

渗透率和注入速度对多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的影响

于海洋¹, 刘向军¹, 徐彬彬¹, 纪文娟², 王业飞³

(1.中国石化胜利油田分公司 河口采油厂, 山东 东营 257200; 2.中国石油长庆油田分公司 采气一厂, 陕西 榆林 718500; 3.中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 为了进一步研究多孔介质中酚醛树脂冻胶的动态交联反应规律, 采用循环流动装置, 分析了不同渗透率和注入速度下多孔介质中酚醛树脂冻胶的动态成胶过程。结果表明, 随着渗透率的增大, 其动态成胶时间缩短, 成胶后冻胶粘度增大, 从而建立了酚醛树脂冻胶粘度与渗透率的定量关系; 随着注入速度增大, 其动态初始成胶时间先缩短后延长, 最终成胶时间延长, 冻胶强度降低, 从而建立了酚醛树脂冻胶粘度与剪切速率的定量关系。通过分析渗透率和剪切速率对多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的影响, 建立了不同渗透率下酚醛树脂冻胶注入速度和剪切速率的关系, 为调剖时注入速度的选择提供理论依据。

关键词: 酚醛树脂冻胶 动态成胶 渗透率 注入速度 剪切速率

中图分类号: TE357.431

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)03-0073-05

聚合物冻胶广泛应用于调剖堵水, 其动态成胶与静态成胶存在着较大差别, 不能简单地用静态成胶来描述多孔介质中的动态成胶过程。为此, 中外学者采用不同的物理模型对多孔介质中聚合物冻胶的动态成胶过程进行了研究, 认为该过程可分为诱导、成胶和稳定3个阶段, 且动态成胶时间远长于静态成胶时间^[1-10]。当渗透率和注入速度改变时, 多孔介质中聚合物冻胶受到的剪切程度不同^[11-15], 对成胶过程产生的影响亦不同。目前, 对此方面的研究较少, 因此笔者采用循环流动装置, 深入研究了不同渗透率和注入速度下酚醛树脂冻胶在多孔介质中的动态成胶过程, 分析了渗透率和注入速度对动态成胶时间和冻胶强度的影响, 建立了不同渗透率下注入速度和剪切速率的关系, 以为不同渗透率地层选择合适的注入速度提供理论依据。

1 实验器材及方法

实验试剂包括普通部分水解聚丙烯酰胺(HPAM), 其相对分子质量为 1.2×10^7 , 水解度为22%, 固含量为90%; 交联剂酚醛树脂预聚体

(PFR); 氯化钠、氯化钙和六水合氯化镁, 均为分析纯。实验仪器主要包括Brookfield DV(II)粘度计、RW20 digital顶置式机械搅拌器、DY-III型多功能物理模拟装置。填砂管直径为2.5 cm, 长度为100 cm; 其填充介质为不同目数的玻璃微珠; 用a点表示注入端, 在距注入端30和70 cm处有测压点, 分别用b和c点表示, 用d点表示出口端。实验温度为75 °C; 地层模拟水总矿化度为19 334 mg/L, 其中钠—钾离子、钙离子和镁离子的质量浓度分别为6 921, 412和148 mg/L, 阴离子为氯离子。酚醛树脂冻胶的成胶时间较长, 若冻胶流出多孔介质的时候仍未成胶, 将不能准确地反映冻胶在多孔介质中的成胶情况, 因此应用循环流动装置。

实验方法参见文献[16]。

2 酚醛树脂冻胶动态成胶过程

2.1 不同渗透率下动态成胶过程

Carman-Kozeny公式给出了渗透率与孔喉半径的关系^[17], 即渗透率越大, 孔喉半径越大, 在相同作用下越有利于流体的流动。在相同渗透率条件下,

收稿日期: 2014-03-10。

作者简介: 于海洋, 男, 博士, 从事油田化学与提高采收率研究。联系电话: 15154299132, E-mail: yuhaiyang_upc@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”之“海上稠油化学驱油技术”(2011ZX05024-004)。

