

# Research on the Characteristics and Sintering Mechanisms of $Y_2O_3$ -Ceramic

Shuiqing Xiao<sup>1,2</sup>, Haoliang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Business College, Zhanjiang Normal University, Zhanjiang

<sup>2</sup>Faculty of Electromechanical and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou  
Email: xn178@126.com

Received: Jun. 26th, 2012; revised: Jul. 13th, 2012; accepted: Jul. 20th, 2012

**Abstract:** This paper reviewed the optical, thermodynamics properties and application of yttrium oxide, summarized the success sintering methods of nanoceramics, introduced four ways about sintering yttrium oxide ceramics particularly, such as the principles of vacuum sintering (VS), hot pressing sintering (HP), hot isostatic pressing sintering (HIPS) and gas pressing sintering (GPS). In addition, it introduced another important role of  $Y_2O_3$  which is sintering additive.

**Keywords:**  $Y_2O_3$ ; Yttrium Oxide; Yttrium Oxide Ceramics; Sintering Mechanism; Nano Ceramic

## $Y_2O_3$ 的特性及其陶瓷烧结机制研究

肖水清<sup>1,2</sup>, 李毫亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湛江师范学院商学院, 湛江

<sup>2</sup>广东工业大学机电工程学院, 广州  
Email: xn178@126.com

稿日期: 2012年6月26日; 修回日期: 2012年7月13日; 录用日期: 2012年7月20日

**摘要:** 综述了氧化钇的光学、热力学性能及其应用, 介绍了纳米陶瓷的烧结方法, 其中详细介绍目前常用的氧化钇透明陶瓷的四种烧结方法: 真空烧结、热压烧结、热等静压烧结和气氛压力烧结方法的烧结原理。另外, 还介绍了氧化钇作为烧结助剂的另一重要作用。

**关键词:**  $Y_2O_3$ ; 氧化钇; 氧化钇陶瓷; 烧结机制; 纳米陶瓷

### 1. 引言

近年来, 国内外对稀土的应用研究不断深入, 而氧化钇作为一种重要的稀土氧化物原料, 在新材料特别是功能材料研究方面发挥重要的作用, 因而人们也从不同方面对氧化钇进行相关的研究。

氧化钇属于立方晶系, 具有优良的耐热、耐腐蚀和高温稳定性, 介电常数高、透明性好、在红外和远红外区具有较高的直线透过率, 是一种优良的透明陶瓷材料和红外材料, 主要用于红外导弹的窗口和整流罩、天线罩、微波基板、绝缘支架、红外发生器管壳、

红外透镜及其他高温窗等。以氧化钇为主要原料可以制取用于医疗领域的激光晶体, 用于通讯领域的微波磁性材料等; 添加  $Nd^{3+}$ 、 $Eu^{3+}$  等稀土元素的氧化钇透明陶瓷还可作为荧光材料及固体激光器的工作物质。氧化钇粉末不仅是一种重要的功能陶瓷材料, 还是一种应用广泛的结构陶瓷材料: 用超细氧化钇稳定氧化锆粉可烧结成高强度高韧性的陶瓷, 在超重力下采用自挤压辅助烧结技术, 可制出低缺陷、大体积的  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ ( $Y_2O_3$ ) 共晶陶瓷等等。鉴于以上优点和广阔的应用前景, 氧化钇粉末、氧化钇复合粉末的制备和烧结机制引起很多学者的重视。

## 2. 氧化钇的特性及应用

氧化钇(英文名称: yttrium oxide; yttria)是白色略带黄色粉末,熔点为 2430℃,属于立方晶系,具有优异的光学、热学等物理化学性能。氧化钇粉末是一种重要的陶瓷原料,也是荧光粉末中应用较多的稀土氧化物之一。氧化钇具有优良的耐热、耐腐蚀和高温稳定性,可制成性能优良的多晶陶瓷材料,还可作为陶瓷颜料、玻璃着色剂以及添加剂等,生产许多功能材料<sup>[1-3]</sup>。

