

砾岩油藏聚驱后提高采收率技术研究

陈海玲, 郑晓宇, 蒋庆哲

(中国石油大学(北京)国家重质油加工实验室, 北京 102249)

摘要:在分析聚驱后剩余油的分布特点的基础上,从室内研究和现场应用等方面评价了聚合物驱后进一步提高油田采收率技术——聚合物驱后残留聚合物再利用技术、聚合物驱后深部调剖技术、聚合物驱后高效洗油技术,并结合砾岩油藏的储层物性和已有的砾岩油藏二次开发经验,提出了适合砾岩油藏聚驱后进一步提高采收率技术的方案。

关键词:砾岩油藏; 剩余油分布; 残留聚合物; 高效洗油; 深部调剖

中图分类号: TE39

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2013)03-0012-05

Technical study on enhanced oil recovery in conglomerate reservoir after polymer flooding

CHEN Hai-ling, ZHENG Xiao-yu, JIANG Qing-zhe

(State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: On the base of analyzing the distribution characteristics of remaining oil after polymer flooding, the technologies to further improve oil recovery after polymer flooding are evaluated from the lab study and field application, such as residual polymer reuse technology, deep profile control technique and efficient wash oil technology. Combined with physical property of conglomerate reservoir and existing experiences about secondary development of conglomerate reservoir, suitable technology solutions are put forward to further improve oil recovery in conglomerate reservoir after polymer flooding.

Key words: conglomerate reservoir; residual oil distribution; residual polymer; efficient wash oil; deep profile control

克拉玛依油田七东一区克拉玛依组油藏位于克拉玛依市以东约 40 km, 在准噶尔盆地西北缘地区克拉玛依断裂带上。七东一区克下组, 北以克—乌断裂白碱滩段, 东南以 5137 井断层, 西南以 5054 井断裂对油层起遮挡作用。油藏类型为断层遮挡的岩性—构造油藏, 油气水分布主要受构造控制。储集层以砾岩为主的粗碎屑正旋回沉积, 属山麓洪积相和山麓河流相。驱动类型为弹性、溶解气驱。油层岩性主要以细小砾岩、中粗砂岩、砂砾岩为主。

和砂岩储层相比, 砾岩储集层的特点是常规物性差、孔隙结构复杂、喉道半径均值小、孔隙分选系数大、孔喉半径频率分布曲线峰值低、孔喉比大、孔喉配位数低, 在微观上孔隙分布也极不均匀, 表现为孔隙连通性差, 尤其是二、三类区块孔隙孔道稀少, 喉道细而长, 迂回曲折, 节点少, 并且具有大量盲孔和单通道孔隙网络^[1]。冯慧洁等^[2]应用微观透明仿真刻蚀模型和平面填砂模型研究了砾岩油藏聚合物微观驱油机理。研究结果发现, 聚合物驱虽然能用于水驱后的砾岩油藏, 但砾岩油藏的结构性质决定了砾岩水驱、聚驱后的最终剩余油比较多, 因而最

终采收率低于砂岩油藏。

新疆油田适合聚合物驱的层块 75 块, 覆盖地质储量 43 205 万 t。七东一区克下组油藏属于砾岩一类的代表区块, 同类型区块单元数 15 个, 地质储量 13 750 万 t, 这个区块的聚驱后提高采收率综合技术试验成功对同类型油藏以及整个砾岩油藏聚合物驱都有指导和借鉴意义。

1 聚合物驱剩余油分布特点研究

1.1 聚合物驱油机理

最初, 国内外普遍的观点认为, 聚合物只能提高波及效率, 而不能提高微观驱油效率。而实际上, 随着人们对聚合物溶液在地下驱油过程中的渗流特征, 特别是其微观物理化学渗流规律进一步深入了解, 认为聚合物也能提高微观驱油效率。

黄延章等^[3]利用微观渗流模型, 在 1990 年就进行了聚合物驱油微观机理的研究, 认为聚合物提高驱油效率的机理是由于聚合物溶液与油的剪切应力大于水与油的剪切应力。近几年来, 王德民等^[4-5]、夏惠芬等^[6-9]初步探索聚合物溶液的黏弹性对微观

