

# 新型环保阻垢剂 L-CCQDs 的制备及性能研究

李 辉, 郭 敏, 孙征楠, 荆国林\*

(东北石油大学化学与化工学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**以无水柠檬酸、L-抗坏血酸为主要原料,通过熔融缩聚法合成了一种 CQDs 衍生物 L-CCQDs,并通过红外光谱分析仪等手段对其进行表征,得到了与理论相符合的结果。将 L-CCQDs 在 0~80℃ 条件下进行阻垢静态测试,结果表明,在极少量 L-CCQDs 的加入条件下,阻硫酸钙和阻碳酸钙垢的阻垢率均可达到 100%,与单一的无水柠檬酸相比得到明显的改善。通过 SEM 等方法对 L-CCQDs 的阻垢机制进行研究,发现随着 L-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 L-CCQDs 对钙垢生长有显著的抑制作用。

**关键词:**无水柠檬酸;L-抗坏血酸;碳量子点;阻垢

中图分类号:O657.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)09-0114-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.09.024

## Preparation and properties of novel environment-friendly scale inhibitor L-CCQDs

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

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** L-CCQDs, a CQDs derivative, is synthesized through melt polycondensation method with anhydrous citric acid and L-ascorbic acid as main raw materials, and is characterized by means of infrared spectroscopy and other means. The results are consistent with the theoretical ones. L-CCQDs is subjected to static scale inhibition tests at 0~80℃, and the results show that the scale inhibition rates of calcium sulfate and calcium carbonate scales over L-CCQDs with a very small amount of addition can both reach 100%, significantly better than that over single anhydrous citric acid. The scale inhibition mechanism of L-CCQDs is studied by means of SEM and other methods. It is found that with the increasing L-CCQDs addition amount, the crystal form of calcium carbonate scale gradually develops from calcite to smaller aragonite structure, proving that L-CCQDs has a significant inhibitory effect on the growth of calcium scale.

**Key words:** anhydrous citric acid; L-ascorbic acid; carbon quantum dots; scale inhibition

水垢问题是影响人们生产、生活及水资源利用的重要因素。采用阻垢剂进行化学污染治理是最经济有效的技术途径<sup>[1]</sup>。在水处理方面,阻垢剂的发展经过 3 个阶段:含磷阻垢剂、共聚物阻垢剂、环保型阻垢剂<sup>[2]</sup>。含磷阻垢剂主要包括无机磷类和有机磷类。无机磷的阻垢作用较弱,而有机磷阻垢剂在污水处理中有着较好的阻垢作用<sup>[3-6]</sup>。但是,随着人们环保意识的增强,微生物对磷的利用逐渐受限,从而影响了水体中微生物的增殖速度,造成了水体的富营养化和微生物侵蚀<sup>[7]</sup>。共聚物类阻垢剂在一定程度上也表现出了较好的阻垢性,但共聚物类阻垢剂在水中的沉积会对人体健康造成一定的危害<sup>[8-11]</sup>。

目前,国内外对环保阻垢剂的研究多集中于聚

环氧琥珀酸(PESA)和聚天冬胺酸(PASP)的衍生物、天然植物萃取物及其衍生物等方面<sup>[12]</sup>。近年来,国内外学者对各种新型环保阻垢剂进行了深入的研究,其中还涉及到几种新型高分子、碳纳米材料。自量子点(CQDs)首次用作活细胞的生物荧光标志后,人们对量子点的认识就逐渐深入。CQDs 具有光学性能好、水溶性好、毒性低、环境友好、原料来源广泛、成本低、生物相容性好等优点<sup>[13]</sup>。CQDs 的结构与成分决定了其特性的多样性<sup>[14]</sup>。CQDs 表面含氧的亲水性基团如羟基(—OH)、羧基(—COOH)等的溶解性能和生物相容性较好<sup>[15]</sup>。

由于碳点的原材料以有机碳化物为主,所以其表面包含大量的反应性官能团(如—OH 和—COOH)。这些含氧功能基团易于与结垢离子络

收稿日期:2022-10-18;修回日期:2023-06-25

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,硕士研究生,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。

