

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.011

# 碱熔融焙烧 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ 反应过程分析

申晓毅<sup>1,2</sup>, 贾超航<sup>1,2</sup>, 李豪<sup>1,2</sup>, 武康龙<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省冶金传感器及技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以自制  $\text{SiO}_2$  和分析纯  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  为研究对象,  $\text{NaOH}$  为反应介质, 考察了反应温度、物料配比和反应时间对硅提取率的影响。碱熔融焙烧  $\text{SiO}_2$  的合适反应条件: 反应温度  $450\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NaOH}$  与  $\text{SiO}_2$  物质的量比  $2.4:1$ , 反应时间  $60\text{ min}$ 。二氧化硅与  $\text{NaOH}$  反应先生成  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 随温度升高逐步转化为  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ 。碱熔融焙烧  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  的合适反应条件为反应温度  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NaOH}$  与  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  物质的量比  $20:1$ , 反应时间  $150\text{ min}$ 。 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  与  $\text{NaOH}$  反应生成  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ , 在  $350\text{ }^\circ\text{C}$  硅氧四面体反应得到  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 随升温转化为  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ 。

**关 键 词:** 氧化锌矿; 二氧化硅; 硅酸锌; 碱熔融焙烧; 反应过程

中图分类号:  $\text{TF } 813$       文献标志码:  $\text{A}$       文章编号:  $1005-3026(2017)01-0051-06$

## Reaction Process Analysis of $\text{SiO}_2$ and $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ Roasting with Molten $\text{NaOH}$

*SHEN Xiao-yi<sup>1,2</sup>, JIA Chao-hang<sup>1,2</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, WU Kang-long<sup>1,2</sup>*

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Key Laboratory for Metallurgical Sensor & Technology, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHEN Xiao-yi, E-mail: shenxy@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Employing homemade  $\text{SiO}_2$  and analytic  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  as raw materials and  $\text{NaOH}$  as reaction medium, the influences of reaction temperature, molar ratio of  $\text{NaOH}$  to  $\text{SiO}_2$  and reaction time on the extraction ratio of silica were investigated. The appropriate reaction conditions were obtained as reaction temperature of  $450\text{ }^\circ\text{C}$ , molar ratio of  $\text{NaOH}$  to  $\text{SiO}_2$  of  $2.4:1$  and reaction time of  $60\text{ min}$ . Silica reacted with  $\text{NaOH}$  to form  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  at first and then was transformed into  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  along with temperature rising. The appropriate reaction conditions of  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  roasting were reaction temperature of  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , molar ratio of  $\text{NaOH}$  to  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  of  $20:1$  and reaction time of  $150\text{ min}$ .  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  and  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$  were formed when  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  reacted with  $\text{NaOH}$ . Silicon oxygen tetrahedron reacted with  $\text{NaOH}$  to form  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  when the roasting temperature reached  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , and then  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  was transformed into  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ .

**Key words:** zinc oxide ore;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ; molten  $\text{NaOH}$  roasting; reaction process

氧化锌矿是锌的二次资源,随着高品位锌矿资源的日渐枯竭,中低品位氧化锌矿的开发利用势在必行<sup>[1-2]</sup>。氧化锌矿是硫化矿长期风化的产物,其中有利用价值的主要有硅锌矿 $[\text{Zn}_2\text{SiO}_4]$ 、菱锌矿 $[\text{ZnCO}_3]$ 、异极矿 $[\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2\cdot\text{H}_2\text{O}]$ 等<sup>[1-2]</sup>。氧化锌矿中的  $\text{SiO}_2$  主要以硅酸盐、石英及无定形  $\text{SiO}_2$  形式存在<sup>[3-4]</sup>。其处理方法主要分火法和湿法两类。因锌品位低,传统的火法工

艺因能耗高、环境污染严重逐步被取代。湿法工艺有酸法和碱法,碱法又分  $\text{NaOH}$  法和氨法<sup>[3-4]</sup>。酸法工艺是目前研究最多、应用也最为广泛的方法,在处理过程中需严格控制以免生成  $\text{SiO}_2$  胶体影响物料过滤性能<sup>[1-2,5]</sup>。碱浸工艺可同时提取氧化锌矿中的  $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$  和  $\text{Si}$ ,是一种高效的方法<sup>[3,6-7]</sup>。氨法利用锌与氨形成配合物的性质提取  $\text{Zn}$ ,在浸出过程中容器须密封,避免氨挥发<sup>[8-9]</sup>。目前,研

