

氧化铝 α 相变影响因素探析

武鼎铭¹, 王 蕾^{2*}, 申 俊²

¹河南弘程新材料科技有限公司, 河南 郑州

²河南机电职业学院产业技术研究院, 河南 郑州

收稿日期: 2022年1月11日; 录用日期: 2022年2月18日; 发布日期: 2022年2月23日

摘 要

在低温下制备高转相率的 α -氧化铝, 对于降低能耗、降低粉体一次粒径、防止粉体团聚、控制粉体微观形貌, 从而提高粉体成瓷性能至关重要。介绍了氧化铝的 α 相变、相变过程及其相变机理, 通过煅烧条件、添加剂、粉碎、加入晶种、前驱体处理、抑制因素等几个方面, 对氧化铝 α 相变的影响因素进行了综述与探析, 为工业制备高性能 α -氧化铝粉体提供参考依据。

关键词

α -氧化铝, 相变, 添加剂

Analysis on Influencing Factors of α -Phase Transformation of Alumina

Dingming Wu¹, Lei Wang^{2*}, Jun Shen²

¹Henan Hongcheng New Materials Technology Co., Ltd., Zhengzhou Henan

²Henan Vocational College of Electromechanical Industry Technology Research Institute, Zhengzhou Henan

Received: Jan. 11th, 2022; accepted: Feb. 18th, 2022; published: Feb. 23rd, 2022

Abstract

The preparation of α -alumina with high phase conversion rate at low temperatures is essential for reducing energy consumption, reducing the primary particle size of the powder, preventing powder agglomeration, controlling the microscopic morphology of the powder, and thus improving the performance of powder into porcelain. The α -phase transformation, phase transformation process and phase transformation mechanism of alumina are introduced. The influencing factors of α -phase

*通讯作者。

transformation of alumina are summarized and analyzed through calcination conditions, additives, crushing, adding seeds, precursor treatment, inhibition factors, etc., which provide reference for industrial preparation of high-performance α -alumina powder.

Keywords

α -Alumina, Phase Transformation, Additives

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氧化铝粉体产业是我国重要支柱产业之一，高端氧化铝陶瓷粉体是一种对技术和质量要求极高的产品。由于缺乏核心技术支撑，被西方列为对我国限制出口的“卡脖子”材料。

α -氧化铝作为高性能氧化铝陶瓷粉体的核心，具有优良的物理和化学性能，包括高硬度、高机械强度、绝缘、抗磨损、耐高温、耐酸碱等[1] [2] [3]，同时具有优良的电子和光学性能[4] [5]，其广泛应用于机械工业、陶瓷材料[6] [7]、绝缘材料、耐火材料[8] [9]、研磨抛光材料[10] [11]、化学化工材料、电子和光学材料[12] [13]等多种领域。本文介绍了氧化铝的 α 相变、相变过程及其相变机理，通过对氧化铝 α 相变的影响因素进行综述与分析，对于低温下制备高转相率的 α -氧化铝，提高粉体成瓷性能，使其适用于不同领域[14] [15]，具有重要意义。

2. 氧化铝的 α 相变

氧化铝常见的 8 种晶型分别是 α 、 γ 、 δ 、 κ 、 η 、 θ 、 χ 及 ρ [16]，其中除了 α -氧化铝是热力学稳定相之外，其余均为过渡相，也叫亚稳定相。在一定的温度下，过渡相都可转换为 α 相且该过程不可逆[17]。 α -氧化铝属刚玉结构，这种结构使其晶体的稳定性远远大于其他氧化铝晶型[18]。

在过渡相氧化铝中，晶体结构最主要的区别是氧离子在同一排列下铝离子的位置发生了改变，它们之间的转化没有破坏原有晶体颗粒的形貌和氧化铝的化学键[19]。过渡相之间的转变往往是连续的，期间氧离子的堆积方式不变，仅为铝离子的局部转移，属位移型相变，它不会破坏原有的晶体形貌，所需能量较少，相转变温度较低；而过渡相氧化铝转变为 α -氧化铝的过程是由 Fcc (面心立方)结构氧离子排列的过渡相向 Hcp (密排六方)结构氧离子排列的稳定相的转变，氧离子重排发生晶格重构[20]，此过程需大量能量，必须在高温下才能进行[21] [22]。具体过程见图 1。