合,并且由于晶格畸变而影响其结晶。由此推断,从柠檬酸衍生物中得到的碳点会对工业冷却水中的水垢、结垢起到很好的抑制作用。

因此,笔者通过 L-抗坏血酸和无水柠檬酸熔融缩聚制备新型环保阻垢剂 L-CCQDs,探讨其阻垢机理,并对其优良的性能进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂及仪器

试剂:无水柠檬酸(AR),上海麦克林生化科技有限公司生产;L-抗坏血酸(AR),上海麦克林生化科技有限公司生产;碳酸氢钠(AR),沈阳市华东试剂厂生产;无水硫酸钠(AR),宁波远东化工集团有限公司生产;无水氯化钙(AR),天津市大茂化学试剂厂生产。

仪器:真空干燥箱,上海力辰邦西仪器科技有限公司生产;真空冷冻干燥机,上海叶拓科技有限公司生产;S-3400NII型扫描电子显微镜,日立公司(Hitachi)生产;TENSOR II型红外光谱仪,布鲁克香港有限公司生产。

### 1.2 制备方法

称取 L-抗坏血酸和无水柠檬酸,并按一定质量比在玛瑙研钵中均匀混合,然后将其铺在 25 mL 小烧杯的底部,使其与空气完全接触。在真空干燥器(通大气)中高温加热一段时间后,用无水柠檬酸融化并在高温中将 L-抗坏血酸溶解发生反应。一段时间后,溶液的颜色逐渐加深,从无色变为深棕色再变为棕黑色。冷却后加入 1 mol/L 氢氧化钠溶液 1 mL 溶解。然后将溶解的溶液放入分子质量限制为 3.5 K 的透析袋中进行透析 12 h 以除去杂质,并且每 3 h 更换 1 次去离子水。透析液在冷冻干燥器中冷冻干燥 24 h,产生深棕色的 L-CCQDs 粉末并将其储存在与空气隔离的密封罐中。

### 1.3 表征

利用 TENSOR II 型傅里叶红外光谱分析仪对 L-CCQDs 碳量子点阻垢剂进行红外光谱分析,扫描范围为 500~4 000;利用 UV-5200 型紫外-可见分光光度计对 L-CCQDs 碳量子点阻垢剂进行 UV-Vis 表征分析;利用 S-3400NII 型扫描电子显微镜(SEM)表征其微观结构及形貌,加速电压为 10 kV,放大倍数为 1 000~5 000 倍。

### 1.4 阻垢性能测定

#### 1.4.1 碳酸钙垢阻垢率评价

按国标 GB/T 16632—2019 中所述的方法测量

L-CCQDs 的阻碳酸钙垢率,水质条件:Ca<sup>2+</sup>质量浓度为 0.24 g/L,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>质量浓度为 0.732 g/L,pH 为 8,加热温度为 70℃,控温时间为 8 h。

#### 1.4.2 硫酸钙垢阻垢率评价

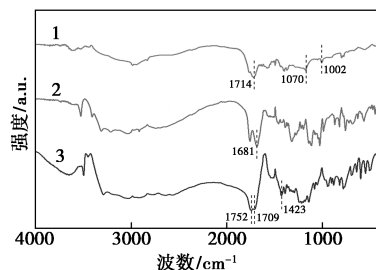
按行标 SY/T 5673—93 中所述的方法测量 L-CCQDs 的阻硫酸钙垢率,水质条件:Ca<sup>2+</sup>质量浓度为 1.51 g/L,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度为 2.4 g/L,pH 为 7,加热温度为 70℃,控温时间为 24 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 分子结构的表征分析

