

# 纳米氧化铝粉体制备方法与工艺的研究进展

孙跃军<sup>1</sup>, 荀冬雪<sup>1</sup>, 刘 民<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

(2. 辽宁工程技术大学理学院, 辽宁 阜新 123000)



孙跃军

**摘 要:** 纳米氧化铝因具备高强度、高硬度、抗磨损、耐高温、表面积大、吸附能力强等优异的特性, 被用于航天工业、磨料、精细陶瓷、耐火材料、催化、光学材料等领域。其中, 纳米  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  两种晶型应用最为广泛。纳米氧化铝的制备工艺也随着研究的深入而不断地发展。该文对制备纳米  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末的传统方法如气相法、固相法、液相等做了简要介绍并分析了其各自的优缺点; 针对出现的问题, 结合近几年的研究, 评述了改良方法和改进工艺; 简要综述了近年来发展出的新制备方法组合和制备原料、方法及途径的创新, 并依据部分粉体特点给予一定的应用建议, 以期对今后纳米氧化铝研究者的研究工作提供一定的借鉴和启发。

**关键词:** 纳米氧化铝; 粉体; 制备; 工艺; 进展

中图分类号: TQ133.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2017)06-0455-06

## Research Progress on Preparing Methods and Technics of Nano-Aluma Powder

SUN Yuejun<sup>1</sup>, XUN Dongxue<sup>1</sup>, LIU Min<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

(2. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Nano-alumina has many outstanding characteristics such as high strength, high hardness, high abrasion resistance, high temperature resistance, large surface area and strong adsorption capacity, so it is widely used in space industries, abrasive materials, fine ceramics, refractory materials, catalysis materials, optical materials, etc. Among various polymorphs,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  are the most widely used. The preparation technology of nano-aluma develops constantly with the in-depth research. In this paper, the traditional preparation methods of nano  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder, such as vapor phase method, solid phase method and liquid phase method, are introduced briefly, and their respective advantages and disadvantages are also analyzed. Aiming at problems arisen, improved methods and technics are reviewed combined with the research of recent years. New preparation methods combinations and innovations on raw materials, methods and approaches are briefly summarized; some application suggestions are given based on the characteristics of the powder, so as to provide some reference and inspiration to the researchers on nano-alumina in the future.

**Key words:** nano-alumina; powder; preparation; technique; progress

## 1 前 言

在自然界中存在着氧化铝的多种同质异性相<sup>[1]</sup>, 例如  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\chi$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\kappa$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  等, 最为常见及应用最广泛的的主要有两种:  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。其中稳态的纳米  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$

因具备高强度、高硬度、抗磨损、耐高温、高电阻率<sup>[2,3]</sup>, 被广泛用于航天工业、磨料、精细陶瓷、表面防护、耐火材料、半导体等领域。而亚稳态的纳米  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有孔隙体积大<sup>[4]</sup>、表面积大<sup>[5]</sup>、吸附能力良好等优异的特性, 被应用于光学材料<sup>[6]</sup>、湿度传感器、催化<sup>[7]</sup>、复合材料<sup>[8]</sup>等领域。纳米氧化铝的传统制备方法主要有: 气相法、固相法和液相法。而前两种方法或因对设备气密性要求较高, 或由于产生有害气体等原因, 使其发展受到限制。虽然液相法也存在一些问题, 但制备条件相对温和, 逐渐成为研究及应用的重点。随

收稿日期: 2016-03-09

第一作者: 孙跃军, 男, 1972 年生, 教授, 硕士生导师, Email: sunyuejun0001@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.06.09

着近年来研究的深入,研究者不断改善工艺,解决原有工艺上存在的不足。如:在原有方法基础上添加一些物质;将各单一制备方法进行组合;在原料、方法上进行创新等。

本文就制备这两种纳米氧化铝粉体的优缺点进行综述,针对出现的问题,结合近几年的研究报道,评述相应的改进工艺。另外,综述了制备纳米氧化铝的新方法、新组合、新成果,为不同领域纳米氧化铝材料应用,提供制备新思路。

