

N掺杂碳量子点对Q235碳钢 在0.5 M H₂SO₄中的 缓蚀作用

方议苓, 王泽爽, 蔡 萌, 冉宗召, 谭伯川*

重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月26日

摘 要

为解决传统缓蚀剂毒性高、生物降解性差等问题, 本文以辣椒秸秆为碳源、尿素为氮源, 采用水热法制备氮掺杂碳量子点, 研究其在0.5 M H₂SO₄溶液中对Q235碳钢的缓蚀性能与作用机理。通过傅里叶红外光谱、电化学测试、扫描电子显微镜及吸附等温模型分析, 结果表明: 氮掺杂碳量子点表面富含羟基、羧基、C-N等活性官能团, 可在碳钢表面自发形成单分子层吸附膜, 属于物理-化学混合吸附, 符合Langmuir吸附等温模型。该缓蚀剂为混合型缓蚀剂, 缓蚀效率随浓度的升高而提升, 200 mg/L为最优浓度, 298 K时缓蚀效率达97.2%。温度升高会削弱吸附稳定性, 使缓蚀效率略有下降, 但高浓度N-CDs在308 K下仍保持良好的防护效果。SEM形貌显示, 添加缓蚀剂的碳钢表面平整无明显腐蚀, 空白组则出现严重腐蚀与剥落。本研究制备的氮掺杂碳量子点绿色高效、成本低廉, 为农业废弃物高值化利用与碳钢酸性环境防腐提供了新思路。

关键词

氮掺杂碳量子点, 辣椒秸秆, Q235碳钢, 绿色缓蚀剂

Corrosion Inhibition of N-Doped Carbon Quantum Dots on Q235 Carbon Steel in 0.5 M H₂SO₄

Yiling Fang, Zeshuang Wang, Meng Cai, Zongzhao Ran, Bochuan Tan*

School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: April 21, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 方议苓, 王泽爽, 蔡萌, 冉宗召, 谭伯川. N掺杂碳量子点对Q235碳钢在0.5 M H₂SO₄中的缓蚀作用[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 167-177. DOI: 10.12677/ms.2026.165111

Abstract

To address the problems of high toxicity and poor biodegradability of traditional corrosion inhibitors, nitrogen-doped carbon quantum dots (N-CDs) were prepared by hydrothermal method using chili straw as carbon source and urea as nitrogen source in this paper. The corrosion inhibition performance and mechanism of N-CDs on Q235 carbon steel in 0.5 M H₂SO₄ solution were investigated. Characterizations, including Fourier transform infrared spectroscopy, electrochemical measurements, scanning electron microscopy and adsorption isotherm analysis, were adopted. The results show that N-CDs are rich in active functional groups such as hydroxyl, carboxyl and C-N, which can spontaneously form a monolayer adsorption film on the surface of carbon steel. The adsorption belongs to physical-chemical mixed adsorption and conforms to the Langmuir adsorption isotherm model. The inhibitor is a mixed-type inhibitor, and its inhibition efficiency increases with the increase in concentration. The optimal concentration is 200 mg/L, with the inhibition efficiency reaching 97.2% at 298 K. The increase in temperature weakens the adsorption stability and slightly reduces the inhibition efficiency, but high-concentration N-CDs still maintain good protection at 308 K. SEM images reveal that the carbon steel surface with inhibitor is smooth without obvious corrosion, while the blank sample suffers from severe corrosion and peeling. The N-CDs prepared in this study are green, efficient and low-cost, providing a new strategy for high-value utilization of agricultural waste and corrosion protection of carbon steel in acidic environments.

Keywords

Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots, Chili Straw, Q235 Carbon Steel, Green Corrosion Inhibitor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

金属腐蚀是工业生产和日常生活中普遍存在的一种现象，它不仅导致材料性能的退化与经济损失，还可能引发安全隐患和环境污染问题。因此，金属腐蚀防护技术的研究具有重要的意义。碳钢作为广泛应用于建筑、制造和能源领域的结构材料，它在酸性环境中极易发生腐蚀，其表面氧化膜难以稳定存在，从而会导致严重的均匀腐蚀和局部腐蚀[1]。为了有效地抑制碳钢在酸性介质中的腐蚀行为，我们采用缓蚀剂进行防护。其操作简便、成本低廉且效果显著，通过吸附在金属表面形成保护膜，能够显著地降低金属与腐蚀介质之间界面的反应活性，从而延缓或阻止过程中腐蚀的发生[2]。

尽管传统缓蚀剂(如铬酸盐、钼酸盐等无机化合物及某些有机胺类物质)在金属腐蚀防护中表现出了良好的性能，但其通常具有较高的毒性或生物降解性差的问题，这些问题不仅限制了其实际应用的范围，还对环境造成了潜在威胁。例如，铬酸盐类缓蚀剂虽然具有优异的缓蚀效果，但其强致癌性和高污染性已引起了广泛关注[3]。此外，传统缓蚀剂的合成工艺往往比较复杂而且能耗较高，进一步增加了使用成本。在此背景下，开发出一种兼具高效性、环保性和经济性的新型缓蚀剂显得尤为重要。

近年来，碳量子点作为一种新型纳米材料，因其独特的光学、电学和化学性能而受到广泛关注。其结构通常由 sp² 杂化的碳原子构成核心骨架，表面富含羟基、羧基等活性官能团，这些官能团赋予了碳量子点良好的水溶性和生物相容性[2]。从性质上看，碳量子点具有优异的光致发光特性、低毒性和环境友好性，使其在传感、成像及催化等领域展现出巨大的应用潜力。制备方法方面，水热法、微波辅助法以

