

含氟耐高温型 CO₂ 发泡剂的制备与室内评价研究

尹相文¹, 田玉芹¹, 韦雪¹, 刘伟伟¹, 秋列维², 王晨^{3*}

(1. 中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000;

2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710000;

3. 陕西科技大学, 教育部轻化工助剂化学与技术重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘要:以含氟辛基磺酰氟和 4,4'-二羟基二苯醚为原料, 制备了氟碳双磺酸盐型 CO₂ 发泡剂。考察了发泡剂质量分数、发泡温度、压力和矿化度对体系泡沫性能的影响。结果表明, 当温度和矿化度升高, 体系起泡体积和半衰期均减小; 压强增大, 体系起泡体积和半衰期均增大。当发泡剂质量分数为 0.3% 时, 在 150℃、20 MPa 和 100 000 mg/L 矿化度下, 起泡体积、半衰期和综合指数分别为 667 mL、28 min 和 18 676 mL/min。室内封堵实验表明, 该发泡剂泡沫封堵效果优异, 阻力因子可达 32.5。

关键词:发泡剂; 耐高温; 综合指数; 阻力因子

中图分类号: TE357.46

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)12-0180-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.12.036

Preparation and indoor evaluation of fluorine-containing CO₂ foaming agent with resistance to high temperature

YIN Xiang-wen¹, TIAN Yu-qin¹, WEI Xue¹, LIU Wei-wei¹, QIU Lie-wei², WANG Chen^{3*}

(1. The Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Branch Company,

Dongying 257000, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University,

Xi'an 710000, China; 3. Key Laboratory of Auxiliary Chemistry & Technology for Light Chemical Industry of Ministry of Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Fluorocarbon bis-sulfonate type CO₂ foaming agent is prepared from perfluorooctyl sulfonyl fluoride and 4,4'-dihydroxy diphenyl ether. The influences of the concentration of foaming agent, foaming temperature, pressure and salinity on the foaming and stabilizing properties of the system are studied. The results show that both the bubbling volume and half-life decrease with the increase of temperature and salinity, but both increase with the increase of pressure. The foaming volume, half-life and composite index of the foaming agent are 667 mL, 28 min and 18,676 mL·min, respectively when the mass fraction of the foaming agent is 0.3%, the temperature is at 150℃, the pressure is 20 MPa and the salinity is 100 000 mg·L⁻¹, indicating good resistances against temperature and salt. The indoor evaluation shows that the foaming agent has excellent foam blocking effect, and its maximum resistance factor can reach 32.5.

Key words: foaming agent; resistance to temperature; composite index; resistance factor

目前, CO₂ 驱油已成为油藏开发中一种有效方法^[1-4]。CO₂ 驱可通过降低原油黏度来降低油水界面张力, 具有增渗和润湿反转效果, 大幅度提高原油采收率^[5-6]。但是在 CO₂ 驱油开发过程中, CO₂ 气窜是影响 CO₂ 注气效果的重要因素^[7-8]。

近年来, 泡沫驱可以有效控制气驱时气体流量和气窜现象^[9-10]。CO₂ 作为驱油剂和 CO₂ 地质埋存技术的结合, 使得 CO₂ 泡沫驱的研究和应用受到了国内外学者的广泛关注^[11-13]。陈楠等^[14]在 1~

9 MPa 和 30~90℃ 条件下, 研究了压力、温度对泡沫稳定性的影响。然而目前多数实验都是在常规条件下进行的, 现有技术无法满足当油藏温度超过 150℃ 的封窜需求, 故需研制耐高温在 150℃ 以上的 CO₂ 稳定发泡体系。

阴离子磺酸盐类表面活性剂因具有界面活性高、耐高温性能好、耐盐性较好, 非常适用于高温、高矿化度的地层条件^[15]。而含氟类表面活性剂一般具有降低体系界面张力等作用^[16]。笔者以含氟辛

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 中国石化股份公司科技攻关项目(P20070-2)

