

# 一种金铜簇配位聚合物的制备与力致变色性能

韩雨宸<sup>#</sup>, 张蒙<sup>#</sup>, 杨琪, 彭秋晨, 李恺

(郑州大学化学学院, 郑州 450001)

**摘要** 合成了一种具有原子精确结构的新型金铜配位聚合物 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  ( $\text{L}=\text{苯乙炔}$ ), 其在聚集态下表现出良好的发光性能.  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  具有一维链状结构, 能够通过一锅法在室温条件下高效合成. 在研磨作用下,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  从浅黄色变为红色, 发射波长从 550 nm 红移至 620 nm. 在二氯甲烷蒸汽作用下, 红色的  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  可以恢复为浅黄色, 发光也可恢复为黄色发光. 该可逆变化过程表现出优异的抗疲劳性, 使得  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  在荧光防伪材料领域具有潜在应用前景. 机理研究表明,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  在研磨后从晶态向无定形态转变, 原本的金属-金属键和分子内、分子间的大量  $\pi-\pi$  相互作用被破坏, 阻断了簇中心发光通道, 是导致其发光和颜色改变的主要原因.

**关键词** 配位聚合物; 金铜簇; 力致变色

中图分类号 O614

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20260007

## Preparation and Mechanochromism Property of a Gold-Copper Cluster Coordination Polymer

HAN Yuchen<sup>#</sup>, ZHANG Meng<sup>#</sup>, YANG Qi, PENG Qiuchen, LI Kai<sup>\*</sup>

(College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract** An atomic precise gold-copper coordination polymer,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  ( $\text{L}=\text{phenylacetylene}$ ), was synthesized, which exhibits excellent luminescent properties in the aggregated state.  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  has a one-dimensional chain-like structure and can be efficiently synthesized by a one-pot method at room temperature. Upon grinding, the color of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  changes from yellow to red, and the emission wavelength red-shifts from 550 nm to 620 nm. Under the action of dichloromethane vapor, the red  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  powders can revert to yellow. This reversible change process exhibits excellent fatigue resistance, making  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  suitable for the application in fluorescent anti-counterfeiting materials. Mechanistic study shows that  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  transforms from a crystalline state to an amorphous state after grinding. Meanwhile, the original metal-metal bonds and a large number of  $\pi-\pi$  interactions within and between molecules are disrupted, blocking the long-range cluster center luminescence channel, which is the main reason for its luminescence and color change.

**Keywords** Coordination polymer; Gold-copper cluster; Mechanochromism

力致变色材料是一种智能响应材料, 能够在外部机械力的刺激下改变自身的颜色或发光波长, 在数据存储、荧光材料、运动或应力传感器等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 通过施加机械力来改变材料的颜色和发光一般存在两种方式, 一是改变其化学结构, 二是改变其聚集模式. 前者借助机械力的作用促使材料本身发生化学反应, 进而生成一种或多种新的物质, 带来颜色和发光的改变<sup>[4-6]</sup>; 后者则是

收稿日期: 2026-01-01. 网络首发日期: 2026-02-01.

联系人简介: 李 恺, 男, 博士, 教授, 主要从事发光团簇方面的研究. E-mail: likai@zcu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22371264, 22505228)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.22371264, 22505228).

<sup>#</sup> 共同第一作者.

在机械力的作用下使分子的堆积模式、分子构象以及分子间作用力发生改变,从而使得材料在受到机械力刺激前后呈现出不同的颜色和发光行为<sup>[7-9]</sup>.近年来,具有聚集诱导发光(Aggregation-induced emission, AIE)特性的分子由于在聚集态下良好的发光特性,在力致变色材料尤其是力致发光变色材料的开发领域表现出广阔的前景<sup>[10-14]</sup>.在各类AIE分子中,币金属团簇AIE分子由于其固有的高发光量子效率、灵活的亲金属相互作用和丰富的团簇间作用力,使得其颜色和发光都容易受到周围环境(如温度、压力)等的影响,成为一类极具潜力的力致变色材料<sup>[15,16]</sup>.

