

# 煤基化学链燃烧技术的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧载体研究

蒋林林 赵海波 张少华 王 建 郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 直接以煤为燃料的化学链燃烧是解决中国燃煤  $\text{CO}_2$  排放的一种潜在技术, 关键问题之一是难以气化和氧化的煤焦与氧载体之间的固固还原反应。本文基于溶胶—凝胶法, 利用  $\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$  和  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  制备了 12 种不同的氧载体, 并用 XRD、SEM、BET 等对其物化性质进行了表征, 发现烧结温度以低于  $1200^\circ\text{C}$  为宜。选择 6 种不同参数(活性  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  质量含量、烧结温度和烧结时间)的  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体, 在热重中研究了它们与煤焦的反应性能, 结果表明, 在  $880^\circ\text{C}$  左右时, 氧载体与煤焦快速反应, 首先快速还原成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 然后有一部分  $\text{FeO}$  出现。综合各方面因素, 选用 F6A1116 氧载体(60%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量,  $1100^\circ\text{C}$  烧结 6 h)进行与煤焦/空气的多次循环实验。结果表明, 氧载体没有杂质物相生成, 表现了良好的循环反应性。反应后氧载体表面发生了一定程度的烧结现象, 但仍维持孔隙结构。这些实验结果初步证明, 基于  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体、燃用固体燃料煤焦的化学链燃烧技术是可行的。

**关键词** 化学链燃烧; 煤焦; 溶胶—凝胶法;  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体

**中图分类号:** TQ534; TK16    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-231X(2010)06-1053-04

## Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> OXYGEN CARRIERS FOR CHEMICAL LOOPING COMBUSTION FUELED BY COAL CHAR

JIANG Lin-Lin ZHAO Hai-Bo ZHANG Shao-Hua WANG Jian ZHENG Chu-Guang

(State Key Lab. of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Chemical looping combustion (CLC) fueled by coal is a potential technology to solve the  $\text{CO}_2$  emission from coal combustion in China, one of the key points of which is the solid-solid reduction between oxygen carriers and coal char (it is difficult to gasify and oxidize). Based on the sol-gel method,  $\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$  and  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  are selected as main raw materials to prepare 12 kinds of oxygen carriers in this paper. X-ray diffraction (XRD),  $\text{N}_2$  adsorption-desorption (BET) method and scanning electron microscope (SEM) are utilized to characterize the physicochemical properties of oxygen carriers. The results show that the sintering temperature is better below  $1200^\circ\text{C}$ . Six kinds of oxygen carriers which are different in mass contents of active  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sintering temperature and sintering time are selected to react with char in a thermo-gravimetric analysis (TGA) in order to research their reactivity. The experimental results show that  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  oxygen carriers start to rapidly react with coal char at the temperature  $880^\circ\text{C}$ , as when  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  is first rapidly reduced to  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , and then slowly reduced to  $\text{FeO}$ . Oxygen carrier with contents of 60%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sintering temperature of  $1100^\circ\text{C}$  and sintering time of 6 hours is selected to circularly react with char/air. There are no other phases after several circle reduction-oxidation reactions, which shows extremely good circular reactivity. The sintering behavior is observed on the surface of the particles, but the porous beehive structure of particles is still maintained. These experimental results show promise in the development of the chemical looping combustion of coal, based on  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  oxygen carriers.

**Key words** chemical looping combustion; coal char; sol-gel;  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  oxygen carriers

## 0 引言

化学链燃烧技术(CLc)<sup>[1]</sup> 可以实现  $\text{CO}_2$  的低耗回收、 $\text{NO}_x$  的减排、化学能的梯级利用, 基本原理是将传统的燃烧借助于氧载体的作用分解为两个

反应。在燃料反应器中, 氧载体中的晶格氧与燃料发生还原反应, 生成  $\text{CO}_2$  和水蒸气, 通过冷凝得到高纯度的  $\text{CO}_2$ , 还原态氧载体循环到空气反应器中,

收稿日期: 2009-12-18; 修订日期: 2010-05-09

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(No.2006CB705807)

