

# 多孔介质中油膜驱替特性的实验模拟

张立娟<sup>1</sup>,岳湘安<sup>1</sup>,孙盈盈<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**利用现有的微观模型难以模拟和量化驱油剂对油膜类残余油的驱替特性,为此,建立一种研究多孔介质中油膜驱替特性的实验模拟系统,通过该系统开展了几种单一驱油体系和复合驱油体系对油膜的驱替实验,得到油膜驱替效率的量化结果。在相同的流动条件下,具有低界面张力、强乳化能力和改变壁面润湿性能力的表面活性剂与强碱复合驱油体系对油膜的驱替效率最高,为74.32%;具有低界面张力和较强乳化能力的表面活性剂溶液及其与弱碱或盐的复合驱油体系,对油膜的驱替效率为57.49%~71.98%;具有改变壁面润湿性能力的强碱和弱碱溶液,对油膜的驱替效率分别为56.09%和10.14%;质量分数为0.2%的NaCl溶液3种驱油性均不显著,对油膜的驱替效率最低。研究表明,降低界面张力、增强乳化能力和改变壁面润湿性有利于提高对油膜的驱替效率。

**关键词:**化学驱 驱替效率 润湿性 界面张力 乳化

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0080-05

## Experimental simulation on displacement of oil film in porous media

Zhang Lijuan<sup>1</sup>, Yue Xiang'an<sup>1</sup>, Sun Yingying<sup>2</sup>

(1.College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China;

2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

**Abstract:** It is difficult for current existing micro-models to simulate and quantify displacement of residual oil film. A laboratory system was developed to model displacement of oil film in porous media, and flooding experiments on oil film were conducted with several single and composite oil displacement agents. Quantification results of displacement efficiency of oil film were presented. At the same flow conditions, the composite system of surfactant/strong alkaline has the highest displacement efficiency of 74.32% with low interfacial tension, strong emulsification and wettability change ability. Surfactant solution and its composite system consisting of weak alkaline or salt have low interfacial tension and strong emulsification and their displacement efficiencies are between 57.49% and 71.98%. The displacement efficiencies of strong base and weak base solution capable of wettability change are 56.09% and 10.14% respectively. However, the displacement efficiency of salt solution with mass fraction of 0.2% is the lowest without the above three displacement properties. Research results show that higher oil film displacement efficiency can be obtained by chemical agents with lower interfacial tension, strong emulsification and wettability change ability.

**Key words:** chemical flooding; displacement efficiency; wettability; interfacial tension; emulsification

油膜是亲油储层水驱后典型的残余油<sup>[1-2]</sup>,存在不连续的分散油膜和连续油膜<sup>[3-4]</sup>2种形态,其中连续油膜具有铺展面积大和厚度小的特点,难于驱

替。前人主要是通过岩心薄片<sup>[5-6]</sup>和玻璃蚀刻模型<sup>[7-12]</sup>进行室内实验,研究化学驱油剂对油膜类残余油的驱替特性。岩心薄片模型来源于真实的岩

收稿日期:2015-09-16。

作者简介:张立娟(1977—),女,黑龙江肇州人,讲师,博士,从事提高采收率理论与技术研究。联系电话:13439186240, E-mail:zhanglj2001@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“油水在油藏孔喉中的流动和乳化机理研究”(50804051),国家科技重大专项“低渗油藏水驱后提高采收率技术”(2011ZX05009-004),中国石油大学(北京)优秀青年教师研究项目“泡沫驱在特低渗透油藏适应性及调驱机理研究”(2462015YQ0209)。

心,保留了储层岩石本身的孔隙结构特征、岩石表面物理性质及部分填充物,更接近于真实的多孔介质;但是由于孔隙结构、油水分布较复杂,残余油不是以单一油膜形式存在的。因此,通过岩心薄片模型得到的研究结果只能用于对油膜驱替效率的估算。玻璃蚀刻模型可制作出相对简单的孔隙通道,用于观察驱油剂对油膜的驱替过程,但是,这类模型尺寸较小,且饱和油量有限,难以进行油膜驱替效率的量化分析。