然而,币金属团簇的稳定性相对较差,以其为基础开发的力致变色材料在受力后往往会发生不可逆的结构转变,虽然伴随着颜色和发光的改变,但却不能重复使用<sup>[17]</sup>.为了提升币金属团簇材料的稳定性,将其通过分子组装,形成团簇基框架组装材料或配位聚合物材料成为一种有效的手段,许多研究表明,团簇基框架组装材料或配位聚合物材料在光、热、溶剂分子等外部因素的刺激下具有良好的可逆响应特性<sup>[18-23]</sup>.这些材料在机械力的作用下同样有望表现出良好的可逆响应特性.

本文设计合成了具有原子精确结构的Au-Cu合金一维配位聚合物 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ (L=苯乙炔).该配位聚合物能够通过一锅法在室温条件下进行合成,产率超过65%(以金元素计算). $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 拥有良好的力致变色特性,在研磨前后,晶体颜色发生从浅黄色向红色的显著转变,伴随发光从黄色变为红色,发射波长红移达70 nm.更重要的是,在二氯甲烷气体熏蒸作用下,研磨后的 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 可以恢复为发黄光的状态.可逆的研磨和熏蒸恢复过程可多次重复,使得 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 在荧光防伪材料领域具有潜在应用前景.机理研究表明, $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 在研磨后从晶态向无定形态转变,原本的金属-金属键和分子内、分子间的大量 $\pi$ - $\pi$ 相互作用被破坏,阻断了簇中心发光通道,是导致其发光和颜色改变的主要原因.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

氯金酸(质量分数23.5%~23.8%的HCl溶液)、苯乙炔(纯度95%)和六氟磷酸四乙腈铜(纯度98%),分析纯,上海阿拉丁试剂有限公司;乙醇、乙醚、二氯甲烷和三乙胺,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司.

MiniFlex型台式X射线粉末衍射(XRD)仪(铜靶: $\lambda=0.15418\text{ nm}$ ),日本理学公司;Perkin-Elmer 240型元素分析仪,美国PerkinElmer公司;Agilent Cary 5000型紫外-可见-近红外光谱仪,安捷伦科技(中国)有限公司;Zeiss Sigma 500型扫描电子显微镜(SEM),德国卡尔蔡司公司;爱丁堡FLS-980型荧光光谱仪,英国爱丁堡仪器公司;Rigaku XtaLAB Pro型X射线单晶衍射仪,日本理学公司.

### 1.2 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的合成

将1.00 g(2.5 mmol)氯金酸溶解在25 mL乙醇中,缓慢加入600  $\mu\text{L}$ (8.2 mmol)二甲基硫醚,快速搅拌2 h,直至产生白色沉淀.过滤反应液,用10 mL乙醇和10 mL乙醚分别洗涤沉淀3次,得到0.74 g白色固体 $\text{Me}_2\text{SAuCl}$ ,产率为95%.将60 mg(0.2 mmol) $\text{Me}_2\text{SAuCl}$ 溶解在10 mL二氯甲烷中,然后依次加入100  $\mu\text{L}$ 苯乙炔和100  $\mu\text{L}$ 三乙胺,溶液的颜色从无色变为浅黄色,轻轻摇晃反应瓶,溶液再次变为无色.将75 mg(0.2 mmol)六氟磷酸四乙腈铜溶解在20 mL二氯甲烷中,缓慢加入上述反应液中,反应液从无色变为亮橙色.室温下挥发约12 h后,在浅黄色溶液中形成大量浅黄色条状晶体 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ .过滤收集晶体,总产率为65%(以金元素计算).

### 1.3 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的单晶结构测定

采用Rigaku XtaLAB Pro型X射线单晶衍射仪( $\text{CuK}\alpha$ 辐射, $\lambda=0.154184/0.154178\text{ nm}$ ),在200 K下收集 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的X射线单晶衍射数据.晶体挑选过程如下:用滴管将含有晶体的母液滴在载玻片上,在显微镜下观察,选择形状规则且透明的晶体,用Loop环固定后进行测试.数据收集与还原通过CrysAlisPro程序完成;结构由直接法(SHELXS)解出,并利用OLEX2软件中的SHELXL-2015模块,基于全矩阵最小二乘法进行精修.所有非氢原子坐标均进行各向异性精修,氢原子则通过理想化几何结

构计算其位置,并分配了固定的各向同性位移参数.根据电子密度分布的不同,分别采用了相应的结构精修策略.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的晶体结构分析

