第 48 卷第 4 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 4
2020 年 4 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　April，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190691

# 熔融盐对氧化锆纳米片合成的影响

刘雪枫[1]，刘健敏[2]，李亚格[1]，唐紫娟[1]，王　涛[1]，冯　果[2]，江伟辉[1,2]

(1. 景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院，江西 景德镇 333403；
2. 国家日用及建筑陶瓷工程技术研究中心，江西 景德镇 333001)

**摘　要**：以四氯化锆为锆源，乙醇为溶剂，采用溶剂热辅助熔盐法低温煅烧制备氧化锆纳米片。研究并讨论了熔盐种类和用量对氧化锆晶体生长和形貌的影响。结果表明：以 NaCl 和 $Na_3PO_4$ 的混合物为熔盐，且 $m$(前驱体):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1 时，可以得到平均边长超过 1.8 μm，厚约 70 nm，宽厚比大于 10:1 的单斜氧化锆纳米片。纳米片为单晶结构，无明显缺陷，主要暴露面为(001)晶面，其在熔盐中的形成符合自聚焦机理，包括溶解、扩散、吸附和生长过程，(001)面主导的氧化锆纳米片与表面能的理论计算结果吻合。

**关键词**：熔盐法；氧化锆纳米片；(001)晶面；自聚焦
**中图分类号**：TB383　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)04–0514–06
**网络出版时间**：2020–01–14



## Effect of Molten Salt on Preparation of Zirconia Nanosheets

*LIU Xuefeng*[1], *LIU Jianmin*[2], *LI Yage*[1], *TANG Zijuan*[1], *WANG Tao*[1], *FENG Guo*[2], *JIANG Weihui*[1,2]
(1. School of Material Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China;
2. National Engineering Research Center for Domestic and Building Ceramics, Jingdezhen 333001, Jiangxi, China)

**Abstract:** $ZrO_2$ nanosheets were prepared at low temperature by a molten salt method with assistance of solvothermal process using zirconium chloride as zirconium source and ethanol as a solvent. The effects of salt type and content on the growth and morphology of zirconia crystals were investigated. The results show that monoclinic zirconia nanosheets with an average side length of 1.8 μm, a thickness of 70 nm and a width:thickness ratio of more than 10:1 can be obtained when NaCl and $Na_3PO_4$ are used as composite molten salts and the mass ratio of precursor:NaCl:$Na_3PO_4$ is set to 10:10:1. The nanosheet shows single crystal structure with little defects, and the main exposed surface is (001) facet. The formation process in molten salts accords with a self-focusing mechanism, including dissolution, diffusion, adsorption and growth. The large percentage of (001) facet obtained is in reasonable agreement with that based on the theoretical calculation of surface energy.

**Keywords:** molten salt method; zirconium dioxide nanosheet; (001) facet; self-focusing

氧化锆是基础研究和应用中的一种非常引人关注的氧化物材料，其具有熔点高、韧性好、抗磨损、强度高、抗氧化、良好的离子导电性和生物相容性等一系列优异性能，是重要的耐高温材料、宽禁带半导体材料、固体氧化物燃料电池、催化剂材料和陶瓷生物材料等[1–3]。

众所周知，微观形貌对无机纳米材料的物化性能，尤其是光电、催化和生物化学性能具有显著影响。探索纳米材料的可控合成并进一步了解晶体的生长习性，对实现材料的规模化制备和器件功能化具有重要意义[4]。鉴于此，尺寸和形状可控的低维氧化锆纳米晶体(如纳米线、纳米管、纤维、纳米带、薄膜)的合成在近几年吸引了广泛的研究热情。在各种不同形貌的材料中，片状氧化锆因具有较高的各向异性、较大的宽厚比和比表面积、超薄等结构特点，有望应用于陶瓷基或金属基复合材料增强体、

收稿日期：2019–10–20。　修订日期：2019–11–08。
基金项目：国家自然科学基金(51662016，51962014)；江西省重点研发计划(20192BBEL50022)；江西省教育厅重点项目(GJJ180699)。
第一作者：刘雪枫(1992—)，男，硕士研究生。
通信作者：江伟辉(1965—)，男，博士，教授。

**Received date:** 2019–10–20.　**Revised date:** 2019–11–08.
**First author:** LIU Xuefeng (1992–), male, Master candidate.
**E-mail:** use131421@163.com
**Correspondent author:** JIANG Weihui (1965–), male, Ph.D., Professor.
**E-mail:** whj@jci.edu.cn