为此,笔者研究并模拟驱油剂对油膜的驱替特性,量化了油膜的驱替效率,建立了一种研究多孔介质中油膜驱替特性的实验模拟系统。利用该系统研究强碱、弱碱、盐、表面活性剂等单一驱油体系及表面活性剂与强碱、弱碱或盐的复合驱油体系对油膜的驱替效率,并通过测试体系与原油界面张力、乳化能力及改变壁面润湿性等驱油性能,分析其在驱替油膜中的作用。研究结果有助于改进和优化驱油体系,为提高油膜类残余油的驱替效率提供理论依据。

## 1 实验器材与方法

### 1.1 实验器材

**实验仪器** 实验中驱油体系与原油界面张力由SVT20视频旋滴界面张力仪(德国dataphysics仪器股份有限公司制造)测定,接触角度由DCAT21表面张力和接触角测定仪(德国dataphysics仪器股份有限公司制造)测定。油膜驱替实验模拟系统主要由平流泵、中间容器、多孔介质中油膜驱替模型、液体自动采集装置和恒温箱组成。其中,多孔介质中油膜驱替模型由长度为250 mm、内径为25 mm的玻璃外管,内部充填若干直径为1.2 mm的玻璃棒束构成,玻璃棒之间有一定的间隙,用以模拟实际多孔介质中的孔隙。该模型具有可视性、可重复性和油膜驱替后可计量的特点。在制作该模型之前,将玻璃外管内表面、玻璃棒束外表面的润湿性处理为亲油性。由于该模型表面积相对较大,易形成一定量的油膜,通过液体自动采集装置可以准确地计量不同时刻采出液中的油水量。

**实验材料** 实验采用的表面活性剂为石油磺酸盐XP,其活性物质含量为40%,配制质量分数为0.15%;NaCl,NaOH和 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,均为分析纯,配制质量分数为0.2%;实验用水为蒸馏水;实验用油为大庆油田地面脱水脱气原油,60℃时原油粘度为11 mPa·s,原油密度为0.859 6 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 实验方法

**界面张力测定** 在实验温度为60℃的条件下,采用SVT20视频旋滴界面张力仪测定质量分数为0.15%的XP,质量分数为0.2%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,质量分数为0.2%的NaOH,质量分数为0.2%的NaCl,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 复合驱油体系,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的NaOH复合驱油体系,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的NaCl复合驱油体系等7种驱油体系与原油的界面张力。

**乳化能力评价** ①按体积比为7:3分别将7 mL驱油剂和3 mL原油放置于试管中,再放入水浴槽中;②待试管内温度达到60℃时,快速震荡5次,静置1 min,使得原油与驱油剂两相液体均匀接触;③再快速震荡5次后,记录试管内乳化层与驱油剂之间界面从0刻度线位置处上升至5 mL刻度线位置处所需的时间,时间越长,表明驱油剂的乳化能力越强;④将试管放入60℃恒温箱中平衡12 h后,重复实验步骤②和③,模拟驱油剂与原油接触时间对其乳化能力的影响;⑤将试管放入60℃恒温箱中平衡24 h,重复实验步骤②和③。通过实验对7种驱油体系进行乳化能力评价。

**改变壁面润湿性能力测定** 实验准备长、宽、厚分别为20,20,1.3 mm的石英薄片共10片。将其浸泡在质量分数为0.5%的二甲基二氯硅烷—煤油溶液中24 h后,取出并用酒精冲洗干净,烘干后,再浸泡在原油中,并放置于温度为70℃的恒温箱内48 h以上。实验先测定其与纯水的接触角,再将其分别放置于7种驱油体系中浸泡72 h后,取出观察、拍照、测定其与纯水的接触角,判断其润湿性的变化情况。

