

## 铁尾矿制备BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>微晶玻璃的晶化过程

于洪浩<sup>1,2</sup>, 薛向欣<sup>1</sup>, 黄大威<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;  
2. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 以鞍山铁尾矿为主要原料制备BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系微晶玻璃, 并利用DSC、XRD、SEM以及FT-IR对微晶玻璃的晶化过程和微观结构进行研究。结果表明: DSC曲线上出现的放热峰所对应的温度 800 °C和 870 °C分别为BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>相与BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>相的析晶温度; 微晶玻璃晶化过程中的初晶相为BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 中间过渡相为Ba<sub>2</sub>FeSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 并随着温度的升高而消失, 最终形成主晶相BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, 次晶相为BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的微晶玻璃; 随着晶化温度的升高, 微晶玻璃的红外吸收带在 800~700 cm<sup>-1</sup>波长范围发生宽化, 在 1 100~900 cm<sup>-1</sup>和 500~400 cm<sup>-1</sup>波长范围内发生分裂; 玻璃结构中的[FeO<sub>4</sub>]向[FeO<sub>6</sub>]转化促进玻璃的析晶, 出现BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>的红外特征吸收峰。

**关键词:** 铁尾矿; 微晶玻璃; BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>; 晶化过程

中图分类号: TB 321 文献标识码: A

## Crystallization on BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramic made from iron ore tailing

YU Hong-hao<sup>1,2</sup>, XUE Xiang-xin<sup>1</sup>, HUANG Da-wei<sup>1</sup>

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
2. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system glass-ceramic was synthesized from iron ore tailing of Anshan as starting material. The crystallization process and microstructure of the glass-ceramic were investigated using differential scanning calorimetry (DSC), X-ray powder diffraction(XRD), scanning electron microscopy(SEM) and fourier transform infrared spectroscopy(FT-IR).The DSC results show that exopeak temperatures at 800 and 870 °C correspond to the crystalline phase formation of BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, respectively. The initial crystalline phases of the sample are BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Ba<sub>2</sub>FeSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> as transition crystalline phase changed into BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> with increase of temperature. The final crystalline phases of the glass-ceramic are BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> and BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. With the increase of crystallization temperature, infrared absorption bands of the sample are broaden within the range of 800–700 cm<sup>-1</sup> and are splitted within the range of 1 100–900 cm<sup>-1</sup> and 500–400 cm<sup>-1</sup>. The crystallization is accelerated by [FeO<sub>4</sub>] fundamental unit shifted to [FeO<sub>6</sub>] in the glass structure, and BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> as the final crystalline phase is observed.

**Key words:** iron ore tailing; glass-ceramic; BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>; crystallization

作为亚铁磁性氧化物中的一大家族, 由于钡铁氧化物(BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>)的原料价格便宜、抗氧化性能优异、具有较大的矫顽力和磁能积、具有单轴磁晶各向异性等一系列优点。因此, 它们不仅被用作传统的永磁材料,

而且在无线电电子学、自动控制、计算机、高密度信息磁记录介质、激光调制以及微波、磁光器件和高频设备中也得到广泛应用<sup>[1-11]</sup>。微晶玻璃是一类既具有玻璃性能, 又具有陶瓷性能的复合材料。近些年来, 利

用玻璃析晶方法制备各种磁性材料, 特别是钡铁氧体结构材料的研究工作已经大量开展起来<sup>[3-11]</sup>。

随着钢铁工业的迅速发展, 铁尾矿在工业固体废弃物中占的比例越来越大<sup>[12-13]</sup>。铁尾矿不仅污染周围环境, 危害人民生命财产的安全, 而且还占用大量土地、消耗资金、浪费资源、影响企业的经济效益。目前, 对于铁尾矿的再利用, 主要包括铁尾矿的再选和有价元素的综合回收、铁尾矿用做采空区填料或建筑材料等几个方面。鞍山铁尾矿其主要成分为石英和赤铁矿(两者的总含量大于 96%, 而其它氧化物的含量均不足 1%), 可以成为制备钡铁氧体为主晶相的微晶玻璃的一种廉价原料。以鞍山铁尾矿为主要成分制备微晶玻璃, 既可以降低钡铁氧体微晶玻璃的原料成本, 又提高了鞍山铁尾矿材料的附加值, 同时又有利于环境保护, 对于整体化利用鞍山铁尾矿及治理环境具有重要的意义。