生物传感器、光催化剂等领域。目前已有大量的研究工作报道了其他金属氧化物薄片的合成，如氧化钛[5]、氧化锰[6]、氧化锌[7]、氧化钨[8]等，尺寸一般限于几十到几百纳米。但对纳米氧化锆片状结构的制备研究较少。Shu 等[9]通过煅烧片状分层 $ZrOSO_4$ 前驱体制得了花瓣状氧化锆纳米片，所得的具有(100)面的二维氧化锆对罗丹明 B 的光降解表现出优异的催化活性；Nayak 等[10]以 $NaBH_4$ 为沉淀剂，采用两步法低温合成了椭圆氧化锆纳米片。但上述实验得到的片材均存在尺寸较小、分散性差、团聚严重等问题。

本工作以溶剂热预处理的氧化锆干凝胶粉为前驱物，将其与特定熔盐混合来制备氧化锆纳米片。熔盐在高温下的高质量输运与熔剂作用类似，这种高活性介质不仅能使反应物充分混合，而且可以充分表现出晶体的各向异性，形成具有特殊形貌的结构。一旦产品材料的可溶性低于盐溶液中的反应物，就可以根据反应物和目标产物来调整各种盐混合物[11−12]。主要研究了熔盐种类和用量对氧化锆晶体生长和形貌的影响，同时初步探讨了纳米片的形成机理。

# 1　实验

## 1.1　样品制备

在通风橱中称取 1.3 g $ZrCl_4$(99.9%，质量分数，Aladddin 公司)溶于 40 mL 乙醇(优级纯，上海沪试)中，配成 0.14 mol/L 的溶液，搅拌至澄清后再加入 0.8 mol/L 的 NaOH(分析纯，西陇科学)，40 ℃搅拌 1 h，然后转移至容积为 100 mL、以聚四氟乙烯为内衬的反应釜内，经 120 ℃溶剂热处理 24 h 得到前驱体。将前驱体反复洗涤、干燥，然后与不同熔盐按一定质量比混合，研磨 15 min，置于刚玉坩埚内在 900 ℃热处理 5 h 后随炉自然冷却至室温，最后用去离子水(自制，SHB-ⅢA 循环水真空泵)清洗 3 次、乙醇清洗 2 次，在 60 ℃干燥 5 h 得到目标样品。

在熔盐种类相关实验中，所用熔盐包括 KCl(优级纯)、NaCl(优级纯)、$Na_2SO_4$(分析纯)和 $Na_3PO_4$(分析纯)，均购自 Aladddin 公司。前驱体与不同熔盐的配比见表 1。熔盐用量相关实验中，所选熔盐为 NaCl 和 $Na_3PO_4$，且其质量比恒为 10:1。如 $m$(前驱体):$m$(熔盐)=10:11 即为 $m$(前驱体):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1，以此类推。

## 1.2　表征

采用辽宁丹东 DX-2700B 型 X 射线粉末衍射仪(XRD)对样品进行物相分析(Cu 靶，$K_\alpha$ 辐射，$\lambda$=0.154 nm)，工作电压 40 kV，电流 30 mA，采样时间 0.2 s；借助德国 NETZSCH STA449C 型综合热分析仪对样品进行差热–热重(DTA–TG)分析(静态空气气氛，升温速率 10 ℃/min)；选用日本日立 SU8010 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察样品的形貌和粒径分布(镀铂金颗粒约 2 nm，加速电压 15 kV)；利用日本电子 JEM-2010 型透射电子显微镜(TEM)观察样品显微形貌，并用选区电子衍射(SAED)和高分辨透射电镜(HR-TEM)表征样品的结构(加速电压 200 kV)。

**表 1　前驱体与熔盐配比**

**Table 1　Mass ratio of precursor to salts**

| Serial number | Mass ratio |
|---|---|
| 1 | $m$(P):$m$(KCl)=10:10 |
| 2 | $m$(P):$m$(KCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1 |
| 3 | $m$(P):$m$(NaCl)=10:10 |
| 4 | $m$(P):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1 |
| 5 | $m$(P):$m$($Na_2SO_4$)=10:10 |
| 6 | $m$(P):$m$($Na_2SO_4$):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1 |

P is precursor.

