

# 钐、铈-3-噻吩乙酸二元、三元配合物的合成及表征\*

## Synthesis and Characterization of the Binary and Ternary Complexes of Rare Earth with 3-Thiopheneacetic acid and 1,10-Phenanthroline

梁春群,张丽霞\*\*

LIANG Chun-qun,ZHANG Li-xia

(广西师范学院化学与生命科学学院,广西南宁 530001)

(College of Chemistry and Life Science, Guangxi Teachers Education University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

**摘要:**以 3-噻吩乙酸为第一配体合成钐、铈的二元配合物,以 3-噻吩乙酸为第一配体,phen 为第二配体合成钐、铈的三元配合物,通过元素分析和 EDTA 滴定分析确定其通式为  $REY_3 \cdot 2H_2O$ 、 $REY_3 \cdot phen$  ( $RE=Eu, Sm; Th=3$ -噻吩乙酸根,phen=邻菲罗啉)后,测定 4 种配合物的红外光谱、紫外光谱和荧光光谱及 TG-DTG 曲线。结果表明,由于第二配体的加入,对稀土离子的发光起到了敏化作用,增强了稀土离子的发光强度,并且三元配合物热稳定性比二元配合物的热稳定性好。

**关键词:**  $Sm^{3+}$   $Eu^{3+}$  3-噻吩乙酸 1,10-邻菲罗啉 发光性质

中图分类号:O614.33 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2012)01-0064-05

**Abstract:** Four solid complexes of rare earth with 3-thiopheneacetic acid and 1,10-phenanthroline were synthesized, and the general formula of these complexes was proved to be  $REY_3 \cdot 2H_2O$  and  $REY_3 \cdot phen$  ( $RE=Eu, Sm; Th=3$ -Thiopheneacetic acid, phen= Phenanthroline) by element analyse and titration analyse. These complexes were characterized by IR spectroscopy, UV-spectroscopy, Fluorescent spectrum and TG-DTG. The results showed that  $RETh_3 \cdot phen$  had better thermal stability than  $REY_3 \cdot 2H_2O$ , and that adding the second ligand could enhance  $Eu^{3+}$  or  $Sm^{3+}$  ion fluorescence intensity.

**Key words:** Europium (III), samarium (III), 3-thiopheneacetic acid, 1,10-phenanthroline, luminescence properties

稀土元素具有外层电子结构基本相同,内层 4f 电子能级相近的特殊电子构型,因而在电、光、磁等方面有独特的性质。光致发光稀土有机配合物荧光材料作为无机发光、有机发光研究的交叉学科,有着十分重要的理论研究意义和实际应用价值。选择某些可以产生荧光的稀土离子与在紫外区及近紫外区具有良好吸收光的有机配体来制备有机稀土发光配合

物是常用的方法。对于稀土发光配合物,很多研究主要集中在中心离子的组成及配体的选择上,尤其是稀土离子与羧酸、吡啶环所形成的三元配合物可以发出更强的荧光,日益受到人们的重视<sup>[1~9]</sup>。

稀土元素能够通过 O, S 等原子的配位与许多有机化合物形成配合物,3-噻吩乙酸是一种杂环芳香羧酸,但是以其作为配体与稀土离子配位的研究很少。本文以 3-噻吩乙酸为配体,在溶液中合成钐、铈-3-噻吩乙酸二元配合物、以 3-噻吩乙酸为第一配体、邻菲罗啉为第二配体合成钐、铈的三元配合物,通过元素分析确定其通式为  $RE(Th)_3 \cdot 2H_2O$  及  $RE(Th)_3 \cdot phen$  ( $RE=Eu, Sm; Th=3$ -噻吩乙酸根,phen=邻菲罗啉)后,测定 4 种配合物的红外光谱、紫外光谱和荧光光谱及 TG-DTG 曲线。

收稿日期:2011-09-07

修回日期:2012-01-13

作者简介:梁春群(1970-),男,硕士,讲师,主要从事高分子材料及无机材料研究。

\* 广西教育厅基金项目(201010LX306)和广西师范学院基础研究基金项目(0710A001)资助。

\*\* 通讯作者。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂

稀土氧化物  $RE_2O_3$  ( $RE = Eu, Sm$ ) 由天津市津科精细化工研究所提供, 纯度 99.9%。3-噻吩乙酸 (3-Thiopheneacetic acid) 是上海化学试剂公司产品, 为分析纯。1,10-邻菲啰啉 (1,10-Phenanthroline) 是上海化学试剂公司产品, 其它试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器和测试条件