究人员通过改进方法和反应介质来处理氧化锌矿,如  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  焙烧、 $\text{NaOH}$  焙烧、生物浸出等<sup>[8]</sup>. 其中  $\text{NaOH}$  焙烧法结合火湿法工艺的优点,经焙烧、水溶处理综合提取氧化锌矿中的  $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$  和  $\text{Si}$ . 该方法操作简单,反应温度低. 作为提取反应的关键步骤,本文主要考察焙烧过程各因素对硅提取率的影响及焙烧过程中硅的物相转化过程,为碱熔融焙烧中低品位氧化锌矿提供参考.

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料和实验方法

实验原料:  $\text{SiO}_2$  (自制),  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  (AR),  $\text{NaOH}$  (AR), 蒸馏水(自制).

焙烧试验:将  $\text{NaOH}$  与  $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  按比例混合均匀后置于坩埚中,将坩埚放入焙烧炉. 启动程序,在一定的温度制度下焙烧,反应结束后随炉

冷取样,趁热  $80\text{ }^\circ\text{C}$  溶出  $1\text{ h}$  后过滤. 滤饼淋洗烘干. 检测滤渣和溶液中  $\text{SiO}_2$  的含量,计算提取率.

将  $\text{NaOH}$  与  $\text{SiO}_2$  按物质的量比  $2.4:1$  混料,分别选取  $250, 300, 350, 400, 450$  和  $500\text{ }^\circ\text{C}$  焙烧  $60\text{ min}$ ,随炉冷取样,分析物相结构. 将  $\text{NaOH}$  与  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  按物质的量比  $20:1$  混料,分别选取  $350, 400, 450$  和  $500\text{ }^\circ\text{C}$  焙烧  $150\text{ min}$ ,随炉冷取样,分析物相结构.

采用  $\text{D/MAX-RA}$  型 X 射线衍射仪表征样品的物相结构.

## 2 结果讨论

### 2.1 自制 $\text{SiO}_2$ 的物相和形貌分析

图 1 为自制二氧化硅的 XRD 图谱和 SEM 照片. 由图可见,自制二氧化硅为非晶态球形颗粒,颗粒均匀,分散性良好,粒度约为  $200\text{ nm}$ .

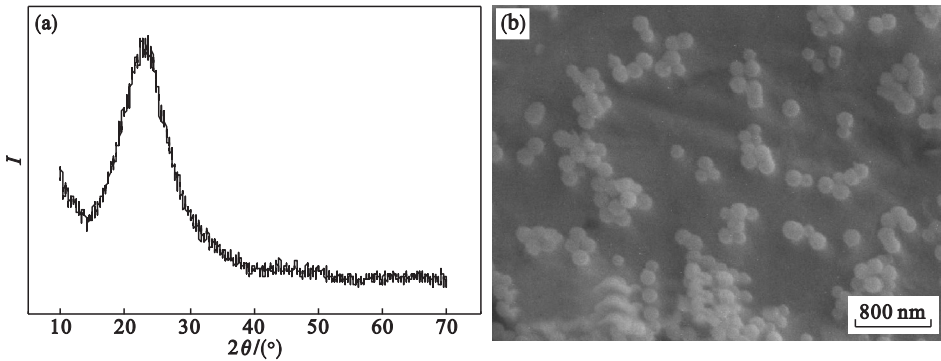


图 1  $\text{SiO}_2$  的 XRD 图谱和 SEM 照片  
Fig. 1 XRD pattern and SEM image of homemade  $\text{SiO}_2$  powde  
(a)—XRD 图谱; (b)—SEM 照片.

表 1 为自制二氧化硅干燥和煅烧样品的成分分析结果. 可见,自制二氧化硅主要含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  杂质,但含量很低. 干燥样品中  $\text{SiO}_2$  质量分数仅为  $91.51\%$ ,其余主要是吸附水,煅烧后  $\text{SiO}_2$  质量分数可达  $99.90\%$ ,纯度高.