驱油效率的影响。从一些微观驱油实验中发现,黏弹性流体和黏性流体在同样条件下驱替水驱后的残余油,前者的驱油量大大超过了后者的驱油量,对残余油具有弹性的“拉、拽”作用。聚合物提高驱油效率:①本体黏度使聚合物在油层中存在阻力系数和残余阻力系数,是驱替水未波及残余油和簇状残余油的主要原因;②界面黏度使聚合物溶液在多孔介质中的黏滞力增加,是驱替膜状、柱状残余油的主要机理;③聚合物的黏弹性使得聚合物溶液能够进入盲端中驱油。图1为各种残余油(包括簇状、膜状、柱状和盲端残余油)的形状和分布示意图。

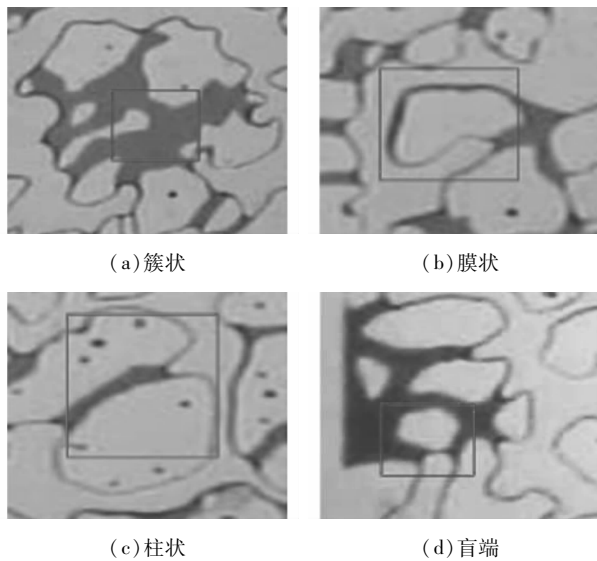


图1 残余油形状和分布示意图

1.2 同一储层聚合物驱与水驱后的剩余油分布对比

吴文祥等^[10]利用压汞法对聚合物驱后储层物性的变化进行了研究,发现聚合物驱后地层的非均质性增强,剩余油主要分布在中、低渗透层。王克文等^[11]、宋考平等^[12]通过网络模型研究了储层特性(孔隙半径、连通性、均质性和润湿性)对聚合物驱后剩余油含量及微观分布形态的影响,发现聚合物驱后剩余油的分布形态更为复杂,孤立状残余油所占比例有所增加(如图2)。

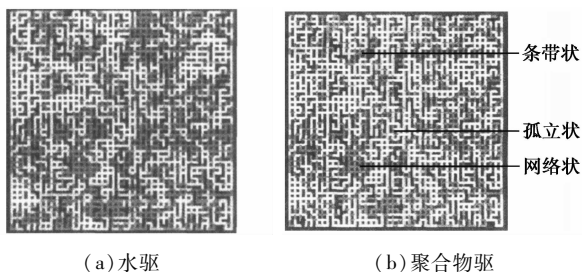


图2 同一储层水驱及聚合物驱后剩余油分布

1.3 不同储层聚驱后剩余油饱和度分布

兰玉波等^[13]通过室内三维物理模拟驱油试验研究,深入探讨了非均质砂岩油田水驱和聚合物驱油后剩余油饱和度变化,发现与水驱相比,聚合物驱后不同渗透率油层的采出程度都有不同程度的提高,尤其是高渗透层(如图3所示)。

