

赵凹油田高温油藏冻胶泡沫调驱体系的研制及性能评价

王建勇¹,王思宇²,赵思琪³,石步乾⁴,张艳辉⁵,戴彩丽²

(1.中国石化油田勘探开发事业部,北京 100728; 2.中国石油大学(华东)重质油国家重点实验室,山东 青岛 266580; 3.天津大学 化工学院,天津 300072; 4.中国石化河南油田分公司第一采油厂,河南 南阳 474780; 5.中海油能源发展钻采工程研究院,天津 300452)

摘要:针对赵凹油田安棚主体区主力油层水窜严重的开发现状,通过室内实验方法,研制了适用于其油藏条件的冻胶泡沫调驱体系,该体系主要包括耐高温起泡剂和冻胶稳泡体系,即由质量分数为0.2%~0.3%的HN-1起泡剂、0.25%~0.35%的KY-6梳形聚合物和0.6%~0.8%的YG103酚醛树脂交联剂复配而成,并优化了冻胶泡沫的注入方式、气液比和注气速度,评价了冻胶泡沫的驱油性能,形成了适用于赵凹油田油藏条件的耐高温冻胶泡沫调驱技术。评价结果表明:酚醛树脂冻胶体系作为耐高温冻胶泡沫的稳泡体系,具有较好的稳泡效果,能够大幅度提高泡沫的半衰期;与分段塞注入方式相比,气液混注方式产生的冻胶泡沫具有更好的封堵性能;冻胶泡沫的最佳气液比为1:1,气液比过高或过低均会导致冻胶泡沫的阻力系数和封堵能力下降;最佳注气速度为0.5 mL/min,注气速度过高或过低均会使冻胶泡沫封堵能力下降。驱油实验结果表明,冻胶泡沫调驱体系具有良好的选择性封堵性能,剖面改善率达99%,采收率提高了44.6%。

关键词:冻胶泡沫 注入方式 气液比 注入速度 赵凹油田
中图分类号: TE357.42 **文献标识码:** A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0057-05

赵凹油田安棚主体区主力油层油藏温度高(100 ℃)且储量集中,随着赵凹油田逐步进入高含水、特高含水期^[1-2],稳产难度增大,多轮次调剖施工后,前期使用的调剖剂在高温油藏条件下有效期短,选择性差,对地层伤害严重,需要研制具有良好耐温性能的选择性调剖剂。泡沫是指气体分散于液体中所形成的体系^[3-4],由水、气体和起泡剂组成,其通过地层中的孔隙喉道时产生贾敏效应,能够增大流体流动阻力,从而达到封堵大孔道的目的。另外,因为泡沫具有遇水稳定、遇油消泡的特点,故其具有非常好的选择性封堵性能。但因其在高温条件下的稳定性较差,调剖有效期较短,须引入稳泡体系以增强其稳定性。而冻胶是聚合物与交联剂发生交联反应后形成的胶状物,具有良好的粘弹性。使用冻胶作为泡沫的稳泡体系,形成以冻胶为分散介质的冻胶泡沫,其良好的粘弹性不但能有效提高泡沫的稳定性,而且包裹在冻胶中的气体还

可增大冻胶的封堵强度和波及面积。因此,冻胶泡沫比普通泡沫更稳定,比单纯冻胶的封堵强度和波及面积更大,封堵能力更强,有效期更长,能够满足赵凹油田高温油藏的调剖要求^[5]。为此,笔者在室内优选了适用于赵凹油田高温油藏条件的起泡剂,优化了耐温冻胶配方作为泡沫稳泡体系,并考察了不同施工参数对冻胶泡沫注入及封堵性能的影响,驱油实验结果表明,冻胶泡沫调驱体系在赵凹油田油藏条件下具有较好的选择性封堵性能,能够有效提高油田产量和采收率。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器主要包括:LB-30型平流泵、DY-III型多功能物理模拟装置、气体流量计、泡沫发生器、Ross-Miles法发泡仪和Memmer恒温干燥箱等。

