Fe - Al(10 nm) 载氧体反应性的影响程度相当,最终的失重量也基本相同,比未添加煤灰时的失重量提高了约 35%,反应过程中烟煤灰表现略好于褐煤灰。煤灰提升气体燃料转化率的原因主要有两方面:一方面煤灰与载氧体的混合能够提高 TGA 坩埚内颗粒的空隙率,使得还原性气体更容易扩散进入床层内部接触到更多载氧体颗粒^[5];另一方面煤灰中含有的某些活性成分能够转化部分还原性气体燃料,使得燃料转化率增加^[9]。通过表 1 对 3 种煤灰的化学组成分析可知,煤灰中的 Fe_2O_3 和 $CaSO_4$ 是主要的活

性成分,3 种煤灰中 $CaSO_4$ 的含量相似,但 Fe_2O_3 含量差别较大,其中无烟煤灰中 Fe_2O_3 含量最高,对应的还原过程中的失重量也最大,因此煤灰中 Fe_2O_3 含量是影响气体燃料转化率的主要因素。

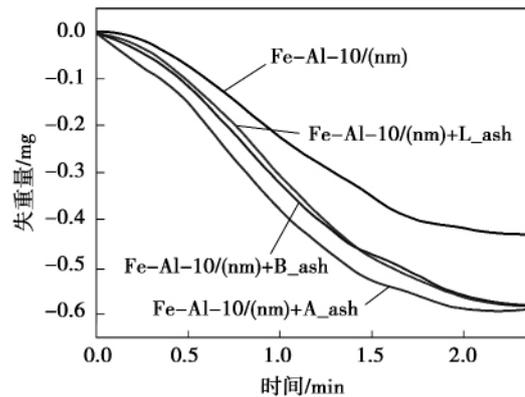


图 2 煤灰类型对 Fe - Al(10 nm) 反应性能的影响

Fig. 2 Effect of coal ash type on the reactivity performance of Fe - Al(10 nm) oxygen carrier

2.2 煤灰对载氧体循环反应性能的影响

图 3 对比了添加和未添加煤灰时 Fe - Al(10 nm) 载氧体的循环反应性能。由图 3(a) 可知,当未添加任何煤灰时,Fe - Al(10 nm) 载氧体表现出较好的循环反应性能,循环过程中失重量表现比较平稳,失重量波动的原因主要是仪器运行过程中需要手动调控。载氧体的反应性能与其物理结构有很大关系,Fe - Al(10 nm) 载氧体稳定的循环反应性能表明在 900 °C、未添加煤灰的条件下,Fe - Al(10 nm) 载氧体能够保持较好的孔结构特性。由图 3(c) 可知,当 3 种煤灰分别与 Fe - Al(10 nm) 载氧体混合后,失重量则随循环次数的增加产生不同程度的降低,尤其在烟煤灰存在时的失重量降低最为明显,其次为图 3(b) 的褐煤灰,图 3(d) 为失重量降低幅度最小的无烟煤灰。循环过程中失重量的减小表明气体燃料转化率随循环次数的增加逐渐降低,3 种煤灰对 Fe - Al(10 nm) 载氧体的物理结构产生了不利影响。虽然在循环过程中添加煤灰后的失重量逐渐降低,但还原性气体燃料转化率仍然高于 Fe - Al(10 nm) 载氧体单独存在时的气体燃料转化率,表明煤灰中的活性成分 (Fe_2O_3 和 $CaSO_4$) 在循环过程中始终能够转化部分气体燃料。

