

有机-无机复合交联凝胶 防 CO₂ 气窜体系评价研究

何龙¹, 谷峪^{2,3*}, 焦保雷¹, 张世岭², 何晓庆¹, 郭继香²

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011;
2. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102200;
3. 中国航油集团北京石油有限公司, 北京 100020)

摘要:针对非均质 CO₂ 气驱油藏存在的气窜问题, 研制出一种以聚丙烯酰胺为基液、M 型无机交联剂 (Cr³⁺ 无机类) 和 K 型有机交联剂 (酚醛树脂有机类) 复合使用的 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系。在温度为 115℃、矿化度 2×10⁴ mg/L 的实验条件下, 该体系具有良好的防止 CO₂ 气窜效果。结果表明, 有机-无机复合交联体系较传统单一交联剂体系具有更高的强度及热稳定性。该体系的弹性模量 *G'* 主要受 M 型无机交联剂加剂量影响, 其微观结构具有无机交联凝胶体系的强树状结构及有机交联体系的球状结构, 兼具 2 种体系优点。在 3 种不同渗透率人造岩心中, SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系可以有效降低 CO₂ 气窜, 封堵率均在 95% 以上, 突破压力梯度最高达 12.3 MPa/m。

关键词: CO₂ 驱; 防气窜; 聚合物凝胶; 有机-无机复合交联体系; 提高采收率

中图分类号: TE3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)03-0111-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.03.022

Evaluation study on compound cross-linking gel system for prevention of CO₂ channeling

HE Long¹, GU Yu^{2,3*}, JIAO Bao-lei¹, ZHANG Shi-ling², HE Xiao-qing¹, GUO Ji-xiang²

(1. Northwest Oilfield Branch Company, Sinopec Corp., Urumqi 830011, China;

2. The Unconventional Oil and Gas Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102200, China;

3. Beijing Oil Company Limited, China National Aviation Fuel Group, Beijing 100020, China)

Abstract: SDC-1 preventing CO₂ channeling system is developed with polyacrylamide as basic solution cross-linked by a metal cross-linker M and an organic cross-linker K to solve the problem of gas channeling in heterogeneous CO₂ flooding reservoirs. This system exhibits a good effect in preventing CO₂ from channeling at a salinity of 2×10⁴ mg·L⁻¹ and 115℃, and its thermal stability and gel strength are superior to those using a single cross-linker. The storage modulus of the system is mainly affected by the dosage of M-type cross-linker. Its microstructure has a strong dendritic structure of inorganic crosslinking gel system and spherical structure of organic crosslinking system. Among three kinds of artificial cores with different permeability, SDC-1 system can reduce CO₂ channeling effectively, with a blocking rate exceeding 95% and a breakthrough pressure as high as 12.3 MPa·m⁻¹.

Key words: CO₂ flooding; control of CO₂ channeling; polymer gels; organic-inorganic compound cross-linking system; enhanced oil recovery

1952 年第 1 个 CO₂ 驱专利《二氧化碳采油方法》在美国被授权, CO₂ 作为一种可以稳定供应、环境友好型气体受到全球范围内的重视, 促使 CO₂ 采油技术广泛应用于世界各大油田^[1-2]。随着 CO₂ 驱油技术的不断应用, 也随之带来了一些问题, 尤其是当油藏中存在非均质性时, 如裂缝、大孔道和高渗透带, CO₂ 驱油时会形成黏性指进^[2-5]。黏性指进将导致气窜现象, 降低 CO₂ 驱的波及效率, 从而导致产液量下降^[6]。因此, 采用防气窜技术防止 CO₂ 气窜, 提高其气驱效果, 在高非均质 CO₂ 气驱油藏中尤为重要。常用的防气窜技术有水气交替技术

(WAG)、二氧化碳增黏、二氧化碳泡沫、聚合物凝胶等^[2,7-9]。聚合物凝胶技术在调剖堵水等领域被广泛应用, 但由于传统采用单一交联剂的聚合物凝胶体系强度较低, 其在防 CO₂ 气窜方面的应用相对较少^[10]。笔者采用耐温耐盐聚丙烯酰胺^[11], 使用有机、无机及有机-无机复合交联剂提高凝胶强度及热稳定性, 制备防气窜体系以满足 CO₂ 封窜要求。