### 2.1. 光学性能及应用

氧化钇因钇元素的 4f 电子具有众多可发射可见光的能级而堪称理想的荧光材料<sup>[4]</sup>。若以 Eu<sup>3+</sup>作为发光中心,通过稀土激活的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>是一类重要的红色发光材料。目前,发光材料制备方法较多,诸如高温固相法、化学共沉淀法、溶胶-凝胶法、燃烧合成法、水热合成法、微波辐射法和超声波下的均匀沉淀法等。湖南稀土金属材料研究院的王延琦等通过正交试验,用微波辐射法制备了性能优良的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>红色荧光粉<sup>[5]</sup>;廖金生<sup>[6]</sup>等人用水热法制备出比商用荧光粉寿命更长的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>荧光粉;此外,许多学者不断研究开发出新配制方法,制备氧化钇类荧光材料<sup>[7-9]</sup>。利用 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米晶的低声子能量,在其中掺入三价稀土离子(Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>、Ln<sup>3+</sup>等),可以实现并提高材料的转换发光效率。此类材料在用于转换激光、显示材料、温度传感器、生物荧光标签、DNA 检测、太阳能电池和肿瘤治疗等方面有巨大应用潜力<sup>[8-10]</sup>。

自从 1962 年 Cobel 制备出透明氧化铝以来<sup>[11,12]</sup>,透明陶瓷材料的研究与应用得到迅速发展。其中,以 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为一种新型激光工作物质的多晶陶瓷的研究最多,Nd:YAG 透明陶瓷的制备可以采用固相反应法、溶胶-凝胶法、喷雾干燥法、沉淀法、低温燃烧法等多种合成方法,目前主要采用真空烧结法来制备多晶 Nd:YAG 陶瓷<sup>[13-19]</sup>。以 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为基质,也有掺杂其他元素(Yb<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>、C、Ho<sup>3+</sup>)而制得不同性能的多晶透明陶瓷<sup>[20-23]</sup>。

### 2.2. 热、力学性能及其应用

用氧化钇作稳定剂的单相四方多晶氧化锆材料具有最佳的室温力学性能,其断裂强度高达 2.5 Gpa,

断裂韧性超过 15 Mpa·m<sup>1/2</sup>;用氧化钇超细粉末稳定的四方多晶氧化锆陶瓷(Y-TZP)是一种重要的增韧陶瓷<sup>[4]</sup>。通过添加微量氧化钇到不同合金中,可得到较高抗弯强度的材料<sup>[24]</sup>。添加约 2 mol%氧化钇超细粉的 Mg-PSZ 在 1100℃热处理 800 h,仍然表现良好的力学性能,其断裂强度和韧性最高分别可达 671 Mpa 和 15.27 Mpa·m<sup>1/2</sup>;另外, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 还具有优良的耐高温耐腐蚀性,通常将氧化钇超细粉涂在坩埚表面,保护在恶劣工作条件下的主要耐火材料(通常是 ZrO<sub>2</sub>)<sup>[25,26]</sup>,提高其抗高温氧化能力。另外,浸渍纳米氧化钇的材料显气孔率降低,可提高材料的耐腐蚀性。

### 2.3. 烧结助剂

大量研究结果表明:掺入微量的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在烧结过程中,可以有效地降低纳米粉体的晶粒尺寸,并能改善粉末的分散度,降低烧结温度,提高烧结速度,还可实现材料的近全致密化。今年,赵冉<sup>[27]</sup>等人研究了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 陶瓷烧结的作用,添加少量的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 起到烧结助剂的作用,当添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的摩尔分数大于某一域值时,陶瓷的相对密度就降低了,所以若要掺杂的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 起烧结助剂的作用,掺入量是有一个范围的。

## 3. 氧化钇陶瓷的烧结

### 3.1. 纳米陶瓷烧结

烧结是陶瓷材料致密化、晶粒长大、晶界形成的过程,是陶瓷制备过程中最重要的阶段<sup>[28]</sup>。纳米陶瓷的烧结与普通陶瓷的烧结不同,普通陶瓷烧结一般不必过分考虑晶粒的长大,而纳米陶瓷烧结则必需控制其晶粒的长大,同时要使纳米粉体迅速致密化。由于纳米粉体具有巨大的比表面积,较高的表面活化能而使纳米陶瓷的烧结表现为烧结温度低、烧结初期变短的特点。这样,普通陶瓷的烧结方法难以控制晶粒长大,且影响到纳米陶瓷的独特性能,因此,必须采用特殊的烧结方法烧结纳米陶瓷。