#### 2.1.1 红外光谱分析

L-CCQDs、L-抗坏血酸和无水柠檬酸的 FT-IR 谱图如图 1 所示。从图 1 中可以看出,无水柠檬酸 1 752 cm<sup>-1</sup>处是酯基—C=O 的伸缩振动,这与无水柠檬酸的某些分子发生了乙酰化作用有关。1 709 cm<sup>-1</sup>处是由于—COOH 中—C=O 的伸缩振动而产生的。在 1 423 cm<sup>-1</sup>处是由于 O—H 在羧基中存在的吸收峰。在 L-抗坏血酸 FT-IR 谱图中,1 681 cm<sup>-1</sup>处的短峰是 C=C 平面上的伸缩振动。另外,L-CCQDs 谱线还存在一些新的吸收峰,峰值在 1 070 cm<sup>-1</sup>处与酯基 C—O—C 结构相对应,1 714 cm<sup>-1</sup>处为酰胺基 C=O 伸缩振动。在 1 002 cm<sup>-1</sup>处为羧酸类化合物 C—O 键的伸缩振动,因此 L-CCQDs 被成功合成。



1—无水柠檬酸;2—L-抗坏血酸;3—L-CCQDs

图1 无水柠檬酸、L-抗坏血酸和 L-CCQDs 的 FT-IR 谱图

#### 2.1.2 L-CCQDs 的紫外-可见光谱分析

取加热时间为 1 h、加热温度为 200℃的无水柠檬酸与 L-抗坏血酸摩尔质量比为 2:1 的 L-CCQDs,用去离子水作溶剂,以 0.002 5 mg/mL 的水溶液制备 L-CCQDs,并在 200~800 nm 范围内用 UV-Vis 吸收光谱仪进行测定,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,L-CCQDs 在一定的紫外线范围(200~400 nm)中具有很强的吸收能力,而当波长逐渐靠

近可见光时, L-CCQDs 的吸光度逐渐降低, 在 (400~800 nm) 可见光范围内几乎没有吸收, 说明 L-CCQDs 具有很高的吸收强度。

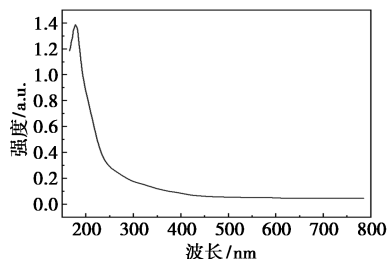


图 2 P L-CCQDs 的紫外-可见光谱

## 2.2 不同水体条件下 L-CCQDs 的阻垢性能研究

### 2.2.1 L-CCQDs 质量分数与结垢温度对阻垢性能的影响

(1) L-CCQDs 质量分数与结垢温度对碳酸钙阻垢性能的影响

采用《水处理剂阻垢性能的测定碳酸盐沉积法》(GB/T 16632—2019), 通过改变水体温度对 L-CCQDs 进行碳酸钙阻垢性能的评价试验, 其中  $\text{Ca}^{2+}$  离子的质量浓度为 0.24 g/L,  $\text{HCO}_3^-$  离子的质量浓度为 0.732 g/L, pH 为 8, 控温 8 h。结果如图 3 所示。

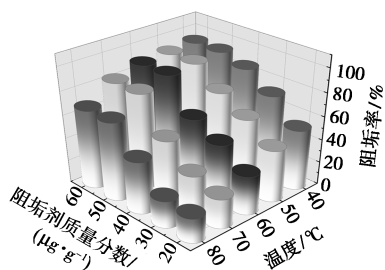


图 3 L-CCQDs 在不同水体温度下对碳酸钙的阻垢性能

采用静态阻垢试验, 研究了不同质量分数 L-CCQDs 阻垢剂在 40、50、60、70℃ 和 80℃ 下对碳酸钙的阻垢效果, 并对其进行了探讨。当水温为 40℃ 时, 加入 50  $\mu\text{g/g}$  L-CACQDs 时对碳酸钙的阻垢效果最好, 随着水温升高, 其阻垢效率降低。这是因为温度升高会加速分子的移动速度, 从而使钙离子更易于粘附在成垢的阴离子上; 随着温度的增加, L-CCQDs 对碳酸钙的吸附性减弱。在 L-CCQDs 质量分数为 50  $\mu\text{g/g}$  时, 对碳酸钙的阻垢效率可达 97%, 当 L-CCQDs 质量分数继续增加时, 对碳酸钙的阻垢效率没有明显的提高, 因此 L-CCQDs 质量分数为 50  $\mu\text{g/g}$  时其对碳酸钙的阻垢性能有显著提高且用