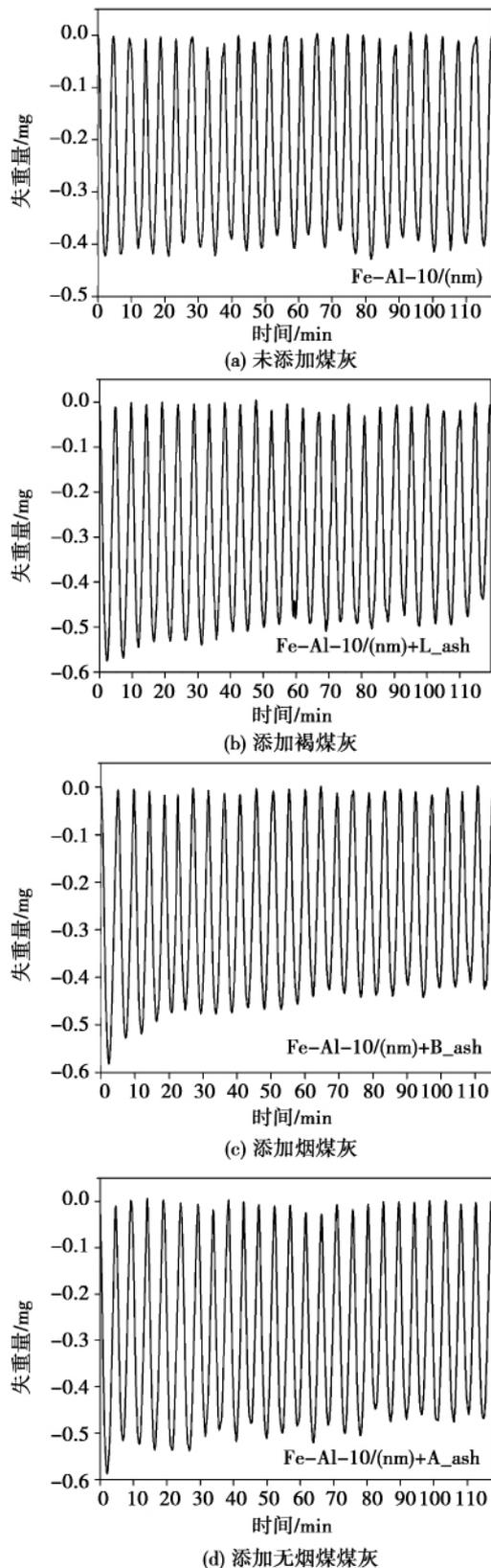


图3 煤灰类型对 Fe - Al (10 nm) 循环反应性能的影响

Fig. 3 Effect of coal ash type on the recyclability performance of Fe - Al (10nm) oxygen carrier

为了验证煤灰对载氧体的物理结构是否产生影响,采用 SEM (扫描电子显微镜)对循环后的 Fe - Al (10 nm) 载氧体进行了表观形貌分析,如图 4 所示。由图可见,当 Fe - Al (10 nm) 载氧体单独存在时,循环后的载氧体颗粒能够保持较好的孔结构特性,在载氧体颗粒表面能够观察到细小的颗粒和大量的孔隙,并没有发现明显的烧结。然而,当 3 种煤灰存在时,循环后的 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面则表现出不同程度的烧结,与 Bao 等人^[11]观察到的现象相似,尤其是当烟煤灰存在时,Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面发生严重烧结,细小的颗粒团聚到一起导致颗粒表面大量的孔隙被堵塞,因而气体燃料较难扩散进入载氧体颗粒内部参与反应,使得气体燃料转化率降低。对于褐煤灰和无烟煤灰作用下的 Fe - Al (10 nm) 载氧体,颗粒表面烧结程度弱于烟煤灰存在时的烧结程度,在载氧体颗粒表面仍旧能够观察到一些孔隙,无烟煤灰存在时的烧结程度最轻,在载氧体颗粒表面仍旧能够观察到一些小孔,而褐煤灰作用下的载氧体颗粒表面只能观察到一些大的孔隙。煤灰对 Fe - Al (10 nm) 载氧体孔结构特性的变化与图 3 中的实验数据相吻合。

此外,为了验证循环反应后煤灰是否沉积在 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面,采用 EDS (能谱仪)对循环反应后的 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面的元素分布进行了分析,如图 5 所示,其中横坐标 keV 为 X 射线电压,纵坐标 Counts 为单位时间单位面积通过的光子数。对于未添加煤灰的 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒如图 5 (a) 所示,由图可见,载氧体颗粒表面只检测到 Fe、Al 和 O 3 种元素。而当 3 种煤灰存在时,在循环反应后的 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面检测到 Ca、Si 和 Mg 元素的存在,表明煤灰与 Fe - Al (10 nm) 载氧体发生了相互作用使得煤灰沉积在载氧体颗粒表面,从而对载氧体的物理结构产生了不利影响,如图 4 所示。通过对比 3 种煤灰对 Fe - Al (10 nm) 载氧体的作用程度发现,褐煤灰和烟煤灰存在时载氧体颗粒表面 Ca、Si 和 Mg 元素的含量相对较多,如图 5 (b)、图 5 (c) 所示,而无烟煤灰存在时只检测到 Ca 和 Si 元素,如图 5 (d) 所示,且相对含量较少。因此,通过 EDS 分析可以判定褐煤灰和烟煤灰的熔点较无烟煤灰的熔点低,使得两种煤灰在载氧体颗粒表面更容易发生沉积导致载氧体颗粒烧结较严重,而熔点较高的无烟煤灰比较容