作者简介: 尹相文(1980-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为油气田开发工程和气驱工艺研究, yinxiangwen.slyt@sinopec.com; 王晨(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为油田化学品, 通讯联系人, sustwangchen@163.com。

基磺酰氟和 4,4'-二羟基二苯醚为原料,设计合成了氟碳磺酸盐阴离子型发泡剂。测试了产物溶液表、界面张力。研究了发泡剂质量分数及高温、高压和高盐下发泡剂的起泡和稳泡性能,并对发泡剂的泡沫封堵性能进行了室内评价。

1 实验试剂与仪器

含氟辛基磺酰氟、4,4'-二羟基二苯醚、氯磺酸,均为分析纯,上海麦克林生化科技有限公司生产。*N,N*-二甲基甲酰胺、三乙胺、碳酸氢钠,均为分析纯,天津市大茂化学试剂厂生产。

NMR 核磁共振波谱仪(400 MHz),布鲁克生产;全自动表面张力仪(DCAT21 型);旋转界面张力仪(TX-500 型);高温高压泡沫液性能测试装置,海安石油科研有限公司生产;BH-2 型岩心抽空加压饱和实验装置,海安石油科研有限公司生产。

2 实验部分

2.1 氟碳双磺酸盐 CO₂ 发泡剂的合成

氟碳双磺酸盐 CO₂ 发泡剂合成路线如图 1 所示。

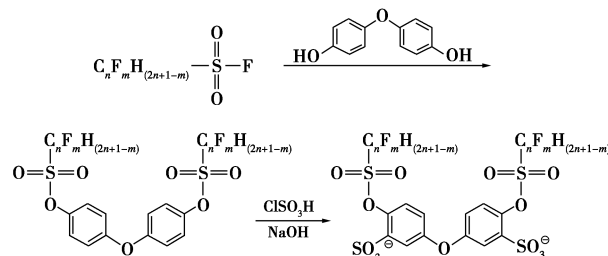


图 1 氟碳双磺酸盐 CO₂ 发泡剂的合成路线

具体制备过程分 2 步合成:

(1) 将 4,4'-二羟基二苯醚溶解于放置有 *N,N*-二甲基甲酰胺和三乙胺的三口烧瓶中,三乙胺作缚酸剂,其用量与含氟辛基磺酰氟等摩尔。升温至 75℃,缓慢滴加全氟改性剂,含氟辛基磺酰氟与 4,4'-二羟基二苯醚摩尔比为 2.13:1。滴加完毕后反应 7 h,测试体系的 pH,当体系环境呈现中性或弱碱性时,停止反应。反应结束后,用大量饱和碳酸氢钠溶液进行水洗,得到含氟化合物,产率约为 85%。

(2) 在装有回流冷凝器、温度计的三口烧瓶中加入一定质量的含氟化合物中间体,将氯磺酸用去离子水完全溶解后全部转移至三口烧瓶中,含氟化合物中间体与氯磺酸摩尔比为 1:2.09。加入相转移催化剂后,升温至 95℃,加热搅拌反应 9 h,测定

其磺化率。反应结束后,产物先用水溶解除去氯磺酸钠,再加入 95% 乙醇洗涤产物迅速从水中析出,分离提纯,再用石油醚洗涤,分离提纯,即为最终产物,目标产物收率约为 92%。

