

碳量子点疏水润湿调节剂制备与 解水锁性能研究

徐浩楠, 张太亮*, 郑存川, 刘仕林, 逢子羿
(西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500)

摘要:针对致密气藏在生产开发过程中易产生水锁现象,提出了采用改性碳量子点改变岩石润湿性实现致密气藏解除水锁研究。通过热解法制备了带羟基的碳量子点,在制备过程中加入经酰氯化的全氟辛酸单体对碳量子点进行表面修饰改性,得到可以作用于岩石表面改变润湿性的改性碳量子点。制备的碳量子点具有无定形结构的碳壳,通过 SEM、EDS 等表征分析对该改性碳量子点进行了系统的研究,将改性后的碳量子点与助剂复合得到超疏水润湿调节剂,经过润湿调节剂修饰过的岩石润湿角可达到 142.7°,自吸实验吸水率平均降低 65%~70%,岩心驱替水锁伤害率可降至 15.225%。

关键词:致密气藏;碳量子点;水锁;改性;润湿调节

中图分类号:TE357.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0291-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.054

Preparation of carbon quantum dots-based hydrophobic wetting regulator and study on its performance in unlocking water-lock

XU Hao-nan, ZHANG Tai-liang*, ZHENG Cun-chuan, LIU Shi-lin, PANG Zi-yi

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:In order to solve the water lock phenomenon in the production and development process of tight gas reservoir, a study is performed on the removal of water lock in tight gas reservoir through using modified carbon quantum dots to change the wettability of rock. Carbon quantum dots with hydroxyl groups are prepared via a pyrolysis method. During the preparation process, perfluorooctanoic acid monomers with acyl chloride are added to modify the surface of carbon quantum dots to obtain the modified carbon quantum dots that can act on the rock surface to change the wettability. The prepared carbon quantum dots, which have a carbon shell with an amorphous structure, are systematically studied by means of SEM, EDS and other characterization analysis. The modified carbon quantum dots are compounded with additives to obtain a superhydrophobic wetting regulator that can make the wetting angle of the rock reach 142.7° and the water absorption rate in self-priming experiment reduce by 65%~70% on average. The core displacement water lock damage rate can be reduced to 15.225%.

Key words:tight gas reservoir; carbon quantum dots; water lock; modification; wetting regulation

近年来,碳材料因出色的理化性能,如高比表面积、优异的电导性、良好的生物相容性及较强的光学特性,成为了科研和工程应用中的研究热点。碳量子点最早在 Xu 等^[1]研究中通过电弧放电法净化单壁碳纳米管时被意外发现,而当 Sun 等^[2]用激光刻蚀的方法制得 4~5 nm 的碳纳米材料并将其命名为碳量子点,标志着碳量子点研究的开端。从那时起,关于碳量子点的合成方法、结构特征、性能调控及其在不同领域的应用等方面的研究得到了广泛的开展^[3-8]。碳量子点(CDs)主要分为 2 大类制备方法:自上而下法和自下而上法。自上而下法通常包括电弧放电法、电化学法、化学氧化法、激光蚀刻法和机械球磨法等,这些方法的优点是操作简单且设备相

对成熟,但在粒径控制和产物均一性方面可能存在一定的挑战。自下而上法则是通过从小分子或原子逐渐聚合形成碳量子点,这类方法包括微波合成法、水热/溶剂热合成法、模板合成法、热解合成法和反胶束法等^[9-15]。

天然气藏在开发过程中,由于地层能量持续亏空,产量呈现递减趋势,最终导致采出程度较低^[16-18]。随着近井地带温度、压力变化,气田极易产生积液现象,同时气田渗透率低,流体或凝析液容易在岩屑裂缝中产生高毛管阻力,形成“液锁”现象^[19-21]。为了有效缓解这一问题,当前常用的润湿调节剂通常是表面活性剂溶液,通过降低界面张力,减弱毛细管对水的黏附力,但该技术在现场应用中

收稿日期:2025-01-10;修回日期:2025-03-10

基金项目:四川省重点研发项目(2021YFG0112)

作者简介:徐浩楠(2000-),男,硕士生;张太亮(1971-),男,博士,教授,研究方向为油气田化学,通讯联系人,199531010020@swpu.edu.cn。

