

环氧树脂乳液凝胶堵剂的制备与性能表征

岳鹏^{1*}, 石锐¹, 孙博闻¹, 杨彪^{1*}, 曾美婷², 黄雪莉²,
(1. 中石化西北油田分公司采油二厂, 新疆轮台 841604;
2. 新疆大学化学化工学院, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘要:为解决油田开采后期出现严重水窜且常规冻胶堵剂适用期短、强度受地层复杂环境影响较大等问题,以环氧树脂为主剂,经阴离子表面活性剂 tween20 和非离子表面活性剂 SDS 复配乳化制得性能稳定、易泵注的环氧乳液凝胶堵剂。结果表明,复配乳化剂能使环氧树脂完全乳化且乳化后乳液稳定性良好,环氧树脂的最佳乳化 HLB 值为 17~18,在 40℃、24 h 内的不稳定系数低于 2;乳化剂质量分数为 4%~5%时,含水率最高可达 50%左右,乳液黏度为 200 mPa·s 以下,乳液粒径分布均匀、易泵注、耐剪切,填砂管模拟封堵的封堵率在 90%以上。

关键词:环氧树脂;乳液;凝胶;封堵剂

中图分类号:TE358.3;TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)10-0177-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.10.036

Preparation and performance test of epoxy resin emulsion gel plugging agent

YUE Peng^{1*}, SHI Rui¹, SUN Bo-wen¹, YANG Biao^{1*}, ZENG Mei-ting², HUANG Xue-li²

(1.No.2 Oil Production Factory, Sinopec Northwest Oil Field Company, Luntai 841604, China;

2.College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract:In view of serious water shutoff phenomenon in the later stage of oilfield exploitation, conventional jelly channeling sealing agent has a short pot life and its strength is greatly affected by the complex environment of the stratum.A stable and easy-to-pump epoxy emulsion gel plugging agent is produced by emulsifying epoxy resin with anionic surfactant tween20 and nonionic surfactant SDS together.The results show that the compound emulsifier can completely emulsify epoxy resin and the emulsion obtained has a good stability.The best emulsification HLB value of epoxy resin is 17-18,the instability coefficient is less than 2 within 24 h at 40℃.If the addition amount of emulsifier is 4%-5%,the water content of emulsion will reach 50%,the viscosity is below 200 mPa·s,and the particle sizes distribute evenly.The emulsion is easy to pump and has high shear-resistant property.A blocking rate of over 90% can be achieved in sand-filled pipe simulated blocking test.

Key words:epoxy resin; emulsion; gel; plugging agent

随着油田开采进入中后期,油井出水已经成为目前油田提高采收率所面临的巨大难题^[1-2]。为了提高采收率,需要配套高质量、大规模的堵水和调剖作业,大幅度提高注入水和边底水的波及效果^[3-6]。环氧树脂型堵剂具有耐温、耐腐蚀性能,在地层高温下能够形成高强度三维体型结构的堵剂,对地层大孔道进行有效封窜^[7-8]。由于室温下环氧树脂堵剂黏度较高,只能溶于部分有机溶剂进行降黏,但大多有机溶剂毒性大,会对环境造成较大污染,且环氧树脂在注入地层过程中就已经开始反应形成致密体型

结构,易堵塞管道,造成施工事故,因此限制了环氧树脂堵剂在油田方面的应用^[9-10]。乳液堵剂在油田提高采收率方面具有很好的优势^[3,11]。环氧树脂乳液以水为外相,有效降低环氧树脂堵剂的黏度,注入后在地层水的作用下,乳液会在复杂环境下进行破裂,树脂与固化剂混合形成凝胶,从而对地层进行有效封堵。且环氧乳液注入难度系数低,能够很好地进入低渗透率地层,从而达到深度调堵的目的^[12]。

环氧树脂乳化法常见的有机机械乳化法、相反转法和化学改性法^[13-14]。机械乳化法制备的环氧树

收稿日期:2020-11-17;修回日期:2021-08-11

基金项目:国控示范工程下属 008 任务(2016ZX05053)

作者简介:岳鹏(1987-),男,本科,工程师,主要从事碳酸盐岩油藏分析及提高采收率工作,1318426790@qq.com;杨彪(1993-),男,硕士,技术人员,研究方向为油田化学堵剂体系,通讯联系人,1511609028@qq.com。

