

一种红光铱配合物的合成、晶体结构及性能

陈祝安, 张 柯, 黄光英, 晏彩先, 常桥稳, 刘伟平, 左 川*

(昆明贵金属研究所, 云南贵金属实验室有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 以 1-苯基异喹啉(piq)为主配体, 以 3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid)为辅助配体合成了一种铱(III)配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 。采用元素分析、红外光谱、核磁共振谱分析和单晶 X 射线衍射对其化学组成和结构进行了表征。采用热失重(TGA)曲线分析了其热稳定性质, 热分解温度为 325 °C。采用紫外-可见光谱和光致发光光谱对其光物理性质进行了分析。结果表明, 化学组成为 $\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$, 属于三斜晶系, P_1/n 空间群。晶胞参数为 $a=8.3130(4)$ nm, $b=11.4866(5)$ nm, $c=15.3737(7)$ nm, $\alpha=75.726(2)^\circ$, $\beta=83.005(2)^\circ$, $\gamma=88.785(2)^\circ$, $V=1.4120(11)$ nm³, $Z=2$ 。光物理性质显示最大发射波长为 618 nm, 为红色发射的铱磷光配合物。

关键词: 铱(III)配合物; 1-苯基异喹啉; 合成; 晶体结构; 光物理性质

中图分类号: O672.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)S1-0093-07

Synthesis, crystal structure and properties of a 1-phenylisoquinoline neutral iridium complex

CHEN Zhu'an, ZHANG Ke, HUANG Guangying, YAN Caixian, CHANG Qiaowen, LIU Weiping, ZUO Chuan*

(Kunming Institute of Precious Metals, Yunnan Precious Metals Laboratory Co. Ltd.,

State Key Laboratory of New Technologies for Comprehensive Utilization of Rare and Precious Metals, Kunming 650106, China).

Abstract: An iridium (III) complex $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ was synthesized with 1-phenylisoquinoline (piq) as the main ligand and 3-methyl-2-pyridinic acid (mecid) as the auxiliary ligand. By elemental analysis, infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy analysis and single crystal X-ray diffraction on the chemical composition and structure characterization. The thermal stability was analyzed by thermogravimetric (TGA) curve, and the thermal decomposition temperature was 325 °C. The photophysical properties were analyzed by UV-VIS and photoluminescence spectra. The results show that the chemical composition is $\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$, belonging to the triclinic system and P_1/n space group. Crystal cell parameters for $a=8.3130(4)$ nm, $b=11.4866(5)$ nm, $c=15.3737(7)$ nm, $\alpha=75.726(2)^\circ$, $\beta=83.005(2)^\circ$, $\gamma=88.785(2)^\circ$, $V=1.4120(11)$ nm³, $Z=2$. Photophysical properties show a maximum emission wavelength of 618 nm, which is a red-emitting iridium phosphor complex.

Key words: iridium (III) complex; 1-phenylisoquinoline; compositing artist; crystal structure; photophysical property

从便携可穿戴设备的小屏幕到电视的大屏幕, 有机发光二极管(OLED)已经成为当下很流行的一种显示器, 它柔韧性好、轻薄和制造方便等^[1-3]。在这些显示器中, 以磷光铱(III)配合物为发光层器件

的综合性能最优, 它具有化学结构修饰简单、光物理性质可调节、稳定性好等优点^[4]。具有八面体构型的环金属化铱(III)配合物备受研究者青睐, 它主要分为 $\text{Ir}(\text{C}^{\wedge}\text{N})_3$ 型和 $\text{Ir}(\text{C}^{\wedge}\text{N})_2(\text{L}^{\wedge}\text{X})$ 型铱(III)配合

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 云南贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050230 和 YPML-2023050217); 中央引导地方自由探索项目(202207AA110006); 云南省技术创新人才培养项目(202205AD160053)