的效果往往需要较长时间。现通过热解法制备全羟基的 CDs,再经改性处理得到枝接全氟链的 CDs-PF,该粒子通过吸附岩石水湿层在其表面形成致密薄膜达到解除水锁/液锁的作用,从而提高气井产量。

1 主要实验仪器、药品及方法

1.1 实验仪器及药品

全氟辛酸、无水葡萄糖、无水乙醇来自上海麦克林生化科技股份有限公司;二氯甲烷来自北京伊诺凯科技有限公司;氯化亚砷来自四川优思福生物科技有限公司;三乙醇胺来自上海赛瀚科技有限公司。

SDC-200S 接触角测量仪,高温滚子炉和鼓风干燥箱,真空冷冻干燥机,集热式恒温加热磁力搅拌器,多头磁力搅拌器,玻璃培养皿,带聚四氟乙烯内衬的反应釜,透析袋。

1.2 CDs-PF 的表征测试与性能评价方法

1.2.1 表征测试

对于 CDs-PF,通过傅里叶红外光谱测试研究其化学组成与官能团,透射电子显微镜(SEM)和能量色散 X 射线光谱分析(EDS)分析其形貌、粒径分布情况和元素分布,通过 X 射线衍射分析其结构特征。

1.2.2 性能评价方法

(1) 接触角测试

采用 SDC-200S 接触角测量仪,对接触角进行测试。

(2) 岩心自吸实验

①将待用实验岩心用清水浸泡 24 h,以洗净岩心,取出后放入烘箱烘干,冷却后称重,为 m_0 (g);②将 50 mL 的地层水置于丝口瓶中,使其浸泡住岩心的小半部分,瓶口使用保鲜膜和瓶盖进行密封;③将岩样悬挂在垂向自吸实验装置的天平下,如图 1 所示,记录岩样吸水前的重量。逐渐调节烧杯高度直到岩样在自吸液中浸泡长度为 2~3 mm,开始采

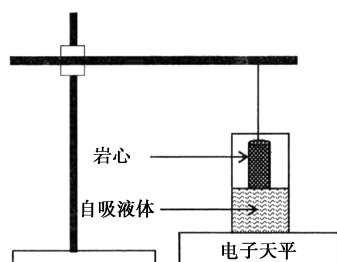


图 1 岩心自吸实验示意图

集数据;④岩心自吸一段时间后,取出岩心擦净,立即在称量纸上称重,岩心及吸水重量为 m_1 (g)。

岩心自吸地层水重:

$$m = m_1 - m_0 \quad (1)$$

(3) 毛细管实验

①将配制好的新型解锁剂吸入玻璃毛细管中,在 110℃ 环境下老化 24 h;②将经解锁剂处理且老化后的玻璃毛细管和未经解锁剂处理的玻璃毛细管插入用甲酚红染色的地层水中,记录毛细管中液柱高度。

(4) 岩心驱替实验

①岩心清洗,烘干,称重 m_1 ;②打围压,抽真空,正向气测渗透率 K_0 ;③注入地层水饱和岩心,称重 m_2 ,计算孔隙体积 V ;④地层温度下正向气测渗透率 K_1 ;⑤计算渗透率伤害率;⑥将岩心取出,清水浸泡 12 h 烘干;⑦注入 CDs-PF 分散液配制的的海水;⑧地层温度下正向气测渗透率 K_2 ;⑨计算渗透率恢复率。

储层伤害率计算:

$$\text{伤害率} = [(K_0 - K_1)/K_0] \times 100\% \quad (2)$$

储层恢复率计算:

$$\text{恢复率} = [(K_2 - K_1)/(K_0 - K_1)] \times 100\% \quad (3)$$

2 CDs-PF 的制备及结构表征

2.1 CDs-OH 的制备

通过文献[22]调研,确定前置体 CDs^[8-9]的最佳反应时间是 12 h,因此在制备时研究温度对产率的影响。

将 2.5 g 无水葡萄糖和 55 mL 无水乙醇加入聚四氟乙烯内衬的钢制高压釜中,并将高压釜放入烘箱中,调整反应温度,反应 12 h。待反应完成后得到深棕色液体,将得到的液体用滤纸过滤,再用聚四氟乙烯膜(孔径为 0.2 μm)过滤,紧接着转移至透析袋(3 000 Da)中,透析 3 d,期间不断更换纯水。最后,收集透析液,通过真空冷冻干燥机干燥得到深棕色粉末,即 CDs-OH。通过对不同温度下制备的碳点产率计算得到表 1。

