

Tb³⁺离子掺杂的Al₂O₃基发光材料的微波水热合成与性能

程文俊, 刘 静, 张俊计*

大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年2月24日; 录用日期: 2026年3月20日; 发布日期: 2026年3月31日

摘 要

以Al(NO₃)₃·9H₂O和尿素为原料, 采用微波水热-焙烧法制备了稀土离子Tb³⁺掺杂的Al₂O₃基发光材料。利用X-射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、同步热分析仪(TG-DSC)、荧光光谱仪(FS)和Chromaticity Diagram等对产物的结构、形貌、发光性能和CIE色度进行分析和表征。结果表明, 在180℃下微波水热30 min, 可制备出结晶良好的叶片状勃姆石。勃姆石经不同温度的焙烧, 由γ-Al₂O₃向δ-Al₂O₃转变, 焙烧后的样品形貌基本保留前驱体的形貌。掺杂Al₂O₃基发光材料的发光来自Tb³⁺的⁵D₄→⁷F_j (j = 3, 4, 5, 6)能级跃迁发射, 发光强度随焙烧温度的提高趋于增强, CIE色度随焙烧温度变化不明显, 呈绿色。

关键词

微波水热法, Al₂O₃基质, 发光性能

Microwave Hydrothermal Synthesis and Properties of Rare Earth Doped Al₂O₃ Luminescent Materials

Wenjun Cheng, Jing Liu, Junji Zhang*

College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: February 24, 2026; accepted: March 20, 2026; published: March 31, 2026

Abstract

Al(NO₃)₃·9H₂O and urea were used as raw materials to prepare Al₂O₃-based luminescent materials

*通讯作者。

文章引用: 程文俊, 刘静, 张俊计. Tb³⁺离子掺杂的 Al₂O₃ 基发光材料的微波水热合成与性能[J]. 纳米技术, 2026, 16(2): 17-25. DOI: 10.12677/nat.2026.162003

doped with rare earth ions Tb^{3+} by microwave hydrothermal-calcination method. The structure, morphology, luminescence performance and CIE chromaticity of the products were analyzed and characterized by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Synchronous thermal analyzer (TG-DSC), fluorescence spectrometer (FS) and Chromaticity Diagram. The results indicate that well crystallized leaf shaped boehmite can be prepared by microwave hydrothermal treatment at $180^{\circ}C$ for 30 minutes. Boehmite was calcined at different temperatures, and the morphology of the sample was changed from $\gamma-Al_2O_3$ to $\delta-Al_2O_3$, and the morphology of the sample after calcination basically retained the morphology of the precursor. The luminescence of the two Al_2O_3 -doped luminescent materials came from the ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_j$ ($j = 3, 4, 5, 6$) energy level transition emission of Tb^{3+} , and the luminescence intensity tended to increase with the increase of calcination temperature, while the CIE chromaticity did not change significantly with the calcination temperature, showing green color.

Keywords

Microwave Hydrothermal Method, Al_2O_3 Matrix, Luminous Performance

Copyright © 2026 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

发光材料被广泛应用于固态照明、显示、生物医学、光学传感、生物、信息储存与防伪应用等多个领域[1]。常见纳米的发光材料主要包括半导体量子点、贵金属纳米材料、稀土掺杂纳米材料等，其中稀土掺杂纳米材料具有优异的发光稳定性，较长的激发态寿命，以及对生物组织的自发荧光的抗干扰性等，在多个领域进行广泛的应用[2]-[4]。

Al_2O_3 作为稀土发光材料的基质之一，存在多种晶型结构，包括 α 、 γ 、 θ 相等[5] [6]。不同晶相的 Al_2O_3 对稀土离子的溶解性、格位占据和发光效率均有显著影响，这为调控发光性能提供了多种可能[7]。 Al_2O_3 基质的宽禁带特性使其能够高效传递能量给掺杂的稀土离子，同时其低声子能量减少了激发态能量的非辐射弛豫，有利于提高稀土离子的发光效率[8]。

