

## 半夹芯 16 电子碳硼烷化合物 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ 与含磷化合物的反应性

叶红德<sup>\*1,2</sup> 张昕瑜<sup>1</sup> 肖欣<sup>1</sup> 朱清嵘<sup>1</sup> 何橹灵<sup>1</sup> 彭化南<sup>\*1</sup> 刘紫薇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>上饶师范学院化学与环境科学学院, 江西省普通高校应用有机化学重点实验室, 上饶 334001)

(<sup>2</sup>海南师范大学, 海南省热带药用植物化学重点实验室, 海口 571158)

**摘要:** 半夹芯 16 电子碳硼烷化合物  $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$  分别与二苯基甲基膦、苯基二甲基膦和三甲基膦反应得到碳硼烷衍生物 ( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PPh<sub>2</sub>Me) (**1**)、( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PPhMe<sub>2</sub>) (**2**)和( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PMe<sub>3</sub>) (**3**)。分别用红外、核磁、元素分析、质谱和单晶 X 射线衍射等表征方法对 **1**、**2** 和 **3** 进行了结构表征。紫外可见吸收光谱结果显示化合物 **1**、**2** 和 **3** 在乙腈溶剂中均有 2 个吸收峰, 第一个吸收峰分别位于 321、316 和 321 nm; 第二个吸收峰分别位于 425、399 和 407 nm。荧光光谱结果显示化合物 **1**、**2** 和 **3** 在乙腈中的最大发射波长位于 406 nm 左右。

**关键词:** 半夹芯; 碳硼烷; 含磷化合物

中图分类号: O614.81<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2021)08-1375-06

DOI: 10.11862/CJIC.2021.109

### Reactivity of Half-Sandwich 16e Carborane Compound $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ with Phosphorous Compounds

YE Hong-De<sup>\*1,2</sup> ZHANG Xin-Yu<sup>1</sup> XIAO Xin<sup>1</sup> ZHU Qing-Rong<sup>1</sup>

HE Lu-Ling<sup>1</sup> PENG Hua-Nan<sup>\*1</sup> LIU Zi-Wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Applied Organic Chemistry, Higher Institutions of Jiangxi Province, School of Chemistry and Environmental Science, Shangrao Normal University, Shangrao, Jiangxi 334001, China)

(<sup>2</sup>Key Laboratory of Tropical Medicinal Plant Chemistry of Hainan Province, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

**Abstract:** Half-sandwich 16e carborane compound  $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$  reacts with diphenylmethylphosphine, phenyl-dimethylphosphine and trimethylphosphine to afford addition compounds ( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PPh<sub>2</sub>Me) (**1**), ( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PPhMe<sub>2</sub>) (**2**) and ( $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ )(PMe<sub>3</sub>) (**3**), respectively. **1**, **2** and **3** have been characterized by IR, NMR, elemental analysis, mass spectrum and single-crystal X-ray diffraction analysis. The ultraviolet spectra of compounds **1**, **2** and **3** in acetonitrile showed two absorb bands, where the first bands were located at 321, 316 and 321 nm, respectively, and the second bands were located at 425, 399 and 407 nm, respectively. The fluorescence spectrum results of compounds **1**, **2** and **3** exhibited maximum emission peaks at about 406 nm. CCDC: 2056803, **1**; 2056804, **2**; 2056805, **3**.

**Keywords:** half-sandwich; carborane; phosphorous compounds

收稿日期: 2020-12-14。收修改稿日期: 2021-02-03。

江西省教育厅科技计划项目(No.GJJ190883)、国家自然科学基金(No.62065016)、江西省自然科学基金(No.20202BABL202023)、海南省热带药用植物化学重点实验室 2020 年开放基金项目(No.rdzw2020s03)和上饶师范学院大学生创新训练计划项目(No.2019-CX-71)资助。