表 1 二氧化硅样品成分分析(质量分数)				
Table 1 Composition analysis of $\text{SiO}_2$ powder (mass fraction)				
样品	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	质量损失/%
干燥样品	91.51	0.001	0.002	8.47
煅烧样品	99.90	0.001	0.002	—

### 2.2 碱熔融焙烧 $\text{SiO}_2$ 各因素对硅提取率的影响

图 2 为碱熔融焙烧  $\text{SiO}_2$  各因素与硅提取率的关系. 由图可见,随焙烧温度的升高,硅提取率

升高. 在  $450\text{ }^\circ\text{C}$  提取率趋于平缓. 这是因为升高温度后, $\text{NaOH}$  转变为液相,固固相反应转化为液固相反应,升温促进分子活化和传热传质的进行. 随物料配比的增加,硅提取率升高,这是因为  $\text{NaOH}$  用量增加,物料充分接触,促进反应进行. 硅提取率随反应时间增加而增加,反应时间超过  $60\text{ min}$ ,硅提取率基本不变.

### 2.3 碱熔融焙烧 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ 各因素与硅提取率的关系

图 3 为碱熔融焙烧  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  各因素与硅提取率的关系. 硅的提取率为经水溶进入溶液中硅的量相对硅酸锌中硅总量的比值. 随焙烧温度的增加,硅提取率增加,在  $400\text{ }^\circ\text{C}$  以上提取率增加缓慢,温度达  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ,提取率基本不变. 这是因为提高反应温度改善了反应条件,促进了液固相反应间的传质. 随物料配比增加,硅提取率增加,这是

因为增加  $\text{NaOH}$  的用量,有助于  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  与反应介质的充分接触. 增加碱熔融焙烧时间,硅提取率增加,焙烧时间达到 150 min 后,硅提取率变化不大.

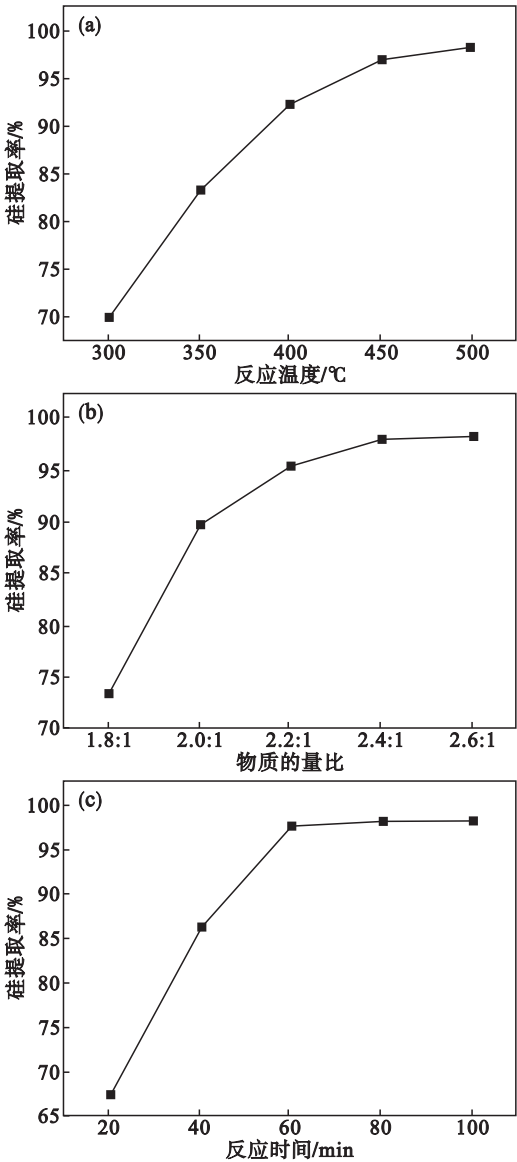


图 2 碱熔融焙烧  $\text{SiO}_2$  反应温度、物料配比、反应时间与硅提取率的关系  
Fig. 2 Relationships of Si extraction ratio with reaction temperature, molar ratio and time for  $\text{SiO}_2$  roasting with molten  $\text{NaOH}$

- (a) —物质的量比 2.4:1, 反应时间 60 min;  
(b) —反应温度 450 °C, 反应时间 60 min;  
(c) —反应温度 450 °C, 物质的量比 2.4:1.