纳米陶瓷烧结主要分为气相、固相、液相和活化液相烧结四种类型;如果考虑烧结的影响因素,例如:温度、时间、压力、粒度和添加剂等的影响,具体可以采用放电等离子烧结(SPS)、预热粉体爆炸烧结法、热等静压烧结、微波烧结、激光选择烧结、热压烧结、

气氛压力烧结、无压烧结、超高压烧结、原位加压成型烧结等等。

### 3.2. 氧化钇陶瓷烧结

氧化钇(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)陶瓷是一种具有优异物理化学性能的材料,例如耐热、耐腐蚀、透光性好、熔点高(达2430℃),在红外装置、高温实验用装置及电子元件等方面均有多种用途。例如用于红外制导导弹的窗口和整流罩、天线罩、微波基板、红外透镜、红外发生管及其它高温窗口等<sup>[29,30]</sup>。在添加了Nd<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>和Eu<sup>3+</sup>等稀土元素后,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷还可作为激光器和闪烁晶体的基质材料<sup>[30-34]</sup>。此外,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>还可作为烧结助剂,Y<sup>3+</sup>能够进入晶格,增大晶格常数,掺杂适量的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,可以降低烧结温度<sup>[35]</sup>,抑制晶粒长大,从而起到烧结助剂作用。当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为烧结助剂时,运用何种烧结方法主要取决于基质物质特性。例如:黄晓巍<sup>[36]</sup>用液相烧结方法制备了氧化铝和3%氧化钇稳定四方氧化锆复相材料,赵青等<sup>[37]</sup>用微波烧结方法制备8 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>掺杂ZrO<sub>2</sub>(8YSZ)陶瓷;毛豫兰等<sup>[38]</sup>用常压烧结方法制备氮化硅-氧化镁-氧化钇陶瓷;杜学丽等<sup>[39]</sup>用SPS烧结方法制备了掺杂Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的AlN陶瓷;黄小丽等<sup>[40]</sup>用热压烧结与常压烧结方法制备了掺杂CaO-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的AlN陶瓷等等。

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>是透明陶瓷的主要材料,而Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷的透光性不仅取决于其化学成分和晶系等内在因素,还与烧结体的组织结构有密切的关系,即烧结体内的微气孔、晶界散射、晶粒尺寸及其均匀度对陶瓷的透光有很大的影响。而烧结体的特性不仅与粉体的性能有关,更与烧结工艺密切相关<sup>[19]</sup>。目前,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷的烧结方法主要报道的有热等静压<sup>[41]</sup>、真空烧结、热压烧结、氢气气氛烧结(干氢、湿氢)等。其致密化机理可以概括为纯固相高温烧结、液相烧结/瞬时液相

烧结、压力辅助烧结和固溶活化烧结。为了提高Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷的光学质量和降低烧结温度,往往将几种烧结方法联合使用。

关于Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷烧结方法及原理分别简要介绍如下:

#### 1) 真空烧结(Vacuum Sintering, VS)

真空烧结的基本原理是:利用真空烧结炉的真空技术,有效控制炉内气氛,通过预热、排气、真空、加温、降温和进气等过程,设置出相应的温度和气体控制曲线,从而实现致密化烧结的全过程。真空烧结技术在硬质合金制备技术中得到广泛应用。何庭秋等人先采用真空烧结方法,后再经过热等静压,有效地排除影响陶瓷透明的因素(微气孔、非主晶相、杂质),成功烧结制得相对密度为99.99%,红外平均透过率达72%的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nd透明陶瓷<sup>[19]</sup>。何庭秋等人烧结的透明陶瓷的表面及断面SEM图如图1所示,从图中(a)可以看出,真空烧结形成的烧结体,其晶粒大小均匀、形状为规则多边形,尺寸在30~50 μm之间,晶界几乎没有微气孔,这样的微观结构有利于陶瓷的透明;从图中(b)可以看出,烧结体晶粒之间结合紧密,晶界较窄,且干净清晰,是利于陶瓷透明的。实验烧结得到结果样品如图2所示。

罗军明等人以氧化钇为基质材料,掺不同含量的Er<sup>3+</sup>,采用共沉淀法制备出性能良好的Er<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米粉,在温度为1700℃,真空度为1×10<sup>-3</sup> Pa下烧结8 h,得到相对密度为99.8%的Er<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>透明陶瓷<sup>[20]</sup>。