元素分析用美国 PE-2400 Series II 元素分析仪测定。Nicolet NEXUS 670 Fr-IR 型红外光谱仪, KBr 压片, 记录光谱范围为  $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。北京普析通用仪器有限责任公司 TU-190 双束紫外可见光分光光度计, 日本岛津 Hitachi F-3010 型荧光分光光度计 (激发和发射狭缝均为  $3.0 \text{ nm}$ , 加滤光片 UV-42) 在室温下测定。Perkin-Elmer TGA7 分析仪的测试条件为: 氮气气氛, 流速为  $10 \text{ ml/min}$ , 测试温度范围为室温至  $800^\circ\text{C}$ , 升温速率  $10^\circ\text{C/min}$ 。

### 1.3 配合物的合成方法

#### 1.3.1 钐、铈氯化物制备

将相应的稀土氧化物和浓盐酸反应后, 加热浓缩到表面出现晶膜, 加  $20 \text{ ml}$  无水乙醇溶解, 得到稀土氯化物溶液。

#### 1.3.2 钐、铈-3-噻吩乙酸二元配合物合成

按  $1 \text{ mmol} : 3 \text{ mmol}$  的比例将稀土氯化物溶液加入到  $20 \text{ ml}$  3-噻吩乙酸 ( $3 \text{ mmol}$ ) 无水乙醇中。用稀氨水调节体系  $\text{pH}$  值 = 5.8 左右, 在  $60^\circ\text{C}$  左右搅拌  $30 \text{ min}$ , 再在室温中搅拌  $120 \text{ min}$  得到白色粘稠状沉淀, 室温静置  $24 \text{ h}$ , 将白色沉淀过滤, 用无水乙醇洗涤, 产品在  $50^\circ\text{C}$  下干燥至恒重。

#### 1.3.3 钐、铈-3-噻吩乙酸-邻菲啰啉三元配合物合成

在  $20 \text{ ml}$  3-噻吩乙酸 ( $3 \text{ mmol}$ ) 无水乙醇溶液中, 加入  $1 \text{ mmol}$  的邻菲啰啉, 将稀土氯化物的乙醇溶液加入到混合配体中, 用稀氨水调节体系  $\text{pH}$  值 = 5.8 左右, 在  $60^\circ\text{C}$  左右搅拌  $30 \text{ min}$ , 再在室温中搅拌  $120 \text{ min}$  得到白色粘稠状沉淀, 室温静置  $24 \text{ h}$ , 将白色沉淀过滤, 用无水乙醇洗涤得产品。产品在  $50^\circ\text{C}$  下干燥至恒重。

## 2 结果与分析

### 2.1 配合物的元素组成

配合物用硝酸和高氯酸的混合酸 (1 : 1) 消化处理后, 用二甲酚橙作指示剂, 采用 EDTA 滴定方法测定稀土 ( $Sm^{3+}, Eu^{3+}$ ) 含量。元素测定结果列于表 1。表 1 的数据表明, 测定结果与理论计算值相符合, 可

以确定二元配合物的组成为  $RETh_3 2H_2O$  ( $RE = Sm^{3+}, Eu^{3+}, Th = 3\text{-噻吩乙酸根}$ ), 三元配合物的组成  $RETh_3Phen$  ( $RE = Sm^{3+}, Eu^{3+}, Th = 3\text{-噻吩乙酸根}, Phen = 1,10\text{-邻菲啰啉}$ )。

表 1 配合物的元素组成分析结果

Table 1 Composition of the complexes

配合物 Complexes	RE (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
$SmTh_3 2H_2O$	24.31	35.22	—	2.91	15.60
	(24.66)	(35.88)	—	(3.12)	(15.74)
$EuTh_3 2H_2O$	24.23	35.63	—	2.84	15.52
	(24.85)	(35.32)	—	(3.11)	(15.70)
$SmTh_3 phen$	20.26	48.05	3.78	3.14	12.66
	(19.94)	(47.74)	(3.71)	(3.05)	(12.70)
$EuTh_3 phen$	20.49	47.34	3.82	2.64	12.48
	(20.11)	(47.64)	(3.71)	(3.04)	(12.70)

括号内为理论值。Brackets for the theoretical value.