相对分子质量大的流体注入压差高,岩心渗透率越小,筛网系数和粘度的损失越大^[18]。用不同目数的玻璃微珠填制渗透率分别为0.55, 2.13, 8.08和13.58 μm^2 的填砂管岩心。在注入速度为0.5 mL/min的条件下,根据多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶实验方法,考察渗透率的影响。由实验结果(图1)可知,随着时间的延长,注入端压差(Δp_{ad})先是基本不变,然后迅速增大至稳定,说明在不同渗透率下酚醛树脂冻胶动态成胶均经历了诱导、成胶和稳定3个阶段^[19-20](图1a)。第1测压点压差(Δp_{bd})有不同程度的增大,但存在明显的时间滞后,说明多孔介质中酚醛树脂冻胶在动态成胶过程中可产生深部运移(图1b)。随着渗透率的增大,动态成胶稳定阶段 Δp_{ad} 逐渐减小,其原因是多孔介质孔喉半径增大,渗流阻力减小;而 Δp_{bd} 先减小后增大,这是此时酚醛树脂冻胶更容易运移的结果。当渗透率较小时,诱导阶段聚合物结构单元可运移至深部,但是在成胶阶段受到孔喉半径的限制形成的聚集体不易发生运移,在地层深部滞留产生封堵。因此,在渗透率较低条件下,酚醛树脂冻胶动态成胶时也可在地层深部产生封堵。

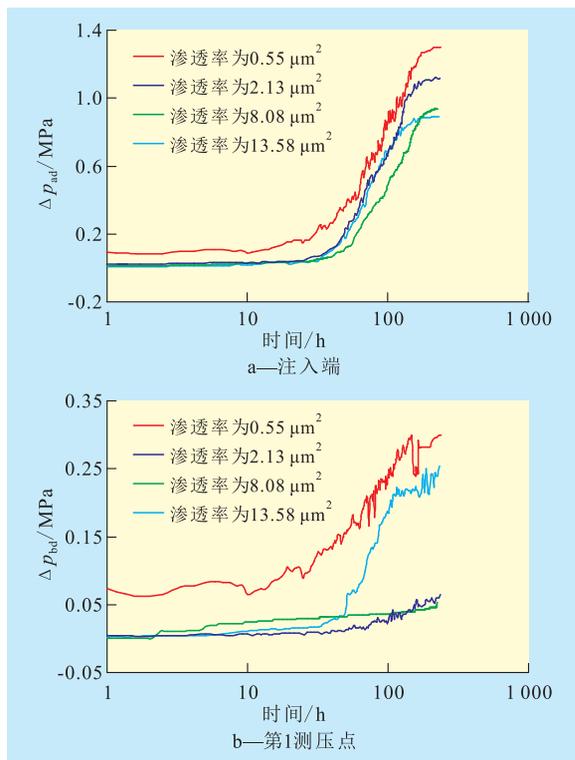


图1 不同渗透率下酚醛树脂冻胶在多孔介质中动态成胶过程

根据达西公式,由 Δp_{ad} 可计算出酚醛树脂冻胶的粘度,用来表征多孔介质中的动态成胶过程,考察渗透率对酚醛树脂冻胶动态成胶时粘度的影

响(图2)。根据Mokhtari等的研究结果,将成胶时间分为初始成胶时间和最终成胶时间,初始成胶时间是诱导阶段和成胶阶段的分界点;最终成胶时间是成胶阶段和稳定阶段的分界点^[21]。由多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的实验方法^[16]可知,多孔介质中动态成胶时间为整个成胶过程所用时间的1/2。由图2可以看出,随着渗透率的增大,酚醛树脂在多孔介质中动态初始成胶时间和最终成胶时间略微缩短,酚醛树脂冻胶粘度先是基本不变然后逐渐增大至稳定,当渗透率分别为0.55, 2.13, 8.08和13.58 μm^2 时,所对应的单位孔隙体积下的粘度分别为21.08, 70.03, 223.03和356.46 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

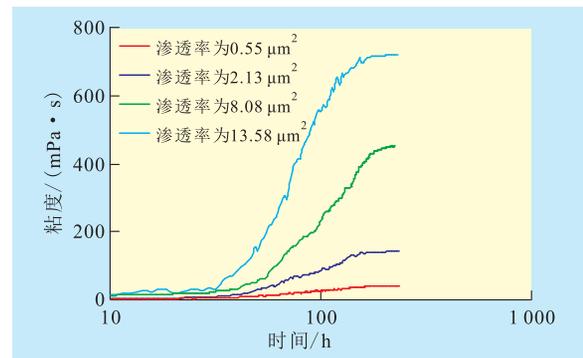


图2 不同渗透率下多孔介质中动态成胶酚醛树脂冻胶粘度随时间的变化

酚醛树脂冻胶在多孔介质中动态成胶时所承受的剪切速率^[12-14]为

$$\gamma = \frac{3n+1}{n} \times \frac{v}{\sqrt{0.5} \sqrt{8C'K\phi}} \quad (1)$$