## 2 纳米氧化铝粉体的制备方法

### 2.1 气相法

气相法是直接利用气体或者通过其他方法将物质变成气体,使之在气态下发生物理或化学反应,而后在冷却过程中凝聚长大,形成超细微粉。

气相法的优点在于:易控制反应条件、颗粒粒径小且分散性好、产物易于精制。缺点是操作比较复杂,设备气闭性要求高,产率低,且收集困难,不易于大规模生产。

### 2.2 固相法

固相法是将铝盐或金属铝研磨后煅烧或者直接加热,使其发生固相反应,从而制得氧化铝的方法。可分为机械化学法、热解法和燃烧法等。

#### 2.2.1 机械化学法

机械化学法是把机械球磨法与化学反应法相结合。路富亮<sup>[9]</sup>以廉价的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和 Al 为原料,使其先发生氧化还原反应,再采用高能球磨工艺进行球磨,制备出平均颗粒尺寸为 16 nm 的单晶  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  纳米颗粒粉体。此法是在较低的环境温度下,通过控制氧化还原反应逐步进行,因而可应用到抗腐蚀、抗磨涂层以及金属模板复合物增强材料的制备中。但球磨法产生粉尘较多,大规模使用对环境有一定影响。

#### 2.2.2 热解法

热解法工艺简单,常用于工业制备。热解硫酸铝铵时会产生  $\text{SO}_2$  等有毒气体,污染环境,正逐渐被碳酸铝铵热解法所取代<sup>[10]</sup>。

#### 2.2.3 燃烧法

传统的燃烧法是按一定比例把反应物放入炉子中燃烧,直接得到产物的方法。如瞿秀静等<sup>[11]</sup>将硝酸铝和尿素放入马弗炉燃烧,制备出粒径为 40~90 nm 片状和类球状的稳态  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。虽然此法流程简单,无需溶剂,但粉末收集有难度,需要配有废气处理装置。Kathirvel 等<sup>[12]</sup>对传统燃烧法进行改良,首次采用在空气中燃烧氧气和乙炔以氧化商业铝粉的工艺,制备出了粒径范围

在 70~150 nm 之间的球形纳米  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  粉末。如图 1 装置示意图所示,粉末收集盘安装在火焰上方 25 cm 处,在不同比例的氧气和乙炔的燃烧作用下,熔化后的铝粉发生氧化反应,在收集盘表面形成氧化铝。该方法原料单一,工艺简单,不产生有害气体。

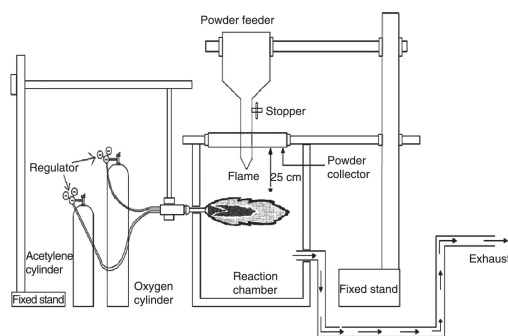


图 1 燃烧合成装置示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of flame synthesis set-up<sup>[12]</sup>

### 2.3 液相法

目前工业和实验室研究所广泛采用的制备纳米粉末的方法是液相法,本文也将着重介绍此法。液相法主要可分为沉淀法、水热法、微乳液法、溶胶-凝胶法等。

#### 2.3.1 沉淀法

沉淀法是在溶液状态下,使原料中的有效成分发生化学反应,生成沉淀,再经过滤、洗涤、干燥、烧结制备出超细粒子。包括直接沉淀法、共沉淀法和均匀沉淀法。

直接沉淀法是通过沉淀反应从溶液中直接制备纳米粒子。常用沉淀剂为氨水,为了得到分散度好的纳米氧化铝,控制氨水滴加的方式、速度,反应温度,减少团聚等成为制备工艺的研究重点。而添加种晶或加入隔离介质,也可起到细化颗粒的作用。Du 等<sup>[13]</sup>采用直接沉淀法,通过预先加入种晶  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和隔离介质 NaCl,以硝酸铝和氨水为原料,制备出了粒径在 11~18 nm 之间的单分散球形  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。种晶可以有效抑制颗粒生成蠕虫状,促进球形颗粒生长<sup>[14]</sup>。而 NaCl 的加入可以防止因前驱体颗粒相互接触而产生的团聚,确保产物的分散性。这也提供了一种在高温条件下制备分散颗粒的有效方法。

均匀沉淀法是以易缓慢水解的物质为沉淀剂,利用水解速率控制粒子生长速度而得到纳米粒子的方法。由于沉淀剂的缓慢水解,化学反应缓慢发生,氧化铝核速率得到控制,在某一时刻发生爆发性形核的概率比直接沉淀法小,颗粒团聚现象得到一定控制,因此制备出的氧化铝颗粒更均匀,粒径更细小。

