

# Eu<sup>2+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup> 掺杂铝酸盐制备长余辉发光材料研究

刘 勤<sup>1</sup>, 张万明<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>西昌学院理学院, 四川 西昌

<sup>2</sup>西昌学院资源与环境学院, 四川 西昌

收稿日期: 2021年9月1日; 录用日期: 2021年10月7日; 发布日期: 2021年10月15日

## 摘 要

本研究以Eu<sup>2+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup>掺杂九水合硝酸铝、硝酸铈, 硼酸为助熔剂, 尿素为还原剂、燃烧剂, 在600℃~610℃下低温燃烧法合成黄绿色SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup>长余辉发光材料; 主要研究Eu<sup>2+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup>稀土元素掺杂量, 硼酸、尿素添加量对样品余晖时长的影响。结果得出: 在尿素/硝酸盐为两倍, 硼酸用量为20%, Eu/Dy/La = 1:1:1时, 制备的SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup>长余辉材料发光强度和余晖时间最佳。

## 关键词

铝酸铈, 发光材料, 燃烧法合成, 稀土

# Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, La<sup>3+</sup> Doped Aluminum Acid Preparation Study of Long Afterglow Luminescent Materials

Qin Liu<sup>1</sup>, Wanming Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Xichang University, Xichang Sichuan

<sup>2</sup>College of Resources and Environment, Xichang University, Xichang Sichuan

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 15<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

In this paper, the yellow-green color  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  long afterglow luminescent material was synthesized by low-temperature combustion method at  $600^\circ\text{C}\sim 610^\circ\text{C}$  with  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  doping aluminum nitrate nonahydrate and strontium nitrate, boric acid as flux and urea as reducing agent and incendiary agent; and discuss the influence of  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  and  $\text{La}^{3+}$  rare earth elements doping amount and urea borate addition amount on the residual light duration of samples. The results show that the best luminescence intensity and afterglow time of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  were obtained when urea/nitrate was twice, the amount of boric acid was 20% and  $\text{Eu}/\text{Dy}/\text{La}$  was 1:1:1.

## Keywords

Strontium Aluminate, Luminescent Material, Combustion Synthesis, Rare Earth

Copyright © 2021 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

长余辉材料是长余辉发光材料的简称, 又称为荧光材料、蓄光材料, 本质是一种光致荧光材料[1]。其吸收外来能量时(日光、紫外光), 能够在暗处发出明显荧光, 长期被应用为一种绿色节能材料。广泛应用于: 照明、交通、消防、船舶行业、涂料装饰中等[2]。在陶瓷釉料中添加防水性较好的发光材料粉末, 可制备出夜光效果好的陶瓷釉料, 大大增加了陶瓷的装饰效果和使用范围[3]。

长余辉材料中铝酸盐长余辉发光材料以其产品发光性能较稳定、余晖时间较长等特点, 引起了科学界的广泛关注[4], 并且最早应用于工业中。 $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 长余辉发光材料是发光材料中具有优良品质的发光材料, 以其极高的发光强度、较长的余晖时长, 近年来, 许多文献和专利都积聚在这种发光材料上[5]。相比于传统的硫化物发光材料, 稀土离子掺杂铝酸盐长余辉材料没有放射性元素, 能够做到对环境友好型、对人体无害。稀土铝酸盐长余辉材料有多种制备方法, 根据文献探究使用有: 电弧法[6]、高温固相法[7]、溶胶-凝胶法[8]、水热合成法[9]、低温燃烧合成法[10]。

低温燃烧合成法是按一定比例混合金属硝酸盐、有机还原剂和稀土硝酸溶液, 放入马弗炉燃烧, 反应物反应过程中自身燃烧放出的能量能够加快反应的进行, 燃烧后所得产物为长余辉发光材料[11]。文献中第一次出现燃烧法制备  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$  发光材料是印度的学者 Kingsley [12], 陈吉涛等人采用燃烧法研究  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  长余辉发光材料开辟了国内科研新边界[13]。低温燃烧法作为制备发光材料的新兴技术, 拥有高效、节能、产物疏松易粉碎、不需要气氛保护等特点, 目前已经应用在发光材料的合成中。液相的方式使反应物充分均匀的混合在一起, 能使反应物反应得更加完全, 反应的温度更低, 具有更加节能、简单、高效的特点。

