

# 绿色环保阻垢剂 Ly-CCQDs 的合成及性能研究

李辉, 孙征楠, 荆国林\*

(东北石油大学化学化工学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**以无水柠檬酸、L-赖氨酸为主要原料,通过熔融缩聚法合成了一种纯柠檬酸(CCQDs)衍生物 Ly-CCQDs,通过红外光谱分析仪、紫外-可见分光光度计等对其进行表征,在 40~80°C 条件下对 Ly-CCQDs 进行了阻垢静态测试。结果表明,在极少量 Ly-CCQDs 加入的条件下,阻硫酸钙和碳酸钙垢的阻垢率均可达到 100%,与单一的无水柠檬酸相比有明显的改善。通过 SEM 对 Ly-CCQDs 的阻垢机制进行研究,随着 Ly-CCQDs 加入量的增大,碳酸钙垢的晶型逐渐由方解石向尺寸更小的霏石结构发展,证明 Ly-CCQDs 对钙垢生长有显著的抑制作用。

**关键词:**无水柠檬酸;L-赖氨酸;熔融缩聚;阻垢

中图分类号:O657.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)03-0212-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.03.037

## Synthesis and properties of green scale inhibitor Ly-CCQDs

LI Hui, SUN Zheng-nan, JING Guo-lin\*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing163318, China)

**Abstract:** Ly-CCQDs, a CCQDs derivative, is synthesized via the melt polycondensation method with anhydrous citric acid and L-lysine as main raw materials, and characterized by means of infrared spectrometer, ultraviolet-visible spectrophotometer, etc. The scale inhibition static test to Ly-CCQDs is carried out at 40~80°C. It is shown that the scale inhibition rates of Ly-CCQDs against calcium sulfate and calcium carbonate scale both reach 100% under a very small addition amount of CCQDs, showing a significant improvement than that of anhydrous citric acid alone. The scale inhibition mechanism of Ly-CCQDs is studied through SEM, and it is found that the crystal form of calcium carbonate scale changes with the increasing addition amount of Ly-CCQDs, and gradually develops from calcite to smaller aragonite structure, proving that Ly-CCQDs has a significant inhibitory effect on the growth of calcium scale.

**Key words:** anhydrous citric acid; L-lysine; melt polycondensation; scale inhibitor

CCQDs 是一种由纯柠檬酸合成的碳量子点阻垢剂<sup>[1-2]</sup>,其独特的光学效应为新型阻垢剂的开发提供了新的研究方向<sup>[3-7]</sup>。为了改善 CCQDs 碳量子点的阻垢性能,研究人员对 CCQDs 碳量子点合成的实验进行了优化。

为开发新型阻垢剂的应用途径,针对 CCQDs 碳量子点的阻垢性,Chen 等<sup>[8]</sup>对其进行了优化合成实验。CCQDs 的碳量子点中含有丰富的羧基,其与 Ca<sup>2+</sup> 离子的相互作用是其阻垢的重要因素。L-赖氨酸具有良好的羧基及较强的水溶性和电子效应,同时也有水溶性较强、吸附电子效应较好的醚基,可以改善 CCQDs 的阻垢性。

赖氨酸是一种白色自由流动的针状结晶型粉

末,因分子中既有氨基又有羧基,使其对 CaCO<sub>3</sub> 和 CaSO<sub>4</sub> 均具有高度的阻垢抑制作用<sup>[9]</sup>。研究表明,L-赖氨酸在自然环境中有较强的降解能力<sup>[10-15]</sup>。因此,笔者尝试使用 L-赖氨酸对柠檬酸进行修饰,以获得具有更好阻垢性能的碳量子点。该产品可用于脱盐工艺、工业锅炉、水冷系统及石油管线等领域<sup>[16]</sup>。

## 1 实验步骤

### 1.1 试剂和仪器

试剂:柠檬酸、L-赖氨酸、碳酸氢钠、无水硫酸钠、无水氯化钙,均为分析纯。

仪器:真空冷冻干燥机,布鲁克香港有限公司生

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2024-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52076036);东北石油大学青年科学基金项目(15071120528)

作者简介:李辉(1997-),男,硕士生,研究方向为绿色阻垢剂和碳量子点,huili142857@163.com;荆国林(1969-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为水污染控制工程,通讯联系人,jglxueshu@yeah.net。

