温度对粉煤灰 – 硫酸渣共还原制备铁硅合金过程的影响

雷家柳[1]，李 洁[2]，寇勇勇[2]，裴新平[1a]，万 凯[1a]，付勇军[1]

（1. 湖北理工学院 a. 材料科学与工程学院；b. 先进材料制造与固废资源化协同技术湖北省工程研究中心，湖北 黄石 435003；2. 湖北国安特殊钢检验检测有限公司，湖北 黄石 435000）

摘要：本文以粉煤灰和硫酸渣为研究对象，采用热力学分析及高温试验探索粉煤灰 – 硫酸渣固废体系协同共还原制备铁硅合金的共还原机理，以及焙烧温度对还原产物微观结构演变特征及物相转化规律的影响。结果表明：铁硅合金内存在多种物相组成，硫酸渣主要物相有助于促进粉煤灰中莫来石相和石英相还原。XRD 分析表明，当还原温度为 1 150、1 200 ℃时，焙烧产品中合金相主要为 Fe_3Si；超过 1 250 ℃后 Fe_3Si 相完全消失；在 1 300 ~ 1 400 ℃温度区间，铁硅合金主要以 Fe_5Si_3 相存在。SEM-EDS 分析表明，铁硅合金颗粒呈球形，当反应温度为 1 150 ℃时，表面有着大小不一致的含铝、硅、氧凸包；当反应温度为 1 250 ℃时，铁硅合金表面的凸包颗粒尺寸变小；当反应温度提高到 1 350 ℃时，铁硅合金表面凸包尺寸更为细小，数量明显减少。本文研究成果可为其他共还原因素对粉煤灰与硫酸渣共还原体系的影响提供指导，继而为实现粉煤灰与硫酸渣固废体系的全资源化利用奠定基础。

关键词：硫酸渣；粉煤灰；焙烧温度；共还原；铁硅合金

中图分类号：TF645；TF09　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000 – 8764(2022)06 – 0091 – 08

doi：10. 13403/j. sjqt. 2022. 06. 089

Effect of temperature on preparation of iron-silicon alloy by coreduction of fly ash and sulfuric acid residue

LEI Jialiu[1], LI Jie[2], KOU Yongyong[2], PEI Xinping[1a], WAN Kai[1a], FU Yongjun[1]

(1. *Hubei Polytechnic University a. School of Materials Science and Engineering; b. Hubei Engineering Research Center for Collaborative Technology of Advanced Material Manufacturing and Solid Waste Recycling, Huangshi* 435003, *Hubei, China*; 2. *Hubei Guoan Special Steel Inspection and Testing Co., Ltd., Huangshi* 435000, *Hubei, China*)

Abstract: In this paper, fly ash and sulfuric acid residue are taken as the research objects, thermodynamic analysis and high-temperature test are adopt to explore the coreduction mechanism of preparing iron-silicon alloy and the influence of calcination temperature on microstructure evolution characteristics and phase transformation law of reduction products prepared by coreduction of fly ash-sulfuric acid residue solid waste system. The results show that there are various phase compositions between iron-silicon alloys, and the main phase of sulfuric acid residue is helpful to promote the reduction of mullite phase and quartz phase in fly ash. XRD analysis shows that the alloy phase in the calcination product is mainly Fe_3Si at the reduction temperature of 1 150 and 1 200 ℃. When the temperature exceeds 1 250 ℃, Fe_3Si phase disappears completely. In the temperature range of 1 300 ~ 1 400 ℃, iron-silicon alloy mainly exists in the form of Fe_5Si_3. SEM-EDS analysis shows that the iron-silicon alloy particles are spherical, and when the reaction temperature is 1 150 ℃, the surface has convex hull containing aluminum, silicon and oxygen with different

收稿日期：2022 – 07 – 22；**修回日期**：2022 – 08 – 06

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704105)；湖北理工学院校级重点项目(21xjz01A)

作者简介：雷家柳(1987—)，男，副教授，从事冶金固体综合利用研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

sizes. When the temperature is 1 250 ℃, the size of convex hull particles on the surface of iron-silicon alloy becomes smaller. When the reaction temperature is increased to 1 350 ℃, the convex hull size on the surface of iron-silicon alloy is smaller and the number is obviously reduced. The research results can provide guidance for the influence of other coreduction factors on the coreduction system of fly ash and sulfuric acid residue, and then lay a foundation for the full resource utilization of the solid waste system of fly ash and sulfuric acid residue.