2.2 结构表征

利用核磁共振仪测定发泡剂的核磁共振氟谱图,以二甲基亚砜为溶剂,四甲基硅烷为内标物。

利用 DCAT21 型全自动表面张力仪在 25℃ 下测试发泡剂的表面张力,随着发泡剂质量分数的增大,表面张力快速下降并趋于稳定在 24 mN/m。

利用 TX-500 旋转界面张力仪对不同发泡剂体系的界面张力进行测试,随着发泡剂质量分数的增大,界面张力快速下降并趋于稳定在 0.005 mN/m。

2.3 起泡和稳泡性能测试

配制 0.3% 的发泡剂溶液,并置于高温高压泡沫液性能测试装置容器中。开启泡沫仪控温装置,设定实验温度。利用手摇泵将容器中的发泡剂溶液泵入泡沫仪,记录液面高度。向泡沫仪中通入 CO₂ 气体达到预定压力值。开启泡沫仪搅拌装置,以恒定转速(100 r/min)搅拌 3 min。关闭泡沫仪搅拌装置,开始计时并记录泡沫高度,记录泡沫高度随时间变化及析液半衰期。采用起泡体积、半衰期和综合指数(起泡体积×半衰期)表征发泡剂的性能。

2.4 泡沫封堵性能测试

利用 BH-2 型岩心抽空加压饱和实验装置对预处理后的天然岩心进行抽空饱和^[10],计算岩心孔隙度,而后进行渗透率测定。

采用水气交替式注入,设置起泡液注入速度为 0.1 mL/min,CO₂ 注入速度为 0.1 mL/min,气液比为 1:1,恒温箱温度设置为 150℃,段塞尺寸为 0.2 PV,记录实验过程中岩心两端压差,计算泡沫阻力因子 *RF*:

$$RF = P_2/P_1 \quad (1)$$

式中:*P*₁ 为水驱时岩心两端压差,MPa;*P*₂ 为泡沫驱岩心两端压差,MPa。

3 结果与分析

3.1 核磁氟谱分析

从 CO₂ 发泡剂的核磁氟谱可知,化学位移为 -80 ppm 处出现 -CF₃ 的吸收峰,在 -125 ppm 左右处出现了 -CF₂- 的吸收峰。由于磺酰基团的吸电子作用,联结磺酰基团的 -CF₂- 在 -113 ppm 处出现了吸收峰。综上可知,全氟辛基磺酰氟成功引入发泡剂分子结构中。

3.2 温度和压力对发泡剂溶液体系界面张力的影响

CO₂ 发泡剂溶液体系在不同温度下的界面张力随压力的变化情况如图 2 所示。

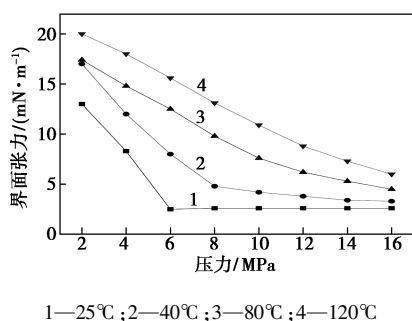


图 2 体系界面张力随压力和温度的变化关系

由图 2 可知,当温度低于 CO₂ 临界温度 (31.1℃) 时,随着压力的升高,发泡剂溶液间的界面张力急剧减小并趋于稳定;当温度高于 31.1℃ 时,随着压力的升高,发泡剂溶液间的界面张力一直减小,但是当压力高于 CO₂ 临界压力时,界面张力减小的幅度变弱。这是因为当 CO₂ 处于超临界态时,压力继续升高,CO₂ 扩散性变强,CO₂ 在溶液中的溶解度增幅变缓,气液相差异对界面张力的影响变弱,使得该阶段界面张力减小的幅度较小^[13]。

3.3 发泡剂质量分数对泡沫性能影响

用 10 万标准矿化水配制发泡剂溶液,测试不同质量分数的发泡剂的起泡体积和半衰期,并计算其综合指数,结果如图 3 所示。

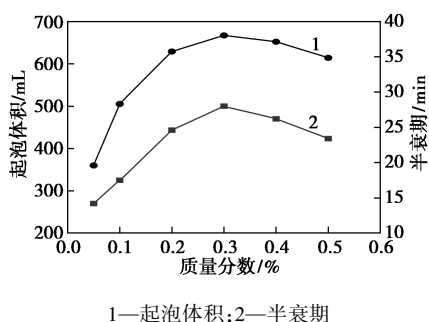


图 3 发泡剂质量分数对发泡剂泡沫性能的影响

由图 3 可知,随着发泡剂质量分数的增加,起泡体积、半衰期均先增大后减小,综合指数依次为 5 112.8、8 837.5、15 473.4、18 676、17 082.4 mL/min 和 14 367.6 mL/min。当发泡剂质量分数为 0.3% 时,起泡体积、半衰期和综合指数达到最大值,分别为 667 mL、28 min 和 18 676 mL/min。发泡剂质量分数增大,体系的表面张力降低,利于生成泡沫,发泡体积增加;当发泡剂质量分数过高时,表面活性剂