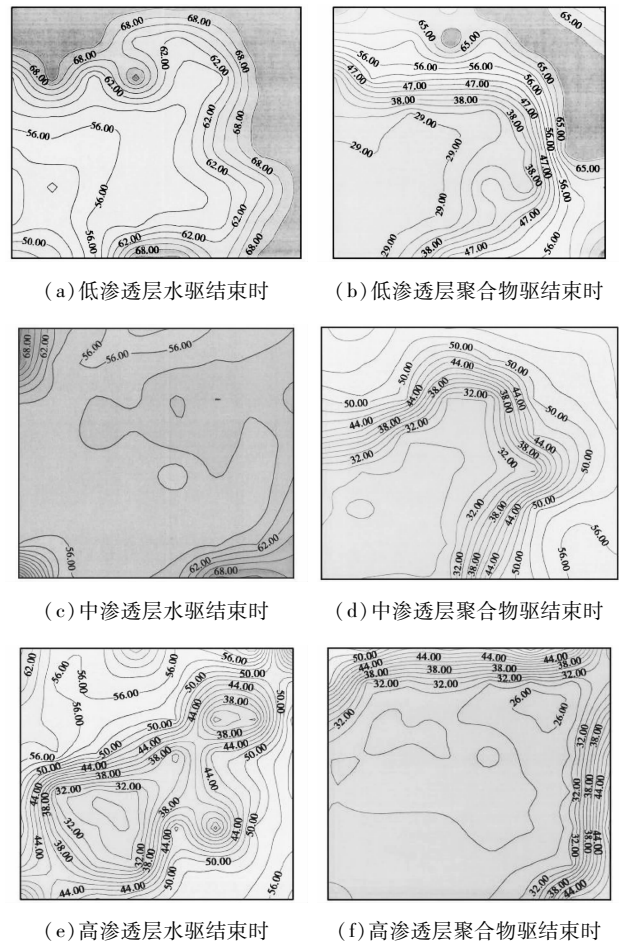


图3 低、中、高渗透层水驱、聚驱结束时含油饱和度分布

在剩余油的宏观分布方面,在纵向上主要分布在中、低渗透层,在平面上主要分布在主流线两翼,由于水动力学方面的原因,水洗程度弱或没有波及的部位。

1.4 平面填砂砾岩模型聚驱后剩余油分布

冯慧洁等^[2]用陶瓷颗粒模仿砾岩颗粒制作了平面填砂砾岩模型,研究宏观砾岩油藏驱油机理。研究发现,对于非均质同样严重的砂岩模型,各阶段的采收率均高于砾岩模型,说明砂岩的聚驱效果优于性质相近的砾岩,但砾岩模型聚驱后的最终采收率比水驱结束时提高了近10%,如图4可以看到聚驱结束时模型中的剩余油比水驱结束时明显减少。

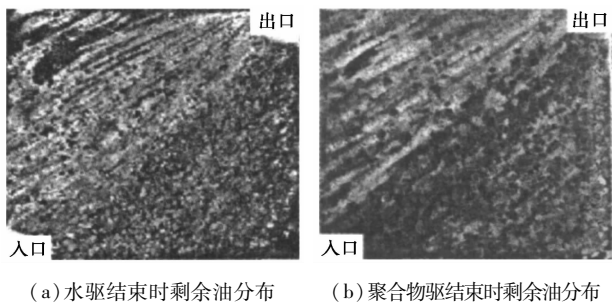
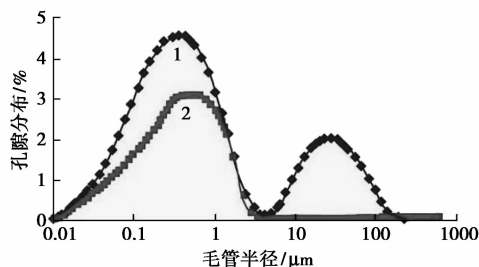


图4 平面填砂砾岩模型水驱、聚驱后剩余油分布

图5为用核磁共振技术研究克拉玛依油田六中区下克拉玛依组砾岩油藏剩余油的微观分布^[14]。砾岩油藏模型的结构性质决定了砾岩模型水驱、聚驱之后的最终剩余油比较多,且集中在中低渗油藏。