收稿日期:2013-05-06。

作者简介:王建勇,男,高级工程师,从事油田开发研究和管理工作。联系电话:(010)59968545,E-mail:wangjy@sinopec.com。

基金项目:长江学者和创新团队发展计划“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(IRT1294),山东省杰出青年基金“提高采收率与采油化学”(JQ201013),国家自然科学基金“铅冻胶分散体的制备、表征及其在多孔介质中的运移规律的研究”(51174221),教育部新世纪优秀人才支持计划“提高采收率与采油化学”(20110226)。

实验试剂主要包括:相对分子质量为 $2\ 300\times 10^4$ 、水解度为26.8%、固含量为82.9%的KY-6梳形聚合物;有效物含量为40%~50%的YG103酚醛树脂交联剂,工业品;河南油田提供的S23,HN-1,HN-3,GCF-1,FYW-1,FYF-1和FYF-2高温起泡剂;烷基醇酰胺(Ninol,工业品);十二烷基硫酸钠(SDS,化学纯)。实验用油为赵凹油田安棚主体区原油,其地层粘度为 $5.8\text{ mPa}\cdot\text{s}$,密度为 0.765 g/cm^3 ;实验用水为赵凹油田安棚主体区油田现场用水,其矿化度为 $3\ 681.2\text{ mg/L}$,水型为 NaHCO_3 型。

1.2 实验方法

泡沫性能评价方法 通过改进的Ross-Miles法,将气体流量计连接在Ross-Miles法发泡仪的下侧,通过控制气体流量,考察在一定气液比下不同起泡剂在油藏温度下的起泡能力和稳泡能力。泡沫体系的综合性能由泡沫的起泡能力和稳泡能力共同决定,笔者将一定气液比条件下泡沫体系的起泡体积与半衰期的乘积定义为泡沫综合值,用该值综合评价不同起泡剂产生泡沫的性能。

泡沫物理模拟方法 在室内条件下模拟赵凹油田油藏条件,在不同气液比、不同注气速度条件下,借助泡沫发生器生成泡沫并注入到填砂管内,通过测定不同施工参数条件下泡沫阻力系数的变化,对比评价泡沫的注入性能和封堵性能,从而优化泡沫的施工参数。

泡沫驱油性能评价 在室内条件下,通过双填砂管模型模拟油藏非均质性,实验中定义高渗和低

渗产液分数分别为高渗透层和低渗透层的产液量与总产液量的比值,高渗和低渗产油分数分别为高渗透层和低渗透层的产油量与总产油量的比值,用来反映剖面吸水情况。具体实验步骤包括:①将高、低渗透填砂管分别填满石英砂,称干重,抽真空饱和模拟水,称湿重,计算孔隙体积,并分别测定高、低渗透填砂管的初始渗透率;②将2个填砂管分别饱和油,并联水驱至含水率达98%;③注入冻胶泡沫调驱体系后,在地层温度下老化30 h;④待冻胶泡沫成冻后,继续水驱至含水率为98%,计算采收率增值。

2 配方优化

2.1 耐高温起泡剂的优选

采用改进的Ross-Miles法,在注气速度为 15 mL/min 、气液比为1.5:1、温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察了S23,HN-1,HN-3,GCF-1,Ninol,SDS,FYW-1,FYF-1和FYF-2共9种高温起泡剂的起泡性能。实验结果(图1)表明:随着起泡剂质量分数的增大,泡沫起泡体积和半衰期均呈现先增大后减小的趋势,因此泡沫综合值也呈现先增大后减小的趋势;HN-1,FYF-1和FYW-1起泡剂的半衰期明显高于其他6种起泡剂,其中HN-1起泡剂的质量分数为0.2%~0.3%时,泡沫综合值达到最大且大于其他8种起泡剂,说明其泡沫综合性能最佳。因此,将质量分数为0.2%~0.3%的HN-1起泡剂作为优选起泡剂。