晶体结构解析结果表明,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  结晶在单斜晶系的  $C2/c$  空间群中. 由图1(A)可以看出, 该结构由2个  $\text{AuCu}(\text{L})_2$  单体组成  $\text{Au}_2\text{Cu}_2(\text{L})_4$ , 进而形成无限延伸的一维链状结构.  $\text{Au}-\text{Au}$  键长为 0.3192 nm,  $\text{Au}-\text{Cu}$  键长范围在 0.3187~0.3193 nm 之间, 表明其形成了较强的金属相互作用<sup>[24-26]</sup>. 2个炔基分别采用  $\mu_2-\eta_1$  和  $\eta_2$  的配位模式. 所有炔基与 Au 原子呈  $\sigma$  配位模式, 与 Cu 原子呈现  $\pi$  配位模式[图1(B)].  $\text{Au}-\text{C}$  键长范围为 0.1993~0.1999 nm,  $\text{Cu}-\text{C}$  键长范围为 0.2054~0.2143 nm<sup>[27,28]</sup>. 具体的晶体学参数见本文支持信息表S1和表S2. 由图1(C)可以看出, 一维金铜配位聚合物的分子内和分子间分别存在  $\pi-\pi$  和  $\text{C}-\text{H}\cdots$  相互作用,  $\pi-\pi$  相互作用的距离为 0.425 nm,  $\text{C}-\text{H}\cdots$  相互作用的距离为 0.407 nm. 在  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  晶体表面可检测到 Au、Cu 和 C 元素, 各元素在晶体表面分布均匀[图1(D)].

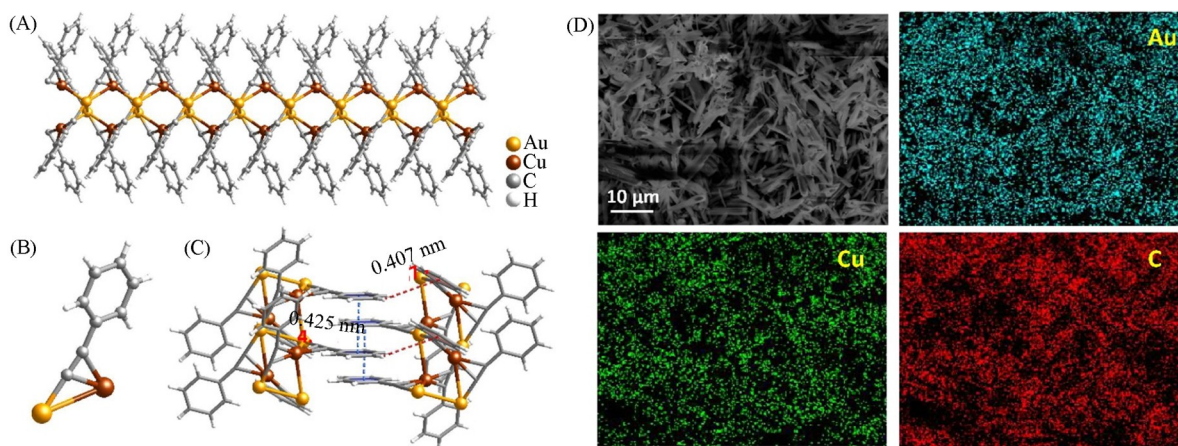


Fig. 1 Schematic diagram of molecular stacking(A), monomer structure(B), intermolecular interactions(C) and SEM image and elemental mapping(D) of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$

### 2.2 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的光学性质

$[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  在室温下为浅黄色晶体, 经研磨后转变为红色粉末(见本文支持信息视频1).  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  在研磨前的紫外-可见漫反射光谱在 385 nm 附近呈现一个较窄的单峰, 而研磨后单峰消失, 吸收范围拓展至 630 nm[图2(A)]. 此外, 对研磨前后的  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  进行固体荧光光谱测试发现, 研磨前的样品呈现黄色发光, 发射波长位于 550 nm 处; 研磨后的  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  表现为红色发光, 发射波

