

碳点缓蚀剂的研究进展

陈汇凯¹,黄锦圳¹,鲁国强¹,刘洒文¹,赵彩玲¹,闭锦叶¹,汪建明^{1*},刘汉斌²

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江),广东 湛江 524005; 2. 陕西科技大学轻工科学与工程学院,陕西 西安 710021)

摘要: 碳纳米材料因其独特的物理化学性质,如高比表面积、优异的电子传输性能及丰富的表面官能团,成为多个领域的研究热点。特别是碳点(Carbon Dots, CDs),作为一种零维纳米材料,具有优异的光学性能、环境友好性、生物相容性和易改性,在生物传感、新能源和医药等领域展现出广泛的应用潜力。碳点在金属防腐领域的应用逐渐受到关注,其作为缓蚀剂的研究已成为当前科学研究的新方向。简述了碳点的制备方法,并系统综述了近年来碳点在金属防腐领域的应用研究进展。阐述了碳点缓蚀剂在金属防腐中的优势,包括其环境友好性、高稳定性及优异的缓蚀效率。碳点在碳钢和铝合金等多种金属材料的防腐研究中显示出优异的应用潜力。还着重讨论了碳点缓蚀剂的缓蚀机理,包括等温吸附模型和吸附类型。最后,指出了当前碳点缓蚀剂研究中存在的挑战,包括对缓蚀机理的深入理解、大规模合成方法的开发以及在复杂腐蚀环境中的稳定性和长效性,并对碳点缓蚀剂在金属防腐领域的前景进行了展望。尽管目前对碳点作为金属防腐缓蚀剂的研究仍处于初步阶段,但其在腐蚀防护领域的应用前景非常广阔,有望在未来实现其在低碳环保和金属防腐领域的广泛应用。

关键词: 碳点;零维纳米材料;缓蚀剂;制备方法;金属防腐;缓蚀机理;等温吸附模型;吸附类型

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)04-0538-12

引文格式: 陈汇凯,黄锦圳,鲁国强,等. 碳点缓蚀剂的研究进展[J]. 材料研究与应用,2024,18(4):538-549.

CHEN Huikai, HUANG Jinzhen, LU Guoqiang, et al. Research Progress of Carbon Dots Corrosion Inhibitors[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(4): 538-549.

0 引言

金属腐蚀已经成为工业领域中的全球性问题,对经济和环境造成严重的影响。金属设备暴露在海水、盐湖等含氯环境中,氯离子容易破坏金属保护膜,降低设备的使用寿命和安全性^[1-2]。在油气开采过程中,利用CO₂气体驱油可以减少温室气体,提高油气开采量。但CO₂是腐蚀性气体,可溶于水生成H₂CO₃,对金属管道造成均匀腐蚀或局部腐蚀,导致管道失效^[3-4]。此外,在工业装备制造和加工过程中,经常需要对设备进行酸洗等处理,这些酸性物质同样会导致金属腐蚀,缩短设备服役时间并造成相应的经济损失^[5]。因此,金属的防腐蚀技术受到广泛关注。

当前,主流的金属防腐蚀技术包括开发防腐特性的合金材料、涂层保护法及缓蚀剂保护法等^[6]。其中,缓蚀剂能吸附在金属表面形成保护层,显著降

低介质中金属的腐蚀速率,缓蚀剂保护法具有成本低廉、工艺简单和适用范围广等优点,因而被广泛采用^[7]。常用的无机盐缓蚀剂包括锌盐、硼酸盐、铬酸盐、磷酸盐、硅酸盐和硝酸盐等^[8-9]。然而,由于无机缓蚀剂具有一定毒性和潜在的环境危害,其使用受到限制。有机型缓蚀剂中主要含有N、O、P、S等杂原子化合物,这些杂原子由于自身具有非键电子(孤电子)或 π 电子,从而被吸附在金属表面,形成一层保护膜,减少了腐蚀介质与金属表面的接触面积,减缓金属的腐蚀^[10]。各种有机缓蚀剂,特别是含有N、S等杂原子、芳香环和 π 键的唑类衍生物,已被证实能有效抑制金属的腐蚀^[11-13]。但这些有机缓蚀剂的高毒性和难降解性限制了其应用。随着人们健康与环保意识的提高,开发和应用成本低廉、无毒无害、高效的绿色缓蚀剂成为当前金属防腐蚀研究的重点。然而,绿色缓蚀剂在极端环境下的稳定性、防腐

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)林君院士工作站人才团队引进科研项目(ZJW-2022-08-08)

作者简介: 陈汇凯, 硕士, 研究方向为腐蚀电化学与防腐涂层。Email: 13692439048@163.com。

通信作者: 汪建明, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为腐蚀防护。Email: wangjm@zjblab.com。

蚀效率、生产成本、降解速率控制等问题仍有待解决^[14-16]。

碳点(Carbon Dots, CDs)是一种新型的零维碳纳米材料,直径小于10 nm,通常近似球形。CDs因其制备成本低、易修饰改性和环境友好等优点而受到广泛关注,已在生物传感、药物输送、光催化和发光二极管等领域有大量的研究报道^[17-20]。近年来,国内外研究者开展了CDs缓蚀剂在金属防腐蚀领域的研究,为金属缓蚀剂的发展提供了新的思路。然而相关领域的研究尚处于起步阶段,亟需对相关研究进展进行梳理总结。综述了CDs缓蚀剂的研究现状,分析了CDs的改性方法及对金属的防腐蚀效果,探讨了CDs缓蚀剂的等温吸附模型和缓蚀机理,最后对CDs缓蚀剂存在的挑战和未来发展进行了总结与展望。

1 CDs的制备方法

作为一种零维碳纳米材料,CDs缓蚀剂的缓蚀效率主要取决于2个关键因素:粒径大小和表面官能团。CDs的粒径大小主要影响其分散性、稳定性以及与金属表面的相互作用,较小的粒径意味着更大的比表面积,可导致更高的表面活性和更强的吸附成膜能力。CDs由于其比表面积大,可以引入更多功能化官能团,如羟基、羧基和氮掺杂等,增强与金属的相互作用,增强缓蚀效果。因此,制备CDs缓蚀剂需选择合适的方法,实现CDs缓蚀剂尺寸的控制与官能团的引入。

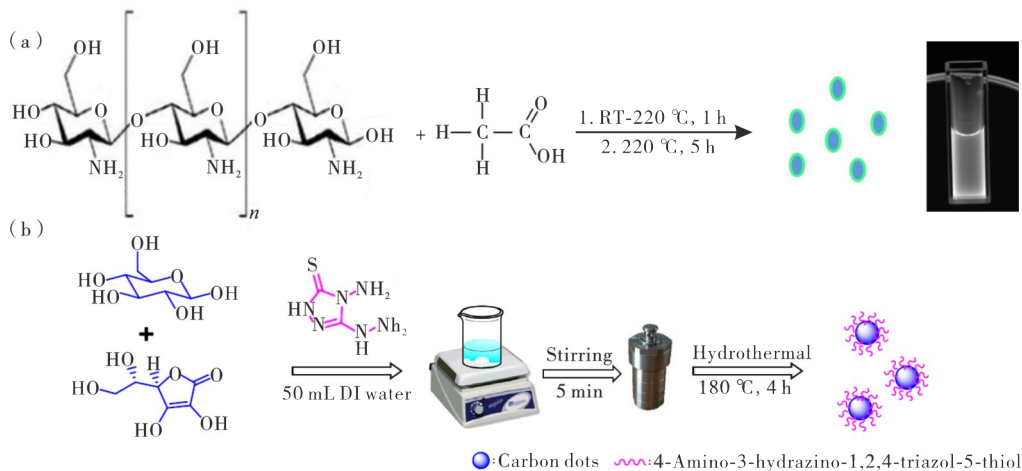
CDs制备主要分为“自上而下”和“自下而上”2类合成方法。2种方法使用的原料不同,合成工艺有所差异,各有优缺点。