式中: γ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流体的幂律指数; v 为注入速度, cm/s ; C' 为与迂曲度有关的系数,通常取值为25/12~2.5; K 为渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度,其取值为饱和水体积与总体积的比值。

当渗透率分别为0.55, 2.13, 8.08和13.58 μm^2 时,对应剪切速率分别为14.22, 7.23, 3.71, 2.86 s^{-1} 。表明多孔介质中酚醛树脂冻胶的动态成胶过程存在2种作用力:①有利于形成网状结构的交联作用;②破坏网状结构的剪切作用。因此酚醛树脂冻胶在多孔介质中动态成胶的初始和最终成胶时间均比安瓿瓶内和多孔介质中静态成胶的初始和最终成胶时间长。

当渗透率无限小至趋于0时,酚醛树脂冻胶在多孔介质中不能成胶,粘度值为0;当渗透率无限大时,根据式(1)可知,剪切速率趋于0,因此可近似看作是静态成胶,根据达西公式求解动态成胶后单位孔隙体积冻胶的粘度,建立了多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的粘度与渗透率之间的关系(图3),

其中 a 反映多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶后的粘度,其值越大反映冻胶粘度越大; b 反映剪切速率对酚醛树脂冻胶粘度的影响,可侧面反映酚醛树脂冻胶的抗剪切能力,其值越大,冻胶粘度受剪切速率影响越大,冻胶的抗剪切能力越差。随着渗透率的增大,多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶后的稳定粘度增大,当注入速度为0.5 mL/min,渗透率大于 $3 \mu\text{m}^2$ 时,多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶后的粘度值较大。

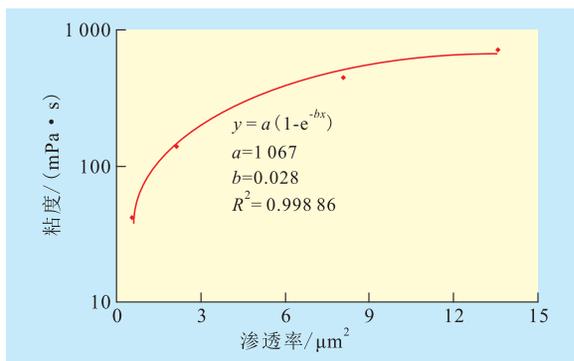


图3 渗透率对动态成胶后冻胶粘度的影响

2.2 不同注入速度下动态成胶过程

剪切作用对聚合物冻胶的成胶有较大的影响,随着注入速度的增大,剪切速率增大,聚合物冻胶通过岩心后的粘度损失增大。考察注入速度对多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的影响,实验方法如下:用相同目数的玻璃微珠填制渗透率为 $5\sim 8 \mu\text{m}^2$ 的填砂管岩心,研究注入速度分别为0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5和2 mL/min时,多孔介质中酚醛树脂冻胶的动态成胶过程,记录压差随时间的变化(图4)。

由图4可知,在实验条件下的渗透率对成胶影响较小。随着时间的延长,不同注入速度下动态成胶过程相似, Δp_{in} 先是基本不变,然后迅速增大至稳定阶段,表明酚醛树脂冻胶经历了诱导、成胶和稳定3个阶段。 Δp_{in} 有不同程度的增大,但是存在明显的时间滞后现象,表明酚醛树脂冻胶在多孔介质中动态成胶时可发生运移,在地层深部产生封堵。当注入速度较小时,剪切速率也较小,动态成胶后酚醛树脂冻胶粘度较大,因此表现为较高的压差;当注入速度较大时,剪切速率较大,动态成胶后形成酚醛树脂冻胶的粘度较低,但是此时酚醛树脂冻胶通过岩心孔喉时渗流阻力较大,亦表现为较高的压差,因此不论注入速度如何,第1测压点压差 Δp_{in} 增长的幅度均较大。