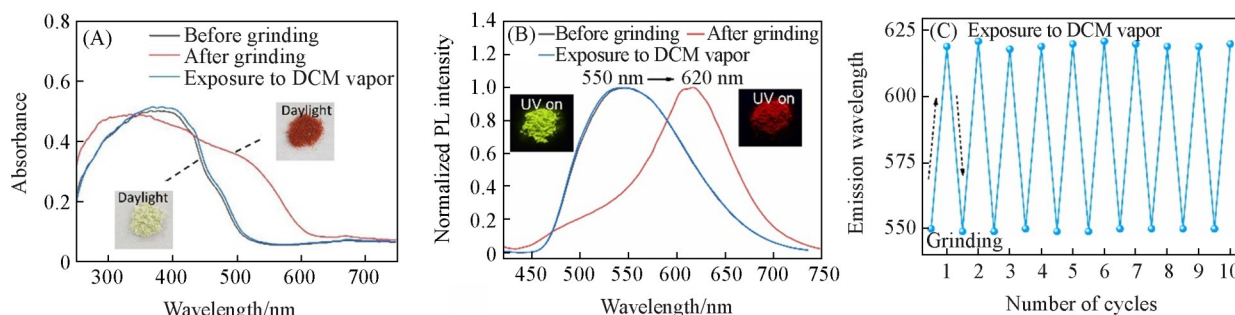


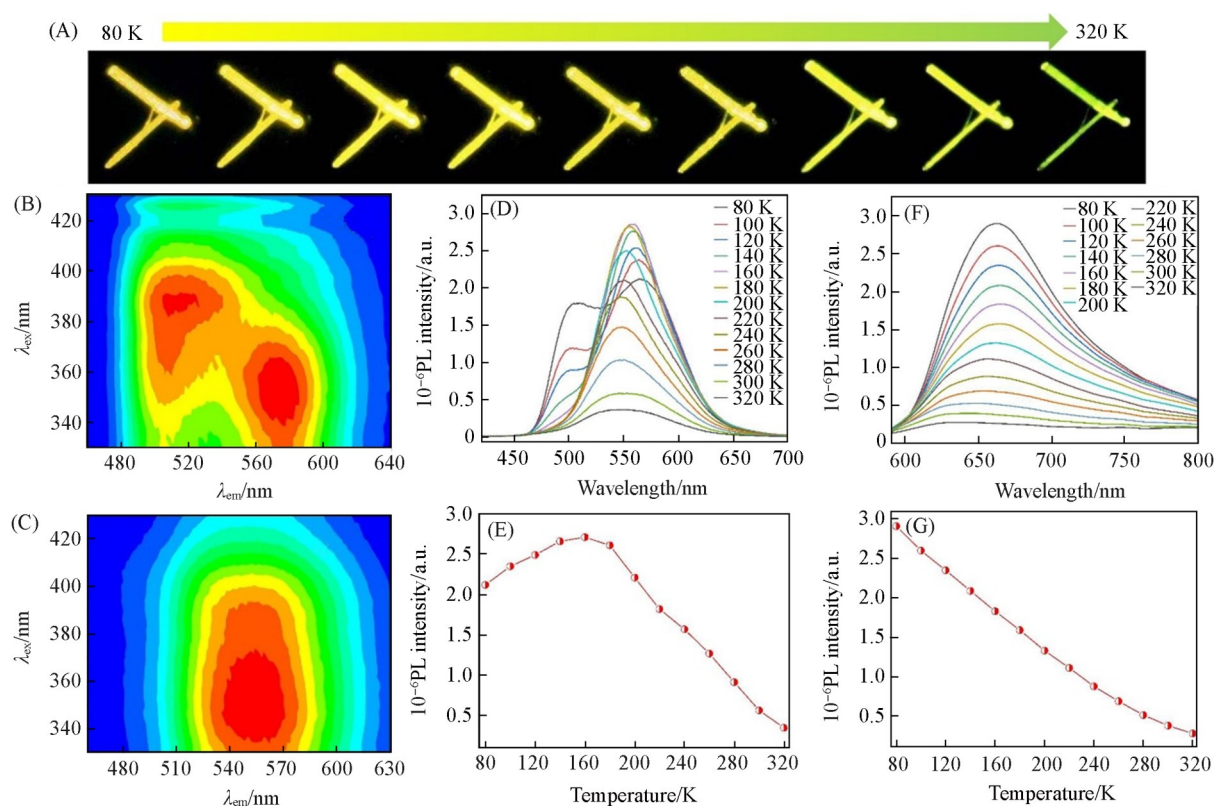
Fig. 2 UV-Vis diffuse reflectance absorption spectra(A) and luminescence spectra(B) of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  before and after grinding and reversible luminescence cycles of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  under alternating grinding/exposure to DCM vapor (C)

Inset in (A): photographs of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  before and after grinding under daylight. Inset in (B): photographs of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  before and after grinding under UV light.