及化学氧化法是常见的合成途径，其中水热法因操作简便且易于调控产物性能而被广泛采用[3]。此外，不同类型碳量子点的缓蚀机理也成为了研究热点。一方面，碳量子点的尺寸效应被认为对其缓蚀性能具有重要影响，较小尺寸的碳量子点更容易进入金属表面的微观孔隙，从而形成更加致密的防护层[2]。另一方面，碳量子点的表面功能化修饰也被证明是改善其缓蚀性能的有效手段。例如，通过引入硫、磷等杂原子或接枝特定的有机分子，可以进一步增强碳量子点与金属表面的相互作用，从而提高其缓蚀效率[2]。而氮元素的引入可以显著改变碳量子点的表面性质和电子分布，从而增强其与金属表面的相互作用，提高缓蚀性能。然而，以农业废弃物如辣椒秸秆为前驱体制备氮掺杂碳量子点[4]，并将其应用于 Q235 碳钢在硫酸溶液中的缓蚀研究的创新性在于，辣椒秸秆作为一种丰富的生物质资源，不仅成本低廉且环保可持续，同时其独特的化学组成可能为氮掺杂碳量子点的性能优化提供新的可能性。具体而言，本研究将重点探讨不同浓度氮掺杂碳量子点对 Q235 碳钢腐蚀行为的影响规律，揭示其缓蚀作用机理，并优化出最佳缓蚀剂浓度。通过结合实验测试与理论分析，本研究期望为金属腐蚀防护领域提供一种新型绿色高效缓蚀剂的设计思路，同时推动碳量子点在功能性材料领域的应用拓展[5]。本研究的结果不仅有助于深化对碳量子点缓蚀性能的理解，也为解决实际工程问题提供了科学依据，具有重要的理论价值和实践意义。

2. 实验

2.1. N-CDs 制备与表征

首先将辣椒秸秆清洗并干燥，用剪刀剪成小段，然后碎粉，用分析天平称取 2 g 的辣椒秸秆粉末与 2 g 的尿素，1:1 混合加入 60 mL 的超纯水，超声 10 min 使其溶解混合，最后转移到 100 mL 的聚四氟乙烯反应釜中，然后将密封好的反应釜转移到马弗炉中在 180℃ 下保温 10 h。等加热结束，自然冷却后将液体全部转移至烧杯中，得到深棕色悬浊液。用漏斗过滤出大颗粒，得到的粗滤液再通过 0.22 μm 针式过滤器过滤，滤液用分子截留量为 1000 Da 的透析袋透析 24 h，透析完成后，将透析袋中的液体转移至小烧杯中冷藏一天，最后将冷冻后的液体在冷冻干燥箱中干燥除去水分，得到固体粉末状的氮掺杂碳量子点。最终产物呈棕黄色，具有良好的分散性与稳定性。具体的制备流程图如图 1 所示。

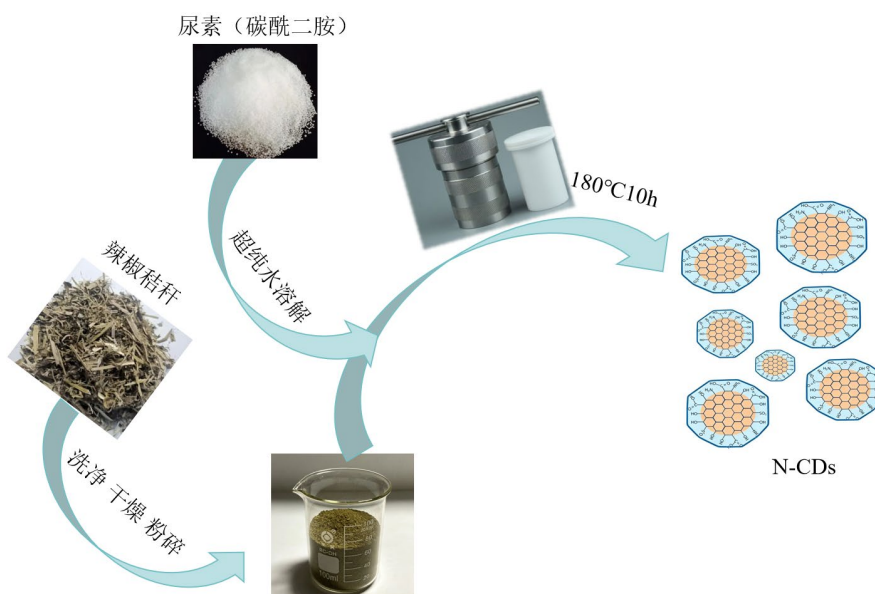


Figure 1. Schematic diagram of the preparation of nitrogen-doped carbon quantum dot corrosion inhibitor
图 1. 氮掺杂碳量子点缓蚀剂制备示意图

2.2. 电化学测试体系

本实验采用三电极体系进行电化学测试,其中工作电极为商用 Q235 碳钢,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂片电极。工作电极的预处理过程如下:首先使用 400、800、1000 和 2000 的碳化硅砂纸依次打磨,直至表面光滑无划痕;随后用超纯水和无水乙醇分别冲洗,最后用冷风吹干。处理后的工作电极有效暴露面积为 1 cm^2 。

将工作电极封装在腐蚀测试池上倒入相应溶液,在指定温度下进行电化学测试。电化学阻抗谱(EIS)测定在开路电位下进行,开路电位(OCP)的测试时间为 1800 s,交流激励信号峰值为 5 mV,频率范围为 $10^5 \sim 10^{-2} \text{ Hz}$,极化曲线扫描速率为 1 mV/s。所有电化学测试重复三次以确保可重复性。使用 Zsimpwin 软件拟合分析 EIS 曲线、等效电路图和 Related 电化学参数。缓蚀效率可以通过以下公式(1)计算:

$$\eta = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}}{i_{corr}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: i_{corr}^0 和 i_{corr} 为腐蚀电流密度。

2.3. 形貌测试

Q235 碳钢样品用 400~5000 的 SiC 砂纸依次进行水磨至光滑无细痕,而后用无水乙醇超声清洗 30 min,冷风干燥后分别放入 298 K、303 K、308 K 的空白溶液和实验溶液中浸泡。通过扫描电子显微镜观察合金表面的形貌。通过原子力显微镜测量合金表面粗糙度。通过 X 射线光电子能谱表征元素和键合信息。