作者简介: 蒋林林(1985—), 男, 山东东营人, 硕士生, 主要从事化学链燃烧的研究。

与空气发生反应恢复晶格氧，气体产物为 N<sub>2</sub> 和未反应的 O<sub>2</sub>。

目前固体燃料 CLC 技术主要有两种途径<sup>[2]</sup>：(1) 将固体燃料汽化再进行传统 CLC；(2) 把固体燃料直接用于 CLC。Pan 等<sup>[2,3]</sup> 初步提出了固体燃料 CLC 系统的研究思路，并指出 Cu 基、Ni 基、Co 基氧载体是固体燃料 CLC 的合适氧载体。Lyngfelt 等<sup>[4]</sup> 在流化床中研究了 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 氧载体与石油焦、各种煤等固体燃料的反应性，并研究了水蒸气浓度、温度对反应过程的影响，搭建了用于研究固体燃料 CLC 的 10 kW 串行流化床反应系统。Rubel 等<sup>[5]</sup> 采用 TG-DSC-MS 发现 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末或是铁基催化剂具有很好的还原反应性。沈来宏等<sup>[6,7]</sup> 对 CaSO<sub>4</sub> 作为氧载体的串行流化床煤基 CLC 技术进行了模拟，采用流化床反应器以水蒸气作为汽化—流化介质、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为氧载体在 800~960°C 内的煤化学链燃烧反应特性进行了研究。向文国等<sup>[8]</sup> 采用分析纯 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 作为氧载体，在热重 (TGA) 中研究了它与神华煤单次还原反应的可行性。本课题组<sup>[9]</sup> 在 TGA 中研究过 NiO/NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 氧载体与煤焦的反应性。

众多氧载体中，铁基氧载体价格便宜，没有碳沉积的趋势，含铁氧化物的熔点都比较高，对环境无二次污染，因而受到广泛关注。但是，商业氧化铁或天然铁矿石等在高温下进行多次循环的氧化还原反应过程中会出现反应活性下降、破碎、碳沉积等问题，需要通过化学方法进行可控设计的制备或改性。本文采用溶胶凝胶法制备各组分混合均匀的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体，在 TGA 中对其与漯河煤焦/空气的多次循环反应性能进行了研究。

## 1 溶胶—凝胶法制备 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体及其物化表征

### 1.1 溶胶—凝胶法制备 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体

本文采用 Al(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>3</sub>、Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 为原料，HNO<sub>3</sub> 为胶溶剂，制备了 12 种氧载体，详细过程参见文献 [9]，选用粒径为 125~180 μm 的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体进行研究。

### 1.2 氧载体的物化表征

制备了 12 种氧载体，对其物化性能进行表征以初筛选合适的氧载体，筛选标准是无杂质相、多孔结构和较好的机械强度。物相组成由 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测定；孔结构由 ASAP2000 型比表面积与孔径测定仪 (BET) 进行测定；微观形貌由 Quanta 200 型环境扫描电子显微镜 (ESEM) 进行观测；机械强度由 FGJ-5 型数字式测力仪进行测定。

由表 1 氧载体的 XRD 结果可知，烧结温度高于 1200 °C 时，大部分氧载体中检测到杂质物相，原因是氧载体高温下熔融而与瓷舟烧结而被污染。

表 1 12 种新鲜 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体的 XRD 结果

Table 1 XRD characterization of 12 kinds of fresh oxygen carriers

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 氧载体	物相组成
F4A1016	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F4A1116	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F4A1216	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeSi <sub>2</sub>
F4A1316	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeSi <sub>2</sub>
F6A1016	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F6A1116	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F6A1216	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeSi
F6A1316	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeSi
F8A1016	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F8A1116	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F8A1216	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F8A1316	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

注：F4A1016, F-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量为 40%；A-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>；10- 烧结温度为 1000 °C；1- 干燥之后先预烧再烧结；6- 烧结时间为 6 h

对物相纯净的 6 中氧载体进行 BET 分析 (见表 2)，发现，随着烧结温度的升高、活性成分含量的提高，氧载体的比表面积、内孔容积、平均孔径均明显减小。这是由于热处理时氧载体组分向粒子内部孔隙处迁移，界面减少，结构致密化。但烧结后其比表面积、内孔容积、平均孔径仍足够大，表现为多孔结构，可用于 CLC 过程。

