

基于异丙醇溶剂热合成四方相 BaTiO₃ 工艺探索及机理研究^①

盖卉妍^{1,2}, 戴超华², 杨林²

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司,湖南长沙410012; 2.长沙矿冶院检测技术有限公司,湖南长沙410012)

摘要: 以 Ba(OH)₂ · 8H₂O 和 Ti(OC₄H₉)₄ 为原料,异丙醇(IPA)为溶剂,通过溶剂热法合成富四方相纳米钛酸钡(BTO)粉体,研究了钡钛比、体系 pH 值、溶剂热温度及时间等因素对制备高四方性纳米 BTO 粉体的影响,利用 X 射线衍射和扫描电镜等表征方法研究了 IPA 在溶剂热制备 BTO 过程中的作用机理。结果表明,溶剂热工艺合成过程中,IPA 会优先提供一定的—OH 以促进 Ti(OC₄H₉)₄ 的水解,生成 TiO₆ 八面体并与 Ba²⁺ 连接。在低碱性环境中,经相转变、小颗粒溶解与重结晶等过程逐步转变为形貌规整的四方相 BTO。钡钛比 1.6、体系 pH 值 10、溶剂热温度 220 °C、时间 24 h、煅烧温度 950 °C、煅烧时间 2 h 时制备的富四方相纳米 BTO 粉体分散均匀、形貌规整,呈正方形或近正方形,c/a 值达 1.009 4,平均粒径为 124 nm。

关键词: 钛酸钡; 四方相; 异丙醇(IPA); 溶剂热法; 陶瓷电容器; 钙钛矿材料; 合成制备

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.038

文章编号: 0253-6099(2024)02-0178-05

Exploration into Synthesis of Tetragonal Phase BaTiO₃ Based on Isopropanol Solvothermal Process and Its Mechanism

GAI Huiyan^{1,2}, DAI Chaohua², YANG Lin²

(1.Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China; 2.Testing Technology Company of Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: With Ba(OH)₂ · 8H₂O and Ti(OC₄H₉)₄ as raw materials, and isopropanol (IPA) as solvent, tetragonal-rich BaTiO₃ (BTO) nanopowder was synthesized by adopting solvothermal process. Effects of Ba/Ti ratio, pH value, solvothermal temperature and time on synthesis of tetragonal-rich BTO powders were investigated, and the mechanism of IPA in the solvothermal process for synthesis of BTO powders was also characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. It is found that in the solvothermal process, IPA will preferentially provide certain —OH to promote the hydrolysis of Ti(OC₄H₉)₄, generating TiO₆ octahedra to interconnect with Ba²⁺, which is gradually transformed into the tetragonal phase BaTiO₃ with regular morphology after phase transition, dissolution of small particles, and recrystallization in a low alkalinity environment. Experimental results show that under the following conditions including Ba/Ti ratio of 1.6, pH of 10 for the system, a solvothermal process at 220 °C for 24 h, calcination at 950 °C for 2 h, the synthesized tetragonal-rich BTO nanopowder is well dispersed with regular morphology, square or nearly square shape, with c/a value of 1.009 4 and particle size of 124 nm on average.

Key words: barium titanate; tetragonal phase; isopropanol (IPA); solvothermal process; ceramic capacitors; perovskite materials; synthesis

随着科技的进步,作为储能元件的多层片式陶瓷电容器(MLCC)的发展趋向小型化甚至微型化。具有高介电常数^[1]的钙钛矿材料四方相钛酸钡(BTO)是

制备高容 MLCC 的重要原材料之一,目前国内外 MLCC 用钛酸钡要求其粒径和晶胞参数 c/a 值分别在 0.05 ~ 0.50 μm 和 1.008 ~ 1.010 范围内。固相法^[2]、溶胶-凝

① 收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 盖卉妍(1997—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为有色金属冶金。E-mail:gaihy0616@qq.com

胶法^[3]、共沉淀法^[4]及水热合成法^[5]等是获得富四方相纳米 BTO 粉体的常见方法,其中水热法和固相法是工业中常用的两种工艺。然而,传统固相法合成的 BTO 粉体纯度低、形态可控性差、四方相含量低;水热法合成 BTO 粉体需要相对较高的温度和压力,步骤复杂,合成的粉末颗粒容易结块。