Dynys 等[23]通过研究 Al_2O_3 相变过程中微观结构的变化，首先提出了 α - Al_2O_3 的相变可以分为两个阶段：相的成核和 α 粒子(晶体)的生长。相变过程中消耗的大部分能量用于克服成核势垒形成 α 核，其余能量用以促进晶粒生长。因此可通过降低 α 相变的成核势垒(激活能)，来降低相变温度，抑制粒径长大。后来，又有 Chang [24]、Yen [25]和 Wen [26] [27]等对 α -氧化铝相变理论做了进一步的研究，存在不同意见，未形成定论。

3. 氧化铝 α 相变影响因素探析

高端氧化铝陶瓷粉体具有多种特征：高的 α 转相率、低杂质含量(主要是 Na_2O 、Si 和 Fe 等)、 α -氧化铝一次晶粒粒径小、粒径分布窄、球形微观结构(非蠕虫状)及分散性能好、无团聚等，这些一般可以通过

对氧化铝的 α 相变过程进行控制来得到。氧化铝 α 相转变的影响因素主要有：转相温度，参与相变的过渡相氧化铝量，参与相变的过渡相氧化铝面积，晶种的有效浓度，以及添加剂、粉碎条件等，部分添加剂会对氧化铝相变产生抑制作用，下面对影响 α -氧化铝相变的因素进行总结和讨论。

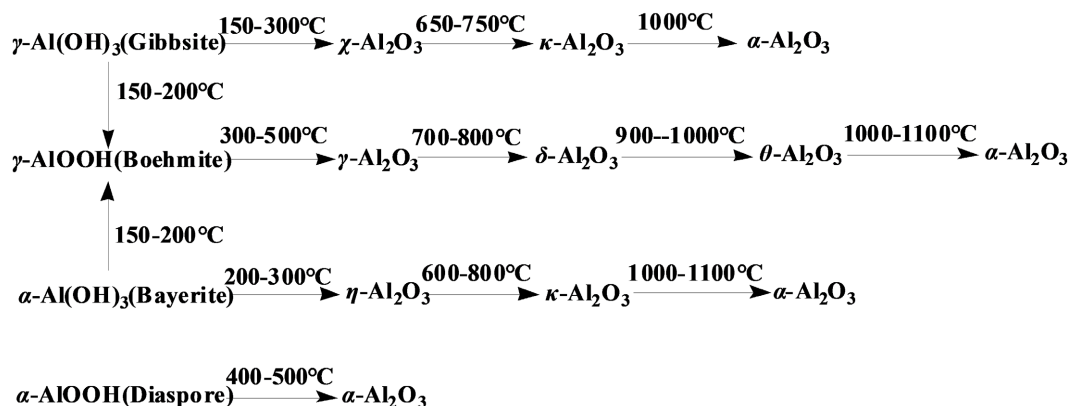


Figure 1. Sequences of the phase transformations of the alumina precursors toward the stable α - Al_2O_3 phase

图 1. 各种先驱体转化为 α - Al_2O_3 的相变过程

3.1. 煅烧条件对 α -氧化铝相转化的影响

主要从煅烧温度和保温时间两个方面分析。孙志昂[28]等的研究表明，不添加矿化剂，煅烧温度越高转化率越高，但一次粒径也会越大。研究采用隧道窑，保温时间(10 h)一致，转化率由 1300°C 下的 90% 提高至 1520°C 下的 96%， α -氧化铝一次晶粒由 0.7~0.8 μm 长大至 1.3~1.5 μm ；保温时间降至 2 h 后，转化率由 1300°C 下的 87% 提高至 1420°C 下的 90%~92%，一次晶粒由 0.6 μm 长大至 1.0 μm 。上述研究表明，在一定程度上，煅烧温度提高使转化率提高，煅烧时间延长使转化率提高，且都使得一次粒径长大。