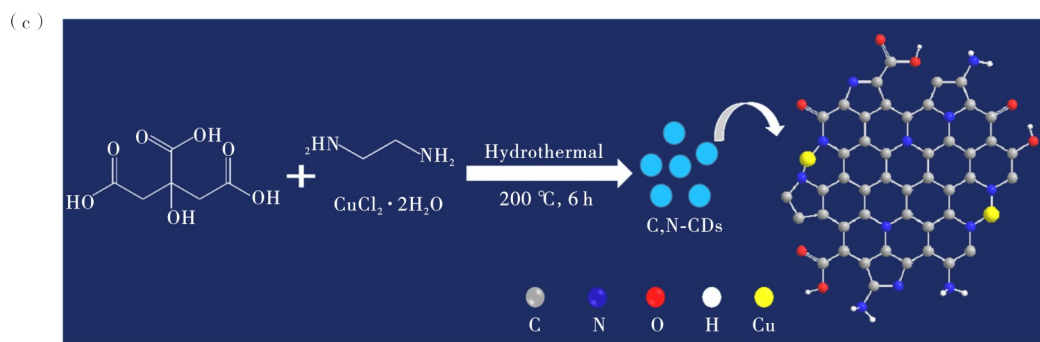
CDs的“自上而下”合成法是一种以大尺寸碳材

料为原料,逐步减小尺寸制备CDs的方法。这种方法通常涉及对大尺寸的碳材料进行物理或化学处理。常用的“自上而下”合成方法包括电弧放电法^[21]、激光烧蚀法^[22]、化学氧化法^[23]、球磨法^[24]和电化学剥离法^[25]等。该类方法通常更适合大规模生产,但会面临尺寸与形态难以控制、纯度和产率不高等难题。

CDs的“自下而上”合成法指的是从含碳分子或碳原子出发,通过化学反应合成CDs的方法。这类方法通常涉及碳源分子的聚合和碳化过程,以生成纳米尺寸的CDs。相比于“自上而下”法,“自下而上”法通常更环保,尤其是当使用生物质材料作为碳源时,这与当前可持续发展的目标相符。此外,“自下而上”法在合成过程中可以引入不同的官能团,从而满足特定应用要求。“自下而上”合成方法主要包括水热法^[26]、微波辅助法^[27]、化学氧化法^[28]、热解法^[29]和模板法^[30]等。

尽管“自上而下”法能够实现碳点的表面功能化,但“自下而上”法在制备特定功能性的CDs方面具有更多的灵活性与控制性,目前大多数文献工作使用“自下而上”法合成CDs缓蚀剂。其中水热法是最常用于制备CDs缓蚀剂的合成方法,具有环保、低成本、原料选择范围广、工艺兼容性强等优点。此外,水热合成提供了一个封闭环境,通过控制反应时间、温度、原料比例,可以在一定程度上控制CDs缓蚀剂的尺寸和均匀性,有利于获得较为统一的粒径分布。图1为基于不同碳源采用水热法合成CDs缓蚀剂的路线图。





(a) —壳聚糖; (b) —葡萄糖和抗坏血酸; (c) —柠檬酸。
(a) —chitosan; (b) —glucose and ascorbic acid; (c) —citric acid.

图1 基于不同碳源的CDs水热法合成路线^[31-33]

Figure 1 Hydrothermal synthesis route of CDs with various resource

2 CDs缓蚀剂的研究现状

2.1 氮掺杂碳点(N-CDs)缓蚀剂

CDs作为缓蚀剂时,一般需要先对其进行修饰改性。氮掺杂的缓蚀剂可以与金属之间通过配位键或静电作用吸附在金属表面,抑制金属腐蚀。因此,研究人员以含有N元素的物质作为原材料,制备氮掺杂碳点(N-CDs),探究其对金属的防腐蚀效果。Cui等^[34]以氨基水杨酸(ASA)为前驱体,通过溶剂热法制备了平均尺寸约为3 nm的N-CDs缓蚀剂,研究了其在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl溶液中对Q235碳钢的腐蚀抑制效果。结果表明,N-CDs在基体表面达到吸附平衡时,抑制效率最大达到96%。Ye的团队^[35-36]针对不同温度和时间下水热反应制备N-CDs的影响规律开展研究,以柠檬酸铵为原料,探究了3种不同反应温度(150、180和210 °C)和3种不同反应时间(1、2和3 h)下制备的N-CDs对Q235碳钢在酸性溶液中的缓蚀效率。研究表明,不同反应变量的N-CDs缓蚀剂,达到最佳的缓蚀效果N-CDs质量浓度均为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最佳反应温度和反应时间为180 °C和2 h。Xu等^[37]以柠檬酸为碳源、聚乙烯亚胺(PEI)为氮源,制备了N-CDs。N-CDs通过与 Cu^{2+} 之间的相互作用在铜表面形成网状保护膜,抑制了 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 溶液中铜表面的电荷转移过程。Zhang等^[38]以三聚氰胺和果糖为原料制备了N-CDs,实现了铜在中性NaCl(质量分数3%)溶液中的缓蚀。Long等^[39]使用荔枝叶合成掺杂氮元素的N-CDs缓蚀剂。研究表明, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的N-CDs显示出98.06%的显著缓蚀效率。陈佳起等^[40]将开心果壳进行预处理,与酒石酸溶液混合后进行水热反应,制备得到N-CDs,腐蚀实验后对Q235碳钢表面的分析结果表明,N-CDs的吸附使碳钢表面呈现疏

水状态,利于阻挡腐蚀介质侵蚀。Wu等^[41]以水杨酸钠、四亚乙基五胺和尿素为原料,通过微波法制备N-CDs,对N80钢的腐蚀抑制效率分别达到89.04% ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl)和94.6% (质量分数3.5% NaCl)。

针对CDs缓蚀剂生物降解速度快、使用寿命短的问题,研究人员使用缓蚀容器对其进行负载从而实现CDs的可控释放。Guo等^[42]开发了一种基于介孔二氧化硅(MSN)负载的N-CDs的刺激释放系统,以藻酸钙(Alg)作为壁材料,得到可对pH进行响应的缓蚀胶囊(MSN@N-CDs@Alg),制备流程如图2所示。研究表明,该缓释胶囊在不同pH条件下均可有效释放,在碱性条件下对Q235碳钢的保护效率达95%。

除了吸附在金属基体上起到保护作用,CDs本身的高荧光性也可应用在防腐领域中。Liu等^[43]探讨了具备荧光性质的N-CDs缓蚀剂对铁板的腐蚀防护效果与实时监测作用。研究表明,制备得到的N-CDs显著抑制铁的腐蚀,同时N-CDs吸附膜可以对 Fe^{3+} 进行快速、敏感的反应。铁板在腐蚀发生前呈现较强的荧光强度,随着浸泡时间延长,荧光开始减弱,激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)图像和荧光图像的变化趋势一致(见图3)。N-CDs蓝色荧光强度降低对应 Fe^{3+} 浓度的增加,意味着铁板腐蚀加剧。

N-CDs通过在金属表面形成一层稳定的保护膜来减缓腐蚀过程,与传统的化学缓蚀剂相比,氮掺杂碳点具有更高的环境友好性。N-CDs具体的作用机制以及在不同腐蚀环境下的性能稳定性等仍需进一步研究,且大规模生产N-CDs的成本效益和应用效果的实地验证也是未来研究的重要方向。