# 2　结果与分析

## 2.1　氧化锆晶体的相转变过程

图 1 为前驱体与熔盐混合物[$m$(前驱体):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1]的 DTA–TG 曲线。在 DTA 曲线中，103.4 ℃的吸热峰是由残余乙醇和自由水的挥发引起的，对应于 TG 曲线中 6.56%的质量损失；在 678.5 ℃附近有 1 个较宽的放热峰，结合图 2 发现当煅烧温度达到 750 ℃时，四方氧化锆衍射峰显著增强，但未有其他晶相出现，由此判断该放热峰是由于加热过程中四方氧化锆的不断形成。763.1 和 793.4 ℃的吸热峰分别对应于熔盐的熔融和挥发，其中后者伴随着 38.81%的明显质量损失。

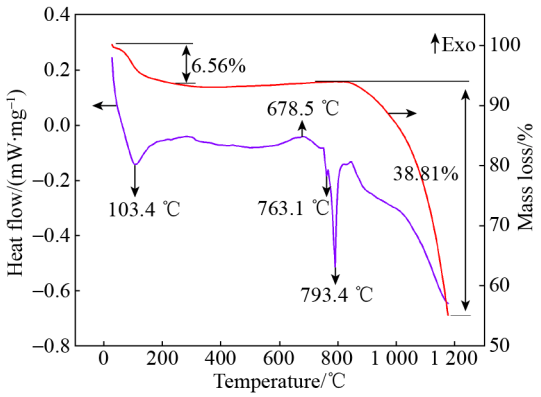



图 1　前驱体混合物的 DTA–TG 曲线

Fig. 1　Thermogravimetric curves of precursor mixture

为进一步研究熔盐对样品晶相转变的影响，用 XRD 分析了在熔盐低共熔点[$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:1，763 ℃]附近保温 5 h 样品的相组成，如图 2 所示。室温下的前驱体为结晶较弱的四方氧化锆，随温度升高氧化锆逐渐晶化、发育，在 750 ℃时结晶度明显提高。利用 Scherrer 公式[13]对 750 ℃的 30.2°的衍射峰进行计算，得到此时样品的平均晶粒尺寸为 26.2 nm。随着温度继续升高，熔盐开始熔化，在熔融介质中，反应主要由化学平衡控制，比扩散控制的固态反应进行得快得多，导致晶粒迅速长大超过四方相转变为单斜相的临界尺寸(约 30 nm)[14]。770 ℃时单斜相的含量已经多于四方相，到 800 ℃几乎发生完全相变。相比之下，在没有加入熔盐的样品中，相转变过程明显较慢，这进一步证明了熔盐对晶体生长发育的促进作用。

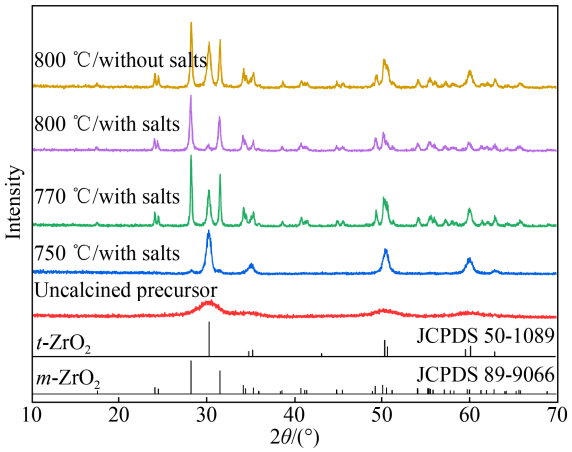



图 2 不同温度下合成样品的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of samples synthesized at different temperatures

## 2.2 熔盐种类对氧化锆纳米片合成的影响

图 3 为前驱体与不同熔盐混合，并在 900 ℃煅烧 5 h 的 XRD 谱，其中 $Na_3PO_4$ 的质量分数为 10%。由图 3 可见，采用不同熔盐所得产物主晶相均为单斜氧化锆($m$-$ZrO_2$)，同时含有数量不等的四方相($t$-$ZrO_2$)，四方相的出现是由于前驱体在溶解、析出的动态过程中始终存在细小的 $ZrO_2$ 颗粒，$ZrO_2$ 纳米颗粒或团簇小于相变临界尺寸，以亚稳四方相的形式存在。以 $Na_2SO_4$ 为熔盐时，$t$-$ZrO_2$ 的相对含量最高，这是因为 $Na_2SO_4$ 熔点较高(884 ℃)，900 ℃时熔盐刚开始熔融，流动性差，同时黏度较高，导致晶体生长较慢。而在 $Na_2SO_4$ 中加入 10%的 $Na_3PO_4$ 后，液态环境有所改善，促进了晶体的生长发育，$t$-$ZrO_2$ 含量降低。反应均没有其他杂相产生，表明熔盐并未与前驱体反应生成杂质。