用 Δp_{in} 可计算多孔介质中酚醛树脂冻胶动态

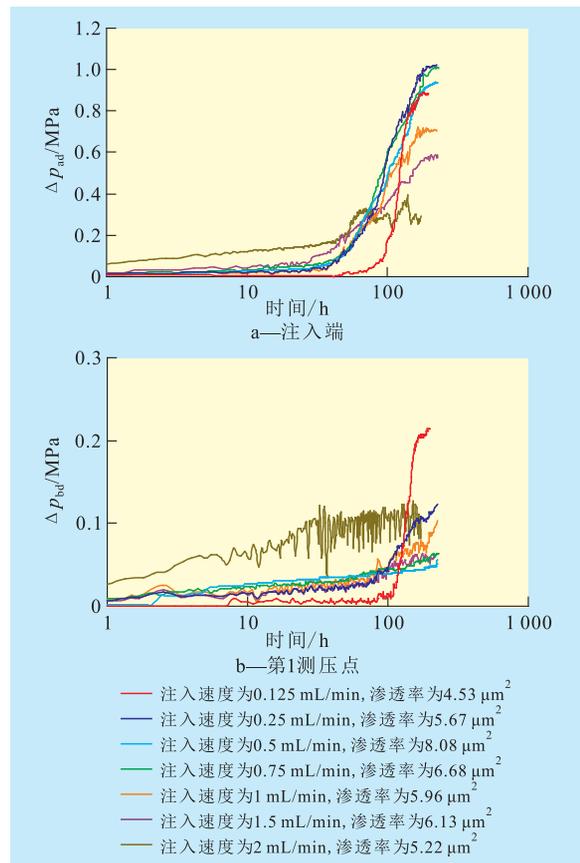


图4 不同注入速度下多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶过程

成胶过程中的粘度,根据其随时间的变化,分析注入速度对动态成胶的影响(图5)。随着注入速度的增大,酚醛树脂冻胶动态初始成胶时间先缩短后延长,最终成胶时间略微延长,且稳定阶段的粘度随着注入速度的增大逐渐降低。在实验渗透率下,注入速度分别为0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5和2 mL/min时,对应单位孔隙体积的粘度分别为470.7, 339.35, 223.03, 131, 99, 48.5和36 mPa·s。

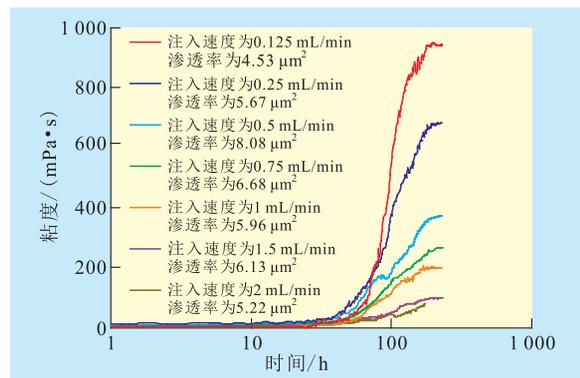


图5 不同注入速度下多孔介质中动态成胶酚醛树脂冻胶粘度随时间的变化

当注入速度过低时,剪切速率较小,对冻胶的破坏作用较小,同时形成的结构单元碰撞几率降

低,初始成胶时间延长;当注入速度过高时,剪切速率较大,对冻胶的破坏作用较大,同时也增加了结构单元相互碰撞的几率,但是结构单元所形成的较大聚集体在剪切作用下又被破坏,因此初始成胶时间延长。初始成胶时间的变化规律与剪切破坏和加速交联2种作用有关。由于剪切作用的存在,形成的聚集体遭到破坏,延长了最终成胶时间,降低了成胶后冻胶的粘度。根据式(1)计算得出,注入速度分别为0.125,0.25,0.5,0.75,1,1.5和2 mL/min时,对应的剪切速率分别为1.26,2.23,3.71,6.02,8.71,12.83和18.69 s^{-1} 。

根据动态成胶后单位孔隙体积酚醛树脂冻胶的粘度与计算的剪切速率,建立了粘度与剪切速率的关系(图6),随着剪切速率增大,动态成胶后酚醛树脂冻胶的粘度逐渐减小。在渗透率为5~8 μm^2 ,剪切速率大于10 s^{-1} 时,动态成胶后酚醛树脂冻胶粘度较低。对比实际数据和拟合曲线,当剪切速率较小时,实验过程中稳定阶段压差变化幅度平缓,实际值和拟合值相差不大;但随着注入速度的增大,酚醛树脂冻胶待成胶液在多孔介质中循环次数增多,导致拟合值大于实际值,动态成胶后粘度偏小。