Al_2O_3 基发光材料有多种制备方法，包括共沉淀法、溶剂热法、乳液法、溶胶-凝胶法、传统水热法以及微波水热法等。

刘世江等[9]采用共沉淀法，将不同掺杂比例的 Eu_2O_3 和 Tb_2O_3 用浓硝酸溶解并与 $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 混合，用氨水调节 pH 值，制备浓度为 0.2 mol/L，pH 值为 3 的混合盐溶液，并将该溶液在边搅拌边滴加的条件下缓慢滴入至 pH 为 10 的碳酸氢铵溶液中，滴加结束后继续搅拌 1 h 并陈化 24 h，将获得的沉淀物在 $1050^{\circ}C$ 下煅烧 4 h 制备样品。结果表明： Tb^{3+} 掺杂浓度为 5 mol% 时提高了 $Al_2O_3:Eu^{3+}$ 的发光强度，且 Tb^{3+} 的掺杂有利于提高 $\gamma-Al_2O_3$ 的热稳定性。覃利琴等[10]采用溶剂热法，将取 2.25 g 的 $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 溶于无水乙醇中，并掺入不同含量的氧化铽和 0.4 g 的柠檬酸，用稀氨水调节溶液 pH 值，将制备的 50 ml 溶液在不同温度下反应 24 h，再将制备出的沉淀物在 $800^{\circ}C$ 下热处理 4 h 获得 $Al_2O_3:Tb^{3+}$ 粉末样品。结果表明：在 $170^{\circ}C$ 下水热 24 h， Tb^{3+} 掺杂量为 5 mol%，溶液 pH 值为 8 时制备出的 $Al_2O_3:Tb^{3+}$ 发光性能最好。陈艳林等[11]采用乳液法，将 $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 水溶液与草酸二甲酯混合，在滴加入二甲苯溶液中，最后混入溶解在 HNO_3 中不同掺杂量的 Eu_2O_3 ，将配制的乳浊液在 $50^{\circ}C$ 下水浴 3 h，再在 $144^{\circ}C$ 下共沸蒸馏，洗涤、干燥后在不同温度下煅烧 2 h，制备得到 $Al_2O_3:Eu^{3+}$ 。结果表明： Eu^{3+} 掺杂量为 1 mol%，在 $1200^{\circ}C$

下煅烧 2 h 制备的红色发光材料 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的发光性最好。林丙臣[12]将异丙醇铝在 90°C 下水浴 2 h 形成 $\gamma\text{-AlOOH}$ 沉淀, 再分别加入含 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 和 Ce^{3+} 的溶液, 在 90°C 下水浴 16 h 形成溶胶, 将得到的溶胶在 100°C 下煅烧 6 h 后再在 900°C 小煅烧 2 h, 研磨得到最终样品。结果表明: 双掺体系中 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的摩尔比为 1:6 时体系发光强度最好。 Ce^{3+} 离子的掺入可增强 1534 nm 的光致发光强度, 也降低其可见区的上转换发光强度。刘佃光[13]采用水热法, 以 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和尿素为原料, PEG 作为分散剂, 掺杂不同摩尔含量的 $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 在 120°C 下水热 24 h, 将制备得到的沉淀物在 500°C 、 900°C 和 1200°C 下分别煅烧 2 h, 制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 。结果表明: 煅烧产物 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 的形貌会维持水热合成前驱体产物 $\text{NH}_4\text{Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3:\text{Tb}^{3+}$ 的形貌, 在 Tb^{3+} 掺杂摩尔比为 2 mol% 时, 样品的发光强度最高。朱振峰等[14]采用微波水热法, 将 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 以及不同摩尔分数的 $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶于乙醇、正丁醇和水的混合溶液中, 并加入 CTAB、NaOH 以及乙酸乙酯搅拌均匀, 将溶液在 180°C 下微波水热反应 30 min, 最后将制备的前驱体在 500°C 下煅烧 2 h, 制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 。结果表明: 煅烧后的样品形貌保留了其前驱体样品的由片状自组装成的微球形貌, 随着 Eu^{3+} 离子掺杂量的增加, 处于偏离反演对称中心格位 Eu^{3+} 数量增多, 样品在 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 电偶极跃迁强度变大。

与其他制备方法相比较, 微波水热法利用微波辐射的高效加热特性, 有效解决了传统水热过程中容器内部加热不均的问题。微波的快速加热过程抑制了掺杂离子的偏析和团聚, 显著提升掺杂离子的均匀性与发光性能。微波水热法还具有快速的加热速率、良好的加热均匀性、不存在温度梯度差异等优势, 避免了传统加热中的滞后现象[15]-[17]。

本文首先采用微波水热法制备 Tb^{3+} 离子掺杂的 Al_2O_3 基发光材料前驱体, 再通过高温焙烧制备出 Al_2O_3 基发光材料, 分析制备工艺对产物的结构、形貌以及发光性能的影响。