量较少。

(2) L-CCQDs 质量分数与结垢温度对硫酸钙阻垢性能的影响

采用《油田用防垢剂性能评定方法》(SY/T 5673—93), 通过改变水体温度对 L-CCQDs 进行硫酸钙阻垢性能的评价试验, 其中  $\text{Ca}^{2+}$  的质量浓度为 1.51 g/L,  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度为 2.4 g/L, pH 为 7, 控温 10 h。结果如图 4 所示。

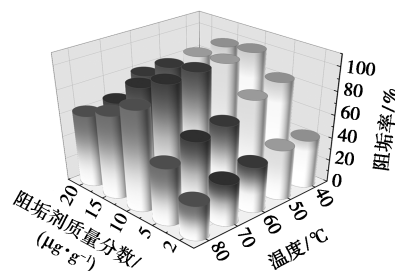


图 4 L-CCQDs 在不同水体温度下对硫酸钙的阻垢性能

通过静态阻垢实验评估 40、50、60、70℃ 和 80℃ 下不同质量分数的 L-CCQDs 阻垢剂对硫酸钙的阻垢效率。从图 4 可知, 当 L-CCQDs 阻垢剂质量分数为 10  $\mu\text{g/g}$  时, 阻垢效率可达 95%, 但当 L-CCQDs 质量分数继续增加时, 对硫酸钙的阻垢效率有下降的趋势。与碳酸钙相似, 阻垢剂质量分数和温度的改变对阻垢效率的影响很大, 当温度升高时阻垢效率降低, 而在同一温度下, 阻垢剂的阻垢效率也会降低。L-CCQDs 在较高温度的阻垢性能有较大提高, 在水温为 80℃ 加入 10  $\mu\text{g/g}$  L-CCQDs 时, 阻垢效率可达 98%。

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

$\text{Ca}^{2+}$  质量浓度对 L-CCQDs 阻硫酸钙和碳酸钙的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 当溶液中加入一定量的羧基碳量子点阻垢剂时, 在一定的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度下, 阻垢剂对  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度可以达到 100% 的耐受性。当  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度增大时, 阻垢剂对  $\text{Ca}^{2+}$  的耐受性将显著降低, 直接导致了阻垢效果的降低。实验发现, 在向水体溶液中添加 L-CCQDs 进行阻垢试验测试时, L-CCQDs 对碳酸钙、硫酸钙都具有较高的阻垢性。L-CCQDs 对碳酸钙、硫酸钙的阻垢效率随溶液中钙离子质量浓度的增加而降低。当钙离子质量浓度由 0.5 g/L 提升至 3.0 g/L 时, 其对碳酸钙的阻垢效率由 97% 降至 63%; 实验还表明, 在钙离子质量浓度由 0.5 g/L 提升至 3.0 g/L 时, 其对硫酸钙的阻垢效率由 98% 降低至 76%。这

主要是由于  $\text{Ca}^{2+}$  在溶液中的质量浓度太低,导致结晶过程缓慢,不容易生成钙垢。随着钙离子质量浓度的增加,L-CCQDs 表面羧基的阻垢作用达到了最大值,而钙离子的质量浓度太高,则很难抑制碳酸钙、硫酸钙结晶的形成与成长,而在 L-CCQDs 的表面羧基螯合后,溶液中的钙离子将不能与羧基结合,而且会被钙离子所排斥。另外,由于 L-抗坏血酸与柠檬酸合成的 L-CCQDs 表面除了羧基官能团外,还包含少量的醚基,从而使阻垢剂与钙离子之间的螯合作用减弱。在钙离子质量浓度较高的情况下,钙离子容易与硫酸根离子发生反应,从而形成硫酸钙沉淀。但在高硬度水中,通过适当地增加阻垢剂的投加量,可以起到较好的阻垢作用。