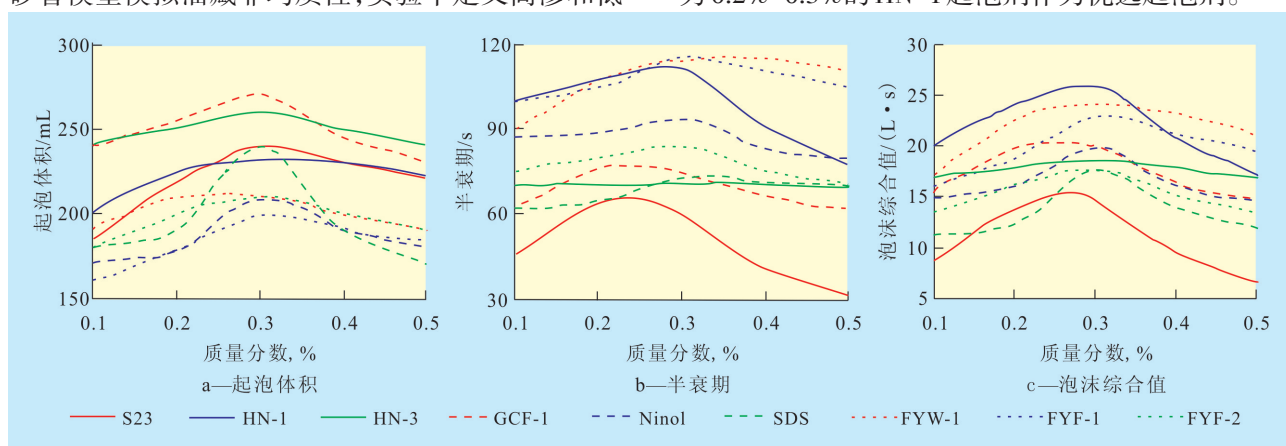


图1 起泡剂质量分数对起泡体积、半衰期和泡沫综合值的影响

在注气速度为 15 mL/min 、气液比为1.5:1、温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察了HN-1起泡剂的热稳定性。实验结果(图2)表明,HN-1起泡剂在老化15和30 d后,起泡体积和半衰期略有下降,导致泡沫综合值略微下降但幅度较小,可见HN-1起泡剂在高温下的热稳定性好。

2.2 冻胶稳泡体系配方优化

使用油田现场水配制冻胶稳泡体系成胶液,以冻胶强度达到强度代码法^[6]中E级别的时间为成冻时间,测定冻胶在温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时的成冻时间。由YG103酚醛树脂冻胶的成冻实验结果(图3)可以看出,不同质量分数的KY-6梳形聚合物与酚醛树脂