2. 实验方法

2.1. 实验试剂

本文中实验所用的实验试剂如表 1 所示。

Table 1. Reagents used in the experiment

表 1. 实验所用试剂

试剂名称	试剂纯度	生产厂家
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (九水合硝酸铝)	分析纯(AR)	天津市大茂化学试剂厂
H_2NCONH_2 (尿素)	分析纯(AR)	天津市大茂化学试剂厂
HNO_3 (硝酸)	分析纯(AR)	天津市大茂化学试剂厂
Tb_4O_7 (氧化铽)	分析纯(AR)	上海跃龙有色金属有限公司
H_2O (去离子水)	—	自制

2.2. 实验仪器

本文中实验所用的实验设备如表 2 所示。

2.3. 样品制备

按稀土离子与 Al^{3+} 摩尔比 1:100 分别称取一定量的氧化铽, 充分溶于适量的硝酸溶液中, 加热溶液使多余的硝酸挥发。再分别加入 5 g $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 5 g 尿素, 用去离子水配制成 40 ml 的溶液。将混合溶液移至反应釜并放入微波水热平行合成仪中, 微波最大功率值设定为 600 W, 最大压力值设为 2 MPa,

Table 2. Equipment used in the experiment**表 2.** 实验所用设备

仪器名称	仪器型号	生产厂家
电子天平	AL204	梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	巩义市予华仪器有限责任公司
微波水热平行合成仪	XH-800S	北京祥鹤科技发展有限公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9030A	巨为仪器设备有限公司
箱式电阻炉	KSL-1200X	合肥科晶材料技术有限公司

在 10 min 内温度从室温升至 100℃, 在 100℃ 保温 5 min; 然后将压力最大值改设为 5 Mpa, 在 10 min 内将温度升至 180℃ 并保温 30 min。反应结束, 对制备得到的沉淀物进行过滤、洗涤, 在干燥箱中 80℃ 下干燥 5 h, 得到前驱体样品。将前驱体样品在箱式电阻炉中分别在 600℃、800℃、1000℃ 焙烧 2 h, 冷却至室温获得最终产物。

2.4. 样品表征

采用荷兰帕纳科公司的 Empyren (锐影) X-射线衍射仪(XRD)对微波水热产物和焙烧产物进行晶体结构分析; 采用德国蔡司 SUPRA 55 场发射扫描电镜(SEM)对产物进行形貌分析; 采用 STA 449 F3 同步热分析仪(TG-DSC)分析前驱体产物在空气气氛下的热分解过程, 测定温度区间为室温至 1000℃, 升温速率为 10℃/min; 使用 FluoroMax-4 型光谱仪(FS)检测产物的激发光谱和发射光谱。

3. 结果与讨论

3.1. 微波水热反应产物的表征

3.1.1. 微波水热反应产物的 XRD 分析

图 1 是 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、尿素和 Tb_4O_7 在 180℃ 下保温 30 min 的微波水热合成前驱体产物的 XRD 图谱。