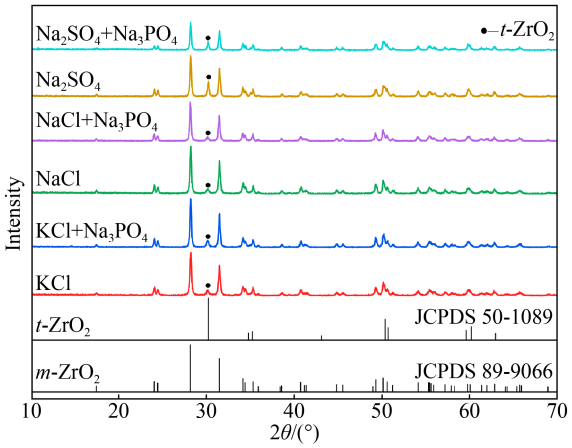


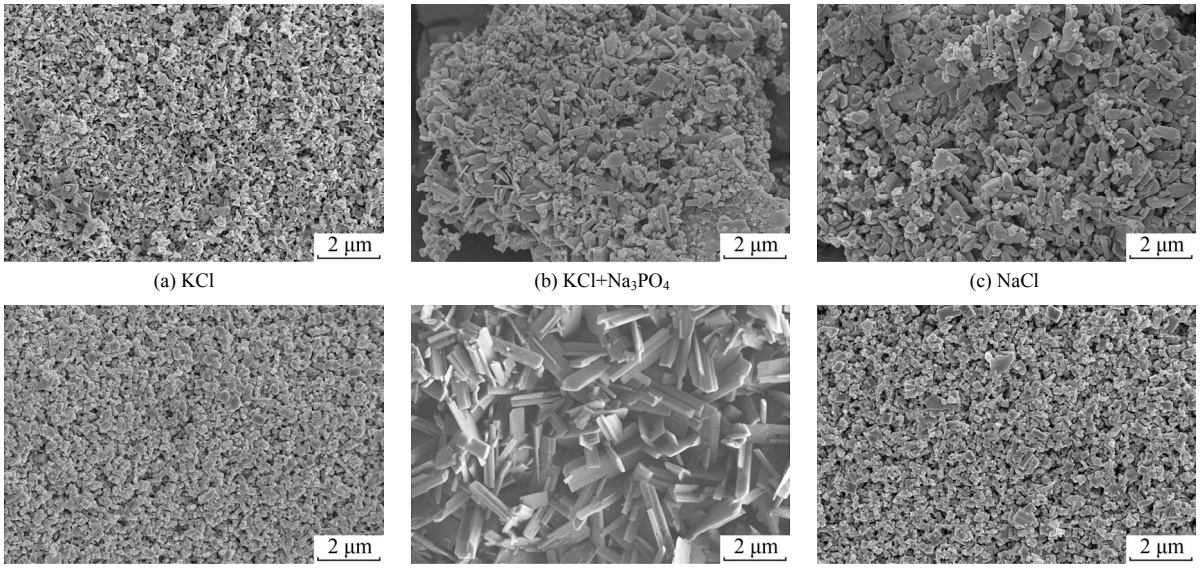

图 3 不同熔盐中合成样品的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of samples synthesized with different molten salts

图 4 为前驱体与不同熔盐混合煅烧后所得样品的 SEM 照片。在单独以 KCl(图 4a)和 NaCl(图 4c)为熔盐时，产物均由颗粒组成，其中 NaCl 中颗粒较大，同时晶体表现出一定的各向异性，说明在 NaCl 熔盐中前驱体有一定的溶解性。当分别加入 10%的 $Na_3PO_4$ 后，样品有明显的二维生长趋势，且 NaCl+$Na_3PO_4$ 的片状形貌最好，表明氧化锆在 $Na_3PO_4$ 中溶解性良好，这在氧化锆晶须的制备中也有报道[15]。但由于反应过程中始终有小颗粒析出，同时在同一体系中，晶体的各向同性、各向异性乃至不同厚度的各向异性互相竞争，因此始终难以得到形状和尺寸均一的氧化锆纳米片。而由图 4d 和图 4f 可见，当采用 $Na_2SO_4$ 作为熔盐时，无论是否添加 $Na_3PO_4$，产物均由小颗粒组成。这说明 900 ℃时 $Na_2SO_4$ 并不能很好地起到液态熔盐的传质作用，与前述 XRD 分析一致。