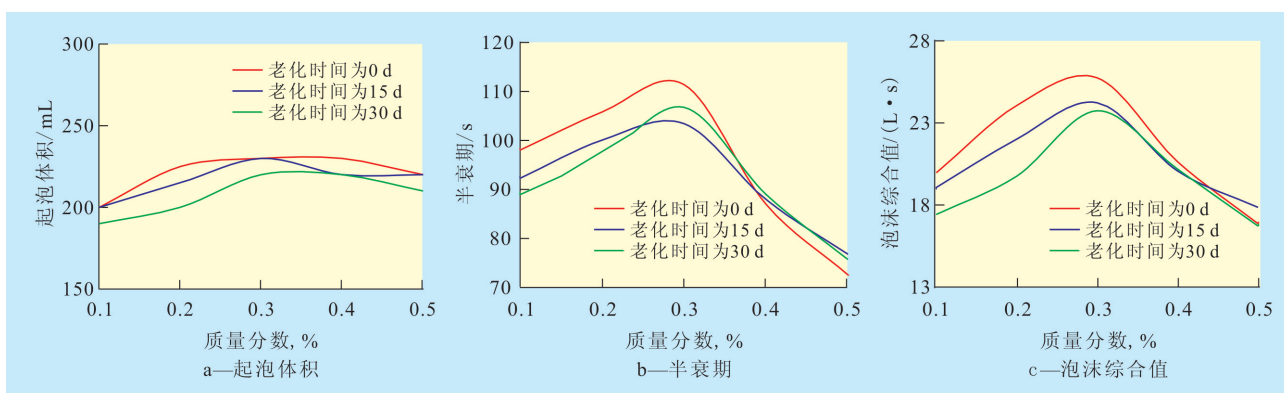


图2 老化时间对起泡体积、半衰期和泡沫综合值的影响

交联剂均可形成结构稳定的冻胶体系,并且随着聚合物质量分数和交联剂质量分数的增大,成冻时间变短^[7-8]。这是因为聚合物和交联剂质量分数越大,酰胺基越多,酰胺加成反应越快,成冻时间越短。结果表明,酚醛树脂冻胶成冻时间可调,能够满足现场注入的需求。

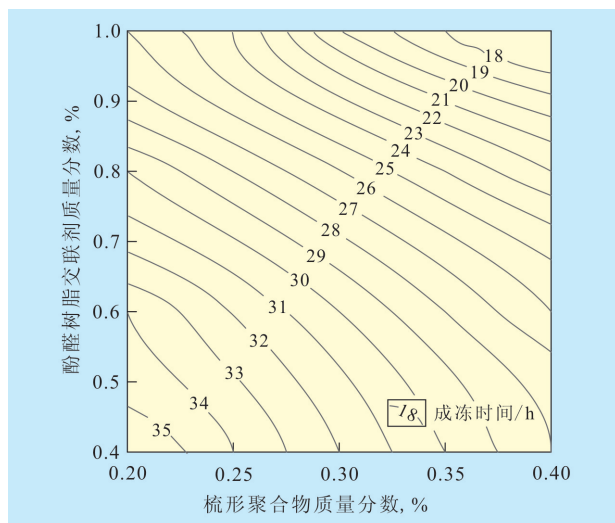


图3 YG103酚醛树脂冻胶成冻时间等值线

2.3 冻胶泡沫调驱体系配方优化

在HN-1起泡剂质量分数为0.3%、注气速度为15 mL/min、气液比为1.5:1和温度为100 ℃的条件下,采用改进的Ross-Miles法,评价了不同质量分数的KY-6梳形聚合物与不同质量分数的YG103酚醛树脂交联剂反应生成冻胶的稳泡性能。

由不同配方冻胶对泡沫性能的影响结果(表1)可见:随着冻胶的形成,冻胶泡沫的起泡体积有所降低,但降幅不大,说明冻胶稳泡体系降低了起泡剂的起泡能力;但泡沫半衰期在冻胶发生交联反应后增幅较大,说明冻胶稳泡体系可有效提高泡沫的稳定性,使冻胶泡沫的泡沫综合值显著增大。这是由于梳形聚合物与酚醛树脂交联剂反应形成的冻

胶能够作为冻胶泡沫的粘弹性膜,有效提高了泡沫的液膜强度,从而增强了泡沫的稳定性^[9]。因此,建议现场采用由KY-6梳形聚合物与YG103酚醛树脂交联剂复配而成的冻胶作为稳泡体系。综上所述,研制的冻胶泡沫调驱体系由质量分数为0.2%~0.3%的HN-1起泡剂、0.25%~0.35%的KY-6梳形聚合物和0.6%~0.8%的YG103酚醛树脂交联剂复配而成。

表1 不同配方冻胶对泡沫性能的影响

质量分数, %			起泡 体积/ mL	半衰 期/s	泡沫 综合值/ (mL·s)
HN-1 起泡剂	KY-6梳形 聚合物	YG103酚醛 树脂交联剂			
0.3	0	0	230	112	25 760
0.3	0.25	0.6	175	2 073	362 775
0.3	0.25	0.8	160	2 410	385 600
0.3	0.30	0.6	160	2 360	377 600