\*通信联系人。E-mail: yehongde@163.com, huananpeng@126.com

二十面体闭式-碳硼烷( $C_2B_{10}H_{12}$ )根据分子中2个碳原子的相对位置可以分为3种异构体:1,2- $C_2B_{10}H_{12}$ 、1,7- $C_2B_{10}H_{12}$ 和1,12- $C_2B_{10}H_{12}$ (即 $o$ -碳硼烷、 $m$ -碳硼烷和 $p$ -碳硼烷)。近年来,这些二十面体闭式-碳硼烷由于它们独特的3D拟芳香性几何结构和推-拉电子特性而得到了广泛的研究<sup>[1]</sup>,含碳硼烷结构单元材料的光物理性质吸引了越来越多的研究兴趣<sup>[2]</sup>。人们通过把碳硼烷结构单元引入到发光材料中以便提高和改善其发光性能<sup>[3]</sup>,如把碳硼烷作为有效的构造材料用在有机和聚合物领域以便获得优异的发光和电子材料<sup>[4]</sup>,或把碳硼烷结构单元引入荧光有机体系<sup>[5]</sup>、聚合物<sup>[6]</sup>和金属配合物<sup>[7]</sup>。实验结果显示,碳硼烷在协调光物理性质方面起着独特的作用。不过,就含碳硼烷结构单元材料的光物理性质而言,碳硼烷笼体本身的作用仍然需要进一步进行研究,对于 $o$ -碳硼烷衍生物更应如此,因为 $o$ -碳硼烷衍生物拥有一个独特的C—C键(键距范围在0.162~0.215 nm)<sup>[8]</sup>,并且通常能使荧光猝灭<sup>[9]</sup>。

近年来,人们对含钴金属离子配合物的紫外和荧光性能<sup>[10-14]</sup>进行了广泛研究。但据我们所知,目前还没有对含有钴离子的碳硼烷衍生物的荧光和紫外性能进行测试。我们首先合成含有钴离子的半夹芯式16电子碳硼烷化合物 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ ,再用合成的 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ 分别与二苯基甲基膦、苯基二甲基膦和三甲基膦反应生成含有碳硼烷笼体和钴离子的加成物,最后对这些加成物进行紫外和荧光性能测试。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

所有化学试剂均为分析纯,未做进一步纯化处

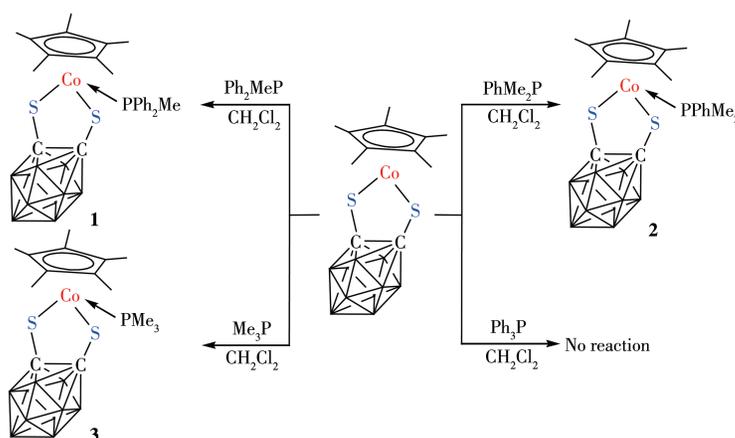
理直接使用。溶剂在氮气气氛下用金属钠(石油醚、乙醚和四氢呋喃)或者氢化钙(二氯甲烷)干燥,使用前进行重蒸。正丁基锂( $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  in cyclohexane, Aldrich)直接使用。 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ 参照相关文献<sup>[15-17]</sup>合成。合成过程采用标准的Schlenk技术。使用Bruker SMART Apex II型X射线单晶衍射仪收集单晶数据。采用Thermo Fisher Scientific质谱仪进行质谱测试,Nicolet 6700型FTIR红外光谱仪测定红外光谱,Purkinje TU-1901型紫外分光光度计测定紫外可见(UV-Vis)光谱,F-7000型荧光光谱仪测定荧光光谱。