#### 2) 热压烧结(Hot-Pressing, HP)

热压烧结是一种机械加压的烧结方法,此法是把陶瓷粉末装在模腔内,在加压的同时将粉末加热到烧成温度,由于从外部施加压力而补充了驱动力,因此可在较短时间内达到致密化,并且获得具有细小均匀晶粒的显微结构。其原理如图3所示。

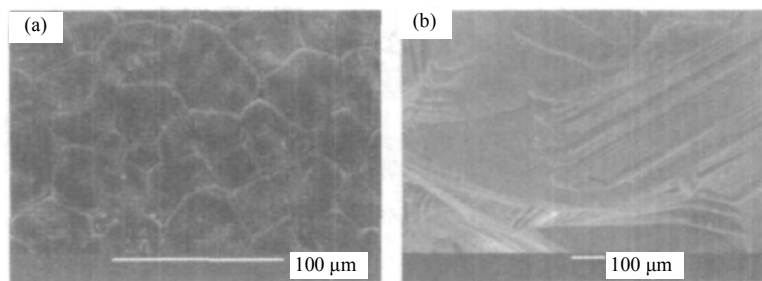


Figure 1. SEM micrograph of surface (a) and section (b) of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nd transparent ceramics  
图 1. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nd 透明陶瓷的表面(a)其断面(b)的 SEM 图

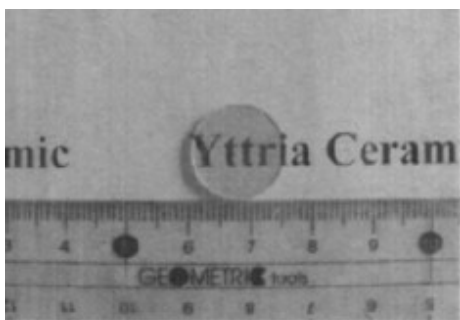


Figure 2. Photograph of transparent ceramics sample  
图 2. 透明陶瓷样品照

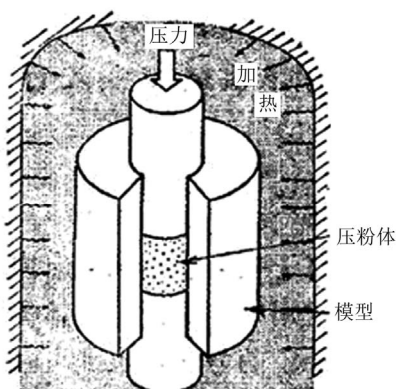


Figure 3. Hot-pressing sintering schematic diagram  
图 3. 热压烧结示意图

热压烧结分真空热压烧结、气氛热压烧结、连续热压烧结等。与常压烧结相比，其烧结温度低得多，而且烧结体中气孔率也低。热压烧结致密化的机理是扩散和颗粒间的塑性滑移。在材料的烧结过程中，粉体颗粒在颗粒表面能作用下和外在压力作用下存在扩散现象；在外力作用下颗粒间产生滑移，气孔被“压碎”，从而迅速致密化。另外，热压烧结还可以提高制品的性能，例如透明性、电导率、力学性能以及使用可靠性。但热压烧结通常只能制造形状单一的产品，在很多情况下后期加工会大大增加制造成本。尽管如此，经过 40 多年的发展，热压烧结已经从单纯的实验室研究走向广泛的工业应用，已成为一种技术成熟而重要的烧结工艺。

热压烧结的特点：a) 热压烧结由于加热加压同时进行，粉料处于热塑性状态，有助于颗粒的接触扩散、流动传质过程的进行，因而成型压力仅为冷压的 1/10；b) 还能降低烧结温度，缩短烧结时间，从而抵制晶粒长大，得到晶粒细小、致密度高和机械、电学性能良好的产品；c) 无需添加烧结助剂或成型助剂，可生产

超高纯度的陶瓷产品。

热压烧结的缺点是过程及设备复杂，生产控制要求严，模具材料要求高，能源消耗大，生产效率较低，生产成本高。近年来，使用热压烧结方法制备高强度的陶瓷例子有：氧化铝、铁氧体、碳化硼、氮化硼等工程陶瓷，还有诸如 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之类的高强度复合陶瓷。李喜坤<sup>[42]</sup>等人采用热压烧结方法在热压温度为 1650℃、压力为 35 Mpa，保温时间为 30 min 时制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN-0.2%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合陶瓷，其抗弯强度、断裂韧性及硬度分别达到最大值 1015 Mpa，6.89 Mpa·m<sup>-1/2</sup> 和 20.82 Mpa。