1 试剂与仪器

1.1 试剂

聚丙烯酰胺, 工业品, 河北聚丙烯酰胺恒奥化工

收稿日期: 2020-04-23; 修回日期: 2021-01-04

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05014-005-009); 国家自然科学基金(51674274)

作者简介: 何龙(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为油田化学, paladinglong@163.com; 谷峪(1993-), 女, 硕士, 研究方向为油田化学, 通讯联系人, super_valley@yeah.net。

生产;M型Cr³⁺类无机交联剂、K型酚醛树脂类有机交联剂、硫脲,分析纯,上海麦克林生化科技有限公司生产。

1.2 仪器

HAAKE MARS III型流变仪,德国HAAKE生产;JJ-1精密定时电动搅拌器,江苏省荣华仪器制造有限公司生产;FA2004电子天平,上海越平科学仪器有限公司生产;JA-X1250减压阀,徐州鸿业仪器仪表有限公司生产;DHG电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司生产;Quanta 200F场发射扫描电子显微镜,美国FEI公司生产;驱替装置,江苏华安科研仪器有限公司生产;二氧化碳钢瓶,北京华通精科气体化工有限公司生产;安瓿瓶等。

2 实验方法

2.1 防CO₂气窜体系的制备

用电子天平称取一定质量的聚丙烯酰胺固体粉末,加入到预先配置好的矿化度为 2.0×10^4 mg/L模拟地层水中(未特别说明,均采用该模拟地层水配制凝胶),充分搅拌2 h,将其密封并熟化24 h,所得产品为聚丙烯酰胺基液。取聚丙烯酰胺基液20 mL,加入 0.1×10^4 mg/L稳定剂,搅拌溶解后,再加入一定量的交联剂,搅拌均匀后,置于115℃烘箱内反应,待其成胶后所得样品为聚丙烯酰胺凝胶防CO₂气窜体系。

2.2 防CO₂气窜体系强度及热稳定性评价

采用国内外常用的目测代码法评价防CO₂气窜体系的强度及热稳定性^[12]。首先将配置好的20 mL防CO₂气窜体系基液注入安瓿瓶中并抽真空至无气泡状态,之后采用酒精喷灯烧断安瓿瓶颈密封,并将其放入115℃高温烘箱中。每隔一定时间将安瓿瓶取出并观察其倒置后所表现出的状态划分其凝胶强度(强度由弱到强划分为A到I,共计9个级别)。采用目测代码法不仅可以评价防CO₂气窜体系的成胶强度,还可通过长期加热后安瓿瓶内的凝胶的强度变化和分水情况评价体系的热稳定性。

2.3 防CO₂气窜体系黏弹性评价

根据《SY/T 6296—1997 采油用聚合物冻胶强度的测定—流变参数法》,采用HAAKE MARS III型流变仪测定防CO₂气窜体系黏弹性^[2,13]。

2.4 防CO₂气窜体系微观结构评价

扫描电子显微镜(SEM)被广泛用于评价聚丙烯酰胺凝胶体系的微观结构,通过该技术可以评价

交联剂类型对防CO₂气窜体系微观结构的影响。实验方法如下:①从安瓿瓶中取出少量待测凝胶,放入培养皿中,保持表面清洁;②将液氮倒入培养皿,急速冷却凝胶样品,并转移到冷冻真空干燥器内,抽真空24 h;③用手术刀将真空冷冻干燥后的样品切割成3 mm×3 mm左右的片状,通过导电胶将其固定在铜片座上,喷金后可放入扫描电镜中进行微观结构观察。

2.5 防CO₂气窜体系封堵率测定

通过测定人造岩心注入防CO₂气窜体系前后渗透率变化,计算评价体系的防气窜性能,具体实验方法如下:

(1)注入人造岩心约2个PV的防气窜体系基液(0.2 mL/min)。

(2)关闭夹持器出入口,在115℃高温下,使防气窜体系在人造岩心内充分成胶。

(3)通过测定注入压力并采用达西公式计算封堵后的人造岩心渗透率。

(4)通过封堵率公式计算封堵率:

$$S = [(K_1 - K_2)/K_1] \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_1 为人造岩心原渗透率, 10^{-3} μm²; K_2 为封堵后人造岩心渗透率, 10^{-3} μm²; S 为封堵率,%。

3 结果与分析

3.1 M型无机交联剂对成胶性能的影响

将一定质量的M型无机交联剂及 0.1×10^4 mg/L的稳定剂加入到质量浓度为 1×10^4 mg/L的聚丙烯酰胺基液中充分搅拌均匀,并从中量取20 mL注入到安瓿瓶中,抽真空密封后置于115℃烘箱内高温老化,观察其成胶强度并记录成胶时间,成胶效果如表1所示。

表1 不同质量浓度M型无机交联剂凝胶体系配方表

编号	质量浓度/($\times 10^4$ mg·L ⁻¹)		成胶时间/h	成胶强度代码	30 d成胶效果
	M型无机交联剂	硫脲			
1	0.1	0.1	6.5	F	B
2	0.2	0.1	5.7	F	C
3	0.3	0.1	5.2	G	E
4	0.4	0.1	5.0	G	分水
5	0.5	0.1	4.5	H	严重分水

由表1中可以看出,不同质量浓度的M型无机交联剂均可与聚丙烯酰胺形成凝胶,但随着M型无机交联剂质量浓度的增加,成胶强度随之升高,最高

可达H级,成胶时间由6.5 h降至4.5 h。老化30 d后,1~3号凝胶均未分水,但是体系强度有整体下滑趋势;4、5号凝胶均出现分水现象。由此可知,过高质量浓度的M型无机交联剂,凝胶高温多天后易出现分水现象。这是由于当M型无机交联剂质量浓度过高时,聚丙烯酰胺上带负电的羧基基团与M型无机交联剂的Cr³⁺离子形成过多的交联点,导致体系过度交联,降低了凝胶的锁水能力,长期高温后,凝胶体系易分水^[14-15]。

3.2 K型有机交联剂对成胶性能的影响

将一定质量的K型有机交联剂及0.1×10⁴ mg/L的稳定剂加入到质量浓度为1×10⁴ mg/L的聚丙烯酰胺基液中充分搅拌均匀,并从中量取20 mL注入到安瓿瓶中,抽真空密封后置于115℃烘箱内高温老化,观察其成胶强度并记录成胶时间,结果如表2所示。

表2 不同质量浓度K型有机交联剂凝胶体系配方表

编号	质量浓度/(×10 ⁴ mg·L ⁻¹)		成胶时间/h	成胶强度代码	30 d成胶效果
	K型有机交联剂	硫脲			
1	0.5	0.1	23	C	B
2	1.0	0.1	22	D	C
3	1.5	0.1	22	D	C
4	2.0	0.1	21	D	D
5	2.5	0.1	21	E	D

由表2中可以看出,聚丙烯酰胺可以与不同质量浓度的K型有机交联剂反应生成凝胶,与M型无机交联剂不同的是,其成胶强度均在D级左右,相对较弱。但是该体系的成胶时间相对更长,约为22 h左右。与M型无机交联剂反应不同的是,将凝胶置于115℃高温老化30 d后,体系并未出现分水现象,但是体系强度下降。这是由于K型有机交联剂是通过脱水缩合与聚丙烯酰胺形成共价键,相对于无机交联剂所形成的配位键,共价键具有更好的稳定性,从而使凝胶体系具有更好的热稳定性。但是该体系强度相对较低,且长时间高温老化后强度进一步下降,不适宜长期用于CO₂封窜^[16]。