产;真空干燥箱,梅特勒托利多仪器有限公司生产; TENSOR II 型红外光谱仪,布鲁克香港有限公司生产; S-3400N II 型扫描电子显微镜,日立公司(Hitachi)生产; UV-5200 型紫外-可见分光光度计,上海森信仪器有限公司生产; JEM-2100 型透射电子显微镜,日本电子株式会社生产; LS 55 型荧光分光光度计,珀金埃尔默仪器有限公司生产。

## 1.2 制备方法

首先,确保 L-赖氨酸与无水柠檬酸按适宜的摩尔比于玛瑙研钵之中进行混合,此后,再将混合样品平摊于容量为 25 mL 的烧杯底部,确保其与空气之间的充分接触,在烘箱中控温加热,在高温下柠檬酸和 L-赖氨酸溶解并发生反应。经数小时的冷却处理之后,在实验样品之中添加浓度为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液进行溶解。并且将溶解之后的溶液放置到捕获分子质量是 3.5 K 的透析袋之中进行杂质的去除,共计处理 12 h,且每隔 3 h 进行一次去离子水的更换操作。完成这一操作处理之后,将透析液放置到冷冻干燥机之中持续冷冻干燥处理 12 h,将制备的 Ly-CCQDs 制成黄褐色的粉末,放在密闭的容器中。

## 1.3 表征

利用扫描范围为 450~5 000  $\text{cm}^{-1}$  的 II FT-IR 光谱仪对碳量子点阻垢剂 Ly-CCQDs 进行分析;利用紫外-可见光谱仪对碳量子点阻垢剂 Ly-CCQDs 进行表征;利用 S-3400N II 扫描电子显微镜对阻垢剂的微观结构进行表征。加速电压为 8 kV、放大倍数为 900~4 000 倍;利用 LS-55 型荧光光谱仪测定 Ly-CCQDs 的碳量子点阻垢剂的荧光光谱。用去离子水溶解一定数量的待测物质,将其配制成 10~60 mg/L 不同质量浓度的待测溶液,再将其加入到四面透光性的石英比色皿上,擦拭干净后进行测定;利用 JEM-2100 型透射电子显微镜观察了 Ly-CCQDs 的碳量子点阻垢剂的性能;利用 D/MAX-2200 型 X 射线粉末衍射仪对沉淀过滤得到的碳酸钙和硫酸钙进行分析,在控温 50℃ 条件下干燥若干小时,随后用玛瑙研钵研磨沉淀,以使待测量的沉淀粒度尽可能均匀、精细。扫描速度为 10°/min,扫描范围为 5~80°。

## 1.4 阻垢性能的测定

### 1.4.1 碳酸钙垢阻垢率的分析与评价

基于国标 GB/T 16632—2019 中的具体标准对于阻垢剂 Ly-CCQDs 的阻碳酸钙垢率进行测量与分析。设定的水体环境为:质量浓度为 0.24 g/L 的

$\text{Ca}^{2+}$  离子、质量浓度为 0.732 g/L 的  $\text{HCO}_3^-$  离子;pH=7;加热温度设定为 80℃,控温时间设定为 10 h。

### 1.4.2 硫酸钙垢阻垢率的分析与评价

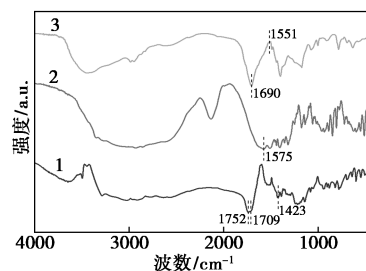
依照行标 SY/T 5673—93 之中的具体标准对阻垢剂 Ly-CCQDs 的阻硫酸钙垢率进行测量,设定的水体环境为:质量浓度为 1.51 g/L 的  $\text{Ca}^{2+}$  离子、质量浓度为 2.4 g/L 的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子;pH=8;加热温度设定为 80℃,控温时间设定为 30 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ly-CCQDs 的结构与荧光性分析