2.4. 红外光谱测试

氮掺杂碳量子点的成分采用的是傅里叶变换红外光谱进行测试,其型号为 Nicolet iS50 红外光谱仪。红外测试的波数范围为 $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

3. 结果与讨论

3.1. 傅里叶红外光谱分析

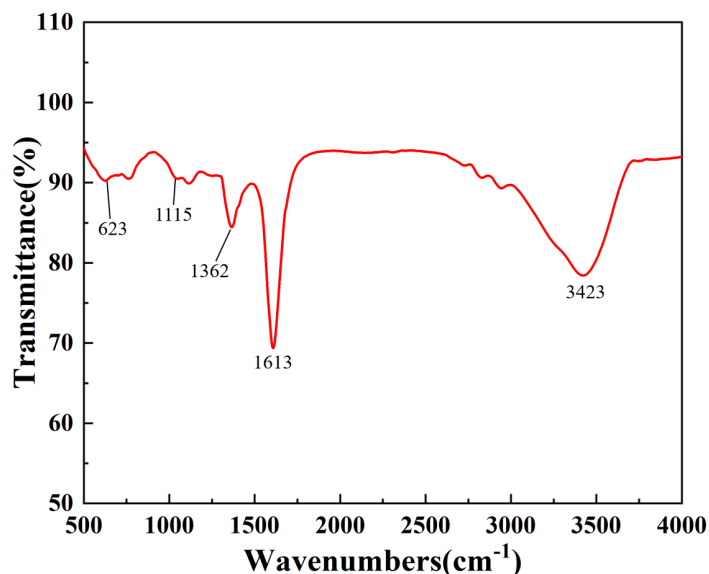


Figure 2. FT-IR spectrum of nitrogen-doped carbon quantum dots
图 2. 氮掺杂碳量子点的红外光谱图

图 2 呈现了氮掺杂碳量子点缓蚀剂的傅里叶红外光谱图,从图中可以看出:位于 3423 cm^{-1} 的宽强峰归属于-OH 与 N-H 的伸缩振动,表明氮元素成功掺杂且样品具有良好亲水性; 1613 cm^{-1} 处的强吸收峰对应 C=C 芳香骨架振动与 C=O 伸缩振动,证明样品具备类石墨化的碳基体结构; 1362 cm^{-1} 与 1115 cm^{-1} 处的特征峰分别验证了 C-N 键的形成及 C-O-C 醚键的存在,进一步确证了氮掺杂与表面含氧基团的丰富性;尤为关键的是, 623 cm^{-1} 处的特征峰对应 C-S 键或金属-杂原子相互作用,为 N-CDs 在酸性介质中通过化学吸附作用于 Q235 碳钢表面、形成致密缓蚀保护膜提供了直接的微观结构依据。整体而言,FTIR 分析清晰揭示了 N-CDs 的成功制备及其表面富含活性位点的结构特征,为其优异的缓蚀性能提供了坚实的结构支撑。

3.2. 开路电位

开路电位是评价缓蚀剂在金属表面吸附行为及腐蚀倾向的重要参数。本实验分别测试了空白及添加不同浓度(25、50、100、200 mg/L)氮掺杂碳量子点缓蚀剂时 Q235 碳钢的开路电位随时间变化曲线,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着浓度的增加, OCP 逐渐向正方向移动,表明金属表面的腐蚀倾向显著降低。缓蚀剂的加入有效抑制了金属表面的阴极析氢反应和阳极溶解过程。此外,开路电位随时间的变化曲线显示,所有含缓蚀剂的体系均能在较短时间内达到稳定状态,表明 N-CDs 在金属表面具有较强的吸附能力,能够快速形成保护膜。