1—孔隙分布;2—剩余油分布

图5 剩余油在孔隙中分布示意图

综合来看,相比于砂岩油藏,砾岩油藏聚驱后剩余油分布更零散,且中低渗油层剩余油饱和度高于高渗油层,挖潜难度增大。

2 聚驱后提高采收率技术筛选评价

2.1 聚驱后剩余油挖潜开发思路

已工业化应用聚合物驱的两大主要油田对聚驱后剩余油分布的认识基本相同^[15-16],结合韩大匡院士^[17]总结的高含水后期和特高含水期剩余油的主要富集部位,可以看出上述聚驱后剩余油分布类型与水驱剩余油分布类型基本一致。因此,聚驱后挖潜仍可遵循高含水期二次开发思路,通过深化油藏描述以及准确量化剩余油的分布,在重构油藏地下认识体系的基础上,结合油藏井网系统的重建,挖潜剩余油。也即水驱综合调整和三次采油技术。

2.2 水驱综合调整

水区综合调整措施:①细分开发层系,降低层间干扰;②通过进一步缩小井距,在分流线上布新采油井等重建井网系统,调整和优化注采关系;③利用水平井挖潜富集剩余油。这些措施应用于大庆油田、

胜利油田等取得了显著的增产效果^[18-20],对于低渗透的砾岩油藏小井距开发也是适合的^[21]。

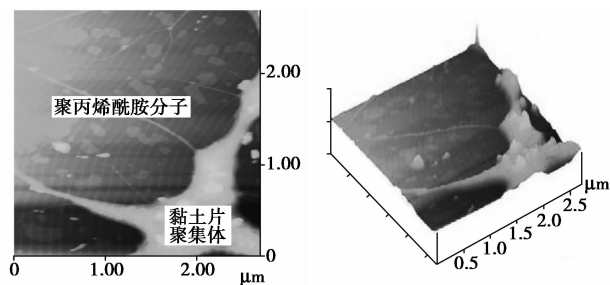
水驱综合调整措施依赖于剩余油分布的准确预测,以提高水驱波及体积或提高水驱波及范围内的冲洗强度为目标,但为继续较大幅度提高采收率,还必须研究以提高驱油效率为目标的三次采油技术。

2.3 三次采油技术

聚合物驱存在的问题:①聚合物溶液虽有调剖作用,但不能控制高渗透层,特别是特高渗透层;②聚合物驱后恢复水驱时存在指进现象,油井产液的含水率上升快;③聚合物驱后地层残留着大量聚合物;④聚合物在地层中存在不可入孔隙体积(5%~30%),减小了聚合物驱的波及体积;⑤聚合物驱不存在低油水界面张力所产生的洗油能力。为了解决聚合物及聚合物驱后存在的问题,赵福麟等^[22]提出聚合物驱后3项提高采收率技术,即聚合物驱后地层残留聚合物的再利用技术、深部调剖技术和高效洗油技术,这些技术是具有四次采油性质的技术。

2.3.1 地层残留聚合物的再利用技术

以某区块聚合物驱油试验为例,根据每月油井采出液中聚合物含量检测结果以及对应产水量,折算了单井采出聚合物量。统计16口中心采油井共采出聚合物干粉1133t,与注入干粉量相比,有72.3%的聚合物滞留在地下,以溶液溶解、吸附、捕集的形式存在。残留聚合物再利用技术(固定技术和絮凝技术)即是向地层注入再利用剂(絮凝剂和交联剂)将地层残留聚合物形成絮凝体或/和弱冻胶,封堵高渗透层,控制水的窜流,通过提高波及系数提高原油采收率。残留聚合物再利用技术在实验室和现场的应用也取得了显著的效果。选择稳定化钠土YG866为絮凝剂,对大庆喇嘛甸聚驱后油藏进行封堵调剖,絮凝体的原子力显微镜图像见图6;图7为喇嘛甸油田4-P1920井区4-P1925井施工前后的吸水剖面变化图^[23-25]。在提高采收率增值及投