易与载氧体颗粒发生分离,不易与载氧体颗粒发生相互作用,因此对载氧体物理结构影响较小。为了进一步证实 3 种煤灰灰熔点对载氧体物理结构的影响,采用灰熔点测试仪对 3 种煤灰的灰熔融特性进行了定量分析。结果表明,褐煤灰、烟煤灰和无烟煤灰的灰熔点分别为 1 420、1 335 和 1 517 °C,从而证实了图 4 和图 5 得到的结论。

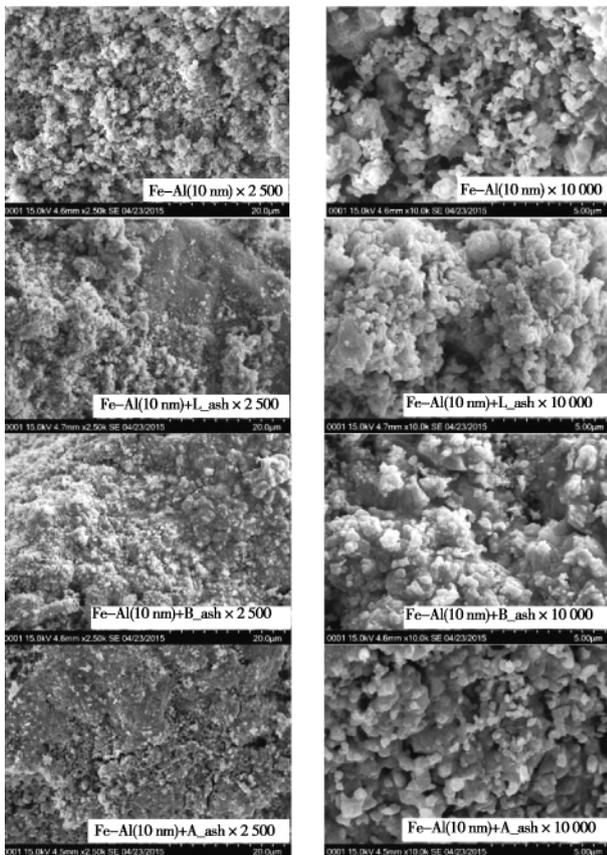


图 4 3 种煤灰对 Fe - Al(10 nm) 载氧体表面形貌的影响

Fig. 4 Effect of three coal ashes on the surface morphology of Fe - Al(10 nm) oxygen carrier

综上所述,虽然煤灰的存在能够提高还原阶段气体燃料的转化率,但 3 种煤灰对 Fe - Al(10 nm) 载氧体的物理结构均产生了消极影响,因此在实际的燃煤 CLC 过程中应尽量避免煤灰与载氧体颗粒的接触,而流化床反应系统在煤灰与载氧体颗粒的分离方面具有较固定床和移动床的优势,可以根据煤灰与载氧体颗粒的密度差实现煤灰与载氧体颗粒的高效分离,目前在这一方面的研究仍然很匮乏,需进一步深入研究燃料反应器的结构以降低煤灰与载氧体颗粒之间的接触概率。