3 施工参数优化

3.1 注入方式优化

目前泡沫主要有气液混注和分段塞注入2种注入方式^[10]。利用泡沫物理模拟方法对比不同注入方式对冻胶泡沫性能的影响。实验结果(图4)表明:在气、液注入速度均为1 mL/min的条件下,气液混注方式的阻力系数最高,多段塞注入方式的阻力系数次之,少段塞的阻力系数最低。这是因为气液混注方式是在地面产生冻胶泡沫,形成的冻胶泡沫在注入地层的过程中,存在较强的贾敏效应,流动阻力较大,导致泡沫注入过程阻力系数较高,但这种方式能够使气体与起泡剂溶液充分接触发泡,形成的冻胶泡沫具有较高的残余阻力系数,封堵效果最佳;分段塞注入方式是在地层中产生冻胶泡沫,注入过程阻力系数较低,易注入,但气体与起泡剂接触不充分,产生的冻胶泡沫较少,残余阻力系数较

低,封堵效果一般;相对少段塞注入方式,多段塞注入过程中气体与起泡剂溶液接触更加充分,生成的冻胶泡沫更多,因此具有较高的残余阻力系数,封堵效果更好。

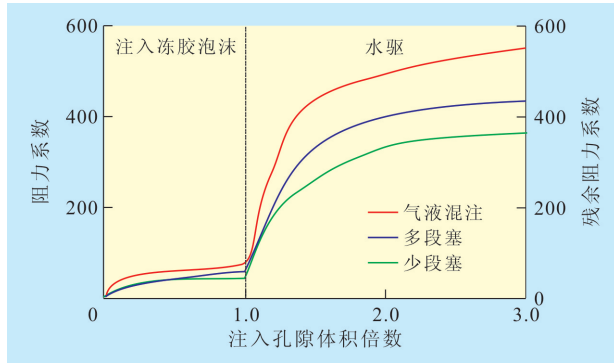


图4 注入方式对冻胶泡沫调驱体系性能的影响

3.2 气液比优化

不同气液比条件下生成的泡沫具有不同的泡沫特征值^[11]。利用泡沫物理模拟方法对比不同气液比对冻胶泡沫性能的影响。由实验结果(图5)可以看出:当气液比为1:1时,冻胶泡沫的残余阻力系数最高,封堵效果最好,这是因为此时形成的冻胶泡沫最致密。气液比过高或者过低均会使冻胶泡沫的残余阻力系数降低,封堵性能变差,因此冻胶泡沫调驱存在最佳注入气液比。这是由于气液比过低时,冻胶泡沫体积较小,对岩心的封堵能力较差,表现为在注入过程中阻力系数低,易注入,在后续水驱过程中残余阻力系数低,封堵效果较差;而气液比过高时,产生的冻胶泡沫为多面体且体积较大,易破碎,表现为在注入过程中易发生气窜造成阻力系数降低,在后续水驱过程中,残余阻力系数低,封堵能力差。故冻胶泡沫的最佳气液比为1:1。

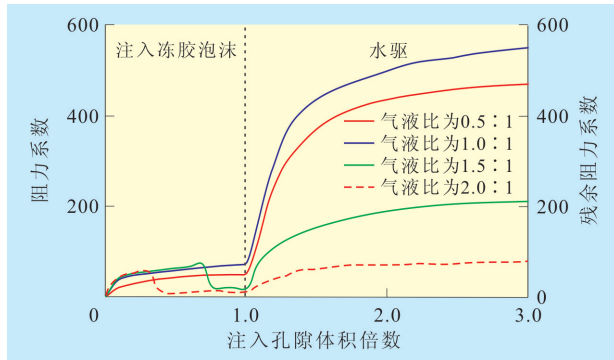


图5 气液比对冻胶泡沫性能的影响

3.3 注气速度优化

利用泡沫物理模拟方法对比不同注气速度对冻胶泡沫性能的影响。分析实验结果(图6)可知:在气液比为1:1的条件下,注气速度为0.5 mL/min

时的阻力系数较低,易注入,成冻后的残余阻力系数较高,封堵性能较好,因此最佳注气速度为0.5 mL/min。这主要是由于当注气速度过低时,冻胶泡沫主要是通过液膜滞后机理生成,生成的冻胶泡沫较大,稳定性差,表现为残余阻力系数低,封堵性能差;而注气速度过高时,冻胶泡沫主要是通过缩颈分离机理生成,产生的气体分离后,冻胶不能迅速填充到气泡离开的孔隙,使后续的冻胶泡沫不能连续顺利生成,并且快速运移产生较强的剪切作用,对冻胶的稳泡作用也会产生一定程度的负面影响。因此,最佳注气速度为0.5 mL/min。