脂乳液粒径较大、稳定性较差;化学改性法制备乳液成本相对较高;而相反转法制备环氧树脂乳液只需选择合适的乳化剂,制备过程简单、稳定性好、乳化后树脂黏度低,在油田堵水方面具有很好的应用前景。

1 实验部分

1.1 实验药品

环氧树脂 E51,工业级,环氧当量为 182~185,无锡市长干化工有限公司生产;Tween20、Tween80,分析纯,西陇化工股份有限公司生产;壬基酚聚氧乙烯醚(NP-9),分析纯,艾科试剂生产;十二烷基硫酸钠(SDS),分析纯,上海展云化工有限公司生产;水性固化剂,实验室自制;蒸馏水;模拟地层水,矿化度为 22×10^4 mg/L。

1.2 实验仪器

多重光散射仪(稳定性分析),Turbiscan Lab expert 型,法国 Formulacion 公司生产;HAAKE MARS III 流变仪,德国 HAAKE 仪器公司生产;IKA 电动搅拌机,EUROSTAR60 型,德国 IKA 仪器公司生产;标准单槽式超声仪,AIX-C1002 型,艾柯森自动化设备有限公司生产;徕卡显微镜,Leica DM2500M 型,德国徕卡仪器公司生产;化学采油评价仪,自组建设备。

1.3 实验方法

1.3.1 环氧树脂乳液的制备

称取一定量的环氧树脂,向其中加入一定计量比的乳化剂,在 40°C 下恒温超声 10 min。然后利用搅拌速率为 2 000 r/min 的机械高速搅拌器进行搅拌,搅拌的同时将溶液加热升温至 70°C ,搅拌 10 min 后开始边搅拌边滴加 70°C 的蒸馏水,刚开始滴加水时形成 W/O 型乳液,滴加水至发生相反转时,乳液由 W/O 型向 O/W 型转变,这个点成为相反转点,此时停止滴加蒸馏水,搅拌 5 min 后再继续滴加剩下的蒸馏水,之后继续搅拌 30 min 得到稳定的环氧树脂乳液。

1.3.2 乳液稳定性分析

利用多重光散射乳液稳定性分析仪对环氧树脂乳液进行静态稳定性分析。将配置好的乳状液置于特定的透明玻璃瓶中,在设定的温度条件下,测定乳状液的透射光强(T)和背散射光强(BS)随时间的变化,从而分析乳状液内部微粒运动随时间的变化,通过乳状液内部微粒的变化得到不稳定指数 TSI 。

不稳定指数 TSI 是反应乳状液稳定性的一个定量指标,乳状液越稳定, TSI 数值越小;相反,乳状液越不稳定, TSI 数值越大。因此通过 TSI 可以定量地分析不同配方体系下乳状液稳定性能。

1.3.3 环氧乳液流变性能测定

利用 HAAKE MAX III 流变仪测试环氧树脂乳液黏度随剪切速率和温度的变化情况。剪切速率范围为 0~100 1/s,温度变化范围为 $40\sim 120^\circ\text{C}$ 。

1.3.4 环氧树脂乳液凝胶封堵性能测试

采用单管填砂管驱替实验装置,填砂管模型使用 80 目的石英砂,分 6 段进行填砂,每段加压 8 MPa。先对填砂管模型进行水相渗透率测定;然后将加入固化剂的环氧乳液凝胶注入填砂管,注入后将填砂管密封并加热至 90°C ,恒温老化 24 h 后,继续用水测封堵后渗透率,利用封堵前后渗透率计算封堵效率。

2 结果与讨论

2.1 HLB 值对乳液性能的影响

环氧树脂经表面活性剂乳化后形成 O/W 型乳液,采用单一乳化剂 Tween20、Tween80、壬基酚聚氧乙烯醚(NP-9)、十二烷基硫酸钠(SDS)制备环氧乳液发现,单一乳化剂不能使环氧树脂乳化或乳化后稳定性差,静置 24 h 后出现分层现象。根据油藏地层复杂条件的应用要求,选用耐温性能好的阴离子型乳化剂 SDS 和耐盐性能好的非离子型乳化剂 tween20 进行复配,得到不同 HLB 值的复配乳化剂,复配乳化剂乳化得到环氧树脂乳液的静置稳定性和用高矿化度地层水稀释稳定性如表 1 所示。