3.2. 添加剂对 α -氧化铝相转化的影响

研究表明，添加矿化剂可降低转相温度，提高转相率[29]，而且转相后物料中氧化钠的含量也会降低。孙志昂[28]等研究了硼酸、氯化铵、氟化物以及复合矿化剂对 α -氧化铝相转化的影响。采用硼酸作为矿化剂，添加量为 0.5%~0.15% (以氧化铝质量计)，1450°C 下煅烧 10 h，转相率 98%，含氧化钠 0.05%，研磨后平均粒径较小(4~5 μm)，晶体表面光滑，干净。在 α -氧化铝的相转化过程，氯化铵作为脱钠剂添加量为 0.2%~1.5% (以氧化铝质量计)，1300°C 下煅烧 8 h， α -氧化铝中氧化钠含量低至 0.08% 以下，甚至可以 0.01% 以下，但其晶体一般为针状或条状(小于 2 μm)，可用于耐火材料的浇注料。

有证据表明，某些矿化剂可以通过改善氧化铝相变过程中的质量传输，甚至改变形态来显著降低相变温度[30]。陈超伦[14]采用碳酸铝胺为先驱体，研究了不同的氟化物(MgF_2 , AlF_3 , CaF_2 , NaF , ZnF_2 , LiF)对 α -氧化铝相变过程的影响。结果表明，分别加入 NaF (wt 5%)、 LiF (wt 5%)、 CaF_2 (wt 5%)、 ZnF_2 (wt 5%)、 MgF_2 (wt 5%) 后并没有对相转化温度的降低产生显著影响，而 AlF_3 (wt 5%) 的加入将转相温度降低了 300°C，效果显著。Wu 等[31]的研究结果显示，以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 为先驱体，分别添加 2% 质量分数的 MgF_2 , AlF_3 , CaF_2 , LiF , NaF 在指定温度下煅烧，其中 AlF_3 的添加使得完全转化为 α - Al_2O_3 的煅烧温度降低了大约 400°C， MgF_2 降低大约 220°C， CaF_2 降低 130°C，其余氟化物(LiF 和 NaF) 没有对相转化产生影响。可以得出结论，相比其它氟化物，氟化铝对 α -氧化铝相转变起显著的促进作用。

Rajendran [32]报导了在已经加入了 α -氧化铝晶种的前驱体中再添加少量硝酸铵， θ 相到 α 相的相变温度能够继续降低，主要原因是硝酸铵在煅烧过程能够发生分解反应(约 320°C 时)，释放大能量并造

成氧化铝过渡晶相的高能缺陷,可以帮助克服 α 相的形核势能,从而加快相变动力速率。但硝酸铵属于炸药成分,不能在工业生产大量使用。

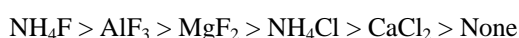
陈玮[33]采用氢氧化铝为前驱体,结果见表1:

Table 1. Effect of different additives on α phase transition of alumina

表 1. 不同添加剂对氧化铝 α 相变的影响

添加剂	None	NH ₄ F	MgO	AlF ₃	NH ₄ Cl	MgF ₂	CaCl ₂
相变点/°C	1291	1088	1293	1137	1206	1132	1265
α -Al ₂ O ₃ 含量/(1100°C)	3.4	67.5	2.5	55.8	24.3	46.8	13.5

上表说明,添加剂能显著影响其相变温度,AlF₃、NH₄F、NH₄Cl、MgF₂、CaCl₂等添加剂都对氧化铝的相变有不同程度的促进作用,而MgO有微弱的抑制作用。1100°C的煅烧条件下(除MgO外),其促进作用比较如下:



3.3. 氧化铝 α 相变温度的降低措施

通常情况下, α -氧化铝的相变温度很高,固体颗粒之间易烧结产生硬团聚,因此降低其 α 相变温度是关键。目前降低氧化铝 α 相变温度的方法主要有球磨、添加晶种(籽晶)和添加剂等[34]。添加剂的影响上文已述,下面主要介绍另外两种方法。