## 2.3 熔盐用量对氧化锆纳米片形貌的影响

以 NaCl+$Na_3PO_4$ 为熔盐，在不同熔盐用量下煅烧所得样品的 SEM 照片，如图 5 所示。在未添加熔盐的条件下(图 5a)，样品仅由 200 nm 左右的柱状小颗粒组成，证明氧化锆本身即具有一定的各向异性，只因生长环境受限未能进一步长大。逐渐加入熔盐至前驱体和熔盐的质量比为 20:11 和 10:11 时(图 5b 和图 5c)，样品形貌明显改善，不仅尺寸增大，而且生长成为棱角分明、形状规则的片状结构。在 $m$(前驱体):$m$(熔盐)=10:11[$m$(前驱体):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$)=10:10:1]时，纳米片的平均边长超过 1.8 μm，厚约 70 nm，宽厚比大于 10:1。然而，随着熔盐用量进一步增大，达到 10:22 和 10:33 时(图 5d 和图 5e)，薄片尺寸有所减小，同时小颗粒明显增多。

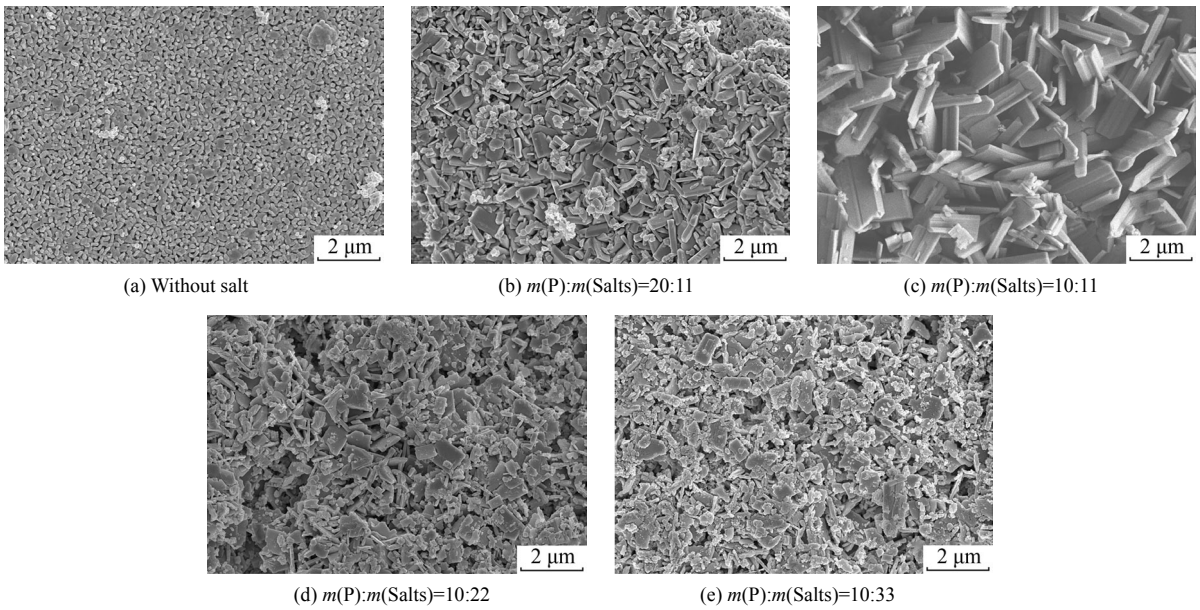



(a) KCl　(b) KCl+$Na_3PO_4$　(c) NaCl

(d) $Na_2SO_4$　(e) NaCl+$Na_3PO_4$　(f) $Na_2SO_4$+$Na_3PO_4$

图 4　不同熔盐中合成样品的 FE-SEM 照片

Fig. 4　Field emission (FE)-SEM images of samples synthesized in different molten salts