Key words: sulfuric acid residue; fly ash; calcination temperature; coreduction; iron-silicon alloy

《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》指出，不断提高大宗固废综合利用效率，是实现碳达峰碳中和的重要举措。然而，由于固废成分复杂、基础理论研究不足等原因，目前我国固废大宗利用的工业附加值偏低，高附加值利用消纳量较小[1]。若能基于固废资源特点，有效实现多种固废的协同资源化及高附加值利用，对于促进经济社会低碳绿色发展意义重大。

粉煤灰作为电力工业和冶金工业燃煤电厂的固体废弃物，是我国堆积量最大的固废之一。据估计，2024 年粉煤灰生产量将达到 9.25 亿吨[2]。粉煤灰的长期堆积会占用大量土地，继而导致一系列的环境污染问题[3]。我国粉煤灰成分以 SiO_2、Al_2O_3 为主，其次为 Fe_2O_3，三者的总和质量分数超过 80%[4-5]。其中 Al_2O_3 是电解铝行业重要的原料，随着国内外资源竞争日趋激烈，适合氧化铝工业发展的优质资源日渐稀缺，粉煤灰作为一种铝资源受到国内外学者的广泛研究。现有研究比较关注粉煤灰中铝元素的提取和氧化铝的制备[6-11]，而忽视了其他元素的回收利用。目前关于粉煤灰中 Al、Si、Fe 的同步回收，相关研究工作还较为缺乏。有人开展了高铝粉煤灰制备 Al-Si 合金的研究，然而，当还原温度达到了 2 200 ℃左右时，大规模工业化生产应用出现难题[12]。张羡夫[13]和马国军等[14]、杨大兵等[15]利用粉煤灰制备得到 Al-Si-Fe 合金，实现了粉煤灰中 Al、Si、Fe 的同步回收利用，然而还原温度也为 1 800 ~ 1 900 ℃。此外，试验中还存在矿渣与金属不易分离，铝的回收效率较低等问题。已有研究表明，Fe_2O_3 添加剂可以大大促进 SiO_2 的还原，显著降低还原温度[16-17]。吕学伟等[18-19]结合热力学研究和相关试验，研究了纯 Fe_2O_3 助剂对粉煤灰碳热还原的促进作用，结果表明：Fe_2O_3 的加入有助于降低还原温度，且已还原出来的铁可与随后还原出来的硅结合生成铁硅合金，铁硅合金的生成降低了硅的活度，从而促进了莫来石相的进一步分解及 SiO_2 的还原，这为后续铁硅合金和氧化铝的分离提供了条件。

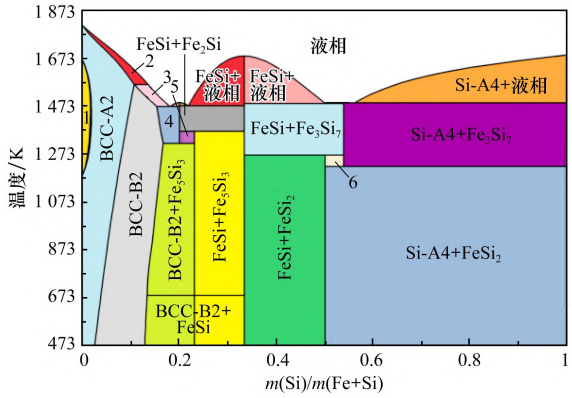
而硫酸渣作为黄铁矿焙烧制酸产生的渣，其含有丰富的铁资源，铁的质量分数为 40%~60%，物相组成主要为 Fe_2O_3，其次为 SiO_2、CaO 和 Al_2O_3 及少量的碱金属氧化物等。关于硫酸渣中有价金属的回收研究，主要还是以提铁为主[20-23]，而 SiO_2 和 Al_2O_3 的富集回收较少涉及。由于硫酸渣含有较高的硫，严重阻碍了硫酸渣回收利用的工业应用进程[24-25]。目前我国每年产生的硫酸渣数量在千万吨以上，大部分都被填埋处理，这样不仅浪费了资源，提高了处理成本，而且对环境有很大的污染。硫酸渣中丰富的 Fe_2O_3 资源正好可以作为粉煤灰催化还原的助剂，同时又可同步富集回收硫酸渣中的硅铝资源。

基于此，本文以冶金及电力行业中的固废粉煤灰、化工行业中的固废硫酸渣为原料，分析其资源特点，提出粉煤灰协同硫酸渣煤基共还原制备铁硅合金及同步分离 Al_2O_3 的全资源化利用思路，其中铁硅合金可用于冶金行业的钢铁冶炼和铸造领域，高 Al_2O_3 尾渣可用于有色行业作为炼铝的原料；此外，重点研究氩气气氛条件下焙烧温度对粉煤灰 - 硫酸渣共还原产物微观结构演变特征及物相转化规律的影响。本文研究成果可为其他因素对该固废体系共还原制备铁硅合金的影响提供指导，继而为实现多固废体系的全资源化、高附加值利用奠定基础。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　热力学分析