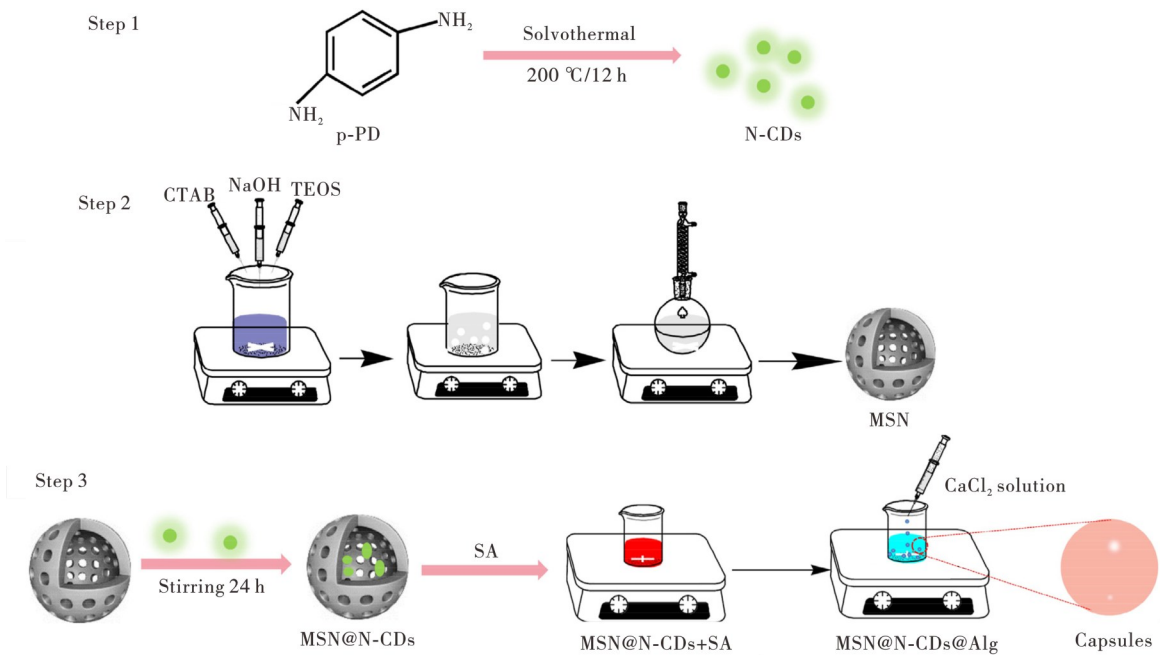
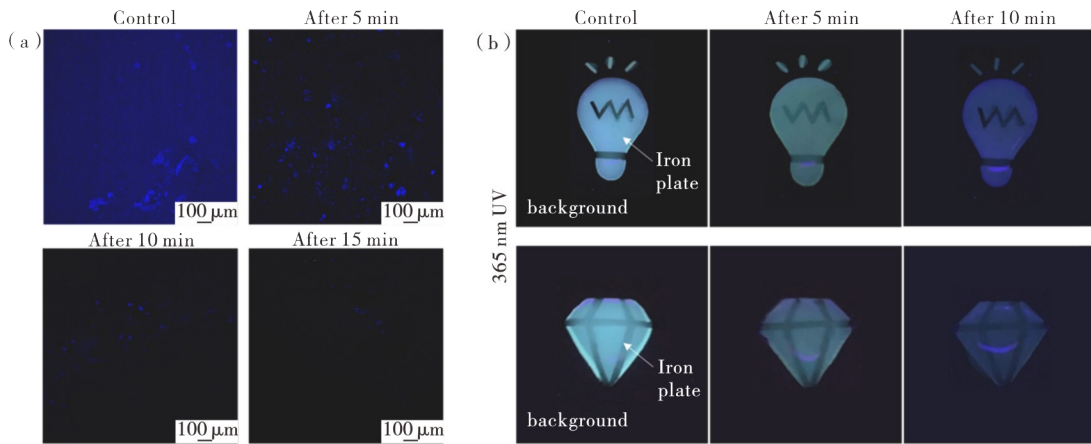


图2 控制释放型 N-CDs 的合成路线图^[42]

Figure 2 Synthesis route of control released N-CDs



(a)—CLSM 图像;(b)—荧光图像。
(a)—CLSM image; (b)—fluorescence image.

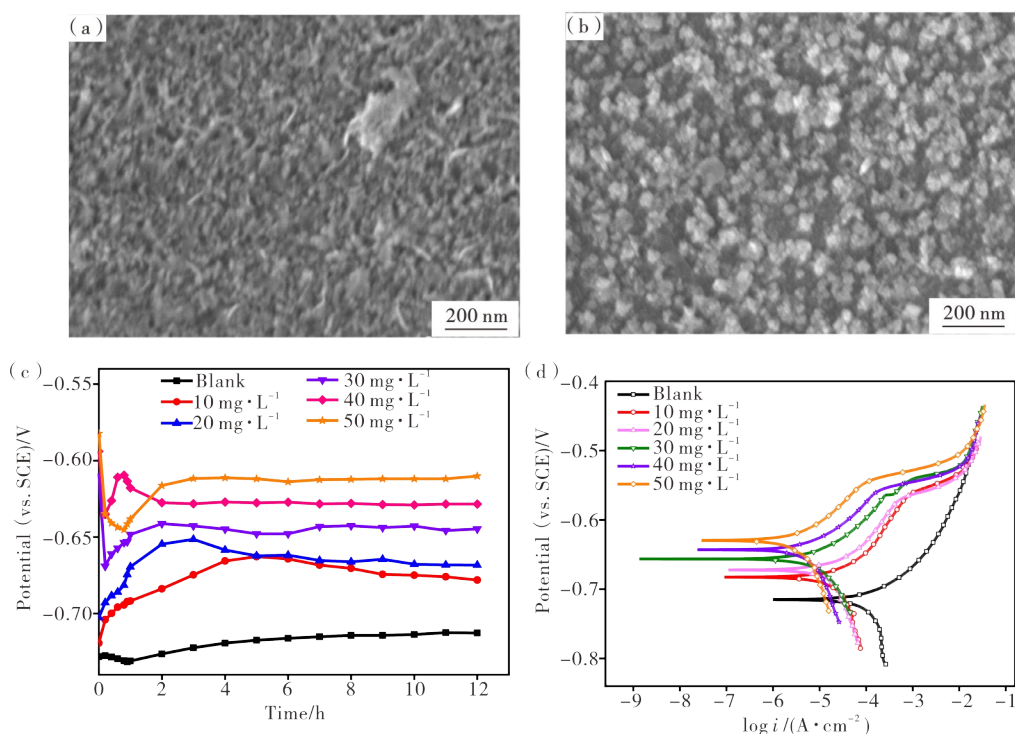
图3 涂有 N-CDs 的铁板在 0.1 mol·L⁻¹ HCl 中浸泡不同时间后的图像^[43]

Figure 3 Images of iron plates coated with N-CDs soaked in 0.1 mol·L⁻¹ HCl for different times

2.2 氮、硫共掺杂碳点 (N,S-CDs) 缓蚀剂

氮(N)、硫(S)等电负性杂原子能够与金属形成配位键,这有助于缓蚀剂在金属表面的稳定吸附,研究人员开发氮、硫共掺杂碳点(N,S-CDs)探究其对金属的保护效果。Cen等^[44]首次将N,S-CDs用于防腐领域,实现了碳钢在CO₂饱和的NaCl(质量分数3.5%)溶液中免受腐蚀。对照组试样表面因严重腐蚀出现深裂纹和腐蚀产物导致膜破裂,而添加N,S-CDs后碳钢表面呈现致密的缓蚀剂膜(见图4)。