热压烧结的典型应用主要有：a) 陶瓷刀头的烧结。日立公司的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷刀具的烧结工艺是采用温度为 1580℃，20 min，30 MPa 的热压烧结；美国 Iscar 公司生产的 S-8 牌号刀具 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 是用 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等作为主要成分，经用热等静压烧结法而获得接近理论密度；b) 强共价键陶瓷的烧结。B<sub>4</sub>C、SiC、TiB<sub>2</sub>、ZrB<sub>2</sub> 等都属强共价键陶瓷，常压烧结致密化很困难，而 HfB<sub>2</sub>、TaC 材料烧结更加困难。白克武等人(1994)研究表明，当热压温度和压力分别为 2000℃~2100℃ 和 30~55 MPa 时，B<sub>4</sub>C 烧结体晶粒尺寸均匀，为 3~5 μm，相对密度为 92%~98% TD，抗弯强度为 400~500 MPa；c) 晶须或纤维增强的复合陶瓷。目前，陶瓷基复合材料中常用弥散的颗粒、晶须、纤维作为第二相，无压烧结很难实现致密化，而热压烧结有助于这种复合体系的致密化。所以几乎所有的碳化硅晶须增韧增强氧化铝或氮化硅陶瓷都是采用热压方法生产的，大部分的纤维复合材料也需要采用热压烧结；d) 透明陶瓷的烧结。通过热压烧结可以获得接近零气孔率的陶瓷产品，同时也是制备透明陶瓷的一种有效工艺。采用热压烧结已成功地获得氧化物透明陶瓷有 MgO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、镁铝尖晶石(MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)、钇铝石榴石(YAG)等。

### 3) 热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)烧结

热等静压烧结是一种成型和烧结同时进行的方法，它的基本原理是：以高压气体为压力介质，使材料(粉末、素坯或烧结体)在加热过程中经受各向均衡的压力，借助于高温和高压的共同作用促进材料致密化<sup>[28]</sup>。

热等静压最早是在 1955 年由美国 Battelle Columbus 实验室首先研制成功，随后瑞典的 ASEA 公

司, 美国的 ABB 公司生产出商业用热等静压设备。从 20 世纪 60 年代开始, 热等静压技术已在粉末冶金领域得到应用, 70 年代后开始应用于现代陶瓷烧结领域。由于热等静压烧结的产品密度均匀, 机械性能优异, 且各向同性, 现已成为高性能陶瓷制品的常用烧结方法。

热等静压烧结技术可分为包套式热等静压与非包套式热等静压二种。包套式热等静压烧结是指陶瓷粉末可预成型后的陶瓷素坯被置于不透气的封装材料内, 然后在高温高压条件下的致密化过程。非包套式热等静压烧结又称热等静压后处理工艺(post-HIP), 或常压烧结加 HIP。非包套式热等静压烧结技术是将经常压烧结后, 不含连通和开口气孔的陶瓷烧体直接放入炉膛进行热等静压, 从而减少烧体体内剩余气孔的数量和尺寸, 或消除气孔, 甚至愈合裂纹。例如: 当陶瓷刀片坯体密度大于 93% 时, 开口气孔基本完全消除, 可在坯体表面自然形成包套, 因此刀片坯体可直接置于热等静压烧结炉内进行处理。在处理过程中, 以氮气作为加压介质, 加压 150 MPa, 升温至 1650°C, 保温 1 h, 随炉冷却, 经 HIP 处理后, 刀片的密度可达理论密度的 99.5% 以上。

与普通的无压烧结和单向热压烧结相比, 热等静压具有如下优点: 降低烧结温度和缩短烧结时间; 减少或不使用烧结助剂; 提高陶瓷性能和可靠性; 便于制造复杂形状产品。

#### 4) 气氛压力烧结(Gas Pressure Sintering, GPS)

气氛压力烧结是指陶瓷在高温烧结过程中, 施加一定的气体压力, 通常为 N<sub>2</sub>, 压力范围在 1~10 MPa, 以便抑制在高温下陶瓷材料的分解和失重, 从而可提高烧结温度, 进一步促进材料的致密化, 获得高密度的陶瓷制品。