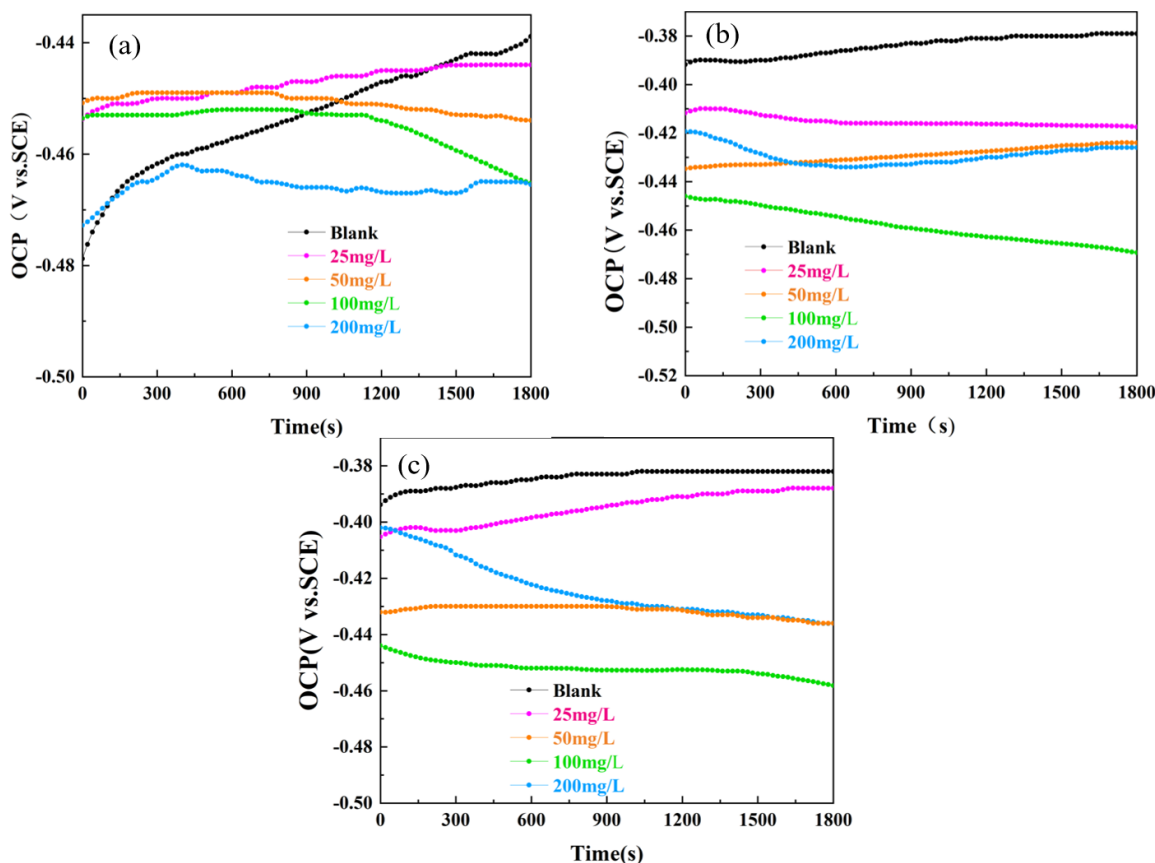


Figure 3. Open circuit potential plots of carbon steel electrodes immersed in acidic medium without and with nitrogen-doped carbon quantum dots at different temperatures: (a) 298 K; (b) 303 K; (c) 308 K

图 3. 碳钢电极浸泡在酸性介质中缺乏和含有氮掺杂碳量子点不同温度: (a) 298 K; (b) 303 K; (c) 308 K 时的开路电位图

3.3. Tafel 极化曲线分析

图 4 中(a)、(b)、(c)的塔菲尔极化曲线分别对应 298 K、303 K、308 K 下不同浓度(25、50、100、200 mg/L)该缓蚀剂对硫酸溶液中 Q235 碳钢的缓蚀作用；结果表明，该氮掺杂碳量子点为混合型缓蚀剂，可同时抑制碳钢的阳极溶解与阴极析氢反应，通过在金属表面形成吸附阻隔膜实现防腐，在 298 K 时缓蚀剂吸附充分，随浓度升高自腐蚀电流密度持续降低，200 mg/L 浓度下缓蚀效果最优，303 K 时温度升高导致缓蚀剂分子部分脱附，同浓度下缓蚀效率小幅下降，308 K 时高温大幅加速了碳钢腐蚀，低浓度缓蚀剂几乎失效，仅高浓度仍能维持一定缓蚀效果，整体呈现温度越高、缓蚀效率越低的规律，温度升高会破坏吸附平衡、降低吸附膜稳定性，是影响缓蚀性能的核心因素。从表 1 中也可以看到，加入 N-CDs 后，腐蚀电流密度 i_{corr} 与腐蚀速率均显著降低，且随 N-CDs 浓度升高，抑制效果逐渐增强。在同一温度下， i_{corr} 随 N-CDs 浓度增大而明显减小，表明 N-CDs 能够有效抑制电极表面的电化学反应，降低腐蚀动力学速率。腐蚀电位 E_{corr} 复杂变化是界面吸附、阴阳极反应动力学与温度效应共同作用的结果。常温下低浓度 N-CDs 优先吸附于阳极位点抑制铁溶解，使 E_{corr} 负移；浓度提高后形成完整吸附膜并同时抑制阴阳极反应，电位随之正移。温度升高会加剧分子热运动并削弱吸附稳定性，导致中低温区间低至中浓度下以阳极抑制为主、电位持续负移，仅在高浓度时才能形成致密膜层使电位回升；高温下低浓度缓蚀作用微弱，电位仅小幅波动，随浓度提升逐步转为混合型缓蚀，且温度越高越需要更高浓度才能实现稳定的协同缓蚀，与缓蚀效率变化规律一致，随 N-CDs 浓度升高而不断提高，在 200 mg/L 时达到最大值。