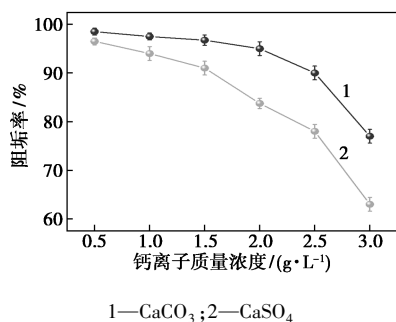


图5  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度对 L-CCQDs 阻硫酸钙和碳酸钙垢的影响

### 2.2.3 成垢阴离子对阻垢性能的影响

L-CCQDs 对硫酸钙和碳酸钙阻垢性能随  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度的变化情况如图 6 所示。从图 6 中可以看出,当溶液中加入一定量的羧基碳量子点阻垢剂时,在一定的  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度下,L-CCQDs 对于碳酸钙、硫酸钙都具有较高的耐受性。L-CCQDs 对碳酸钙的阻垢效率随溶液中的成垢阴离子质量浓度的增加而降低。在 L-CCQDs 质量分数为  $20 \mu\text{g/g}$  下,碳酸氢根离子质量浓度由  $0.5 \text{ g/L}$  提升至  $1.5 \text{ g/L}$  时,其对碳酸钙的阻垢效率由  $97\%$  降至  $38\%$ ;实验还表明,在 L-CCQDs 质量分数为

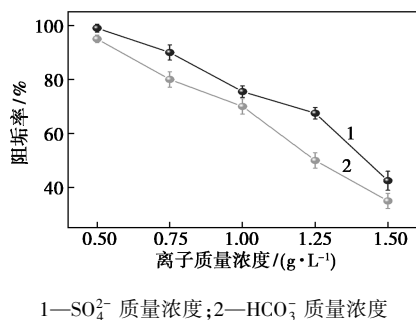


图6 L-CCQDs 对硫酸钙和碳酸钙阻垢性能随  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度变化的情况

$5 \mu\text{g/g}$  下,当硫酸根离子质量浓度由  $0.5 \text{ g/L}$  提升至  $3.0 \text{ g/L}$  时,其对硫酸钙的阻垢效率由  $98\%$  降低至  $43\%$ 。高质量浓度的碳酸氢根离子会使溶液变成碱性;同时,高质量浓度的碳酸氢根离子会加速与钙的结合,加速碳酸钙的析出。而且当  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度增大时,离子之间发生碰撞的几率增大,从而导致了碳酸钙和硫酸钙的生成。通过适当提高阻垢剂的质量分数可以提高阻垢效率。

### 2.2.4 pH 对阻垢性能的影响

将 L-CCQDs 的质量浓度设定在  $10 \text{ mg/L}$ ,保持其他条件不变,阻垢效率随 pH 的变化情况如图 7 所示。从图 7 中可以看出,在酸性环境中,阻垢剂对  $\text{CaSO}_4$  的阻垢效果几乎为零。但当 pH 在  $8 \sim 12$  的范围内时,随着 pH 的增加,阻垢效果随溶液 pH 的增大显著提高。

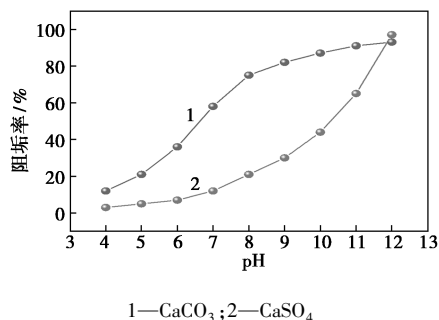


图7 pH 对 L-CCQDs 阻垢性能的影响

通过 L-CCQDs 的制备可以对其原因进行分析。所制得的 L-CCQDs 表面含有丰富的羧酸盐,由其制备过程可以看出其羧酸盐为羧酸钠,羧酸钠是一种强碱弱酸盐,在碱性条件下以  $-\text{COO}^-$  的形式存在为主,而在酸性环境中主要是以  $-\text{COOH}$  形式存在。而  $-\text{COO}^-$  可以与  $\text{Ca}^{2+}$  发生螯合作用,从而阻止  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的结合,是抑制  $\text{CaSO}_4$  结垢的主要功能基团。结果表明,L-CCQDs 的阻垢效率在 pH 为  $8 \sim 12$  之间有明显的提高。