## 2.4 碱熔融焙烧 $\text{SiO}_2$ 反应过程分析

图 4 为  $\text{NaOH}$  与  $\text{SiO}_2$  物质的量比 2.4:1、反应时间 60 min 条件下,不同焙烧温度下物料的 XRD 图谱. 由图可见,250 °C  $\text{NaOH}$  与  $\text{SiO}_2$  已经反应生成了  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,但反应率较低. 300 °C 焙烧物料与 250 °C 焙烧物料物相结构基本相同. 350 °C 焙烧物料 XRD 图谱中出现了  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ,表

明  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  已向  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  转化. 随着焙烧温度的升高, $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  衍射峰增强. 450 °C XRD 图谱与 500 °C XRD 图谱基本相同,主要物相为  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  和  $\text{NaOH}$ , $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  向  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  的转化尚未完全.  $\text{NaOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$  归因于  $\text{NaOH}$  在空气中的强吸水能力.

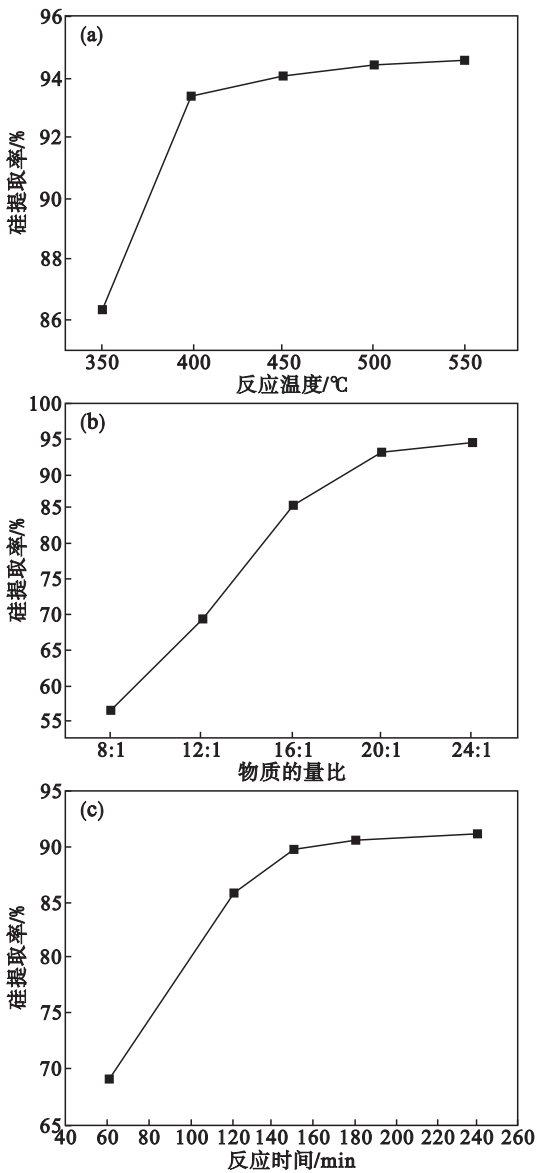


图 3 碱熔融焙烧  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  反应温度、物料配比、反应时间与硅提取率的关系  
Fig. 3 Relationships of Si extraction ratio with reaction temperature, molar ratio and time for  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  roasting with molten  $\text{NaOH}$

- (a) —物质的量比 20:1, 反应时间 150 min;  
(b) —反应温度 500 °C, 反应时间 150 min;  
(c) —反应温度 500 °C, 物质的量比 20:1.

## 2.5 碱熔融焙烧 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ 反应过程分析

图 5 为  $\text{NaOH}$  与  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  在物质的量比 20:1,反应时间 150 min 条件下,不同温度焙烧物料的 XRD 图谱. 由图可见,在 250 °C, $\text{NaOH}$  已与  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  发生反应,得到新的物相  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  和

$\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{OH})_4$  是中间产物,可以看作是  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$  或  $\text{NaOH}$  与  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  混合物,加热得到  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ , 此时  $\text{Si}-\text{O}$  基团尚未开始反应.  $350\text{ }^\circ\text{C}$  焙烧物料中出现  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  和  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ , 表明此时硅氧四面体已参与反应.  $450\text{ }^\circ\text{C}$  焙烧熟料中主要物相为  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ ,  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{NaOH}$  和

$\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$ , 表明  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  逐步向  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  转化, 而其本身衍射峰被掩蔽.  $550\text{ }^\circ\text{C}$  反应最终物相为  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ ,  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{NaOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$ , 可见,  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  与  $\text{NaOH}$  反应不完全, 即  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  在碱介质中比  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  稳定, 要破坏  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  需更强的反应条件.