溶剂热法已被证实可有效提高 BTO 粉体的四方相含量^[6]。有研究报道,有机溶剂异丙醇(IPA)能有效增加 BTO 粉体比表面积和降低颗粒尺寸^[7]。本文以 Ti(OC₄H₉)₄ 为钛源、Ba(OH)₂·8H₂O 为钡源、以 IPA 为溶剂,在溶剂热合成条件下通过改变原料钡钛比、体系 pH 值、溶剂热温度和时间等条件制备富四方相纳米 BTO 粉体,并采用 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)研究溶剂热反应过程中 BTO 粉体的形成机理,为高纯纳米富四方相 BTO 粉体的制备提供参考。

1 实验部分

1.1 实验试剂

实验试剂包括八水合氢氧化钡(Ba(OH)₂·8H₂O, 分析纯)、钛酸四丁酯(Ti(OC₄H₉)₄, 化学纯)、异丙醇(IPA, 分析纯)、氢氧化钠(NaOH, 分析纯)、无水乙醇(分析纯);实验用水为自制去离子水。

1.2 实验方法

分别以钡钛比、pH 值、溶剂热反应温度和溶剂热反应时间为变量设计实验,研究各变量对 BTO 粉体四方性的影响,具体实验步骤如下:①按照一定钡钛比称取 Ba(OH)₂·8H₂O,加入盛有 30 mL 去离子水的烧杯中加热搅拌 1 h 使其溶解,得到氢氧化钡溶液;②采用移液枪量取 3.403 mL Ti(OC₄H₉)₄,加入盛有 20 mL IPA 溶剂的烧杯中水解 10 min,然后与氢氧化钡溶液混合,并转移至 100 mL 聚四氟乙烯杯中,加入去离子水,控制水热釜填充度为 60%;③向上述混合溶液中加入固体 NaOH 调节体系 pH 值,搅拌 30 min;④将反应釜放入烘箱中进行溶剂热反应,待反应结束后,对反应产物进行洗涤干燥并研磨过筛得到 BTO 粉末;⑤将 BTO 粉末在 950 °C 下煅烧 2 h,得到富四方相纳米 BTO 粉体,并对其进行表征。

1.3 表征方法

采用 D8 ADVANCE X 型射线衍射仪分析 BTO 粉体的晶体结构,根据 XRD 衍射数据通过 Rietveld 结构精修计算钛酸钡晶胞参数以获得 c/a 值,从而判断 BTO 粉体的四方性;采用 SM-7900F 型场发射扫描电子显微镜(SEM)表征 BTO 粉体的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 钡钛比对 BTO 四方性的影响

pH 值 13、溶剂热反应温度 200 °C、溶剂热反应时间 24 h,并对产物进行 950 °C 煅烧 2 h,不同钡钛比下 BTO 粉体的 XRD 图谱见图 1。由图 1 可知,不同钡钛比下 BTO 粉体结晶度良好,无明显杂质相,且均在 45°~46°范围内存在(200)和(002)衍射峰。BTO 粉体的晶胞参数 c 值、 a 值及二者的比值见表 1。随着钡钛比增加,BTO 粉体的 c/a 值增大,水热反应生成的 BTO 中普遍存在 O—H 缺陷和钡离子空位缺陷,这两种缺陷会限制钡离子沿 c 轴位移^[8],阻止其由立方相向四方相转变,提高 Ba²⁺浓度,使其在反应介质中过量,可以有效抑制缺陷的产生^[9],使生成的 BTO 晶体呈四方相结构。

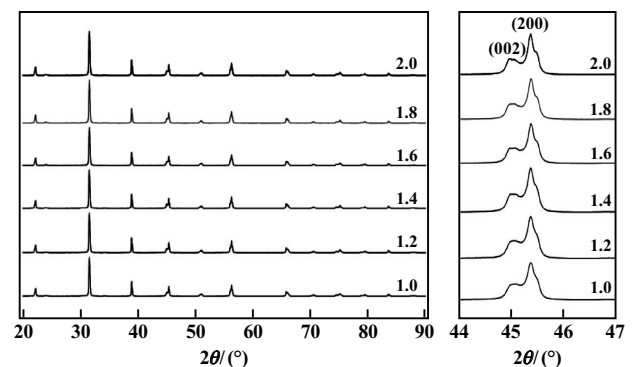
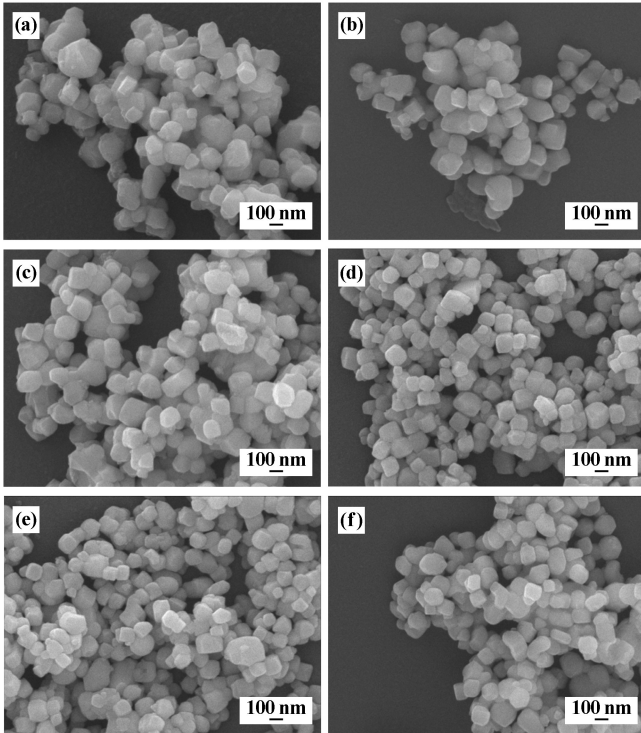