本文作者采用鞍山铁尾矿以及其它辅助氧化物为原料, 利用烧结法制备出了钡铁氧体为主晶相的微晶玻璃, 并对其晶化过程进行了研究。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

实验所用主要原料为鞍山型铁尾矿(鞍山钢铁集团公司), 其主要成分如表 1 所列。图 1 所示为鞍山铁尾矿的 XRD 谱。从图 1 中可看出, 尾矿中主要是  $\alpha$ -石英相及赤铁矿相。本研究选择 BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 玻璃体系, 配料以铁尾矿为主按照  $n(\text{BaO}):n(\text{Fe}_2\text{O}_3):n(\text{SiO}_2)=2:1:2$ <sup>[10]</sup> 摩尔比加入 BaCO<sub>3</sub>(分析纯)和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(分析纯)调节成分, 经过计算得出基础玻璃的原料组成如表 2 所列。

表 1 实验用铁尾矿主要化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental iron ore tailings (mass fraction, %)

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	TiO <sub>2</sub>
82.260	14.370	0.800	0.570	0.034	0.016

表 2 基础玻璃原料组成

Table 2 Composition of base glass (mass fraction, %)

Iron ore tailing	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaCO <sub>3</sub>
28.24	26.89	44.87

### 1.2 微晶玻璃制备

将原料按配比混合均匀后放入刚玉坩锅中, 在硅钼棒炉中熔制玻璃, 熔制温度为 1 400 °C, 保温 2 h。将玻璃熔体水淬成玻璃颗粒, 烘干后研磨成粒径小于 74  $\mu\text{m}$  的玻璃粉, 将玻璃粉在 20 MPa 下压制成型。

基础玻璃的 DSC 曲线如图 2 所示。吸热峰的起始温度就是玻璃核化的起始温度(也是玻璃转变温度), 这时玻璃吸热开始进行结构调整; 放热峰的起始温度就是晶体生长的起始温度, 同时放热峰的温度也是相应晶体生长速度最快的温度。从 DSC 曲线上可以看出, 在 635 °C 处存在一个微弱的吸热峰, 这对应于玻璃的起始转变温度  $\theta_g$ , 表明玻璃体在这个温度开始进行结构调整。接着在 800 和 870 °C 处出现析晶峰, 对应于  $\theta_{c1}$  和  $\theta_{c2}$  在更高温度下微晶玻璃中晶体开始熔化, 最后又完全转变为玻璃相。为考察基础玻璃体系晶化过程中的物相变化, 选择将基础玻璃分别在 600、

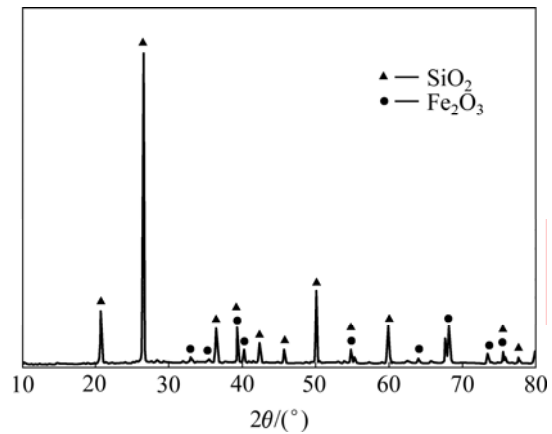


图 1 鞍山铁尾矿的 XRD 谱

Fig.1 XRD pattern of iron ore tailings of Anshan

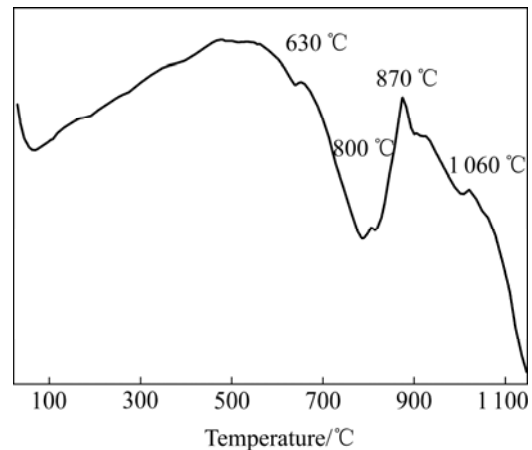


图 2 基础玻璃的 DSC 曲线

Fig.2 DSC curve of glass

700、800、850、900、950、1 000、1 050 和 1 100 °C 温度下晶化处理 3 h, 然后经过退火冷却至室温, 即得微晶玻璃试样。

### 1.3 分析测试

取 20 mg 玻璃粉进行 DSC 分析, 仪器为德国 NETZSCH 公司的 STA449c 型热分析仪, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末为参比物, 升温速率为 10 °C/min。