添加N,S-CDs后,开路电位(OCP)相比对照组明显正移,且OCP达到稳定所需要的时间与N,S-CDs浓度成反比。从塔菲尔极化曲线图可见,由于N,S-CDs的加入,阴极和阳极反应均受到显著抑制,说明N,S-CDs是混合型缓蚀剂,当添加质量浓度为50 mg·L⁻¹时,最大缓蚀效率为96.7%。Saraswat等^[45]采用异烟肼、硫脲和柠檬酸进行水热反应制备了N,S-CDs,在盐酸溶液环境中,200 mg·L⁻¹的N,S-CDs对低碳钢有最高98.64%的缓蚀效率。



(a)—不添加缓蚀剂的碳钢表面；(b)—添加 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ N,S-CDs 的碳钢表面；(c)—开路电位；(d)—塔菲尔曲线。

(a)—carbon steel surface without the addition of corrosion inhibitor；(b)—carbon steel surface with the addition of $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ N,S-CDs；(c)—open circuit potential；(d)—Tafel curve.

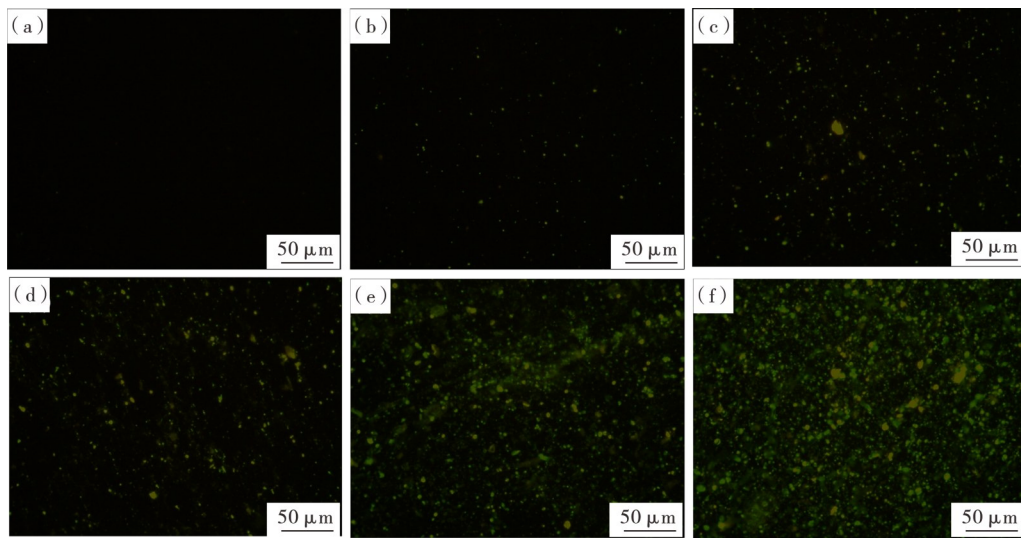
图4 不添加缓蚀剂和添加N,S-CDs后碳钢表面的SEM图像、开路电位和塔菲尔曲线^[44]

Figure 4 SEM images, open circuit potential and Tafel curve of carbon steel without the addition of corrosion inhibitor and with the addition

研究人员制备N,S-CDs缓蚀剂针对Cu表面展开腐蚀防护研究。Cui等^[46]用柠檬酸和硫脲合成了N,S-CDs,在浸泡60h的长效性测试中,在 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的N,S-CDs条件下,最高缓蚀效率达95.86%。Liu等^[47]通过调整L-半胱氨酸和柠檬酸铵的比例,采用水热法合成N,S-CDs。结果表明,N,S-CDs平均粒径约为3—6 nm,呈现良好分散性,表面含有大量不饱和键与极性基团。腐蚀抑制效率随S/N的增加先上升后下降,当 $m(\text{L-半胱氨酸}):m(\text{柠檬酸铵})=1:2$ 时效果最好。Zhang等^[48]以邻苯二胺和硫脲为原料,合成了在 H_2SO_4 溶液中对铜的高效N,S-CDs缓蚀剂。Wan等^[32]采用简单的水热法,利用葡萄糖、抗坏血酸和4-氨基-3-胍基-5-巯基-1,2,4-三唑的混合溶液制备了N,S-CDs缓蚀剂,发现其在中性溶液对铜具有缓蚀效果。研究结果显示,当N,S-CDs的质量浓度为 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在NaCl(质量分数3.5%)溶液中对铜的最佳缓蚀效率为88%。

铝致密的保护膜在酸性介质中容易破坏,因此Cen等^[49]通过使用氨基水杨酸和硫脲作为原料的水热法合成N,S-CDs,基于扩散和聚集效应以及与铝离子的强相互作用,N,S-CDs能够吸附在铝表面,形成一种网状阻隔膜。由于CDs的荧光特性,N,S-CDs在基体的分布还可以通过荧光显微镜进行表征(见图5),浸泡12h后,铝合金表面基本被绿色荧光覆盖。Pan等^[50]以硫脲和4-氨基水杨酸为前驱体制备N,S-CDs,在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下对铝的缓蚀效率达到86.6%。

N,S共掺杂提供了比单独N掺杂更复杂的电子结构和化学功能性,这增强了N,S-CDs与金属表面的相互作用,从而提供更稳定有效的防腐效果。虽然N,S-CDs的使用减少了对环境和人类健康的潜在风险,但目前多数N,S-CDs缓蚀剂使用硫脲作为提供硫源的前驱体,可能会在水热过程中产生有毒副产物,因此前驱体的选择十分重要。



(a)—0 min; (b)—10 min; (c)—30 min; (d)—1 h; (e)—6 h; (f)—12 h。

图5 铝合金在 50 °C 下浸泡不同时间 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ N, S-CDs 的荧光图像^[49]

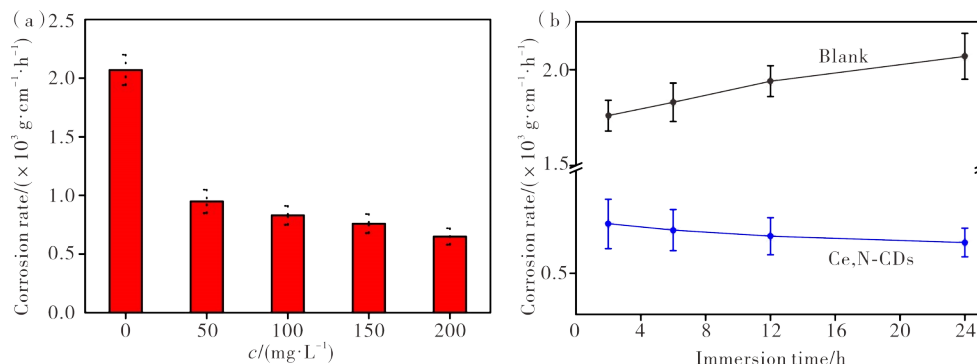
Figure 5 Fluorescence images of the aluminium alloy after immersion with $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ N, S-CDs at 50 °C for different time