### 1.2 化合物1-3的合成

在氩气保护下把 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ (80.1 mg, 0.2 mmol)和二苯基甲基膦(100.1 mg, 0.5 mmol)加入到20 mL二氯甲烷中,室温反应10 h。之后减压抽去溶剂,粗产物经200~300目硅胶柱层析分离,洗脱剂为石油醚/ $CH_2Cl_2$ (2:1, V/V),得到产物1。产物2、3用类似方法合成得到(Scheme 1)。

1: 产率: 95%(114.2 mg)。熔点: 298 °C(分解)。<sup>1</sup>H NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  7.54~7.36(m, 10H, Ph-H), 2.05(s, 3HCH<sub>3</sub>), 1.60(s, 15H, Cp\*)。 <sup>13</sup>C NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  133.27(Ph-CH), 130.50(Ph-C), 128.22(Ph-CH), 128.13(Ph-CH), 94.51(Cp\* - C<sub>ring</sub>), 92.09(carborane - C), 77.20(carborane - C), 10.42(Cp\* - CH<sub>3</sub>), 9.95(CH<sub>3</sub>)。 <sup>11</sup>B NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  -1.64(4B), -4.52(3B), -7.58(3B)。ESI-MS(positive mode,  $CH_2Cl_2/CH_3OH$ , 5:1, V/V):  $m/z$  = 639.18 [ $C_{25}H_{38}B_{10}CoS_2PK$ ]<sup>+</sup>。IR(KBr,  $cm^{-1}$ ): 2 572(B—H)。元素分析按 $C_{25}H_{38}B_{10}CoPS_2$ 计算值(%): C, 49.98; H, 6.38。实测值(%): C, 50.02; H, 6.35。

2: 产率: 96%(103.4 mg)。熔点: 285 °C(分解)。<sup>1</sup>H NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  7.54~7.39(m, 5H, Ph-H), 1.71(s,



Scheme 1 Synthesis of 1-3

3H,  $CH_3$ ), 1.68(s, 3H,  $CH_3$ ), 1.60(s, 15H,  $Cp^*$ )。  $^{13}C$  NMR ( $CDCl_3$ ):  $\delta$  134.64(Ph-CH), 130.58(Ph-C), 130.45(Ph-CH), 128.52(Ph-CH), 96.97( $Cp^*-C_{ring}$ ), 95.04(carborane-C), 77.20(carborane-C), 16.49( $CH_3$ ), 16.13( $CH_3$ ), 9.65( $Cp^*-CH_3$ )。  $^{11}B$  NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  -1.78(3B), -5.36(3B), -7.20(4B)。 ESI-MS(positive mode,  $CH_2Cl_2/CH_3OH$ , 5:1,  $V/V$ ):  $m/z=577.19[C_{20}H_{36}B_{10}CoS_2PK]^+$ 。 IR(KBr,  $cm^{-1}$ ): 2 579(B—H)。 元素分析按  $C_{20}H_{36}B_{10}CoS_2P$  计算值(%): C, 44.60; H, 6.74。 实测值(%): C, 44.55; H, 6.78。

**3**: 产率: 97%(94.5 mg)。 熔点: 270 °C(分解)。  $^1H$  NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  1.60(s, 15H,  $Cp^*$ ), 1.51(s, 3H,  $CH_3$ ), 1.50(s, 3H,  $CH_3$ ), 1.49(s, 3H,  $CH_3$ )。  $^{13}C$  NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  97.04( $Cp^*-C_{ring}$ ), 95.08(carborane-C), 92.05(carborane-C), 16.65( $CH_3$ ), 10.01( $Cp^*-CH_3$ )。  $^{11}B$  NMR( $CDCl_3$ ):  $\delta$  -1.69(2B), -5.56(4B), -9.02(4B)。 ESI-MS(negative mode,  $CH_3OH$ ):  $m/z=585.06[C_{15}H_{34}B_{10}CoS_2P+DMSO+CH_3O]^-$ 。 IR(KBr,  $cm^{-1}$ ): 2 573(B—H)。 元素分析按