铝酸盐作为发光基质母体, 其本身无余辉效应, 只有在稀土元素作为激活剂的激发下有余辉性能。近年来, 许多研究仅限于 1 种或者 2 种稀土元素。本文采用掺杂稀土元素  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  的长余辉发光材料[14], 通过对比实验和讨论, 采用发光强度较好的稀土元素 La, 相比于掺杂两种稀土元素的  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  发光材料而言, 发光强度大大提高, 余晖时长延长到 32 min。

## 2. 制备与测试

### 2.1. 试验材料

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、 $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  (本试验采用添加试剂纯度为分析纯, 采用化学纯亦可)。

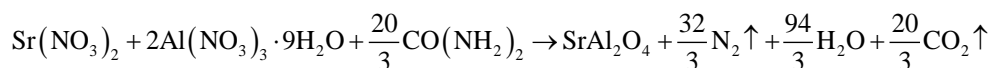
### 2.2. 合成方法

分别称量一定质量的稀土氧化物  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  于 100 mL 的烧杯中, 滴加少量稀释后的浓硝酸溶液加热后搅拌溶解成透明溶液(其中氧化镨的溶解在查阅资料后得知在滴加少量  $\text{H}_2\text{O}_2$  才能溶解), 冷却至室温后转移到 50 mL 的容量瓶中, 加蒸馏水定容配成 0.01 mol/L 的溶液 A [15]。

采用电子天平按一定摩尔质量称量 0.05 mol 的  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  和尿素, 并混合, 加入几滴的蒸馏水不断搅拌至溶液呈透明状, 形成溶液 B。

用量筒量取一定体积的溶液 A 滴加在溶液 B 中, 将完全溶解后的溶液倒入到坩锅内并立即放入提前预热到  $600^\circ\text{C}$ ~ $610^\circ\text{C}$  的马弗炉中, 待坩锅中溶液水分蒸发完全后, 可看到坩锅中溶液开始剧烈沸腾冒泡, 而后燃烧发出燃烧光芒, 并放出大量刺激性气味, 燃烧反应十分迅速, 整个反应时间 5 分钟左右, 燃烧后的产物呈白色蓬松中间有细微小孔的云朵形状, 放于研钵中进行研磨后可得到 200 目的  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ :  $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  发光材料粉末。将其置于阳光或者紫外光等光源下照射激发, 一段时间后移至暗处可观察到粉末发出黄绿色长余辉。

基体合成的反应式为:



实验研究工艺流程与研究设计图如图 1 所示。

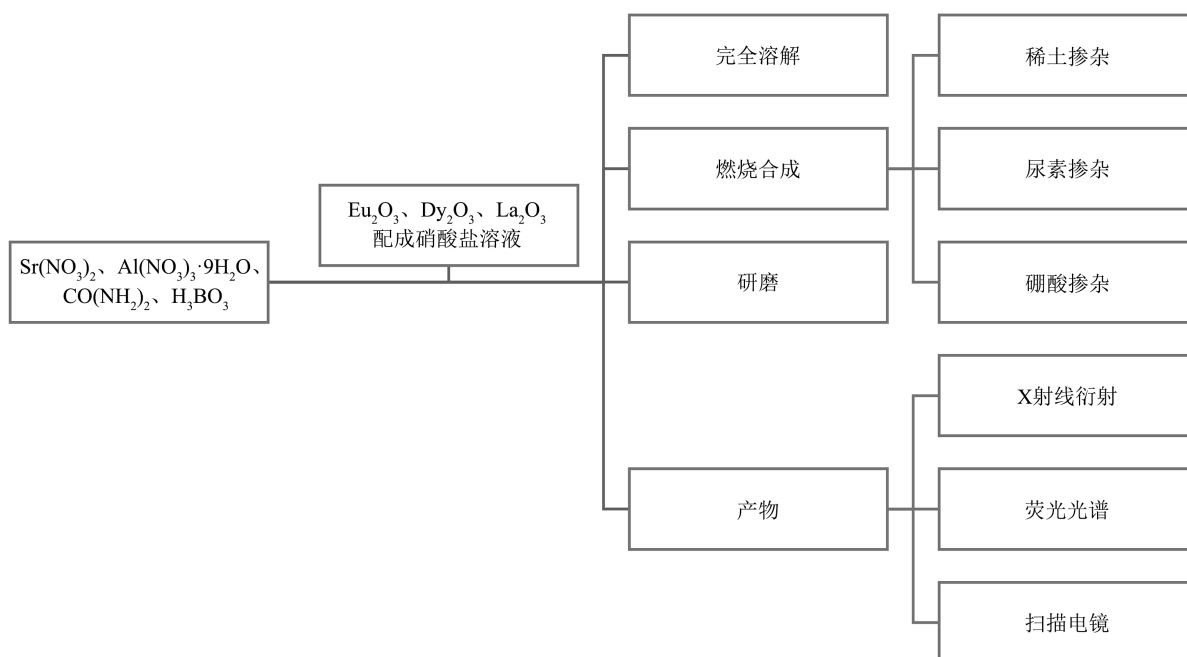


Figure 1. The experimental research process flow and research design drawing

图 1. 实验研究工艺流程与研究设计图

### 2.3. 样品测试

采用 DX-2700 型号的 X 射线衍射仪对稀土元素掺杂的铝酸盐长余辉材料进行物相分析, 管电压为 40 KV, 管电流为 25 mA, 扫描角度为  $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$ , 扫描速度 0.05 deg/min。采用 Apreo S HiVac 型扫描电镜, 观察研磨后的稀土元素掺杂的铝酸盐长余辉材料粉末的微观形貌。采用日立 F-7100 型荧光光谱仪, 室温下测量长余辉发光材料的荧光发射光谱, 电压: 150 W, 电源: 氙灯, 狭缝宽度: 5.0 nm, 扫描速度: 2400 nm/min。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1. 硼酸添加量对燃烧产物的影响

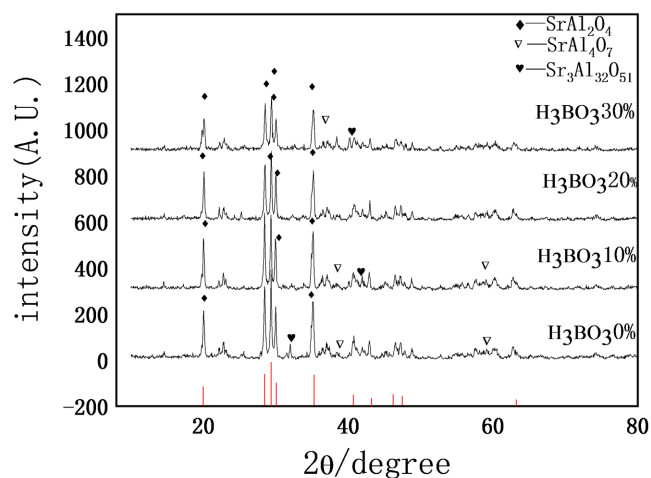
为分析不同硼酸添加量对样品粉末晶体结构的影响, 本实验对硼酸掺杂摩尔比分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3 的样品进行燃烧反应, 并对所制备的产品进行 X 射线衍射图谱分析。

实验过程中所用的尿素为硝酸盐的两倍, 马弗炉预设温度为  $610^{\circ}\text{C}$ , 改变硼酸的用量(见表 1)。按照图 1 燃烧法工艺简易流程图来进行试验。图 2 为四种硼酸添加量的 XRD 衍射图谱。

**Table 1.** Boric acid dosage and product number

**表 1.** 硼酸用量与产品编号

样品序号	P1	P2	P3	P4
硼酸用量的摩尔比值	0	0.1	0.2	0.3



**Figure 2.** XRD comparison graph of products with different boric acid additives

**图 2.** 不同硼酸添加量产物的 XRD 比较图

从图 2 中分析可知, 不同的硼酸添加量对  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  物相的形成有影响。硼酸加入量为 0 的样品中根据 XRD 图谱分析得出含有部分的  $\text{SrAl}_4\text{O}_7$  和  $\text{Sr}_3\text{Al}_{32}\text{O}_{51}$  相。其中添加量为 10% 时, 物相中有较多的杂相。硼酸添加量为 20% 时, 燃烧后的样品为黄色, 其物相分析图谱与  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  标准卡片较一致[16]。