2.3 金属元素掺杂碳点缓蚀剂

金属离子和杂原子掺杂的 CDs, 如 Mg, N-CDs、Cu, N-CDs、Zn, N-CDs 和 Mn, N-CDs 等, 已被发现具有可生物成像、抗菌、荧光发射等特性^[51-54]。但这类改性 CDs 在金属缓蚀方面的应用报道较少。Kalajahi 等^[55]合成了铜纳米粒子掺杂碳量子点的纳米杂化物 Cu-CQDs, 研究了其在有硫酸盐还原菌 (SRB) 的存在下对 X60 钢的缓蚀作用。结果表明, 加入了 Cu-CQDs 后, 样品表面形成了一种致密的纳米杂化物保护层。添加 Cu-CQDs 后, 硫元素含量显著减少, 表明 Cu-CQDs 同时抑制了硫酸盐还原菌的活性。Padhan 等^[33]以柠檬酸、乙二胺和氯化铜为原

料, 通过水热反应制备 Cu, N-CDs。结果表明, Cu, N-CDs 的缓蚀效率高于以柠檬酸和乙二胺制备的 N-CDs, 在不同温度的 HCl (质量分数 15%) 溶液中均表现出大于 99.5% 的缓蚀效率。

近年来, 稀土缓蚀剂因其优异的物理化学性能和许多潜在的应用而受到广泛关注^[56-58]。铈 (Ce) 是其中被最广泛研究的稀土金属元素, 其储量丰富、成本低廉, 可在钢铁表面形成一层致密氧化物膜。Liu 等^[59]以柠檬酸和硝酸铈六水合物作为原料, 通过水热法制备得到呈浅棕绿色的掺杂 Ce 与 N 的碳点缓蚀剂 (Ce, N-CDs), 研究了其对金属的腐蚀速率的影响 (见图 6)。结果表明, 腐蚀速率与 Ce, N-CDs 添



(a)—缓蚀剂质量浓度与腐蚀速率的关系; (b)—浸泡时间与腐蚀速率的关系。

(a)—relationship between corrosion inhibitor concentration and corrosion rate; (b)—relationship between immersion time and corrosion rate.

图6 Ce, N-CDs 缓蚀剂浓度和浸泡时间对金属的腐蚀速率的影响^[59]

Figure 6 Influence of concentration and immersion time of Ce, N-CDs inhibitor on the corrosion rate of metals

加量成反比,并且随着浸泡时间增加腐蚀速率呈下降趋势。Ce,N-CDs主要通过碳钢表面的吸附和Ce配合物的形成协同保护金属。Zeng等^[60]通过水热法以不同质量比的硝酸铈和柠檬酸铵为原料,制备得到一系列Ce,N-CDs。研究表明,Ce,N-CDs可以在铜表面形成保护膜,抑制铜的腐蚀,且随着Ce含量的增加,CDs缓蚀剂的腐蚀抑制能力先增强后减弱。同时,CDs中的金属离子可以形成金属离子-缓蚀剂络合物膜或钝化金属氧化物膜,从而增强缓蚀性能。

金属元素的掺杂可以改变碳点的表面化学性质和电子结构,从而增强其与基体表面的相互作用,形成更稳定有效的保护膜。金属元素掺杂碳点通常来源于廉价易得的碳源和金属源,且制备方法相对简单,因此具有较好的可持续性和环境友好性。

3 CDs缓蚀剂缓蚀机理研究

缓蚀剂吸附的热力学研究是理解和优化缓蚀剂性能的关键,它涉及缓蚀剂与金属表面相互作用的基本原理。热力学参数的阐释,反映了缓蚀剂与金属表面的相互作用,通常通过应用各类吸附等温模型来实现,等温吸附模型主要包括Langmuir模型、Temkin模型、Frumkin模型和Bockris-Swinkell模型^[61]。绝大多数碳点缓蚀剂更适用Langmuir吸附等温模型^[62]。Langmuir等温线特征方程如下所示^[63]

$$K_{\text{ads}} \cdot c_{\text{inh}} = \frac{\theta}{1 - \theta}$$

对方程进行变形重写,得到下式。

$$\frac{c_{\text{inh}}}{\theta} = \frac{1}{K_{\text{ads}}} + c_{\text{inh}}$$

$$f(z) = a + b \cdot z$$

其中,变量 z 为 c_{inh} 缓蚀剂浓度, $f(z) = c_{\text{inh}}/\theta$, θ 为表面覆盖度,在缓蚀剂研究中通常使用缓蚀效率代替, b 为斜率,值应接近1, a 为截距,可根据 $a = 1/K_{\text{ads}}$ 来计算吸附平衡常数 K_{ads} 。一般来说, K_{ads} 值越高,缓蚀剂与金属基体表面的结合作用越强^[64]。此外,热力学参数吉布斯吸附自由能(ΔG_{ads}^0)可以用来评估吸附过程的自发性以及缓蚀剂的吸附类型。 ΔG_{ads}^0 可由如下方程求得^[34]。

$$\Delta G_{\text{ads}}^0 = -RT \ln(1000K_{\text{ads}})$$

式中, R 代表气体摩尔常数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 代表开尔文温度。当 $\Delta G_{\text{ads}}^0 \geq -20 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,缓蚀剂的吸附类型主要为物理吸附;当 $\Delta G_{\text{ads}}^0 \leq -40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,缓蚀剂的吸附类型主要为化学吸附;当 $-40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \leq \Delta G_{\text{ads}}^0 \leq -20 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,缓蚀剂的吸

附类型包括物理吸附和化学吸附^[65]。而CDs的吸附动力学机制尚未清晰。

目前关于CDs缓蚀剂的研究报道中,根据计算得到对应的 ΔG_{ads}^0 均在 $-20 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 到 $-40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之间,表明CDs缓蚀剂的吸附类型为既有物理吸附也有化学吸附。Ren等^[66]制备N-CDs和缓蚀性能更好的N,S-CDs缓蚀剂,以动电位极化测试结果计算得到对应的 K_{ads} 值分别为 90.3 和 $567.9 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$,说明N,S-CDs具有更强的吸附能力,进一步计算得出N-CDs和N,S-CDs的 ΔG_{ads}^0 值分别为 -28.3 和 $-32.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,表明它们都能通过化学吸附和物理吸附自发吸附在碳钢表面。Liu等^[59]制备稀土金属元素铈掺杂的碳点缓蚀剂Ce,N-CDs,计算得到的 K_{ads} 和 ΔG_{ads}^0 值分别为 $185.2 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $-30.05 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,表明Ce,N-CDs在金属表面同时存在物理吸附和化学吸附。

Langmuir等温吸附模型对于有机缓蚀剂分子的吸附研究通常是有效的。一般假设吸脱附达到平衡态,且金属基体表面均匀,在低浓度下,吸附状态下的缓蚀剂分子之间没有相互作用。物理吸附主要通过范德华力或静电作用,化学吸附主要通过如共价键或离子键等较强的化学键。对于那些外层拥有空轨道的金属,如Fe和Cu,改性的CDs缓蚀剂通过其N和S的孤对电子与Fe和Cu形成配位化学键,从而附着在金属基体表面;而对于Al这类外层缺乏空轨道的金属,CDs缓蚀剂则主要通过其表面的官能团与 Al^{3+} 离子形成螯合结构,实现对金属基体的吸附。

Luo等^[67]使用柠檬酸铵和蛋氨酸制备了N,S-CDs,并阐述了对应的缓蚀作用机理。图7为N,S-CDs的保护机制。N,S-CDs的吸附方式主要包括物理吸附和化学吸附:物理吸附来自CDs缓蚀剂的活性基团,促进N,S-CDs在钢表面的吸附;化学吸附来自于杂原子N和S与钢的反应,有利于减少腐蚀活性位点数量。此外,N,S-CDs致密的保护膜增强了其表面疏水能力,有效避免腐蚀介质的接触。Padhan等^[33]制备的铜和氮掺杂的碳点缓蚀剂Cu,N-CDs,对应的保护机制如图8所示。除了通过物理化学吸附在钢表面形成保护膜,Cu,N-CDs中的Cu离子还可以在钢表面被还原,形成均匀的Cu膜,阻止阴极 H^+ 还原和铁的阳极氧化反应。