### 2.2 红外光谱分析

配合物的红外吸收光谱如图 1 所示, 配合物主要吸收峰归属见表 2。与配体的红外光谱图比较, 配合物的 IR 谱带有较大变化, 但是各配合物的谱图相似, 说明各配合物的组成和结构相似。由表 3 中的数据可知, 3-噻吩乙酸的  $COOH$  的特征吸收峰  $\gamma_{C=O} = 1701 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\delta_{O-H} = 898 \text{ cm}^{-1}$  在形成配合物后均消失, 而出现了羧酸根的反对称  $\gamma_{as}(COO^-)$  和对称  $\gamma_s(COO^-)$  伸缩振动吸收峰, 这说明稀土与羧酸根中的氧发生了配位作用。对于二元配合物  $\gamma_{as}(COO^-)$  出现在  $1549 \text{ cm}^{-1}$ , 对于三元配合物  $\gamma_{as}$  出现在  $1606 \text{ cm}^{-1}$ ; 而对于  $\gamma_s(COO^-)$ , 二元配合物和三元配合物均出现在  $1427 \text{ cm}^{-1}$ 。在游离 phen 的 IR 谱中具有 4 个特征峰, 它们是  $\gamma_{C=N} = 1587 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\gamma_{C=C} = 1622 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\delta_{C-H} = 742 \text{ cm}^{-1}, 875 \text{ cm}^{-1}$ , 形成配合物后,  $\gamma_{C=N}, \gamma_{C=C}$  的吸收峰被掩盖,  $\delta_{C-H}$  的吸收峰发生红移, 表明 phen 中的 N 原子参与了配位。此外在  $545 \text{ cm}^{-1}$  附近出现了  $RE-O$  的伸缩振动吸收峰<sup>[9]</sup>。4 个配合物均在  $766 \text{ cm}^{-1}$  出现了噻吩环的特征吸收峰, 在  $3091 \text{ cm}^{-1}$  附近出现了噻吩环的 CH 振动吸收峰。在二元配合物中, 在  $3250 \text{ cm}^{-1}$  附近出现较强的羟基的伸缩振动吸收峰, 结合热重分析结果表明有水分子存在。

表 2 配合物的红外光谱数据

Table 2 Major IR spectra data of complexes

配合物 Complexes	$Th^- (\text{cm}^{-1})$			$Phen (\text{cm}^{-1})$		
	$\gamma_{Coo-as}$	$\gamma_{Coo-as}$	$\Delta\gamma$	$\gamma_{C=C}$	$\gamma_{C=N}$	$\delta_{C-H}$
$SmTh_3 2H_2O$	1549	1427	122			
$EuTh_3 2H_2O$	1549	1427	122			
$SmTh_3 phen$	1606	1427	177	被掩盖	被掩盖	849, 727
$EuTh_3 phen$	1606	1427	179	被掩盖	被掩盖	849, 730

### 2.3 紫外光谱分析

游离的邻菲啰啉的紫外最大吸收峰位于  $267 \text{ nm}$

(如图 2a),游离的 3-噻吩乙酸的最大紫外吸收峰为 265nm(如图 2b),两个配体均能吸收紫外光。对于二元配合物,SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O、EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O 的最大吸收峰位于 266nm、264nm(图 3),与游离 3-噻吩乙酸的紫外吸收峰位置基本一致;对于三元配合物,2 个配体的紫外特征吸收峰均发生叠加并发生红移,形成与

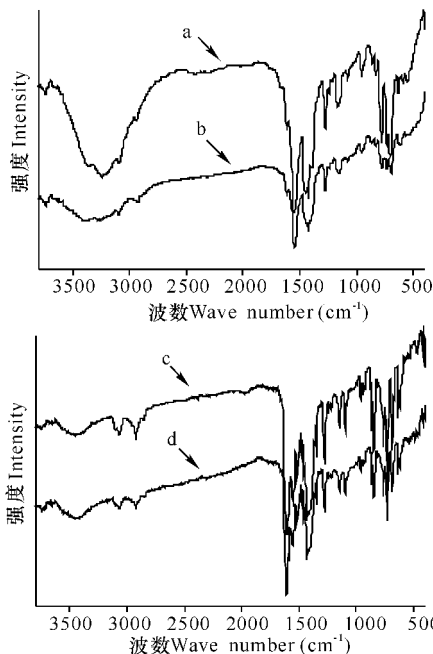


图 1 二元配合物(a,b)和三元配合物(c,d)的红外光谱  
Fig.1 IR spectra of binary complexes(a,b) and ternary complexes(c,d)  
(a)EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O, (b)SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O, (c)EuTh<sub>3</sub>phen, (d)SmTh<sub>3</sub>phen.