表 1 乳化剂 HLB 值对环氧乳液稳定性的影响

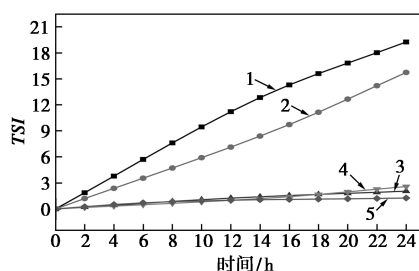
乳化剂 HLB	静置稳定性(24 h)	稀释稳定性
15	部分乳化	立刻分层
16	乳化、静置分层	立刻分层
17	乳化、静置不分层	稀释 25% 分层
18	乳化、静置不分层	稀释 38% 分层

由表 1 中可以看出,表面活性剂由 SDS 与 tween20 复配的乳化剂,当 HLB 值为 15~16 时,乳液部分乳化或乳化后稳定性差,静置 24 h 后分层,用高矿化度模拟地层水稀释后立刻破乳;当 HLB 值达到 17~18 时,环氧树脂完全乳化,乳化剂的亲水亲油性达到平衡,亲环氧基团与环氧树脂液滴结合,亲水基团与液滴外层水分子通过氢键缔合形成稳定的

环氧乳液。因此,环氧树脂乳化的最佳 *HLB* 值为 17~18。

2.2 乳化剂质量分数对环氧乳液性能的影响

利用 *HLB* 值为 17 的复配乳化剂对环氧树脂进行乳化,环氧树脂与水的质量比为 1:1,考察乳化剂质量分数对所制得的环氧乳液储存稳定性的影响,结果如图 1 所示。乳化剂质量分数对乳液黏度的影响如表 2 所示。为缩短实验时间,稳定性评价温度设置为 40℃,采用多重光散射仪对乳液进行程序扫描,扫描时间为 24 h,扫描频率为 1 次/2 h。



1—2%; 2—3%; 3—4%; 4—5%; 5—6%

图 1 乳化剂质量分数对乳液稳定性的影响

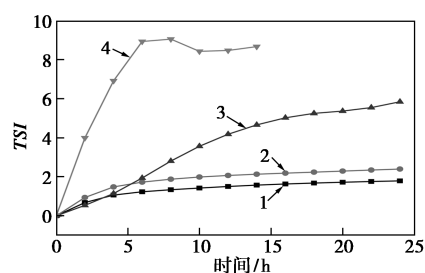
表 2 乳化剂质量分数对乳液黏度的影响

乳化剂质量分数/%	2	3	4	5	6
乳液黏度/(mPa·s)	698	600	234	985	1423

由图 1 和表 2 中可以看出,随着乳化剂质量分数的增加,环氧乳液的不稳定指数 *TSI* 减小,乳液趋于更稳定状态。当乳化剂质量分数为 2%~3%时,环氧乳液的不稳定指数 *TSI* 随着时间的延长而增加,说明乳化剂质量分数较小时,在发生相反转时乳化剂分子未能完全与水结合形成界面膜,环氧树脂容易发生团聚,乳液粒径变大并开始沉降,因此乳化剂质量分数较低时环氧乳液黏度也较大。当乳化剂质量分数增加至 4%以上时,乳液的不稳定指数 *TSI* < 3,环氧乳液稳定极好,40℃下能够稳定 24 h 而不发生沉降分层。当乳化剂质量分数为 4%时乳液黏度最低,为 230 mPa·s。继续增加乳化剂质量分数,由于乳化剂与水形成氢键,亲水性增加,粒子之间形成水化层,使得乳液粒子的运动性能下降,乳液黏度开始增大。