分子吸附于溶液表面,当液膜局部受冲击时,变薄的液膜不能恢复原厚度,液膜强度较小,泡沫稳定性也就较低,因此发泡剂半衰期减小。

3.4 温度对发泡剂泡沫性能影响

用 10 万标准矿化水配制质量分数为 0.3% 的发泡剂溶液,测试 20 MPa 时不同温度下发泡剂的起泡体积和半衰期,并计算其综合指数,结果如图 4 所示。

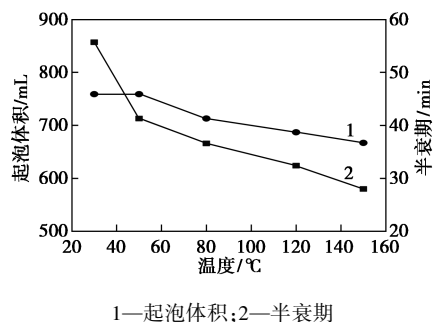


图 4 温度对发泡剂泡沫性能的影响

由图 4 可知,起泡剂的起泡体积和半衰期随着温度的升高而减少,综合指数依次为 42 276.3、31 346.7、26 095.8、22 258.8 mL/min 和 18 676.0 mL/min。在 150℃ 的高温下,发泡剂的起泡体积、半衰期和综合指数分别为 667 mL、28 min 和 18 676 mL/min。温度升高,可加快液膜中的液体蒸发,使泡沫液膜变薄,泡沫破裂速度加快;同时可加快分子运动,使泡沫内部的压力增加,加快泡沫之间聚并。因此升高温度,半衰期减小^[17]。但氟碳双磺酸盐发泡剂分子具有双子结构,黏弹性好,可以减缓液膜水分的蒸发速率,使得半衰期衰减较慢,在高温下稳泡性能良好。

3.5 压力对发泡剂泡沫性能影响

用 10 万标准矿化水配制质量分数为 0.3% 的发泡剂溶液,测试 150℃ 时不同压力下发泡剂的起泡体积和半衰期,并计算其综合指数,结果如图 5 所示。

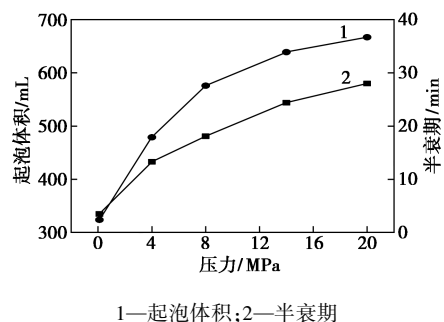


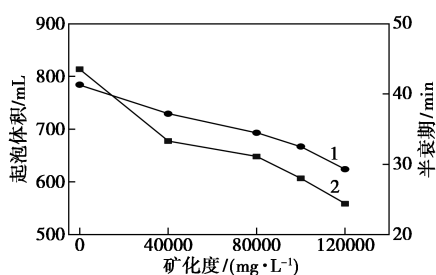
图 5 压力对发泡剂泡沫性能的影响

由图 5 可知,起泡体积和半衰期均随着压力增

加而增加,综合指数依次为 1 134.0、6 370.7、10 425.6、15 591.6 和 18 676.0 mL/min。在 20 MPa 的高压条件下,起泡体积、半衰期和综合指数分别达到最大值 667 mL、28 min 和 18 676 mL/min。当压力达到 8 MPa 时,CO₂ 已达到超临界状态,其与起泡剂溶液易混合,能够形成更致密的泡沫结构,泡沫性能更优。