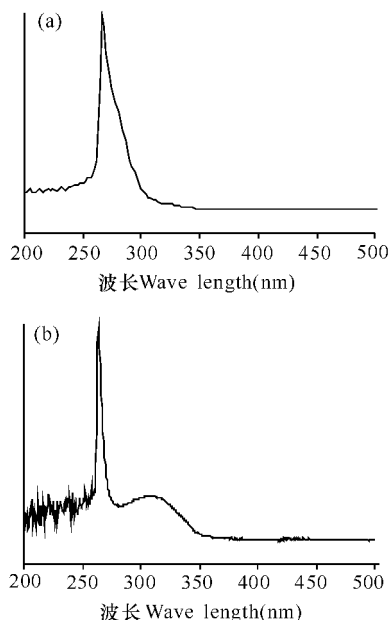


图 2 配体的紫外光谱  
Fig.2 UV spectra of ligand  
(a)邻菲啰啉, (b)3-噻吩乙酸。

(a)3-Thiopheneacetic acid, (b)1,10-Phenanthroline.

配合物相应的新的特征吸收峰(图 4)。SmTh<sub>3</sub>phen、EuTh<sub>3</sub>phen 的最大吸收峰分别位于 281nm、273nm,表明第一配体与第二配体已形成了整合环,也进一步说明 Sm<sup>3+</sup>、Eu<sup>3+</sup> 与配体已配位成键,配体能将能量传递给中心离子,从而发出 Sm<sup>3+</sup>、Eu<sup>3+</sup> 的特征光。这一点与从荧光发射光谱中得出的结论一致。

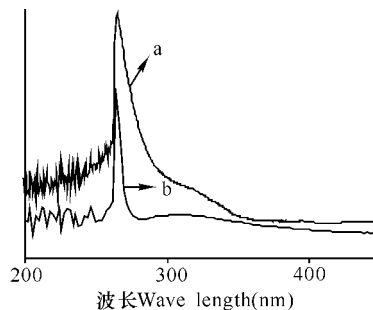


图 3 二元配合物的紫外光谱  
Fig.3 UV spectra of binary complexes  
a, SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O, b, EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O.

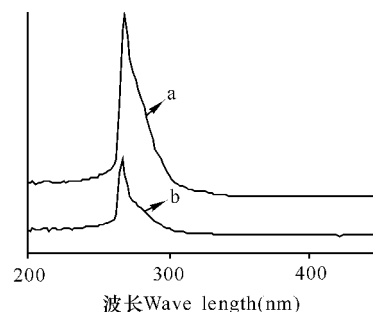


图 4 三元配合物的紫外光谱  
Fig.4 UV spectra of ternary complexes  
a, SmTh<sub>3</sub>phen, b, EuTh<sub>3</sub>phen.

## 2.4 荧光光谱分析

测得 EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O 的荧光发射光谱图如图 5 所示。从图 5 可以看出, Eu<sup>3+</sup> 离子的发光跃迁对化学环境高度敏感,形成配合物后由于配位场的作用,除<sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>0</sub>(581nm)跃迁未产生劈裂外,<sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub>, <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub>都产生了不同程度的劈裂。电偶极跃迁<sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub>(614nm),明显强于磁偶极跃迁<sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub>(590nm),表明中心离子 Eu<sup>3+</sup> 在配合物中处于不对称的中心位置<sup>[10]</sup>。此外,在 465nm 处出现了一个宽的发射带,这是由配体 3-噻吩三乙酸根离子在激发光激发下产生的发射谱带。这也进一步说明,配体并没有较好的将吸收的能量全部传递给 Eu<sup>3+</sup>。在加入第二配体形成三元配合物后,其发射光谱图如图 6 所示,从图 6 中可以看出,465nm 处的宽发射带消失了,说明由于第二配体的加入,改变了 Eu<sup>3+</sup> 的周围环境,使得分子侧链的羰基 C=O 的 π-π\* 跃迁吸收减弱,能将其吸收的能量很好传递给 Eu<sup>3+</sup>。从图 6 可观察到<sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>0</sub>(581nm), <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub>(593nm), <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub>(614nm)