与单一金属的还原不同的是，铁硅之间可形成多种合金相。为了明确共还原合金产物及其平衡物相组成，本文使用 FactSage7.0 软件进行 Fe-Si 合金相图计算，结果如图 1 所示。



1—FCC-A1；2—BCC-A2＋液相；3—BCC-B2＋液相；4—BCC-B2＋Fe_2Si；5—Fe_5Si_3＋Fe_2Si；6—$FeSi_2$＋Fe_3Si_7。

图 1　Fe-Si 合金相图(标准大气压下)

Fig. 1　Phase diagram of Fe-Si alloy(at normal atmospheric pressure)

由图 1 可知：Fe-Si 之间稳定存在的合金相有 Fe_3Si、Fe_5Si_3、FeSi 和 $FeSi_2$。其中，大部分铁硅合金相在温度超过 1 200 ℃时开始出现液相。Fe_5Si_3 在 1 100 ℃时会转变为 FeSi 和 Fe_2Si，FeSi 的液相线温度达 1 400 ℃，$FeSi_2$ 在 1 000 ℃时会转变为 FeSi 和 Fe_3Si_7。本文试验原料中，设置 $n(Fe):n(Si)=1:1$。为确保还原合金相的熔分、聚集和长大，试验保温温度范围设置为 1 150～1 400 ℃。

焙烧过程可能发生的反应如式(1)～(10)所示。此外，根据粉煤灰与硫酸渣的主要物相组成，使用 HSC chemistry 软件计算焙烧产品可能存在的铁硅合金相的还原热力学条件，结果如图 2 所示。由图 2 可知：Fe_2O_3 的存在有利于促进莫来石相和石英石相的还原，降低还原温度；同时，不同铁硅相的还原理论温度差别较大，硅质量分数越高，其理论还原温度也较高，即以 $Fe_3Si\rightarrow Fe_5Si_3\rightarrow FeSi\rightarrow FeSi_2$ 的顺序，还原温度依次升高。