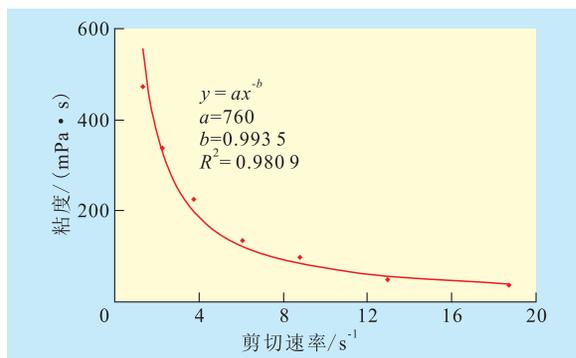


图6 酚醛树脂冻胶动态成胶后粘度与剪切速率的关系

3 渗透率和注入速度与剪切速率的关系

由渗透率和注入速度对多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶的影响分析可知,式(1)可反映出渗透率和注入速度对多孔介质中剪切速率的贡献,渗透率越大,注入速度越小,其剪切速率越小,动态成胶后冻胶的粘度越大。因此,在酚醛树脂冻胶实际应用时应考虑渗透率和注入速度的影响,在现场条件允许时尽量降低注入速度以获得较高的成胶粘度。

由式(1)可建立不同渗透率下注入速度和剪切

速率之间的关系(图7)。对于质量分数为0.2%的HPAM与质量分数为0.6%的酚醛树脂复配而成的溶液,当渗透率不变时,多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶时的剪切速率随注入速度的增大而增大;在注入速度一定的条件下,剪切速率随渗透率的增大而降低。动态成胶实验结果表明,当剪切速率大于10 s^{-1} 时,酚醛树脂冻胶动态成胶后粘度较低;当剪切速率小于10 s^{-1} 时,随着渗透率的增大,注入速度的选择范围增大。由图7可得到不同渗透率下酚醛树脂冻胶动态成胶后粘度值较高的注入速度范围。同时可以看出,聚合物冻胶在应用时,地层渗透率越低对其注入速度的要求就越高。

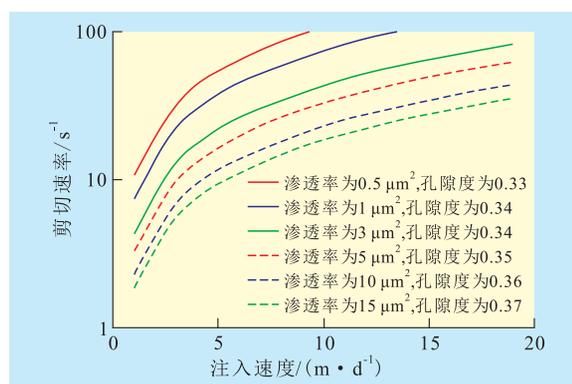


图7 不同渗透率下注入速度和剪切速率的关系

4 结论

研究了在75 $^{\circ}C$ 、不同渗透率和注入速度下,多孔介质中酚醛树脂冻胶的动态成胶过程。随着渗透率的增大,动态成胶时间缩短,成胶后冻胶强度增大,建立了冻胶粘度和渗透率的定量关系;随着注入速度增大,酚醛树脂冻胶动态初始成胶时间先缩短后延长,最终成胶时间延长,冻胶强度降低,建立了聚合物冻胶粘度与剪切速率的定量关系。在此基础上,建立了不同渗透率下注入速度与剪切速率的关系,根据剪切速率与动态成胶后冻胶粘度的关系可选择不同渗透率下合适的注入速度。

参考文献:

- [1] 胡菁华,刘玉章,白宝君.剪切下交联研究[J].石油勘探与开发,2002,29(4):101-102.
- [2] 朱怀江,刘玉章,樊中海,等.动态过程对聚合物-酚醛交联体系成胶机理的影响[J].石油勘探与开发,2002,29(6):84-86.
- [3] 张建华.聚合物凝胶体系在孔隙介质中交联及运移封堵性能研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):54-56.
- [4] 赵晓非,于庆龙,晏凤,等.有机铬弱凝胶深部调剖体系的研究