第一作者: 陈祝安, 男, 硕士研究生; 研究方向: 贵金属有机化合物的合成; E-mail: chenzhuan217@foxmail.com

*通信作者: 左 川, 男, 高级工程师; 研究方向: 贵金属化学; E-mail: zuochuan@ipm.com.cn

物。其中 $\text{Ir}(\text{C}^{\wedge}\text{N})_2(\text{L}^{\wedge}\text{X})$ 型铱(III)配合物中包含 $\text{C}^{\wedge}\text{N}$ 主配体和 $\text{L}^{\wedge}\text{X}$ 辅助配体^[5]。在铱磷光配合物中, $\text{C}^{\wedge}\text{N}$ 配体在其光物理性质方面占主导地位^[6], 含喹啉或喹啉衍生物的配体通常被用来设计为红光配合物, 如苯基喹啉、1-苯基异喹啉等^[7-11]。辅助配体的结构对铱配合物的光物理性能也有一定影响, 常用的辅助配体有 $\text{O}^{\wedge}\text{O}$ 型的乙酰丙酮(Hacac)与 $\text{N}^{\wedge}\text{O}$ 型的吡啶甲酸(pic)等^[12-21]。对辅助配体结构进行修饰可用于调控配合物的波长, 以改变其光物理性质, 提高化学稳定性等^[22-23]。随着 OLED 显示技术的发展, 对红光材料的色纯度要求越来越高, 开发兼有高效率和高色纯度的红光 Ir(III)配合物具有重要的意义。

基于此, 本文以 1-苯基异喹啉(piq)为环金属主配体, 选用添加了供电子基团的 3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid)作为 $\text{N}^{\wedge}\text{O}$ 辅助配体, 设计合成出一种新型红光中性铱配合物, 并对其分子结构进行了表征, 对其热稳定性和光物理性质进行了研究。

1 实验部分

1.1 试剂及仪器

乙二醇单乙醚(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 硅胶(200~300 目, 烟台化学工业研究院), 石油醚、无水碳酸钠、二氯甲烷(分析纯, 西陇化工股份有限公司), 3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid)、1-苯基异喹啉(piq) (上海毕得医药科技股份有限公司)。

用 Elementar 公司 VARIO EL III 型元素分析仪进行元素分析测定。用 Bruker Tensor-27 型傅立叶变换中红外光谱仪测得红外谱图。用 Avance III 型 500MHz 核磁共振波谱仪测 ^1H -NMR 和 ^{13}C -NMR 谱图; 用 Bruker APEX-II CCD 型 X 射线单晶衍射仪(XRD)测定目标化合物的晶体结构参数, 选用石墨单色器单色化的($\text{Cu K}\alpha$)射线($\mu=9.807\text{ mm}^{-1}$), 测定温度为 150 K。用 RARUAN 公司 Carry50 型紫外可见分光光度计进行紫外可见光谱分析。用 HITACHI 公司日立 F-7000 型荧光分光光度计进行光致发光荧光光谱分析。用 NERZSCH 德国耐驰公司 STA449F1 同步热分析仪进行热稳定性分析。

1.2 中性铱配合物的合成

1.2.1 二聚体 $(\text{piq})_2\text{Ir}_2\text{Cl}_2(\text{piq})_2$ 的合成

在 1000 mL 圆底烧瓶中加入(20.00 g, 96.2 mmol, 理论量的 2.2 倍) 2-苯基异喹啉, 用 360 mL 乙二醇单乙醚溶解后, 加入(15.57 g, 43.7 mmol)三水合三氯化铱和 120 mL 去离子水(乙二醇单乙醚和

去离子水的体积比为 3:1), 反复除气三次, 氮气保护下 120 °C 加热回流反应 24 h。冷却到室温, 抽滤, 滤饼依次用 30 mL 丙酮, 40 mL×2 去离子水, 30 mL×2 丙酮洗涤, 干燥, 得到的固体粗产品可直接应用于下一步反应, 产率为 86%。

1.2.2 铱配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的合成

向 500 mL 三颈烧瓶中依次加入: 二聚体 $(\text{piq})_2\text{Ir}_2\text{Cl}_2(\text{piq})_2$ (1.000 g, 0.786 mmol)、3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid) (0.237 g, 1.729 mmol)、无水碳酸钠 0.417 g、乙二醇单乙醚 40 mL, 并在氩气氛围保护下, 升温至回流且边搅拌 8 h, 停止反应, 冷却至室温。加入大量去离子水后继续在室温下搅拌 30 min, 过滤, 滤饼用去离子水、无水乙醇洗涤 2 次后, 干燥, 得到的粗品用二氯甲烷与甲醇 ($V_{\text{DCM}}:V_{\text{MET}}=200:1$) 混合溶液作为洗脱剂, 减压过 200~300 目硅胶柱, 旋蒸除去溶剂, 过滤, 得到深红色粉末固体 0.912 g, 产率为 78%。