**油膜驱替实验** 油膜驱替实验包括制造油膜和驱替油膜2部分。实验步骤为:①将玻璃外管和玻璃棒束均浸泡在质量分数为0.5%的二甲基二氯硅烷—煤油溶液中24 h以上,使整个多孔介质的壁面润湿性由亲水性变为亲油性;②用酒精清洗玻璃外管和玻璃棒束各3次,风干并称量;③在温度为60℃的条件下,将玻璃外管内壁和玻璃棒束浸泡在原油中,老化48 h后,玻璃外管内壁和玻璃棒束外表面上形成油膜;④将附有油膜的玻璃棒束充填至玻璃外管中,称重并计算油膜的质量;⑤连接实验装置,以0.35 mL/min的速度进行水驱至含水率为100%,形成残余油膜;⑥以0.35 mL/min的速度注入7种驱油体系中的任一种,驱替至含水率为100%后结束。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 驱油体系与原油的界面张力

质量分数为0.2%的NaCl,质量分数为0.2%的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,质量分数为0.2%的NaOH与原油的界面张力随着驱油体系与原油接触时间的增加变化较小(图1),并趋于稳定,达到平衡界面张力。其平衡界面张力分别为34, 5.9和6.4 mN/m;相同质量分数条件下,盐溶液与原油的瞬间界面张力大,远高于强碱或弱碱溶液与原油的瞬间界面张力。表面活性剂溶液及其与盐、弱碱、强碱复合驱油体系与原油的界面张力随着驱油体系与原油接触时间的增加大幅下降,并在接触时间约为50~60 min时达到平衡,平衡界面张力接近于0.1 mN/m。含有表面活性剂的4种驱油剂与无表面活性剂的碱溶液或盐溶液相比,平衡界面张力大幅度下降;而在表面活性剂XP中加入质量分数为0.2%的强碱、弱碱或盐对进一步降低其平衡界面张力无明显效果。

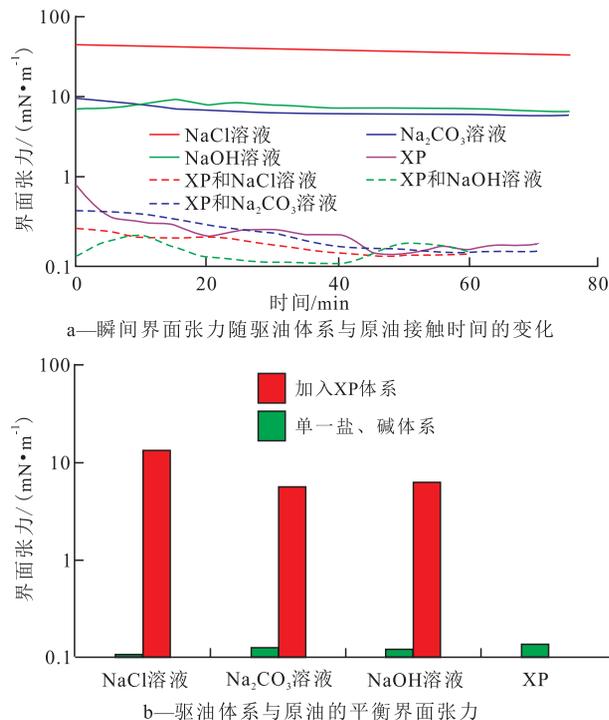


图1 7种驱油体系与原油的瞬间界面张力和平衡界面张力  
Fig.1 Instantaneous and equilibrium interfacial tension of 7 chemical agents and oil

### 2.2 驱油体系对原油的乳化能力

7种驱油体系与原油的接触时间越长,越有利于乳化。对于单一驱油体系,表面活性剂溶液的乳化能力大于弱碱、强碱和盐溶液(图2a);对于复合驱油体系,表面活性剂与强碱体系和表面活性剂与弱碱体系的乳化能力大于表面活性剂与盐溶液的