(a) Without salt　(b) *m*(P):*m*(Salts)=20:11　(c) *m*(P):*m*(Salts)=10:11

(d) *m*(P):*m*(Salts)=10:22　(e) *m*(P):*m*(Salts)=10:33

图 5　以 NaCl+$Na_3PO_4$ 为熔盐，不同用量下所得样品的 FE-SEM 照片

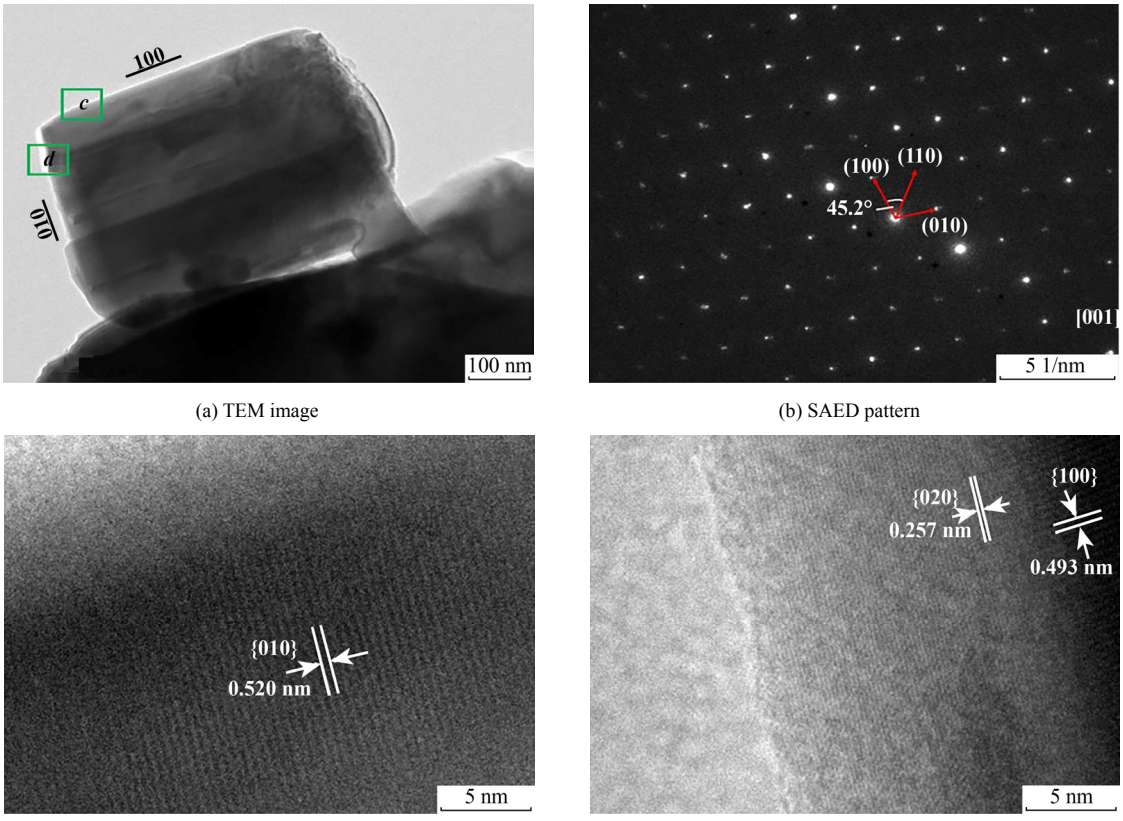
Fig. 5　FE-SEM images of samples obtained under different salt dosages

该现象是因为在过量的熔盐中，前驱体过于分散，从而延长了传质距离，晶体生长速率下降。而且随着熔剂中溶质数量的增多，在重结晶过程中析出了更多小晶粒。

### 2.4　纳米片的结构分析

图 6a 为单个纳米片的 TEM 照片，其具有清晰的轮廓和光滑的表面，同时均匀的透明度表明薄片的厚度基本一致。选区电子衍射照片（图 6b）中清晰的斑点和高分辨 TEM 照片（图 6c 和图 6d）中无晶格失配的等距晶格条纹表明样品为明确的单晶。测量衍射斑点最近邻 3 组晶面的 $d$ 值分别为 0.509、0.482、0.364 nm，与单斜氧化锆的(010)，(100)和(110)晶面间距基本吻合（JCPDS 89-9066）。晶带轴方向为[001]。利用单斜晶相晶面角公式计算得到(100)和(110)晶面夹角为 44.3°，与测量值 45.2°近似，可以确定样品为单斜氧化锆结构，与 XRD 谱结果一致。图 6a 中 c 区域的 HR-TEM 照片显示条纹间距 $d_1$=0.520 nm，对应 $m$-$ZrO_2$ 的(010)晶面，d 区域的 2 组条纹 $d_2$=0.257 nm，$d_3$=0.493 nm，分别对应(020)和(100)晶面，根据条纹方向和间距可以确定纳米片的 2 个侧面为(010)和(100)晶面，进而求得其晶轴面，即纳米片的顶面和底面为(001)晶面。