对比实验中的样品在紫外灯照射 10 分钟后, 添加量为 20%、30% 的余辉强度较强, 余辉时长中硼酸添加量 20% 可达 25 min。其中不加硼酸的样品烧结后产品的体积较小, 为淡黄色, 紫外光激发后无发光现象[17]。

### 3.2. 尿素添加量对产物余辉时长的影响

尿素是整个燃烧合成反应过程中的作燃烧剂, 是起到燃烧的关键, 并且尿素在实验中可部分还原稀土元素为+2价。为研究在整个反应过程尿素使用量对发光材料产物发光强度和余晖时长的影响, 按照还原剂/氧化剂 = 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1 五组尿素添加量进行实验, 在 600°C~610°C 下进行燃烧反应, 其中添加助熔剂硼酸的摩尔比均为 20%。实验结果如表 2 所示。

**Table 2.** The physical performance of the product is affected by different urea additions

**表 2.** 不同尿素添加量对产品物理性能影响

编号	N1	N2	N3	N4	N5
尿素/氧化剂	1:1	1.5:1	2:1	2.5:1	3:1
产物颜色	黄色	白色	白色	黄色	黄色
硬度大小	较松	较软	质脆	较软	疏松

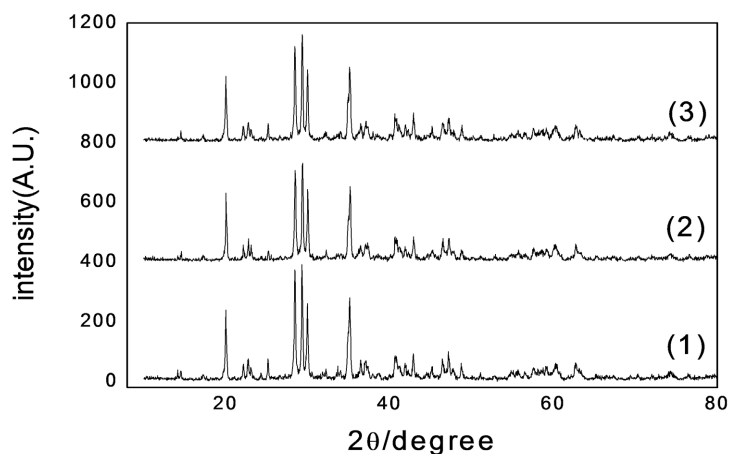
当尿素/氧化剂 = 2.5:1 时此时燃料富余, 燃烧反应剧烈进行, 产生大量刺鼻性气, 燃烧产物体积有增大的趋势, 质地较软[18]。在标准对色箱中采用紫外灯照射 10 分钟后关闭灯源, 计时激发后的 N3 组尿素添加量为 2:1, 样品的余晖时长可达到 32 min。

综合上面分析讨论, 当尿素与氧化剂硝酸盐质量比例为 2:1 时, 反应较快, 燃料剂用量合理, 产物硬度较小, 蓬松, 颗粒细小。所以尿素的较好用量为氧化剂(硝酸铝、硝酸铈)的两倍。

### 3.3. 不同稀土添加量对产物晶型的影响

为研究掺杂不同稀土元素对整个  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  物相生成的影响, 本实验通过采取三种不同比例:  $\text{Eu}/\text{Dy} = 1:2$ 、 $\text{Eu}/\text{Dy}/\text{La} = 1:1:1$ 、 $\text{Eu}/\text{La} = 1:2$  进行实验(见表 3)。燃烧反应在温度 600°C~610°C 下, 反应时间 5 min 左右, 尿素用量为硝酸盐的 2 倍, 硼酸用量的摩尔比为 20%。

图 3 不同稀土  $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  的掺杂情况的 XRD, 对其结果进行分析: 发现燃烧反应产物中除  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  相外, 并未发现其他物相, 故可以得出掺杂少量的稀土元素  $\text{Eu}/\text{Dy}/\text{La}$  对物质  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  物相衍射峰并无影响, 没有改变物质  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  的晶体结构。