图 1 不同钡钛比下 BTO 粉体的 XRD 图谱

表 1 不同钡钛比下 BTO 粉体晶胞参数及 c/a 值

| 钡钛比 | a/nm | c/nm | c/a 值 |
|-----|---------------|---------------|---------|
| 1.0 | 0.399 619 | 0.402 662 | 1.007 6 |
| 1.2 | 0.399 584 | 0.402 629 | 1.007 6 |
| 1.4 | 0.399 581 | 0.402 653 | 1.007 7 |
| 1.6 | 0.399 663 | 0.402 981 | 1.008 3 |
| 1.8 | 0.399 649 | 0.403 006 | 1.008 4 |
| 2.0 | 0.399 621 | 0.402 996 | 1.008 5 |

图 2 为不同钡钛比下 BTO 粉体的 SEM 图。随着钡钛比增加,BTO 粉体颗粒的分散性明显提高,团聚现象减少,颗粒形状更加规整。钡钛比 1.6 时,BTO 粉末颗粒分散性较好,粒径分布均匀,没有出现明显团聚,粉体颗粒形状规则,表现为四方或近四方,平均粒径为 116 nm;钡钛比继续增至 2.0 时,BTO 粉体粒度增加,不规则度增大,个别晶粒出现异常长大,平均粒径为 124 nm。以上结果说明,增大钡钛比有利于四方相 BTO 的生成与转变,其中钡钛比 1.6 时合成的 BTO 粉体四方性高且粒径小。综合考虑,后续实验中的钡钛比确定为 1.6。



(a) 钡钛比 1.0; (b) 钡钛比 1.2; (c) 钡钛比 1.4;
(d) 钡钛比 1.6; (e) 钡钛比 1.8; (f) 钡钛比 2.0
图 2 不同钡钛比下 BTO 粉体的 SEM 图

2.2 体系 pH 值对 BTO 四方性的影响

钡钛比 1.6, 其他条件不变, 不同 pH 值下 BTO 粉体的 XRD 图谱见图 3。随着 pH 值增加, 衍射峰分离程度逐渐减小。计算所得 BTO 的晶胞参数见表 2。结果表明, pH=10 时 c/a 值较高, BTO 粉体中四方相含量高。随着溶液 pH 值增加, 四方相含量略有减少。

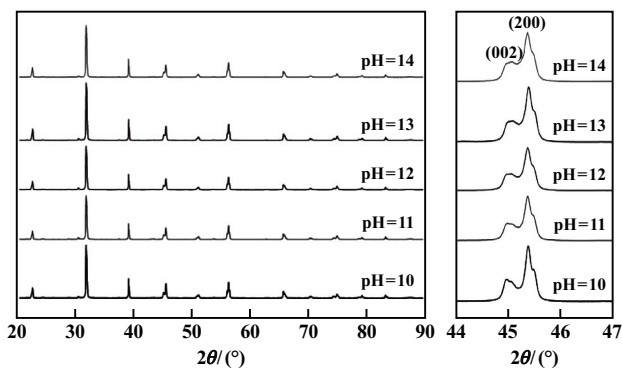


图 3 不同 pH 值下 BTO 粉体的 XRD 图谱

水热体系中, $\text{Ti}(\text{OH})_6^{2-}$ 在 OH^- 作用下逐步失去 H^+ 生成 TiO_6 八面体并在 Ba^{2+} 参与下相互连接^[10]。在溶剂热合成过程中, IPA 中的 $-\text{OH}$ 会优先参与 $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ 的水解生成 TiO_6 八面体, 并与 Ba^{2+} 连接形成 BaTiO_3 晶核:

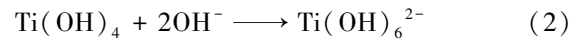
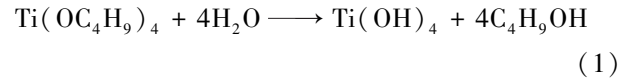
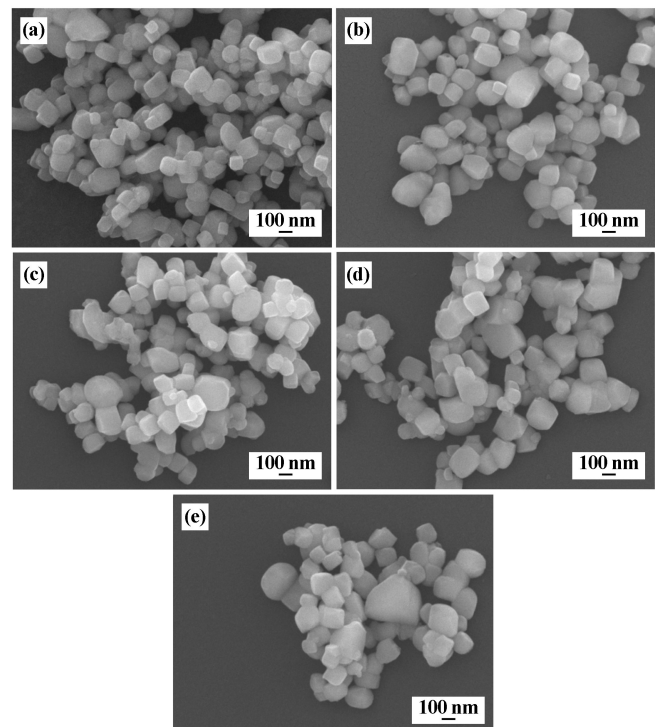


表 2 不同 pH 值下 BTO 粉体晶胞参数及 c/a 值

| pH 值 | a/nm | c/nm | c/a 值 |
|------|---------------|---------------|---------|
| 10 | 0.399 551 | 0.402 799 | 1.008 1 |
| 11 | 0.399 626 | 0.402 621 | 1.007 5 |
| 12 | 0.399 65 | 0.402 653 | 1.007 5 |
| 13 | 0.399 634 | 0.402 539 | 1.007 3 |
| 14 | 0.399 651 | 0.402 504 | 1.007 1 |

体系 OH^- 浓度过高时, 生成过量 TiO_6 八面体, 吸附于 BaTiO_3 晶核表面, 使 TiO_6 八面体配位不完全, 基端残留的 $\text{O}-\text{H}$ 缺陷堵塞了 Ba^{2+} 的轴向孔道, 抑制了 Ba^{2+} 迁移, 使得 BTO 粉体四方性下降。

不同 pH 值下 BTO 粉体的微观形貌如图 4 所示。pH=10 时, BTO 粉体呈近四方体状, 平均粒度为 101 nm。随着溶液 pH 值增大, BTO 粉体粒度呈逐渐增大的趋势, 颗粒不规则度增加且逐渐出现团聚现象。以上结果表明, 溶液 pH 值升高不仅会降低 BTO 粉体四方性, 还会增加粉体颗粒粒径。因此, 后续实验体系 pH 值控制为 10。



(a) pH=10; (b) pH=11; (c) pH=12; (d) pH=13; (e) pH=14
图 4 不同 pH 值下 BTO 粉体的 SEM 图

2.3 溶剂热温度对 BTO 四方性的影响

pH 值 10, 其他条件不变, 不同溶剂热温度下 BTO

粉体的 XRD 图谱见图 5, BTO 晶胞参数及 c/a 值见表 3。随着溶剂热温度升高, BTO 粉体 c 轴不断伸长, c/a 值不断增大, (002) 与 (200) 衍射峰在 160 °C 时开始出现明显的分离, 200 °C 时分离较为彻底, 此时 c/a 值达 1.008 1; 继续升高温度至 220 °C, BTO 粉体四方性更高, c/a 值为 1.009 4, 更接近目标值($c/a = 1.01$)。