1.3 铱配合物的单晶培养与测定

室温下, 将 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 溶解在二氯甲烷中配制成饱和溶液, 过滤后选用乙醇作为不良溶剂, 通过溶剂缓慢挥发法培养目标单晶。培养一段时间后, 得到亮红色透明的柱状晶体。选取晶体尺寸为 0.3 mm×0.25 mm×0.1 mm 的亮红色透明晶体进行 XRD 测定。使用 Olex2 解析目标化合物单晶结构, 并使用 ShelXL 对相应参数进行最小二乘最小化修正。检测采集了 $2\theta=2.99^\circ\sim72.38^\circ$ 范围内的衍射数据, 共测得 22384 个衍射点, 其中包括独立衍射点 5537 个 ($R_{\text{int}}=0.0818$)。

2 结果与讨论

2.1 中性铱配合物的合成过程

中性铱配合物的合成过程如图 1 所示, 先将 1-苯基异喹啉(piq)与三水合三氯化铱反应得到铱的氯桥二聚体 $(\text{piq})_2\text{Ir}_2\text{Cl}_2(\text{piq})_2$, 再将铱的氯桥二聚体在碱性条件下与 3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid)反应得到 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 粗品, 进一步通过柱色谱纯化得到 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 。

2.2 中性铱配合物的结构表征

2.2.1 元素分析

$\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的化学式为 $\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$ 。元素分析得到各组分含量列于表 1, 经计算对比可知本样品中 C、H、N 含量的测定值与理论值基本一致。

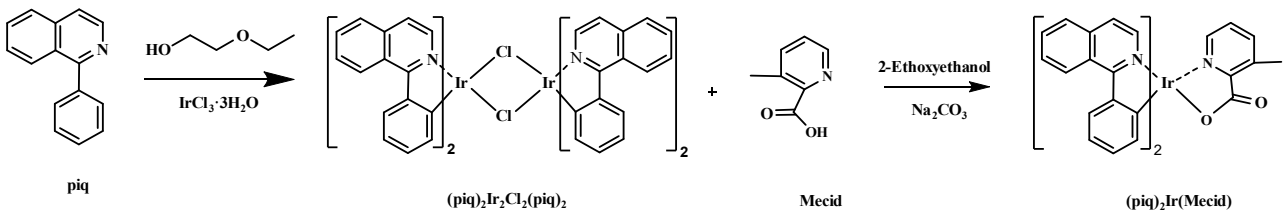


图 1 Ir(piq)₂(mecid)的合成过程 Fig.1 Synthesis of Ir(piq)₂(mecid)

表 1 元素分析(质量分数)

Tab.1 Elemental analysis (mass fraction) %			
元素	C	H	N
理论值	60.31	3.56	5.70
测定值	60.92	3.78	5.81

2.2.2 核磁共振谱分析

对 Ir(piq)₂(mecid)进行核磁共振谱分析, 图 2 和图 3 分别为 Ir(piq)₂(mecid)配合物在 CDCl₃ 溶剂中测试得到的 ¹H-NMR 谱图和 ¹³C-NMR 谱图。