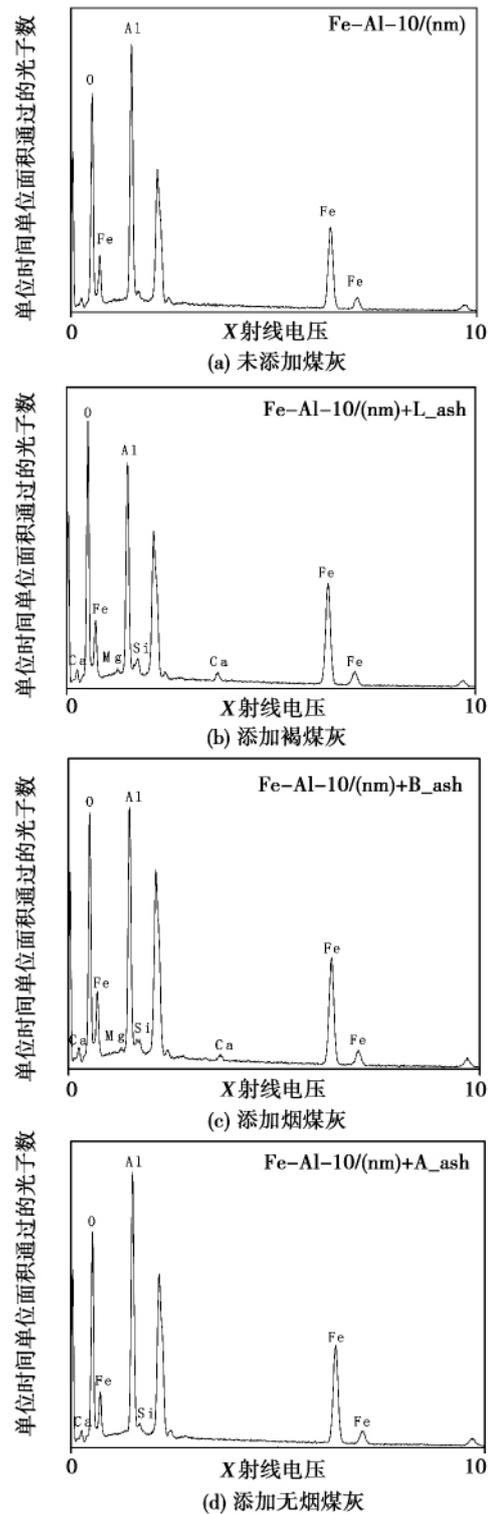


图 5 3 种煤灰对 Fe - Al(10 nm) 载氧体表面元素分布的影响

Fig. 5 Effect of three coal ashes on the surface elemental distribution of Fe - Al(10 nm) oxygen carrier

3 结 论

本文研究了我国典型煤种(褐煤、烟煤和无烟煤)制得的煤灰对 Fe - Al (10 nm) 载氧体的反应性能、持续循环性能和物理结构的影响,得到的主要结论如下:

(1) 煤灰对 Fe - Al (10 nm) 载氧体反应性能影响的研究表明,3 种煤灰均能够提高还原阶段气体燃料的转化率,使得反应过程中的失重量增加,这主要与煤灰中的 Fe_2O_3 和 CaSO_4 活性成分有关,其中无烟煤灰表现最佳。

(2) 煤灰对 Fe - Al (10 nm) 载氧体循环反应性能影响的研究表明,循环反应后 3 种煤灰均沉积在 Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面,使得载氧体颗粒表面发生不同程度的烧结,导致其循环反应性能产生不同程度的降低,其中烟煤灰对载氧体理化性质的影响程度最大,Fe - Al (10 nm) 载氧体颗粒表面烧结最严重,载氧体循环反应性能降低的程度最大,无烟煤影响程度最小。

参考文献:

- [1] WANG P, MEANS N, SHEKHAWAT D, et al. Chemical-looping combustion and gasification of coals and oxygen carrier development: A brief review [J]. *Energies* 2015 8: 10605 - 10635.
- [2] 金红光, 洪 慧, 韩 涛. 化学链燃烧的能源环境系统研究进展 [J]. *科学通报* 2008 (24): 2994 - 3005.
JIN Hong-guang, HONG Hui, HAN Tao. Research Status on the energy environment system of the chemical-looping combustion [J]. *Chinese Science Bulletin* 2008 24: 2994 - 3005.
- [3] 金红光. 新颖化学链燃烧与空气湿化燃气轮机循环 [J]. *工程热物理学报* 2000 21(2): 138 - 141.
JIN Hong-guang. A novel gas turbine cycle with chemical-looping combustion and saturation for air [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2000 21(2): 138 - 141.
- [4] ISHIDAM, JIN H G. A novel chemical-looping combustor without NO_x formation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996 35(7): 2469 - 2472.
- [5] ZHANGS, RAJENDRAN S, HENDERSON S, et al. Use of pyrite cinder as an iron-based oxygen carrier in coal-fueled chemical looping combustion [J]. *Energy Fuels* 2015 29(4): 2645 - 2655.
- [6] LINDERHOLMC, LYNGFELT A, CUADRAT A, et al. Chemical-looping combustion of solid fuels - operation in a 10 kW unit with two fuels, above-bed and in-bed fuel feed and two oxygen carriers, manganese ore and ilmenite [J]. *Fuel* 2012 102: 808 - 822.
- [7] RUBELA, ZHANG Y, LIU K, et al. Effect of ash on oxygen carriers for the application of chemical looping combustion to a high carbon char [J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D Ifp Energies Nouvelles* 2011 66(2SI): 291 - 300.
- [8] RUBELA, ZHANG Y, NEATHERY J K, et al. Comparative study of the effect of different coal fly ashes on the performance of oxygen carriers for chemical looping combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2012 26(6): 3156 - 3161.
- [9] AZISM M, LEION H, JERNDAL E, et al. The effect of bituminous and lignite ash on the performance of ilmenite as oxygen carrier in Chemical-Looping combustion [J]. *Chemical Engineering & Technology* 2013 36(9SI): 1460 - 1468.
- [10] SAHAC, BHATTACHARYA S. Chemical looping combustion of low-ash and high-ash low rank coals using different metal oxides - a thermogravimetric analysis study [J]. *Fuel*, 2012, 97: 137 - 150.
- [11] BAOJ, LI Z, CAI N. Interaction between iron-based oxygen carrier and four coal ashes during chemical looping combustion [J]. *Applied Energy* 2014 115: 549 - 558.
- [12] 李小红, 姚润生, 李 凡. 适宜“三高”煤利用的煤气化技术探讨 [J]. *现代化工* 2009 29(z1): 234 - 236.
LI Xiao-hong, YAO Run-sheng, LI Fan. Progress in gasification technology for tri-high coal [J]. *Modern Chemical Industry* 2009, 29(z1): 234 - 236.
- [13] FONTO, MORENO N, DIEZ S, et al. Differential behaviour of combustion and gasification fly ash from Puertollano Power Plants (Spain) for the synthesis of zeolites and silica extraction [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009 166(1): 94 - 102.
- [14] JINGN, 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: 647 - 655.

(单丽华 编辑)

煤灰对铁基载氧体理化特性的影响 = **Effect of Coal Ash on the Physicochemical Property of Iron-based Oxygen Carrier** [刊, 汉] ZHANG Shuai (ShenhuaGuohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing China, Post Code: 100025), XIAO Rui (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 81 ~ 86

Abstract: The coal ashes derived from three typical Chinese coals (lignite, bitumen and anthracite) were prepared and used to investigate the interaction between coal ash and iron-based oxygen carrier in a thermogravimetric analyzer, and the effect of coal ash on the reactivity, recyclability and physical structure of iron-based oxygen carrier was evaluated. The results showed that all three coal ashes could enhance the fuel gas conversion in the reduction period, in which anthracite ash behaved the best with the highest fuel conversion achieved. Compared to the stable cyclic performance of iron-based oxygen carrier without coal ash presented, the recyclability of iron-based oxygen carrier showed different degrees of degradation after three coal ashes were added. The reason could be ascribed to the sintering on the surface of oxygen carrier particles, which was mainly caused by the ash deposition on the iron-based oxygen carrier. Of all the prepared coal ashes, anthracite ash was showed to have the minimal impact on the physical structure of iron-based oxygen carrier. **Key words:** chemical-looping combustion, Chinese coal, coal ash, iron-based oxygen carrier, interaction

基于最小二乘支持向量机的煤耗率软测量 = **Soft Sensing of Coal Consumption Rate based on Least Squares Support Vector Machine** [刊, 汉] DU Hai-ling (Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, China, Post Code: 030000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 87 - 91

To measure coal consumption rate accurately on the fly and improve the economy of boiler unit, this article used the method of least squares support vector machine (LSSVM) to build a soft measurement model for the coal consumption rate of a sub-critical boiler, and it was validated by the unit operation data of one year long. The comparison showed the maximum relative error of the soft measurement is 5.7% and it meets the industrial precision requirement. This paper also introduced a correction method for the on-line measurement. The results showed that with the on-line correction the maximum relative error becomes 2.2%, further improving the accuracy of soft measurement, and it can be applied in the process of electric power generation. **Key words:** soft sensing, least squares support vector machine, coal consumption rate, correction factor

水泥窑协同处置不同类型危险废物时二噁英排放特性研究 = **Emission Characteristics of PCDD/Fs from**