尿素作为均匀沉淀法常用的沉淀剂,虽然在控制反应速率方面有一定优势,但对反应温度要求严格且反应时间较长。王舟等<sup>[15]</sup>针对这一问题,提出引入脲酶作为催化剂缩短反应时间的方法,即采用共沉淀法(共沉淀法是把沉淀剂加入到混合后的金属盐溶液中,使各组分混合沉淀,再经加热分解得到超微粒子)制备氧化铝。他们在配置好的硫酸铝铵与尿素混合液中,加入适量脲酶,制备出了纯度高,耗能低,粒度均一的球形 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,并且将反应时间由原来的8 h减少到2.5 h,极大的提高反应效率。

液相沉淀法具有反应易控制,成本低、纯度高、工艺简单且易于大量生产等优点。

### 2.3.2 水热法

水热法是以水溶液为反应介质,在一定的密闭系统中,通过对反应器加热创造一个高温高压的环境,使通常状态下不溶或者难溶的物质溶解并且重结晶的方法<sup>[16]</sup>。这种方法的优势在于避免了煅烧后氢氧化物转化成氧化物这一容易形成硬团聚的步骤,所制备的粉体团聚程度很低。水热法的另一个优点是可以制备出不同微结构和不同形貌的产物。兰伟兴等<sup>[17]</sup>以硝酸铝为原料,以尿素为沉淀剂,采用水热-共沉淀法,制备出了三维“十”字型 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 超细粉体,粉体的表面积为 $230\text{ m}^2/\text{g}$ ,平均粒径为6 nm,如图2所示。在三维“十”字型 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 结构形成过程中,尿素作为 $\text{OH}^-$ 缓释剂,在80℃下缓慢水解起到决定性作用。

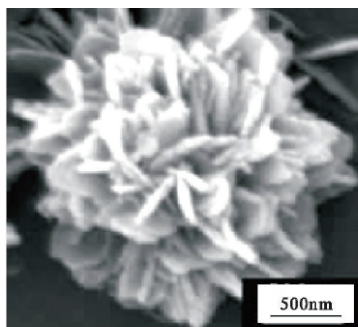


图2 水热合成三维“十”字型 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  SEM照片<sup>[17]</sup>

Fig.2 SEM image of the 3D cross shape of  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  via hydrothermal-coprecipitation method<sup>[17]</sup>

水热法需要在密闭的反应釜中高温高压下保温较长时间,物质的中间状态无法观察到;且条件控制严格,如改变反应釜大小等条件对实验影响很大,这些限制均不利于应用到工业上生产上。

### 2.3.3 微乳液法

微乳液是由油、水、表面活性剂和助表面活性剂组成的各相同性的、热力学稳定的、外观透明或半透明的

分散体系。微乳液可以分为O/W型(水包油型)、W/O型(亦称反相微乳液,油包水型)两种不同的结构。微乳液法制备纳米粒子具有实验装置简单、颗粒大小和形状可控等优点,但添加物易与纳米产物混合,影响产物纯度。而且油包水型使用较多油和有机溶剂<sup>[18,19]</sup>,成本更高。张慧勇<sup>[20]</sup>在传统方法上改进,将纯净水、吐温-80与乙醇制成透明的水相,由 $\text{AlCl}_3$ 、环己烷、与乙醇构成油相,将油相在搅拌作用下加入水相,使其形成稳定的水包油铝盐微乳液,然后用氨水调节pH值,60℃水浴反应,加入PEG6000,经离心、洗涤、干燥、煅烧制备出粒径为10.9 nm的 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒子。

### 2.3.4 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是将金属醇盐或无机盐溶在溶剂中水解、聚合形成溶胶,经过陈化形成三维空间网络结构的凝胶,凝胶干燥成干凝胶,再高温煅烧处理得到超细氧化物粉末的方法。此方法对实验条件要求不高,受到国内外许多研究人员的关注,不断扩展反应物的多样性。