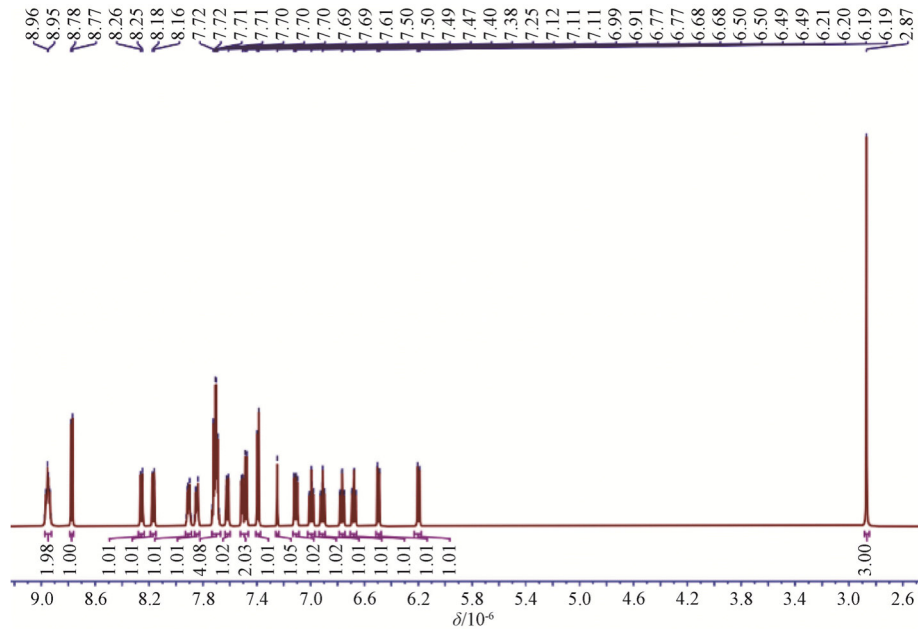


图 2 Ir(piq)₂(mecid)配合物的 ¹H-NMR 谱图 Fig.2 ¹H-NMR spectra of Ir(piq)₂(mecid) complexes

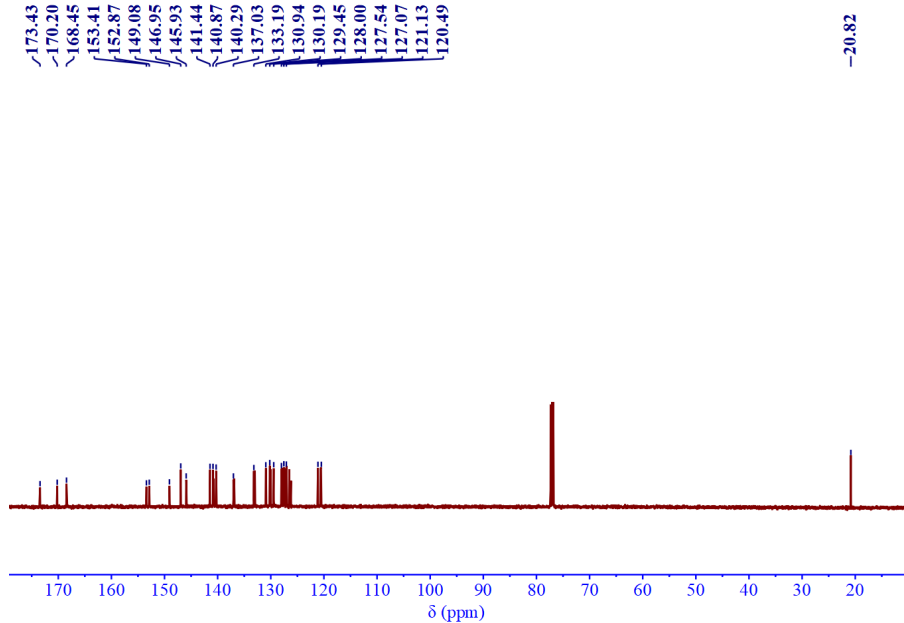


图 3 Ir(piq)₂(mecid)配合物的 ¹³C-NMR 谱图 Fig.3 ¹³C-NMR spectra of Ir(piq)₂(mecid) complexes

核磁氢谱: ^1H NMR (500 MHz, Chloroform- d) δ : 8.97~8.92 (m, 2H), 8.77 (d, J = 6.4 Hz, 1H), 8.28~8.23 (m, 1H), 8.19~8.15 (m, 1H), 7.93~7.88 (m, 1H), 7.84 (dt, J = 5.1, 3.0 Hz, 1H), 7.71 (ddt, J = 7.2, 4.0, 3.1 Hz, 4H), 7.64~7.60 (m, 1H), 7.52~7.46 (m, 2H), 7.39 (d, J = 6.4 Hz, 1H), 7.25 (s, 1H), 7.11 (dd, J = 7.8, 5.2 Hz, 1H), 6.99 (ddd, J = 8.2, 7.2, 1.3 Hz, 1H), 6.91 (ddd, J = 8.2, 7.1, 1.3 Hz, 1H), 6.77 (td, J = 7.4, 1.3 Hz, 1H), 6.68 (td, J = 7.3, 1.2 Hz, 1H), 6.50 (dd, J = 7.7, 1.3 Hz, 1H), 6.20 (dd, J = 7.6, 1.3 Hz, 1H), 2.87 (s, 3H)。

核磁碳谱: ^{13}C NMR (126 MHz, Chloroform- d) δ : 173.43, 170.20, 168.45, 153.41, 152.87, 149.08, 146.95, 145.93, 141.44, 140.87, 140.29, 137.03, 133.19, 130.94, 130.19, 129.45, 128.00, 127.54, 127.07, 121.13, 120.49, 20.82。