(a) 平面图

(b) 立体图

扫描范围 2.5 μm × 2.5 μm

图6 絮凝体的原子力显微镜照片

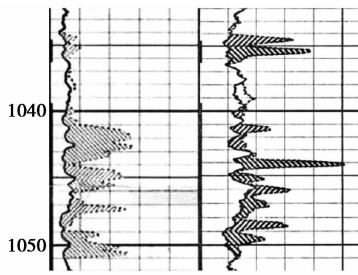


图7 4-P1925井施工前后的吸水剖面对比

入产出比方面,聚合物再利用技术具有不容置疑的优势(见表1)。

表1 提高采收率增值及投入产出比

注入孔隙 体积倍数	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
采收率增值/%	20.3	26.6	28.0	30.7	32.5	33.4	36.7
投入产出比	1:10.7	1:13.7	1:9.9	1:8.8	1:8.2	1:7.0	1:6.2

研究证实,絮凝技术主要利用地下低质量浓度的聚合物,固定技术主要利用地下高质量浓度的聚合物,是聚合物驱后提高采收率首要的接替技术。

2.3.2 聚合物驱后的深部调剖技术

聚合物驱后的深部调剖技术适用于地层残留聚合物再利用后调剖作用仍不足的地层,尤其适用于聚合物波及系数相对较小的砾岩油藏。米冬玲等^[26]利用具有较好体膨性能的预交联颗粒调剖剂,对高渗透层进行封堵;柳荣伟^[27]用聚丙烯酰胺和柠檬酸铝制备可动凝胶,在锦16块的地层条件下研究了水驱和聚合物驱后可动凝胶的驱油效果;李永新等^[28]针对新疆红山嘴油田主力区红48断块下组油藏后期水驱、聚合物驱和深部调驱等技术进行了研究。结果表明,深部调驱技术是目前条件下改善该油藏开发效果较好的开采方式。

目前,国内外油田常用的深部调驱(调剖)技术主要有以下几类:交联聚合物溶液深部调剖技术、交联聚合物弱凝胶深部调剖技术、胶态分散凝胶(CDG)深部调驱技术、体膨凝胶颗粒深部调剖技术、含油污泥深部调剖技术、微生物深部调剖技术等。但任何深部调剖技术都不是普适的,应根据油藏实际情况及经济效益预测选择合适的体系,进行精细深部调剖,有针对性地挖掘各类油层剩余油。

随着油田开发问题的日益复杂化,单一技术的应用受到限制或效果不理想,而通过技术组合可以克服单一技术的不足而发挥组合技术的协同效应,如辽河油田采取交联聚合物溶液与体膨凝胶颗粒的技术组合,对存在大孔道或裂缝的水驱油藏取得了

较好的效果;孤岛油田采取聚合物与交联聚合物线团深部调驱技术相组合,有效改善了含聚流体“窜流”严重的现象;而我实验室针对克拉玛依砾岩油藏二次开发采用的交联聚合物溶液和交联聚合物弱凝胶技术组合获得了成功。

2.3.3 高效洗油技术

原油在油藏孔隙中被圈捕的主要作用力是黏滞力和毛细管力。若想改善油藏的微观驱油效率,使被捕集的油流动,必须降低界面张力。1966年,Wagner等^[29]的实验证明,界面张力必须低于0.07 mN/m才能提高驱替效率;Foster^[30]于1973年研究了毛管数与采收率的关系后指出,当毛管数达到 10^{-2} 时,残余油饱和度接近零,为使毛管数达到此值,界面张力必须下降到超低状态 10^{-3} mN/m数量级;Reed等^[31]的研究工作则进一步表明,活性剂水溶液和原油形成并保持超低界面张力的性能是决定驱替效率的关键,当界面张力达到 10^{-3} mN/m时,残余油饱和度可接近零。美国Oryx能源公司在德克萨斯州Eastland郡Ranger油田McCleskey砂层中进行的低界面张力表面活性剂/聚合物先导实验^[32],所增加油量为水驱后剩余油量的25%,经济效益比较可观。所以,低界面张力成为筛选驱油用表面活性剂和驱油体系的主要标准。