将试样研磨至粒径小于 74  $\mu\text{m}$  后, 采用 KBr 压片法, 玻璃粉末与 KBr 之比为 1:100, 采用 Nicolet 380 红外光谱仪进行红外光谱测定。

将晶化处理后的试样抛磨光滑, 用 5% 浓度的氢氟酸腐蚀 120 s, 采用日立 S-3400N 扫描电子显微镜进行显微分析, 观察微晶玻璃的显微结构。

将晶化处理后的试样研磨至粒径小于 74  $\mu\text{m}$  后, 采用日本理学 D/MAX-RB 型 X 射线衍射仪进行物相组成分析。测试条件为 Cu 靶 K 辐射, 波长为 0.154 06 nm, 工作电压为 40 kV, 电流为 50 mA, 扫描速度为 8 (°)/min, 步长为 0.02°, 扫描范围为 10°~70°。

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD 分析

图 3 所示为不同温度条件下晶化处理的基础玻璃

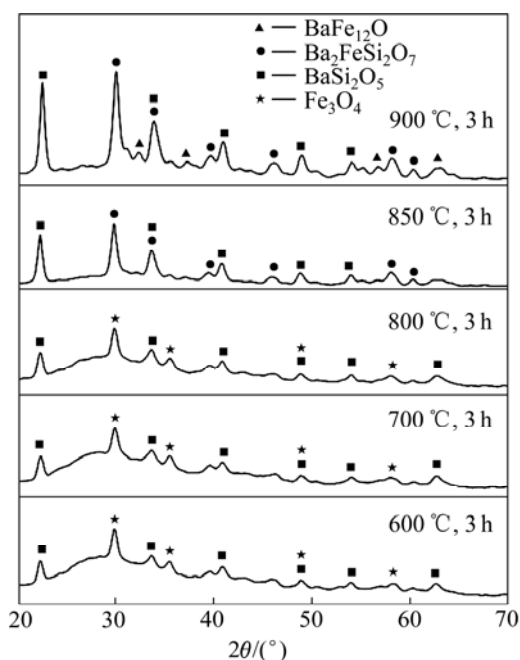


图 3 试样的 X 射线衍射谱

Fig.3 XRD patterns of samples

试样的 XRD 谱。不同温度条件下晶化处理的基础玻璃的晶相组成如表 3 所列。由图 3 可看出, 基础玻璃样品在 600、700 和 800 °C 晶化处理后仍然有明显的玻璃态引起的馒头状衍射峰, 同时也有少量的  $\text{BaSi}_2\text{O}_5$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的衍射峰出现。说明从  $\theta_g$  温度 (635 °C) 直到 800 °C 都是试样的结构调整阶段; 继续提高热处理温度, 在 850 °C,  $\text{BaSi}_2\text{O}_5$  相已长成较为完整的晶体, XRD 衍射峰尖锐, 衍射强度也较大。玻璃态引起的馒头状衍射峰和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  衍射峰消失, 出现了新相  $\text{Ba}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$ 。说明  $\theta_{c1}=800$  °C 为  $\text{BaSi}_2\text{O}_5$  晶体的析晶温度。由 DSC 曲线可知,  $\theta_{c2}$  的温度为 870 °C, 经 XRD 分析可以认为是  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  相的析晶温度。当热处理温度达到 900 °C 以上时, 过渡相  $\text{Ba}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$  消失, 样品中出现大量的主晶相  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , 并随着热处理温度的升高,  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  晶相的析出量在 1 050 °C 时达到最大。在 DSC 曲线上 1 060 °C 左右开始急剧下降, 试样重新吸热, 晶体发生了重熔(回吸), 使得晶体数量减少, 玻璃相又开始增加。由 1 100 °C 条件下晶化处理试样的 XRD 谱可以看出, 晶相的析晶量明显下降。同时, 在 950~1 100 °C 温度下, 晶化处理的试样中出现了少量的具有钙钛矿结构的  $\text{BaFeO}_3$  晶相。