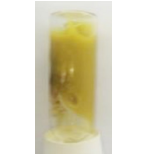
3.3 M+K型复合交联剂对比对成胶性能的影响

选用M型无机交联剂和K型有机交联剂进行有机-无机复合交联实验,并对2种交联剂质量浓度配比进行筛选。按表3所示配方配制凝胶,将溶液搅拌均匀后注入到安瓿瓶中,置于115℃烘箱内高温老化,观察其成胶强度和成胶时间,结果如表4所示。

表3 不同质量浓度M+K型复合交联剂凝胶配方表

编号	质量浓度/(×10 ⁴ mg·L ⁻¹)			成胶强度代码	成胶时间/h
	K型有机交联剂	M型无机交联剂	硫脲		
1	1.0	0.1	0.1	G	14
2	1.0	0.2	0.1	G	14
3	1.0	0.5	0.1	H	13
4	2.0	0.1	0.1	G	13
5	2.0	0.2	0.1	H	12
6	2.0	0.5	0.1	H	11

表4 M+K型复合交联剂加剂量对成胶效果的影响

编号	成胶效果	90 d后效果	编号	成胶效果	90 d后效果
1			4		
2			5		
3			6		

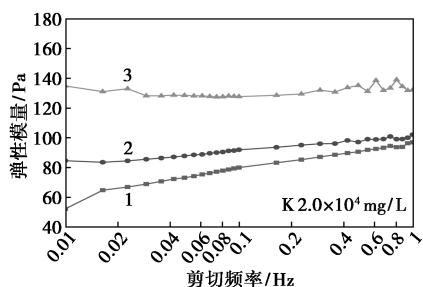
由表3和表4可以看出,聚丙烯酰胺与不同质量浓度的M+K型复合交联剂均可以有效成胶,成胶时间约为11~14 h,介于相同条件下单独使用M型无机交联剂或K型有机交联剂成胶时间之间。M+K型复合交联剂交联的SDC-1型凝胶成胶强度较强,强度在G~H级,高于单独使用M型无机交联剂或K型有机交联剂时的凝胶体系。115℃高温90 d后,凝胶强度也出现了不同程度的下降,说明需要调整K型有机交联剂和M型无机交联剂的质量浓度,找出最佳配比,使聚丙烯酰胺凝胶体系具有更好的长期热稳定性。如样品3和样品6所示,过量的M型无机交联剂会导致凝胶长时间高温后出现分水现象或强度下降。对比样品4、5、6及样品1、2、3可以发现,样品5所形成的凝胶体系稳定性相对较好,强度始终维持在H级左右,故0.2×10⁴ mg/L的M型无机交联剂及2.0×10⁴ mg/L的K型有机交联剂为防CO₂气窜体系的最佳配比。

M型无机交联剂作为一种无机类交联剂,成胶强度高但成胶时间相对较短,长期高温后易发生分

水;K 型有机交联剂成胶性能良好,且成胶时间相对于 M 型无机交联剂体系更长,长期高温后虽体系强度下降,但体系不易分水。使用 M+K 型复合交联剂,兼具了 M 型无机交联剂成胶强度高和 K 型有机交联剂不易分水的优点^[17]。2 种交联剂可以协同发挥作用,主要是因为 K 型有机交联剂的加入可以削弱 M 型无机交联剂与聚丙烯酰胺之间的作用,从而延长成胶时间;而 M 型交联剂的加入也可以增强聚丙烯酰胺凝胶的三维网状结构,从而加强凝胶体系的整体强度。综合考虑体系成胶效果,样品 5 配方效果较优,并将形成的凝胶体系命名为 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系。

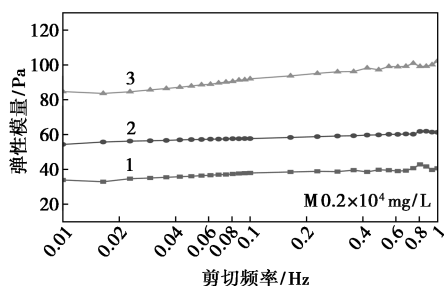
3.4 交联剂对 SDC-1 型有机-无机复合交联防 CO₂ 气窜体系黏弹性能的影响