表 1 不同温度下 CDs 产率

温度/℃	180	200	220	240
产率/%	5.54	15.71	17.42	—

由表 1,前置体 CDs-OH 产率在 180℃ 时最低,仅为 5.54%;在 200、220℃ 下合成的碳点产率分别为 15.71%、17.42%。结果表明,随着反应温度的升

高,碳前置体的碳化程度增强。当温度达到 240℃ 时,碳化过度,导致无法准确计算产量。因此,选择 220℃ 条件下制备 CDs-OH。

2.2 CDs-PF 的制备

CDs-PF 制备实验过程如图 2 所示,在烧瓶中加入 CH_2Cl_2 和全氟辛酸,待全氟辛酸溶解后,继续滴加 SOCl_2 的 CH_2Cl_2 溶液,在 45℃ 油浴下搅拌 12 h 后通过旋蒸除去 CH_2Cl_2 得到活化的全氟辛酸 (PFOF-OCl)。接着在低温 (2~8℃) 下,将 CH_2Cl_2 、CDs-OH 和 TEA 溶液恒压滴定到 CH_2Cl_2 和 PFOF-OCl 的溶液中,反应 24 h。随后,通过旋转蒸发除去 CH_2Cl_2 、三乙醇胺,并通过乙醚除去三乙醇胺盐酸盐。最后在无乙醇和纯水溶液 (1:1) 中透析 (3 500 Da) 3 d,真空冷冻干燥得到深棕色粉末,即 CDs-PF。

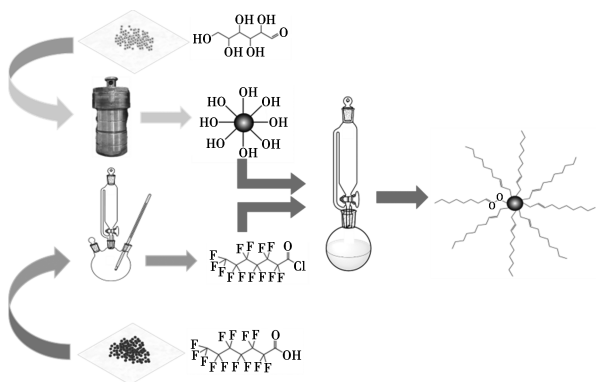
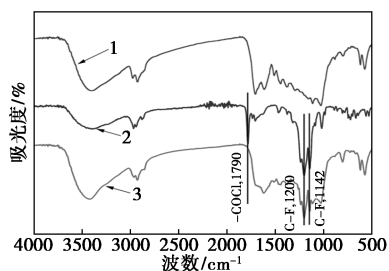


图 2 CDs-PF 合成路线

2.3 CDs-PF 结构表征

2.3.1 红外测试分析

由图 3 可知,碳量子点表面的结构及特征官能团可通过傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 进行表征,同时也对 PFOF-OCl 和 CDs 进行红外光谱分析。如图所示,PFOF-OCl 的红外光谱在 1790 cm^{-1} 处出现了一COCl 的特征吸收峰,证明该反应物已成功合成。CDs-PF 的红外光谱中,分别在 1200 、 1142 cm^{-1}



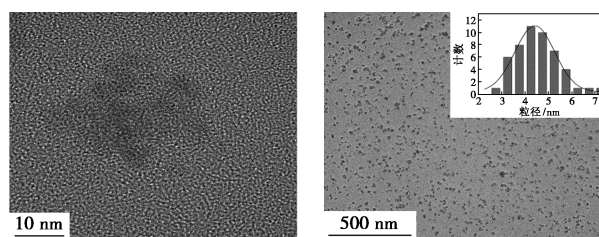
1—CDs;2—PFOF-OCl;3—CDs-PF

图 3 FT-IR 光谱图

处出现了 C—F 的吸收峰,同时 1790 cm^{-1} 处的特征峰消失,表明 PFOF-OCl 与碳点表面的羟基发生了亲核反应并脱去 HCl。综上所述,原始 CDs 碳点与 PFOF-OCl 成功反应,合成了 CDs-PF。