3.6 矿化度对发泡剂泡沫性能影响

在 150℃、20 MPa 的高温高压条件下,测试不同矿化度下发泡剂的起泡体积和半衰期,并计算其综合指数,结果如图 6 所示。



1—起泡体积;2—半衰期

图 6 矿化度对发泡剂泡沫性能的影响

由图 6 可知,发泡剂的起泡体积和半衰期随着矿化度的增加而减小,综合指数依次为 34 104、24 275.7、21 552.3、18 676 mL/min 和 15 225.6 mL/min。当生成泡沫时,泡沫液膜的两表面吸附一层氟碳表面活性剂,而反离子(Na⁺、Ca²⁺)则分散于液膜的内部,液膜的两表面构成了表面双电层。随着体系中矿化度的增加,体系反离子作用浓度增大,双电层的扩散层会被反电荷离子所压缩,电位降低,液膜两表面的排斥作用减弱,液膜厚度变小,泡沫稳定性变差,即半衰期减小。

3.7 气液比对泡沫封堵性能的影响

在不同气液比下,测试了泡沫对 CO₂ 驱封堵性能的影响,计算了泡沫阻力因子,结果如表 1 所示。

表 1 气液比对泡沫阻力因子的影响

岩芯 编号	长度/ cm	孔隙 度/%	渗透率/ mD	气液比	水驱压 差/MPa	泡沫驱压 差/MPa	阻力 因子
1-1	8.65	13.8	6.02	1:3	0.06	0.75	12.5
1-2	8.50	14.1	6.18	1:2	0.04	0.86	21.5
1-3	8.58	14.3	6.34	1:1	0.06	1.95	32.5
1-4	8.60	14.5	6.58	2:1	0.06	1.68	28.0
1-5	8.53	14.7	6.92	3:1	0.05	1.04	20.8

由表 1 可知,随气液比的增加,阻力因子先升高后降低,在气液比为 1:1 时达到最大值,为 32.6。当

气体含量较少时,不能产生大量泡沫,从而阻力因子相对较少;当气体含量较多时,泡沫中气体含量较多,在多孔介质中运移时易发生挤压,导致泡沫易破裂,易发生气窜,泡沫的封堵效果变差。该驱替实验最佳气液比为 1:1。

3.8 注入速率对泡沫封堵性能的影响

在不同注入速度下,测试了泡沫对 CO₂ 驱封堵性能的影响,计算了泡沫阻力因子,结果如表 2 所示。

表 2 注入速率对泡沫阻力因子的影响

岩芯 编号	长度/ cm	孔隙 度/%	渗透率/ mD	注入速度/ (mL·min ⁻¹)	水驱 压差/ MPa	泡沫驱 压差/ MPa	阻力 因子
2-1	8.56	14.2	6.53	0.10	0.06	1.74	29.0
2-2	8.52	14.0	6.55	0.15	0.05	1.59	31.8
2-3	8.66	14.5	6.72	0.20	0.04	1.30	32.5
2-4	8.72	14.7	6.61	0.30	0.04	0.94	23.5
2-5	8.60	14.2	6.87	0.50	0.05	0.78	15.6

由表 2 可知,阻力因子随着注入速度增加先增加后减少。这是由于发泡剂起泡需要一定能量,当注入速度较低时不能够达到最大有效发泡的能量,产生泡沫较少;当注入速度较高时,产生泡沫较多,从而阻力因子较大;当注入速度过高,泡沫会因过高剪切力而变稀,从而导致阻力因子降低。最佳注入速度为 0.20 mL/min,阻力因子达到最大值 32.5。