长在 620 nm 处[图 2(B)].  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  在研磨前后的发射峰发生了高达 70 nm 的红移, 表现出显著的光致发光变色效应. 有趣的是, 将二氯甲烷滴加在研磨后的  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  上, 其颜色会迅速转变回浅黄色, 使用二氯甲烷蒸汽进行熏蒸也可使其颜色恢复, 但该过程较缓慢, 大约需要 1 min. 同时, 样品的紫外-可见漫反射光谱和固体荧光光谱也能恢复到研磨前的状态, 显示出良好的可逆性. 荧光测试表明, 该可逆转变至少可以经历 10 个循环而荧光信号未出现明显衰减[图 2(C)]. 同时, 合成了对比化合物  $[\text{AuCu}(\text{L}')_2]_n$  ( $\text{L}'=3$ -氟苯乙炔), 并对其性能进行了表征. 由本文支持信息图 S1 和 S2 可以看出,  $[\text{AuCu}(\text{L}')_2]_n$  的晶体结构与  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  相似, 且本身也为淡黄色固体, 几乎没有光致发光性能, 但通过研磨后可以变成红色并表现出明显的光致发光特性. PXRD 结果表明, 与化合物  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  类似, 研磨导致  $[\text{AuCu}(\text{L}')_2]_n$  从晶态变为无定形态, 二氯甲烷熏蒸可使研磨后的  $[\text{AuCu}(\text{L}')_2]_n$  恢复为晶态, 且颜色和发光也可以恢复至研磨前的状态.

### 2.3 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的发光机制

为了探究  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  的发光机制, 对  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  研磨前后的变温光谱进行了测试, 测试区间为 83~320 K [图 3(A)]. 由图 3(B) 可以看出, 研磨前的粉末样品在 80 K 时呈现出典型的双发射现象. 短波长处的发射峰强度随温度的升高逐渐降低; 当温度超过 160 K 时, 短波长处的发射峰完全消失 [图 3(C)]. 长波长处的发射峰随着温度的升高呈现先增强后减弱的趋势, 并伴随着发射峰波长蓝移, 表现出典型的热活化延迟荧光 (Thermally-activated delayed fluorescence, TADF) 特性, 当温度为 160 K 时峰强度达到最高值 [图 3(D) 和 (E)]. 研磨后的样品从 83 K 到 320 K 始终只有一个发射峰, 该发射峰的强度随着温度的升高逐渐降低, 波长从 660 nm 蓝移至 620 nm [图 3(F) 和 (G)].



**Fig. 3** Photographs showing the temperature-dependent color changes of unground  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  under UV light (A), 3D luminescence spectra of  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  at 80 K (B) and 170 K (C), temperature-dependent luminescence spectra of unground  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  (D), luminescence intensity of unground  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  at 550 nm as a function of temperature, temperature-dependent luminescence spectra of ground  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  (F) and luminescence intensity of ground  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  at 620 nm as a function of temperature (G)

进一步对样品在不同温度下的发光寿命进行了测试. 结果表明,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  研磨前的长波长寿命随着温度升高不断减小, 符合一般 TADF 分子的变温寿命变化规律 [图 4(A)]. 相反地,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$