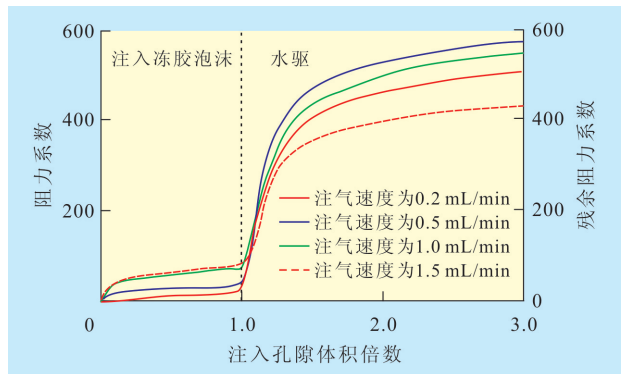


图6 注气速度对冻胶泡沫性能的影响

4 驱油性能评价

在气液比为1:1、注气速度为0.5 mL/min、温度为100℃的条件下,采用气液混注的注入方式,借助双管并联模型评价冻胶泡沫调驱体系的驱油性能。冻胶泡沫调驱体系由质量分数为0.3%的KY-6梳形聚合物、0.6%的YG103酚醛树脂交联剂和0.3%的HN-1起泡剂复配而成,双管并联模型中高渗透管渗透率为 $1527 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,低渗透管渗透率为 $109 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由双管并联物理模型实验结果(图7,图8)可知,注入冻胶泡沫调驱体系后,非均质双管模型高渗透层实现了有效封堵,低渗透层的产液

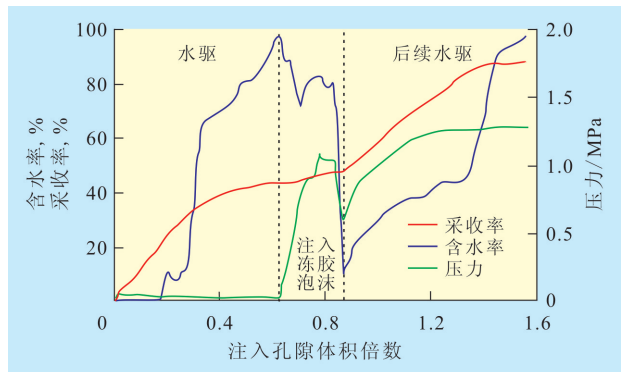


图7 冻胶泡沫调驱体系驱油实验结果

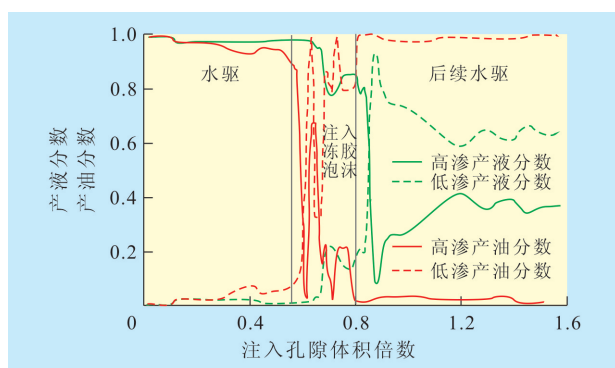


图8 调驱前后不同渗透率地层产液变化

量和产油量明显上升,实现了液流转向,剖面改善率达99%,采收率提高了44.6%。

5 结论

通过室内实验,优选了适用于赵凹油田高温油藏条件的冻胶泡沫调驱体系,其中起泡剂具有较好的起泡性能及热稳定性能,冻胶稳泡体系具有较好的成冻性能,复配后形成的冻胶泡沫调驱体系综合性能更好。室内物理模拟实验发现,冻胶泡沫调驱体系在气液混注的条件下,在气液比为1:1、注气速度为0.5 mL/min时封堵性能最佳,易注入且成冻后封堵能力强。双管并联驱油实验结果表明,冻胶泡沫调驱体系具有较好的选择性封堵性能,剖面改善率达99%,能够有效增产原油,提高采收率达44.6%。