3.3.1. 粉碎对 α -氧化铝相变的影响

粉碎属于机械活化过程,主要是通过球磨的方式,将前驱体的多晶团聚体粉碎为很多表面不规则的粉体,破坏其原始结晶形态[35]。

1) 粉碎过程增加了体系的表面积,也就是增加了体系的表面能,粉碎时间越长,表面积越大,在相变过程中,发生相变的前驱体表面积增大,相变速率提升。

2) 粉碎过程使体系产生大量晶体缺陷与悬空键,这些缺陷与悬空键储蓄了大量化学能,在高温时易发生相转变,释放化学能,提高转相速率。

3) 粉碎过程中,从粉碎介质上脱落下来很多微小的氧化铝颗粒,在转相过程中,这些微小颗粒可以起到晶核作用[36]。

3.3.2. 晶种对 α -氧化铝相变的影响

肖泓芮[37]将晶种对氧化铝相变的影响归纳为两点:1) 降低相变成核势垒与活化能[38],这样可以使其相变温度降低;2) 提高 α 相变的成核密度,从而提高陶瓷致密度。晶种能够促进过渡相氧化铝转变成 α -氧化铝,但并非所有的晶种都能起到诱导作用,只有与过渡相氧化铝接触的 α -氧化铝才能成为有效晶种。

宋振亚[34]报导了不同晶种对氧化铝相变的影响,主要分为两类晶种,一类是与 α -Al₂O₃的结构相似的 α -Fe₂O₃,非常适合作为籽晶;另一类是与 α -Al₂O₃结构不一致的物质如TiO₂、MgO、ZnO等。结果表明:1) 加入二氧化钛(wt2%)籽晶后,相变温度降低至1100°C,粉体的分散性能更好,且有效改善了硬团聚现象;2) 加入氧化镁(wt8%)和氧化锌(wt10%)籽晶后,不仅能够降低其相变温度,而且粉体烧结现象也得到很大改善。但上述晶种是与 α -Al₂O₃完全不同的物质,相当于在氧化铝粉体中引入了杂质,不利于纯度的提升。

目前研究最多是纳米 α - Al_2O_3 作为晶种用于前驱体的相转化过程。杨聪[39]等的研究表明：1) 纳米 α - Al_2O_3 晶种的添加，有效降低了其相转化的开始和完成温度；2) 相转化温度降低后，高温团聚情况得到很大改善，分散性更好。孙旭东[40]等人利用 α - Al_2O_3 作为晶种添加到碳酸铝铵前驱体中在 900°C 下煅烧出粒径为 30 nm 左右的 α - Al_2O_3 粉体。

3.4. 前期酸处理前驱体对 α -氧化铝相变的影响

陈若愚[41]分别利用盐酸溶液和硝酸溶液处理氧化铝前驱体，煅烧后的相变结果表明：1) 前驱体用盐酸溶液处理后再煅烧，能够有效促进氧化铝 α 相变，降低晶粒尺寸大小；2) 前驱体预先用硝酸溶液处理，硝酸溶液浓度增加，煅烧后氧化铝晶粒尺寸亦增加。

3.5. 抑制过渡相向 α -氧化铝转变的因素

陈玮[33]考察了 Na_2O 对过渡相氧化铝转变成 α - Al_2O_3 的影响。 Na_2O 是碱法生产氧化铝过程中引入并残留的杂质，在很多情况下，其对 α - Al_2O_3 材料的性能起到负面作用，会降低陶瓷材料的体积密度，降低耐火材料的高温性能，降低电子材料的电阻率等。研究表明， Na_2O (wt 0.14%) 对会抑制过渡相向 α - Al_2O_3 转变，主要是因为其可以与氧化铝反应生成相应的铝酸盐，形成空间位阻，降低了转相速率。

宋振亚[34]研究了 SiO_2 (商用 30% 硅胶) 和 ZrO_2 (实验室自制溶液) 对 γ - Al_2O_3 到 α - Al_2O_3 转相过程中的作用。结果表明 SiO_2 和 ZrO_2 对氧化铝 α 相变都有明显的抑制作用，且同等条件下 SiO_2 的抑制性更强。但陈若愚[41]的研究结果恰恰相反，采用 γ - Al_2O_3 为前驱体，煅烧温度 1100°C ， SiO_2 的加入量分别为 wt 0.1%、wt 0.5% 和 wt 1.0% 三个试样，与空白试样对比，结果显示 SiO_2 可有效促进相变，且 SiO_2 含量越高效果越好，但氧化铝一次晶粒尺寸亦逐渐增大。