$C_{15}H_{34}B_{10}CoS_2P$  计算值(%): C, 37.80; H, 7.19。 实测值(%): C, 37.75; H, 7.16。

### 1.3 晶体结构测定

分别选取大小尺寸为 0.20 mm×0.15 mm×0.12 mm (**1**)、0.20 mm×0.15 mm×0.12 mm (**2**)、0.20 mm×0.18 mm×0.12 mm (**3**) 的单晶, 置于 Bruker SMART Apex II 型 X 射线单晶衍射仪上进行衍射实验, 分别在 222(2)、296(2) 和 296(2) K 下, 用石墨单色化的 Mo  $K\alpha$ ( $\lambda=0.071\ 073\ nm$ ) 射线, 采用  $\omega$ - $2\theta$  扫描方式收集衍射数据。 衍射数据用 SAINT 程序进行还原处理, 用 SADABS 程序进行吸收校正。 全部数据经  $L_p$  校正和吸收校正, 用 SHELXS-97<sup>[18]</sup> 进行晶体结构解析, 用 SHELXL-97<sup>[19]</sup> 进行结构精修。 化合物 **1**、**2** 和 **3** 的有关晶体学数据详见表 1, 部分键长和键角数据列于表 2。

CCDC: 2056803, **1**; 2056804, **2**; 2056805, **3**。

表 1 化合物 1~3 的晶体和结构精修数据

Table 1 Crystal and structure refinement data for compounds 1-3

Compound	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Chemical formula	$C_{26}H_{42}OB_{10}CoPS_2$	$C_{20}H_{36}B_{10}CoPS_2$	$C_{15}H_{34}B_{10}CoPS_2$
Formula weight	632.75	538.61	476.54
Crystal system	Triclinic	Orthorhombic	Triclinic
Space group	$P\bar{1}$	$Pna2_1$	$P\bar{1}$
$a / nm$	1.018 96(4)	1.619 26(13)	1.190 51(3)
$b / nm$	1.180 51(5)	0.874 67(7)	1.506 92(5)
$c / nm$	1.372 54(6)	1.980 32(17)	1.532 68(4)
$\alpha / (^\circ)$	92.568 0(10)		71.581(2)
$\beta / (^\circ)$	100.636 0(10)		81.627(2)
$\gamma / (^\circ)$	99.491 0(10)		72.182(2)
$V / nm^3$	1.595 61(12)	2.804 8(4)	2.479 99(13)
$Z$	2	4	2
$D_c / (g \cdot cm^{-3})$	1.250	1.276	1.276
$\mu / mm^{-1}$	4.072	0.828	0.926
$F(000)$	624	1 120	992
$\theta$ range / ( $^\circ$ )	6.27~53.95	2.515~27.202	3.659~28.48
Reflection collected	15 108	23 948	37 669
Independent reflection	5 662	6 432	11 831
Reflection observed [ $I > 2\sigma(I)$ ]	5 463	5 779	9 515
Data, restraint, parameter	5 662, 0, 374	6 432, 1, 315	11 831, 0, 539
GOF	1.055	1.032	1.022
$R_1, wR_2$ [ $I > 2\sigma(I)$ ]	0.044 3, 0.121 9	0.030 8, 0.074 8	0.040 7, 0.092 5
$R_1, wR_2$ (all data)	0.045 3, 0.123 1	0.036 3, 0.077 6	0.055 6, 0.100 3
Largest peak and hole / ( $e \cdot nm^{-3}$ )	767, -946	424, -202	430, -457

表2 化合物1~3的部分键长(nm)和键角(°)