#### 2.1.1 红外光谱分析

Ly-CCQDs、L-赖氨酸和无水柠檬酸的 FT-IR 谱图如图 1 所示。从图 1 中可以看出,在 Ly-CCQDs 的谱线上均呈现出所有的特征峰。无水柠檬酸在 1 709  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是酯基—C=O 的弯曲振动,1 752  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是—COOH 中—C=O 的伸缩振动,1 423  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是羧基中的—OH。L-赖氨酸在 1 575  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是—NH<sub>2</sub> 基产生的弯曲振动。Ly-CCQDs 在 1 690  $\text{cm}^{-1}$  处的峰归因于—COOH 中的—C=O 所产生的伸缩振动,1 551  $\text{cm}^{-1}$  处的峰是—NH<sub>2</sub> 键的弯曲振动。从上述分析可知,成功合成了 Ly-CCQDs。



1—无水柠檬酸;2—L-赖氨酸;3—Ly-CCQDs

图 1 无水柠檬酸、L-赖氨酸以及阻垢剂 Ly-CCQDs 的 FT-IR 分析

#### 2.1.2 Ly-CCQDs 的紫外-可见光谱分析

在温度为 200℃ 的条件下加热无水柠檬酸,设定加热时间为 1.5 h,针对于柠檬酸:L-赖氨酸摩尔比为 5:1 的 Ly-CCQDs,选定的溶剂为去离子水, Ly-CCQDs 的紫外-可见光谱图如图 2 所示。由图 2 中可以看出, Ly-CCQDs 在部分紫外光范围内(40~800 nm)有着较强的吸收,在 50 nm 处吸收强度最高,表明 Ly-CCQDs 含有未共轭的双键。随着波长越来越接近可见光, Ly-CCQDs 的吸光度逐渐降低,但在可见光(400~800 nm)中几乎不吸收。

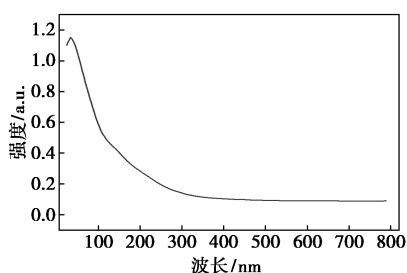
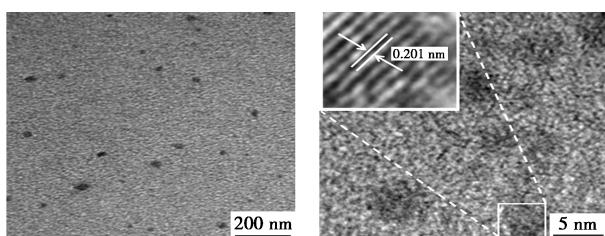


图 2 Ly-CCQDs 的紫外-可见光谱

### 2.1.3 Ly-CCQDs 的 TEM 表征

为了研究碳量子点的形貌,将 Ly-CCQDs 粉末超声分散到乙醇中,然后滴到超薄的碳膜上。乙醇挥发后,用 JEM-2100 透射电镜对碳量子点 Ly-CCQDs 粉末进行表征,结果如图 3 所示。



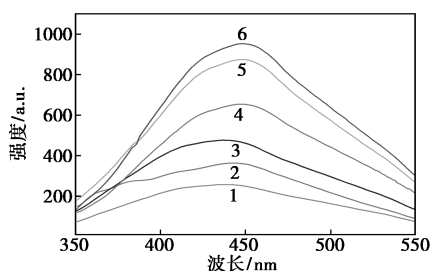
(a) Ly-CCQDs (20 万倍) (b) Ly-CCQDs (60 万倍)

图 3 Ly-CCQDs 的透射电镜图

从图 3 中可以看出, Ly-CCQDs 分布均匀,大多呈圆形,尺寸在 3~5 nm 之间,石墨区域中 Ly-CCQDs 的晶格间距约为 0.201 nm,且分散性好,无团聚现象。

### 2.1.4 Ly-CCQDs 的 PL 测试分析

不同质量浓度的 Ly-CCQDs 在 385 nm 波长处的荧光光谱如图 4 所示。



1—10 mg/L; 2—20 mg/L; 3—30 mg/L; 4—40 mg/L; 5—50 mg/L; 6—60 mg/L

图 4 不同质量浓度 Ly-CCQDs 的荧光光谱

从图 4 中可以看出,在 390 nm 的激发波长下,荧光强度随着 Ly-CCQDs 质量浓度的增加而显著增加,并表现出一定的规律性。因此,调整了荧光强度与 Ly-CCQDs 质量浓度之间的关系,结果如图 5 所示。实验表明, Ly-CCQDs 的荧光强度与质量浓度