相比于传统缓蚀剂,CDs缓蚀剂还具有一些特殊的缓蚀作用机理。(1)纳米粒子的团聚效应。由于纳米粒子较大的比表面积和易于累积电荷的特性,纳米粒子在溶液中往往会产生较强的相互作用力,

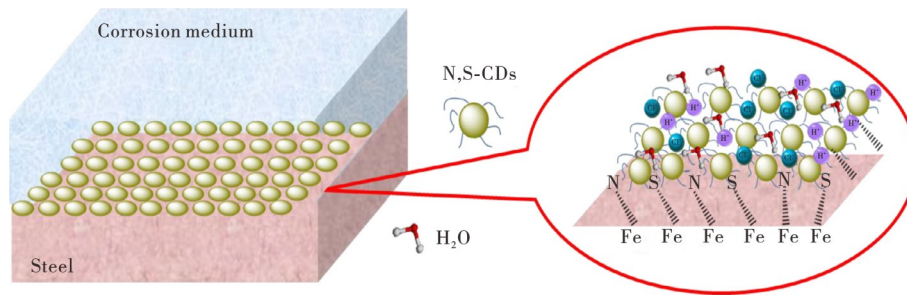
图7 N,S-CDs的保护机制^[67]

Figure 7 Protection mechanism of N, S-CDs

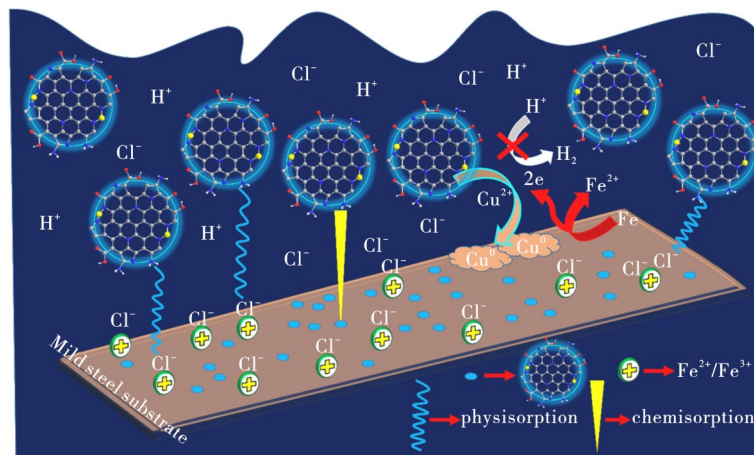
图8 Cu,N-CDs的保护机制^[33]

Figure 8 Protection mechanism of Cu,N-CDs

使得粒子易于聚集,这种情况称为纳米粒子的团聚效应^[68]。由于团聚现象,CDs吸附在金属表面的同时也会聚集,最终形成比传统缓蚀剂吸附膜更厚的保护膜。当CDs添加浓度过高时,团聚现象严重,导致CDs在溶液中的分散性不佳,形成的保护膜会存在一定缺陷^[69]。除了适当控制添加浓度,还可以通过表面功能化改性、使用表面活性剂或稳定剂、超声分散处理等方法解决CDs缓蚀剂在应用过程中的团聚问题。(2)CDs表面官能团与金属表面的相互作用。CDs缓蚀剂的表面含有大量的活性基团如羟基、羧基等,可与金属发生强烈的相互作用(氢键形成、配位键合以及静电吸附等),利于其吸附在金属表面^[70]。(3)CDs的可调控性。通过优化合成条件,改变CDs的尺寸、掺杂元素以及表面官能团的种类和密度,可以在较宽的范围内调控其缓蚀效率与合成效率^[71]。

此外,传统的小分子缓蚀剂能够快速且均匀地分散在溶液体系中,可较快吸附在金属表面从而达到稳定状态。而CDs缓蚀剂在金属表面达到稳定吸附状态所需时间更长。原因可能是纳米粒子尺寸较大,其在溶液中的扩散移动还受到纳米粒子自身

的结构和溶液体系的影响^[72]。这些因素有可能对CDs的缓蚀机理研究产生一定影响。

4 总结与展望

本文综述了CDs作为缓蚀剂在防腐领域的应用,总结了近年CDs缓蚀剂在金属腐蚀防护领域的研究进展。相较于传统缓蚀剂,CDs缓蚀剂除了可以通过物理化学作用更好地吸附在金属基体上,吸附膜也具有一定的疏水性,有效隔绝腐蚀性介质的侵入。改性的CDs缓蚀剂,是一类环境友好、缓蚀性能优异的新型绿色缓蚀剂,在防腐领域有着巨大潜能。在今后的研究工作中,应致力于以下几个方面的研究:

(1) CDs缓蚀剂的缓蚀机理研究。CDs的表征主要是定性的,难以准确获知其表面官能团的密度与分布状况。此外,CDs作为纳米粒子,存在团聚现象,这进一步增加了探究其缓蚀作用机制的难度。因此,详细理解CDs缓蚀机制的作用过程,仍需通过更多的实验与理论研究进行深入分析。

(2) CDs缓蚀剂制备工艺的优化。一方面是合成原料的无毒性,避免使用类似三聚氰胺、硫脲、乙

二胺等有毒物质来进行CDs缓蚀剂的合成;另一方面是优化制备方法流程,探寻高效、低成本且环境友好的大规模生产方法,拓宽碳点缓蚀剂在工业级应用的可行性。

(3) CDs与缓蚀剂的复配。CDs与其他类型的高效缓蚀剂(如有机缓蚀剂、无机盐缓蚀剂等)配合使用可能会产生协同效应,进一步提高缓蚀效率,这是一个值得探索的方向。

(4) CDs的环境适应性研究。为拓展CDs缓蚀剂在油气开采和化学工业等领域的应用,探索CDs缓蚀剂在极端条件(如高温、高压、强酸强碱环境等)下的应用和稳定性可能成为未来研究的重要方向。

(5) CDs涂层填料开发。CDs兼具腐蚀抑制作用和荧光响应作用,可开发CDs缓蚀剂填料,制备多功能的智能化涂层,从而实现涂层的腐蚀检测与预警、腐蚀抑制与涂层自修复等多种功能集成。

CDs缓蚀剂作为一种具有广泛应用前景的新型零维碳纳米材料,在腐蚀防护领域的发展潜力巨大,未来的研究将向着多元化与更深入的方向发展。

参考文献:

- [1] 李善建, 崔国涛, 王梦忆, 等. 氯化钠对曼尼希碱型盐酸缓蚀剂缓蚀性能的影响[J]. 应用化工, 2020, 49(11): 2784-2786.
- [2] 许凯, 王保杰, 孙杰. 典型腐蚀介质中阴离子对镁合金腐蚀行为影响的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(12): 166-176.
- [3] 马迪. 油气井CO₂腐蚀主控因素及解决措施[J]. 化工管理, 2021, 28: 143-144.
- [4] 范家僊, 李敏. 含CO₂油气田腐蚀特点分析及防腐对策[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(9): 60-66.
- [5] 付光, 高国强, 郝鹏飞, 等. 酸洗缓蚀剂的应用研究[J]. 轧钢, 2022, 39(1): 110-114.
- [6] FARH H M H, BEN SEGHIER M E A, ZAYED T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106885.
- [7] 楚天舒, 万闪, 廖伯凯, 等. 植物提取物缓蚀剂的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(6): 1078-1086.
- [8] DAMBORENEA J DE, CONDE A, ARENAS M A. 3-Corrosion inhibition with rare earth metal compounds in aqueous solutions [M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2014: 84-116.
- [9] ILEVBARO G O, BURSTEIN G T. The inhibition of pitting corrosion of stainless steels by chromate and molybdate ions[J]. Corrosion Science, 2003, 45(7): 1545-1569.
- [10] GOYAL M, KUMAR S, BAHADUR I, et al. Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 256: 565-573.
- [11] BAO Y, YAN Y, WEI Y M, et al. Salt-responsive ZnO microcapsules loaded with nitrogen-doped carbon dots for enhancement of corrosion durability[J]. 2021, 56: 5143-5160.
- [12] TURANO M, WALKER M, GRILLO F, et al. Adsorption of the prototypical organic corrosion inhibitor benzotriazole on the Cu (100) surface [J]. Corrosion Science, 2022, 207: 110589.
- [13] GONI L K M O, JAFAR MAZUMDER M A, QURAIISHI M A, et al. Bioinspired heterocyclic compounds as corrosion inhibitors: A comprehensive review [J]. Chemistry-An Asian Journal, 2021, 16(11): 1324-1364.
- [14] MAESTRO C A R, DE SOUSA MALAFAIA A M, SILVA C F, et al. Corrosion resistance improvement of mild steel in different pH using peel garlic green inhibitor [J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 305: 127971.
- [15] ZAKERI A, BAHMANI E, AGHDAM A S R. Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review [J]. Corrosion Communications, 2022, 5: 25-38.
- [16] HUANG L, ZHAO Q, LI H J, et al. Investigation of adsorption and corrosion inhibition property of Hyperoside as a novel corrosion inhibitor for Q235 steel in HaCl medium [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 364: 120009.
- [17] WEN X P, ZHAO Z H, ZHAI S Q, et al. Stable nitrogen and sulfur co-doped carbon dots for selective folate sensing, in vivo imaging and drug delivery [J]. Diamond and Related Materials, 2020, 105: 107791.
- [18] SHI D, YANG M Z, CHANG B, et al. Ultrasonic-ball milling: A novel strategy to prepare large-size ultrathin 2D materials[J]. 2020, 16(13): 1906734.
- [19] XU Q, NIU Y C, LI J P, et al. Recent progress of quantum dots for energy storage applications [J]. Carbon Neutrality, 2022, 1(1): 13.
- [20] KORAH B K, CHACKO A R, ABRAHAM T, et al. Recent progress and future perspectives of carbon dots in the detection, degradation, and enhancement of drugs [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2022, 39(2): 2100264.
- [21] DEY S, GOVINDARAJ A, BISWAS K, et al. Luminescence properties of boron and nitrogen doped graphene quantum dots prepared from arc-discharge-

- generated doped graphene samples [J]. *Chemical Physics Letters*, 2014, 595-596: 203-208.
- [22] CUI L, REN X, WANG J, et al. Synthesis of homogeneous carbon quantum dots by ultrafast dual-beam pulsed laser ablation for bioimaging[J]. *Materials Today Nano*, 2020, 12: 100091.
- [23] 陈科场. 碳点的合成、应用及环境影响研究进展[J]. *山东化工*, 2022, 51(23): 136-139.
- [24] JEONG G, PARK C H, YI D C, et al. Green synthesis of carbon dots from spent coffee grounds via ball-milling: Application in fluorescent chemosensors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 392: 136250.
- [25] ZHAO Y Y, WANG Y M, LI Y. Aluminum-doped carbon quantum dots and carbon nanosheets from electrochemical peeled-off MAX phase and their antioxidant ability [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, 153: 110894.
- [26] 张大伟, 张镇威, 萧卫泓, 等. 基于一步水热合成荧光碳点的水样中亚硝酸根离子的检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(S1): 273-274.
- [27] SUN P Y, LI X, KONG B H, et al. Fabrication and characterization of microwave-assisted synthesis of carbon dots crosslinked sodium alginate hydrogel films [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127130.
- [28] LI R L, ZHAO Z B, LENG C Y, et al. Preparation of carbon dots from carbonized corncobs by electrochemical oxidation and their application in Na-batteries [J]. *New Carbon Materials*, 2023, 38(2): 347-355.
- [29] SINGH J, KAUR S, LEE J, et al. Highly fluorescent carbon dots derived from *Mangifera indica* leaves for selective detection of metal ions [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137604.
- [30] CHERNYAK S, PODGORNOVA A, DOROFEEV S, et al. Synthesis and modification of pristine and nitrogen-doped carbon dots by combining template pyrolysis and oxidation [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 507: 145027.
- [31] KEERTHANA A K, ASHRAF P M. Carbon nanodots synthesized from chitosan and its application as a corrosion inhibitor in boat-building carbon steel BIS2062 [J]. *Applied Nanoscience*, 2020, 10(4): 1061-1071.
- [32] WAN S, CHEN H K, LIAO B K, et al. Adsorption and anticorrosion mechanism of glucose-based functionalized carbon dots for copper in neutral solution [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 129: 289-298.
- [33] PADHAN S, ROUT T K, NAIR U G. N-doped and Cu, N-doped carbon dots as corrosion inhibitor for mild steel corrosion in acid medium [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 653: 129905.
- [34] CUI M J, REN S M, XUE Q J, et al. Carbon dots as new eco-friendly and effective corrosion inhibitor [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 726: 680-692.
- [35] YE Y W, YANG D P, CHEN H, et al. A high-efficiency corrosion inhibitor of N-doped citric acid-based carbon dots for mild steel in hydrochloric acid environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 381: 121019.
- [36] LIU Z, YE Y W, CHEN H. Corrosion inhibition behavior and mechanism of N-doped carbon dots for metal in acid environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122458.
- [37] XU Q J, GE K, ZHANG S T, et al. Understanding the adsorption and inhibitive properties of nitrogen-doped carbon dots for copper in 0.5 M H₂SO₄ solution [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 125: 23-34.
- [38] ZHANG T T, ZHANG D Q, WU P P, et al. Corrosion inhibition of high-nitrogen-doped CDs for copper in 3 wt% NaCl solution [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 138: 104462.
- [39] LONG W J, LI X Q, YU Y, et al. Green synthesis of biomass-derived carbon dots as an efficient corrosion inhibitor [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 360: 119522.
- [40] 陈佳起, 赵万玉, 姚睿充, 等. 开心果壳基碳点的合成及其对Q235碳钢的缓蚀行为研究[J]. *化工学报*, 2023, 74(8): 3446-3456.
- [41] WU X D, LI J B, DENG C Y, et al. Novel carbon dots as effective corrosion inhibitor for N80 steel in 1 M HCl and CO₂-saturated 3.5 wt% NaCl solutions [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1250: 131897.
- [42] GUO C B, LIAN Y B, HUANG C, et al. pH-responsive capsule loaded with nitrogen-doped carbon dots for metal corrosion protection [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 2306-2323.
- [43] LIU Z, JIA R N, JIAN Y, et al. N-doped carbon dots as a multifunctional platform for real-time corrosion monitoring and inhibition [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 650: 129499.
- [44] CEN H Y, CHEN Z Y, GUO X P. N, S co-doped