研磨后的发光寿命则几乎不随温度变化而变化[图4(B)]. 金属团簇发光通常源于簇中心发光(Metal cluster-centered, MCC)和金属-配体电荷转移(Metal-to-ligand charge transfer, MLCT)发光等多个发光通道<sup>[29,30]</sup>. 为了明确 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的发光机制, 进一步对 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 在研磨前的变温晶体结构进行了测试和解析. 由图4(C)可以看出, 从83 K到293 K,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 分子内相邻两个金原子的距离从0.419 nm伸长至0.431 nm, 说明随温度的升高, 晶体中的金属-金属相互作用逐渐减弱, 导致簇中心发光强度降低, 使得未研磨 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 短波长的发射峰逐渐降低直至消失<sup>[31,32]</sup>. 对比研磨前后的XRD数据可以发现, 研磨后,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的多数衍射峰消失, 分子从晶态向无定形态转变, 而通过二氯甲烷蒸汽熏蒸可以使 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的晶体堆积方式恢复[图4(D)], 原本的金属-金属键和分子内、分子间的大量 $\pi$ - $\pi$ 相互作用被破坏, 阻断了MCC发光通道, 分子表现出长波长的MLCT发光<sup>[33,34]</sup>.  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 研磨后的发光寿命几乎不随温度变化而变化的实验结果也验证了其MLCT发光的特性<sup>[35,36]</sup>.

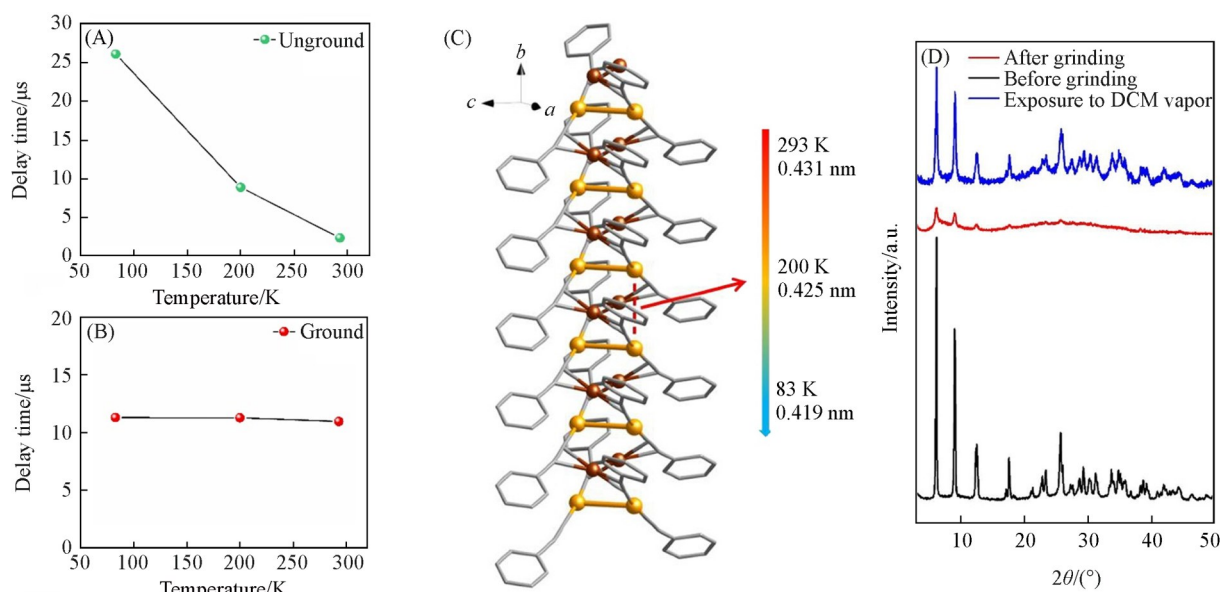


Fig. 4 Luminescence lifetime of unground(A) and ground(B)  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  at different temperatures, schematic diagrams showing the decrease of the intermolecular Au—Au distances with temperature(C) and XRD patterns of the  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$  before grinding, after grinding and exposure to DCM vapor

#### 2.4 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 力致变色特性的应用

由于 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 对外部机械力具有可逆响应行为, 因而有望应用于具有可重复书写性能的变色纸张. 选取圆形滤纸浸泡在用于生长 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 晶体的母液中, 从而得到均匀负载 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的书写纸. 将该书写纸烘干以去除残留的溶剂. 如图5所示, 在纸张上写下郑州大学的缩写字母“ZZU”字样时, 发现书写“ZZU”的部分转变为红色, 在纸上留下清晰可见的字样. 进一步用二氯甲烷蒸汽熏蒸, 红色字样又转变成黄色. 这种颜色变化过程具有优异的可逆性, 在荧光防伪方面具有潜在的应用前景.