### 2.2 FT-IR 分析

图 4 所示为试样的红外吸收光谱, 其中图 4(a) 为基础玻璃的红外吸收光谱。由图 4(a) 可知, 在

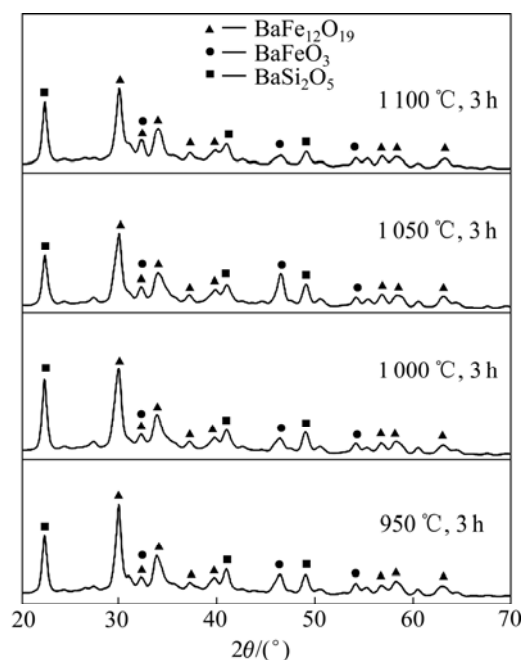


表3 不同热处理条件下的微晶玻璃的晶相组成

Table 3 Crystalline phases of different glass-ceramics under different heat-treatments

Label	Heat-treatment	Crystalline phase
1	600 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (vs)
2	700 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (vs)
3	800 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (vs)
4	850 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), Ba <sub>2</sub> FeSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (s)
5	900 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), Ba <sub>2</sub> FeSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (s), BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> (w)
6	950 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), BaFeO <sub>3</sub> (w), BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> (s)
7	1 000 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), BaFeO <sub>3</sub> (w), BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> (vs)
8	1 050 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), BaFeO <sub>3</sub> (w), BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> (vs)
9	1 100 °C, 3 h	BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s), BaFeO <sub>3</sub> (w), BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> (m)

vs—very strong, s—strong, m—medium, w—weak

1 200~400 cm<sup>-1</sup>波数范围内主要存在3个吸收带: 第一部分在1 100~900 cm<sup>-1</sup>波数范围内, 该段吸收带最强, 这是由于[SiO<sub>4</sub>]四面体外的Si—O—Si不对称伸缩振动、[SiO<sub>4</sub>]四面体内O—Si—O键的伸缩振动以及Si—O键的不对称伸缩振动所引起的; 第二部分在800~550 cm<sup>-1</sup>存在着几个强度较弱的吸收带, 这是由于多数T离子的T—O—T桥氧的对称伸缩振动(T: 四面体配位的Si<sup>4+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>)<sup>[14-15]</sup>和Si—O伸缩振动所引起的吸收; 第三部分在500~400 cm<sup>-1</sup>范围内存在一个强的吸收带, 它是由Si—O—Si键的弯曲振动所形成的。

图4(b)~(g)所示为基础玻璃在不同晶化温度处理后的红外吸收光谱。对比图4(a)和图4(b)可知, 经过晶化处理后, 玻璃红外光谱发生明显的变化, 1 100~900 cm<sup>-1</sup>和500~400 cm<sup>-1</sup>波数段出现分裂的趋势, 在950 cm<sup>-1</sup>出现弱的能肩, 它与Si—O键的振动模式有关, 说明玻璃中出现较多的非桥氧。在红外光谱中, 435 cm<sup>-1</sup>吸收峰是Fe—O<sub>4</sub>和Fe—O伸长变成Fe—O<sub>6</sub>的吸收峰; 596 cm<sup>-1</sup>的峰属于Fe—O<sub>4</sub><sup>[16]</sup>。说明大部分的Fe<sup>3+</sup>以带负电的[FeO<sub>4</sub>]进入玻璃相中(四面体位置), 起到网络连接作用, 另外一部分的Fe<sup>3+</sup>以带负电的[FeO<sub>6</sub>](八面体位置)进入晶相中, 促进析晶。这说明低配位的[FeO<sub>4</sub>]向高配位的[FeO<sub>6</sub>]转化, 起到断网作用, 对玻璃的析晶起着促进作用, 符合文献[17]所述的规