- 及性能评价[J].特种油气藏,2013,20(3):114-117.
- [5] 罗宪波,蒲万芬,赵金洲,等.交联聚合物溶液动态成胶时间确定及运移过程研究[J].西南石油学院学报,2005,27(5):72-74.
- [6] Doncel-Prez E, Darder M, MartnLpez E, et al.Gelation under dynamic conditions: A strategy for in vitro cell ordering [J].Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2006, 17(9): 795-802.
- [7] 李先杰,侯吉瑞,岳湘安,等.剪切与吸附对弱凝胶深部调驱作用的影响[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(6):147-151.
- [8] 曹功泽,侯吉瑞,岳湘安,等.改性淀粉-丙烯酰胺接枝共聚调堵剂的动态成胶性能[J].油气地质与采收率,2008,15(5):72-74.
- [9] McCool C, Li X, Wilhite G.Flow of a polyacrylamide/chromium acetate system in a long conduit [J].SPE Journal, 2009, 14(1): 54-66.
- [10] 吕晓华,唐金星,张丽庆,等.低浓度微凝胶体系动态成胶及驱油试验[J].石油与天然气化工,2003,32(3):162-163.
- [11] Metzner A, Otto R.Agitation of non-Newtonian fluids [J].AIChE Journal, 1957, 3(1): 3-10.
- [12] Savins J.Non-Newtonian flow through porous media [J].Industrial & Engineering Chemistry, 1969, 61(10): 18-47.
- [13] Camilleri D, Engelson S, Lake L W, et al.Description of an improved compositional micellar/polymer simulator [J].SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(4): 427-432.
- [14] 王新海,赵郭平.幂律流体在多孔介质中的剪切速率[J].新疆石油地质,1998,19(4):312-314.
- [15] 高春宁,李文宏,武平仓.适用于低渗透高矿化度油藏的新型聚合物弱凝胶驱油体系——以长庆油田陇东侏罗系油藏为例[J].油气地质与采收率,2011,18(5):40-43.
- [16] 史胜龙,王业飞,于海洋,等.多孔介质中酚醛树脂冻胶动态成胶规律[J].大庆石油学院学报,2012,36(1):41-46.
- [17] 秦积舜,李爱芬.油层物理学[M].东营:石油大学出版社,2001:130-131.
- [18] 张建英,杨普华.HPAM的分子量对岩心渗透率适应性研究[J].石油勘探与开发,1995,22(4):74-77.
- [19] 吕鹏,王业飞,于海洋,等.多孔介质剪切下铬冻胶体系成胶行为研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(1):75-80.
- [20] 王业飞,徐怀民,于海洋,等.疏水缔合聚合物/Cr³⁺冻胶在多孔介质中动态成胶研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):59-62,66.
- [21] Mehdi Mokhtari, Mehmet Evren Ozbayoglu.Laboratory investigation on gelation behavior of xanthan crosslinked with borate intended to combat lost circulation [C].SPE 136094, 2010.

编辑 刘北羿

(上接第72页)

- [3] 郭龙.渤海油田义34块特低渗透油藏二氧化碳混相驱实验[J].油气地质与采收率,2011,18(1):37-40.
- [4] 杜朝锋,武平仓,邵创国,等.长庆油田特低渗透油藏二氧化碳驱提高采收率室内评价[J].油气地质与采收率,2010,17(4):63-64,76.
- [5] 张奉东,王震亮.苏北盆地草舍油田CO₂混相驱替试验与效果分析[J].石油实验地质,2010,32(3):296-300.
- [6] 郭平,周耐强,张茂林,等.任11碳酸盐岩油藏注CO₂提高采收率研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(2):180-183.
- [7] 付美龙,叶成,熊帆,等.茨31块CO₂驱参数优化与方案设计[J].钻采工艺,2011,34(1):56-58.
- [8] 廖海婴,吕成远,赵淑霞,等.用数值模拟研究低渗透油藏CO₂驱影响因素[J].新疆石油地质,2011,32(5):520-522.
- [9] 廖长霖,廖新维,赵晓亮,等.低渗透油藏二氧化碳驱油及埋存可行性研究[J].油气地质与采收率,2013,20(5):79-83.
- [10] 张恩磊,顾岱鸿,何顺利,等.杂质气体对二氧化碳驱影响模拟研究[J].油气地质与采收率,2012,19(5):75-77.
- [11] 白素,宋考平,杨二龙,等.CO₂驱水气交替注入参数正交试验设计参数[J].特种油气藏,2011,18(1):105-108.
- [12] 尚庆华,吴晓东,韩国庆,等.CO₂驱油井产能及影响因素敏感性分析[J].石油钻探技术,2011,39(1):83-88.
- [13] 苏玉亮,慕立俊,范文敏,等.特低渗透油藏油井压裂缝参数优化[J].石油钻探技术,2011,39(6):69-72.

编辑 刘北羿