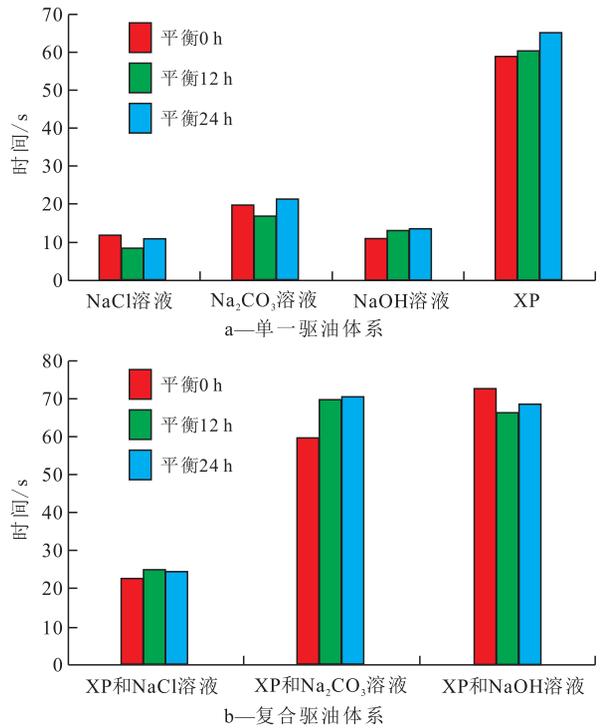


图2 驱油体系对原油的乳化能力  
Fig.2 Emulsifying ability of chemical agents

(图2b)。实验结果表明,表面活性剂与弱碱或强碱的复合驱油体系具有低界面张力和强乳化能力;单一表面活性剂体系及其与盐复合驱油体系界面张力低、乳化能力较强;单一盐、弱碱和强碱溶液具有界面张力高、乳化能力弱的特点。

### 2.3 驱油体系改变壁面润湿性的能力

驱油剂作用前,石英薄片依次在二甲基二氯硅烷—煤油溶液和原油中浸泡,润湿性由亲水性变为亲油性,其与纯水的接触角为140.12°。经过单一盐、碱、表面活性剂溶液或表面活性剂与盐、碱复合驱油体系等7种驱油剂作用后,亲油的石英薄片润湿性发生不同程度的变化。强碱溶液和含有强碱的表面活性剂复合驱油体系改变壁面润湿性的能力最强,润湿性由亲油性变为亲水性,接触角由140.12°分别下降至57.47°,56.10°;盐溶液改变壁面润湿性的能力最弱,接触角为108.60°;其他4种驱油体系改变壁面润湿性能力好于盐溶液,但比强碱溶液和强碱的表面活性剂复合驱油体系要差,润湿性由亲油性变为中等润湿性。经质量分数为0.2%的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,质量分数为0.15%的XP,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的NaCl等4种驱油体系作用后,接触角由140.12°分别下降至100.41°,104.92°,105.32°,99.72°。

此外,7种驱油剂改变润壁面润湿性的效果还

可以通过驱油剂作用后石英表面上油膜的变化照片直观地观察到。附有油膜的石英薄片经质量分数为0.2%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,质量分数为0.15%的XP,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,质量分数为0.15%的XP和质量分数为0.2%的NaCl等4种驱油体系作用后,石英表面上的油膜均有不同程度的减少;而经过强碱溶液和表面活性剂与强碱复合体系作用后,石英表面仅有微量的油膜残留;经过质量分数为0.2%的NaCl作用后,石英表面上的油膜基本无变化。

#### 2.4 驱油体系对油膜的驱替效率

根据7种驱油体系对油膜驱替效率随着驱替时间的变化(图3),可以将其分为3类:①表面活性剂溶液和含有表面活性剂的复合驱油体系。在其与油膜较短的接触时间内,驱替效率迅速上升,随后增加速度变缓。实验分析认为,该类驱油体系具有低界面张力和强或较强的乳化原油能力,当其与原油接触后,在剪切力作用下,部分油膜被迅速乳化分散,从而在短时间内增加油膜的驱替效率;②强碱和弱碱溶液。单一碱驱油体系主要是通过改变壁面润湿性来提高油膜驱替效率的作用。碱性越强,对壁面润湿性的改变程度越大,对油膜的驱替效率也越高;在其与油膜较短的接触时间内,驱替效率随时间的增幅较小或基本不增加,与油膜长时