2.3.2 透射电镜测试分析及能谱分析

从图 4 中的透射电子显微镜 (TEM) 和高分辨透射电子显微镜 (HR-TEM) 图像,以及粒径分布图可以看出,碳量子点形貌呈近球形,分布均匀。对碳点的粒径进行统计后,插图显示其粒径大致分布在 $3.5\sim 5.5\text{ nm}$,平均粒径约为 4.5 nm 。进一步的高分辨率透射电子显微镜表征结果显示,HR-TEM 图像未见晶格条纹,表明该碳量子点为无定型结构。

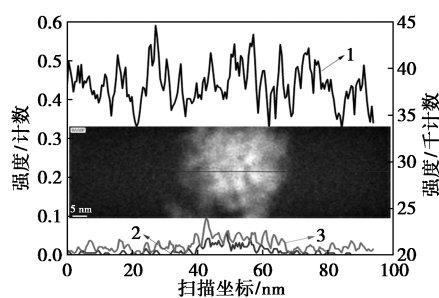


(a) SEM 图

(b) 粒径图

图 4 CDs-PF 的 SEM 图与粒径图

从图 5 中的 X 射线能谱 (EDS) 分析可以看出,碳量子点主要由碳 (45%) 和氟 (25%) 元素构成,表明该碳点主要由碳和氟 2 种元素组成。此外,在碳点的较密集区域还存在氯元素,推测是由于反应物过量导致未反应的中间产物残留。通过 EDS 测试结果进一步表明,CDs 与 PFOF-OCl 成功反应,合成了 CDs-PF。



1—C;2—Cl;3—F

图 5 CDs-PF 的 EDS 能谱分析图

2.3.3 XRD 测试分析

从图 6 中的碳点 XRD 图谱可以看出, $2\theta \approx 22^\circ$,与石墨 (002) 晶面接近,表明碳点具有无定型碳结构,且缺乏完整、连续的晶体结构,这与 HR-TEM 表征结果一致。在 XRD 谱图中,石墨的特征峰出现在 26.5° [23],对应 (002) 晶面,格子间距为 0.32 nm ,由于石墨具有较高的结晶度,该峰强度较大且尖锐。

然而,HR-TEM 结果表明合成的碳点为无定型结构,因此,XRD 图中(002)晶面峰强度较弱且较宽。此外,由于合成的碳点掺氮且结晶度较低,(002)晶面的格子间距增大。根据布拉格定律,格子间距的增大将导致 XRD 峰左移,因此,相较于石墨,碳点的 XRD 峰左移至 22°。

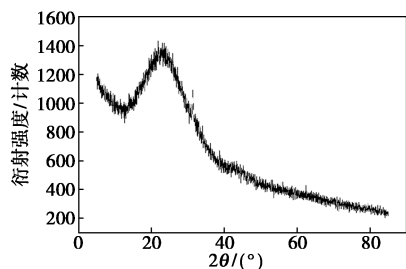


图 6 CDs-PF 的 XRD 图

3 超疏水润湿调节剂解水锁性能评价

将 CDs-PF 通过超声处理直接分散到 10 mL 的纯水溶剂中。然后加入其他助剂,如助排剂、防膨剂等得到超疏水润湿调节剂,CDs-PF 的具体质量分数为 10%。

3.1 接触角实验评价

将岩心片放入加入了不同浓度超疏水润湿调节剂的溶液中浸泡,实验条件为 110℃、12 h。

由图 7 可知,随着超疏水润湿调节剂浓度的增加,其对岩心界面修饰能力逐渐增强,接触角从 120°逐步上升。在质量分数为 0.9% 时,接触角达到最大值 148°,此时效果最佳。进一步增加浓度对接触角的影响较小,因此选择 0.9% 作为最佳质量分数。