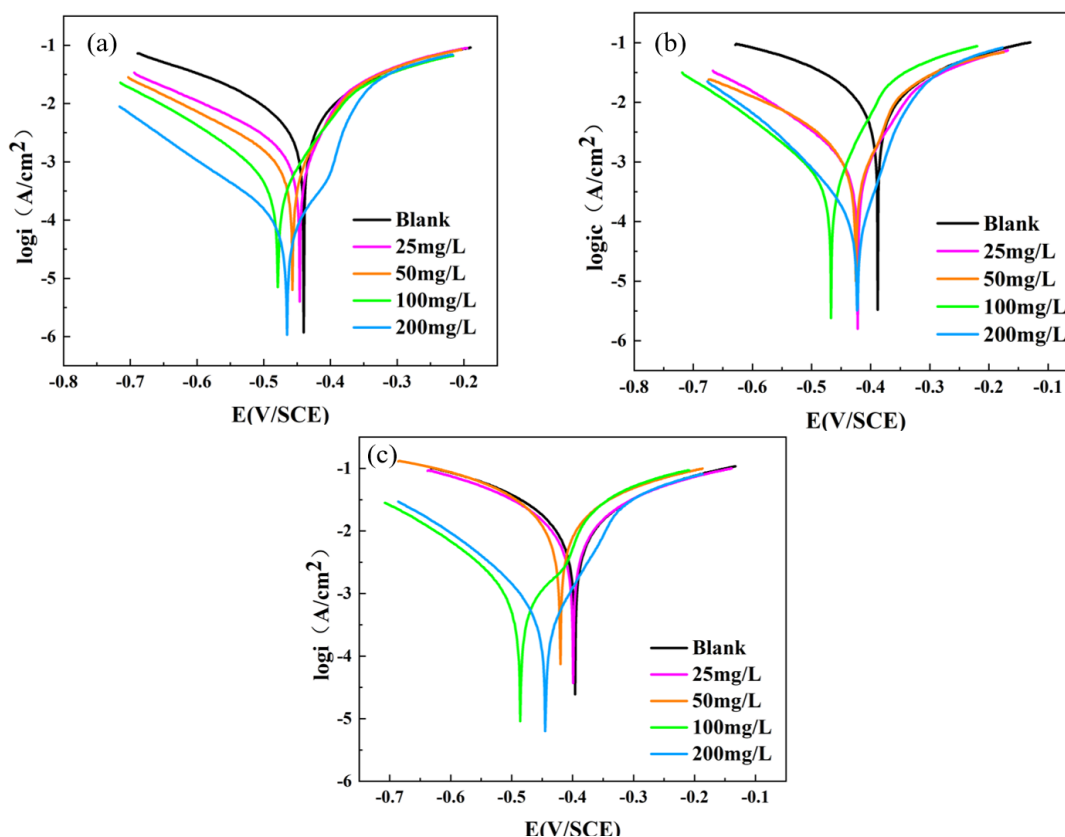


Figure 4. Tafel polarization curves of carbon steel electrodes immersed in acidic medium without and with nitrogen-doped carbon quantum dots at different temperatures: (a) 298 K; (b) 303 K; (c) 308 K

图 4. 碳钢电极浸泡在酸性介质中缺乏和含有氮掺杂碳量子点不同温度：(a) 298 K；(b) 303 K；(c) 308 K 时的 tafel 极化曲线图

Table 1. Polarization fitting parameters of N-CDs at different concentrations and temperatures
表 1. 不同温度下不同浓度 N-CDs 的极化拟合参数

T (K)	C (mg/L)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_{corr} (MPY)	β_c (mV/dec)	β_a (mV/dec)	η (%)
298	0	-454.4	2392.2	1093.2	-156.0	154.6	
	25	-482.6	1882.2	860.2	-166.3	134.7	21.3
	50	-473.5	1199.5	548.2	-157.8	96.8	49.9
	100	-476.3	454.9	207.9	-126.3	72.1	81.0
	200	-441.4	66.2	30.3	-131.5	37.7	97.2
303	0	-385.9	9162.2	4187.1	-179.8	178.0	
	25	-428.8	1786.5	816.4	-154.6	121.4	80.5
	50	-450.8	1016.2	464.4	-137.0	89.3	88.9
	100	-479.9	574.1	262.4	-125.2	74.1	93.7
	200	-442.0	203.2	92.9	-97.9	66.2	97.7
308	0	-398.2	9397.2	4294.5	-167.4	178.2	
	25	-402.7	8851.2	4044.9	-176.3	181.1	5.8
	50	-418.0	1235.9	564.8	-183.5	193.2	86.8
	100	-452.5	527.2	240.9	-131.8	51.6	94.3
	200	-427.9	375.8	171.7	-118.2	58.9	96.0

3.4. 电化学阻抗谱数据分析

图 5 中(a)、(b)、(c)分别对应 298 K、303 K、308 K 时的电化学阻抗谱图, 整体呈现出温度越高、碳钢腐蚀速率越快、阻抗弧直径(电荷转移电阻 R_{ct})越小的规律; 所有温度条件下, 缓蚀剂的防护效果均随浓度升高而提升, 200 mg/L 为最优浓度, 其阻抗弧直径远大于空白组, R_{ct} 显著增大, 说明氮掺杂碳量子点可通过表面含氮官能团在碳钢表面吸附形成致密防护膜, 有效抑制电荷转移与腐蚀反应; 温度升高会加速分子热运动、削弱缓蚀剂吸附稳定性, 导致 R_{ct} 下降、缓蚀效率衰减, 但高浓度缓蚀剂在 308 K 下仍能保持显著防护效果; 三组温度下的 Nyquist 图均为单一容抗弧, 表明该腐蚀过程由电荷转移步骤控制, 缓蚀剂的核心作用是抑制界面电荷转移。针对不同体系的阻抗数据, 采用了差异化的等效电路模型进行拟合: 空白 0.5 M H_2SO_4 溶液中 Q235 碳钢的腐蚀以均匀腐蚀为主, 过程简单, 因此采用简单等效电路模型, 可准确反映溶液电阻、双电层电容及电荷转移电阻的变化; 而添加不同浓度 N-CDs 缓蚀剂后, 缓蚀剂在碳钢表面形成吸附层, 腐蚀过程涉及多界面过程, 简单电路模型无法精准拟合, 因此采用 R(QR)(LR)等效电路模型, 可更准确地描述缓蚀剂吸附后体系的阻抗特征, 区分各界面过程的电阻与电容参数, 具体等效电路模型如图 6 所示。而结合表 2 的数据, 我们可以更加直观地看出: 空白试样的电荷转移电阻很小, 表明界面腐蚀反应极易发生。加入 N-CDs 后, 显著增大, 且随浓度升高持续上升, 说明 N-CDs 在金属表面形成了致密的吸附膜, 大幅提高了电荷转移阻力, 从而抑制腐蚀。双电层电容 C_{dl} 随 N-CDs 浓度增加而明显降低, 原因是 N-CDs 分子吸附在金属表面, 取代了部分溶剂水分子和离子, 使界面介电常数下降、膜层厚度增加, 进一步证明吸附防护膜的形成。在相同浓度下, 温度升高使 R_{ct} 减小、 C_{dl} 增大, 缓蚀效率略有下降, 说明高温不利于 N-CDs 的稳定吸附, 与极化曲线结论一致。CPE 参数 n 接近 1, 表明吸附后界面均匀性提高, 表面状态更规整。