Majid等<sup>[21]</sup>以九水合硝酸铝和异丙醇铝为原料,以乙二醇为分散剂,通过溶胶凝胶法制备出了颗粒尺寸为10~300 nm不等的氧化铝前驱体,此前驱体在500℃下煅烧4 h,可生成海绵状纳米孔结构的 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;在1000℃下煅烧则生成 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。该方法的一个创新是前驱体不经过任何洗涤和纯化,可以简化工艺,节省处理时间和成本。Ting等<sup>[22]</sup>采用醇盐溶胶-凝胶法,以异丙醇铝为原料,创新性加入葡萄糖使其水解,生成浅黄色的溶胶,蒸发烧结,最终在1000℃下,制得粒径小于50 nm的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末。此法虽可获得颗粒细小、分布均匀的粉末。虽然醇盐价格相对较高,但葡萄糖来源广泛,且不会产生 $\text{NO}_x$ 等对环境有害的气体。

## 3 纳米氧化铝制备方法的组合与创新

由于传统的制备方法均或多或少存在一定的缺点,近几年来,科研工作者不断组合和创新原有的制备方法,制备工艺得到不断完善和提高。

### 3.1 制备方法的组合

#### 3.1.1 与溶胶法的组合

溶胶凝胶法是近几年来最受研究者青睐的纳米氧化铝制备方法,在此方法的基础上研究人员不断进行改进并应取得了一定的进展。

(1)溶胶-凝胶-自蔓延法。溶胶-凝胶自蔓延技术相比于其他制备纳米粒子方法,具有颗粒分散均匀、颗粒粒径可控、设备简单、高效环保、易于工业化等优点。朱雁凤等<sup>[23]</sup>采用该法用硝酸铝与柠檬酸作为反应物,在超声条件下生成Al-柠檬酸溶胶后,置于已预热



至 600 ℃ 的马弗炉中, 柠檬酸作为燃料自燃直到干凝胶粉末燃烧完, 即可制得颗粒尺寸为 20~30 nm 的  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体。由于也作为还原剂的柠檬酸与金属硝酸盐发生的氧化还原反应在短时间放出大量热, 能直接得到纳米级粒子, 纳米粒子夹杂在未分解完全的有机物中, 进一步热处理可得到团聚少、颗粒小粉体。

(2) 溶胶凝胶-静电纺丝工艺法。静电纺丝工艺是在外力作用下, 将聚合物溶液或金属纺成理想尺寸的纤维。这种工艺可避免溶胶凝胶法后续陈化、烘干过程中带来的团聚影响, 而受到科学界的较多关注。目前  $\text{CeO}_2$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  等纳米纤维都已通过此法制备出<sup>[24-26]</sup>。Tang 等<sup>[27]</sup>先将异丙醇铝溶液、硝酸和乙酸乙酯混合, 在 85 ℃ 磁力搅拌 16 h 制备出  $\text{Al}(\text{OOCCH}_3)_3$  凝胶, 然后将凝胶与 PVA 溶液混合, 在室温条件下进行静电纺丝, 纺丝纤维经 1000 ℃ 煅烧制得了平均粒径 30~90 nm, 狭长度大于 1000 的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维。Yang 等<sup>[28]</sup>曾报道过在氧化铝纳米纤维上引入特定官能团可有效吸附水中  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  等重金属元素。这种高狭长度、大比较面积的纳米纤维若用于水处理, 一定可以起到更佳高效去除作用。

(3) 无水解溶胶凝胶法。早在 90 年代初, Viouxb<sup>[29]</sup>提出了一种新的无水解溶胶凝胶法, 即溶胶不经过金属醇盐水解而是由反应物的聚合直接转变为凝胶。 $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  等这些在水溶液或低温下很难合成的物质都通过广义无水解溶胶凝胶法制备成功<sup>[30-32]</sup>。Acosta 等<sup>[33]</sup>采用此法制备出氧化铝, Zhou 等<sup>[34]</sup>对此法进行改进, 采用廉价的铝粉代替铝醇盐, 碘为催化剂, 通过控制 PEG600 用量创新性地以无水解溶胶凝胶法制备了分散性较好的纳米  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 颗粒粒径为 100 nm。

### 3.1.2 与其他方法组合

反应物在不同状态下制备均有自己独有优点, 将不同状态进行组合, 如气液态、液固态相结合, 研究者也取得了一定的成果。

①爆轰-沉淀法。沉淀法制备的氧化铝前驱体要通过烧结才能得到纳米氧化铝, 但烧结过程中颗粒会进一步团聚。为避免这一现象发生, 王立成<sup>[35]</sup>将沉淀法制得的前驱体  $\text{Al}(\text{OH})_3$  与黑索金混合制成炸药, 在爆轰装置中引爆, 短短几分钟就可制成平均粒径 50 nm 的氧化铝, 而且随着改变氢氧化铝与黑索金的比例, 可以爆轰出不同成分、规则球形的纳米  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体。另外该实验中加入硼酸作为粘合剂, 有利于改善团聚。此方法可以大大节省烧结时间, 缩短制备工艺周期同时避免烧结带来的再次团聚, 但爆轰过程中的引入的碳原子无法除去, 影响产物纯度。②溶液燃烧合成法。此法