**Figure 3.** XRD map of samples doped with different rare earth elements

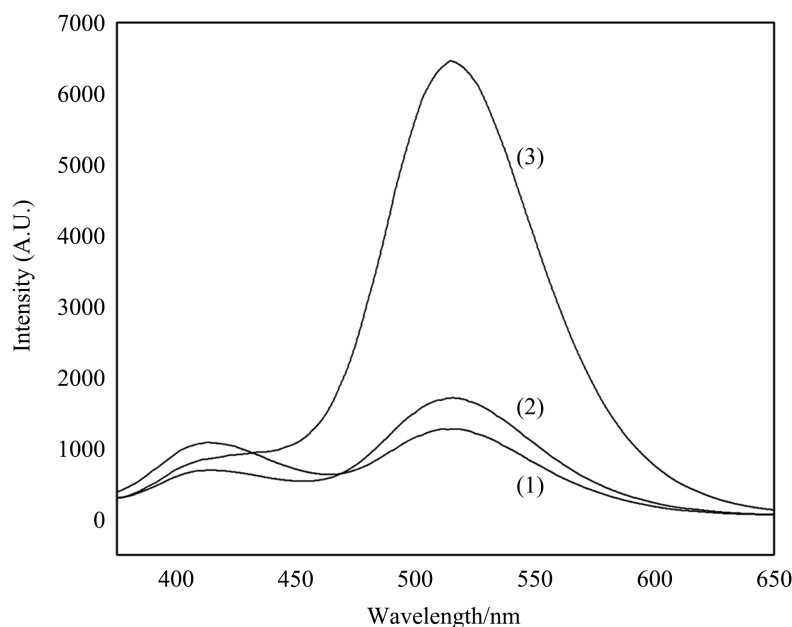
**图 3.** 不同稀土元素掺杂的样品的 XRD 图谱

**Table 3.** Matrix expressions and rare earth doping**表 3.** 基质表达式与稀土掺杂量

基质分子式	稀土掺杂量/% (摩尔百分比)			产品编号
	Eu	Dy	La	
$\text{Sr}_{0.98}\text{Al}_2\text{O}_4$	0.01	0.02	0	(1)
$\text{Sr}_{0.97}\text{Al}_2\text{O}_4$	0.01	0.01	0.01	(2)
$\text{Sr}_{0.98}\text{Al}_2\text{O}_4$	0.01	0	0.02	(3)

### 3.4. 产物的荧光性能分析

按表 3 研究稀土  $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  掺杂量对铝酸盐长余辉发光材料的影响。采用日立 F-7100 型荧光光谱仪对燃烧反应后的样品铝酸盐长余辉材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  进行荧光光谱测试。应用碱土铝酸盐的激发波长 340 nm 的紫外光激发反应后的粉末状产品, 从图 4 可以看到 3 个样品的发射主峰峰值均位于 514 nm 左右, 其中  $\text{Eu}/\text{Dy} = 1:2$ 、 $\text{Eu}/\text{Dy}/\text{La} = 1:1:1$  两种实验样品有两个发射峰, 两个峰的位置大致重合,  $\text{Eu}/\text{La} = 1:2$  只有一个发射峰。其中主要的发射峰位于 514 nm 处, 可以推测是发光中心稀土  $\text{Eu}^{2+}$  的电子部分跃迁导致整个产品在受到外来光源激发的情况下发出黄绿色光[19]。该激发光范围属于可见光范围, 是肉眼可见的黄绿色, 与实际样品发光颜色一致[20]。