表 2 六种 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧载体 BET 分析及机械强度

Table 2 Pore structure and crushing strength of oxygen carriers

氧载体种类	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	内孔容积 (cm <sup>3</sup> /g)	平均孔径 (μm)	机械强度 (N)
F4A1016	7.1025	1.1419	0.1205	1.17±0.40
F4A1116	2.6156	0.0552	0.1139	1.13±0.24
F6A1016	4.8529	0.0736	0.1034	1.06±0.30
F6A1116	2.2810	0.0141	0.0841	1.28±0.35
F8A1016	3.0070	0.0179	0.0865	1.18±0.38
F8A1116	0.5322	0.0037	0.0933	1.82±0.34

对 6 种初筛选的氧载体，任选 30 个粒径在 125~180 μm 的同种颗粒进行破坏实验，记录破坏时的压力值 (表 2)。发现，随着烧结温度的升高，机械强度增加。由与相同粒径石英砂机械强度值 (1.25±0.39 N) 的对比可知，氧载体有足够的机械强度用于 CLC 过程。

氧载体 F6A1116 的微观形貌见图 1，可知新鲜氧载体为棱角分明、形状不规则的粉状颗粒 (图 1(a))，其表面有许多大小相对均匀的圆形颗粒 (图 1(b))，有利于化学反应的进行。

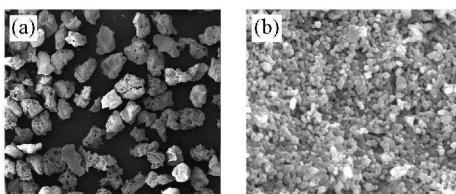


图 1 新鲜氧载体 F6A1116 的 ESEM 照片

Fig. 1 ESEM image for fresh F6A1116 oxygen carrier

## 2 氧载体与煤焦的反应性研究

### 2.1 实验过程

CLC 技术要求氧载体具有良好的还原–氧化反应性和持续循环能力, 在 STA 409 型 TGA 中, 研究了  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体与煤焦/空气的化学反应性。选取 150  $\mu\text{m}$  以下粒径的漯河煤, 采用国标方法制备煤焦, 其工业分析及元素分析见表 3; 根据煤焦的元素分析数据, 基于煤焦中 C、H、O 与氧载体中活性氧完全反应生成  $\text{CO}_2$ 、Fe 和  $\text{H}_2\text{O}$  的化学当量比, 计算确定实验中煤焦与氧载体的混合质量比(见图 2)。

TGA 反应器温度为 900  $^{\circ}\text{C}$ , 升温速率为 15  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 惰性气体  $\text{N}_2$  流量为 100 mL/min, 燃料为煤焦, 氧化气氛直接使用空气, 流量为 100 mL/min。

### 2.2 试验结果

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  与煤焦发生还原反应过程的热重分析曲线如图 2 所示, 曲线 7 为温度变化过程; 曲线 1~6 则分别为不同氧载体与煤焦反应的质量变化。由图 2 可知, 氧载体与煤焦的混合物在 880  $^{\circ}\text{C}$  左右质量急剧下降, 表明此时还原反应快速进行。氧载体 F4A1016(曲线 1)、F4A1116(曲线 2) 与煤焦的化学反应性依次减小; F6A 系列、F8A 系列也基本符合上述规律, 表明烧结温度 1000  $^{\circ}\text{C}$  的氧载体反应性更好。理论上煤焦与 F4A 系列、F6A 系列和 F8A 系列氧载体完全还原反应后的失重率分别为 84.8%、78.1% 和 71.8%, 但实际上  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的还原产物为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与 FeO。依据理论失重率和实际失重率的比值, 可知 F4A1016 反应性较好(最终相对还原程度 88.79%), 其次为 F4A1116 (88.10%)、F6A1016 (83.06%)、F6A1116 (82.06%)、F8A1116 (77.14%) 和 F8A1016 (77.11%)。综合 BET、机械强度、还原反应性能等因素, 认为 F6A1116 氧载体(曲线 4)具有较