采用不同剂量的 M 型无机交联剂和 K 型有机交联剂配制 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系,通过测定体系的弹性模量评价凝胶体系的黏弹性能,结果如图 1 和图 2 所示。



1—0.1×10⁴ mg/L;2—0.2×10⁴ mg/L;3—0.5×10⁴ mg/L

图 1 M 型无机交联剂质量浓度对凝胶弹性模量 G' 的影响



1—0 mg/L;2—1×10⁴ mg/L;3—2×10⁴ mg/L

图 2 K 型有机交联剂质量浓度对凝胶弹性模量 G' 的影响

由图 1 和图 2 可知,在 0.01~1 Hz 频率范围内 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系弹性模量 G' 较为稳定,说明 M 型无机交联剂和 K 型有机交联剂不会影响该凝胶体系在 0.01~1 Hz 频率范围内的稳定性。随着 M 型无机交联剂和 K 型有机交联剂质量浓度的

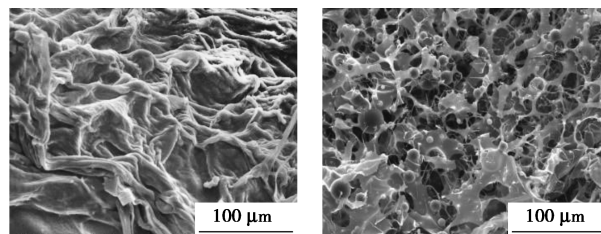
增加,弹性模量 G' 数值升高,说明 2 种交联剂可以有效提升凝胶体系强度。对比 2 张图可以发现,当弹性模量 G' 为 80~90 Pa 时,M 型无机交联剂质量浓度明显少于 K 型有机交联剂,且增加少量 M 型无机交联剂即可显著提高凝胶的弹性模量。说明凝胶的强度主要受 M 型无机交联剂的影响,且通过调整 2 种交联剂的配比可以调整 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系的强度,从而满足不同 CO₂ 气驱油藏的不同需求。

3.5 M+K 型复合交联剂配比对成胶性能的影响

实验结果表明,M+K 型有机-无机复合交联剂的成胶效果优于单独使用任何一种交联剂。为进一步分析不同类型交联剂对凝胶体系的影响,利用 SEM 扫描电镜对不同类型的聚丙烯酰胺凝胶体系微观结构进行分析。不同类型交联体系凝胶配方如表 5 所示,其 SEM 扫描结果如图 3 所示。

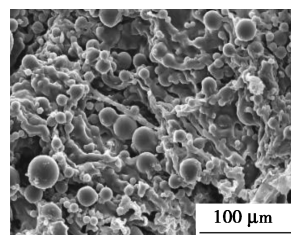
表 5 不同类型交联剂凝胶微观结构配方表

编号	基液用水	质量浓度/(×10 ⁴ mg·L ⁻¹)		
		聚合物	M 型无机交联剂	K 型有机交联剂
A	去离子水	1.0	0.2	0.0
B	去离子水	1.0	0.0	2.0
C	去离子水	1.0	0.2	2.0



(a) 配方 A

(b) 配方 B



(c) 配方 C

图 3 不同类型交联剂凝胶扫描电镜图

从图 3 中可以看出,交联剂类型对聚丙烯酰胺凝胶的微观结构影响显著。从图 3(a)中可以看出,当采用 M 型无机交联剂时,凝胶具有大量强树状结构。树状结构是聚丙烯酰胺凝胶构成三维网状结构的基础,强树状结构所形成的凝胶微观结构更为紧密,从而使形成的凝胶强度相对更强。而从图 3(b)中可以看出,当采用 K 型有机交联剂时,聚丙烯酰

胺凝胶的微观结构虽然具有大量树状结构,但这些树状结构相对较弱,这也解释了该凝胶强度较弱的原因。同时,这些树状结构中镶嵌了大量球状结构,这一结构有助于提高凝胶热稳定性。从图 3(c)中可以看出,当复合使用 M 型、K 型交联剂配制 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系时,凝胶具有 2 种交联剂的共同特点,强树状结构镶嵌了大量球状结构,这一结构既提高了凝胶强度,同时也提高了其热稳定性,兼具了无机交联剂和有机交联剂凝胶体系的优点。