律: 当X离子具有[XO<sub>4</sub>]和[XO<sub>6</sub>]两种配位状态, 配位数增大, 吸收带向长波方向移动; 同时该波段明显宽化, 说明T—O—T桥氧结构发生调整, 玻璃结构的不均匀性增大, 也有利于玻璃的析晶。

由图4(c)~(g)可以看出, 经过继续升温处理后, 600~400 cm<sup>-1</sup>吸收带发生明显的分裂, 呈现类似矿物晶体的红外光谱, 结合XRD分析可以说明, 样品已由基础玻璃转化为微晶玻璃。800~650 cm<sup>-1</sup>吸收带继续宽化, 说明玻璃结构进一步发生调整。随着热处理温度的升高, 吸收带的分裂程度在1 050 °C时达到最大, 出现明显的BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>(435、545和596 cm<sup>-1</sup>)特征吸收峰<sup>[16, 18-20]</sup>。

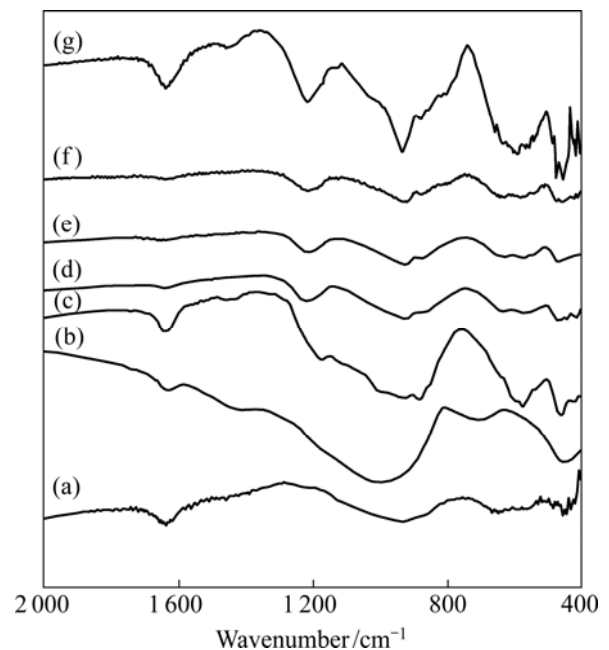


图4 试样的红外吸收光谱

Fig.4 FT-IR absorption spectra of samples: (a) Glass; (b) 850 °C, 3 h; (c) 900 °C, 3 h; (d) 950 °C, 3 h; (e) 1 000 °C, 3 h; (f) 1 050 °C, 3 h; (g) 1 100 °C, 3 h

### 2.3 扫描电镜分析

不同热处理条件得到微晶玻璃试样的显微形貌如图5所示。由图5可看出, 晶体的生长速度随着温度的升高而增加, 晶体的形状和分布也更加理想, 且晶体析出量增加, 经1 050 °C晶化处理后达到最佳。当析晶温度高于1 050 °C时, 晶体均匀排列程度降低。但随着温度的继续升高达到1 100 °C时, 由于晶相开始熔化、回吸, 晶体尺寸明显变小, 含量减少, 玻璃相含量相对增加。