参考文献:

- [1] 张艳辉,戴彩丽,徐星光,等.河南油田氮气泡沫调驱技术研究与应用[J].断块油气田,2013,20(1):129-132.
- [2] 李兆敏,刘伟,李松岩,等.多相泡沫体系深部调剖实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(1):55-58.
- [3] 戴彩丽,赵福麟,焦翠,等.冻胶泡沫在火烧山裂缝性油藏油井堵水中的应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2007,29(1):129-132.
- [4] 刘永革,刘慧卿,庞占喜,等.底水稠油油藏双水平井泡沫压脊技术及参数优化[J].油气地质与采收率,2012,19(4):74-77.
- [5] 韩树柏,汪小平,赵修太,等.自生气耐温冻胶泡沫调驱体系研制与性能评价[J].油气地质与采收率,2011,18(1):34-36,40.
- [6] Sydansk R D. Delayed in situ crosslinking of acrylamide polymers for oil recovery applications in high-temperature formations: US, 4844168[P].1989-07-04.
- [7] 戴彩丽,王业飞,冷强,等.长成冻时间的深部调驱剂研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,2003,18(1):21-23,26.
- [8] 高建,岳湘安,侯吉瑞,等.温度对HSG冻胶体系流变性的影响[J].材料研究学报,2006,20(5):552-555.
- [9] 徐国瑞,杨丽媛,李兆敏,等.冻胶泡沫体系封堵性能评价[J].应用化工,2013,42(4):583-586.
- [10] 赵淑霞,彭彦素,于红军,等.氮气泡沫驱提高高渗透特高含水油藏采收率技术——以梁家楼油田纯56块为例[J].油气地质与采收率,2010,17(2):74-76.
- [11] 张广卿,刘伟,李敬,等.泡沫封堵能力影响因素实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):44-46.

编辑 常迎梅

(上接第48页)

- [2] 康玉柱.塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J].石油实验地质,2007,29(3):217-223.
- [3] 康玉柱.中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布[J].天然气工业,2008,28(6):1-12.
- [4] 张玲,侯庆宇,庄丽,等.储量估算方法在缝洞型碳酸盐岩油藏的应用[J].油气地质与采收率,2012,19(1):24-27.
- [5] 王树华,魏萍.SEC储量动态评估与分析[J].油气地质与采收率,2012,19(2):93-94.
- [6] 张强.富台潜山三重介质油藏地质建模[J].油气地质与采收率,2007,14(5):50-52.
- [7] 漆立新,云露.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J].石油与天然气地质,2010,31(1):1-12.
- [8] 李阳,智慧文.塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J].石油学报,2011,32(1):101-106.
- [9] 肖玉茹,何峰煜,孙义梅.古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J].石油与天然气地质,2003,24(1):75-80.
- [10] 夏日元,唐健生,邹胜章,等.塔里木盆地北缘古岩溶充填物包裹体特征[J].中国岩溶,2006,25(3):246-249.
- [11] 黄成毅,邹胜章,潘文庆.古潮湿环境下碳酸盐岩缝洞型油气藏结构模式——以塔里木盆地奥陶系为例[J].中国岩溶,2006,25(3):250-255.
- [12] 周文,李秀华,金文辉,等.塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J].岩石学报,2011,27(8):2339-2348.
- [13] 郑应钊,刘国利,马彩琴,等.多条件约束地质建模技术在青西油田裂缝性油藏中的应用[J].油气地质与采收率,2011,18(3):77-80,93.

编辑 王星