33 条  $\text{Eu}^{3+}$  的特征谱线,  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ ,  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  也没有产生劈裂, 荧光强度也明显高于二元配合物的荧光强度, 约是二元配合物荧光强度的 55 倍。说明引入第二配体邻菲啰啉后, 可以显著提高配合物的发光强度。原因是 Phen 具有比一般芳香羧酸更大的共轭大  $\pi$  键, 在对紫外光吸收的竞争中, Phen 处于优势, 由于 Phen 的三重态能级 ( $22913\text{cm}^{-1}$ ) 高于  $\text{Eu}^{3+}$  离子的最低激发态, 根据能量传递原理, 可能实现第二配体 Phen 直接将能量传递给  $\text{Eu}^{3+}$  离子; Phen 也可作为能量给与体, 将所吸收能量传递给能量接受体第一配体, 第一配体再作为能量给与体, 将能量传递给  $\text{Eu}^{3+}$  离子, 两步能量传递导致配合物的荧光强度提高; 第二个原因是二元配合物中含有配位水, 稀土离子的电子能级可与 O-H 振子的高能振动能态耦合, 产生有效非辐射去活化作用, 因而配位水的存在明显地猝灭配合物的荧光强度, 第二配体 phen 的加入取代了配位水分子, 占据了配位水的位置, 从而避免配位水分子中 O-H 高频振动引起的能量损失, 进而提高配合物的荧光强度; 第三个原因是 phen 的加入改变了中心离子配位环境, 增加了中心离子  $\text{Eu}^{3+}$  的配位数以及配合物的稳定性, 有助于提高配合物的发光效率。

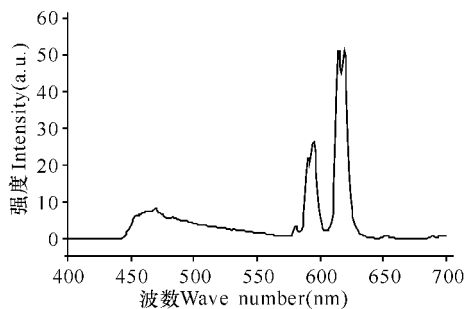


图 5  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  的荧光光谱(激发波长 395nm)  
Fig. 5 Emission spectrum of  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$

$\text{SmTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  配合物的荧光发射光谱如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在 450nm 和 584nm 之间出现了一个宽的发射带, 此发射带为配体的发射带,  $\text{Sm}^{3+}$  在这个区域间的发射特征谱线被掩盖; 在加入第二配体 phen 形成三元配合物后, 其荧光光谱图如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 位于 450nm 和 584nm 之间的宽发射带消失, 可观察到  $\text{Sm}^{3+}$  的四条特征谱线, 分别归属于,  ${}^4\text{G}_{3/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$  (490nm),  ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$  (545nm),  ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$  (603nm),  ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$  (617nm) 的能级跃迁, 其中最大发射峰位于 603nm ( ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$ ) 处, 属于  $\text{Sm}^{3+}$  的电子偶极能级跃迁, 远远强于其它能级的跃迁, 说明钐离子在配合物中处于不对称的位置<sup>[10]</sup>, 也进一步说明由于第二配体的

加入, 改变了  $\text{Sm}^{3+}$  离子周围的环境, 使配体能够较好地能量传递给钐离子, 导致  $\text{Sm}^{3+}$  有明显的特征发射。

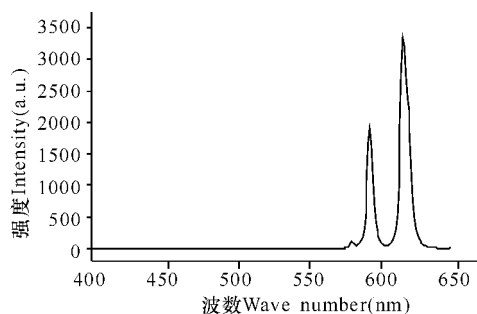


图 6  $\text{EuTh}_3 \text{phen}$  的荧光光谱(激发波长 350nm)  
Fig. 6 Emission spectrum of  $\text{EuTh}_3 \text{phen}$