无需加入分散剂, 也无一般液相法陈化、纯化和离心工艺处理, 更不要求高温高压等条件, 便可制备出粒径分布狭窄的纳米级氧化铝颗粒, 节约时间和成本。Farahmandjou 等<sup>[36]</sup>采用溶液燃烧合成法, 在 100 ℃ 下, 将燃料甘氨酸溶于九水合硝酸铝溶液中, 控制 pH 维持在一定范围, 蒸发 3 h, 合成氧化铝前驱体颗粒, 在 1000 ℃ 煅烧后生成粒径 80 nm 的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

### 3.2 制备原料、方法及途径的创新

近年来, 随着研究的不断深入, 科研工作者不断创新制备纳米氧化铝的原料、方法和途径, 希望能满足工业发展的要求。

Ansari 等<sup>[37]</sup>首次使用柠檬草叶子提取液制备纳米氧化铝粉体。该方法以柠檬草叶子提取液与硝酸铝为原料, 在微波辅助下反应, 得到粒径范围在 9~180 nm 的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。该方法无需陈化、洗涤、烧结等过程, 极大的节省了反应时间和工序, 清洁无毒, 节约能源。细胞实验如图 3 所示, 表明这种纳米氧化铝粉体对绿脓杆菌有很强的杀菌作用, 有望在制药和生物医学方面得到应用。

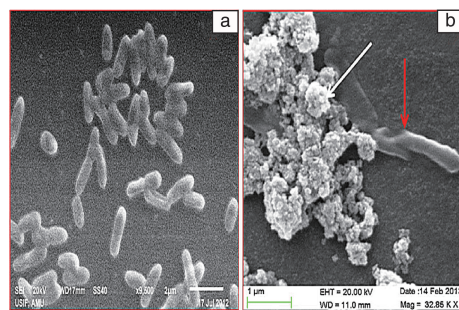
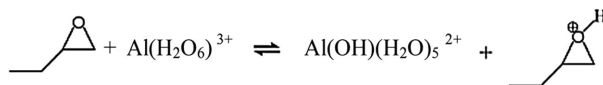


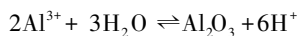
图 3 纳米氧化铝粉体处理前(a)后(b)绿脓杆菌细胞的 SEM 照片<sup>[37]</sup>

Fig. 3 SEM images of the untreated control *P. aeruginosa* cells (a) and the cells treated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -NPs (b)<sup>[37]</sup>

Poursani 等<sup>[38]</sup>利用 1, 2-环氧丁烷作为凝胶过程前体物, 不经过溶胶, 直接产生凝胶的新方法制备出纳米  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。与传统溶胶-凝胶方法相比, 只需要凝胶就可以形成颗粒均一、形状规则的产物, 工艺省去溶胶及陈化的大量时间, 大大提高了制备效率。工艺步骤如图 4 所示。其中, 环氧丁烷作为酸清除剂被加入, 目的是消除水合铝中的质子, 反应式如下:



而逐渐加入的水起到凝胶剂的作用, 反应式如下:



经试验表明, 该纳米结构的氧化铝对清除水中的重金属 Cr 和 Pb 具有良好的能力, 有望在废水处理中得到应用。

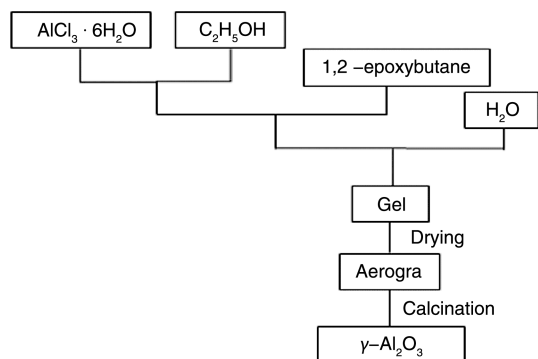


图4 凝胶法制备纳米  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  示意图<sup>[38]</sup>