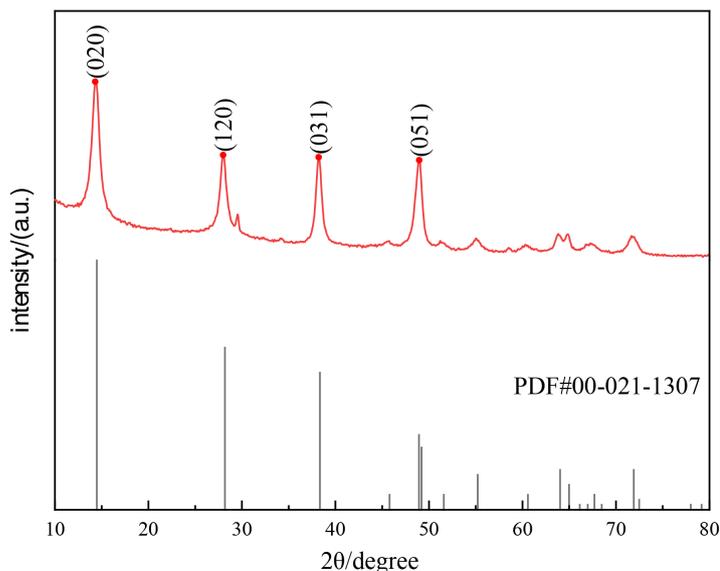


Figure 1. XRD mapping of microwave hydrothermal synthesis products

图 1. 微波水热合成产物的 XRD 图谱

分析图 1 可知, 产物的 XRD 谱线在 14.355° 、 27.984° 、 38.226° 和 48.94° 处出现了 4 个尖锐衍射峰, 经分析与 AlOOH 的标准卡 PDF#00-021-1307 完全吻合, 衍射峰对应的晶面依次为(020)、(120)、(031)和(051)。XRD 图谱中未检测出与 Tb^{3+} 离子相关的衍射峰, 说明加入的 Tb^{3+} 离子已以固溶的形式进入了 AlOOH。与传统水热法数小时甚至十几小时的合成条件相比, 微波水热法有助于在较低温度和很短的反应时间合成产物。

3.1.2. 微波水热反应产物的 SEM 分析

图 2 为 180°C 保温 30 min 条件下微波水热合成前驱体产物的 SEM 图片。从图中可知, 前驱体产物的形貌为叶片状, 有部分团聚, 晶体生长较完整。

AlOOH 是由 AlO_6 八面体层状组成, 层间由氢键连接, 勃姆石的晶体结构使得其生长不易沿着[010]晶向进行[18]。原料中的 NO^- 会优先选择附着在(010)与(001)晶面, 从而阻碍了晶体沿着[010]和[001]晶向生长, 故而最终 AlOOH 的形貌呈现为叶片状[19]。

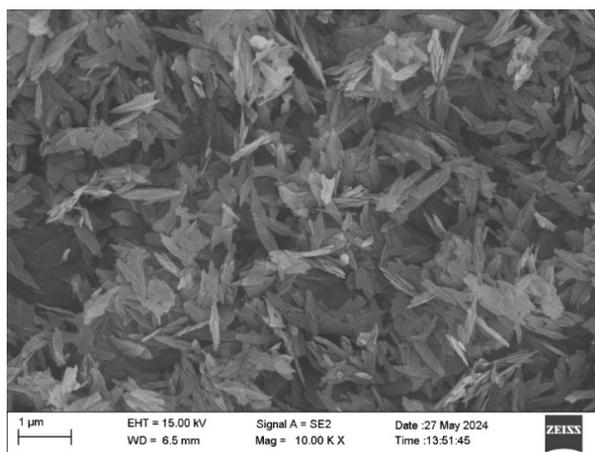


Figure 2. SEM image of microwave hydrothermal synthesis products
图 2. 微波水热合成产物的 SEM 图片

3.1.3. 微波水热反应产物的 TG-DSC 分析

图 3 为微波水热合成前驱体产物的 TG-DSC 图谱。从 TG 曲线可以看出, 在室温至 200°C 的升温过程中, 样品随温度失重速度较为缓慢, 失重大约为 8%, 这是附着在 AlOOH 表面的水分子受热蒸发引起的样品重量下降; 在 200°C 到 500°C 的过程中, 样品的重量随着温度的升高而急速下降, 这是因为 AlOOH 的结晶水随温度的升高而脱离, 样品也由 AlOOH 转变为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; 温度在 500°C 后, 样品重量随着温度的升高基本不变, 没有明显的失重。

分析图 3 中样品的 DSC 曲线可知, 在 50°C 附近有一个吸热峰, 与 TG 曲线中 AlOOH 吸收热量脱去表面水分子的过程相对应; 在 300°C 到 500°C 的范围内出现一个较强的吸收峰, 与 TG 曲线中 AlOOH 受热失去结晶水, 由 AlOOH 转变为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的过程相对应; 在 700°C 附近存在一个很宽的吸热峰, 对应 TG 曲线样品无明显失重的阶段, 吸热量使氧化铝发生晶型转变, 在 900°C 后样品再次急剧吸热。

3.2. 焙烧产物的表征

3.2.1. 焙烧产物的 XRD 分析

图 4 是将用微波水热法合成的前驱体在不同温度焙烧 2 h 后产物的 XRD 图谱。由图可知, 在焙烧温度为 600°C 时, 产物的主衍射峰与 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (PDF#00-029-0063) 的衍射峰完全吻合。在焙烧温度为 800°C 和

1000°C时, 产物的衍射峰与 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (PDF#00-047-1770)的衍射峰完全吻合。这表明在焙烧温度为 600°C到 800°C区间发生了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的晶型转变, 且 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相在 800°C到 1000°C的温度区间稳定存在。