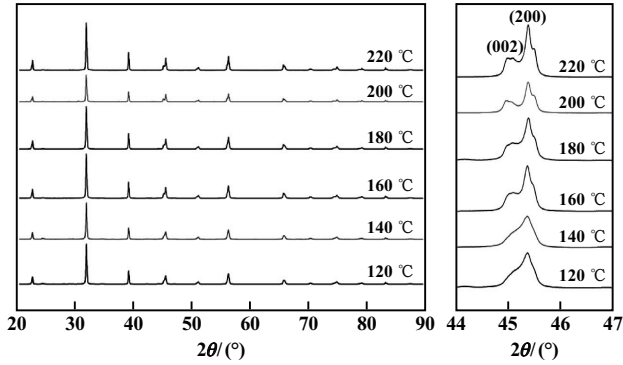


图 5 不同溶剂热温度下 BTO 粉体的 XRD 图谱

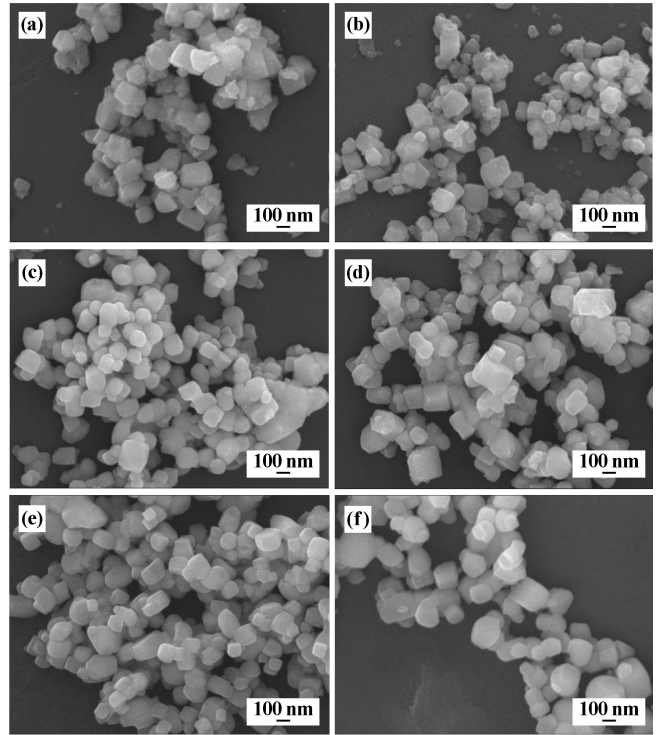
表 3 不同溶剂热温度下 BTO 粉体晶胞参数及 c/a 值

| 溶剂热温度/°C | a/nm | c/nm | c/a 值 |
|----------|---------------|---------------|---------|
| 120 | 0.399 870 | 0.402 018 | 1.005 3 |
| 140 | 0.399 861 | 0.401 990 | 1.005 3 |
| 160 | 0.399 722 | 0.402 347 | 1.006 6 |
| 180 | 0.399 657 | 0.402 429 | 1.006 9 |
| 200 | 0.399 551 | 0.402 799 | 1.008 1 |
| 220 | 0.399 600 | 0.403 350 | 1.009 4 |

不同溶剂热温度下 BTO 粉体的微观形貌如图 6 所示。溶剂热反应温度较低(120、140 °C)时, BTO 粉体颗粒较大, 团聚现象明显, 颗粒间边界不清晰且形状不规则; 160 °C 时, BTO 粉体颗粒边界开始清晰, 表现出特定形貌特征, 但依然存在团聚现象; 200 °C 时, BTO 粉体晶粒边界明显, 形状规整, 呈近四方形, 且分散均匀, 无明显团聚现象, 颗粒尺寸明显减小, 平均粒径仅 98 nm; 220 °C 时, BTO 粉体颗粒尺寸略有增加, 平均粒径为 124 nm。以上结果说明, 提高溶剂热反应温度有利于 BTO 晶体的形成和四方相的转变, 升高温度加剧了分子运动, 有利于溶剂热过程中钡源与钛源的溶解、接触和反应, 表面羟基缺陷减少^[11], 颗粒形状趋向规整, 最终形成四方形颗粒。综上, 溶剂热温度 220 °C 为宜。

2.4 溶剂热时间对 BTO 四方性的影响

溶剂热温度 200 °C, 其他条件不变, 不同溶剂热时间下 BTO 粉体(未煅烧)的 XRD 图谱见图 7, BTO 的晶胞参数与 c/a 值见表 4。溶剂热时间 1 h、2 h 时, BTO 粉体为立方相结构($a=b=c$)且接近纯立方相的晶轴