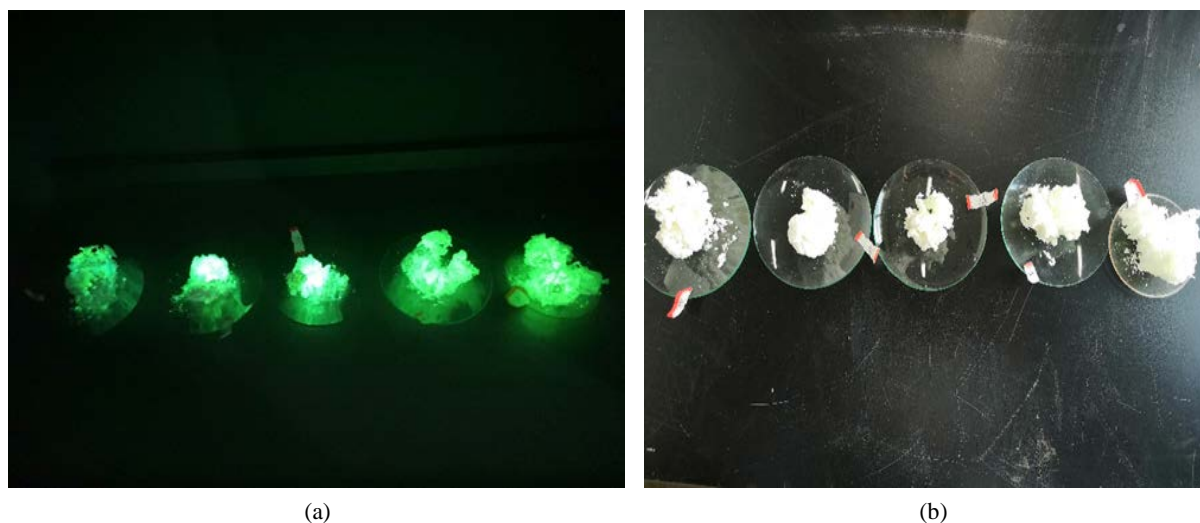
**Figure 4.** Fluorescent emission spectra of samples doped with different rare earth elements

**图 4.** 不同稀土元素掺杂的样品的荧光发射光谱

稀土元素  $\text{Eu}^{2+}$  可激活不发光的母体基质  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  从而具有发光潜性, 在外来光源的激发下, 产品移于暗处可发光, 发光颜色为明显可见的黄绿色[21]。

燃烧反应后所得产品如图 5 所示, 其中 A 图为从马弗炉中取出后的照片, B 图为在紫外灯照射激发后置于黑暗处所得的照片。

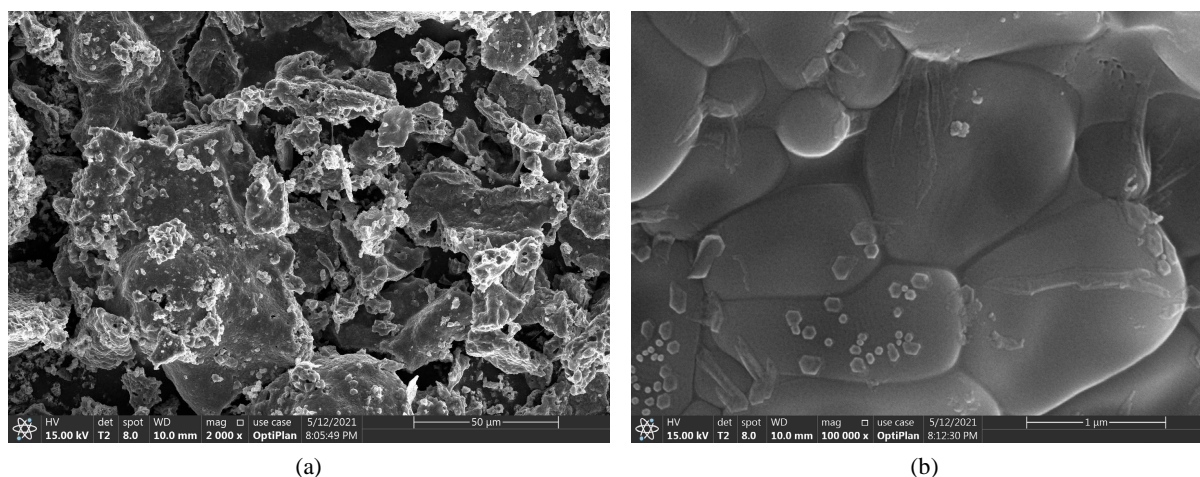




**Figure 5.** Before-and-after photo of the excitation of the sample  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$   
**图 5.** 样品  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  的激发前后对比照片