$$Al_6Si_2O_{13}+6C=4CO+3Al_2O_3+2SiC \quad (1)$$

$$Al_6Si_2O_{13}+11/2C+1/2Fe_2O_3=11/2CO+3Al_2O_3+FeSi_2 \quad (2)$$

$$Al_6Si_2O_{13}+7C+Fe_2O_3=7CO+3Al_2O_3+2FeSi \quad (3)$$

$$Al_6Si_2O_{13}+9C+5/3Fe_2O_3=9CO+3Al_2O_3+2/3Fe_5Si_3 \quad (4)$$

$$Al_6Si_2O_{13}+13C+3Fe_2O_3=13CO+3Al_2O_3+2Fe_3Si \quad (5)$$

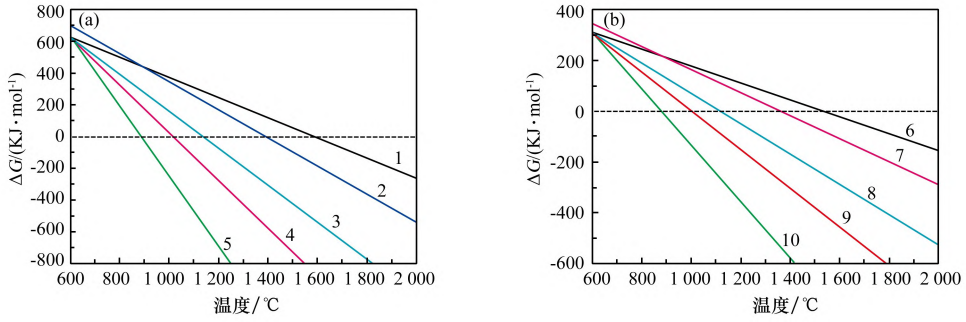
$$SiO_2+3C=2CO+SiC \quad (6)$$

$$SiO_2+11/4C+1/4Fe_2O_3=11/4CO+1/2FeSi_2 \quad (7)$$

$$SiO_2+7/2C+1/2Fe_2O_3=7/2CO+FeSi \quad (8)$$

$$SiO_2+9/2C+5/6Fe_2O_3=9/2CO+1/3Fe_5Si_3 \quad (9)$$

$$SiO_2+13/2C+3/2Fe_2O_3=13/2CO+Fe_3Si \quad (10)$$



(a) 莫来石相；(b) 石英相

1～10—反应(1)～(10)。

图 2　不同铁硅合金相的还原热力学

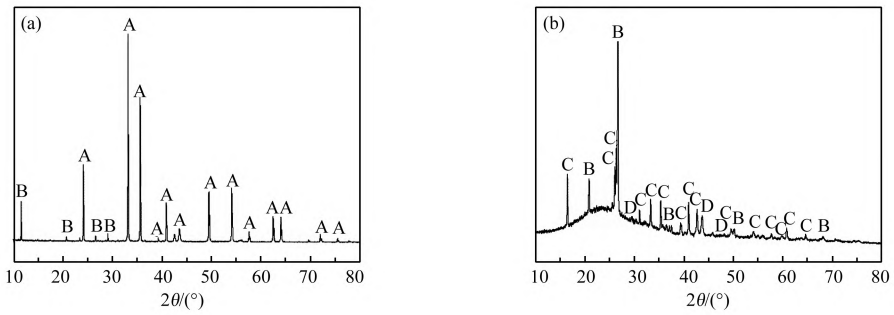
Fig. 2　Reduction thermodynamics of different ferrosilicon alloy phases

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 试验原料与方法

2.1 试验原料

试验所用固废为硫酸渣和粉煤灰，其中硫酸渣颜色呈黑褐色，粉煤灰呈灰白色。硫酸渣和粉煤灰的X射线衍射和化学成分分析分别如图3和表1所示。由图3和表1可知：硫酸渣的主要物相为Fe_2O_3，其次为SiO_2，全铁品位为56.64%；粉煤灰主要物相为莫来石相和石英相，其主要成分为SiO_2和Al_2O_3，三者的总和质量百分数达80%以上。



（a）硫酸渣；（b）粉煤灰

A—Fe_2O_3；B—SiO_2；C—$Al_6Si_2O_{13}$；D—$CaCO_3$。

图3 硫酸渣和粉煤灰XRD分析

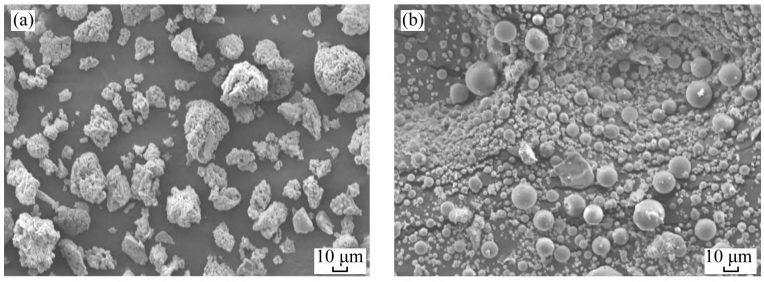
Fig. 3 XRD patterns of sulfuric acid residue and coal fly ash

表1 硫酸渣与粉煤灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of sulfuric acid residue and coal fly ash %

原料名称	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	TFe	S	P	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	其他
硫酸渣	11.68	1.06	2.13	1.85	1.36	56.64	1.32	0.04	—	—	—	23.92
粉煤灰	54.91	26.07	—	5.15	0.93	—	—	—	4.80	0.89	1.46	5.79

硫酸渣和粉煤灰的扫描电镜SEM微观形貌分析如图4所示。由图4可知，硫酸渣呈不规则颗粒状，表面有较多孔隙；粉煤灰呈球形微珠分布，表面光滑。试验所用还原剂为无烟煤，其化学成分如表2所示。无烟煤采用0.106 mm筛子筛分，其固定碳质量分数为76.56%。



（a）硫酸渣；（b）粉煤灰

图4 硫酸渣和粉煤灰SEM微观形貌

Fig. 4 SEM morphology of sulfuric acid residue and coal fly ash

表2 无烟煤的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of anthracite %

C	S	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO
76.56	0.54	6.09	2.68	0.23	1.28	0.35

2.2 试验方法

试验主要研究焙烧温度对粉煤灰－硫酸渣固废体系共还原过程中微观结构和物相转变的影响规律。试验所用设备为真空碳管炉(可通气氛)，设备示意如图5所示。试验方法：将硫酸

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

渣和粉煤灰按原料中 $n(Fe):n(Si)=1:1$（摩尔比）进行配料混匀，添加适量的 15% 的聚乙烯醇溶液作为黏结剂，还原剂为无烟煤；为保证充分还原，设置 $n(C):n(O)=1.05:1$，其中 $n(O)$ 为混合料中 Fe_2O_3 和 SiO_2 中 O 的物质的量之和；将混合料在 10 MPa 压力下制成 ∅20 mm×30 mm 的圆柱状试样，然后将其在 110 ℃ 干燥箱内烘干 4 h 至恒重后备用；保温结束后，试样随炉冷却到室温。