呈正相关。

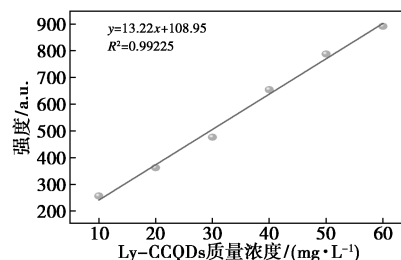


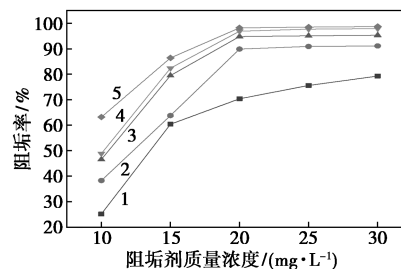
图 5 荧光强度与 Ly-CCQDs 质量浓度之间的关系

## 2.2 Ly-CCQDs 在差异化的水体条件下的阻垢性能分析

### 2.2.1 Ly-CCQDs 质量浓度与结垢温度对于阻垢性能的影响

(1) Ly-CCQDs 质量浓度与结垢温度对碳酸钙阻垢性能的影响

根据《水处理剂阻垢性能的测定-碳酸盐沉积法》(GB/T 16632—2019)中规定的相应标准,在  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 0.24 g/L、 $\text{HCO}_3^-$  质量浓度为 0.732 g/L、pH=8、加热温度为 80℃、控温时间为 8 h 的条件下,所得到的分析结果如图 6 所示。



1—80℃; 2—70℃; 3—60℃; 4—50℃; 5—40℃

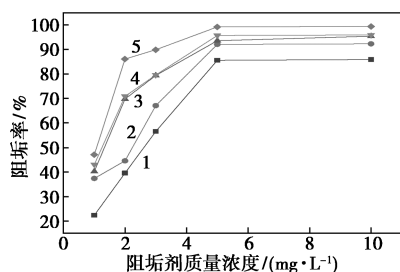
图 6 水体温度和 Ly-CCQDs 质量浓度对碳酸钙阻垢性能的影响

从图 6 中可以看出,阻垢剂的质量浓度和温度对碳酸钙的阻垢作用有很大影响。在相同温度下,随着阻垢剂质量浓度的增加,碳酸钙的阻垢率先增加后趋于稳定。20 mg/L 的 Ly-CCQDs 在水温低于 60℃ 时对碳酸钙的阻垢效果较好,当水温为 40℃ 时对碳酸钙的阻垢率可达到 98%。随着温度的升高,分子的自由速度增加,钙离子和阻垢阴离子容易接触碰撞,因此需要更多的阻垢剂来整合钙离子,以达到更好的阻垢效果。

(2) Ly-CCQDs 质量浓度与结垢温度对硫酸钙阻垢性能的影响

基于《油田用防垢剂性能评定方法》(SY/T

5673—93)的相关标准,在  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 1.51 g/L、 $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度为 2.4 g/L、 $\text{pH}=7$ 、加热温度为  $80^\circ\text{C}$ 、控温时间为 10 h 的条件下,试验所得到的具体结果如图 7 所示。



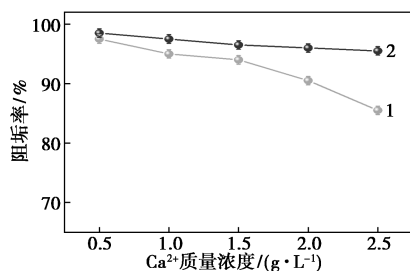
1— $80^\circ\text{C}$ ; 2— $70^\circ\text{C}$ ; 3— $60^\circ\text{C}$ ; 4— $50^\circ\text{C}$ ; 5— $40^\circ\text{C}$