2.2.3 红外光谱分析

将配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 样品采用 KBr 压片, 测试得到的红外光谱如图 4, 主要吸收峰归属列于表 2。

表 2 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的红外吸收峰及其归属

Tab.2 Infrared absorption peak and attribution of $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$

Wavenumber/ cm^{-1}	Predominate mode
3043	$\nu(\text{Ar-H})$
2936, 1432	σ 饱和(C-H)
1643	$\nu(\text{C=O})$
1557	$\nu_{\text{Ar}}(\text{C=C})$
1538	ν 离域(C=C)
1330	$\nu(\text{C-O})$
1123, 1044	$\nu(\text{N-C})$
817, 738	$\pi(\text{C-H})$
582	$\nu(\text{Ir-O})+\sigma(\text{CH}_3)$

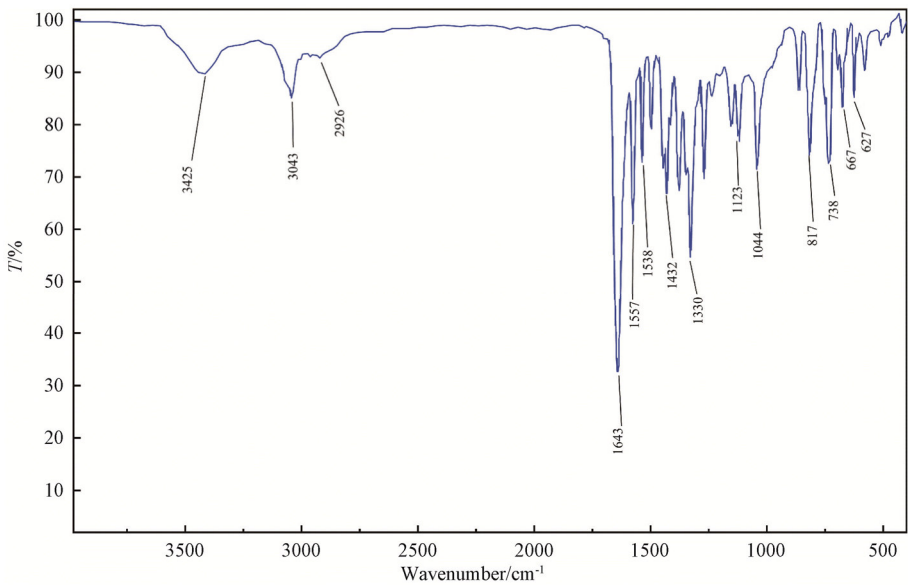


图 4 配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的红外光谱

Fig.4 Infrared spectrum of the complex $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$

由图 4 和表 2 可知, 在主配体中, 1600~1530 cm^{-1} 的吸收谱带归属于主配体中苯环的 C=C 收缩振动, 其中部分吸收峰与主配体异喹啉中 C=N 收缩振动吸收峰重叠。由谱图分析可知 1643 cm^{-1} 的特征峰是辅助配体中 $\nu(\text{C=O})$ 的特征峰, 而在 1330 cm^{-1} 有较高的特征峰, 可归属是辅助配体中的 $\nu(\text{C-O})$ 的特征峰。

2.2.4 晶体结构分析

配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 主要晶体学参数如表 3 所示。通过 X 射线单晶衍射分析数据可知, 配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 晶体的化学组成为 $\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$, 属于三斜晶系, P_1/n 空间群。晶胞参数为 $a=8.3130(4)$ nm, $11.4866(5)$ nm, $c=15.3737(7)$ nm, $\alpha=75.726(2)^\circ$, $\beta=83.005(2)^\circ$, $\gamma=88.785(2)^\circ$, $V=1.4120(11)$ nm³, $Z=2$ 。

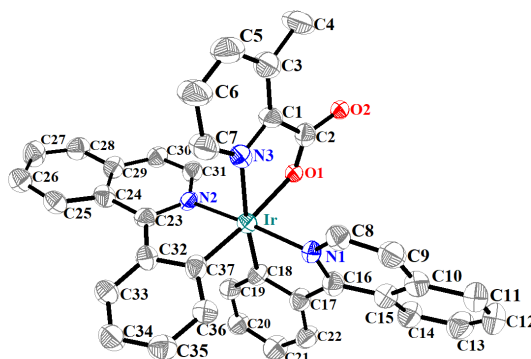
表 3 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的晶体结构参数Tab.3 The crystal structure parameters of $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$