### 3.5. 产物 SEM 图像分析

图 6 为燃烧反应后的长余辉材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{La}^{3+}$  的 SEM 照片, 观察放大 100,000 倍的照片 B 可以看到产物中有晶体生成, 晶体排列紧密, 晶型的大小为  $1 \mu\text{m}$  左右。根据文献[22]的研究结论可知: 燃烧法实验过程中马弗炉设置温度为  $610^\circ\text{C}$ , 发光产物晶体的生成的关键元素在于整个燃烧反应的温度。而燃烧法制备长余辉发光材料是在液相混合的情况下进行的, 预设的马弗炉温度只起到将溶液蒸干的作用, 到达反应物的“着火点”, 燃烧反应进行时最高温度可达到  $1600^\circ\text{C}$ , 故燃烧法制备的长余辉材料晶体生成效果好, 整个反应时间迅速。



**Figure 6.** Sample ( $50 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ )  
**图 6.** 试样( $50 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ )

观察放大 2000 倍的照片 A 可以看出电镜扫描下的产物疏松多孔, 可解释肉眼下观察到产物呈蓬松云朵状, 用研钵稍加研磨即可到细致粉末。正如前面陈述, 反应过程中产生大量气体, 如氨气、二氧化氮等, 从而使产物呈现出疏松多孔的云朵状[23]。

## 4. 结论

1) 用燃烧法合成稀土元素  $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  掺杂铝酸盐长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$ , 当稀土元素  $\text{Eu}/\text{Dy}/\text{La} = 1:1:1$  时, 其余辉强度大大增加、余辉时长较两种稀土元素掺杂铝酸盐长余辉发光材料的产物大大增强, 制备  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  铝酸盐长余辉材料对工业生产中使用长余辉材料有着重要意义。

2) 尿素用量为氧化剂(硝酸铝、硝酸铈)的两倍时, 所得样品  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$  铝酸盐长余辉材料产物的发光性能最佳。

3) 硼酸为整个反应的助熔剂, 可降低燃烧反应的温度, 当不使用硼酸时产物无发光效果, 说明硼酸的使用对产物的发光有影响。助熔剂硼酸的使用有助于发光基质  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  物相的生成, 最佳使用量为摩尔质量比 20%。

## 致 谢

时光荏苒, 在我毕业论文即将完成之际, 大学四年的本科生涯也即将结束。在这四年里的学习和实践的过程中, 老师们、朋友们和家人给予了莫大的关怀和帮助, 让我无比感激。回顾四年时光, 在此, 我深深地感谢给予了关心和帮助的家人、老师和朋友。

首先, 由衷地感谢我的父母, 给予了我生命, 从小为我提供了温暖、无所忧虑的生活氛围, 每一次的信任和支持都足以让我对未来全力以赴。在未来, 我更希望自己能做一个温暖的人, 更好地担任家庭里的角色, 以一颗感恩之心回报家人。

其次, 我最想感谢的是我的论文指导老师张万明教授。张老师为人随和, 从开始进入课题组, 到后面的毕业论文的选题和定稿, 您一直悉心教导我, 不断鼓励我们, 教导我要以严格的要求来约束自己在学习上的进步, 同时在论文的定题、修改、排列上帮助了我许多, 在学习方面给予了我极大的信心和帮助。我在实验上的每一步成长都离不开张老师的悉心指导和鼓励, 在此, 对于张老师的帮助和关怀, 呈上我最诚挚的谢意!

感谢刘洪老师对我学习和论文完成的帮助和支持。刘老师从我实验的数据分析, 过程, 到论文的撰写, 都给予了耐心的指导和无私的帮助, 在我学习、实验遇到难题时, 这里要特别感谢刘老师十分耐心的指导我、鼓励我, 帮助我学会了一些有难度的专业词汇, 实验能够如期完成离不开刘老师的辛勤付出。在此, 我要向刘洪老师表示最衷心的感谢!