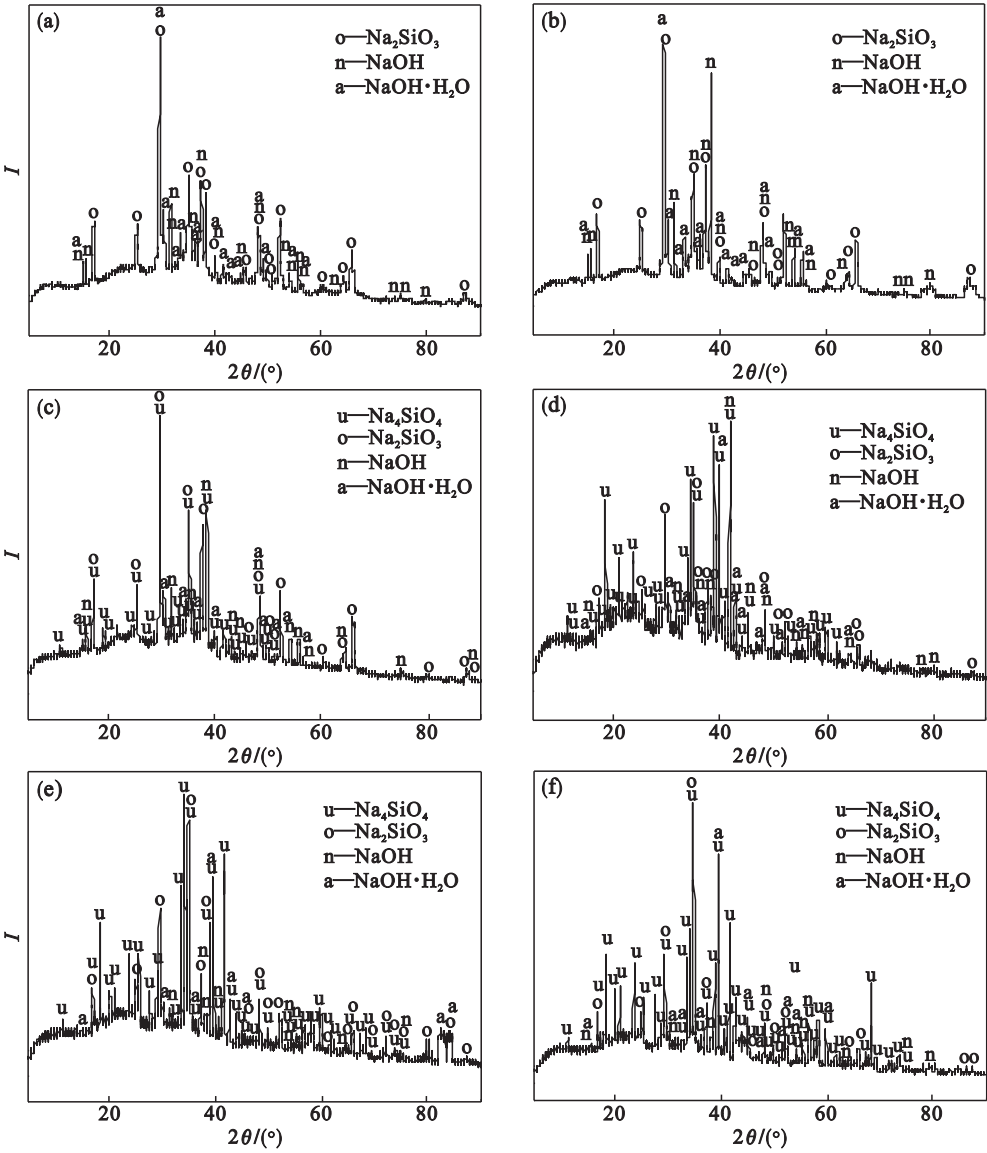
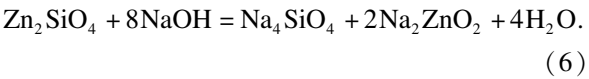
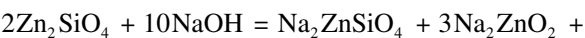
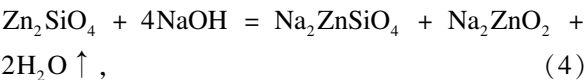
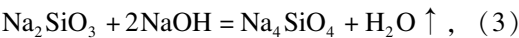
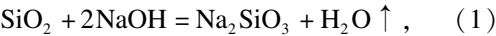