2.3 含水率对环氧乳液性能的影响

改变环氧树脂与水的质量比,利用多重光散射仪检测乳液稳定性能,不同含水率乳液的不稳定指数 *TSI* 如图 2 所示。



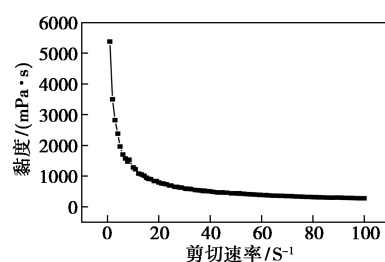
1—40%; 2—50%; 3—60%; 4—70%

图 2 含水率对乳液稳定性的影响

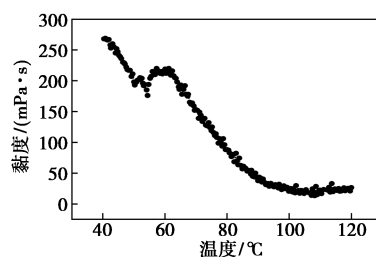
由图 2 可以看出,当乳液含水质量分数为 40%~50%时,乳液在 40℃下扫描 24 h,不稳定指数 *TSI* < 2,乳液具有很好的稳定性;当含水质量分数增加至 60%时,乳液中的粒子自由运动空间增大,乳液不稳定系数增大;当含水质量分数为 70%时,乳液不稳定指数快速增大,约 9 h 后完全沉降分层。因此,乳液含水质量分数为 50%时稳定性能较好,黏度适宜,符合应用要求,且能够有效降低环氧树脂乳液成本。

2.4 环氧乳液流变性能

采用含水率为 50%、乳化剂质量分数为 4%的环氧乳液,利用 HAAKE 流变仪考察环氧乳液的流变性能,结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,乳液黏度随剪切速率的增加而逐渐减小,体现出假塑性流体剪切变稀的特性,当剪切速率增加到 40 s⁻¹后,黏度降低到 500 mPa·s 以下,有助于现场施工,易于泵注。从图 3(b)中可以看出,乳液黏度



(a) 环氧乳液黏度随剪切速率的变化曲线



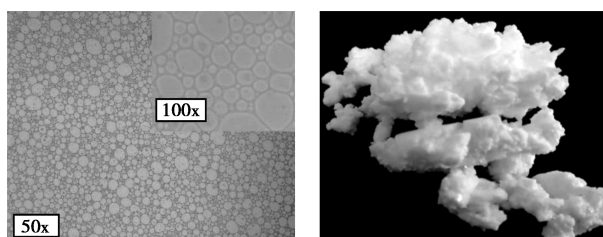
(b) 黏温曲线

图 3 环氧乳液黏度随剪切速率的变化曲线和黏温曲线

随温度的增加而整体降低。当温度从室温增加至 50℃ 时,由于少量水变成水蒸气,乳液黏度增加,黏度测量是在密闭空间,继续升温,检测环境达到恒压状态,因此 60℃ 以后黏度随温度的增加而逐渐下降。因此,环氧乳液流变性能良好,能够进入到地层深部,地层高温有助于进一步降黏。

2.5 环氧乳液微观结构

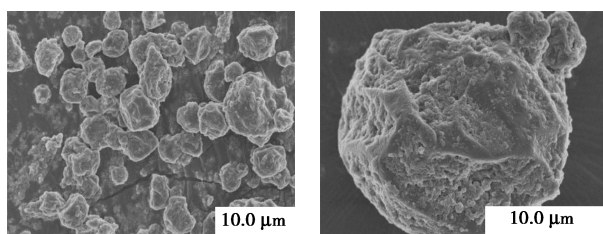
利用莱卡显微镜对含水 50%、乳化剂质量分数为 4% 的乳液微观结构进行观察,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,环氧乳液颗粒大小均一,环氧树脂均匀分散在水中,放大 100 倍后,环氧树脂颗粒外有明显水化层,形成水包油结构。以水为外相,有效降低了环氧树脂的黏度,提高其流动性能,并且水作为分割层,将树脂与引发剂分隔,避免树脂在注入过程中反应形成凝胶。当乳液堵剂进入地层后,环氧树脂与引发剂混合,在高温作用下开始发生聚合反应,聚合物将水反包裹形成白色凝胶,对高渗区进行有效封堵,形成凝胶。



(a) 50x (插图为 100x) (b) 凝胶

图 4 环氧乳液显微结构和凝胶

加入引发剂后,环氧乳液形成乳白色凝胶的扫描电镜(SEM)图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,环氧乳液凝胶颗粒微观表面有囊泡状结构,这是因为形成的乳液为水包油结构,在形成凝胶时,球形结构未被破坏,环氧树脂固化直接将部分水包裹在树脂中,乳液凝胶具有一定强度,既能对油水层进行有效封堵,也能有效防止后续环氧树脂封窜堵剂的漏失。