图 7 水体温度和 Ly-CCQDs 质量浓度对于硫酸钙阻垢性能的影响

由图 7 中可以看出,当 Ly-CCQDs 质量浓度为 5 mg/L 时,硫酸钙的阻垢率超过 99%。与碳酸钙一样,随着温度的升高,阻垢剂对硫酸钙垢的有效性趋于平稳,在相同温度下,高质量浓度的阻垢剂也取得了良好的阻垢效果,证明 Ly-CCQDs 在低温下具有更好的阻垢效果。

### 2.2.2 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度对阻垢剂阻垢性能的影响

$\text{Ca}^{2+}$  质量浓度对 Ly-CCQDs 阻碳酸钙垢与硫酸钙垢的影响如图 8 所示。



1—硫酸钙垢; 2—碳酸钙垢

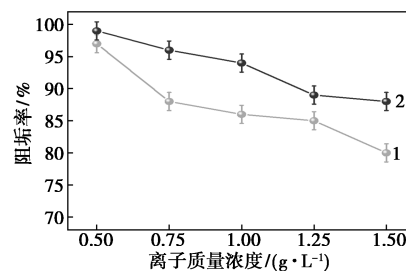
图 8  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度对 Ly-CCQDs 阻碳酸钙垢与硫酸钙垢的影响

从图 8 中可以看出,假若在溶液中添加一定量的 Ly-CCQDs 阻垢剂,设定一定的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度条件,阻垢剂对于  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度的耐受性可以提升至 100% 的水平。而假若进一步提升  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度,则阻垢剂对  $\text{Ca}^{2+}$  的耐受性则呈现出显著下降的趋势,由此导致阻垢剂所具有的阻垢效果下降。实验结果可知,通过在水体溶液中投入一定量的 Ly-CCQDs,其对碳酸钙垢与硫酸钙垢确实有较高的阻垢效果,并且阻垢效率与钙离子质量浓度的增加趋势相伴随而呈现出明显的下降趋势。阻垢实验结果表明,钙

离子质量浓度由此前的 0.5 g/L 大幅度提高到 2.5 g/L 的水平,同样地, Ly-CCQDs 对于硫酸钙的阻垢效率也由相对应的 99% 大幅下降到了 86% 的水平。与此同时,在 Ly-CCQDs 的表面羧基实现了螯合之后,将不会与溶液之中的钙离子结合且会被其排斥。因此,对于较高浓度的钙离子而言,更容易与硫酸根离子发生反应,产生硫酸钙沉淀。

### 2.2.3 成垢阴离子对阻垢性能的影响

Ly-CCQDs 对碳酸钙与硫酸钙的阻垢性能随  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度的变化情况如图 9 所示。



1— $\text{HCO}_3^-$ ; 2— $\text{SO}_4^{2-}$

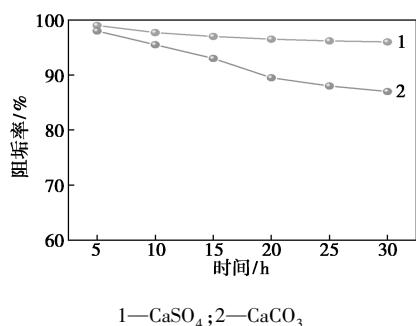
图 9 Ly-CCQDs 对碳酸钙与硫酸钙的阻垢性能随  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度的变化

从图 9 中可以看出, Ly-CCQDs 对于碳酸钙、硫酸钙都呈现出较高的耐受性。Ly-CCQDs 质量浓度为 20 mg/L 时,溶液中的碳酸氢根离子质量浓度由 0.5 g/L 大幅度提升到 1.5 g/L,则 Ly-CCQDs 对于碳酸钙的阻垢效率由相对应的 98% 大幅度下降到 79% 的水平。原因归结于高质量浓度的碳酸氢根离子会改变溶液的酸碱度,使其变为碱性。

### 2.2.4 控温时间对于阻垢性能的影响

实验设定的条件具体表述如下:①碳酸钙:  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 0.24 g/L、 $\text{HCO}_3^-$  质量浓度为 0.732 g/L、溶液  $\text{pH}=8$ ; ②硫酸钙:  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 1.51 g/L、 $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度为 2.4 g/L、溶液  $\text{pH}=9$ 。碳酸钙溶液与硫酸钙溶液二者的加热温度均设定为  $80^\circ\text{C}$ ,并且加热前后均借助于称重实现对于溶液质量的控制;借助于温度控制时间的改变,据此对 Ly-CCQDs 对于碳酸钙垢与硫酸钙垢的阻垢作用与阻垢性能的影响进行测定与分析。实验结果如图 10 所示。