每个温度试验重复三次。试验所用氧化铝坩埚尺寸为 ∅40 × 60 mm，保温温度范围为 1 150～1 400 ℃，保温时间固定为 2 h，升温速率为 10 ℃/min。试验全程通高纯氩气保护，气体流量为 600 mL/min。试验结束后将不同温度条件下获得的焙烧产品粉磨至 －0.074 mm 粒级，采用 XRD 分析物相组成。同时将焙烧产品经简单破碎后，取少量粉末状样品黏到导电胶上，利用真空镀膜仪对样品表面喷金制得扫描电镜样品，采用 SEM-EDS 分析微观形貌及元素分布特征。

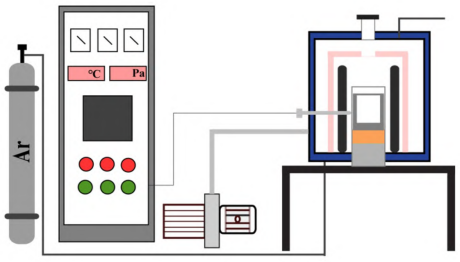


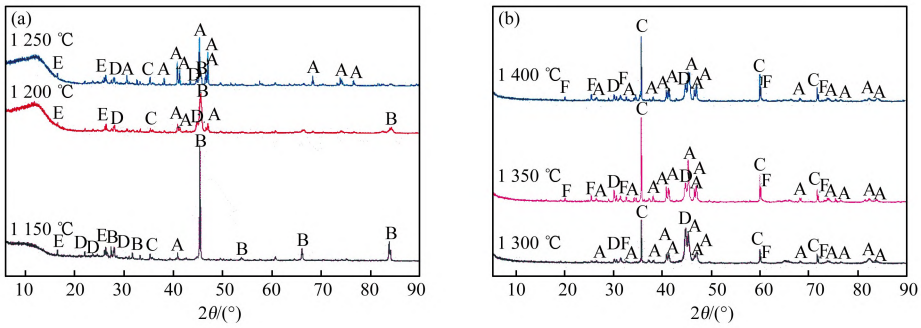
图 5　真空碳管炉示意

Fig. 5　Diagram of vacuum carbon tube furnace

3　结果与讨论

3.1　焙烧温度对物相转变的影响

不同温度条件下获得的焙烧样品的 X 射线衍射分析如图 6 所示。由图 6 可知，在 1 150 ℃ 和 1 200 ℃ 还原温度时，焙烧产品中合金相主要为 Fe_3Si，由于还原温度相对较低，同时硅开始还原时金属铁已大量存在，所以此时铁硅相以低硅质量分数的合金相存在，这与前述热力学分析一致。随着还原温度的提高，Fe_3Si 相的强度逐渐变弱的同时开始出现 Fe_5Si_3 的衍射峰。超过 1 250 ℃后，Fe_3Si 相完全消失，此时铁硅合金主要以 Fe_5Si_3 的形式存在（如 1 300～1 400 ℃温度区间），此外在 1 300～1 400 ℃高温区间还检测到了 Al_2O_3 衍射峰的存在，这表明温度升高有利于较高硅质量分数的合金相形成及 Al_2O_3 的分离。虽然 Si 质量分数增加会使 Fe-Si 合金的饱和磁化强度降低，但硅质量分数超过 12% 后其降低趋势较为平缓（Fe_3Si 和 Fe_5Si_3 的比饱和磁化强度约为 88、80 Am^2/kg）[26]，试验温度范围内存在的铁硅合金相都具有良好的磁性能。此外，由图 6 还可知，当温度超过 1 300 ℃后，SiC 相的衍射峰明显增强，同时还存在钙长石相 $CaAl_2Si_2O_8$。这些物相最终经磁选后会存在尾渣中，严重影响硅的回收率及尾渣中 Al_2O_3 质量分数。综上分析，为确保协同利用及后续磁选效果，以 Fe_5Si_3 为目标合金相，温度控制在 1 300 ℃左右为宜。