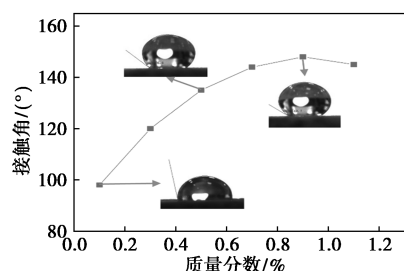


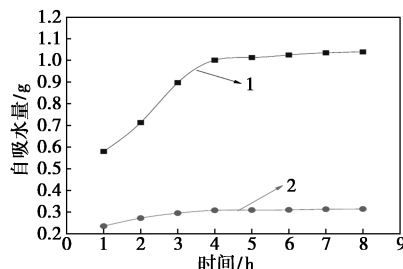
图 7 接触角实验图

3.2 岩心自吸实验评价

按照 2.3.2 中步骤进行实验,将同一块岩心于清水浸泡 24 h 并烘干后,置于润湿调节剂中浸泡,在地层温度 110℃ 下恒温一段时间后,重复 2.3.2 中②、③、④的步骤,记录实验数据,观察实验现象。

根据图 8 数据分析,处理后的岩心在 1~8 h 的

吸水过程中,吸水量降低率为 65%~70%。这表明润湿调节剂通过浸泡,岩心孔隙表面形成了疏水薄膜,改变了岩心的润湿性。



1—未处理;2—处理后

图 8 自吸实验结果

3.3 毛细管实验评价

根据表 2 所示,未经润湿调节剂处理时,毛细管的水上升高度为 10.1 mm;经过润湿调节剂处理后,毛细管插入液面相同位置时,上升高度降至 1.8 mm,液柱高度降低了 82.18%。这一结果表明,CDs-PF 能够与毛细管管壁发生作用,显著改变其界面润湿性。

表 2 毛细管液柱上升实验

毛细管处理方式	未处理	解水锁剂处理	液柱降低率/%
液柱高度/mm	10.1	1.8	82.18

3.4 岩心驱替实验评价

表 3、表 4 实验数据显示,岩心初始渗透率为 0.005 42 mD,注地层水后渗透率骤降至 0.002 495 mD,表明存在显著水锁伤害。注入润湿调节剂后渗透率恢复至 0.004 84 mD,平均伤害率降至 15.225%。研究表明,CDs-PF 复合体系通过调控流体-岩石界面润湿性,显著降低毛细管阻力,从而有效解除水锁效应并实现渗透率恢复。

表 3 岩心参数

岩心长度/cm	岩心直径/cm	孔隙度/%	孔隙体积/mL
4.935	2.45	4.7	1.093

表 4 岩心渗透率及参数

渗透率	P/MPa	Q/(mL·min ⁻¹)	K/mD	伤害率/%	平均伤害率/%	恢复率/%
K ₀	5.0	500	0.00542	—	—	—
K ₁	4.8	200	0.00235	56.64	53.970	—
K ₁ '	4.3	180	0.00264	51.29		
K ₂	2.9	160	0.00484	10.76	15.225	80.17
K ₂ '	2.9	135	0.00435	19.69		63.41

3.5 CDs-PF 改变润湿性机理研究

通过测量接触角,验证了改性碳量子点对岩心片界面润湿性的改变,结果如图 9 所示。CDs-PF 具有全氟疏水长链,表现出显著的疏水性。改性前岩心片的润湿角为 25° ,而改性后,岩心片的润湿角增大至 142.7° ,形成了超疏水界面。这表明,改性碳量子点 CDs-PF 可以有效改善岩心片的疏水性。