从图 10 可知,当控温时间由 5 h 提升到 30 h, Ly-CCQDs 对碳酸钙的阻垢效率由 98% 降低到 87%,因此,在长时间恒温条件下,较于对碳酸钙的阻垢作用, Ly-CCQDs 针对于硫酸钙垢的阻垢作用的恒温性更突出,表明 Ly-CCQDs 具备了极为优越的阻硫酸钙垢特性。在此剂量下, Ly-CCQDs 对硫



1—CaSO<sub>4</sub>; 2—CaCO<sub>3</sub>

图 10 控温时间对 Ly-CCQDs 阻垢性能的影响  
 酸钙垢的阻垢作用在较大的时差范围内均有显著的抑制性,表明 Ly-CCQDs 在抑制硫酸钙垢时具有较高耐受性。

### 2.3 阻垢机理剖析

未添加阻垢剂和加入 10 mg/L 阻垢剂 Ly-CCQDs 后碳酸钙结垢的形态演变如图 11 所示。从图 11(a)、图 11(b)中可以看出,未加阻垢剂的碳酸钙垢呈现出极为规则化的方解石形。而从图 11(c)、图 11(d)中可以看出,添加 Ly-CCQDs 后,碳酸钙垢的结构变为不规则的球形,说明 Ly-CCQDs 碳量子点确实吸附到了碳酸钙形成的反应位点之上,二者的结合有助于对碳酸钙垢的抑制,从而造成其形态结构的改变。

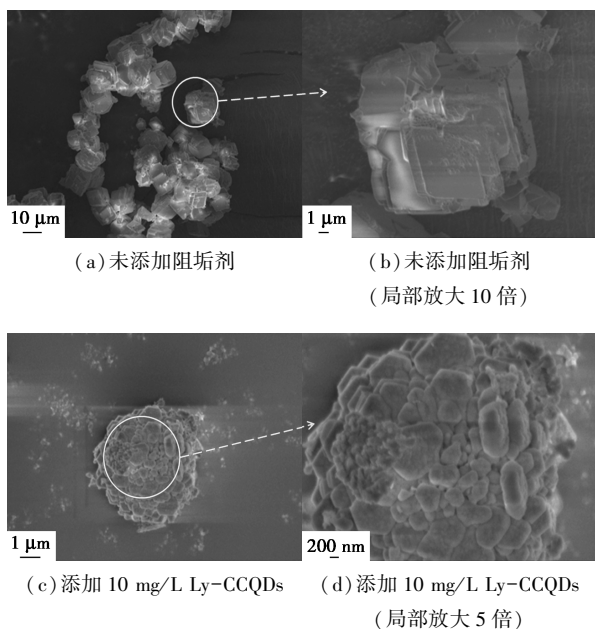


图 11 添加阻垢剂前后碳酸钙垢 SEM 图

未加阻垢剂以及添加 3 mg/L 阻垢剂的硫酸钙垢的 SEM 图如图 12 所示。从图 12 中可以看出,未添加阻垢剂时,硫酸钙晶体为规则的圆柱形,且表面相对较为平滑。而添加 3 mg/L 的 Ly-CCQDs 之后,在一定程度上破坏了硫酸钙的晶体结构。