3.6 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系封堵性评价

采用驱替装置测定 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系封堵率、突破压力梯度及封堵率,结果如表 6 所示。

表 6 不同渗透率岩心条件下封堵性能评价

代号	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)		封堵率/ %	突破压力/ kPa	突破压力梯度/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
	封堵前	封堵后			
YX-1	180.67	7.50	95.84	240.7	3.4
YX-2	484.13	9.78	97.98	504.9	7.2
YX-3	991.63	4.57	99.54	860.2	12.3

由表 6 可知,SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系在不同渗透率的人造岩心中可以有效封堵 CO₂ 气窜,封堵率均在 95% 以上。随着人造岩心渗透率的升高,封堵率升高,这是由于渗透率高的人造岩心的毛管力相对较低,更利于防气窜体系的注入和波及。防气窜体系波及体积越高,防气窜体系成胶后,封堵人造岩心孔隙的能力越强,从而封堵率越高,更有利于防止 CO₂ 气窜的发生。突破压力及突破压力梯度随着人造岩心渗透率的升高而升高,当渗透率为 $991.63 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,突破压力达到 860.2 kPa,突破压力梯度为 12.3 MPa/m;而当渗透率为 $180.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,突破压力为 240.7 kPa,突破压力梯度为 3.4 MPa/m。说明 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系对高渗透率岩心有更好的封堵效果,有利于防止由于压力过高导致的气窜现象。

3.7 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系封堵性评价

有机-无机复合交联体系相对于单一交联体系更有助于提高防 CO₂ 气窜效果。Cr³⁺ 交联剂与酚醛树脂类交联剂交联机理不同,Cr³⁺ 交联剂通过配位键与聚丙烯酰胺上酰胺基进行交联,而聚丙烯酰胺上的羧基可以与酚醛树脂类交联剂形成共价键。两者复合使用,可同时发挥这 2 种类型交联剂的优点,具体机理示意图如图 4 所示。

由图 4(a) 和图 4(b) 可知,单一采用 Cr³⁺ 交联剂,短时间虽可以有效封堵气窜通道,但是长时间高

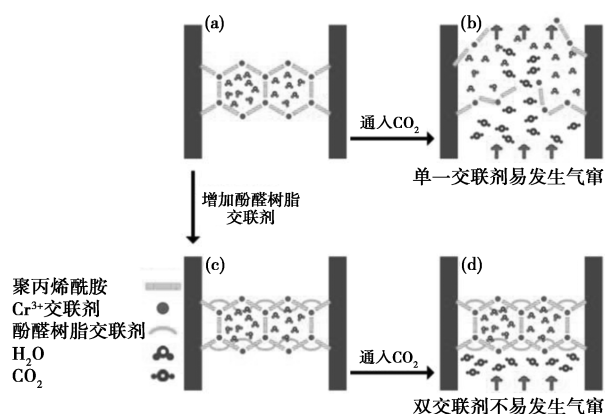


图 4 SDC-1 型有机-无机复合交联防气窜体系机理

温环境下体系易发生水解,当通入 CO₂ 后会突破凝胶,从而使 CO₂ 再次气窜。而由图 4(c) 和图 4(d) 可以看出,体系中引入的酚醛树脂交联剂可以与聚丙烯酰胺形成共价键,可进一步增强凝胶体系强度并提高热稳定性,当通入 CO₂ 后,防气窜体系仍可以保持较好的强度,从而可以长期有效防止 CO₂ 气窜现象发生。

4 结论

(1) 复合使用 M+K 型复合交联剂,具备了 M 型无机交联剂成胶强度高和 K 型有机交联剂热稳定性强的优点,形成的 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系 115℃ 高温 90 d 不分水,具有良好的热稳定性能。