Fig. 4 Schematic for preparing  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles by gelation method<sup>[38]</sup>

Li 等<sup>[39]</sup>采用硝酸、柠檬酸和异丙醇铝为原料, 以脂肪醇聚氧乙烯醚 (AEO-7) 与 (环氧烷) 嵌段共聚物 (P123) 为模板, 经蒸发诱导自组合法制备出纳米晶体  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体。该粉体除具有一定的热稳定性外, 还可通过改变模板物的用量调节其孔径、比表面积的结构, 加入一定量的 AEO-7 可制得孔尺寸为 1~2 nm 的超微孔氧化铝材料, 降低 AEO-7 含量微孔增大到 2 nm 以上; 而改变 P123 的用量则可改变该材料的比表面积, 最大达到 650  $\text{m}^2/\text{g}$ 。这些特性使其在高温催化反应物中具有显著优势, 有望在催化工业上得到广泛应用。

Itoh 等<sup>[40]</sup>利用多羟基化合物合成了粒子尺寸从纳米到微米级可控的氧化铝。他们将六水合硝酸铝和 PVP 溶于乙二醇中进行回流反应, 由于反应过程中会产生棕褐色的  $\text{NO}_x$  气体, 所以前驱体也为深棕色的凝胶, 洗涤烧结后最终生成白色的氧化铝粉末。控制 PVP 的分子量和回流温度可以控制氧化铝颗粒的尺寸,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  二次形核颗粒的粒径范围为 142~1000 nm。

升华方法是将冷冻干燥法中冰升华的过程独立出来, 只利用冰升华的过程制备出纳米粒子和纳米结构。当含有较低浓度盐的冰在真空中升华时, 析出的盐颗粒会自组织形成纳米粒子, 这些纳米粒子又进一步形成一定的纳米结构<sup>[41]</sup>。丁颖颖<sup>[42]</sup>将一定浓度的硫酸铝溶液用液氮迅速冷冻成冰, 通过升华方法制备出了絮状疏松的硫酸铝现状结构, 再煅烧, 经过相转变得到长度为 30~50 nm 的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米棒。由于这些纳米棒整体上是自然均匀分布, 可一定程度增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的韧性, 为进一步制备韧性氧化铝创造了条件。

## 4 结 语

纳米氧化铝, 尤其是  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 不仅广泛用于陶瓷、研磨介质等方面, 而且在生物医药、快离子导体复合材料、湿敏性传感器、催化剂及载体、汽车尾气和水净化等方面得到了广泛的应用, 越来越成为现代工业不可或缺的重要材料。目前, 虽然多数制备方法还在实验室研究阶段, 并且存在成本高、产率低、条件苛刻等问题, 但通过科研工作者的不断努力和努力, 制备纳米氧化铝的方法已向工艺简化、成本降低、效率提高、清洁绿色的方向发展, 相信随着技术的逐渐成熟, 一定会发展出满足各种工业需求的制备方法, 纳米氧化铝在工业应用领域也会不断拓展。

## 参考文献 References

- [1] Mallakpour S, Khadem E. *Progress in Polymer Science*[J], 2015, 51: 74-93.
- [2] Kathirvel P, Chandrasekaran J, Manoharan D, et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 590: 341-345.
- [3] Ianoş R, Lazău I, P-curariu C. *Journal of Materials Science*[J], 2009, 44(4): 1016-1023.
- [4] Bleta R, Alphonse P, Pin L, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2012, 367(1): 120-128.
- [5] Wang W, Zhang K, Yang Y, et al. *Microporous & Mesoporous Materials*[J], 2014, 193: 47-53.
- [6] Al-Bayer R, Zihlif A, Lahlouh B, et al. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*[J], 2013, 24(8): 2866-2872.
- [7] Akarmazyan S S, Panagiotopoulou P, Kambolis A, et al. *Applied Catalysis B Environmental*[J], 2014, 145(1): 136-148.
- [8] Tvarit P, Supratim S, Bhattacharya D, et al. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*[J], 2013, 52(15): 1557-1565.
- [9] Lu Fuling (路富亮). *Dissertation for Master (硕士学位论文)* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012: 44.
- [10] Han Yun (韩芸), Lin Jinhui (林金辉), Shan Chuansheng (单传省). *China Nonmetallic Minerals Industry (中国非金属矿工业导刊)* [J], 2011, 4: 17.
- [11] Zhai Xiujing (翟秀静), Fu Yang (符岩), Wang Jie (王杰), et al. *China Powder Industry (中国粉体工业)* [J], 2007, 4: 12-16.
- [12] Kathirvel P, Chandrasekaran J, Manoharan D, et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2014, 590(2): 341-345.
- [13] Du X, Zhao S, Liu Y, et al. *Applied Physics A*[J], 2014, 116(4): 1963-1969.
- [14] Li Xinxing (李新星), Wang Hongxia (王红侠), Yu Renhong (于仁红), et al. *Materials Review (材料导报)* [J], 2014, 28(11): 80-84.
- [15] Wang Zhou (王舟), Shen Xiangqian (沈湘黔), Li Donghong (李东红), et al. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society (硅酸盐通报)* [J], 2014, 33(9): 2346-2350.
- [16] Zha Xiangyi (查湘义). *Technology Innovation and Application (技术创新)*