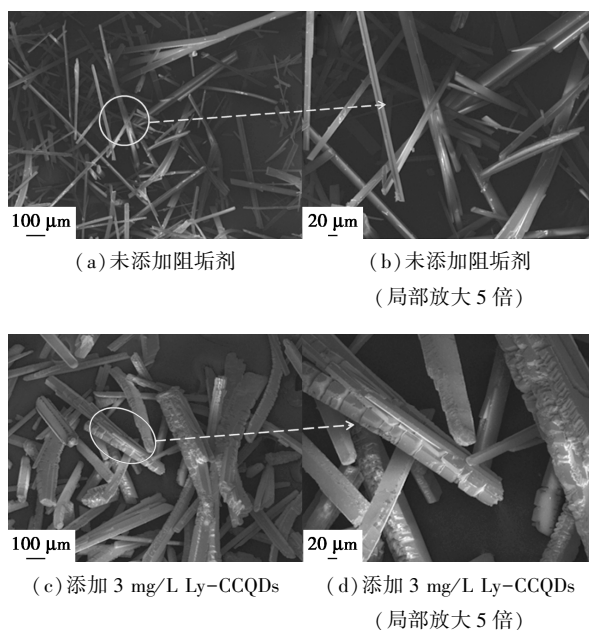


图 12 添加阻垢剂前后硫酸钙垢 SEM 图

### 3 结论

通过一锅热熔缩聚法成功改性合成了 Ly-CCQDs 碳量子点,并通过透射电子显微镜、傅里叶变换红外光谱、紫外-可见分光光度计和荧光光谱等表征手段对其进行表征,同时对 Ly-CCQDs 的阻垢性能进行静态测试。

(1)最佳的 Ly-CCQDs 合成条件为:无水柠檬酸与 L-赖氨酸二者的摩尔比为 5:1、反应温度为 200℃、反应时间为 1.5 h。

(2)Ly-CCQDs 呈球形,尺寸为 3~5 nm,其表面除羧基和氨基外还含有少量的酯基,且 Ly-CCQDs 具有 40~800 nm 的强紫外光吸收能力。

(3)阻垢作用受温度、阴离子浓度和钙离子质量浓度的影响。Ly-CCQDs 在质量浓度为 20 mg/L 时对碳酸钙垢的阻垢率为 98%,在 5 mg/L 浓度下对硫酸钙垢的阻垢率高达 99%。

(4)Ly-CCQDs 阻垢剂的阻垢作用机理主要源于其对于钙离子的吸附作用和螯合作用。Ly-CCQDs 对于硫酸钙垢的阻垢作用机理主要表现为螯合作用、分散作用以及晶格畸变。

### 参考文献

[1] Xu Ying, Zhao Linlin, Wang Lina, *et al.* Synthesis of polyaspartic acid-melamine grafted copolymer and evaluation of its scale inhibition performance and dispersion capacity for ferric oxide[J]. Desalination, 2012, 286: 285-289.  
 [2] Peng Jin, Nestic, Srdjan, *et al.* Corrosion behavior of mild steel in