Parameter	Value
Empirical formula	$\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$
Formula weight	736.81
Crystal system	Triclinic
Space group	P_1/n
a/nm	8.3130 (4)
b/nm	11.4866(5)
c/nm	15.3737(7)
$\alpha/^\circ$	75.726(2)
$\beta/^\circ$	83.005(2)
$\gamma/^\circ$	88.785(2)
Volume/ nm^3	1.4120
Z	2
Density (calculated) g/cm^3	1.733
$F(000)$	724.0
$2\theta/^\circ$	$5.98^\circ \sim 144.76^\circ$
Goodness of fit on F^2	1.064
$R_1, wR_2 [I > 2\sigma(I)]$	0.0658, 0.1687
R_1, wR_2 (all data)	0.0696, 0.1734

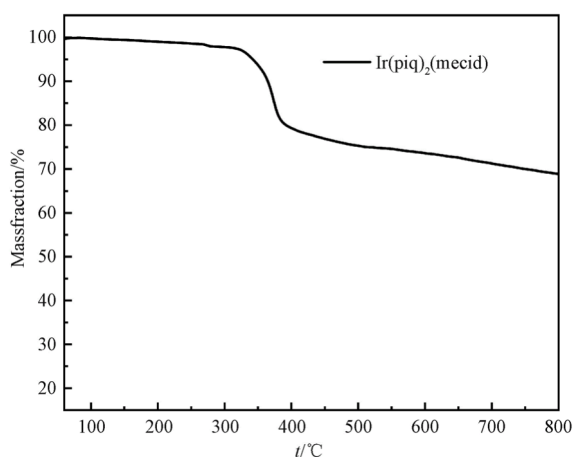
图 5 和表 4 分别为 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的晶体结构图和主要键长及键角。由图可知所得单晶结构为中心原子是三价铱的中性八面体配合物，与 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 配合物分子结构一致。中心金属 $\text{Ir}(\text{III})$ 为六配位状态，其中包括与两个 1-苯基异喹啉中 N 原子和 C 原子形成的两个五元螯合环，以及与 3-甲基-2-吡啶甲酸中一个羧基中的 O 原子配位及吡啶环上的 N 原子形成的一个稳定的五元螯合环。其中 Ir 与 1-苯基异喹啉相连的 Ir-N 键的平均长度为 0.2090(9) nm，Ir-C 键的平均长度为 0.1983(8) nm，Ir 与辅助配体 3-甲基-2-吡啶甲酸相连的 Ir-O 和 Ir-N 键的键长大小分别为 0.2181(5)、0.2140(9) nm，说明中心 Ir 原子到主体配位 N 原子的距离比 Ir 原子到辅助配体配位 O 原子的距离较近。

2.3 中性铱配合物的热物理性能

图 6 是配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 在氮气气氛下测试的热失重(TGA)曲线。由测试结果可知，配合物分子表现出良好的热稳定性，其热分解温度为 325 $^\circ\text{C}$ (失重 5%)，这表明该材料可适用于真空蒸镀法制备 OLED 器件。

图 5 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的晶体结构图(省略 H 原子)Fig.5 Crystal structure diagram of $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ (H atom omission)表 4 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的主要键长及键角Tab.4 Major bond lengths and bond angles of $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$

Bond name	Bond length/(nm)	Bond name	Bond angle/ $^\circ$
Ir(1)-N(1)	0.2041(6)	N(1)-Ir(1)-O(1)	84.2(3)
Ir(1)-O(1)	0.2181(5)	N(1)-Ir(1)-N(3)	97.6(3)
Ir(1)-N(3)	0.2140(9)	N(2)-Ir(1)-O(1)	97.1(2)
Ir(1)-C(37)	0.1981(8)	C(37)-Ir(1)-N(3)	100.0(3)
Ir(1)-N(2)	0.2016(5)	N(1)-Ir(1)-N(2)	176.0(2)
Ir(1)-C(18)	0.1985(8)	O(1)-Ir(1)-N(3)	75.8(2)

图 6 配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 在氮气气氛下测试的热失重(TGA)曲线Fig.6 Thermogravimetric (TGA) curve of complex $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ tested under nitrogen atmosphere