从图 7 可以看出,L-CCQDs 的阻垢效果随 pH 的增加而增加,当 pH 为 4 时,L-CCQDs 对  $\text{CaCO}_3$  的阻垢作用不明显;而 L-CCQDs 在 pH 超过 8 时具有良好的阻垢性能,表明该阻垢剂具有很好的抗碱性。由于碳量子点上含有羧基负离子  $\text{COO}^-$ ,在酸性条件下, $\text{H}^+$  与  $\text{COO}^-$  结合在一起,阻碍  $\text{COO}^-$  与  $\text{Ca}^{2+}$  的络合,因此阻垢率较低。在碱性条件下,溶液中  $\text{COO}^-$  含量增加,与  $\text{Ca}^{2+}$  络合的能力增加,因此可以有效地阻止  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  的结合,形成碳酸钙垢。

### 2.2.5 控温时间对阻垢性能的影响

实验条件如下:①碳酸钙: $0.24 \text{ g/L}$  的  $\text{Ca}^{2+}$  离子

质量浓度和 0.732 g/L 的  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度, pH 为 8;  
②硫酸钙: 1.51 g/L 的  $\text{Ca}^{2+}$  离子质量浓度和 2.4 g/L 的  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度, pH 为 9。加热温度都控制在 80℃, 加热过程前后通过称重来控制质量以减少水分蒸发量, 并通过改变控温时间来测定 L-CCQDs 对碳酸钙和硫酸钙阻垢性能的变化情况, 结果如图 8 所示。

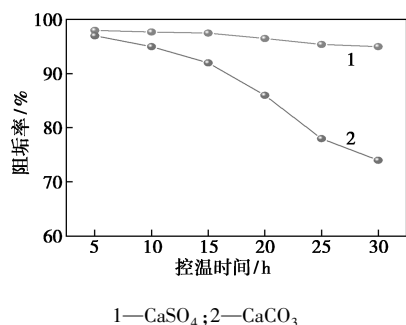


图 8 控温时间对 L-CCQDs 阻垢性能的影响

从图 8 中可以看出, 随着控温时间从 5 h 增加到 30 h, L-CCQDs 阻碳酸钙的阻垢效率从 97% 降至 74%, 损耗 23%; 与之相比, 阻硫酸钙垢具有更好的恒温作用, L-CCQDs 具有优良的阻硫酸钙垢特性。阻垢效率由 98% 降至 95%, 只有 3% 的阻垢效率降低。因此, L-CCQDs 的螯合性能要优于硫酸钙的结合性能。L-CCQDs 在长期的恒温环境下也显示出很好的稳定性, 在此加剂量下, L-CCQDs 可以在较大的温度范围内抑制硫酸钙垢, 表明 L-CCQDs 具有很好的耐高温性能。