(a) 放大 3 000 倍 (b) 放大 5 000 倍

图 5 环氧树脂乳液凝胶微观结构

2.6 环氧乳液凝胶封堵性能

采用双液法进行填砂管封堵模拟实验。将分别

注入 0.5、1、1.5 PV (孔隙体积) 的环氧乳液凝胶填砂管于 110℃ 下养护 24 h,环氧乳液在高温下与引发剂反应成胶,对砂层孔隙进行封堵;然后以 2 mL/min 的模拟地层水连续水驱,测得封堵参数如表 3 所示。由表 3 中可以看出,当环氧乳液凝胶注入量为 0.5 PV 时,封堵率仅有 60.97%,突破压力仅为 0.57 MPa/m;当环氧乳液凝胶注入量增加至 1 PV 时,乳液凝胶的封堵率达到 90% 以上,突破压力增加至 5.13 MPa/m。

表 3 注入不同体积凝胶封堵性能测试

乳液凝胶 注入量/PV	水相渗透率/mD		突破压力梯度 $P_m/$ (MPa·m ⁻¹)	封堵率/ %
	堵前	堵后		
0.5	661.6	258.20	0.57	60.97
1.0	882.2	8.67	5.13	99.02
1.5	808.1	8.75	5.86	98.92

注:1 PV=1 孔隙体积。

3 结论

(1) 采用表面活性剂 tween20 与 SDS 复配的乳化剂乳化环氧树脂,形成 O/W 型环氧乳液堵剂,确定出环氧树脂乳化的最佳 HLB 值为 17~18,乳液具有很好的静态稳定性和稀释稳定性。

(2) 以乳液静态稳定性为主要指标,乳化剂质量分数为 4%~5%,乳液含水质量分数为 50% 时最为稳定,形成的环氧乳液粒径分散均匀,具有剪切变稀特性,易于泵注。

(3) 经单管驱替模型测得环氧乳液凝胶堵剂的封堵性能较好,封堵率达到 90% 以上,具有良好的封堵性能和耐冲刷性能。

参考文献

- [1] Wang L S. Potential of spontaneous emulsification flooding for enhancing oil recovery in high temperature and high salinity oil reservoir[J]. Journal of Dispersion Science & Technology, 2015, 36 (5): 660-669.
- [2] 白宝君,李宇乡,刘翔鹏.国内外化学堵水调剖技术综述[J].断块油气田,1998,(1):1-4.
- [3] Boxall John A, Koh Carolyn A, E Dendy Sloan, et al. Droplet size scaling of water-in-oil emulsions under turbulent flow[J]. Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2012, 28(1): 104-110.
- [4] Huang X B, Sun J S, Lv K H, et al. Application of core-shell structural acrylic resin/nano-SiO₂ composite in water based drilling fluid to plug shale pores[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2018, 55: 418-425.

(下转第 185 页)

能下降。综合以上分析,当 $m(\text{CS}):m(\text{TA})=10:4$ 、 $m(\text{CS}):m(\text{GA})=15:5$ 、反应温度为 40°C 时,复合材料的综合性能最佳。