(2) 在 0.01~1 Hz 频率范围内 SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系弹性模量 G' 较为稳定,弹性模量 G' 与 M 型和 K 型交联剂质量浓度正相关,可有效提升凝胶体系强度,且 M 型无机交联剂的质量浓度对强度的影响效果更加显著。

(3) 复合使用 M+K 型有机-无机复合交联体系时,微观结构具有 M 型无机交联剂的强树状结构及 K 型有机交联剂的球状结构,增强了聚丙烯酰胺凝胶体系的三维网状结构,从而提高其强度及热稳定性。

(4) SDC-1 型防 CO₂ 气窜体系在不同渗透率的人造岩心中均具有良好的防 CO₂ 气窜效果,封堵率均在 95% 以上,突破压力梯度最高达 12.3 MPa/m。

参考文献

- [1] Hamouda A, Chughtai S. Miscible CO₂ flooding for EOR in the presence of natural gas components in displacing and displaced fluids[J]. Energies, 2018, 11(2): 391-403.

(下转第 119 页)

交流阻抗曲线由高频区的半圆弧和低频区的斜直线两部分组成,高频区的圆弧直径对应着电极与电解液界面处的电化学阻抗,低频区的直线斜率对应着离子在电极中的扩散电阻。从图6中可以看出,高频区的半圆弧直径小,说明所制备的材料电化学阻抗较小,其相应的电荷转移能力较快。在低频区的直线与实轴大致呈 90°,表明电解液中的离子扩散电阻小,在材料中的扩散效率较高。电化学阻抗测试结果说明, NiCo₂O₄ 电极材料在发生氧化还原反应时,多孔结构能够为其提供较多的活性位点以便于离子在电解液中的扩散,因此电容性能和动力学性能更佳。

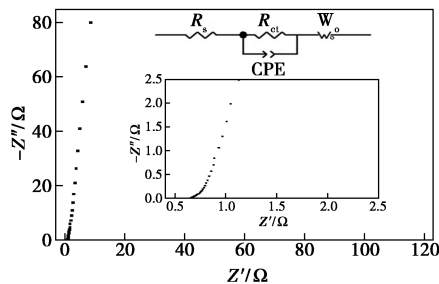


图6 NiCo₂O₄ 的交流阻抗图

3 结论

采用水热法合成了 3D 类花状结构 NiCo₂O₄ 电极材料,研究了其物相组成、微观结构以及电化学性能。3D 类花状结构 NiCo₂O₄ 由多个纳米片组装而成,纳米片结构增大电极与电解液之间的接触面积。NiCo₂O₄ 电极材料在 1 A/g 的条件下比电容为 508 F/g,并且在电流密度为 8 A/g 的条件下经过 3 000 次循环后,其比电容保持率为 98.5%。

(上接第 115 页)

- [2] 谷峪.CO₂ 气驱油藏耐温耐盐防气窜体系配方研究与性能评价 [D].北京:中国石油大学(北京)提高采收率研究院,2018.
- [3] 赵文越.低渗透裂缝油藏 CO₂ 驱气窜评价研究 [D].北京:中国石油大学(北京)提高采收率研究院,2015.
- [4] 段景杰,姚振杰,黄春霞,等.特低渗透油藏 CO₂ 驱流度控制技术 [J].断块油气田,2017,24(2):190-193.
- [5] 王庆,杨昌华,林伟民,等.中原油田耐温抗盐二氧化碳泡沫控制气窜研究 [J].油气地质与采收率,2013,20(4):75-78.
- [6] Wang Z,Zhang L,Yu T, et al.Study of corrosion behavior of oil gathering facilities with CO₂, flooding in low-permeability oilfields [J]. Chemistry & Technology of Fuels & Oils,2019,53(6):933-942.
- [7] 罗二辉,胡永乐,李保柱,等.国外 CO₂ 驱流度控制进一步扩大大波及体积方法 [J].油田化学,2013,30(4):613-619.
- [8] Cai S.Study of CO₂ mobility control using cross-linked gel conformance control and CO₂ viscosifiers in heterogeneous media [D]. Texas:Texas A&M University,2011.
- [9] 张磊.特低渗油藏 CO₂ 驱封窜体系优选及方法理论研究 [D].