### 2.3 阻垢机理分析

无添加阻垢剂和添加 50  $\mu\text{g/g}$  阻垢剂的碳酸钙的 SEM 图如图 9 所示。从图 9(a) ~ 图 9(b) 中可以

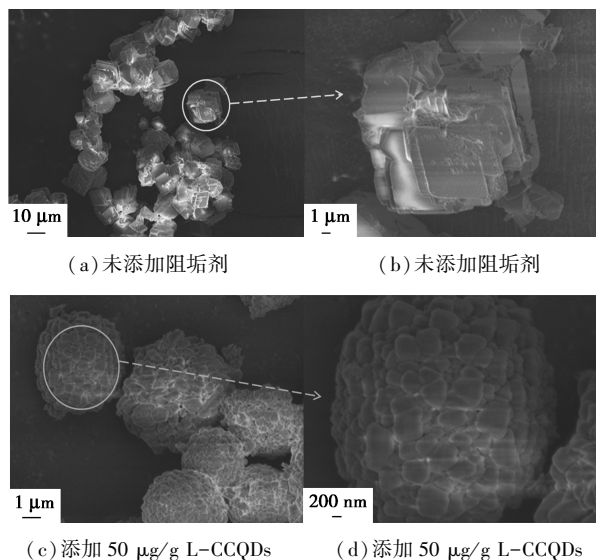


图 9 添加阻垢剂前后碳酸钙垢 SEM 图

看出, 无添加阻垢剂的碳酸钙垢呈现规则的方解石形结构。由 9(c) ~ 图 9(d) 可见, 加入 L-CCQDs 阻垢剂后, 碳酸钙垢从方解石形结构转变为具有不规则形状的球状结构, 这是由于 L-CCQDs 吸附在碳酸钙垢形成的反应部位上, 阻止了碳酸钙垢的生长, 从而使其形貌发生变化。碳酸钙结晶的边缘呈圆形, 结晶表面变粗糙。所以, L-CCQDs 对碳酸钙的阻垢作用主要是螯合和分散, 而非晶格变形。

无阻垢剂的硫酸钙垢和添加 10  $\mu\text{g/g}$  阻垢剂的硫酸钙垢 SEM 图如图 10 所示。从图 10 中可以看到, 在没有添加阻垢剂的情况下, 硫酸钙晶体呈规整的圆柱状, 表面的沟槽是由于机械撞击造成的, 其表面都比较平滑。当 L-CCQDs 质量分数为 10  $\mu\text{g/g}$  时, 该阻垢剂对硫酸钙的结晶结构造成了很大的破坏。与天然的硫酸钙相比, 阻滞后的硫酸钙颗粒粒径较小, 呈现不规则的碎屑。晶核的成长受到了极大的限制, 不能再继续生长了。

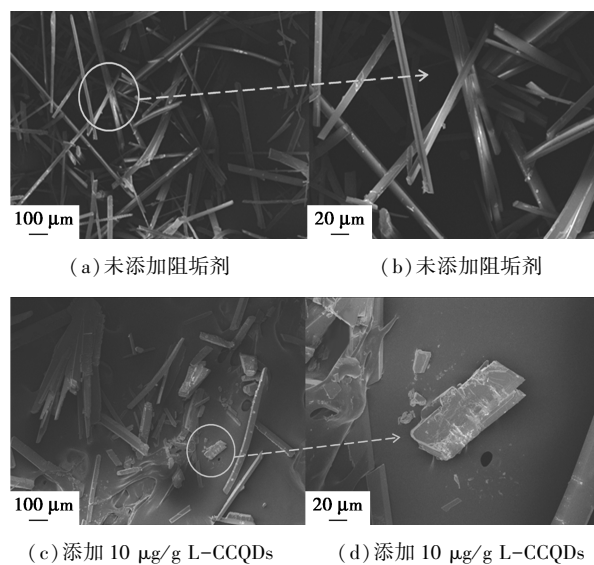


图 10 添加阻垢剂前后硫酸钙垢 SEM 图

### 3 结论

(1) 通过实验确定 L-CCQDs 最佳合成条件为: 无水柠檬酸与 L-抗坏血酸的摩尔比为 2:1、反应温度为 200℃, 反应时间为 1 h。

(2) 利用 FT-IR 对 L-CCQDs 进行表征发现, L-CCQDs 具有丰富的羧基官能团, 其结构中包含了碳碳双键和酯基。

(3) 采用静态阻垢法测定 L-CCQDs 在不同水体中的阻垢效果。在 L-CCQDs 加入量相同的情况下, 阻垢效果随温度的升高而降低; 相同量的 L-CCQDs 对  $\text{Ca}^{2+}$  的耐受性较差; L-CCQDs 的阻垢性能