氧化锆纳米片在熔盐中的形成可以用自聚焦机理来解释[16]。如图 7 所示，在加热过程中无定形 $ZrO_2$ 逐渐结晶形成亚稳 $t$-$ZrO_2$，当升温达到熔盐的低共熔点后，颗粒在液相中进一步长大发生相变形成 $m$-$ZrO_2$。此时，相对较小的颗粒快速溶解并在溶液中形成局部浓度梯度。为保持浓度平衡，溶质通过颗粒间扩散向大的纳米晶周围迁移并供给其持续向二维方向生长。此外，晶体的形状演变及暴露晶面与表面能密切相关。根据上文 TEM 的表征结果，纳米片的长度方向为(010)晶面，宽度方向为(100)晶面，厚度方向为(001)晶面，这与离散 Fourier 变换[17]和局域密度近似[18]的理论计算结果一致，即在不受封端剂等热力学因素的影响下，单斜氧化锆(010)面表面能最高，(100)次之，(001)最低。(001)面的暴露是由于平行于(010)和(100)方向生长的自由能最小化造成的。




(a) TEM image (b) SAED pattern

(c) HR-TEM image of area c (d) HR-TEM imge of area d

图 6 氧化锆纳米片的 TEM 照片、SAED 花样和 HR-TEM 照片

Fig. 6 TEM image, selected area electron diffraction (SAED) patern and high-resolution (HR) TEM images of zirconia nanosheet

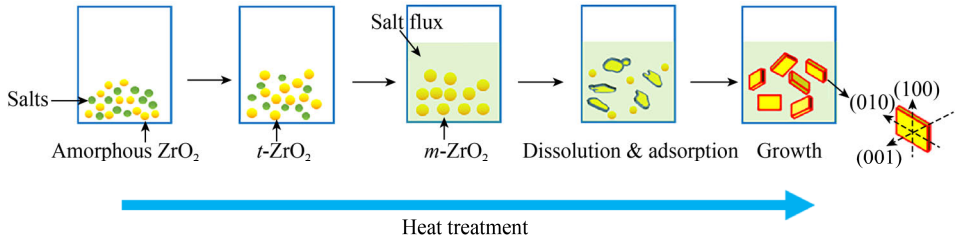



图 7 氧化锆纳米片在熔盐中的形成过程

Fig. 7 Formation process of zirconia nanosheets in molten salt

## 3 结论

1) 氧化锆由于尺寸效应在低温下以亚稳四方相的形式存在，在 770 ℃左右晶体生长超过临界尺寸，发生四方向单斜的晶相转变，液态熔盐明显加快了晶体生长过程。

2) 熔盐种类和用量对氧化锆晶体的形貌均有较大影响。当以 NaCl 和 $Na_3PO_4$ 为复合熔盐，$m$(前驱体):$m$(NaCl):$m$($Na_3PO_4$) =10:10:1 时，可以得到厚约 70 nm，宽厚比大于 10:1 的矩形单斜氧化锆纳

米片。

3) (001)面主导的氧化锆纳米片单晶的形成是由自聚焦机理和表面能差异共同作用造成的。

**参考文献**:


[1] 敖红敏, 俞耀伦, 龙志奇, 等. 超细锆基复合氧化物粉体制备方法概述[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 302–311.
AO Hongmin, YU Yaolun, LONG Zhiqi, et al. Chin J Rare Metal (in Chinese), 2013, 37(2): 302–311.

[2] 张帆, 王鑫, 张良, 等. $ZrO_2$陶瓷的微波烧结制备及其性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(3): 353–357.
ZHANG Fan, WANG Xin, ZHANG Liang, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(3): 353–357.

[3] REDDY C V, BABU B, REDDY I N, et al. Synthesis and characterization of pure tetragonal $ZrO_2$ nanoparticles with enhanced photocatalytic activity[J]. Ceram Int, 2018, 44(6): 6940–6948.

[4] LI W, HUANG H, LI H, et al. Facile synthesis of pure monoclinic and tetragonal zirconia nanoparticles and their phase effects on the behavior of supported molybdena catalysts for methanol-selective oxidation[J]. Langmuir, 2008, 24(15): 8358–8366.

[5] HAN X, KUANG Q, JIN M, et al. Synthesis of titania nanosheets with a high percentage of exposed (001) facets and related photocatalytic properties[J]. J Am Chem Soc, 2009, 131(9): 3152–3153.