- sour environments at elevated temperatures [J]. Corrosion the Journal of Science & Engineering, 2017, 73: 915-926.
- [3] Neeb A, Herranz N, Arce-Gallego S, *et al.* Advanced prostate cancer with ATM loss; PARP and ATR inhibitors [J]. European Urology, 2021, 79: 200-211.
- [4] 白鹏凯, 许萍. 水处理领域中的绿色环保阻垢剂及其研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 87-95.
- [5] Norinda C, Elsi H, Thibaut N, *et al.* Performance of green antiscalants and their mixtures in controlled calcium carbonate precipitation conditions reproducing industrial cooling circuits [J]. Water Research, 2020, 186: 116334.
- [6] Shahidz A, Aniruddhab P. Inhibition of gypsum scales on MS metal surface using hydrodynamic forces [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020, 147: 107706.
- [7] Chen J, Hao X, Han J, *et al.* A green multifunctional anti-scaling inhibitor for crystallization control of Ca scale crystals [J]. Chemical Engineering & Technology, 2019, 42: 444-453.
- [8] Chen J, Xu L, Han J, *et al.* Synthesis of modified polyaspartic acid and evaluation of its scale inhibition and dispersion capacity [J]. Desalination, 2015, 358: 42-48.
- [9] Zhao Lina, Zhou Yuming, Yao Qingzhao, *et al.* Calcium scale inhibition of stimulated oilfield produced water using polyaspartic acid/aminomethanesulfonic acid [J]. Chemistry Select, 2021, 6: 3692-3701.
- [10] Gao Yuhua, Fan Linhua, Liam Ward, *et al.* Synthesis of polyaspartic acid derivative and evaluation of its corrosion and scale inhibition performance in seawater utilization [J]. Desalination, 2015, 365: 220-226.
- [11] Lu Yi-Tsung, Harouaka Khadouja, Paudyal, *et al.* Kinetics of barium sulfate deposition and crystallization process in the flowing tube [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59: 7299-7309.
- [12] Cheng Yushan, Chen Min, Xiao Ju, *et al.* Chemistry study on scale and corrosion inhibition performance of polyaspartic acid [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 571: 012142.
- [13] Huang Henghui, Yao Qi, Qi Jiao, *et al.* Polyepoxysuccinic acid with hyper-branched structure as an environmentally friendly scale inhibitor and its scale inhibition mechanism [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2019, 23: 61-74.
- [14] Guo Xinyu, Zhao Xiaowei, Xu Yanhua, *et al.* The synthesis of polyaspartic acid derivative PASP-Im and investigation of its scale inhibition performance and mechanism in industrial circulating water [J]. RSC Advances, 2020, 10: 33595-33601.
- [15] Fatima A, Yasir S, Khan M, *et al.* Plant Extract-loaded Bacterial Cellulose Composite Membrane for Potential Biomedical Applications [J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2021, 6: 26-32.
- [16] Zhu Tianzhen, Wang Lida, Sun Wen, *et al.* Corrosion-induced performance degradation of phosphorus-containing scale inhibitors at carbon steel-water interface [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57: 5183-5189. ■
- .....
- (上接第 211 页)
- [11] 吴青华, 杨意, 石文龙, 等. 离子液体中电沉积钴铬合金析氢性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(4): 78-86.
- [12] 石文龙, 赵野, 吴青华, 等. Q235 钢表面涂覆含碳酸钙和石墨烯无机富锌涂层的耐蚀性能 [J]. 材料保护, 2022, 55(8): 8-15.
- [13] Indrajith Naik E, Sunil Kumar Naik T S, Pradeepa E, *et al.* Design and fabrication of an innovative electrochemical sensor based on Mg-doped ZnO nanoparticles for the detection of toxic catechol [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 281: 125860-125873.
- [14] 杨意, 石文龙, 吴青华, 等. 基于 ITO 的氧化镍薄膜制备及葡萄糖传感研究 [J]. 化学研究与应用, 2022, 34(9): 2221-2227.
- [15] 李林芝, 何赛君, 黄添增, 等. 基于电化学传感器检测赭曲霉毒素 A 的研究进展 [J]. 分析测试学报, 2021, 40(5): 639-647.
- [16] 臧颖超, 朱慧敏, 范夏琼, 等. 基于 Au@Ag 纳米颗粒的表面增强拉曼检测血浆中的法莫替丁 [J]. 分析测试学报, 2020, 39(6): 779-783.
- [17] Numan A, Shahid M M, Omar F S, *et al.* Facile fabrication of cobalt oxide nanograin-decorated reduced graphene oxide composite as ultrasensitive platform for dopamine detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 238: 1043-1051.
- [18] 王秋蕙. 锡掺杂对氧化锌纳米湿度传感器性能提升研究 [J]. 河南科技, 2022, 41(4): 100-103.
- [19] Monamary A, Vijayalakshmi K, Jereil S D. Fe overlaid hybrid TiO<sub>2</sub>/ITO nanocomposite sensor for enhanced hydrogen sensing at room temperature by novel two step process [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 287: 278-289.
- [20] Jiang Y, Jia L, Yu S, *et al.* An In-ZnO nanosheet-modified carbon nanotube-polyimide film sensor for catechol detection [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(18): 6656-6663.
- [21] Lavanya N, Sekar C. Highly sensitive electrochemical sensor for simultaneous determination of dihydroxybenzene isomers based on Co doped SnO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. RSC Advances, 2016, 6(72): 68211-68219.
- [22] Elanchezian M, Manoj D, Saravanakumar D, *et al.* Amperometric sensing of catechol using a glassy carbon electrode modified with ferrocene covalently immobilized on graphene oxide [J]. Microchimica Acta, 2017, 184(8): 2925-2932.
- [23] Quynh B T P, Byun J Y, Kim S H. Non-enzymatic amperometric detection of phenol and catechol using nanoporous gold [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 221: 191-200.
- [24] Bansal P, Bhanjana G, Prabhakar N, *et al.* Electrochemical sensor based on ZrO<sub>2</sub> NPs/Au electrode sensing layer for monitoring hydrazine and catechol in real water samples [J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 248: 651-657.
- [25] Premalatha S, Babu G N K R. Direct current electrodeposition of Co-ITO nanoflakes modified steel electrode for highly selective non-enzymatic detection of catechol [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 622-631. ■