4. 结语与展望

氧化铝 α 相变过程是前驱体形貌、添加剂、温度控制、参与相变的过渡相氧化铝量及其表面积、晶种及其有效浓度等综合作用的结果，当这几种因素综合作用最大时，相变速率最高，相变温度最低，一次粒径最小，粉体成瓷性能最好。目前在国内的工业生产中，高纯超细 α -氧化铝粉体的制备工艺还难以做到在消除杂质的同时降低煅烧温度，提高分散性能并降低团聚作用，因此应深入研究氧化铝 α 相变及其控制因素，突破高性能氧化铝陶瓷粉体及其产业化的技术瓶颈，为我国高端氧化铝陶瓷粉体产业的快速发展做出贡献。

基金项目

国家火炬项目编号：2012GH031514 和河南省教育厅资助。

参考文献

- [1] 陈玮, 尹周澜, 李旺兴. α -氧化铝显微结构研究[J]. 耐火材料, 2007, 41(增刊): 201-204.
- [2] 李友凤, 周继承, 廖立民, 等. 超重力碳分反应沉淀法制备分散性纳米氢氧化铝[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(10): 1290-1294.
- [3] 李江, 潘裕柏, 宁金威, 等. 纳米晶添加氧化铝粉体的低温烧结研究[J]. 无机材料学报, 2003, 18(6): 1192-1198.
- [4] 刘世江, 孙洪巍, 黄淼淼, 等. 共沉淀法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ 红色荧光粉及其发光性能研究[J]. 中国陶瓷, 2007, 43(3): 22-25+28.
- [5] 李瑶. 锂离子电池隔膜材料的研究进展[J]. 科技创新与应用, 2016(10): 67.
- [6] 刘军芳, 傅正义, 张东明, 等. 透明陶瓷的制备技术及其透光因素的研究[J]. 硅酸盐通报, 2003, 22(3): 68-73.
- [7] 牛金叶, 孙成功. 透明陶瓷的研究现状及应用进展[J]. 现代技术陶瓷, 2007, 28(4): 19-24.