间作用后,驱替效率才会明显增加。其原因为单一碱溶液与原油的界面张力较高,且对原油的乳化能力相对较弱,当与油膜接触时,对油膜的分散启动作用较弱,但其具有相对较强地改变壁面润湿性的能力,与油膜经过长时间接触后能够充分发挥其作用,剥离部分油膜,增加驱替效率;③盐溶液。该驱油体系对油膜的驱替效率不随时间的增加而变化。其与原油的界面张力较高,乳化能力和改变润湿性能力均较弱,驱替能力有限,驱替效率与驱油体系和原油之间的接触时间无关。

进一步分析各驱油体系对油膜的驱替效率可知,具有低界面张力、强乳化能力和改变壁面润湿性能力的表面活性剂和强碱复合驱油体系,对油膜的驱替效率最高,达74.32%;其次是具有低界面张力和较强乳化能力的表面活性剂溶液及其与弱碱或盐的复合驱油体系,其驱油效率为57.49%~71.98%;具有改变壁面润湿性能力的强碱和弱碱溶液,对油膜的驱替效率分别为56.09%和10.14%;盐溶液对水驱残余油膜的驱替效率最低。

### 3 结束语

为研究驱油剂对油膜类残余油的驱替规律,建立多孔介质中油膜驱替特性的实验模拟系统,其主要优点是在水驱后能够形成一定数量的单一类型油膜,可以从定量的角度研究驱油剂对油膜的驱替效率。单一碱、盐、表面活性剂溶液和复合驱油体系驱替油膜的模拟实验结果表明,在化学驱过程中,驱油剂与原油之间的低界面张力、强乳化能力和改变壁面润湿性能力对油膜的驱替均有贡献。对于水驱后的亲油油藏,提高驱油效率的主要目标是油膜类残余油。在提高采收率用驱油剂筛选和研发过程中,须兼顾以上3种驱油性能,以提高驱替效率。研究认识是在常压条件下针对1种粘度和组成的油膜得到的。在油藏的高压条件下,油膜的组成和性质与常压条件差异较大。下一步工作将完善多孔介质中油膜驱替特性的实验模拟系统,研究化学驱油剂在高压条件下对不同性质油膜的驱替特性和驱替机理。

#### 参考文献:

- [1] 侯健,罗福全,李振泉,等.岩心微观与油藏宏观剩余油临界描述尺度研究[J].油气地质与采收率,2014,21(6):95-98.  
Hou Jian, Luo Fuquan, Li Zhenquan, et al. The critical description scale study on core microscopic and reservoir macroscopic re-

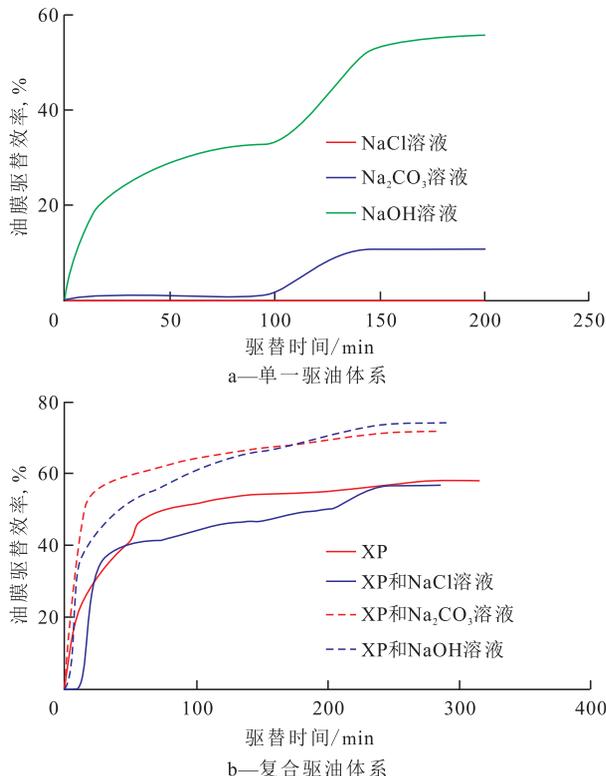


图3 不同驱油体系对油膜的驱替效率  
Fig.3 Oil film displacement efficiency of different chemical agents