- carbon dots as effective corrosion inhibitor for carbon steel in CO₂-saturated 3.5% NaCl solution[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, 99: 224-238.
- [45] SARASWAT V, YADAV M. Improved corrosion resistant performance of mild steel under acid environment by novel carbon dots as green corrosion inhibitor [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 627: 127172.
- [46] CUI M J, LI X. Nitrogen and sulfur Co-doped carbon dots as ecofriendly and effective corrosion inhibitors for Q235 carbon steel in 1 M HCl solution [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(35): 21607-21621.
- [47] LIU Z X, CHU Q K, CHEN H, et al. Experimental and molecular simulation studies of N, S-doped Carbon dots as an eco-friendly corrosion inhibitor for protecting Cu in HCl environment[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 669: 131504.
- [48] ZHANG Y, TAN B C, ZHANG X, et al. Synthesized carbon dots with high N and S content as excellent corrosion inhibitors for copper in sulfuric acid solution[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 338: 116702.
- [49] CEN H Y, ZHANG X, ZHAO L, et al. Carbon dots as effective corrosion inhibitor for 5052 aluminium alloy in 0.1 M HCl solution[J]. *Corrosion Science*, 2019, 161: 108197.
- [50] PAN L, LI G X, WANG Z Y, et al. Nitrogen/sulfur co-doped carbon dots for enhancing anti-corrosion performance of Mg alloy in NaCl solution [J]. *ChemistrySelect*, 2021, 6(41): 11337-11343.
- [51] DING Z Y, CUI L Y, ZENG R C, et al. Exfoliation corrosion of extruded Mg-Li-Ca alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(9): 1550-1557.
- [52] LI F, LIU C J, YANG J, et al. Mg/N double doping strategy to fabricate extremely high luminescent carbon dots for bioimaging[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(7): 3201-3205.
- [53] NICHOLS F, LU J E, MERCADO R, et al. Antibacterial activity of nitrogen-doped carbon dots enhanced by atomic dispersion of copper [J]. *Langmuir*, 2020, 36(39): 11629-11636.
- [54] TAMMINA S K, WAN Y, LI Y Y, et al. Synthesis of N, Zn-doped carbon dots for the detection of Fe³⁺ ions and bactericidal activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2020, 202: 111734.
- [55] KALAJAHI S T, RASEKH B, YAZDIAN F, et al. Green mitigation of microbial corrosion by copper nanoparticles doped carbon quantum dots nanohybrid [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(32): 40537-40551.
- [56] DAVÓ B, DE DAMBORENEA J J. Use of rare earth salts as electrochemical corrosion inhibitors for an Al-Li-Cu (8090) alloy in 3.56% NaCl[J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49(27): 4957-4965.
- [57] MONTEMOR M F, SIMÕES A M, FERREIRA M G S, et al. Composition and corrosion resistance of cerium conversion films on the AZ31 magnesium alloy and its relation to the salt anion [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(6): 1806-1814.
- [58] MENDEZ J A C, VONG Y M, BUENO J D J P. Cerium and other rare earth salts as corrosion inhibitors—A review [J]. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2022, 58 (4) : 801-810.
- [59] LIU Z X, HAO X Y, LI Y, et al. Novel Ce@N-CDs as green corrosion inhibitor for metal in acidic environment[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 349: 118155.
- [60] ZENG S Y, ZHANG F, LIU Y H, et al. Synthesis of Ce, N co-doped carbon dots as green and effective corrosion inhibitor for copper in acid environment [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 141: 104608.
- [61] QIANG Y J, ZHANG S T, XU S Y, et al. The effect of 5-nitroindazole as an inhibitor for the corrosion of copper in a 3.0% NaCl solution [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(78): 63866-63873.
- [62] BERDIMURODOV E, VERMA D K, KHOLIKOV A, et al. The recent development of carbon dots as powerful green corrosion inhibitors: A prospective review [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 349: 118124.
- [63] AL-AMIERY A, SHAKER L M, BETTI N. Corrosion inhibition effect and adsorption behaviour of nicotinic acid derivative on mild steel in HCl media [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 2204-2208.
- [64] JASIM A S, RASHID K H, AL-AZAWI K F, et al. Synthesis of a novel pyrazole heterocyclic derivative as corrosion inhibitor for low-carbon steel in 1M HCl: Characterization, gravimetric, electrochemical, mathematical, and quantum chemical investigations [J]. *Results in Engineering*, 2022, 15: 100573.
- [65] POUR-ALI S, HEJAZI S. Tiazofurin drug as a new and non-toxic corrosion inhibitor for mild steel in HCl

- solution: Experimental and quantum chemical investigations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 354: 118886.
- [66] REN S M, CUI M J, CHEN X Y, et al. Comparative study on corrosion inhibition of N doped and N, S codoped carbon dots for carbon steel in strong acidic solution[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 628: 384-397.
- [67] LUO J X, CHENG X, CHEN X H, et al. The effect of N and S ratios in N, S co-doped carbon dot inhibitor on metal protection in 1 M HCl solution[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 127: 387-398.
- [68] LORITE I, ROMERO J J, FERNANDEZ J F. Influence of the nanoparticles agglomeration state in the quantum-confinement effects: Experimental evidences [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(3): 037105.
- [69] 胡文滨,廖伯凯,郭兴蓬.碳基纳米缓蚀剂的研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2022, 16(5): 776-784.
- [70] LI J B, LV J, FU L P, et al. New ecofriendly nitrogen-doped carbon quantum dots as effective corrosion inhibitor for saturated CO₂ 3% NaCl solution [J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2020, 93 (3): 380-392.
- [71] HE H J, SHUANG E, AI L, et al. Exploiting machine learning for controlled synthesis of carbon dots-based corrosion inhibitors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138210.
- [72] CHANG X J, HENDERSON W M, BOUCHAR D C. Multiwalled carbon nanotube dispersion methods affect their aggregation, deposition, and biomarker response [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6645-6653.

Research Progress of Carbon Dots Corrosion Inhibitors

CHEN Huikai¹, HUANG Jinzhen¹, LU Guoqiang¹, LIU Sawen¹, ZHAO Cailing¹, BI Jinye¹,
WANG Jianming^{1*}, LIU Hanbin²

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524005, China; 2. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Carbon nanomaterials, due to their unique physicochemical properties such as high surface area, excellent electron transport performance, and abundant surface functional groups, have become a research hotspot across multiple fields. Among these, carbon dots (CDs), a type of zero-dimensional nanomaterial, exhibit exceptional optical properties, environmental friendliness, good biocompatibility, and ease of modification. These characteristics have enabled their broad application potential in fields such as biosensing, new energy, and medicine. The use of carbon dots in metal corrosion prevention has garnered increasing attention, with their role as corrosion inhibitors emerging as a new direction in scientific investigation. This article briefly describes the preparation methods of carbon dots and systematically reviews recent advancements in their application of carbon dots in the field of metal corrosion prevention. It elucidates the advantages of carbon dot-based corrosion inhibitors in metal corrosion prevention, including environmental friendliness, high stability, and outstanding corrosion inhibition efficiency. In the corrosion prevention research of various metal materials such as carbon steel and aluminum alloys, carbon dots have demonstrated excellent application potential. The article also focuses on the inhibition mechanisms of carbon dot corrosion inhibitors, including isothermal adsorption models and adsorption types. Lastly, the article points out the current challenges in the research of carbon dot corrosion inhibitors, such as the need for a deeper understanding of inhibition mechanisms, the development of large-scale synthesis methods, and their stability and long-term effectiveness in complex corrosion environments. It forecasts the future prospects of carbon dot corrosion inhibitors in the field of metal corrosion prevention, aiming for their wide application in low-carbon environmental protection and metal corrosion fields. This offers new insights and strategies for the design, development, and application of corrosion inhibitors. Despite being in the early stages of research, carbon dots as metal corrosion inhibitors hold vast potential in the field of corrosion protection.

Keywords: carbon dots; zero-dimensional nanomaterial; inhibitor; preparation methods; metal corrosion prevention; inhibition mechanism; isothermal adsorption model; adsorption type

(学术编辑:孙文)