Table 2 Selected bond lengths (nm) and bond angles (°) for compounds 1~3

1					
C1—C2	0.165 7(3)	C1—S1	0.178 9(2)	C2—S2	0.178 5(2)
S1—Co1	0.225 91(6)	S2—Co1	0.224 62(6)	P1—Co1	0.222 25(6)
P1—C3	0.182 3(2)	P1—C9	0.182 3(2)	P1—C15	0.182 0(2)
C1—C2—S2	116.53(14)	C2—C1—S1	116.85(14)	C1—S1—Co1	104.36(7)
C2—S2—Co1	104.78(7)	S1—Co1—S2	92.81(2)	S1—Co1—P1	86.50(2)
S2—Co1—P1	93.74(2)	Co1—P1—C3	120.11(7)	Co1—P1—C9	116.45(8)
Co1—P1—C15	111.56(9)				
2					
C1—C2	0.166 6(5)	C1—S1	0.179 1(4)	C2—S2	0.178 6(3)
S1—Co1	0.226 56(9)	S2—Co1	0.225 84(9)	P1—Co1	0.221 80(9)
P1—C3	0.183 7(4)	P1—C9	0.180 9(4)	P1—C10	0.182 3(4)
C1—C2—S2	116.4(2)	C2—C1—S1	116.2(2)	C1—S1—Co1	104.40(12)
C2—S2—Co1	104.67(11)	S1—Co1—S2	91.90(3)	S1—Co1—P1	90.70(4)
S2—Co1—P1	91.30(3)	Co1—P1—C3	116.29(12)	Co1—P1—C9	117.55(13)
Co1—P1—C10	114.73(14)				
3					
C1—C2	0.165 4(3)	C1—S1	0.178 6(2)	C2—S2	0.178 8(2)
S1—Co1	0.224 72(6)	S2—Co1	0.224 45(6)	P1—Co1	0.219 89(7)
P1—C13	0.182 0(3)	P1—C14	0.181 8(3)	P1—C15	0.181 1(2)
C1—C2—S2	116.11(13)	C2—C1—S1	116.41(13)	C1—S1—Co1	104.05(7)
C2—S2—Co1	103.94(7)	S1—Co1—S2	92.18(2)	S1—Co1—P1	89.71(3)
S2—Co1—P1	89.36(3)	Co1—P1—C13	114.15(12)	Co1—P1—C14	114.88(11)
Co1—P1—C15	118.16(9)				

## 2 结果与讨论

### 2.1 化合物的结构

化合物1~3是半夹芯16电子碳硼烷化合物 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ 分别和二苯基甲基膦、苯基二甲基膦和三甲基膦发生加成反应的产物。从化合物1的分子结构图(图1)可以看出,与金属中心钴离子配位的辅助配体是 $Cp^*$ 基团。C1、C2、S1、S2和Co1五个原子组成了一个五元环。由于二苯基甲基膦分子中的磷原子与原料 $Cp^*CoS_2C_2B_{10}H_{10}$ 分子中的钴离子配位,导致该五元环不再是一个平面,以 $S1\cdots S2$ 为矢量的二面角是 $159.5^\circ$ 。由于磷原子提供一对电子与钴离子配位,钴离子核外最外层电子数达到18个电子的稳定结构。P—Co键长为 $0.222\ 25(6)$  nm,属于正常的P—Co键距离范围<sup>[20]</sup>。1的光谱和分析测试数据和它的固体结构一致。例如,核磁共振氢

谱<sup>1</sup>H NMR数据显示,化学位移为 $7.54\sim 7.36$ 的多重峰是2个苯环上10个氢原子的吸收峰,化学位移为

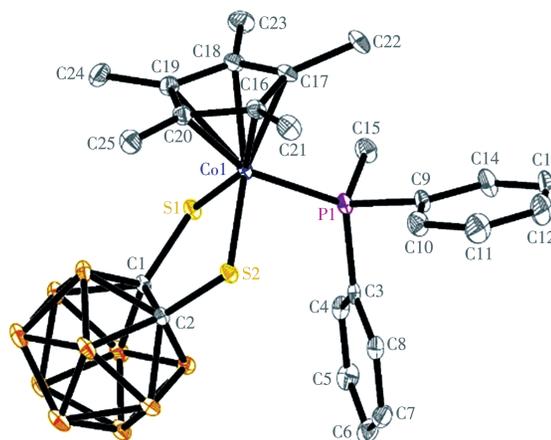


图1 化合物1的椭球几率为30%的分子结构图

Fig.1 Molecular structure of compound 1 with thermal ellipsoids at 30% probability level