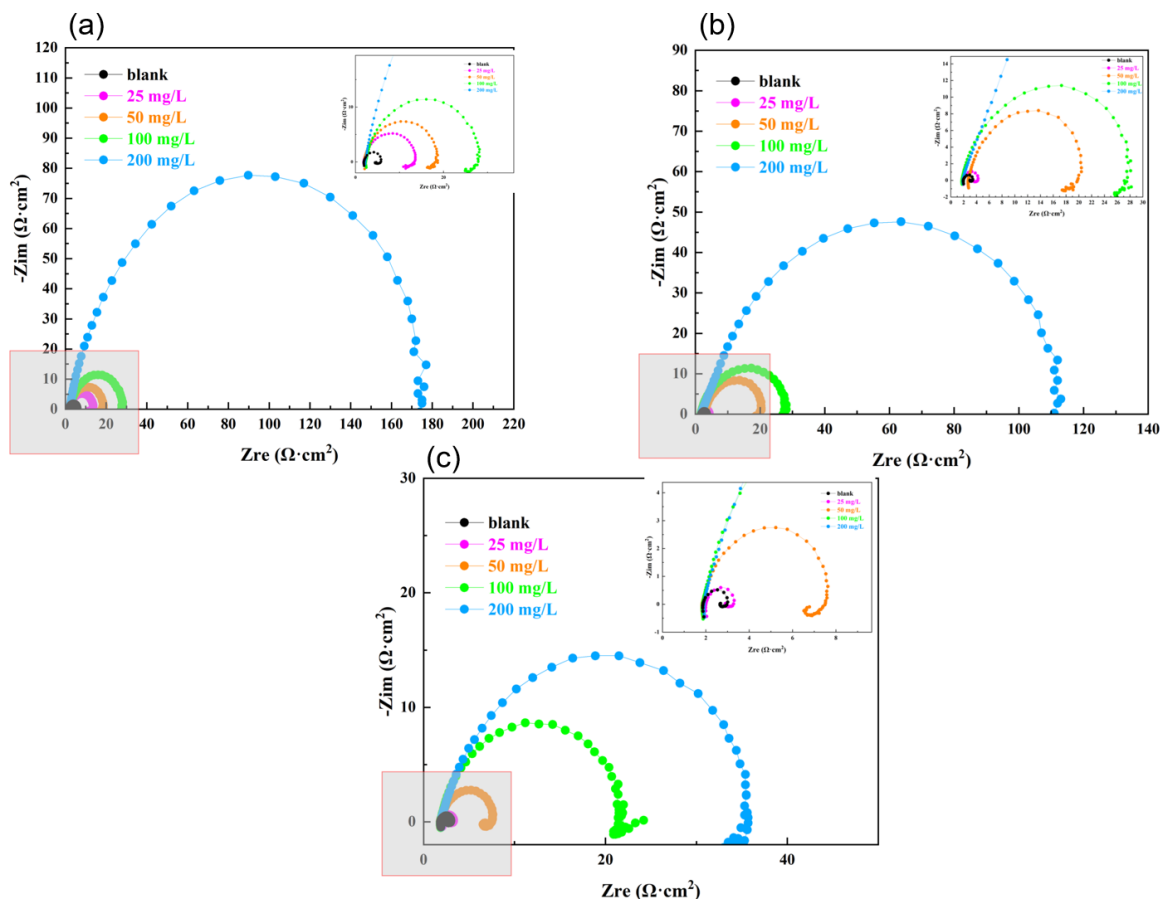


Figure 5. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) plots of carbon steel electrodes immersed in acidic medium without and with nitrogen-doped carbon quantum dots at different temperatures: (a) 298 K; (b) 303 K; (c) 308 K

图 5. 碳钢电极浸泡在酸性介质中缺乏和含有氮掺杂碳量子点不同温度：(a) 298 K；(b) 303 K；(c) 308 K 时的电化学阻抗谱图

Table 2. EIS fitting data of nitrogen-doped carbon quantum dots at different concentrations and temperatures

表 2. 不同温度下不同浓度氮掺杂碳量子点的 EIS 拟合数据

T (K)	G (mg·L ⁻¹)	Rs (Ω·cm ²)	CPE _t Y ₀ × 10 ⁻⁶ (Ω ⁻¹ ·s ⁿ ·cm ⁻²)	n	R _{ct} (Ω·cm ²)	C _{dl} (μF·cm ⁻²)	L (Ω·cm ²)	R _L (Ω·cm ²)	η (%)
298	Blank	1.999	1628	0.64	3.15	864.4	11	29.36	
	25	1.918	336.6	0.91	11.68	268.8	52.13	51.97	73.0
	50	2.044	260.3	0.92	16.53	203.9	128.6	108.2	80.9
	100	2.444	284.6	0.91	25.82	214.6	311.8	158.6	87.8
	200	2.224	149.9	0.88	181.8	73.7	1449	1456	98.3
303	Blank	1.91	1594	0.48	1.35	1148.8	1.576	10.56	
	25	1.983	3096	0.64	1.81	2222.3	1.184	6.927	25.0
	50	2.784	553.7	0.89	18.98	384.8	11.51	76.86	92.9
	100	1.765	359.3	0.87	27.1	219.4	123.5	198.4	95.0
	200	1.896	656.4	0.78	82.9	161.9	77.12	465.2	98.1

续表

	Blank	1.579	3761	0.32	1.41	1806.7	0.7844	7.103	
	25	1.902	1929	0.44	2.26	1434.5	1.705	8.14	37.6
308	50	1.878	1006	0.94	5.85	898.7	10.77	26.29	75.9
	100	1.884	606.1	0.88	20.73	400.8	64.14	421.4	93.2
	200	1.939	521.3	0.85	32.11	278.2	387.8	245.8	95.6

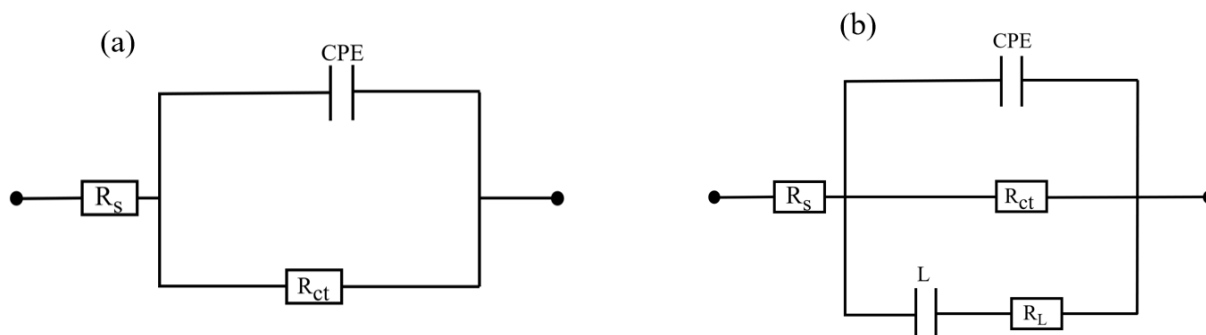


Figure 6. Equivalent circuits used for fitting electrochemical impedance spectroscopy: (a) 0.5 M H₂SO₄ solution; (b) 0.5 M H₂SO₄ solution containing 200 mg/L N-CDs