参考文献

- [1] Goodenough J B.Electrochemical energy storage in a sustainable modern society [J].Energy and Environmental Science,2014,7(1):14-18.
- [2] González A,Goikolea E,Barrena J A, et al.Review on supercapacitors: Technologies and materials [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,58:1189-1206.
- [3] Simon P,Gogotsi Y.Materials for electrochemical capacitors [J].Nature Materials,2008,7(11):845-854.
- [4] Simon P,Gogotsi Y.Materials for electrochemical capacitors [J].Nature Materials,2008,7:845-854.
- [5] 刘小军,卢永周.超级电容器综述 [J].西安文理学院学报:自然科学版,2011,14(2):69-73.
- [6] Kim M,Hwang Y,Kim J.Graphene/MnO₂-based composites reduced via different chemical agents for supercapacitors [J].Journal of Power Sources,2013,239:225-233.
- [7] 徐斌,张浩,曹高萍,等.超级电容器炭电极材料的研究 [J].化学进展,2011,23(2):605-611.
- [8] 曹迪,文浩,罗斌,等.超级电容器电极材料的研究进展 [J].机电工程技术,2019,48(5):224-227.
- [9] Zhu Y,Murali S,Stoller M D, et al.Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene [J].Science,2011,332(6037):1537-1541.
- [10] Ma F X,Yu L,Xu C Y, et al.Self-supported formation of hierarchical NiCo₂O₄ tetragonal microtubes with enhanced electrochemical properties [J].Energy and Environmental Science,2016,9:862-866.
- [11] Xu X Y,Hong W,Zhao H L, et al.3D hierarchical dandelion-like NiCo₂O₄/N-doped carbon/Ni foam for an effective binder-free supercapacitor electrode [J].Materials Chemistry and Physics,2017,186:280-285.
- [12] Gao S,Liao F, Ma S, et al.Network-like mesoporous NiCo₂O₄ grown on carbon cloth for high-performance pseudocapacitors [J].Journal of Materials Chemistry A,2015,3:16520-16527.
- [13] Chen H C,Jiang J J,Zhang L, et al.Facilely synthesized porous NiCo₂O₄ flowerlike nanostructure for high-rate supercapacitors [J].Journal of Power Sources,2014,248:28-36.
- [14] 郑文庆,郑玉婴,张祥,周珺.NiCo₂O₄ 微球的制备及其电化学性能 [J].复合材料学报,2017,34(9):1982-1988.■
- 北京:中国石油大学(北京)提高采收率研究院,2013.
- [10] 张海林,曹毅,刘峰刚,等.CO₂ 驱复合凝胶封窜剂微观结构及配方优化 [J].油田化学,2017,34(1):74-78.
- [11] 朱荣娇,郝纪双,刘淑参,等.疏水缔合聚丙烯酰胺的性能评价 [J].天津大学学报,2012,45(6):540-545.
- [12] Sydansk R D,Argabright P A.Conformance improvement in a subterranean hydrocarbon-bearing formation using a polymer gel: US, 4683949A [P].1987-08-04.
- [13] 巴勒斯,赫顿,瓦尔特斯著,等.流变学导引 [M].北京:石油工业出版社,1992.
- [14] 孙斐斐,林梅钦,王玉功,等.聚丙烯酰胺 Cr³⁺ 凝胶的结构与性能关系 [J].石油学报(石油加工),2014(6):1065-1071.
- [15] 卢祥国,谢坤,曹豹,等.Cr³⁺ 聚合物凝胶成胶效果及其影响因素 [J].中国石油大学学报(自然科学版),2015(3):170-176.
- [16] 刘玉莉,欧阳云丽,孔嫦娥,等.一种低成本 HPAM-酚醛凝胶体系深部调剖堵剂的合成 [J].应用化工,2014(5):883-886.
- [17] 王晓丽.新型复合凝胶调剖体系的评价研究 [J].当代化工,2014(9):1708-1710.■