2.05 的单峰是与磷原子相连的甲基吸收峰,化学位移为 1.60 的单峰是  $\text{Cp}^*$  环上的 5 个甲基吸收峰。另外, **1** 的碳谱、硼谱、质谱、元素分析和红外光谱等表征数据与 **1** 的结构都相符合。

半夹芯 16 电子碳硼烷化合物  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  和苯基二甲基膦发生加成反应得到产物 **2**。 **2** 的分子结构与 **1** 的分子结构类似(图 2), 同样由于苯基二甲基膦分子中的磷原子与钴离子配位, 使分子中 C1、C2、S1、S2 和 Co1 五个原子组成的五元环不是一个平面, 以 S1...S2 为矢量的二面角是  $156.0^\circ$ 。 **2** 的光谱和分析测试数据和它的固体结构一致。例如, 核磁共振氢谱  $^1\text{H NMR}$  数据显示, 化学位移为 1.71 和 1.68 的单峰是与磷原子相连的 2 个甲基吸收峰, 化学位移为 1.60 的单峰是  $\text{Cp}^*$  环上的 5 个甲基吸收峰。同样, **2** 的碳谱、硼谱、质谱、元素分析和红外光谱等表征数据与 **2** 的结构也都相符合。

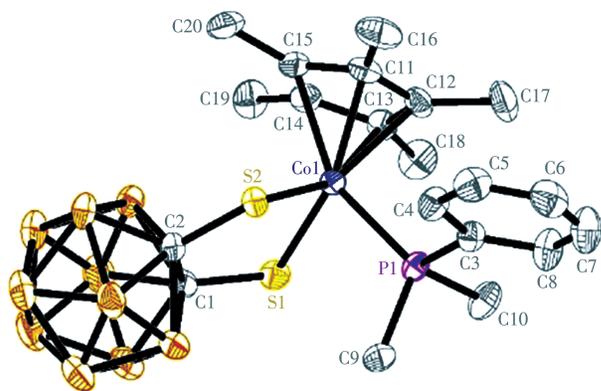


图 2 化合物 **2** 的椭球几率为 30% 的分子结构图

Fig.2 Molecular structure of compound **2** with thermal ellipsoids at 30% probability level

化合物 **3** 是半夹芯 16 电子碳硼烷化合物  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  和三甲基膦发生加成反应的产物, 其分子结构如图 3 所示。 **3** 的碳谱、硼谱、质谱、元素分析和红外光谱等表征数据与 **3** 的结构也都相符合。我们在用柱层析方法提纯 **3** 时, 发现产物 **3** 在色谱柱子里会不断分解为原料  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  和三甲基膦, 这说明硅胶对 **3** 的分解有催化作用。这种加成产物在用柱层析进行提纯时会慢慢分解的情况在我们以前的工作中也遇到过<sup>[17]</sup>。 **1** 和 **2** 在用柱层析进行提纯时不会分解。

与半夹芯 16 电子碳硼烷化合物  $\text{CpCoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  比较,  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  辅助配体是  $\text{Cp}^*$ 。  $\text{Cp}^*$  环上的 5 个甲基加大了辅助配体的体积, 导致  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  的反应性下降。例如  $\text{CpCoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  与  $\text{PPh}_3$  反应生