Fig. 5 Schematic representation of information storage and erasure in  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ -based paper

### 3 结 论

通过一锅法合成了具有良好力致变色特性的一维金铜配位聚合物 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ . 在研磨前后, 晶体颜色发生从浅黄色向红色的显著转变, 伴随发光从黄色变为红色, 发射波长红移达70 nm. 机理研究表明,  $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 在研磨后从晶态向无定形态转变, 原本的金属-金属键和分子内、分子间的大量 $\pi$ - $\pi$ 相互作用被破坏, 阻断了簇中心发光通道, 是导致其发光和颜色改变的主要原因. 在二氯甲烷蒸汽的作

用下, 研磨后的 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 可以恢复为发黄光的状态并且晶体堆积方式也可恢复, 该循环过程具有良好的可逆性. 由于通过研磨/蒸汽熏蒸可以有效调控 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 的颜色和发光, 使得 $[\text{AuCu}(\text{L})_2]_n$ 在荧光防伪材料领域具有潜在应用前景.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20260007>.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Caruso M. M., Davis D. A., Shen Q., Odom S. A., Sottos N. R., White S. R., Moore J. S., *Chem. Rev.*, **2009**, 109(11), 5755—5798
- [ 2 ] Han T., Liu L., Wang D., Yang J., Tang B. Z., *Macromol. Rapid Commun.*, **2021**, 42(1), 2000311
- [ 3 ] Zhang R., Zhao H., Li N., Chen Y., Hu Y., Zhang Q., Chen X., Ruan Q., Long Y., Ke Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, e21287
- [ 4 ] Overholts A. C., Granados Razo W., Robb M. J., *Nat. Chem.*, **2023**, 15(3), 332—338
- [ 5 ] Xie Z., Zhang X., Xiao Y., Wang H., Shen M., Zhang S., Sun H., Huang R., Yu T., Huang W., *Adv. Mater.*, **2023**, 35(21), 2212273
- [ 6 ] Xu T., Han Y., Ni Y., Chi C., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(2), e202414533
- [ 7 ] Chen C., Guo Y., Chang Z., Müllen K., Wang X. Y., *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1), 8555
- [ 8 ] He Y., Lin S., Guo J., Li Q., *Aggregate*, **2021**, 2(6), e141
- [ 9 ] Sun J., Wang Y., Zhan Y., *Appl. Mater. Today*, **2025**, 45, 102841
- [ 10 ] Wang X., Chen Z., Yin J., Liu S. H., *Chin. Chem. Lett.*, **2022**, 33(5), 2522—2526
- [ 11 ] Ren Y., Kravberg A., Xie S., Grape E. S., Yang Z., Inge A. K., Yan M., Ramström O., *Aggregate*, **2025**, 6(1), e659
- [ 12 ] Yang G., Zhao W. X., Liang L., Xue Z. M., Meng F., Kong Y. Q., Lin H. T., Chen S. H., Wang C. Z., *Chem. Eng. J.*, **2025**, 515, 163597
- [ 13 ] Zhang Q., Dang X., Cui F., Wu Z., Li Z. Y., Sun X. Q., Xiao T., Wang L., *Chem. Eur. J.*, **2025**, 31(3), e202403203
- [ 14 ] Zhao X., Gong J., Li Z., Sung H. H. Y., Williams I. D., Lam J. W. Y., Zhao Z., Tang B. Z., Wong W. Y., Xu L., *Aggregate*, **2025**, 6(2), e686
- [ 15 ] Jin Y., Peng Q. C., Li S., Su H. F., Luo P., Yang M., Zhang X., Li K., Zang S. Q., Tang B. Z., Mak T. C. W., *Natl. Sci. Rev.*, **2022**, 9(8), nwab216
- [ 16 ] Kong Y. J., Yan Z. P., Li S., Su H. F., Li K., Zheng Y. X., Zang S. Q., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, 59(13), 5336—5340
- [ 17 ] Wang J. Y., Lei Y. Y., Yuan J. W., Li K., Zang S. Q., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2026**, 65(5), e21059