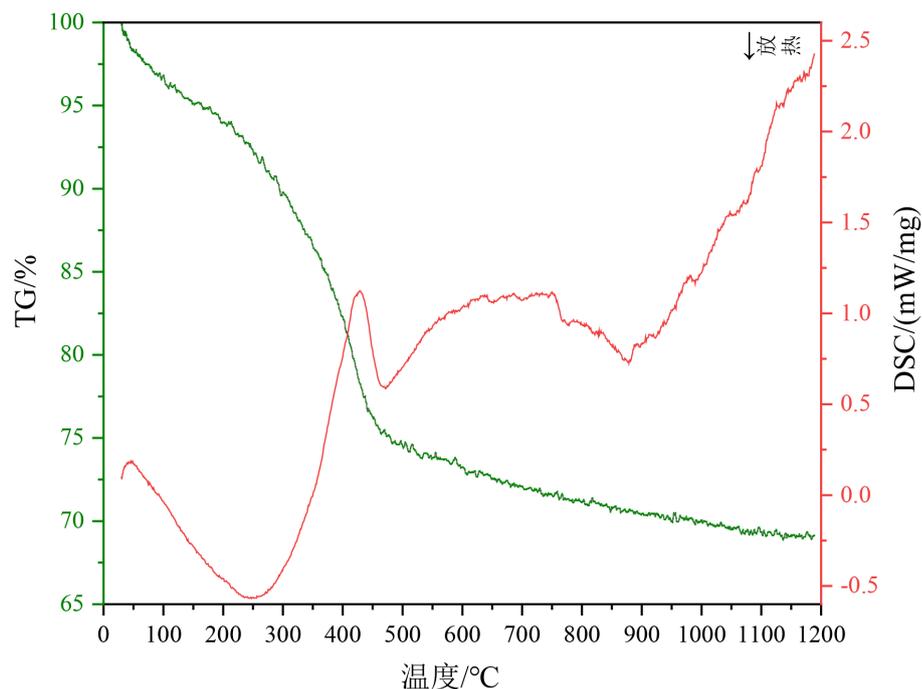


Figure 3. TG-DSC spectra of microwave hydrothermal synthesis products

图 3. 微波水热合成产物的 TG-DSC 图谱

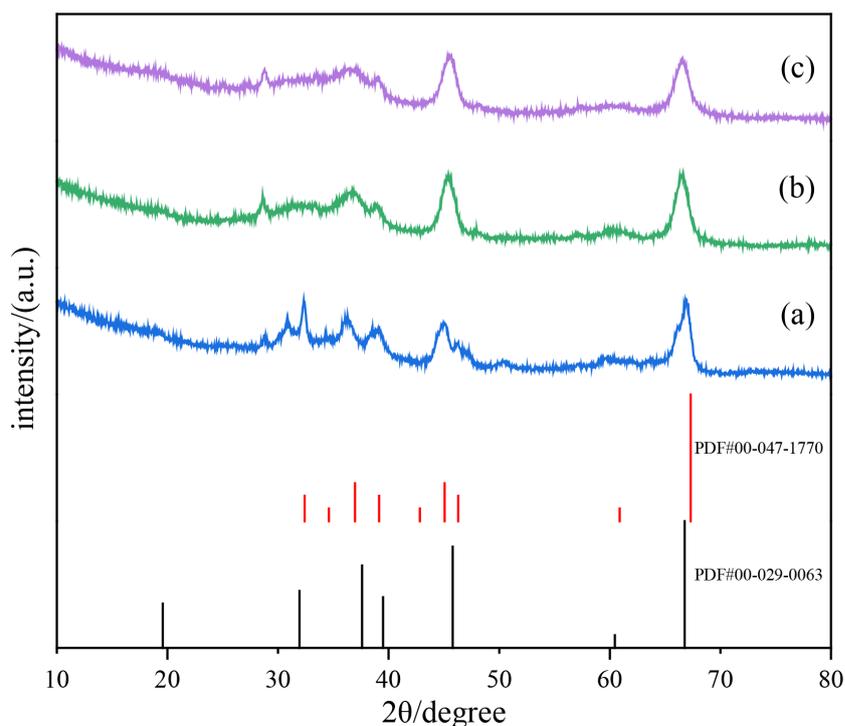


Figure 4. XRD spectra of synthetic products calcined at different temperatures: (a) T = 600°C; (b) T = 800°C; (c) T = 1000°C