(a) 120 °C; (b) 140 °C; (c) 160 °C; (d) 180 °C; (e) 200 °C; (f) 220 °C

图 6 不同溶剂热温度下 BTO 粉体的 SEM 图

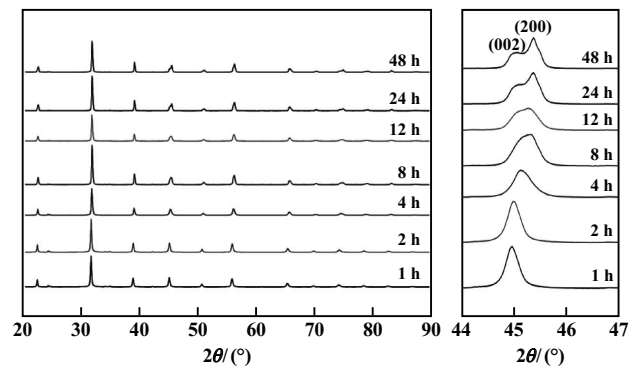


图 7 不同溶剂热时间下 BTO 粉体的 XRD 图谱(未煅烧)

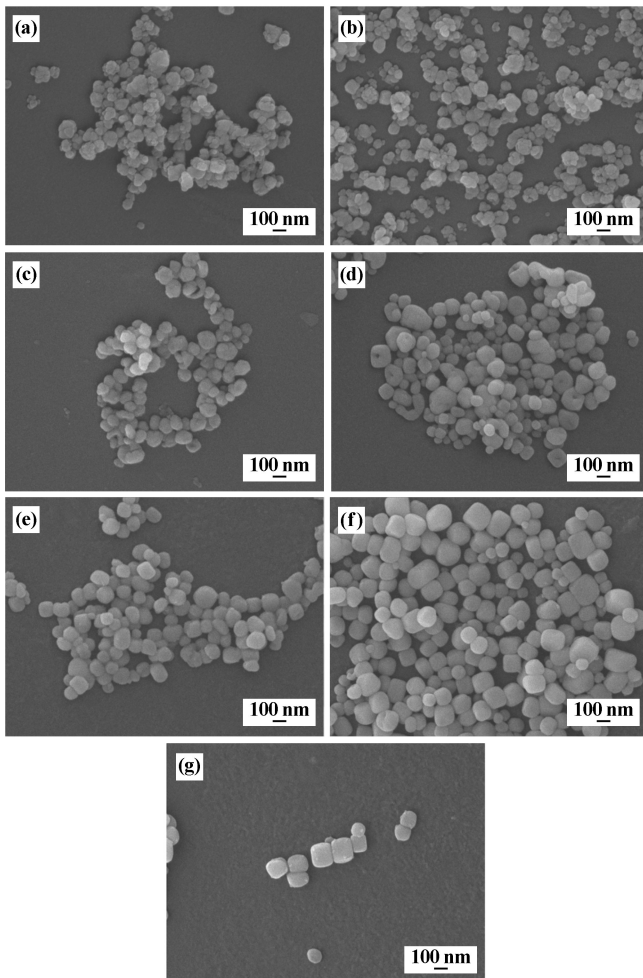
表 4 不同溶剂热时间下 BTO 粉体(未煅烧)晶胞参数与 c/a 值

| 溶剂热时间/h | a/nm | c/nm | c/a 值 |
|---------|---------------|---------------|---------|
| 1 | 0.403 357 | 0.403 357 | 1.000 0 |
| 2 | 0.403 012 | 0.403 012 | 1.000 0 |
| 4 | 0.401 044 | 0.402 575 | 1.003 8 |
| 8 | 0.400 322 | 0.402 343 | 1.005 0 |
| 12 | 0.400 372 | 0.402 494 | 1.005 3 |
| 24 | 0.399 932 | 0.402 488 | 1.006 4 |
| 48 | 0.399 744 | 0.402 564 | 1.007 1 |

长度(0.403 10 nm); 4 h 时, (002) 衍射峰发生明显偏移, BTO 开始出现四方畸变; 随着时间增加, (002) 晶面衍射峰逐渐宽化、分裂, a 轴持续缩短, 四方畸变加剧; 24 h 时, (002) 晶面衍射峰出现明显分裂, X 射线

衍射图谱与四方相 BaTiO_3 的 PDF 卡片完美对应, c/a 值达 1.006 4, 晶粒发育完善; 继续延长至 48 h, 产物结晶度进一步提高, a 轴仍在缩短, c 轴有所伸长, c/a 值为 1.007 1, 较 24 h 时略有提高。