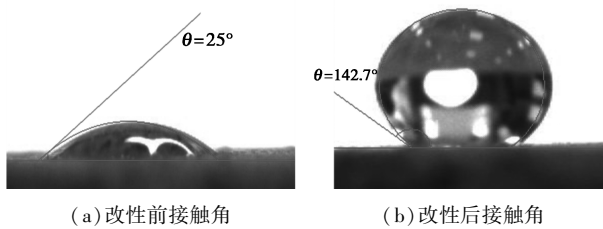


图 9 改性前后岩心片润湿性变化

如图 10 所示,加入 CDs-PF 分散液后,岩石表面的孔隙被 CDs-PF 覆盖并形成疏水膜,导致岩石界面的润湿角大于 90° 。根据毛管阻力公式(4), $\cos \theta$ 为负数时,毛管力方向发生改变,毛细管内部的压力不足以锁住液体,从而实现水锁的解除。

$$\Delta P = 2\gamma \cos \theta / R \quad (4)$$

式中, ΔP 为毛管阻力(压降),Pa 或 N/m^2 ; R 为毛细管半径, m; γ 为液体的表面张力, N/m ; θ 为接触角, $^\circ$ 。

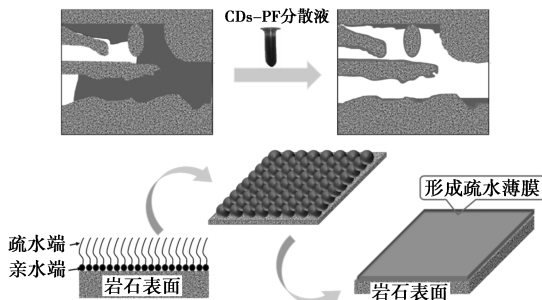


图 10 CDs-PF 解除水锁机理

4 结论

(1) 通过热解法制备羟基 CDs,再经改性处理得到全氟链的 CDs-PF,其性能优异,在质量分数为 0.9% 时效果最好,接触角达到 142.7° ;岩心自吸及毛细管实验中,岩心和毛细管处理前后,吸水量降低率在 65%~70%,毛管阻力降低 82.18%;岩心驱替实验中,岩心在润湿调节剂处理后岩心渗透率得到改善,平均伤害率降至 15.225%。

(2) 通过表征分析证明得到的产物为 CDs-PF,且形貌特征为无定形的碳点,粒径约为 4.5 nm,该

粒子通过吸附在岩石表面形成致密薄膜,达到解除水锁的作用。还可对处理后的岩心片进行耐冲刷实验,分析冲刷前后岩心片表面元素残留以探究该材料对解除水锁是否具有长效性。

参考文献

- [1] Xu X Y, Ray Robert, Gu Yunlong, *et al.* Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, (126):40.
- [2] Sun Y, Zhou B, Lin Y, *et al.* Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(24):7756-7757.
- [3] Ray S C, Saha A, Jana N R, *et al.* Fluorescent carbon nanoparticles: Synthesis, characterization, and bioimaging application [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(43):18546-18551.
- [4] Ding H, Zhang P, Wang T, *et al.* Nitrogen-doped carbon dots derived from polyvinyl pyrrolidone and their multicolor cell imaging [J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(20):9.
- [5] 刘禹杉,李伟,吴鹏,等.水热炭化制备碳量子点及其应用[J]. *化学进展*, 2018, 30(4):349-364.
- [6] Tang W, Wang B, Li J, *et al.* Facile pyrolysis synthesis of ionic liquid capped carbon dots and subsequent application as the water-based lubricant additives [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(2):1171-1183.
- [7] Wang B, Tan H, Zhang T, *et al.* Hydrothermal synthesis of N-doped carbon dots from an ethanolamine-ionic liquid gel to construct label-free multifunctional fluorescent probes for Hg^{2+} , Cu^{2+} and $S_2O_3^{2-}$ [J]. *Analyst*, 2019, 144(9):3013-3022.
- [8] Wang B, Ln Y, Tan H, *et al.* One-pot synthesis of N-doped carbon dots by pyrolyzing the gel composed of ethanolamine and 1-carboxyethyl-3-methylimidazolium chloride and their selective fluorescence sensing for Cr(VI) ions [J]. *Analyst*, 2018, 143(8):1906-1915.
- [9] Kryuchkova A, Ponomarets A, Suchilova V, *et al.* 3D printing of aligned silk fibroin microfibers covered with nitrogen-doped carbon dots for anti-counterfeiting [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 302:10.
- [10] Zhao P, Xia X, Zheng J, *et al.* A novel colorimetric and fluorometric dual-signal identification of crude baijiu based on La-CDs [J]. *Food Chemistry*, 2025, 464:11.
- [11] Yang J, Lin Y, Xu Z, *et al.* A novel TFNi pervaporation membrane with g-C₃N₄ quantum dots for high-efficiency IPA dehydration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 715:10.
- [12] Perumalveeramalai C, Zheng J, Bellam J B, *et al.* Solution-processed, ultrasensitive, high current density vertical phototransistor using porous carbon nanotube electrode [J]. *Appl Surf Science*, 2025, 680:9.
- [13] Zhang M, Dong X, Ji G, *et al.* Synergistic effect of 2D covalent organic frameworks confined 0D carbon quantum dots film: Toward molecularly imprinted cathodic photoelectrochemical platform for detection of tetracycline [J]. *Bionics Bioelectron*, 2025, 267:9.