3 结论

采用溶液-凝胶法制备的 TA/CS 薄膜相比纯 CS 膜具有类似的热分解能力和较高的力学性能。相比纯 CS 膜,TA/CS 膜具有更加光滑的表面以及较为优良的机械性能。当 $m(\text{CS}):m(\text{TA})=10:4$ 、 $m(\text{CS}):m(\text{GA})=15:1$ 、反应温度为 40°C 时,力学性能综合情况最好。通过 TA 和 GA 改性 CS,有效地降低了薄膜的溶胀度和溶失率,对提高 CS 在水处理方面的应用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Lou T, Yan X, Wang X. Chitosan coated polyacrylonitrile nanofibrous mat for dye adsorption[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 919-925.
- [2] Mohammad K, Ehsan S, Vahid V. Nanofiltration of dye solution using chitosan/poly(vinyl alcohol)/ZIF-8 thin film composite adsorptive membranes with PVDF membrane beneath as support[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116693.
- [3] Elwakeel K Z, Al-Bogami A S, Guibal E. 2-Mercaptobenzimidazole derivative of chitosan for silver sorption-Contribution of magnetite incorporation and sonication effects on enhanced metal recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 403: 126265.
- [4] Pereira A R, Fiamingo A, Pedro R, et al. Enhanced chitosan effects on cell membrane models made with lipid raft monolayers[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 193: 111017.
- [5] Govindasamy K, Dahlan N A, Janarthanan P, et al. Electrospun chitosan/polyethylene-oxide (PEO)/halloysites (HAL) membranes for bone regeneration applications[J]. Applied Clay Science, 2020, 190: 105601.
- [6] Jaisankar E, Pavithra M E, Krishna S, et al. Dual property of chitosan blended copolymer membranes: Antidiabetic drug release profile and antimicrobial assay[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 42-52.
- [7] 石甜甜, 孙家娣, 朱叶, 等. 壳聚糖单宁酸复合胶体粒子的制备及功能涂层研究[J]. 功能材料, 2017, 48(5): 5042-5047.
- [8] 肖玲, 贲伟伟. 壳聚糖固化单宁微球的制备及其吸附性能[J]. 精细化工, 2006, (8): 733-737.
- [9] 周友全, 唐婷范, 程昊, 等. 壳聚糖对蔗糖溶液中单宁酸的吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 12-15+21.
- [10] 杨振彦. 改性壳聚糖膜的制备及其对 Cr(VI) 和 Cu(II) 的吸附性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [11] Yan W, Shi M, Dong C, et al. Applications of tannic acid in membrane technologies: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 284: 102267.
- [12] Etter, Margaret C. Encoding and decoding hydrogen-bond patterns of organic compounds[J]. Accounts of Chemical Research, 1990, 23(30): 120-126.
- [13] Wang J, Zheng C, Ding S, et al. Behaviors and mechanisms of tannic acid adsorption on an amino-functionalized magnetic nano-adsorbent[J]. Desalination, 2011, 273(2-3): 285-291.
- [14] Kaczmarek B, Owczarek A, Nadolna K, et al. The film-forming properties of chitosan with tannic acid addition[J]. Materials Letters, 2019, 245(15): 22-24.
- [15] 喻弘, 李傲, 喻鹏. 戊二醛交联壳聚糖膜的制备[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 101-105.
- [16] Yang K, Zhu L, Zhao Y, et al. A novel method for removing heavy metals from composting system: The combination of functional bacteria and adsorbent materials[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122095.
- [17] Feng G R, Ma J C, Zhang X P, et al. Magnetic natural composite Fe₃O₄-chitosan@ bentonite for removal of heavy metals from acid mine drainage[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 538: 132-141.
- [18] Chen A H, Chen S M. Biosorption of azo dyes from aqueous solution by glutaraldehyde-crosslinked chitosans[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2-3): 1111-1121.
- [19] Wu Q Y, Ma L L, Long J X, et al. Depolymerization of organosolv lignin over silica-alumina catalysts[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2016, 29(4): 474-480.
- [20] Xu G, Chen S, Yan X, et al. Synthesis and hydrophilic performance of poly(lactic acid)-poly(ethylene glycol) block copolymers[J]. American Journal of Analytical Chemistry, 2016, 7(3): 299-305. ■
- [1] Lou T, Yan X, Wang X. Chitosan coated polyacrylonitrile nanofibrous mat for dye adsorption[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 919-925.
- [2] Mohammad K, Ehsan S, Vahid V. Nanofiltration of dye solution using chitosan/poly(vinyl alcohol)/ZIF-8 thin film composite adsorptive membranes with PVDF membrane beneath as support[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116693.
- [3] Elwakeel K Z, Al-Bogami A S, Guibal E. 2-Mercaptobenzimidazole derivative of chitosan for silver sorption-Contribution of magnetite incorporation and sonication effects on enhanced metal recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 403: 126265.
- [4] Pereira A R, Fiamingo A, Pedro R, et al. Enhanced chitosan effects on cell membrane models made with lipid raft monolayers[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 193: 111017.
- [5] Govindasamy K, Dahlan N A, Janarthanan P, et al. Electrospun chitosan/polyethylene-oxide (PEO)/halloysites (HAL) membranes for bone regeneration applications[J]. Applied Clay Science, 2020, 190: 105601.
- [6] Jaisankar E, Pavithra M E, Krishna S, et al. Dual property of chitosan blended copolymer membranes: Antidiabetic drug release profile and antimicrobial assay[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 42-52.
- [7] 石甜甜, 孙家娣, 朱叶, 等. 壳聚糖单宁酸复合胶体粒子的制备及功能涂层研究[J]. 功能材料, 2017, 48(5): 5042-5047.
- [8] 肖玲, 贲伟伟. 壳聚糖固化单宁微球的制备及其吸附性能[J]. 精细化工, 2006, (8): 733-737.
- [9] 周友全, 唐婷范, 程昊, 等. 壳聚糖对蔗糖溶液中单宁酸的吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 12-15+21.
- [10] 杨振彦. 改性壳聚糖膜的制备及其对 Cr(VI) 和 Cu(II) 的吸附性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [11] Yan W, Shi M, Dong C, et al. Applications of tannic acid in membrane technologies: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 284: 102267.
- [12] Etter, Margaret C. Encoding and decoding hydrogen-bond patterns of organic compounds[J]. Accounts of Chemical Research, 1990, 23(30): 120-126.
- [13] Wang J, Zheng C, Ding S, et al. Behaviors and mechanisms of tannic acid adsorption on an amino-functionalized magnetic nano-adsorbent[J]. Desalination, 2011, 273(2-3): 285-291.
- [14] Kaczmarek B, Owczarek A, Nadolna K, et al. The film-forming properties of chitosan with tannic acid addition[J]. Materials Letters, 2019, 245(15): 22-24.
- [15] 喻弘, 李傲, 喻鹏. 戊二醛交联壳聚糖膜的制备[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 101-105.
- [16] Yang K, Zhu L, Zhao Y, et al. A novel method for removing heavy metals from composting system: The combination of functional bacteria and adsorbent materials[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122095.
- [17] Feng G R, Ma J C, Zhang X P, et al. Magnetic natural composite Fe₃O₄-chitosan@ bentonite for removal of heavy metals from acid mine drainage[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 538: 132-141.
- [18] Chen A H, Chen S M. Biosorption of azo dyes from aqueous solution by glutaraldehyde-crosslinked chitosans[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2-3): 1111-1121.
- [19] Wu Q Y, Ma L L, Long J X, et al. Depolymerization of organosolv lignin over silica-alumina catalysts[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2016, 29(4): 474-480.
- [20] Xu G, Chen S, Yan X, et al. Synthesis and hydrophilic performance of poly(lactic acid)-poly(ethylene glycol) block copolymers[J]. American Journal of Analytical Chemistry, 2016, 7(3): 299-305. ■