2.4 中性铱配合物的光物理性能表征

2.4.1 紫外可见吸收光谱分析

将 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 配制成 $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 的 CH_2Cl_2 溶液, 测试其紫外可见光谱, 如图 7 所示。由图 7 可知配合物吸收峰位于 250~550 nm, 配合物在波长小于 345 nm 的吸收峰归因于主配体间单线态的跃迁, 355~500 nm 的吸收峰归因于金属和配体的电荷转移跃迁($^1\text{MLCT}$, $^3\text{MLCT}$)所致, 表明中心金属铱原子具有较强的自旋轨道耦合。

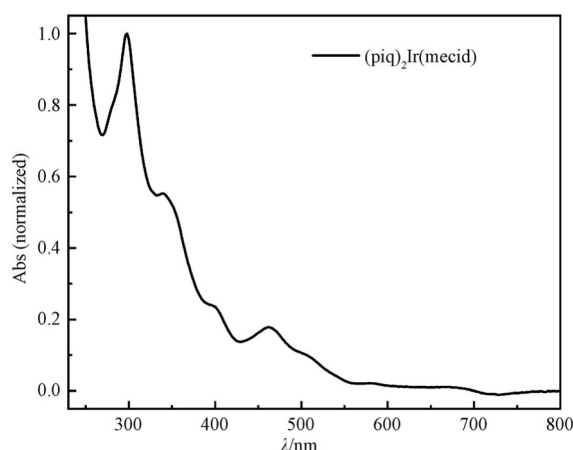


图 7 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的紫外-可见吸收光谱

Fig.7 UV-VIS absorption spectrum of $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$

2.4.2 光致发光光谱分析

将配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 溶解在 CH_2Cl_2 溶液中, 配制成 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 的配合物溶液, 测试得到归一化的光致发光光谱, 如图 8 所示。由图 8 可知其最大发射波长为 618 nm, 为红色发射。

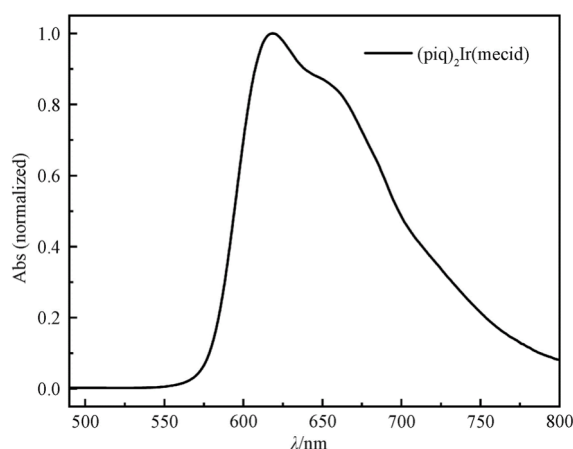


图 8 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 在 CH_2Cl_2 中归一化的光致发光光谱

Fig.8 Normalized photoluminescence spectra of

$\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ in CH_2Cl_2

3 结论

以 1-苯基异喹啉(piq)为主配体, 选用 3-甲基-2-吡啶甲酸(mecid)作为辅助配体, 合成了一种新型的中性红光铱(III)配合物 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$, 测试了其化学组成及晶体结构, 分析了其光物理性质和热稳定性。 $\text{Ir}(\text{piq})_2(\text{mecid})$ 的化学组成为 $\text{C}_{37}\text{H}_{26}\text{IrN}_3\text{O}_2$, 属于三斜晶系, $P1/n$ 空间群。 $a=8.3130(4) \text{ nm}$, $b=11.4866(5) \text{ nm}$, $c=15.3737(7) \text{ nm}$, $\alpha=75.726(2)^\circ$, $\beta=83.005(2)^\circ$, $\gamma=88.785(2)^\circ$, $V=1.4120(11) \text{ nm}^3$, $Z=2$ 。光物理性质显示最大发射波长为 618 nm, 为红色发射。其热分解温度为 325°C , 表明该材料可适用于真空蒸镀法制备 OLED 器件。

参考文献:

- [1] LIANG J, YING L, HUANG F, et al. Recent advances in high performance solution processed WOLEDs for solid-state lighting[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4: 10993-11006.
- [2] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes[J]. Applied Physics Letters, 1987, 51: 913-915.
- [3] ZHANG Y, QIAO J. Near-infrared emitting iridium complexes: molecular design, photophysical properties, and related applications[J]. Iscience, 2021, 24(8): 102858.
- [4] LAI, P N, BRYSAZ C H, ALAM M D, et al. Highly efficient red-emitting bis-cyclometalated iridium complexes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2018, 140: 10198-10207.
- [5] 张松涛, 王樱蕙, 张洪杰, 等. 稀土发光材料在近红外二区成像中的应用[J]. 发光学报, 2020, 41(12): 1460-1478.
- [6] 陈俊, 徐颖, 徐超, 等. 辅助配体功能化铱(III)配合物近红外电致发光材料的合成及其性能[J]. 发光学报, 2022, 43(8): 1217-1226.
- [7] 佟鑫, 葛泽荣, 赵世盛, 等. 高效红光铱配合物的合成, 光物理性质和理论计算[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022(5): 1012-1017.
- [8] QBM A, LA L, JCY A, et al. The novel synthesis of tris-cyclometalated iridium(III) complexes for saturated red organic light-emitting diodes with low efficiency roll-off[J]. Dyes and Pigments, 2021, 191: 109360.

- [9] BOUDREAULT P L T, ESTERUELAS M A, ANA M L, et al. Insertion of unsaturated c-c bonds into the o-h bond of an iridium(III)-hydroxo complex: formation of phosphorescent emitters with an asymmetrical β -diketonate ligand[J]. *Inorganic Chemistry*, 2020, 59(21): 15877-15887.
- [10] ZHU X L, LYSTROM L, KILINA S, et al. Tuning the photophysics and reverse saturable absorption of heteroleptic cationic iridium(III) complexes via substituents on the 6,6'-bis(fluoren-2-yl)-2,2'-biquinoline ligand[J]. *Inorganic Chemistry*, 2016, 55(22): 11908-11919.
- [11] ALI F, NAYAK P K, PERIASAMY N, et al. Synthesis, photophysical, electrochemical and electroluminescence studies of red emitting phosphorescent Ir(III) heteroleptic complexes[J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2017, 129: 1391-1398.
- [12] 晏彩先, 李杰, 姜婧, 等. 高效磷光红光配合物 Ir(pq)₂(acac)的合成、结构表征及光物理性能测试[J]. *功能材料*, 2017, 48(11): 11121-11126.
- [13] 房树清, 钱家盛, 杭德余, 等. β -二酮类铱配合物的合成、表征及光电性能[J]. *精细化工*, 2020, 37(4): 785-792.
- [14] 魏新玉, 王世民, 魏东辉, 等. 含 5-(三氟甲基)-2-吡啶甲酸的黄光铱配合物的合成、光物理性质及量化计算研究(英文)[J]. *化学通报*, 2016, 79(10): 947-951.
- [15] MEI Q, WANG L, TIAN B, et al. Highly efficient red iridium(III) complexes based on phthalazine derivatives for organic light-emitting diodes[J]. *Dyes and Pigments*, 2013, 97(1): 43-51.
- [16] 晏彩先, 许明明, 王姿奥, 等. 一种中性铱磷光配合物的合成及表征[J]. *贵金属*, 2022, 43(S1): 114-118.
- [17] HUANG Y T, CHUANG T H, SHU Y L, et al. Bi-substituted effect on phenylisoquinoline iridium(III) complexes[J]. *Organometallics*, 2005, 24(25): 6230-6238.
- [18] 刘胜强, 于军胜, 曾彦博, 等. 三元铱配合物磷光体系的白光有机电致发光器件光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(03): 636-641.
- [19] 常桥稳, 陈祝安, 王姿奥, 等. 基于苯基喹啉配体修饰的铱磷光配合物及其高效纯红光有机电致发光器件[J]. *发光学报*, 2022, 43(10): 1583-159.
- [20] 常桥稳, 陈祝安, 冯璐, 等. 吸电子基团调控苯基喹啉类铱配合物的合成及光物理性能[J]. *无机化学学报*, 2023, 39(02): 255-261.
- [21] ADAMOVICH V, BENAVENT L, BOUDREAULT P L T, et al. NP pseudo-tris(heteroleptic) red phosphorescent iridium(III) complexes bearing a dianionic[J]. *Inorganic Chemistry*, 2021, 60(15): 11347-11363.
- [22] 晏彩先, 许明明, 陈祝安, 等. 一种喹啉类铱配合物的合成、表征及性能测试[J]. *贵金属*, 2022, 43(4): 31-36.
- [23] 陈铄男. 深红及近红外磷光铱金属配合物的光色调控与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.