- 新与应用)[J], 2014, 1: 17.
- [17] Lan Weixing(兰伟兴), Xue Rujun(薛茹君), FangJun(方俊), *et al. Light Metals(轻金属)*[J], 2012, 1: 20-23.
- [18] Janhavi J S, Hassanb P A, Jayarama R V. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*[J], 2010, 370: 64-71.
- [19] Nagarajan R. *Langmuir*[J], 2000, 16: 6400-6415.
- [20] Zhang Huiyong(张慧勇). *Henan Chemical Industry(河南化工)*[J], 2014, 31: 37-39.
- [21] Farahmandjou M, Golabiyan N. *Journal of Ceramic Processing Research* [J], 2015, 16(2): 1-4.
- [22] Yan T, Guo X, Zhang X, *et al. Materials Research Bulletin*[J], 2016, 73: 21-28.
- [23] Zhu Yanfeng(朱雁风), Liu Weiliang(刘维良), Wu Anhua(武安华), *et al. Journal of Synthetic Crystals(人工晶体学报)*[J], 2013, 42(1): 172-176.
- [24] Yang X H, Shao C L, Liu C Y, *et al. Thin Solid Films*[J], 2005, 478: 228-231.
- [25] Dharmaraj N, Kim C H, Kim K M, *et al. Acta A*[J], 2006(64): 136-140.
- [26] Jaba M, Monoj G, Rajendra K, *et al. RSC Advances*[J], 2013(3): 7591-7600.
- [27] Tang X, Yu Y. *Ceramics International*[J], 2015, 41(8): 9232-9238.
- [28] Yang D, Paul B, Xu W, *et al. Water Research*[J], 2009, 44(3): 741-50.
- [29] Corriu R, Leclercq D, Leféver P, *et al. Chemistry of Materials*[J], 1992(4): 961-963.
- [30] Joo J, Kwon S G, Yu G H, *et al. Advanced Materials*[J], 2005, 17: 1873-1877.
- [31] Deng Z, Wang C, Li Y. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2004, 85(11): 2837-2839.
- [32] Joo J, Kwon S G, Yu T, *et al. Journal of Physical Chemistry B*[J], 2005, 109(32): 15297-302.
- [33] Acosta S, Corriu R J P, Leclercq D, *et al. Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 1994, 170(3): 234-242.
- [34] Tong Q Z, Ting C, Wei H J, *et al. Advanced Materials Research*[J], 2015(1104): 3-8.
- [35] Wang Licheng(王立成). *Dissertation for Master(硕士论文)*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 50.
- [36] Farahmandjou M, Golabiyan N. *Transport Phenomena in Nano and Micro Scales*[J], 2015, 3(2): 100-105.
- [37] Itoh T, Uchida T, Matsubara I, *et al. Ceramics International*[J], 2015, 41(3): 3631-3638.
- [38] Poursani A S, Nilchi A, Hassani A H, *et al. International Journal of Environmental Science & Technology*[J], 2015, 12(6): 003-2014.
- [39] Li Y, Su J, Ma J. *Materials Letters*[J], 2015, 153: 165-167.
- [40] Ansari M A, Khan H M, Alzohairy M A, *et al. World Journal of Microbiology & Biotechnology*[J], 2015, 31(1): 153-164.
- [41] Chen H Y, Dong S S, Li D M, *et al. Physics Letters A*[J], 2003, 312(1): 97-100.
- [42] Ding Yingying(丁颖颖). *Dissertation for Master(硕士论文)*[D]. Jilin: Jilin University, 2013: 47.

(编辑 吴琛)