图 4  $\text{SiO}_2$  与  $\text{NaOH}$  在不同温度下熔融焙烧熟料的 XRD 图谱  
Fig. 4 XRD patterns of  $\text{SiO}_2$  roasting products with molten  $\text{NaOH}$

(a)— $250\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)— $300\text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)— $350\text{ }^\circ\text{C}$ ; (d)— $400\text{ }^\circ\text{C}$ ; (e)— $450\text{ }^\circ\text{C}$ ; (f)— $500\text{ }^\circ\text{C}$ .

综上,碱熔融焙烧  $\text{SiO}_2$  和分析纯  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  的化学反应可以归纳为



### 2.6 焙烧过程热力学分析

对于化学反应,  $\Delta G = \Delta G^\ominus + RT\ln J$ . 对于固相  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_4\text{SiO}_4$  及  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{ZnSiO}_4$  等以纯固相为标态, 液态  $\text{NaOH}$  以纯液相为标态, 则  $\Delta G = \Delta G^\ominus + RT\ln J = \Delta G^\ominus + RT\ln(p_{\text{H}_2\text{O}}/p^\ominus)$

$\leq \Delta G^\ominus$ . 故可通过简单计算  $\Delta G^\ominus$  来考察化学反应 (式(6)) 能否进行.

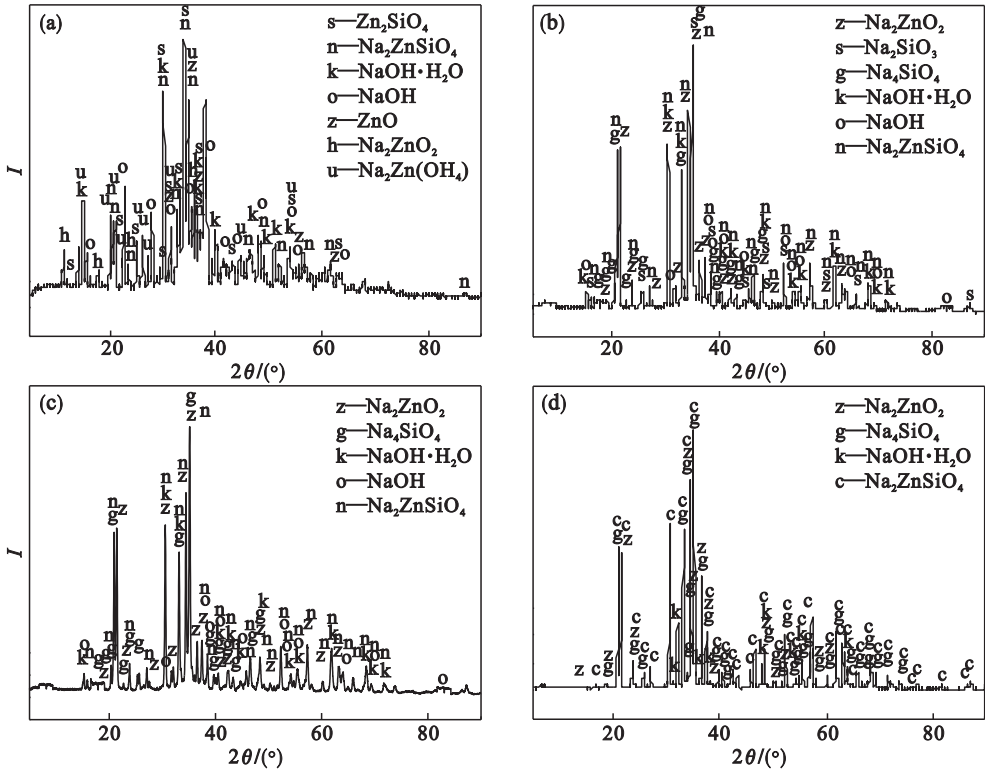


图 5 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 与 NaOH 在不同温度下熔融焙烧熟料的 XRD 图谱  
Fig. 5 XRD patterns of Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> roasting products with molten NaOH  
(a)—250 °C; (b)—350 °C; (c)—450 °C; (d)—550 °C .