图 4. 不同焙烧温度下合成产物的 XRD 图谱: (a) T = 600°C; (b) T = 800°C; (c) T = 1000°C

3.2.2. 焙烧产物的 SEM 分析

微波水热法合成的前驱体经不同温度焙烧 2 h 制备产物的 SEM 图片见图 5。由图可知, 不同焙烧温度下的晶粒形状与前驱体的形貌相似, 均呈叶片状, 但是晶粒尺寸有所不同。随着焙烧温度的升高, 结晶物相发生变化, 晶粒宽度呈现减小的趋势。在焙烧温度为 800°C 时产物的分散性最好。

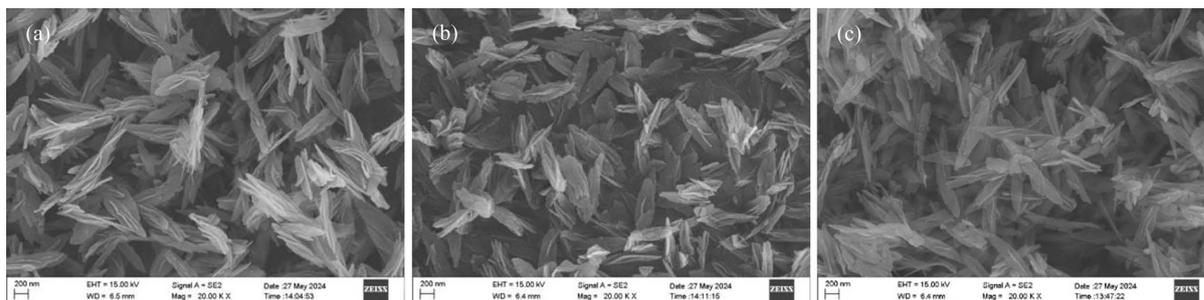


Figure 5. SEM images of synthetic products calcined at different temperatures: (a) $T = 600^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 800^{\circ}\text{C}$; (c) $T = 1000^{\circ}\text{C}$
图 5. 不同焙烧温度下合成产物的 SEM 图片: (a) $T = 600^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 800^{\circ}\text{C}$; (c) $T = 1000^{\circ}\text{C}$

3.2.3. 焙烧产物的发光性能

不同温度下焙烧 2 h 制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 的激发和发射光谱如图 6 所示。

图 6(a) 为 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 在 543 nm 的监测波长测得的激发光谱图谱。由图可见, 最强激发峰位于 400 nm 附近, 对应于 Tb^{3+} 的 ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_4$ 跃迁, 且随着煅烧温度的升高, 该激发峰的强度逐渐增加。此外, 还出现多条位于 342 nm、352 nm、368 nm、378 nm 的激发峰, 分别对应于 Tb^{3+} 离子的 ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{G}_2$ 、 ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_2$ 、 ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{G}_6$ 、 ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_3$ 跃迁。

图 6(b) 为 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 在 400 nm 的激发波长测得的发射光谱图谱。由图可知, 不同煅烧温度样品所对应的发射峰位置基本一致, 均来自于 Tb^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_j$ ($j = 3, 4, 5, 6$) 能级跃迁发射。最强的发射峰中心位于 543 nm, 对应于 ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ 的电子跃迁。由图可知, 随着煅烧温度的增加, 发光强度逐渐增加。