- [8] 廖佳, 李远兵, 段斌文, 等. SiO₂ 微粉加入量对高纯氧化铝轻质隔热材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2015, 49(1): 17-19.
- [9] 腾国强. 金属增韧氧化铝基耐火材料的研究进展[J]. 耐火材料, 2006, 40(1): 53-55.
- [10] 赵晓媛. 氧化铝系化学机械抛光磨料的制备及颗粒分级[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [11] 徐仁泉, 周纪冬, 陈旭晔, 等. 抛光氧化铝在摩擦材料中的应用[C]//中国摩擦密封材料协会. 第九届中国摩擦密封材料技术交流会暨产品展示会论文集. 上海: 中国摩擦密封材料协会, 2007: 117-120.
- [12] 薛伟伟. 超微细氧化铝制备及其改性锂电池隔膜的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [13] 刘世江. 氧化铝基发光材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [14] 陈超伦. 纳米 α 氧化铝粉体制备及烧结性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [15] 吴宇峰, 张铁军, 张家萌, 等. α -Al₂O₃ 相变机理及制备工艺研究进展[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(1): 199-208.
- [16] 张金升, 王美婷, 许凤秀. 先进陶瓷导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [17] Levin, I. and Brandon, D. (2005) Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences. *Journal of the American Ceramic Society*, **81**, 1995-2012. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x>
- [18] Prashanth, P.A., Raveendra, R.S., Krishna, R.H., et al. (2015) Synthesis, Characterizations, Antibacterial and Photoluminescence Studies of Solution Combustion-Derived α -Al₂O₃ Nanoparticles. *Journal of Asian Ceramic Societies*, **3**, 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.07.001>
- [19] 刘勇, 陈晓银. 氧化铝热稳定性的研究进展[J]. 化学通报, 2001, 64(2): 65-70.
- [20] 王忠慧, 韩辉, 樊慧芳, 等. 阐述 α -氧化铝相变机理和 α -相含量影响因素[J]. 轻金属, 2012(1): 24-26.
- [21] Chou, S.N., Huang, J.L., Li, D.F., et al. (2007) The Mechanical Properties and Microstructure of α -Al₂O₃/Aluminum Alloy Composites Fabricated by Squeeze Casting. *Journal of Alloys and Compounds*, **436**, 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.07.062>
- [22] Ozawa, M., Kato, O. and Suzuki, S. (1998) The Effect of a Cr₂O₃-Addition on the Phase Transformation and Catalytic Properties of γ -Al₂O₃ in Treatment of Lean-Burn Exhausts. *Journal of Materials Science*, **33**, 737-741.
- [23] Dynys, F.W. and Halloran, J.W. (1982) Alpha Alumina Formation in Alum-Derived Gamma Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, **65**, 442-448. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1982.tb10511.x>
- [24] Chang, P.L., Yen, F.S., Cheng, K.C., et al. (2001) Examinations on the Critical and Primary Crystallite Sizes during θ -to- α -Phase Transformation of Ultrafine Alumina Powders. *Nano Letters*, **1**, 253-261. <https://doi.org/10.1021/nl015501c>
- [25] Yen, F.S., Wen, H.L. and Hsu, Y.T. (2001) Crystallite Size Growth and the Derived Dilatometric Effect during θ -to- α -Phase Transformation of Nano-Sized Alumina Powders. *Journal of Crystal Growth*, **233**, 761-773. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)01636-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01636-0)
- [26] Wen, H.L., Chen, Y.Y., Yen, F.S., et al. (1999) Size Characterization of θ - and α -Al₂O₃ Crystallites during Phase Transformation. *Nanostructured Materials*, **11**, 89-101. [https://doi.org/10.1016/S0965-9773\(99\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0965-9773(99)00022-7)
- [27] Wen, H.L. and Yen, F.S. (2000) Growth Characteristics of Boehmite-Derived Ultrafine Theta and Alpha-Alumina Particles during Phase Transformation. *Journal of Crystal Growth*, **208**, 696-708. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(99\)00436-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(99)00436-4)
- [28] 孙志昂, 蒋晓辉, 沈乐. α -氧化铝的相变及晶体生长的控制[J]. 陶瓷, 2017(10): 30-34.
- [29] 李艳, 周琦, 赵丽平, 等. 添加剂对氧化铝粉体粒径的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(2): 133-137.
- [30] Fu, G.F., Wang, J. and Kang, J. (2008) Influence of AlF₃ and Hydrothermal Conditions on Morphologies of α -Al₂O₃. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **18**, 743-748. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60128-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60128-4)
- [31] Wu, Y.Q., Zhang, Y.F., Wang, X.X., et al. (2001) Preparation of Platelike Nano Alpha-Alumina Particles. *Ceramics International*, **27**, 265-268. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00074-2)
- [32] Rajendran, S. (1994) Production of Ultrafine Alpha Alumina Powder and Fabrication of Fine Grained Strong Ceramics. *Journal of Materials Science*, **29**, 5664-5672. <https://doi.org/10.1007/BF00349962>
- [33] 陈玮. α -Al₂O₃ 形成过程显微结构演变及其调控[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [34] 宋振亚. Al₂O₃ 超微粉体的制备、改性及其 α 相变控制的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [35] 李继光, 孙旭东, 王雅蓉, 等. α -Al₂O₃ 纳米粉的烧结初期机理研究[J]. 硅酸盐学报, 1998(4): 471-475.
- [36] 吴玉程, 宋振亚, 杨晔, 等. α -氧化铝相变及其相变控制的研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(6): 1043-1048.
- [37] 肖泓芮. 纳米 α -Al₂O₃ 籽晶的合成及其在制备 α -Al₂O₃ 纤维中的应用[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [38] Shelleman, R.A., Messing, G.L. and Kunagai, M. (1986) Alpha-Alumina Transformation in Seeded Boehmite Gels.

- Journal of Non-Crystalline Solid*, **82**, 277-285. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(86\)90142-0](https://doi.org/10.1016/0022-3093(86)90142-0)
- [39] 杨聪, 谢佩韦. 超细 α - Al_2O_3 粉体的制备[J]. 船电技术, 2019, 39(9): 28-30.
- [40] Sun, X.D., Li, J.G., Zhang, F., *et al.* (2003) Synthesis of Nanocrystalline α - Al_2O_3 Powders from Nanometric Ammonium Aluminum Carbonate Hydroxide. *Journal of the American Ceramic Society*, **86**, 1321-1325. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03469.x>
- [41] 陈若愚. α - Al_2O_3 微粉制备与表征[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.