汇总众多研究结果,原油的族组成、表面活性剂的类型、碱、水质、水相盐含量等都与界面张力存在一定的关系,但是可以确定影响界面张力的主要因素还是表面活性剂,由于碱对地层、设备及后续原油加工过程造成的伤害,所以近年来,油田化学工作者通过研究不同类型的表面活性剂来达到超低界面张力。

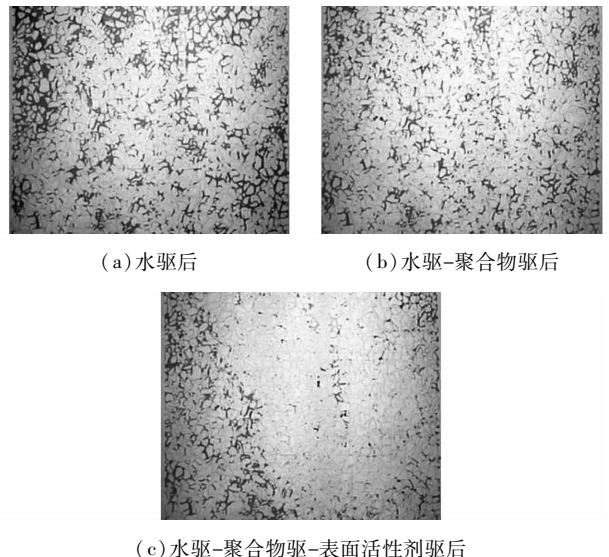


图8 聚合物驱后用表面活性剂驱油效果

王刚等^[33]利用新研制的甜菜碱两性表面活性剂及微观模型驱油实验,观察了该驱油体系对聚合物驱后残余油的作用,进一步完善了表面活性剂体系的微观驱油机理,见图 8。

从措施的投入和对提高采收率的贡献考虑,聚合物驱后提高采收率技术的使用顺序应为:地层残留聚合物的再利用技术、深部调剖技术、高效洗油技术。

3 七东一区砾岩油藏聚合物驱后提高采收率技术方案

综上所述,聚合物驱后采用何种提高采收率技术接替,主要由以下几点决定:必须能克服聚合物驱调剖能力不强的问题,在更大程度上提高波及体积;必须能克服聚合物驱洗油效率不高的缺点,提高洗油效率;对聚合物驱后储层物性的再认识程度;聚合物驱后剩余油的分布特点和准确的分布位置;尽可能降低成本。

通过以上聚驱后不同提高采收率技术的分析,结合本项目组长期以来在交联聚合物弱凝胶、交联聚合物溶液和甜菜碱表面活性剂应用的经验积累,总结交联聚合物微球凝胶复合体系在新疆油田二次开发中的应用成果和经验,针对七东一区砾岩油藏,筛选 2~3 种交联剂、与油藏空隙相匹配尺寸的微球和 2~3 种不同结构的表面活性剂,优选效果明显的地下残余聚合物交联技术、交联聚合物微球深部调剖技术和高效洗油表面活性剂技术进行有机组合,充分发挥三者协同作用,保证低成本下,提高采收率 5%~10%,为砾岩油藏聚驱后提高采收率提供成功的技术积累。