此外, 学校理学院的许多老师也都给予了我无私的帮助与指导, 在此特别感谢何科翰老师、靳必强老师对我学习上的无私付出和给予的帮助, 在我迷茫时, 鼓励我、为我指导方向。

最后, 感谢身边一群可爱朋友的陪伴, 让我的大学四年有了炫彩缤纷的青春颜色。

## 基金项目

基金项目: 四川省质量工程项目(川教函[2019] 31 号); 西昌学院两高课题(LGLZ201812); 凉山州人力资源与社会保证局学术带头人重点项目(ZXS201802)。

## 参考文献

- [1] 邢玉凯. 基于长余辉发光材料的消防安全标志技术[J]. 山西建筑, 2017, 43(22): 235-236.
- [2] 吴家亮. 稀土掺杂铝酸铈长余辉发光材料制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
- [3] 卢显儒, 张国兴. 陶瓷发光釉料的研制[J]. 河北陶瓷, 1994, 43(2): 9-12.
- [4] 张玉军, 朱仲力, 谭砂砾. 蓄能发光陶瓷釉料的研究[J]. 中国陶瓷, 1999, 20(2): 9-11.



- [5] 唐明道. 蓄光型自发光材料及制品发展概况[J]. 光机电信息, 2003, 13(2): 8-14.
- [6] Meng, R.X. (2000) The Preparation of Electric Arc Method and Spectral Analysis on Long Persistence Luminescent Chinaware of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ . *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **20**, 201-208.
- [7] 齐晓霞, 赵军武. 长余辉材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  的制备及发光性能研究[J]. 半导体光电, 2006, 27(5): 573-577.
- [8] 袁曦明, 许永胜, 于江波, 等. 溶胶-凝胶法制备长余辉发光料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  的研究[J]. 稀土, 2002, 23(4): 33-38.
- [9] 李东平, 缪春燕. 水热法合成  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  长余辉材料[J]. 江西化工, 2005(1): 95-96.
- [10] 李健宇. 稀土发光材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 134-136.
- [11] 储志强, 刘东华, 周康宁, 等. 碱土铝酸盐长余辉发光材料的研究进展与发展方向[J]. 金属材料与冶金工程, 2019, 47(1): 27-32.
- [12] Wakakuwa, M., Makishima, A. and Kawashima, M. (1990) Synthesis of Gel-Derived Cellular Alumina. *Journal of Materials Science Letters*, **9**, 230-241. <https://doi.org/10.1007/BF00726527>
- [13] 陈吉涛. 长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  的燃烧法合成与荧光性能研究[C]//第七届全国颗粒测试学术会议、2008 上海市颗粒学会年会论文集. 上海: 中国粉体技术杂志社, 2008: 107-110.
- [14] 赵长亮, 尹盛玉, 宋华杰, 等.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  长余辉发光材料的燃烧法合成及其发光性能[J]. 中南民族大学学报, 2007(2): 7-10.
- [15] 喻俊, 黄志良. 燃烧法制备  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  长余辉发光材料[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 21(2): 73-77.
- [16] 常素玲. 长余辉发光材料的燃烧法制备及其发光性质研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [17] 柴颂刚, 张力, 石光, 等. 燃烧法合成长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ [J]. 华南师范大学学报, 2007, 12(1): 82-88.
- [18] 向周丹. 稀土铝酸锶发光材料的低温燃烧合成研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [19] 张玉奇, 郑泽根, 黄佳木, 等. 蓄光发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  及其常温磷光光谱分析[J]. 无机化学学报, 2003, 12(10): 1129-1132.
- [20] 肖志国, 罗昔贤, 夏威, 等. 长余辉发光材料在陶瓷行业的应用研究[J]. 中国稀土学报, 2001, 19(6): 561-565.
- [21] 孙文周, 赵文娟, 蒋亮. 燃烧法合成超细  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  长余辉发光材料[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(3): 26-29.
- [22] Katsumata, T., Nabae, T., Sasajima, K., *et al.* (1997) Effects of Composition on the Long Phosphore-Scent  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  Phosphor Crystals. *ChemInform*, **28**, 243-245. <https://doi.org/10.1002/chin.199752005>
- [23] 沈毅, 张平, 郑振太, 等. 燃烧法合成铝酸锶基质发光粉体的研究[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(6): 1125-1128.