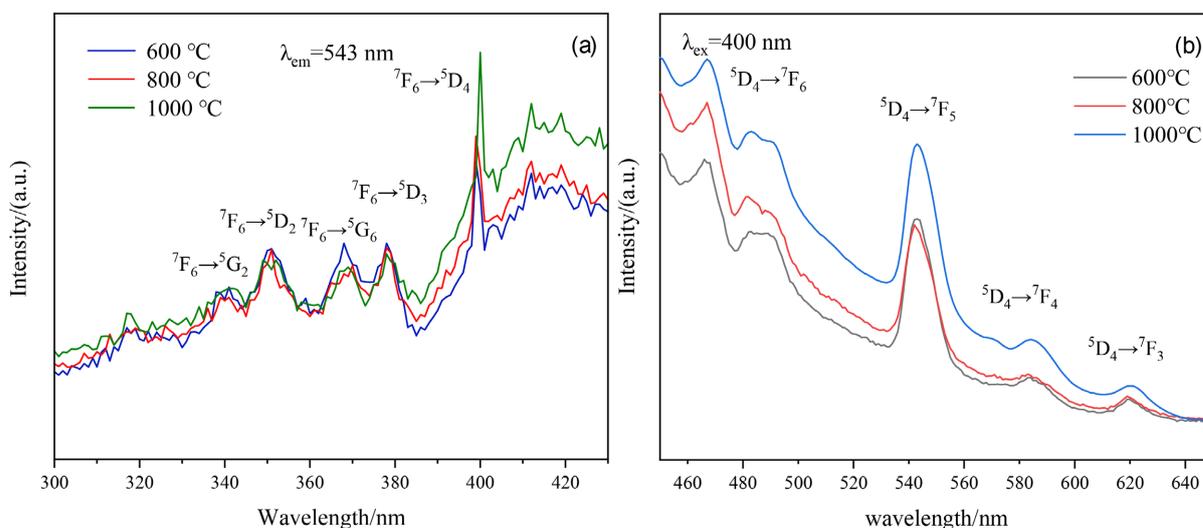


Figure 6. Excitation (a) and emission (b) spectra of $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ calcined at different temperatures

图 6. 不同焙烧温度后 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ 的激发(a)和发射(b)光谱

焙烧温度从 600°C 到 1000°C, 产物由立方晶系的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 变为四方晶型的 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$, 晶格发生畸变,

Tb³⁺离子格位对称性降低。⁵D₄→⁷F₆为磁偶极跃迁,其强度对对称性不敏感,⁵D₄→⁷F₅为电偶极跃迁,强度对对称性高度敏感,根据晶体场理论,对称性的降低会使得⁵D₄→⁷F₅的跃迁概率增加,因此,随着焙烧温度的增加,发光强度逐渐增加[20]。

3.2.4. 焙烧产物的 CIE 色度坐标分析

不同温度下焙烧 2 h 制备的 Al₂O₃:Tb³⁺的 CIE 色度图如图 7 所示。

图 7 是通过 Chromaticity Diagram 对图 6(b)中发射光谱数据进行色坐标计算获得的 CIE-1931 色度图与局部放大图。焙烧温度为 600℃、800℃、1000℃对应的色坐标依次为(0.24004, 0.33964)、(0.23335, 0.32651)和(0.23933, 0.35069),由图可知,焙烧温度不同,其 CIE 色度略有变化,为颜色相近的绿色。

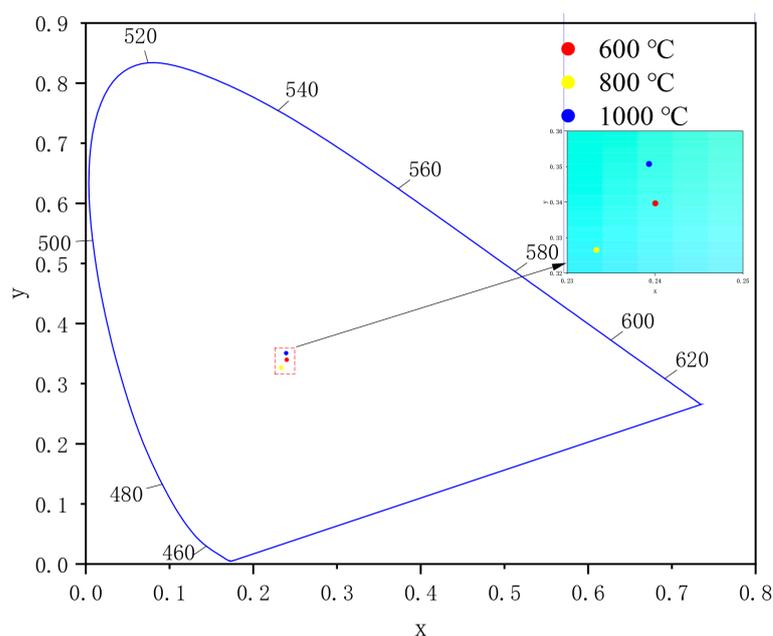


Figure 7. CIE chromaticity diagrams and partial enlarged view of Al₂O₃:Tb³⁺ at different calcination temperatures
图 7. 不同焙烧温度后 Al₂O₃:Tb³⁺ CIE 色度图与局部放大图

4. 结论

(1) 在 180℃下保温 30 min 的微波水热条件下,可以制备出结晶良好的叶片状勃姆石。在 600℃~1000℃的焙烧过程中,前驱体经历了由 γ -Al₂O₃ 到 δ -Al₂O₃ 的相变过程,焙烧后的样品形貌无太大差别,均呈叶片状形貌。