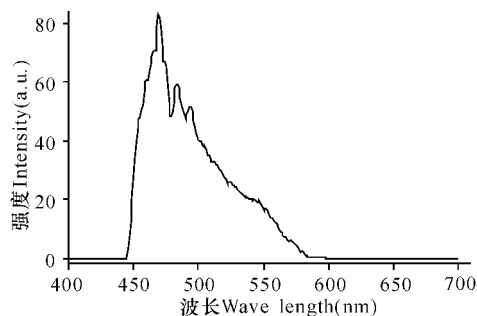


图 7  $\text{SmTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  的荧光光谱(激发波长 220nm)  
Fig. 7 Emission spectrum of  $\text{SmTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$

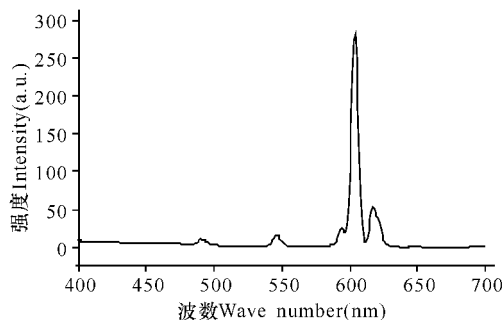


图 8  $\text{SmTh}_3 \text{phen}$  的荧光光谱(激发波长 300nm)  
Fig. 8 Emission spectrum of  $\text{SmTh}_3 \text{phen}$

## 2.5 热重分析

从 TG-DTG 曲线(图 9 和图 10)可以看出, 二元配合物的分解过程分为两步, 三元配合物的热分解过程分为一步。图 9a 是  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  的 TG-DTG 曲线, 在 75~110°C 之间失重并出现吸热峰, 实验测得失重值约为 5.2%, 与  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  失去两分子水的理论失重值吻合, 说明二元配合物中存在结晶水;  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  配合物第二阶段分解温度为 340°C, 这个阶段主要是配体发生分解。  $\text{SmTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  配合物的 TG-DTG 曲线(如图 10a)与  $\text{EuTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  配合物的类似, 分解过程也分为两步, 在 73~110°C 之间失重并出现吸热峰, 实验测得失重值约为 5.4%, 与  $\text{SmTh}_3 2\text{H}_2\text{O}$  失去两分子水的理论失重值吻合, 说明

此二元配合物中存在结晶水;SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O 配合物的第二阶段分解温度为 337℃左右。图 9b 是 EuTh<sub>3</sub>phen 配合物的 TG-DTG 曲线,分解温度约为 340℃,热稳定性较好。图 10b 是 SmTh<sub>3</sub>phen 配合物的 TG-DTG 曲线,与 EuTh<sub>3</sub>phen 配合物的类似,其分解温度也为 340℃。相对于二元配合物而言,三元配合物比较稳定。

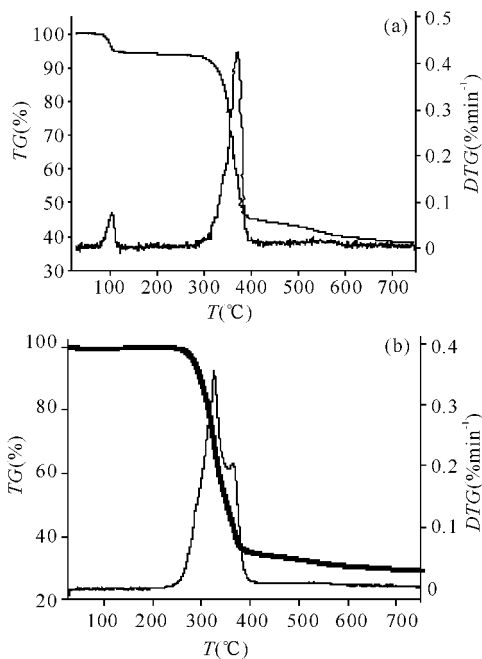


图 9 配合物 EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O(a)和 EuTh<sub>3</sub>phen(b)的 TG-DTA 曲线