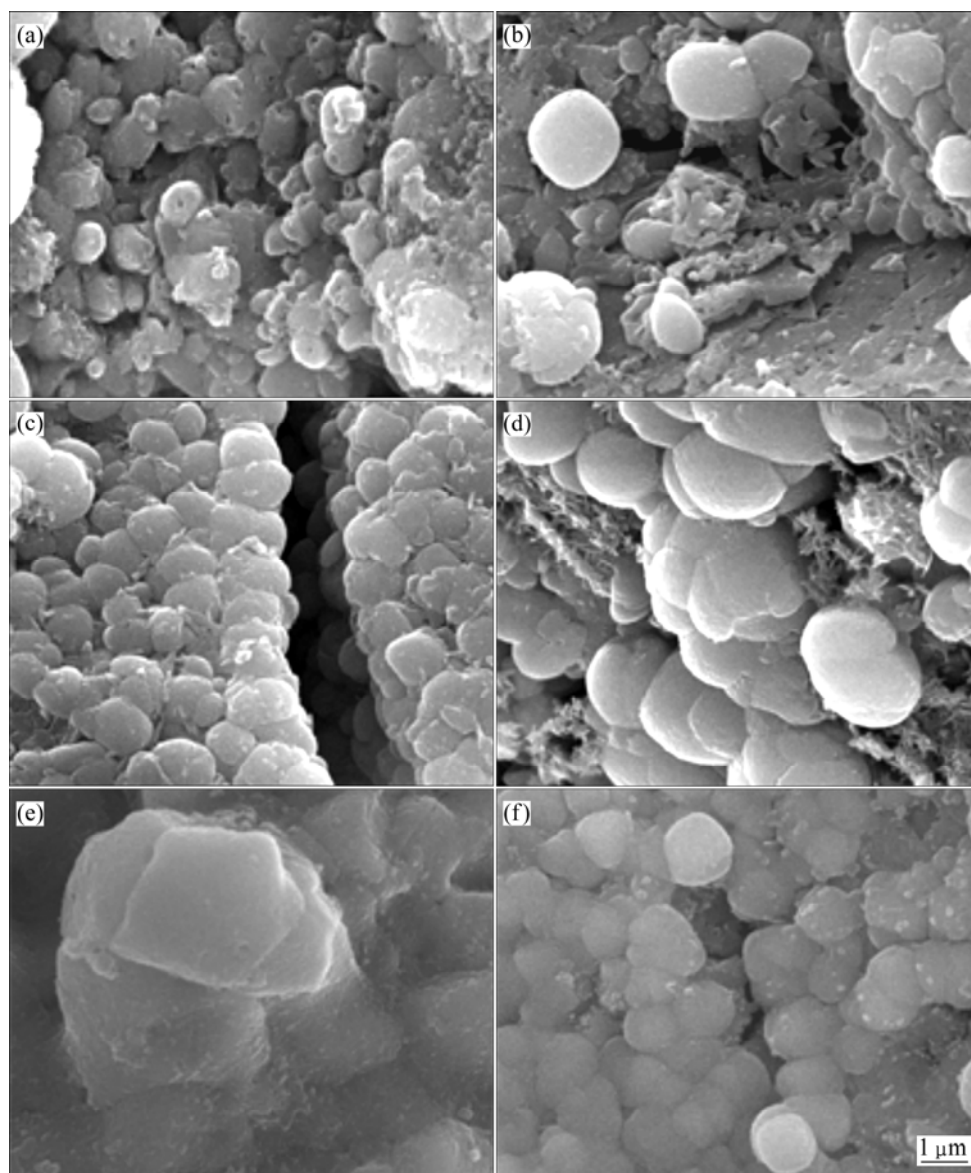


图5 不同热处理条件下试样的SEM像

Fig.5 SEM images of samples at different heat-treatments: (a) 850 °C, 3 h; (b) 900 °C, 3 h; (c) 950 °C, 3 h; (d) 1 000 °C, 3 h; (e) 1 050 °C, 3 h; (f) 1 100 °C, 3 h

### 3 结论

1) 以铁尾矿为主要原料, 在 1 400 °C 的熔化温度即可制备出基础玻璃, 然后经过合适的热处理, 可以获取主晶相为  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  的微晶玻璃。

2) 在基础玻璃晶化过程中, 首先析出基相  $\text{BaSi}_2\text{O}_5$ ; 随着晶化温度的升高, 出现过渡相  $\text{Ba}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$ 。在 900 °C 以上的温度晶化时, 过渡相  $\text{Ba}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$  消失, 出现主晶相  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , 并在 1 050 °C

时, 主晶相含量最大。

3) 随着晶化温度的升高, 样品的吸收带发生明显分裂和宽化, 玻璃结构中的  $[\text{FeO}_4]$  向  $[\text{FeO}_6]$  转化促进了玻璃的析晶, 出现了  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  的红外特征吸收峰。

### REFERENCES

- [1] SPELIOTIS D E. Magnetic recording beyond the first 100 Years[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 193(1/3): 29-35.
- [2] LAIHO R, LEHDERANTA E, STAPANOV Y P, VLASENKO