不同的材料选择适宜的气氛烧结, 有助于烧结过程, 提高制品致密化程度、获得良好的性能的制品。常用的有真空、氢、氧、氮和惰性气体(如氩)等各种气氛。例如透明氧化铝陶瓷、氧化钇透明陶瓷就可用氢气气氛烧结, 透明铁电陶瓷宜用氧气气氛烧结, 氮化物陶瓷如氮化铝等宜用氮气气氛烧结。

与热压、热等静压烧结工艺比较, 气压烧结工艺最大的优势是可以以较低的成本制备性能较好, 形状复杂的产品, 并实现批量化生产。近 30 年来, 气氛

压力烧结工艺在日本、美国、德国、英国和中国等国家都得到较为广泛的研究, 烧结材料的范围也不断扩大, 在实际应用上也取得了很大进展, 现已成为高性能陶瓷材料的一种重要烧结技术。

## 4. 小结与展望

近年来, 随着科技进步, 高科技机械设备的产生, 为纳米技术、纳米陶瓷烧结研究提供优越条件。纳米陶瓷粉体制备方法也日益完善, 纳米陶瓷烧结机制(如烧结时颗粒动力学、热力学等)也渐已明朗, 随着设备成本的降低, 部分纳米陶瓷及器件逐渐由军工应用转向民用, 这是可喜可贺现象。鉴于篇幅问题, 本文只简要介绍关于氧化钇陶瓷的几种常用烧结机制, 至于应该运用何种方法烧结, 应该就不同材料与不同目标要求而运用不同的烧结方法。

氧化钇具有优良的耐热、耐腐蚀和高温稳定性, 介电常数高、透明性好、在红外和远红外区具有较高的直线透过率, 是一种优良的透明陶瓷材料和红外材料, 以氧化钇为主要原料可以制取用于医疗领域的激光晶体, 用于通讯领域的微波磁性材料等; 添加 Nd<sup>3+</sup>、Eu<sup>3+</sup>等稀土元素的氧化钇透明陶瓷还可作为荧光材料及固体激光器的工作物质。氧化钇粉末不仅是一种重要的功能陶瓷材料, 还是一种应用广泛的结构陶瓷材料。这样, 如果氧化钇陶瓷得到广泛应用将产生巨大市场经济效果。因此, 很有必要进行大量试验, 运用不同的烧结方法来探索研究氧化钇陶瓷的烧结机制与行为, 或者研究氧化钇作为烧结助剂的烧结行为, 寻求最优的烧结方法, 以便将科学技术转化生产力。也就是说, 研究氧化钇的相关烧结机制, 运用现代化的新工艺, 用什么样的烧结制备技术烧结得到优质的氧化钇陶瓷产品将是人们今后研究的新热点与重点。

## 参考文献 (References)

- [1] 李玉生, 郭贵宝等. 熔融法氧化钇纳米粉体的制备及表征[J]. 稀土, 2009, 30(10): 15-18.
- [2] M.-H. Weng, T.-J. Liang. Fabrication of mono block ceramic bandpass filters with attenuation poles. *Micro-Wave and Optical Technology Letters*, 2002, 32(6): 400-402.
- [3] 涂铭旌, 刘颖, 朱达川. 纳米稀土材料的研究进展[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(4): 1-4.
- [4] 赵鹏. 氧化钇烧结行为研究[D]. 东北大学, 2008.
- [5] 王延琦, 刘宇晖等. 微波辐射法制备 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>红色荧光粉[J]. 稀有金属与硬质合金, 2011, 39(1): 36-38.