(上接第 180 页)

- [5] Jeirani Z, Mohamedjan B, Sialli B, et al. Pre-prepared microemulsion flooding in enhanced oil recovery: A review[J]. Liquid Fuels Technology, 2014, 32(2): 180-193.
- [6] 计秉玉. 国内外油田提高采收率技术进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 111-117.
- [7] 陈大钧, 郭东旭, 邓英江, 等. 液态双酚 F 型环氧树脂在堵水中的作用探讨[J]. 精细石油化工进展, 2011, 12(1): 5-8.
- [8] 邓英江, 陈大钧, 李文涛, 等. 高温高盐油藏环氧树脂/酚醛树脂复合堵水调剖剂的性能研究[J]. 精细石油化工进展, 2010, 11(10): 19-22.
- [9] 刘江波, 白小佩, 王效明, 等. 注水井带压作业环氧树脂堵剂研

究[J]. 油田化学, 2014, 31(3): 353-356.

- [10] 刘音, 常青, 谭锐, 等. 水平井控水用液体胶塞的室内合成研究[J]. 石油化工应用, 2015, (8): 97-100.
- [11] 赵修太, 李宏, 王春彦. 环氧树脂水乳液固砂性能研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(4): 111-113.
- [12] 黎涛, 张宗谭, 周筱宁. 水乳环氧树脂对水硬性凝胶工作液性能的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 112-118.
- [13] 陈俊芳, 李素芳, 从洪云, 等. 水性环氧乳液的研制及性能研究[J]. 涂料工业, 2011, 41(8): 46-49.
- [14] 董满江, 毛小建, 张兆泉, 等. 水溶性环氧树脂体系的氧化锆凝胶浇注成型(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(7): 1000-1003. ■