- [ 18 ] Huang R. W., Wei Y. S., Dong X. Y., Wu X. H., Du C. X., Zang S. Q., Mak T. C. W., *Nat. Chem.*, **2017**, 9(7), 689—697
- [ 19 ] Liu Y. Y., Zhang X., Li K., Peng Q. C., Qin Y. J., Hou H. W., Zang S. Q., Tang B. Z., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(41), 22417—22423
- [ 20 ] Wu X. H., Luo P., Wei Z., Li Y. Y., Huang R. W., Dong X. Y., Li K., Zang S. Q., Tang B. Z., *Adv. Sci.*, **2019**, 6(2), 1801304
- [ 21 ] Wu X. H., Wei Z., Yan B. J., Huang R. W., Liu Y. Y., Li K., Zang S. Q., Mak T. C. W., *CCS Chem.*, **2019**, 1(5), 553—560
- [ 22 ] Wang Y., Zhai S. M., Luo P., Dong X. Y., Wang J. Y., Han Z., Zang S. Q., *Chin. Chem. Lett.*, **2024**, 35(11), 10949
- [ 23 ] Koshevoy I. O., Chang Y. C., Karttunen A. J., Haukka M., Pakkanen T., Chou P. T., *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, 134(15), 6564—6567
- [ 24 ] Han Z., Duan C., Dong X. Y., Si Y., Hu J. H., Wang Y., Zhai S. M., Lu T., Xu H., Zang S. Q., *Nat. Commun.*, **2025**, 16(1), 1867
- [ 25 ] Peng Q. C., Si Y. B., Wang Z. Y., Dai S. H., Chen Q. S., Li K., Zang S. Q., *ACS Cent. Sci.*, **2023**, 9(7), 1419—1426
- [ 26 ] Ye W. Q., Lu H., Chen W. J., Li N. J., Zhang Y., Wang L. H., Li J., Zhu Y., Li M. Q., Fan C. H., Jia S. S., Chen J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, 46(8), 20250100(叶伟卿, 逯慧, 陈婉京, 李宁静, 张瑜, 王丽华, 李江, 诸颖, 李明强, 樊春海, 贾思思, 陈静. 高等学校化学学报, **2025**, 46(8), 20250100)
- [ 27 ] Li S., Li N. N., Dong X. Y., Zang S. Q., Thomas C. W. Mak, *Chem. Rev.*, **2024**, 124(11), 7262—7378
- [ 28 ] Sullivan A. I., Steele E. A., Takano S., Zeinizade E., Chen J., Malola S., Siddhant K., Häkkinen H., Stamplecoskie K. G., Tsukuda T., Zheng G., Crudden. C. M., *J. Am. Chem. Soc.*, **2025** 147 (5), 4230—4238
- [ 29 ] Yang Y., Guo S., Zhang Q., Guan Z. J., Wang Q. M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(29), e202404798
- [ 30 ] Zhang N., Li Y., Han S., Wei Y., Hu H., Huo R., Duan C., Zhang J., Han C., Xie G., Xu H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(27), e202305018
- [ 31 ] Zhang N., Qu L., Dai S., Xie G., Han C., Zhang J., Huo R., Hu H., Chen Q., Huang W., Xu H., *Nat. Commun.*, **2023**, 14(1), 2901
- [ 32 ] Yang H., Peng S. K., Chen W., Luo D., Xi S., Lu S., Huang Y. L., Hao D. B., Cai B., Wang H., Xie M., Li M. D., Li X. P., Ning G. H., Li D., *CCS Chem.*, **2025**, 7, 2201—2214
- [ 33 ] Sun J. Q., Yao C. H., Xiang H. X., Chen F. Z., Lu J., Huang W., *Adv. Mater.*, **2025**, 38(3), e14182
- [ 34 ] Arima D., Hidaka S., Yokomori S., Niihori Y., Negishi Y., Oyaizu R., Yoshinami T., Kobayashi K., Mitsui M., *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, 146(24), 16630—16638
- [ 35 ] Zhang W., Kong J., Liu W. T., Zhao R., Zhang J., Deng H., Lei Z., Wang Q. M., Luo Y., Zhou M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(47), e202515551
- [ 36 ] Liu X., Jiang Y., Li F., Xu X., Li R., Zhu W., Ni J., Ding C., Liu S., Zhao Q., *Adv. Optical Mater.*, **2023**, 11, 2202169

(Ed.: H, K, M)