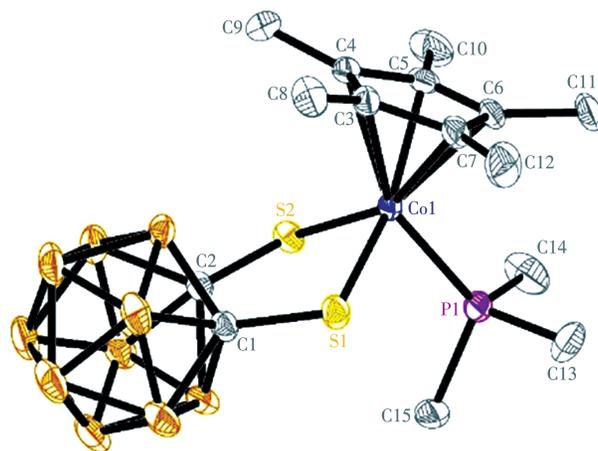


图 3 化合物 **3** 的椭球几率为 30% 的分子结构图

Fig.3 Molecular structure of compound **3** with thermal ellipsoids at 30% probability level

成产物  $(\text{CpCoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10})(\text{PPh}_3)$ , 而  $\text{Cp}^*\text{CoS}_2\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$  与  $\text{PPh}_3$  不反应<sup>[20]</sup>。把  $\text{PPh}_3$  换成体积更小的  $\text{PPh}_2\text{Me}$ 、 $\text{PPhMe}_2$  和  $\text{PMe}_3$ , 反应就能顺利发生。这些实验结果进一步说明了辅助配体体积直接影响反应的发生。同时我们还发现一个有趣的现象, 就是把产物 **1** 和配体  $\text{PMe}_3$  在二氯甲烷中混合, 部分产物 **1** 分子中的配体  $\text{PPh}_2\text{Me}$  会慢慢被体积更小的配体  $\text{PMe}_3$  取代, 转变为产物 **3**; 但是把产物 **3** 和配体  $\text{PPh}_2\text{Me}$  在二氯甲烷中混合, 并未发现有 **1** 生成。

## 2.2 紫外可见光谱分析和荧光分析

化合物 **1**、**2** 和 **3** 在乙腈中 ( $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的 UV-Vis 吸收光谱如图 4 所示, 荧光光谱如图 5 所示。由 UV-Vis 光谱可知, 化合物 **1**、**2** 和 **3** 在乙腈中均出现了 2 个吸收峰, 第一个吸收峰分别位于 321、316 和 321 nm; 第二个吸收峰分别位于 425、399 和 407 nm, 其中波长位于短波的吸收峰对应化合物中共轭体系的  $\pi-\pi^*$  电子跃迁, 长波的吸收峰对应分子内电荷