图 8 为不同溶剂热时间下 BTO 粉体的微观形貌。由图 8 可知, 溶剂热时间对 BTO 粉体形貌及颗粒尺寸有明显影响。时间低于 2 h 时, 颗粒边界模糊且形状不规则, 存在明显团聚现象, 颗粒尺寸较小但不均匀; 4 h 时, BTO 粉体开始出现四方畸变, 此时获得的 BTO 粉体颗粒形状较规整, 颗粒边界开始明显, 小颗粒长大并在大颗粒表面溶解重结晶, 但颗粒尺寸不均匀, 团聚现象依然明显; 随着溶剂热时间延长, 粉体中开始出现四方形颗粒, 颗粒边界更加明显, 形状逐渐规整, 溶解重结晶现象逐渐消失, 颗粒尺寸依然不均匀; 24 h 时, BTO 粉体颗粒边界明晰, 粒粒分明, 表面光滑, 呈四方形或近四方形, 颗粒尺寸较均匀, 平均粒径为 102 nm; 继续延长至 48 h, BTO 粉体颗粒为规则四方形结构, 分散性良好, 颗粒尺寸均匀, 平均粒径为 129 nm。



(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 4 h; (d) 8 h; (e) 12 h; (f) 24 h; (g) 48 h

图 8 不同溶剂热时间下 BTO 粉体的 SEM 图

以上结果表明, 溶剂热反应过程中首先生成立方相 BaTiO_3 , 随着反应时间延长, 立方相 BaTiO_3 开始向四方相转变, 伴随小颗粒的溶解重结晶, 颗粒边界逐渐明显, 颗粒尺寸逐渐均匀, 最终形成形状规整的四方形或近四方形的四方相 BTO 粉体颗粒。

3 结 论

1) 以 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ 为原料, IPA 为溶剂, 通过溶剂热法成功制备富四方相纳米 BTO 粉体。

2) 研究结果表明, 提高原料钡钛比、降低体系 pH 值、增加溶剂热温度和时间均有利于提高 BTO 粉体的四方性。

3) 钡钛比 1.6、体系 pH 值 10、溶剂热温度 220 $^{\circ}\text{C}$ 、溶剂热时间 24 h、煅烧温度 950 $^{\circ}\text{C}$ 、煅烧时间 2 h 时, 得到的富四方相纳米 BTO 粉体分散均匀、形状规整, 呈四方形或近四方形, c/a 值达 1.009 4, 平均粒径为 124 nm。

4) 在溶剂热过程中, IPA 会优先提供一定的 $-\text{OH}$ 以促进 $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ 的水解, 生成的 TiO_6 八面体与 Ba^{2+} 连接, 使其在较低的体系 pH 值下形成立方相 BaTiO_3 , 然后经相转变、小颗粒溶解与重结晶逐渐转变为具有形貌规整的四方相 BTO 粉体。

参考文献:

- [1] Wainer E, Salomon A N. Titanium alloy manufacturing Co[J]. Electrical Report, 1942, 8(9):1943.
- [2] SONG E, DONG H K, Jeong E J, et al. Effects of particle size and polymorph type of TiO_2 on the properties of BaTiO_3 nanopowder prepared by solid-state reaction [J]. Environmental Research, 2021, 202:111668.
- [3] Bisen S, Mishra A, Jarabana K M. Studies of ferroelectric and dielectric properties of pure and doped barium titanate prepared by sol-gel method[C]//AIP Conference Proceedings. 2016:050070.
- [4] ZHANG X Y, YUE J S, ZHAO Y Y, et al. Synthesis of tetragonal BaTiO_3 nano-particle via a novel tartaric acid co-precipitation process[J]. Ceramics International, 2021, 47(5):7263-7267.
- [5] WU X, ZHAO H, HAN W, et al. Facile preparation and dielectric properties of BaTiO_3 with different particle sizes and morphologies[J]. RSC Advances, 2023, 13(16):11002-11009.
- [6] Hongo K, Kurata S, Jomphoak A, et al. Stabilization mechanism of the tetragonal structure in a hydrothermally synthesized BaTiO_3 nanocrystal[J]. Inorganic Chemistry, 2018, 57(9):5413-5419.
- [7] LU W, Quilitz M, Schmidt H. Nanoscaled BaTiO_3 powders with a large surface area synthesized by precipitation from aqueous solutions: Preparation, characterization and sintering[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(10):3149-3159.