好的还原反应性和物理性能, 选用其进行后续实验研究。

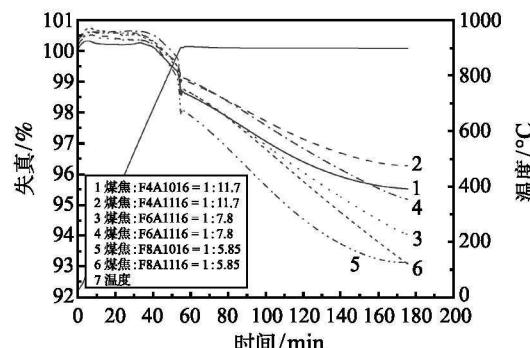


图 2 Fe- 基氧载体与煤焦的化学反应

Fig. 2 TGA results in the reduction reaction between the iron-based oxygen carrier and char

图 3 为 F6A1116 与煤焦/空气的 4 次循环反应结果, 由图可知: 样品在 670  $^{\circ}\text{C}$  时开始反应, 900  $^{\circ}\text{C}$  前反应较快 (900  $^{\circ}\text{C}$  时出现最大微分失重率为  $-0.11502\%/\text{min}$ ), 之后的反应速率变小。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  与煤焦快速反应生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 随后生成 FeO, 还原产物由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、FeO 组成。氧化过程的失重是因为没反应完的煤焦在空气中被燃烧掉。

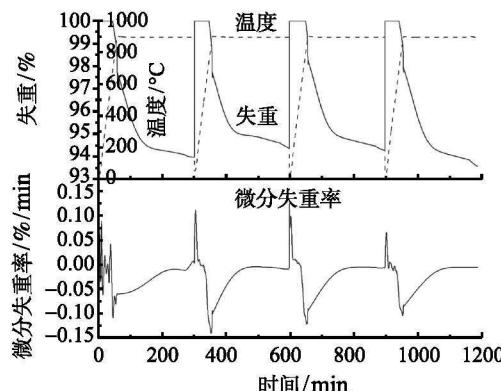


图 3 F6A1116 氧载体与煤焦/空气的 4 次循环反应

Fig. 3 TGA results in the multiple-cycle reduction/ oxidation reaction between the F6A1116 oxygen carrier and char/air

由表 3 得漯河煤焦为  $\text{C}_{4.388}\text{H}_{0.525}\text{S}_{0.016}\text{O}_{0.267}\text{N}_{0.069}$ , 假设反应过程中的失重质量均为氧载体与煤焦反应产生,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  完全还原为 Fe, C 全部转化为  $\text{CO}_2$ , S 全部转化为  $\text{SO}_2$ , N 以原来的形态留在反应

表 3 漯河煤和漯河煤焦的工业分析及元素分析

Table 3 Approximate and elemental analysis of the Luohu coal and coal char

样品	工业分析(%, ad)				元素分析(%, ad)				
	水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	N	$S_t$	O
漯河煤	2.978	19.021	38.705	40.786	50.773	3.530	1.036	0.676	2.302
漯河煤焦	2.328	4.243	38.741	54.689	52.661	0.525	0.966	0.506	4.273

物中, 可计算氧载体的还原分率如下:

$$X_{\text{red}} = \frac{\text{参加反应的活性氧质量}}{\text{全部活性氧质量}}$$

结果如图 4 所示。在实验开始后 130 min 内, 还原分率随还原次数的增加而增大。第 3 次还原分率出现的背离, 可能与样品在反应器中的堆积密度有关。由此可以推断  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体的还原反应性随着循环次数的增加而增大, 这也是溶胶凝胶法制备的氧载体的一个独特优点<sup>[9]</sup>。

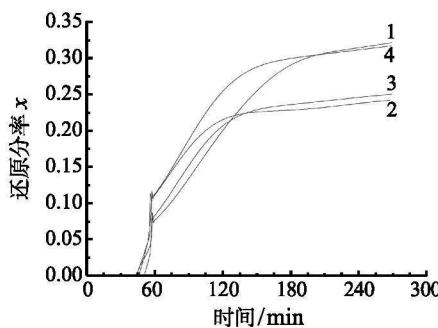


图 4 F6A1116 与漯河煤焦在热重中 4 次反应的还原分率  
Fig. 4 The conversion of the multiple reaction between the F6A1116 oxygen carrier and char in TGA

F6A1116 氧载体与煤焦/空气完成 1 次循环后, 反应产物由  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  组成, 表明  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与煤焦的还原产物完全被氧化为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  为煤焦反应后可检测到的产物; 第 4 次还原产物由  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  组成, 表明活性成分  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与煤焦在文中实验条件下生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ , 煤焦反应后主要产物为  $\text{SiO}_2$ , 随着循环次数的增加, 没有杂质物相生成, 表现了良好的循环反应性。