- maining oil [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 95-98.
- [2] 吕伟峰,冷振鹏,张祖波,等.应用CT扫描技术研究低渗透岩心水驱油机理[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 87-90.  
Lü Weifeng, Leng Zhenpeng, Zhang Zubo, et al. Study on water-flooding mechanism in low-permeability cores using CT scan technology [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 87-90.
- [3] 张立娟,岳湘安.亲油岩石壁面残余油膜的微观驱替机理[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(1): 79-82, 85.  
Zhang Lijuan, Yue Xiang'an. Microscopic displacement mechanism of oil segment remained on hydrophobic rock wall [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(1): 79-82, 85.
- [4] Zhang Lijuan, Yue Xiang'an, Guo Fenqiao. Micro-mechanisms of residual oil mobilization by viscoelastic fluids [J]. *Petroleum Science*, 2008, 5(1): 56-61.
- [5] 郭平,苑志旺,易敏,等.低渗低压油藏真实岩心薄片微观水驱试验研究[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(4): 100-105.  
Guo Ping, Yuan Zhiwang, Yi Min, et al. Experimental study of microscopic water displacement in low-permeability and low-pressure reservoirs by using sandstone slice [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(4): 100-105.
- [6] 张明安.二元复合体系微观驱油机理可视化实验[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 79-82.  
Zhang Mingan. Experiments on visualization of the microscopic mechanism of surfactant/polymer binary compound system [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 79-82.
- [7] Benyamin Yadali Jamaloei, Riyaz Kharrat. Analysis of microscopic displacement mechanisms of dilute surfactant flooding in oil-wet and water-wet porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 81(1): 1-19.
- [8] Pei Haihua, Zhang Guicai, Ge Jijiang, et al. Analysis of microscopic displacement mechanisms of alkaline flooding for enhanced heavy-oil recovery [J]. *Energy Fuels*, 2011, 25(10): 4 423-4 429.
- [9] Hamid Emami Meybodi, Riyaz Kharrat, Majid Nasehi Araghi. Experimental studying of pore morphology and wettability effects on microscopic and macroscopic displacement efficiency of polymer flooding [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(2): 347-363.
- [10] Amin Mehranfar, Mohammad Hossein Ghazanfari. Investigation of the microscopic displacement mechanisms and macroscopic behavior of alkaline flooding at different wettability conditions in shaly glass micromodels [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122(10): 595-615.
- [11] Benyamin Yadali Jamaloei, Riyaz Kharrat, Koorosh Asghari. Pore-scale events in drainage process through porous media under high-and low-interfacial tension flow conditions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1): 223-233.
- [12] Zhang Min, Wang Zenglin, Yang Yong, et al. Influencing factors analysis of microscopic oil displacement in hot-water flooding heavy oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(3): 89-92.

编辑 王星

## 胜利油田勘探开发研究院20项科研成果 荣获2015年度分公司科技进步奖

2015年度胜利油田分公司科技进步奖评选结果揭晓,勘探开发研究院共有20项科研成果获奖,继续包揽胜利油田地质勘探组和油藏工程组一等奖。其中《东营凹陷南部低熟油运移特征及分布规律》、《断块油藏N2人工气顶-边水双向驱动提高采收率技术》等4项成果获科技进步一等奖;《济阳坳陷东部古近系致密砂岩气储层有效性评价》、《SLCHEM化学驱软件系统集成》等6项成果获科技进步二等奖;《孤北洼陷沙三段储层精细研究及目标评价》、《活性剂乳化性能对驱油效率影响及评价技术》等10项成果获科技进步三等奖。