- [6] 廖金生, 徐鹏等. 水热法制备 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu 及其发光性能的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2010, 10(1): 30-33.
- [7] 司伟, 高宏等. 纳米晶 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>的合成及其热分析动力学[J]. 无机化学学报, 2010, 26(8): 1443-1449.
- [8] 李渝, 尹剑波, 赵晓鹏. 两步法制备单分散的 Li 掺杂 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>微球及其发光性能[J]. 功能材料, 2011, 42(2): 336-338.
- [9] 王能利等. 低温凝胶燃烧法合成 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>纳米晶上转换发光材料[J]. 无机化学学报, 2011, 27(4): 619-624.
- [10] 王晓纯等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>的共沉淀法制备和 PH 值对发光性质的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 612-616.
- [11] 林健健等. 微乳液法制备 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米陶瓷粉体及性能表征[J]. 山东轻工业学院学报, 2010, 24(1): 6-9.
- [12] J. A. Eaatman, Y. X. Liao and A. Narayanasamy. Processing of advanced ceramic. Pittsburgh: Materials Research Society, 1987: 320-330.
- [13] 罗军明等. 共沉淀法合成 Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米粉及透明陶瓷的性能[J]. 无机化学学报, 2008, 24(2): 260-264.
- [14] 罗军明等. 共沉淀法制备 Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷[J]. 材料导报: 研究篇, 2009, 23(7): 86-89.
- [15] 孟庆新等. 工艺参数对 Nd:YAG 烧结致密化的影响[J]. 材料热处理技术, 2010, 1: 52-55.
- [16] 郑吉. 煅烧温度对 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体的影响[J]. 化学工程与装备, 2010, 2: 27-29.
- [17] 霍地等. 超细粉体制备 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷[J]. 中国稀土学报, 2008, 26(1): 56-60.
- [18] 王能利等. 氨水共沉淀法制备 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷纳米粉体[J]. 无机化学学报, 2008, 24(7): 1137-1141.
- [19] 何庭秋等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Nd 透明陶瓷的制备[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(6): 1336-1339.
- [20] 罗军明等. Er<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷制备及发光性质研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2254-2257.
- [21] 漆云凤等. Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 透明陶瓷的光学性能研究[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2657-2661.
- [22] 张斌等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C 陶瓷的发光性能[J]. 无机化学学报, 2010, 26(7): 1195-1198.
- [23] 李文杰等. Yb<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>共掺氧化钇透明陶瓷的制备及其性能[J]. 无机化学学报, 2010, 26(4): 687-692.
- [24] 李先容等. 添加微量 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 WC-8%Ni 合金微观组织与性能的影响[J]. 硬质合金, 2010, 27(3): 135-138.
- [25] 乔岳云等. 纳米 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对氧化锆陶瓷涂层显微组织和抗高温氧化性能的影响[J]. 金属铸锻焊技术, 2008, 9: 116-118.
- [26] 李家茂等. 氧化钇纳米粉浸渍处理对氧化铝陶瓷抗钢液腐蚀性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(67): 701-703.
- [27] 赵冉等. 复合烧结助剂对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 陶瓷相对密度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(2): 271-277.
- [28] 曾令可, 李秀艳著. 纳米陶瓷技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [29] 徐政, 倪宏伟著. 现代功能陶瓷[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [30] 郭艳艳. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er 纳米透明陶瓷的制备及其显微结构研究[J]. 江西科学, 2009, 27(1): 55-57.
- [31] J. R. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, et al. Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics a novel solid-state laser material. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(12): 1373-1375.
- [32] J. R. Lu, J. H. Lu, T. Murai, et al. Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(12): 1277-1279.
- [33] 孙晶等. Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光陶瓷粉体制备与性能研究[J]. 中国稀土学报, 2007, 25(6): 672-675.
- [34] J. Y. Chen, Y. Shi and J. L. Shi. Synthesis of (Y,Gd)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu nanopowder by a novel coprecipitation processing. Journal of Material Research, 2004, 19(12): 3586-3591.
- [35] 邢庆凯, 彭志坚等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 Mn-Zn 铁氧体的最佳烧结温度和磁性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 349-352.
- [36] 黄晓巍. 液相烧结 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/3Y-TYP 复相材料的致密化与力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(4): 479-483.
- [37] 赵青等. 氧化钇稳定二氧化锆(YSZ)微波烧结陶瓷的复阻抗谱分析[J]. 功能材料, 2004, 35(增刊): 936-940.
- [38] 毛豫兰等. 氮化硅-氧化镁-氧化钇陶瓷的常压烧结[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(6): 17-20.
- [39] 杜学丽等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 SPS 烧结纳米 AlN 粉末的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9)增刊: 78-82.
- [40] 黄小丽等. CaO-Y<sub>2</sub>O 添加剂对 AlN 陶瓷显微结构及性能的影响[J]. 无机材料学报, 2002, 17(2): 277-284.
- [41] A. I. Kesue, K. Kamata and K. Y. Shida. Synthesis of transparent Nd-doped HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics using HIP. The American Ceramic Society, 1996, 79(2): 359-364.
- [42] 李喜坤等. 热压烧结制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN-0.2%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(6): 705-708.