(2) 焙烧前后的激发发射光谱研究表明, Tb³⁺离子掺杂的样品的发光均来自于 Tb³⁺离子的 ⁵D₄→⁷F_j (j = 3, 4, 5, 6)能级跃迁发射。随着焙烧温度的提高,发光强度趋于增强。

(3) 焙烧温度对稀土离子发光颜色有略微的影响,颜色变化不大, Al₂O₃:Tb³⁺的 CIE 色度为绿色。

基金项目

辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJKZ0480)。

参考文献

- [1] 贾松,王雪飞,史玮诗. 稀土掺杂上转换发光材料的研究进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(2): 114-136.

- [2] 雷清华. 超重力法制备稀土掺杂氧化铝发光纳米材料及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [3] Cao, R., Zhang, J., Wang, W., Hu, Z., Chen, T., Ye, Y., *et al.* (2017) Preparation and Photoluminescence Characteristics of $\text{Li}_2\text{Mg}_3\text{SnO}_6: \text{Mn}^{4+}$ Deep Red Phosphor. *Materials Research Bulletin*, **87**, 109-113. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.11.031>
- [4] Tsai, Y., Huang, Y.L. and Lin, C.C. (2023) Infrared to Short-Wave Infrared-Emitting Phosphors for Light-Emitting Diode Applications. *ACS Applied Optical Materials*, **1**, 1104-1113. <https://doi.org/10.1021/acsaoom.3c00012>
- [5] 侯欣怡, 黄灏彬, 李一凡, 等. 稳定与多变—— α -氧化铝: 从性质、合成到应用[J]. 中国陶瓷工业, 2022, 29(5): 30-38.
- [6] 商连弟, 王宗兰, 揣效忠, 等. 八种晶型氧化铝的研制与鉴别[J]. 化学世界, 1994(7): 346-350.
- [7] Zhao, M., Sik, A., Zhang, H. and Zhang, F. (2022) Tailored NIR-II Lanthanide Luminescent Nanocrystals for Improved Biomedical Application. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2220239. <https://doi.org/10.1002/adom.202202039>
- [8] 杨秋红, 曾智江, 徐军, 等. Ti: Al_2O_3 透明多晶陶瓷光谱特性分析[J]. 人工晶体学报, 2005(5): 97-101.
- [9] 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(3): 22-25+28.
- [10] 覃利琴, 庞起, 陶萍芳, 等. 溶剂热法合成 $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Tb}^{3+}$ 绿色荧光粉及其发光性能[J]. 玉林师范学院学报, 2014, 35(5): 42-49.
- [11] 陈艳林, 严明, 孙义明, 等. 乳液法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉及其发光性能研究[C]//2011 神经网络与模糊系统国际学术会议. 2011: 210-213.
- [12] 林丙臣. 稀土离子掺杂 γ - Al_2O_3 材料的溶胶凝胶法制备及光谱性质研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2007.
- [13] 刘佃光. 掺杂氧化铝的形貌控制及其光致发光性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
- [14] 朱振峰, 刘佃光, 李广军, 等. 微波水热合成球形 $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}$ 及发光性能研究[J]. 功能材料, 2011, 42(7): 1339-1341.
- [15] 薛红燕, 曹旗, 刘芳芳, 等. 微波辅助分步沉淀法制备核壳结构勃姆石粉体[J]. 山东化工, 2015, 44(15): 17-20.
- [16] 张熙曼, 吴秀勇. 微波水热法制备核壳结构勃姆石粉体[J]. 泰山医学院学报, 2013, 34(7): 532-535.
- [17] 张娟娟. 微波与常规水热法合成柠檬酸锌的对比研究[J]. 当代化工, 2023, 52(8): 1810-1813+1818.
- [18] 周粮. 勃姆石纳米棒的水热合成及其气凝胶的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [19] Jiao, W., Wu, X., Xue, T., Li, G., Wang, W., Wang, Y., *et al.* (2016) Morphological Controlled Growth of Nanosized Boehmite with Enhanced Aspect Ratios in an Organic Additive-Free Cationic-Anionic Double Hydrolysis Method. *Crystal Growth & Design*, **16**, 5166-5173. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b00723>
- [20] 张婧, 李增和. Tb^{3+} 离子掺杂的镁铝类水滑石的制备及其发光性能研究[J]. 稀土, 2018, 39(5): 80-87.