[6] DENG R, XIE X, VENDRELL M, et al. Intracellular glutathione detection using $MnO_2$-nanosheet-modified upconversion nanoparticles[J]. J Am Chem Soc, 2011, 133(50): 20168–20171.

[7] TIAN Z R, VOIGT J A, LIU J, et al. Complex and oriented ZnO nanostructures[J]. Nat Mater, 2003, 2(12): 821–826.

[8] CHOI H G, JUNG Y H, KIM D K. Solvothermal synthesis of tungsten oxide nanorod/nanowire/nanosheet[J]. J Am Ceram Soc, 2005, 88(6): 1684–1686.

[9] SHU Z, JIAO X, CHEN D. Synthesis and photocatalytic properties of flower-like zirconia nanostructures[J]. Cryst Eng Comm, 2012, 14(3): 1122–1127.

[10] NAYAK B, MOHANTY S, TAKMEEL M, et al. Borohydride synthesis and stabilization of flake-like tetragonal zirconia nanocrystallites[J]. Mater Lett, 2010, 64(17): 1909–1911.

[11] LIU B, CHEN H M, LIU C, et al. Large-scale synthesis of transition-metal-doped $TiO_2$ nanowires with controllable overpotential[J]. J Am Chem Soc, 2013, 135(27): 9995–9998.

[12] HE H, YAO W, WANG C, et al. Morphology-controlled synthesis of sodium hexa-titanate nanowhiskers by changing evaporation rate of NaCl-KCl molten salts[J]. Ind Eng Chem Res, 2013, 52(43): 15034–15040.

[13] 赵志龙, 薛群虎, 赵亮, 等. 添加不同稳定剂制备的四方氧化锆晶型转变临界尺寸研究[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(3): 468–474.
ZHAO Zhilong, XUE Qunhu, ZHAO Liang, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2017, 46(3): 468–474.

[14] GARVIE R C. The occurrence of metastable tetragonal zirconia as a crystallite size effect[J]. J Phys Chem, 1965, 69(4): 1238–1243.

[15] WANG T, JIANG W, LIU J, et al. Simple and novel synthesis of zirconia whiskers from a phosphate flux[J]. Ceram Int, 2018, 45(4): 4514–4519.

[16] CHEN Y, JOHNSON E, PENG X. Formation of monodisperse and shape-controlled MnO nanocrystals in non-injection synthesis: Self-focusing *via* ripening[J]. J Am Chem Soc, 2007, 129(35): 10937–10947.

[17] PISKORZ W, GRYBOS J, ZASADA F, et al. Periodic DFT and atomistic thermodynamic modeling of the surface hydration equilibria and morphology of monoclinic $ZrO_2$ nanocrystals[J]. J Phys Chem C, 2011, 115(49): 24274–24286.

[18] CHRISTENSEN A, CARTER E A. First-principles study of the surfaces of zirconia[J]. Phys Rev B, 1998, 58(12): 8050–8064.


※　※　※　※　※　※　※　※　※　※　※



江伟辉，教授，博士生导师。现任景德镇陶瓷大学党委书记，国家日用及建筑陶瓷工程技术研究中心主任，新世纪百千万人才工程国家级人选，国务院特殊津贴获得者，教育部新世纪优秀人才，江西省主要学科学术和技术带头人，江西省高校中青年学科带头人，“赣鄱英才 555 工程”领军人才。主持完成 2 项航天军工项目、9 项国家级项目、1 项教育部“新世纪优秀人才”项目以及多项省级项目，推进了科技成果的产业化，产生显著的经济和社会效益。在无机非金属材料领域，尤其在非水解溶胶–凝胶法制备低维陶瓷氧化物材料方面取得多项创新成果。主持申报国家发明专利 40 多项，其中获授权 30 项。发表 SCI 或 EI 收录学术论文六十余篇。获江西省科技进步一等奖、江西省技术发明三等奖以及中国轻工业联合会科学技术发明二等奖各 1 项。



刘雪枫，景德镇陶瓷大学材料科学与工程硕士研究生，研究方向为低维氧化锆纳米材料的制备。所在课题组研究项目包括：低维氧化物陶瓷材料的可控合成；高透光度日用瓷的制备及机理研究；高显色 C@$ZrSiO_4$ 包裹色料的制备；MgO–$Al_2O_3$–$SiO_2$ 微晶玻璃析晶和晶相转变的研究。