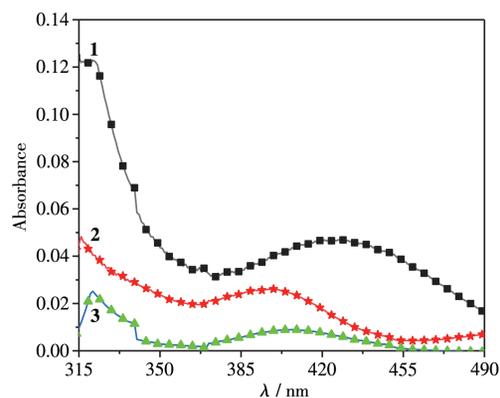


图 4 化合物 **1**~**3** 的 UV-Vis 吸收光谱

Fig.4 UV-Vis absorption spectra of compounds **1**~**3**

转移的电子跃迁<sup>[21]</sup>。由荧光光谱可知,化合物**1**、**2**和**3**在乙腈中的最大发射波长位于406 nm左右。

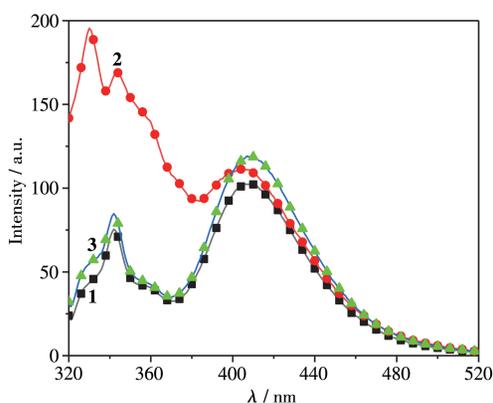


图5 化合物**1**~**3**的荧光光谱

Fig.5 Fluorescence spectra of compounds **1**~**3**

### 参考文献:

- [1] Shi C, Sun H B, Tang X, Lv W, Yan H, Zhao Q, Wang J X, Huang W. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2013**,**52**(50):13434-13438
- [2] Harriman A, Alamiry M A H, Hagon J P, Hablot D, Ziessel R. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2013**,**52**(26):6611-6615
- [3] Zhu L, Lv W, Liu S J, Yan H, Zhao Q, Huang W. *Chem. Commun.*, **2013**,**49**(90):10638-10640
- [4] Shi C, Sun H B, Jiang Q B, Zhao Q, Wang J X, Huang W, Yan H. *Chem. Commun.*, **2013**,**49**(42):4746-4748
- [5] Wee K R, Han W S, Cho D W, Kwon S, Pac C, Kang S O. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2012**,**51**(11):2677-2680
- [6] Kokado K, Tokoro Y, Chujo Y. *Macromolecules*, **2009**,**42**(23):9238-9242
- [7] Kim T, Kim H, Lee K M, Lee Y S, Lee M H. *Inorg. Chem.*, **2013**,**52**(1):160-168
- [8] Glukhov I V, Antipin M Y, Lyssenko K A. *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2004**(7):1379-1384
- [9] Kokado K, Chujo Y. *Macromolecules*, **2009**,**42**(5):1418-1420
- [10] 王润雪, 王姝文, 齐艳娟. *无机化学学报*, **2012**,**28**(3):536-540  
WANG R X, WANG S W, QI Y J. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2012**,**28**(3):536-540
- [11] 张前, 韩燕, 焦元红. *无机化学学报*, **2016**,**32**(1):121-138  
ZHANG Q, HAN Y, JIAO Y H. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2016**,**32**(1):121-138
- [12] 师同顺, 张旭光, 柳巍, 贾博文, 刘国发. *高等学校化学学报*, **1998**,**19**(7):1026-1028  
SHI T S, ZHANG X G, LIU W, JIA B W, LIU G F. *Chem. J. Chinese Universities*, **1998**,**19**(7):1026-1028
- [13] 霍涌前. *化学与生物工程*, **2011**,**28**(6):19-21  
HUO Y Q. *Chemistry & Bioengineering*, **2011**,**28**(6):19-21
- [14] 仝小兰, 葛颖冲, 辛建华, 刘芬, 熊晨. *东华理工大学学报(自然科学版)*, **2016**,**39**(3):288-292  
TONG X L, GE Y C, XIN J H, LIU F, XIONG C. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, **2016**,**39**(3):288-292
- [15] 叶红德, 徐宝华, 胡久荣, 燕红. *无机化学学报*, **2015**,**31**(7):1447-1452  
YE H D, XU B H, HU J R, YAN H. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2015**,**31**(7):1447-1452
- [16] Ye H D, Hu J R, Peng H N, Xie J L, Ye Q, Li Y H, Xing Z S. *Russ. J. Coord. Chem.*, **2015**,**41**(9):585-591
- [17] Ye H D, Ding G Y, Xie M S, Li Y Z, Yan H. *Dalton Trans.*, **2011**,**40**(10):2306-2313
- [18] Sheldrick G M. *SHELXS-97, Program for the Solution of Crystal Structures*, University of Göttingen, Germany, **1997**.
- [19] Sheldrick G M. *SHELXL-97, Program for the Refinement of Crystal Structures*, University of Göttingen, Germany, **1997**.
- [20] Ye H D, Zhan Y L, Liang J, Ye T Y, Zhang D, Peng H N, Hu J R. *Russ. J. Coord. Chem.*, **2018**,**44**(7):454-459
- [21] 黎彧, 邹训重, 邱文达, 庄文柳, 赵娜, 成晓玲. *无机化学学报*, **2019**,**35**(2):329-336  
LI Y, ZOU X Z, QIU W D, ZHUANG W L, ZHAO N, CHENG X L. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2019**,**35**(2):329-336