4 结论

(1) 以含氟辛基磺酰氟和 4,4'-二羟基二苯醚为原料,制备了耐温耐盐型氟碳磺酸盐发泡剂。通过 ¹F-NMR 对其进行结构表征,确定成功合成了目标分子。

(2) 随着温度和矿化度的升高,发泡剂起泡体积和半衰期均减小,但半衰期衰减较慢,这是由于氟碳双磺酸盐分子本身具有黏弹性。在 150℃、20 MPa 和 100 000 矿化度下,发泡剂的起泡体积、半衰期和综合指数分别为 667 mL、28 min 和 18 676 mL/min,表明该发泡剂在高温高盐下起泡和稳泡性能良好。在气液比为 1:1 和注入速度为 0.20 mL/min 下,泡沫封堵效果最好,阻力因子最大可达 32.5,为 CO₂ 混相驱的顺利开展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 高慧梅,何应付,周锡生.注二氧化碳提高原油采收率技术研究进展[J].特种油气藏,2009,16(1):6-12.

(下转第 188 页)

其中 Pd 负载量为 0.5% 时催化活性最佳, 30℃ 下 2 h 转化率为 80.2%, 加入光照后转化率可达 99.6%。这是由于在可见光激发下, 促进了 g-C₃N₄ 表面电子和空穴的分离, 电子由 g-C₃N₄ 向 Pd NPs 迁移, 增加了 Pd NPs 表面电子云密度, 进而促进了 Pd 催化剂的加氢活性。