图 6. 电化学阻抗谱拟合所用的等效电路: (a) 0.5 M H₂SO₄ 溶液; (b) 含 200 mg/L N-CDs 的 0.5 M H₂SO₄ 溶液

3.5. 吸附等温模型分析

电化学数据表明, 298 K 时 200 mg/L N-CDs 在 H₂SO₄ 溶液中对碳钢具有良好的缓蚀效果, 通过电化学 EIS 数据验证 N-CDs 在碳钢表面的吸附行为, 选择 Langmuir 吸附等温模型进行拟合。一方面, Langmuir 模型的核心假设为吸附剂表面均匀、吸附位点能量一致、吸附分子间无相互作用且为单分子层吸附, 这与缓蚀剂在金属表面的典型吸附行为高度契合, N-CDs 分子在碳钢表面的吸附以占据活性位点为核心, 分子间相互作用可忽略, 符合单分子层吸附的特征; 另一方面, 该模型形式简单、线性拟合精度高, 是缓蚀剂吸附行为研究中应用最广泛、认可度最高的经典模型, 能够直观反映缓蚀剂浓度与表面覆盖度的定量关系, 为后续吸附热力学参数的计算提供可靠基础, 根据 Langmuir 等温线方程绘制吸附曲线。吸附曲线由公式(2)推导而来:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (2)$$

其中, C 为缓蚀剂浓度, θ 为表面覆盖度, K_{ads} 为饱和等温线常数。图 7 给出了该方程的 C 和 C/θ 的线性曲线。相关系数 R^2 为 0.998, 符合 Langmuir 吸附等温线。N-CDs 缓蚀剂的 K_{ads} 值为 75.7 L/g。反应热力学参数的标准吉布斯自由能 (ΔG_{ads}^0) 可以从 K_{ads} 中获得。 ΔG_{ads}^0 可由公式(3)得到:

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(1000K_{ads}) \quad (3)$$

其中, R 和 T 分别表示分子气体常数 ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 和吸附温度 (298 K)。计算得到 N-CDs 的 ΔG_{ads}^0 值为 -20.71 kJ/mol , 负值表明该反应是自发进行的。当 ΔG_{ads}^0 大于 -20 kJ/mol 时, 缓蚀剂的吸附作用为物理吸附; 当 ΔG_{ads}^0 小于 -40 kJ/mol 时, 缓蚀剂的吸附作用为化学吸附; 当 ΔG_{ads}^0 值落在 -20 和 -40 kJ/mol 之间, 则认为是化学和物理吸附的相互作用。在这种情况下, ΔG_{ads}^0 值说明 N-CDs 能自发吸附在碳钢表面, 且在碳钢表面的吸附作用既有物理吸附又有化学吸附。

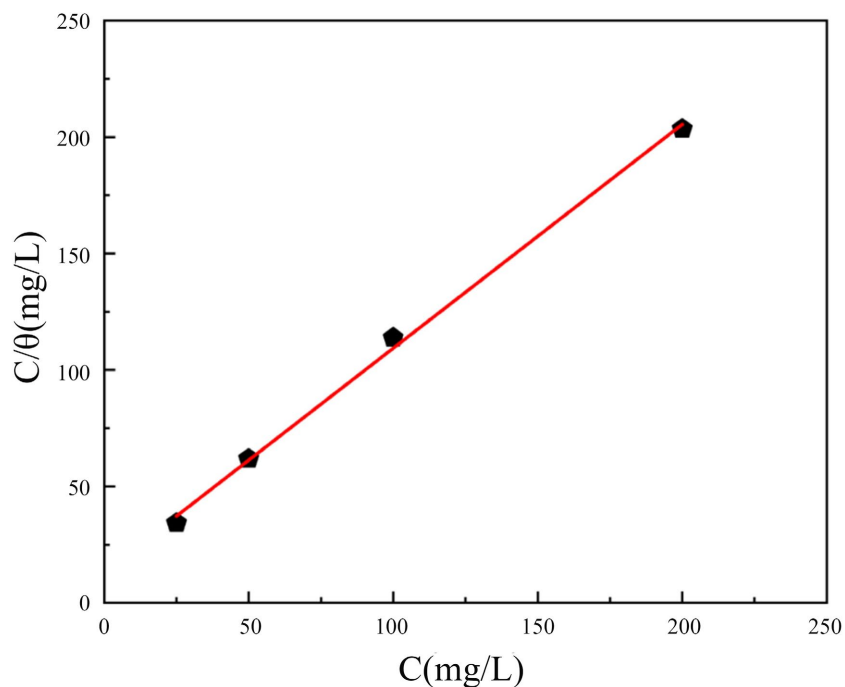


Figure 7. Thermodynamic adsorption isotherm of nitrogen-doped carbon quantum dots on the surface of Q235 carbon steel
图 7. 氮掺杂碳量子点在 Q235 碳钢表面的热力学吸附等温线