受体系成垢阴离子浓度的影响较大,其规律为随着体系成垢阴离子浓度的增大,其阻垢效率降低;pH对L-CCQDs的阻垢效果也有较大的影响,实验证明L-CCQDs适用于高碱度水,在碱性条件下具有很好的阻垢效果,当溶液的pH为4时,其阻垢效果几乎不明显。

(4)利用SEM等方法对垢样进行检测,结果表明:L-CCQDs阻垢剂的作用机理是对钙离子的吸附与螯合作用;在硫酸钙中,其作用机理以螯合、分散、晶格畸变为主。

### 参考文献

- [1] Norinda Chhim, Elsi Haddad, Thibaut Neveux, *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.
- [2] Shahidz Ansari, Aniruddhab Pandit. Inhibition of gypsum scales on MS metal surface using hydrodynamic forces [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 147: 107706.
- [3] Chen Jianxin, Hao Xu, Han Jian, *et al.* A green multifunctional anti-scaling inhibitor for crystallization control of Ca scale crystals [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2019, 42: 444-453.
- [4] Chen Jianxin, Xu Lihua, Han Jian, *et al.* Synthesis of modified polyaspartic acid and evaluation of its scale inhibition and dispersion capacity [J]. *Desalination*, 2015, 358: 42-48.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Fatima Atiya, Yasir Sumayia, Khan Mohd, *et al.* Plant extract-loaded bacterial cellulose composite membrane for potential biomedical applications [J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2021, 6: 26-32.
- [12] 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.
- [13] Neeb Antje, Herranz Nicolás, Arce-gallego Susana, *et al.* Advanced prostate cancer with atm loss: PARP and ATR inhibitors [J]. *European Urology*, 2021, 79: 200-211.
- [14] 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.
- [15] 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. ■
- (上接第 113 页)
- [11] Xu C, Reeves P J, Jacquet Q, *et al.* Phase behavior during electrochemical cycling of ni-rich cathode materials for li-ion batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(7): 2003404.
- [12] Li C, Kan W H, Xie H, *et al.* Inducing favorable cation antisite by doping halogen in Ni-rich layered cathode with ultrahigh stability [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(4): 1801406.
- [13] Yang W, Xiang W, Chen Y X, *et al.* Interfacial regulation of Ni-rich cathode materials with an ion-conductive and pillaring layer by infusing gradient boron for improved cycle stability [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 10240-10251.
- [14] Huang B, Liu D, Qian K, *et al.* A simple method for the complete performance recovery of degraded Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.70}\text{Co}_{0.15}\text{Mn}_{0.15}\text{O}_2$  cathode via surface reconstruction [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(15): 14076-14084.
- [15] 冯耀华,李春雷,艾灵.锂离子电池正极材料  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  的产业化工艺研究 [J]. *现代化工*, 2018, 38(09): 174-179.
- [16] Park G T, Park N Y, Noh T C, *et al.* High-performance Ni-rich  $\text{Li}[\text{Ni}_{0.9-x}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_x]\text{O}_2$  cathodes via multi-stage microstructural tailoring from hydroxide precursor to the lithiated oxide [J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(9): 5084-5095.
- [17] Li L, Chen J, Huang H, *et al.* Role of residual Li and oxygen vacancies in Ni-rich cathode materials [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 42554-42563.
- [18] Li L, Fu L, Li M, *et al.* B-doped and  $\text{La}_4\text{NiLiO}_8$ -coated Ni-rich cathode with enhanced structural and interfacial stability for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 71: 588-594.
- [19] Lee W, Lee S, Lee E, *et al.* Destabilization of the surface structure of Ni-rich layered materials by water-washing process [J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 44: 441-451.
- [20] Wu F, Dong J, Chen L, *et al.* High-voltage and high-safety nickel-rich layered cathode enabled by a self-reconstructive cathode/electrolyte interphase layer [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 41: 495-504.
- [21] Ryu H H, Park N Y, Seo J H, *et al.* A highly stabilized Ni-rich NCA cathode for high-energy lithium-ion batteries [J]. *Materials Today*, 2020, 36: 73-82. ■