(下转第 303 页)

- Springer, 2013.
- [5] Gallei E, Schwab E. Development of technical catalysts [J]. *Catalysis Today*, 1999, 51(3/4): 535-546.
- [6] Clause O, Dupraz C, Franck J. Continuing innovation in cat reforming [J]. *Oil, gas (Hamburg)*, 1998, 24.
- [7] Wu D, Song L, Zhang B, *et al.* Effect of the mechanical failure of catalyst pellets on the pressure drop of a reactor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(17): 3995-4004.
- [8] 刘闪闪, 丁其达, 郭涛, 等. 固定床催化剂成型工艺研究进展 [J]. *过程工程学报*, 2023, 23(4): 501-511.
- [9] 姜浩锡. 固体催化剂的模压成型过程和机械强度研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [10] 邹宗鹏. 己二酸二甲酯加氢制备 1,6-己二醇铜基催化剂模压成型与控制 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [11] ASTM Standards. ASTM D 6175—03(2019): Standard test method for radial crush strength of extruded catalyst and catalyst carrier particles [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [12] ASTM Standards. ASTM D 4179—22: Standard test method for single pellet crush strength of formed catalysts and catalyst carriers [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- [13] 全国肥料和土壤调理剂标准化技术委员会分子筛分技术委员会. HG/T 2783—2020 分子筛抗压碎力试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [14] 全国化学标准化技术委员会化工催化剂分技术委员会. HG/T 2782—2024 化工催化剂颗粒抗压碎力的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [15] Li Y, Li X, Chang L, *et al.* Understandings on the scattering property of the mechanical strength data of solid catalysts; A statistical analysis of iron-based high-temperature water-gas shift catalysts [J]. *Catalysis Today*, 1999, 51(1): 73-84.
- [16] Li Y, Wu D, Zhang J, *et al.* Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts [J]. *Powder Technology*, 2000, 113(1/2): 176-184.
- [17] Curitis R, Juszczak A. Analysis of strength data using two- and three-parameter Weibull models [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33: 1151-1157.
- [18] Trustrum K, Jayatilaka A D S. Applicability of Weibull analysis for brittle materials [J]. *Journal of Materials Science*, 1983, 18: 2765-2770.
- [19] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(3): 293-297.
- [20] 吴东方. 固体催化剂机械强度的基础研究 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [21] 苏玉蕾, 何丰, 李华波. 催化剂成型工艺及技术研究 [J]. *工业催化*, 2013, (4): 11-15.
- [22] Krupp H. Particle adhesion theory and experiment [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1967, 1(2): 111-239.
- [23] Ovsyannikova I A, Goldenberg G I, Korayabkina N A, *et al.* Study of structural and mechanical properties of granulated alumina supports using X-ray microprobes [J]. *Applied Catalysis*, 1989, 55(1): 75-80.
- [24] 杨柳. 硅改性氧化铝基质的合成与表征 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [25] 杨柳, 胡海强, 任靖, 等. 拟薄水铝石性质及其胶溶性能研究 [J]. *应用化工*, 2021, 50(5): 1311-1314, 1319.
- [26] 闫翔云, 季洪海, 蔡玉萍. 热处理对氧化铝载体微观结构及物化性质的影响研究 [J]. *集宁师范学院学报*, 2023, 45(3): 50-55.
- [27] 穆柏春, 孙旭东. 稀土对 Al_2O_3 陶瓷烧结温度、显微组织和力学性能的影响 [J]. *中国稀土学报*, 2002, (S1): 104-107.
- [28] 许崇海, 艾兴, 邓建新, 等. 稀土元素在氧、碳、硼化合物陶瓷材料中的应用研究 [J]. *硅酸盐通报*, 1998, (3): 64-68.
- [29] 田朝. 多级孔 ZSM-5 分子筛挤条成型及其机械强度研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [30] 皮秀娟, 盛毅. 氧化铝载体成型工艺条件研究 [J]. *石油炼制与化工*, 2014, 45(7): 47-51.
- [31] 蒙延双, 王达健. 拟薄水铝石胶溶过程规律及微结构分析 [J]. *中国稀土学报*, 2004, (z1): 373-377.
- [32] 熊飞, 王达健, 蒙延双, 等. 拟薄水铝石胶溶过程参数及胶团结构 [J]. *材料与冶金学报*, 2004, 3(3): 236-240.
- [33] 张喆, 黄绍东, 郭冰之, 等. Al_2O_3 载体的合成及孔径调变 [J]. *光谱实验室*, 2008, (4): 700-704.
- [34] Kirchnerova J, Klvana D, Chaouki J. Preparation and characterization of alumina and chromia cryogel-based catalysts [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2000, 196(2): 191-198.
- [35] 刘相东, 杨彬彬. 多孔介质干燥理论的回顾与展望 [J]. *中国农业大学学报*, 2005, (4): 81-92.
- [36] 杨勇. 催化剂载体氧化铝的制备工艺及改性研究 [D]. 昆明: 昆明贵金属研究所, 2011.
- [37] 李永丹, 王大祥, 张鉴. 煅烧过程中影响铁铬催化剂强度的因素 [J]. *化学工业与工程*, 1992, (3): 8-16.
- [38] 侯春阳. 氧化铝膜包覆活性炭载体的制备及其性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [39] 李建华, 刘海燕, 冯瑶, 等. 热处理对 $\gamma-Al_2O_3$ 和 $\theta-Al_2O_3$ 性质的影响 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2017, 33(5): 466-473.
- [40] 张立忠, 柴永明, 张潮, 等. 焙烧温度对氧化铝载体物化性能的影响 [J]. *当代化工*, 2015, 44(10): 2317-2320. ■