(下转第 187 页)

- [2] Mishra R S, Mahoney M W, Sato Y, et al. Friction stir welding and processing VI[M]. Cham: Springer International Publishing, 2011.
- [3] Takahara H, Motoyama Y, Tsujikawa M, et al. Allowance of deviation and gap in butt joint on friction stir welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2007, 15-17(2):375-380.
- [4] Chiuzuli F R, Batisto B F, Bergmann L A, et al. Effect of the gap width in AZ31 magnesium alloy joints obtained by friction stir welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15:5297-5306.
- [5] MA H, WANG Y, TIAN Z, et al. Gap-tolerance control for friction stir butt welding of 2A14 aluminium alloy[J]. *Measurement*, 2019, 148:106915.
- [6] Schulze S, Bel G G, Richter-Trummer V, et al. The influence of gaps and misalignment on friction stir welded butt joints of medium-sized parts[J]. *Materials Science Forum*, 2014, 783/786 (Pt. 2): 1788-1793.
- [7] Cole E G, Fehrenbacher A, Shultz E F, et al. Stability of the friction stir welding process in presence of workpiece mating variations[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5-8):583-593.
- [8] Firouzdor V, Kou S. Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed, and rotation speed[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2010, 41(11):2914-2935.
- [9] Kosturek R, Sniezek L, Torzewski J, et al. The influence of welding parameters on macrostructure and mechanical properties of Sc-modified AA2519-T62 FSW joints[J]. *Manufacturing Review*, 2020, 7:2020025.
- [10] 黄紫玲, 杨昭, 范纲衔, 等. 对接间隙对 A356 铝合金 FSW 接头组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022(9):26-31.
- [11] 肖毅华, 张浩锋. 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊温度场的数值模型和参数影响分析[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(1):119-126.
- [12] 王森, 刘强, 李天景. 6061 铝合金 FSW 焊缝时效组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5):163-169.
- [13] Bijanrostami K, Barenji R V, Hashemipour M. Effect of traverse and rotational speeds on the tensile behavior of the underwater dissimilar friction stir welded aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2017, 26(2):909-920.

引用本文: 刘家睿, 李庆乾, 李佳慧, 等. 焊接参数对异种铝合金搅拌摩擦焊公差容限的影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):183-187.

(上接第 177 页)

- [14] 万斯雨, 孙有平, 何江美, 等. 降温轧制对 ZK60 镁合金显微组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(11):87-91.
- [15] 刘华燊, 孙有平, 何江美, 等. 轧制压下量对 ZK60 镁合金组织和阻尼性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(2):154-159.
- [16] Al-Samman T, Li X, Chowdhury S G. Orientation dependent slip and twinning during compression and tension of strongly textured magnesium AZ31 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(15):3450-3463.
- [17] Al-Samman T, Gottstein G. Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 490(1-2):411-420.
- [18] REN L B, QUAN G F, XU Y G, et al. Effect of heat treatment and pre-deformation on damping capacity of cast Mg-Y binary alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699:976-982.
- [19] TANG Y T, ZHANG C, REN L B, et al. Effects of Y content and temperature on the damping capacity of extruded Mg-Y sheets[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(3):522-528.
- [20] Kocks U F, Mecking H. Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case[J]. *Progress in Materials Science*, 2003, 48(3):171-273.
- [21] 王仕村. 轧制变形对 Mg-3%Al 合金阻尼性能和力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

引用本文: 刘华燊, 孙有平, 何江美, 等. 轧制应变速率对 Mg-1%Al 合金组织、阻尼和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):172-177.

(上接第 182 页)

- [8] LI J, Inukai K, Takahashi Y, et al. Formation mechanism and dispersion of pseudo-tetragonal BaTiO₃-PVP nanoparticles from different titanium precursors: TiCl₄ and TiO₂[J]. *Materials*, 2017, 11(1):51.
- [9] Lencka M M, Riman R E. Thermodynamic modeling of hydrothermal synthesis of ceramic powders[J]. *Chemistry of Materials*, 1993, 5(1):61-70.
- [10] 翟学良, 李纪标, 杨永社. 电镜在 BaTiO₃ 晶相转化机理研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2000, 19(4):469-470.
- [11] ZHANG M, Falvey J, Hector A L, et al. Effects of the reaction temperature and Ba/Ti precursor ratio on the crystallite size of BaTiO₃ in hydrothermal synthesis[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(43):27809-27819.

引用本文: 盖卉妍, 戴超华, 杨林. 基于异丙醇溶剂热合成四方相 BaTiO₃ 工艺探索及机理研究[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):178-182.