参考文献

- [1] Kim K D, Pokhrell S, Wang Z, *et al.* Tailoring high-performance Pd catalysts for chemoselective hydrogenation Reactions via optimizing the parameters of the double-flame spray pyrolysis [J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6(4): 2372-2381.
 - [2] 刘元勋, 杨汉, 陈倡, 等. 超分子水凝胶软反应器制备钯纳米催化剂的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(12): 97-100, 106.
 - [3] Santos J L, Megías S C, Ivanova S, *et al.* Functionalized biochars as supports for Pd/C catalysts for efficient hydrogen production from formic acid [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 282: 0926-3373.
 - [4] Kwon J S, Baek J H, Lee H S, *et al.* The effect of support pretreatment with ammonia on Pd/SiO₂ Catalyst [J]. *Materials Science Forum*, 2018, 922: 125-129.
 - [5] Byun M Y, Kim J S, Baek J H, *et al.* Liquid-phase hydrogenation of maleic acid over Pd/Al₂O₃ catalysts prepared via deposition-precipitation method [J]. *Energies*, 2019, 12(2): 284-291.
 - [6] 钟秦粤, 陈晶龙, 张文康, 等. Fe₃O₄/g-C₃N₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明 B 的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 95-99, 104.
 - [7] Chen X, Zhang L, Zhang B, *et al.* Highly selective hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over Pt nanoparticles supported on g-C₃N₄ nanosheets catalysts in water [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28558-28570.
 - [8] Gong Y T, Zhang P F, Xu X, *et al.* A novel catalyst Pd@omp-g-C₃N₄ for highly chemoselective hydrogenation of; Quinoline under mild conditions [J]. *Journal of Catalysis*, 2013, 297(1): 272-280.
 - [9] Xu X, Li Y, Gong Y, *et al.* Synthesis of palladium nanoparticles supported on mesoporous N-doped carbon and their catalytic ability for biofuel upgrade [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(41): 16987-16990.
 - [10] Chen Z P, Pronkin S, Feller T P, *et al.* Merging single-atom-dispersed silver and carbon nitride to a joint electronic system via copolymerization with silver tricyanomethanide [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(3): 3166-3175.
 - [11] Chou Y J, Ku H C, Cheng C C, *et al.* Palladium nanoparticles supported on nanosheet-like graphitic carbon nitride for catalytic transfer hydrogenation reaction [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2020, 10: 7883-7893.
 - [12] Kamiya K, Kamai R, Hashimoto K, *et al.* Platinum-modified covalent triazine frameworks hybridized with carbon nanoparticles as methanol-tolerant oxygen reduction electrocatalysts [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-6.
 - [13] Liu Z, Hou W, Pavaskar P, *et al.* Plasmon resonant enhancement of photocatalytic water splitting under visible illumination [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(3): 1111-1116.
 - [14] Wang P, Huang B, Dai Y, *et al.* Plasmonic photocatalysts: Harvesting visible light with noble metal nanoparticles [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, 14(28): 9813.
 - [15] 杨权成, 弓志明, 毛艳宇, 等. g-C₃N₄/煤系高岭土复合材料的制备及可见光催化氧化 As(III) 的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(12): 101-106.
 - [16] Su H, Zhang K X, Zhang B, *et al.* Activating cobalt nanoparticles via the Mott-Schottky effect in nitrogen-rich carbon shells for base-free aerobic oxidation of alcohols to esters [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(2): 811-818.
 - [17] Wang Y, Wang X, Markus A, *et al.* Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: From photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(1): 68-8.
 - [18] Ong W J, Tan L L, Yun H N, *et al.* Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: Are we a step closer to achieving sustainability? [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(12): 7159-7329. ■
- (上接第 183 页)
- [2] 何应付, 周锡生, 李敏, 等. 特低渗透油藏注 CO₂ 驱油注入方式研究 [J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(6): 131-134.
 - [3] 罗懿. 超低渗透油藏 CO₂ 驱提高采收率技术研究与应用 [J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2016, 33(2): 5-10.
 - [4] Zhang L, Pu C, Cui S, *et al.* Experimental study on a new type of water shutoff agent used in fractured low permeability reservoir [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2017, 139(1): 012907.1-012907.9.
 - [5] 柏明星, 贺凯, 段永伟, 等. CO₂ 在能源开发中的应用进展 [J]. *现代化工*, 2018, 38(1): 26-29, 31.
 - [6] 李德祥. CO₂ 驱过程中渗流和气窜机制及化学控制方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
 - [7] 杨昌华, 王庆, 董俊艳, 等. 高温高盐油藏 CO₂ 驱泡沫封堵体系研究与应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2012, 34(5): 95-97.
 - [8] 高云丛, 赵密福, 王建波, 等. 特低渗油藏 CO₂ 非混相驱生产特征与气窜规律 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 79-85.
 - [9] Le V Q, Nguyen Q P, Sanders A. A novel foam concept with CO₂ dissolved surfactants [C]. *SPE 113370*, 2008.
 - [10] 章杨, 张亮, 陈百炼, 等. 高温高压 CO₂ 泡沫性能评价及实验方法研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2014, 28(3): 535-541.
 - [11] 胡永乐, 郝明强, 陈国利, 等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践 [J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 716-727.
 - [12] Enick R M, Olsen D, Ammer J, *et al.* Mobility and conformance control for CO₂ EOR via thickeners, foams, and gels-A literature review of 40 years of research and pilot tests [R]. *SPE 154122*, 2012.
 - [13] Li D X, Ren S R, Zhang P F, *et al.* CO₂-sensitive and self-enhanced foams for mobility control during CO₂ injection for improved oil recovery and geo-storage [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 120: 113-120.
 - [14] 陈楠, 王治红, 刘友权, 等. 温度压力下起泡剂的起泡性和泡沫稳定性研究 [J]. *石油与天然气化工*, 2017, 46(5): 65-68.
 - [15] 周明, 赵金洲, 刘建勋, 等. 磺酸盐型 Gemini 表面活性剂合成研究进展 [J]. *应用化学*, 2011, 28(8): 855-863.
 - [16] 郭东红, 沈文敏, 杨晓鹏, 等. 耐酸耐高温泡沫剂的研制及在超稠油蒸汽吞吐上的应用 [J]. *现代化工*, 2020, 40(10): 175-177.
 - [17] 刘德生, 陈小榆, 周承富. 温度对泡沫稳定性的影响 [J]. *钻井液与完井液*, 2006, 23(4): 10-12, 86. ■