(上接第 295 页)

- [14] Hu J, Ma Y, Wu S. Synthesis and application of optically stable red fluorescent carbon dots for sensitive and selective detection of ceftazidime [J]. *Spectrochemistry Acta Part A-molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, 327: 7.
- [15] Hegazy M M, Ayad M M, Ghali M. UV and blue light cut-off filters using phosphorus doped carbon quantum dots extracted from raw egg yolk [J]. *Journal of Physics D-applied Physics*, 2025, 58(1): 12.
- [16] 蒋官澄, 王乐, 张朔, 等. 低渗特低渗油藏钻井液储层保护技术 [J]. *特种油气藏*, 2014, 21(1): 113-116.
- [17] 欧彪, 梁大川, 孙勇, 等. 低渗透气藏防水锁剂 FS 研究及效果评价 [J]. *钻采工艺*, 2014, 37(3): 98-100.
- [18] 付军亚. 低渗透油藏采油技术研究现状及前景 [J]. *石化技术*, 2019, 26(3): 212.
- [19] 治华. 低渗气藏反凝析污染及水锁伤害解除技术研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2024.
- [20] 蒲万芬, 侯帅, 沈超, 等. 低渗透砂岩储层解水锁剂优选及效果评价——以鄂尔多斯盆地 X 气田为例 [J/OL]. *大庆石油地质与开发*, 2024. DOI: 10.19597/J.ISSN.1000-3754.202402014.
- [21] 曹伟佳, 亓玉坤, 张晓芹, 等. 低渗致密气藏防水锁剂配方性能评价 [J]. *石油化工*, 2024, 53(7): 1006-1011.
- [22] 姚林萍. 聚合物修饰碳量子点基多功能润滑添加剂的制备及其性能研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [23] 林艳. 杂原子掺杂碳点的制备及其对金属离子的传感研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018. ■