图 6 给出了化学反应(1),(2),(3)和(6)的  $\Delta G^\ominus$  与温度的关系<sup>[10]</sup>. 可见,反应式(1)和(2)的  $\Delta G^\ominus < 0$ ,在 500 °C 以上反应式(3)的  $\Delta G^\ominus$  亦小于 0,故反应可进行. 而反应(6)的  $\Delta G^\ominus$  始终大于 0,说明 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 与 NaOH 反应生成 Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 和 Na<sub>2</sub>ZnO<sub>2</sub> 不能直接进行. 而在样品中检测出了 Na<sub>2</sub>ZnO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>ZnSiO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 和 Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, 表明 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 和 NaOH 能反应,但非一步完成. 故反应(4),(5)是可能反应,因未查到 Na<sub>2</sub>ZnSiO<sub>4</sub> 的热力学数据,该部分工作尚待深入.

### 3 结 论

- 1) 碱熔融焙烧 SiO<sub>2</sub> 的合适反应条件为焙烧温度 450 °C,NaOH 与 SiO<sub>2</sub> 物质的量比 2.4:1,反应时间 60 min. 碱熔融焙烧 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 的合适反应条件为焙烧温度 500 °C,NaOH 与 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 物质的量比 20:1,反应时间 150 min.
- 2) 焙烧过程中硅化合物与 NaOH 反应先生成 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>,升温转化为 Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>.

#### 参考文献:

[ 1 ] Li C X,Xu H S,Deng Z G,et al. Pressure leaching of zinc silicate ore in sulfuric acid medium [ J ]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2010,20( 5 ):918 - 923.

[ 2 ] 邵鸿媚,申晓毅,张彬彬,等. 氧化锌矿溶出液的净化 [ J ]. *东北大学学报( 自然科学版)*,2015,36( 6 ):811 - 814. ( Shao Hong-mei, Shen Xiao-yi, Zhang Bin-bin, et al. Purification of the digestion solution of zinc oxide ores [ J ]. *Journal of Northeastern University( Natural Science )*, 2015, 36( 6 ):811 - 814. )

[ 3 ] Chen A L,Zhao Z W,Jia X J,et al. Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore [ J ]. *Hydrometallurgy*,2009,97( 3/4 ):228 - 232.

[ 4 ] Safari V,Arzpeyma G,Rashchi F,et al. A shrinking particle-

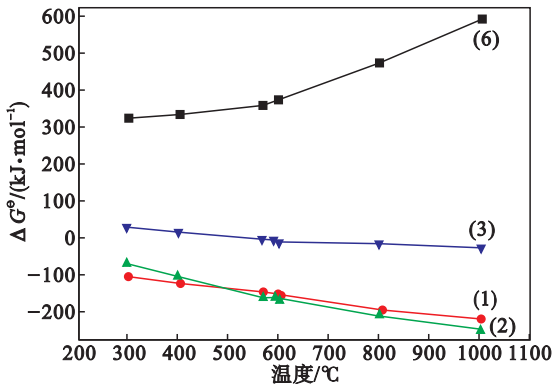


图 6 化学反应(1),(2),(3)和(6)的  $G^\ominus$  与温度的关系  
Fig. 6 Relationships of  $\Delta G^\ominus$  of reactions ( 1 ), ( 2 ), ( 3 ) and ( 6 ) with temperature



shrinking core model for leaching of a zinc ore containing silica [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, 93(1):79–83.

[5] Xu H S, Wei C, Li C X, et al. Sulfuric acid leaching of zinc silicate ore under pressure [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 105 (1/2):186–190.

[6] Feng L Y, Yang X W, Shen Q F, et al. Pelletizing and alkaline leaching of powdery low grade zinc oxide ores [J]. *Hydrometallurgy*, 2007, 89(3/4):305–310.