图 5 为 4 次循环反应后 F6A1116 的微观面貌, 反应前氧载体表面由许多细小的颗粒组成, 分界线明显; 而反应后颗粒生长增大, 相邻颗粒团聚增大, 分界线变得模糊, 可能是高温及表面张力所致。表面出现了一定程度的烧结现象, 但仍为多孔结构。

### 3 结 论

(1) 采用溶胶-凝胶法制备  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体, 烧结温度要低于  $1200^{\circ}\text{C}$ , 所得氧载体的比表面积随着活性成分  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量的增加而减小。

(2) 综合机械强度、BET、反应性能等因素, 选用 F6A1116 氧载体 ( $60\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  含量,  $1100^{\circ}\text{C}$  烧结 6 h) 进行与煤焦/空气的多次循环实验, 发现在文中实验条件反应产物由  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  四种物相组成,  $\text{SiO}_2$  为煤焦反应后主要产物。

(3)  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  与煤焦的反应尽可能控制在  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  转化为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的过程, 以获得较高的反应速率。

(4) 实验结果初步证明, 基于  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  氧载体、燃用固体燃料煤焦的化学链燃烧技术是可行的。

### 参 考 文 献

- Richter H J, Knoche K F. Reversibility of Combustion Process, Efficiency and Costing, Second Law Analysis of Processes [J]. ACS Symposium Series, 1983, 235: 71–85
- Cao Y, Pan W P. Investigation of Chemical Looping Combustion By Solid Fuels. 1. Process Analysis [J]. Energy and Fuels, 2006, 20(5): 1836–1844
- Cao Y, Casenas B, Pan W P. Investigation of Chemical Looping Combustion by Solid Fuels. 2. Redox Reaction Kinetics and Product Characterization with Coal, Biomass, and Solid Waste as Solid Fuels and CuO As An Oxygen Carrier [J]. Energy and Fuels, 2006, 20(5): 1845–1854
- Leion H, T Mattisson, A Lyngfelt. Solid fuels in Chemical-Looping Combustion [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(2): 180–193
- Rubel A, Liu K L, Neathery J, et al. Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion of Solid Fuels [J]. Fuel, 2009, 88(5): 876–884
- 沈来宏, 肖军, 肖睿, 等. 基于  $\text{CaSO}_4$  载氧体的煤化学链燃烧分离  $\text{CO}_2$  研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 69–74  
SHEN Laohong, XIAO Jun, XIAO Rui, et al. Chemical Looping Combustion of Coal in Interconnected Fluidized Beds of  $\text{CaSO}_4$  Oxygen Carrier [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 69–74
- 高正平, 沈来宏, 肖军. 基于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  载氧体的煤化学链燃烧试验 [C]// 中国工程热物理学会燃烧会议论文集. 西安, 2008: 1–4  
GAO Zhengping, SHEN Laihong, XIAO Jun. Chemical Looping Combustion of Coal Based on  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Oxygen Carrier [C]// The Academic Conference of Engineering and Thermal Physics of China, Combustion Division. Xian, 2008: 1–4
- 王莎, 孙小燕, 向文国, 等.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  载氧体还原煤置换燃烧特性研究 [C]// 中国工程热物理学会燃烧会议论文集. 西安, 2008: 1–10  
WANG Sha, SUN Xiaoyan, XIANG Wenguo, et al. Study on the Chemical Looping Combustion of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Oxygen Carrier and Coal [C]// The Academic Conference of Engineering and Thermal Physics of China, Combustion Division. Xi'an, 2008: 1–10
- ZHAO H B, LIU L M, WANG B W, et al. Sol-Gel-Derived  $\text{NiO}/\text{NiAl}_2\text{O}_4$  Oxygen Carriers for Chemical-Looping Combustion by Coal Char [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(2): 898–905

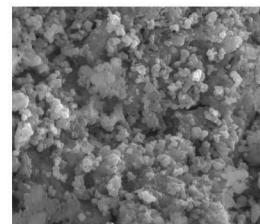


图 5 反应后氧载体 F6A1116 的 ESEM 照片

Fig. 5 ESEM image for the used F6A1116 oxygen carrier