- L S. Microwave absorption in micron and nano-size YBaCuO powders[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, 284/288: 947-948.
- [3] WAGNER V, AHLERSA H, KLUPSCHB T, MULLER R. Magnetization reversal in Ba-ferrite glass ceramics observed by neutron depolarization techniques[J]. *Physica B*, 2004, 345: 169-172.
- [4] LEE C K, SPEYER R F. Magnetic susceptibility studies of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses[J]. *Modern Physics Letters B*, 2002, 16(13): 485-490.
- [5] ARDELEAN I, TODERAS M, FILIP S. Influence of melting temperature on iron ions behavior in B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass studies by magnetic susceptibility[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 272/276: 339-341.
- [6] MIRKAZERMI M, MARGHUSSIAN V K, BEITOLLAHI A. Crystallization behaviour, microstructure and magnetic properties of BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass ceramics[J]. *Ceramics International*, 2006, 32(1): 43-51.
- [7] MIRKAZERMI M, MARGHUSSIAN V K, BEITOLLAHI A, DOU S X, WEXLER D, KONSTANTINOV K. Effect of ZrO<sub>2</sub> nucleant on crystallization behaviour, microstructure and magnetic properties of BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass ceramics[J]. *Ceramics International*, 2007, 33(3): 463-469.
- [8] KLUPSCH T, STEINBEISS E, MULLER R, ULBRICH C, SCHUPPRL W, STEINMETZ H, HOCHÉ T. Magnetic glass-ceramics preparation and properties[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 196/197(1): 264-265.
- [9] MULLER R, ULBRICH C, SCHUPPEL W, STEINMETZ H, STEINBEIU E. Preparation and Properties of Barium-ferrite-containing glass ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, 19(6/7): 1547-1550.
- [10] LEE C K, SPEYER R F. Glass formation and crystallization of barium ferrite in the NaO-BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system[J]. *Journal of Materials Science*, 1994, 29(4): 1348-1351.
- [11] MARGHUSSIAN V K, BEITOLLAHI A, HAGHI M. The effect of SiO<sub>2</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on the crystallization behaviour and magnetic properties of a B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass[J]. *Ceramics International*, 2003, 29(4): 455-462.
- [12] ZHANG S, XUE X, LIU X, DUAN P, YANG H, JIANG T, WANG D, LIU R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources[J]. *Journal of Mining Science*, 2006, 42(6): 403-408.
- [13] MATSCHULLAT J, BORBA R P, DESCHAMPS E. Human and environmental contamination in the iron quadrangle[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(2): 193-202.
- [14] LINPINSK A, KALILA K E. Infrared spectroscopic investigation of structure and crystallization of aluminosilicate glasses[J]. *Journal of Non-crystalline Solid*, 1990, 119(3): 310-317.
- [15] 张培新, 林荣毅, 闫加强. SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系微晶玻璃的晶化过程[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(5): 752-756.
- ZHANG Pei-xin, LIN Rong-yi, YAN Jia-qiang. Crystallization on SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass-ceramic[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(5): 752-756.
- [16] PEREIRA F M M, JUNIOR C A R, SANTOS M R P, SOHN R S T M, FREIRE F N A, SASAKI J M, DEPAIVA J A C, SONMBRA A S B. Structural and dielectric spectroscopy studies of the M-type barium strontium hexaferrite alloys (Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>Fe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>)[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2008, 19(7): 627-638.
- [17] 程继键, 张关林. R<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系统玻璃的结构与性质[J]. *硅酸盐学报*, 1978, 6(4): 307-311.
- CHENG Ji-jian, ZHANG Guan-lin. Structure and property of R<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1978, 6(4): 307-311.
- [18] XU P, HAN X J, WANG M J. Synthesis and magnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> hexaferrite nanoparticles by a reverse microemulsion technique[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(16): 5866-5870.
- [19] XU P, HAN X J, JIANG J J, WANG X H, LI X D, WEN A H. Synthesis and characterization of novel coralloid polyaniline/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nanocomposites[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(34): 12603-12608.
- [20] RAM S. Infrared study of the dynamics of boroxol rings in the crystallization of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> microcrystals in borate glasses[J]. *Physical Review B*, 1995, 51(10): 6280-6286.

(编辑 李艳红)