[7] Babu M N, Sahu K K, Pandey B D. Zinc recovery from sphalerite concentrate by direct oxidative leaching with ammonium, sodium and potassium persulphates [J]. *Hydrometallurgy*, 2002, 64(2):119–129.

[8] Sun Y, Shen X Y, Zhai Y C. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by ammonium sulfate

roasting method [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2015, 22(5):467–475.

[9] Chen Q Y, Li L A, Bai L, et al. Synergistic extraction of zinc from ammoniacal ammonia sulfate solution by a mixture of a sterically hindered beta-diketone and tri-n-octylphosphine oxide (TOPO) [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 105 (3/4):201–206.

[10] 王志猛, 谢宏伟, 张懿, 等. 电动势法测量  $\text{Na}_2\text{PbO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$  生成自由能 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25 (11):3216–3222.

(Wang Zhi-meng, Xie Hong-wei, Zhang Yi, et al. Formation free energy of  $\text{Na}_2\text{PbO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$  measured by electromotive force method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(11):3216–3222.)



(上接第 30 页)

表 2 轨迹误差率对照表

Table 2 Comparison table of trajectory error rate %

识别方法	X 轴	Y 轴	Z 轴	均值
TRM	8.42	7.49	9.37	8.43
时域积分方法	18.47	21.16	17.87	19.17

实验结果表明,本文提出的 TRM 轨迹识别方法无论在单个轴向上的位移误差,还是 3 个轴向位移误差的均值,误差率都比使用时域积分的轨迹识别方法小,并且 TRM 轨迹识别误差均值在 10% 以内,低于现有方法均值水平。

5 结 论

本文针对羽毛球拍具体应用,结合羽毛球拍挥拍动作运动特点,提出一种多传感器融合的羽毛球拍挥拍轨迹识别方法.该方法通过加速度计和磁力计对陀螺仪进行修正,改进现有姿态解算方法.通过频域积分计算挥拍位移,经过典型挥拍动作测试结果表明,挥拍偏航角姿态角精度在 1° 以内,轨迹误差均值控制在 10% 以内.羽毛球拍挥拍轨迹识别精度得到明显的提高,为羽毛球动作识别技术的改进提供了高效的解决方案。

参考文献:

[1] 张博,杨志平.羽毛球男子头顶突击杀球技术动作的运动学分析[J]. *沈阳体育学院学报*, 2013, 32(2):102–106.

(Zhang bo, Yang Zhi-ping. Kinematical analysis on the skills of surprising scores overhead in men's badminton [J]. *Journal of Shenyang Sport University*, 2013, 32(2):102–

106.)

[2] Wang Z, Shi Q, Shen C, et al. Bilinear programming for human activity recognition with unknown MRF graphs[C]// *Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Portland, 2013:1690–1697.

[3] Ahmadi M, Khayatian A, Karimaghaee P. Attitude estimation by divided difference filter in quaternion space [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 75(6/7):95–107.

[4] Faber G S, Chang C C, Rizun P, et al. A novel method for assessing the 3-D orientation accuracy of inertial/magnetic sensors [J]. *Journal of Biomechanics*, 2013, 46(15):2745–2751.

[5] Stenum J, Bruijn S M, Jensen B R. The effect of walking speed on local dynamic stability is sensitive to calculation methods [J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(15):3776–3779.

[6] Ibata Y, Kitamura S, Motoi K, et al. Measurement of three dimensional posture and trajectory of lower body during standing long jump utilizing body-mounted sensors [C]// *Proceeding of 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Osaka, 2013:4891–4894.

[7] Jahanchahi C, Mandic D P. A class of quaternion Kalman filters [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25(3):533–544.

[8] Rodriguez-Martin D, Samà A, Perez-Lopez C, et al. SVM-based posture identification with a single waist-located triaxial accelerometer[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40 (18):7203–7211.

[9] Rezvani S, Lockhart T E. Towards real-time detection of freezing of gait using wavelet transform on wireless accelerometer data[J]. *Sensors*, 2016, 16(4):475–480.

[10] Gangsig S, Ohseop S. A time-domain method to generate artificial time history from a given reference response spectrum[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2016, 48(3):831–839.