温度区间/℃：（a）1 150～1 250；（b）1 300～1 400

A—Fe_5Si_3；B—Fe_3Si；C—SiC；D—$CaAl_2Si_2O_8$；E—Al_2SiO_5；F—Al_2O_3。

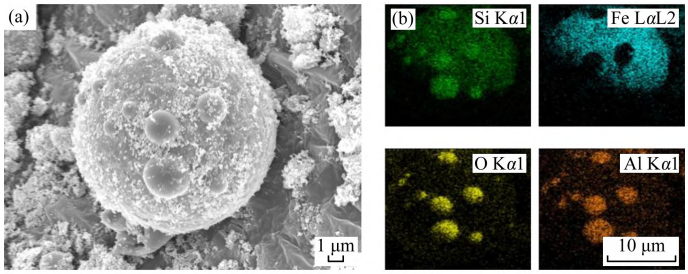
图 6　焙烧产品 XRD 物相分析

Fig. 6　XRD phase analysis of roasted products

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2 焙烧温度对微观结构演变的影响

为了分析共还原温度对焙烧样品微观结构演变规律的影响，在 1 150、1 250、1 350 ℃温度下对焙烧样品进行扫描电镜 SEM-EDS 分析，得到相应温度下焙烧样品中铁硅合金颗粒分别如图 7 ~9 所示。由图 7 可知：铁硅合金颗粒呈球形，其表面明显覆着有大小不一的小颗粒球形凸包，面扫描结果显示其成分主要为 Al、Si、O，推测可能是莫来石未分解完全而形成的铝硅酸盐物质；此时铁硅合金颗粒表面较为粗糙，同时覆着有较多的白色粉状物质。

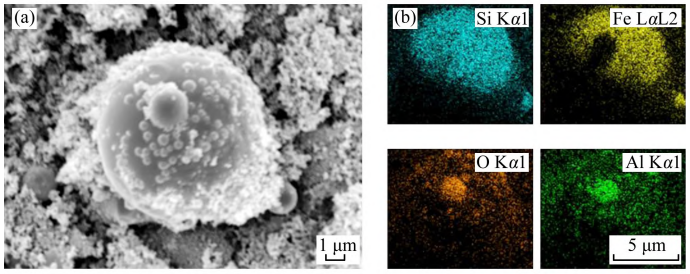


（a）微观形貌；（b）面扫描

图 7 1 150 ℃焙烧试样 SEM-EDS 分析

Fig. 7 SEM-EDS analysis of samples roasted at 1 150 ℃

由图 8 可知：球形铁硅合金颗粒表面仍然明显覆着有大小不一的小颗粒球形凸包，面扫描结果表明其成分仍为 Al、Si、O，但凸包尺寸较为细小；另外，铁硅合金颗粒表面已开始变为较为光滑，同时残留覆着物开始变少。

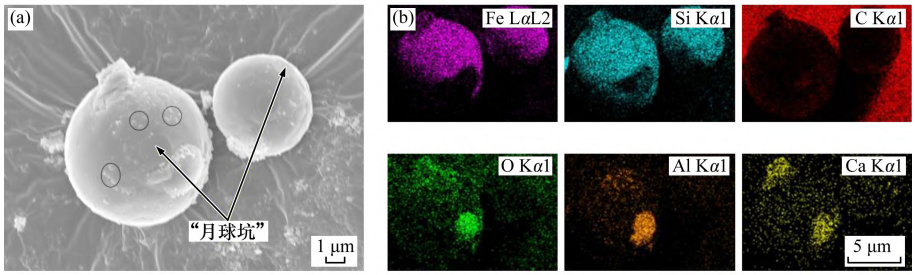


（a）微观形貌；（b）面扫描

图 8 1 250 ℃焙烧试样 SEM-EDS 分析

Fig. 8 SEM-EDS analysis of samples roasted at 1 250 ℃

由图 9 可知：球形铁硅合金颗粒表面覆着的细小颗粒球形凸包尺寸更为细小，数量明显减少。这表明温度升有利于高铝硅酸盐开始分解变小、甚至消失，尤其是较小颗粒的铁硅合金表面已完全不存在细小的凸包。铁硅合金颗粒表面变得更为光滑，同时残留覆着物大大减



（a）微观形貌；（b）面扫描

图 9 1 350 ℃焙烧试样 SEM-EDS 分析

Fig. 9 SEM-EDS analysis of samples roasted at 1 350 ℃

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

少，但此时铁硅合金颗粒表面开始出现了扁平的凸包，面扫描结果表明其成分为 Al、Ca、O，推测可能为莫来石相分解完全后，分离出来的 Al_2O_3 与渣相中的 CaO 在较高温度下形成了钙铝酸盐。另外，此时铁硅合金颗粒表面出现了图中箭头所示的“月球坑”形貌，推测可能与钙铝酸盐在机械力作用下发生脱落分离有关。

上述热力学理论分析及试验研究表明，焙烧温度对粉煤灰与硫酸渣共还原体系的还原反应历程及微观形貌和物相组成影响显著，合适的温度有利于实现产物物相和微观结构的有效调控，继而为后续的高效分离提供条件。