参考文献

- [1] 李庆昌,吴虹,赵立春,等.砾岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [2] 冯慧洁,聂小斌,徐国勇,等.砾岩油藏聚合物驱微观机理研究[J].油田化学,2007,24(3):232-237.
- [3] 黄延章,于大森,张桂芳.聚合物驱油微观机理研究[J].油田化学,1990,7(1):57-60.
- [4] 王德民,程杰成,杨清彦,等.黏弹性聚合物溶液提高岩心的微观驱油效率[J].石油学报,2000,21(5):45-52.
- [5] Xia Huifen, Wang demin, Wu Junzheng, et al. Elasticity of HPAM solution increases displacement efficiency under mixed wettability condition [R]. SPE 88456, 2004:1-8.
- [6] 夏惠芬,王德民,刘中春,等.黏弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理研究[J].石油学报,2001,22(4):60-66.
- [7] 夏惠芬,王德民,侯吉瑞,等.聚合物溶液的黏弹性对驱油效率的影响[J].大庆石油学院学报,2002,26(2):109-111.
- [8] 夏惠芬,孔凡顺,吴军政,等.聚合物溶液的弹性效应对驱油效率的作用[J].大庆石油学院学报,2004,28(6):29-31.
- [9] 夏惠芬,王德民,王刚,等.聚合物溶液在驱油过程中对盲端类残余油的弹性作用[J].石油学报,2006,27(2):72-76.
- [10] 吴文祥,刘洋.聚合物驱后岩心孔隙结构变化特性研究[J].油田化学,2002,19(3):253-256.
- [11] 王克文,孙建孟,关继腾,等.聚合物驱后微观剩余油分布的网络模型模拟[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):72-76.
- [12] 宋考平,杨钊,舒志华.聚合物驱剩余油微观分布的影响因素[J].大庆石油学院报,2004,28(2):25-27.
- [13] 兰玉波,杨清彦,李斌会.聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究[J].石油学报,2006,27(1):64-68.
- [14] 刘红现,许长福,胡志明.用核磁共振技术研究剩余油微观分布[J].特种油气藏,2011,18(1):96-97,125.
- [15] 孙建英,方艳君.聚驱后剩余油分布及挖潜技术研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(4):37-39.
- [16] 胡云亭,杨永利,关振良,等.下二门油田 H2III 油组交联聚合物驱后油藏剩余油分布特征[J].地质科技情报,2007,26(3):47-50.
- [17] 韩大匡.准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J].石油学报,2007,28(2):73-78.
- [18] 喻高明.聚合物驱后组合驱合理井网井距的确定[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2009,31(2):134-137,141.
- [19] 张宗樑.正韵律厚油层内夹层对水平井挖潜效果的影响分析[J].油气地质与采收率,2004,11(3):46-47.
- [20] 束青林.正韵律厚油层剩余油分布模式及水平井挖潜——以孤岛油田中一区 N53 层为例[J].油气地质与采收率,2004,11(6):34-38.
- [21] 闰存章,李秀生,常毓文,等.低渗透油藏小井距开发试验研究[J].石油勘探与开发,2005,32(1):105-108.
- [22] 赵福麟,王业飞,戴彩丽,等.聚合物驱后提高采收率技术研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):86-89.
- [23] 薛建泉,戴彩丽,由庆,等.聚驱后地层残留聚合物性能变化对再利用的影响[J].钻采工艺,2006,29(5):94-97.
- [24] 薄启炜,戴彩丽,王秀英.聚驱后利用地层聚合物絮凝调驱研究与应用[J].油田化学,2009,26(2):176-179.
- [25] 樊剑,韦莉,韩冬,等.聚合物驱后原位交联提高采收率的物模研究[J].油田化学,2011,28(3):323-326.
- [26] 米冬玲,卢洁,付青春.注聚末期颗粒调剖技术应用效果分析[J].大庆石油地质与开发,2006,25(s1):100-101.
- [27] 柳荣伟.水驱和聚合物驱后可动凝胶驱油效果的研究[J].精细石油化工进展,2010,11(4):9-12.
- [28] 李永新,李东文,李红,等.克拉玛依油田红山嘴砾岩油藏开采方式探讨[J].新疆石油地质,2008,29(4):507-509.
- [29] Wagner O R, Leach R O. Effect of interfacial tension on displacement efficiency[J]. Soc Petrol Engrs J, 1966, 6(4):335-344.
- [30] Foster W R. A low-tension waterflooding process[J]. J Petrol Technol, 1973, 25(2):205-210.
- [31] Reed R L, Healy R N. Improved oil recovery by surfactant and polymer flooding[M]. New York: Academic Press, 1977.
- [32] Chiou C S, Ketterhats G E. Polymer/surfactant transport in micellar flooding[J]. Society of Petroleum Engineers, 1981, 21(5):112-128.
- [33] 王刚,王德民,夏惠芬.聚合物驱后用甜菜碱型表面活性剂提高驱油效率机理研究[J].石油学报,2007,28(4):86-90. ■