Fig. 9 TG-DTA curve of complex EuTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O(a) and EuTh<sub>3</sub>phen(b)

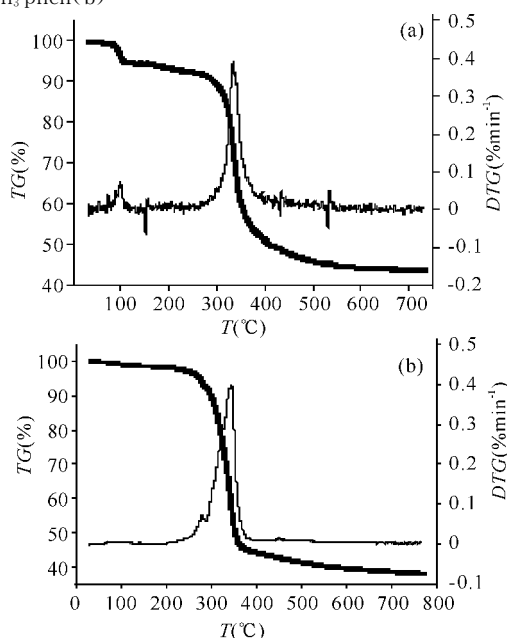


图 10 配合物 SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O(a)和 SmTh<sub>3</sub>phen(b)的 TG-DTA 曲线

Fig. 10 TG-DTA curve of complex SmTh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O(a) and EuTh<sub>3</sub>phen(b)

### 3 结论

以 3-噻吩乙酸为第一配体合成钐、铈的二元配合物,以 3-噻吩乙酸为第一配体,phen 为第二配体合成钐、铈的三元配合物,用元素分析法确定其分子式为 RETh<sub>3</sub>2H<sub>2</sub>O 及 RETh<sub>3</sub>phen (RE=Eu,Sm;Th=3-噻吩乙酸根,phen=邻菲罗啉),并通过红外光谱和紫外光谱对其进行了表征。测定合成的这 4 种配合物的荧光发射光谱的结果表明,由于第二配体的加入,使能量能很好的向稀土离子传递,增强了其发光强度。热重分析结果表明,三元配合物热稳定性,比二元配合物的热稳定性好。

参考文献:

- [1] 周永生,赵永亮,胥佳颖,等. 对氯苯甲酸-2,4,6-三吡啶基三噻吩稀土配合物的合成、表征及发光性能[J]. 发光学报,2010,31(5):661-666.
- [2] Yong K H, Zheng B H, Yi M, et al. Syntheses, crystal structures and luminescence properties of lanthanide coordination polymers involving in situ C-S bond cleavage of (4-pyridylthio) acetic acid[J]. Inorganic Chemistry Communications,2007,10 (7):829-832.
- [3] 王艳,赵永亮,高德青,等. RE(POA)<sub>3</sub>phen 配合物的合成、表征及荧光性能[J]. 发光学报,2009,30(5):663-667.
- [4] Song Y S, Yang B, Chen Z X. Different crystal structure and photophysical properties of lanthanide complexes with 5-bromonicotinic acid[J]. Journal of Solid State Chemistry,2004,177(10):3805-3814.
- [5] Li X, Wang C Y, Hu H M. The first example of tetranuclear lanthanide complexes with 2-sulfobenzoate and 1,10-phenanthroline[J]. Inorganic Chemistry Communications,2008,11(3):345-348.
- [6] 钱国栋,王民权,吕少哲,等. 稀土(Eu,Tb)含氮杂环配合物的合成、表征及荧光性质[J]. 发光学报,1998,19(1):60-65.
- [7] 胡明,赵永亮,李海生,等. 铈、铈-水杨酸-邻菲罗啉稀土配合物的合成、表征及荧光性质[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2000,31(5):504-507.
- [8] 杨景和,朱贵云,张博,等. 稀土元素共发光效应的研究[J]. 分析化学,1998,16(1):29-33.
- [9] 刘妍,王怀善,李明,等. 稀土铈、铈三元配事物的合成、表征与发光性能[J]. 功能材料,2003,34(2):210-214.
- [10] 张若桦. 稀土元素化学[M]. 天津:天津科学技术出版社,1987:70-85.

(责任编辑:邓大玉)