4　结　论

（1）铁硅合金之间存在多种物相组成，硫酸渣主要物相有助于促进粉煤灰中莫来石相和石英相还原。但是，不同铁硅相的形成理论温度差别较大，硅质量分数越高，其转变温度也越高，即铁硅相还原转变的温度以 $Fe_3Si \rightarrow Fe_5Si_3 \rightarrow FeSi \rightarrow FeSi_2$ 的顺序依次升高。

（2）XRD 分析表明，在 1 150、1 200 ℃还原温度时，焙烧产品中合金相主要为 Fe_3Si。随着还原温度的提高，Fe_3Si 相的强度逐渐变弱同时开始出现 Fe_5Si_3 的衍射峰。超过 1 250 ℃后 Fe_3Si 相完全消失，在 1 300 ~ 1 400 ℃温度区间，铁硅合金主要以 Fe_5Si_3 的形式存在。

（3）SEM-EDS 分析表明，铁硅合金颗粒呈球形，反应温度为 1 150 ℃时，表面有着大小不一致的含铝、硅、氧凸包。当温度为 1 250 ℃时，铁硅合金表面的凸包颗粒尺寸变小，且表面的附着残留物质也比 1 150 ℃时减少。当反应温度在 1 350 ℃时，合金表面凸包尺寸更为细小，数量明显减少。但同时表面会出现主要成分是钙铝酸盐的扁平凸包。

（4）焙烧温度对粉煤灰与硫酸渣共还原体系的还原反应历程及微观形貌和物相组成影响显著。本文研究成果可为其他共还原因素对粉煤灰与硫酸渣共还原体系的影响提供指导，继而为实现粉煤灰与硫酸渣固废体系的全资源化、高附加值利用奠定基础。

参考文献：

[1] 石晓莉，杜根杰，杜建磊，等．大宗工业固体废物综合利用产业存在的问题及建议[J]．现代矿业，2022，38(6)：227－229.
SHI Xiaoli，DU Genjie，DU Jianlei，et al. Problems and suggestions on comprehensive utilization of bulk industrial solid waste[J]. Modern Mining，2022，38(6)：227－229.

[2] 徐硕，杨金林，马少健．粉煤灰综合利用研究进展[J]．矿产保护与利用，2021，41(3)：104－111.
XU Shuo，YANG Jinlin，MA Shaojian. Research progress in the comprehensive utilization of fly ash[J]. Conservation & Utilization of Mineral Resources，2021，41(3)：104－111.

[3] 宁松瑞，韩霁昌，张扬，等．粉煤灰在土地整治工程中的研究及应用现状[J]．环境工程，2016(S1)：1025－1028.
NING Songrui，HAN Jichang，ZHANG Yang，et al. The status of applications and researchs of fly ash used in land consolidation engineering[J]. Environmental Engineering，2016(S1)：1025－1028.

[4] GUO Chunbin，ZOU Jingjing，JIANG Yinshan，et al. Thermal activation of coal fly ash by sodium hydrogen sulfate for alumina extraction[J]. Journal of Materials Science，2014(12)：4315－4322.

[5] SIBANDA V，NDLOVU S，DOMBO G，et al. Towards the utilization of fly ash as a feedstock for smelter grade alumina production：A review of the developments[J]. Journal of Sustainable Metallurgy，2016(2)：167－184.

[6] 王腾飞，张金山，李侠，等．碱法提取高铝粉煤灰中氧化铝的研究进展[J]．矿产综合利用，2019，215(1)：16－21.
WANG Tengfei，ZHANG Jinshan，LI Xia，et al. Research progress of extracting alumina in alkali method from high-alumina coal fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2019，215(1)：16－21.

[7] GUO Yanxia，LI Yaoyao，CHENG Fangqin，et al. Role of additives in improved thermal activation of coal fly ash for aluminaextraction[J]. Fuel Processing Technology，2013，110：114－121.

[8] YAO Z T，XIA M S，SARKER P K，et al. A review of the alumina recovery from coal fly ash，with a focus in China[J]. Fuel，2014，120：74－85.

[9] 肖永丰．粉煤灰提取氧化铝方法研究[J]．矿产综合利用，2020，224(4)：161－167.
XIAO Yongfeng. Study on the methods of leaching alumina from fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2020，224(4)：161－167.

[10] 朱辉，谢贤，李博琦，等．从粉煤灰中提取氧化铝技术进展

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. 矿产保护与利用,2020(6):154 – 161.
ZHU Hui, XIE Xian, LI Boqi, et al. Current situation of alumina extraction from fly ash[J]. Conservation & Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 154 – 161.