3.6. SEM 形貌分析

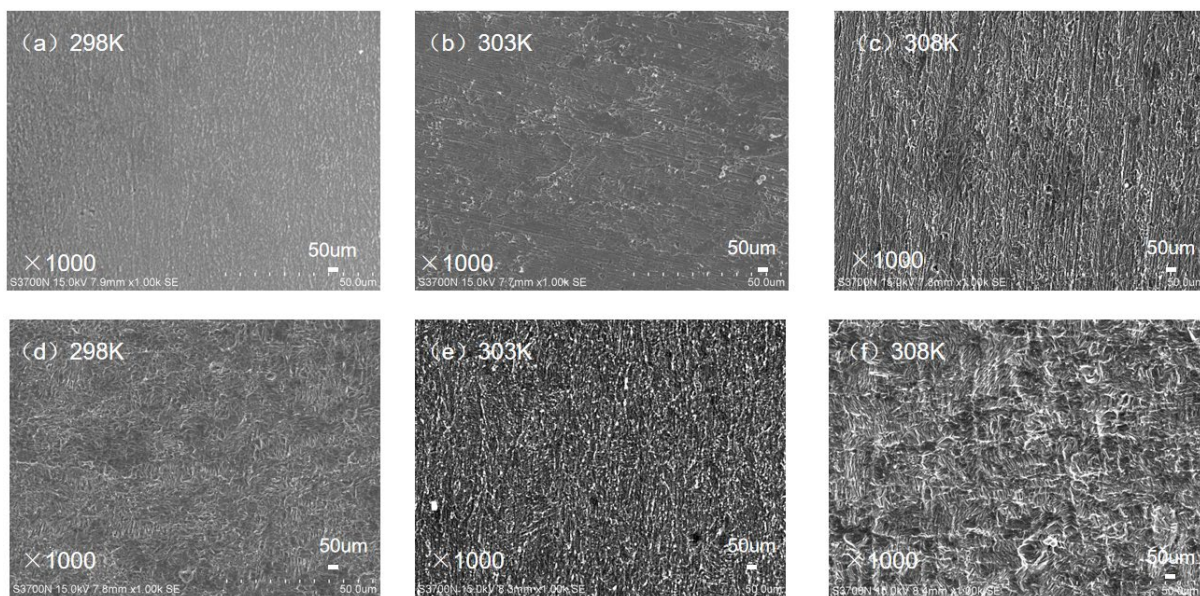


Figure 8. Surfaces of Q235 carbon steel under different experimental conditions
图 8. 不同实验环境下的 Q235 碳钢表面

图 8 呈现了氮掺杂碳量子点在 Q235 碳钢样品表面的在不同实验条件下的表面形貌图, (a)、(b)、(c) 组添加了氮掺杂碳量子点, (d)、(e)、(f) 组未添加缓蚀剂, 六组图对比, 可以看出: 添加缓蚀剂的实验组表面整体远更平整, 298 K 时仅保留原始加工纹理、无明显腐蚀痕迹, 303 K 时仅出现局部轻微腐蚀、加

工划痕仍清晰, 308 K 时虽腐蚀痕迹有所加剧但无大面积坑蚀与基体剥落, 说明 N-CDs 可在碳钢表面形成连续致密的吸附保护膜, 有效阻隔腐蚀介质与基体接触, 显著抑制腐蚀反应; 而未添加缓蚀剂的空白对照组腐蚀程度随温度升高呈指数级加剧, 298 K 即出现明显均匀腐蚀与粗糙腐蚀产物, 303 K 时原始纹理完全被致密腐蚀产物覆盖, 308 K 时更是出现严重坑蚀、基体剥落与絮状腐蚀产物, 基体被完全破坏; 同时可见, 无论有无缓蚀剂, 温度升高均会加剧腐蚀, 其中缓蚀剂组因膜层随温度升高出现一定脱附, 防护性能略有下降, 但在 308 K 下仍能提供显著防护, 充分证明氮掺杂碳量子点是 Q235 碳钢在酸性介质中高效的缓蚀剂, 可通过吸附成膜大幅改善碳钢的腐蚀形貌、抑制腐蚀发生。

4. 结论

本研究以辣椒秸秆为碳源、尿素为氮源, 采用水热法制备的氮掺杂碳量子点(N-CDs), 是适用于 Q235 碳钢在 0.5 M H₂SO₄ 溶液中的高效绿色缓蚀剂, 其表面富含含氧含氮官能团, 为缓蚀作用奠定结构基础。该缓蚀剂为混合型缓蚀剂, 缓蚀效率随浓度的升高显著提升, 200 mg/L 为最优浓度, 298 K 时该浓度下缓蚀效果最佳, 可通过在碳钢表面形成致密吸附膜, 阻断腐蚀介质与基体接触、提高电荷转移阻力, 同时抑制碳钢阳极溶解与阴极析氢反应。温度会显著影响其缓蚀性能, 高温会削弱吸附稳定性、降低缓蚀效率, 但高浓度 N-CDs 仍保有一定的温度适应性。298 K 时 N-CDs 在碳钢表面的吸附符合 Langmuir 单分子层吸附模型, 吸附能力优异, 且为自发进行的物理 - 化学混合吸附。SEM 形貌观察直观证实, N-CDs 可有效改善碳钢在酸性溶液中的腐蚀形貌, 大幅抑制腐蚀发生, 该研究也为农业废弃物高值化利用提供了新路径。

基金项目

重庆市大学生科技创新训练计划项目(S202511551032)。

参考文献

- [1] 王池嘉, 王子华, 刘书佩, 等. 新型碳纳米材料用于有机防腐涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 1-15.
- [2] 吴盼盼, 高立新, 吕战鹏, 等. 碳量子点在金属腐蚀防护中的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(11): 83-87.
- [3] 许旭敏, 顾立宏, 刘仁体, 等. 基于量子化学计算优化的氮掺杂碳量子点缓蚀剂制备及其缓蚀性能[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(1): 98-108.
- [4] 郭江力, 陈体军. 硫酸浓度对 Q235 钢棒材电化学腐蚀后电化学冷拉拔的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(9): 114-118.
- [5] 刘会媛, 柳鑫华, 石春杰, 等. 一种复配缓蚀剂对 Q235 碳钢的缓蚀性能及机理研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(9): 124-132.