[11] SHI Yuan, JIANG Kaixi, ZHANG Tingan, et al. Cleaner alumina production from coal fly ash: membrane electrolysis designed for sulfuric acid leachate[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118470 – 118479.

[12] LU H M, WU G Z, NEELAMEGGHAM N R. Aluminum-silicon alloys prepared fromhigh-aluminum fly ash to extract magnesium from serpentine[M]. TMS Meeting & Exhibition, 2018: 557 – 564.

[13] 张羡夫. 电热还原高铝粉煤灰制取 Fe-Al-Si 合金的试验研究[J]. 铁合金,2005(5):11 – 15.
ZHANG Xianfu. Test study on electric heat reduction high aluminum powder coal ash to exacted Fe-Al-Si[J]. FERRO-ALLOYS, 2005(5): 11 – 15.

[14] MA Guojun, JIN Yibiao, YANG Dabin. Production of Si-Al-Fe alloy with carbothermal reduction of coal fly ash[J]. Advanced Materials Research, 2011, 291 – 294: 1808 – 1811.

[15] 杨大兵,姚华强,马国军. 碳热还原电厂粉煤灰冶炼硅铝铁合金[J]. 再生资源与循环经济,2011,4(2):33 – 36.
YANG Dabin, YAO Huaqiang, MA Guojun, et al. Production of Si-Al alloy with carbothermal reduction of fly ash from thermal power plant[J]. Renewable Resources & Circular Economy, 2011, 4(2): 33 – 36.

[16] BANDYOPADHYAY S, MUKERJI J. Reaction sequences in the synthesis of silicon nitride from quartz[J]. Ceramics International, 1991, 17(3): 171 – 179.

[17] 李晓雷,王健,季惠明,等. Fe_2O_3 对碳热还原氮化 SiO_2 合成 Si_2N_2O 的催化效应及机理[J]. 宇航材料工艺,2012(2):95 – 98.
LI Xiaolei, WANG Jian, JI Huiming, et al. Catalytic effect and mechanism of Fe_2O_3 on synthesis of Si_2N_2O by carbothermal reduction and nitridation of SiO_2[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(2): 95 – 98.

[18] XUE Yang, YU Wenzhou, JIANG, Weiyan, et al. A novel process to extract alumina and prepare Fe-Si alloys from coal fly ash[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 185: 151 – 157.

[19] XUE Yang, YU Wenzhou, MEI Jie, et al. A clean process for alumina extraction and ferrosilicon alloy preparation from coal fly ash via vacuum thermal reduction[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118262 – 118271.

[20] 曹明明,张建良,邢相栋,等. 硫酸渣含碳球团高温焙烧试验研究[J]. 烧结球团,2013,38(1):42 – 45;49.
CAO Mingming, ZHANG Jianliang, XING Xiangdong, et al. Experimental research on high temperature indurating of pyrite residue carbon-containing pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(1): 42 – 45; 49.

[21] 吕亚男,陈栋,唐建国,等. 含硼添加剂对硫酸渣球团性能的影响[J]. 烧结球团,2018,43(4):45 – 48.
LÜ Yanan, CHEN Dong, TANG Jianguo, et al. Effect of boron bearing additives on performance of pyrite cinder pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 45 – 48.

[22] CHUN Tiejun, LONG Hongming, DI Zhanxia, et al. Preparation of direct reduction sponge iron(DRI) using pyrite cinder containing nonferrous metals[J]. High Temperature Materials & Processes, 2017, 36: 1 – 8.

[23] LÜ Yanan, CHEN Dong, TANG Jianguo, et al. Recovery of iron from pyrite cinder with reduction-magnetic separation process in presence of sodium salt[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 72(2): 501 – 510.

[24] 左豪恩,温建康,崔兴兰,等. 硫酸渣脱硫制备高品质铁精矿研究进展[J]. 工程科学学报,2018,40(1):1 – 8.
ZUO Haoen, WEN Jiankang, CUI Xinglan, et al. Review of research progress on preparation of high-quality iron concentrate from pyrite cinder by desulphurization[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1): 1 – 8.

[25] 左豪恩,崔兴兰,温建康,等. 硫酸渣生物脱硫制备高品位铁精矿试验研究[J]. 稀有金属,2018(8):869 – 877.
ZUO Haoen, CUI Xinglan, WEN Jiankang, et al. Preparation of high quality iron concentrate from pyrite cinder by desulfurization[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018(8): 869 – 877.

[26] 王庆学. Fe-Si 体系的机械合金化过程及其磁性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2002.
WANG Qingxue. Sutdyon mechanical alloyingandmagnetiepronerties of Fe-Si system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net