

文章编号:1009-9603(2021)04-0101-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.04.012

## 新型耐特高温抗水解型聚合物驱油性能

徐辉<sup>1</sup>,宋敏<sup>2</sup>,孙秀芝<sup>1</sup>,何冬月<sup>1</sup>,李海涛<sup>1</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015;  
2.中国石化胜利油田分公司油气开发管理中心,山东东营257000)

**摘要:**胜利油区特高温油藏温度为95~120℃,目前已有的驱油用聚合物在该温度下放置30d后水解度约为100%,黏度仅为1mPa·s,驱油性能大幅降低,无法满足此类油藏聚合物驱要求。为了改善聚合物在特高温条件下的热稳定性和驱油性能,通过引入AMPS单体和耐特高温的N-乙基吡咯烷酮单体,优选了新型耐特高温抗水解型聚合物,研究了聚合物在特高温油藏下的增黏性能、流变性能、注入性能及驱油性能,重点研究了聚合物在120℃下的水解度和黏度热稳定性。结果表明,与相对分子质量相近的常规部分水解聚丙烯酰胺相比,耐特高温抗水解型聚合物初始黏度提高1倍以上,黏弹性能大幅增加,且具有良好的注入性和驱油效果,120℃下放置30d后水解度仍为0,黏度不变,具有良好的热稳定性,有望应用在胜利油区特高温油藏,突破化学驱提高采收率温度界限。

**关键词:**特高温油藏;抗水解型聚合物;热稳定性;黏弹性能;驱油性能

中图分类号:TE357.46+1

文献标识码:A

## Study on oil displacement performance of a new type of polymer with ultra-high temperature and hydrolysis resistance

XU Hui<sup>1</sup>, SONG Min<sup>2</sup>, SUN Xiuzhi<sup>1</sup>, HE Dongyue<sup>1</sup>, LI Haitao<sup>1</sup>

(1.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2.Oil and Gas Development Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** In the Shengli Oilfield, the temperature of ultra-high temperature reservoirs is 95–120 °C. The existing polymer for oil displacement, after being placed at this temperature for 30 d, has a hydrolysis degree of about 100% and viscosity of only 1 mPa · s. Its oil displacement performance is greatly affected and cannot meet the polymer flooding requirements of this type of reservoirs. To improve the thermal stability and oil displacement performance of the polymer at ultra-high temperatures, we selected a new type of polymer with ultra-high temperature and hydrolysis resistance by introducing the AMPS and NVP monomer. We studied the performance of the polymer, including viscosity-increasing, rheology, injection and oil displacement, in ultra-high temperature reservoirs, and focused on the thermal stability of hydrolysis degree and viscosity of the polymer at 120 °C. The results demonstrate that compared with conventional partially hydrolyzed polyacrylamide with similar relative molecular mass, the polymer in this paper has the more than doubled initial viscosity. With the viscoelastic performance greatly enhanced, it performs well in injection and oil displacement. After being placed at 120 °C for 30 d, it still has a hydrolysis degree of 0 and constant viscosity, indicating great thermal stability. It is promising to be applied to the ultra-high temperature reservoirs in the Shengli Oilfield, breaking through the temperature limit of EOR by chemical flooding.

**Key words:** ultra-high temperature oil reservoir; anti-hydrolysis polymer; thermal stability; viscoelastic performance; oil displacement performance

收稿日期:2020-12-05。

作者简介:徐辉(1979—),男,江苏徐州人,高级工程师,博士,从事三次采油方面的研究工作。E-mail:44053012@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

依据油藏温度、矿化度和钙镁离子含量,可以将胜利油区适合化学驱油藏资源分为五类, I类到IV类油藏温度小于95℃,常规部分水解聚丙烯酰胺(简称常规HPAM)和超高分多元共聚物<sup>[1-3]</sup>能够满足化学驱性能要求。V类油藏为特高温油藏,温度为95~120℃,在此温度条件下常规HPAM和超高分多元共聚物水解速度均大幅增加<sup>[4-5]</sup>,生成的高浓度羧酸根与钙镁离子络合产生沉淀,导致聚合物黏度稳定性和驱油性能大幅降低,因此如何抑制聚合物水解成为解决特高温油藏化学驱的关键。

目前抑制驱油用HPAM水解速度主要是通过引入2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)单体来实现,由于AMPS单体中叔丁基的空间位阻效应和强酸性负离子的排斥作用,使得它能够有效阻碍氢氧根离子对酰胺根的进攻,但当共聚物中丙烯酰胺的水解作用使得丙烯酸的摩尔占比达到50%时,相邻的羧酸根起着分子内催化作用,促使AMPS单体发生水解<sup>[6-9]</sup>,因此引入AMPS和丙烯酰胺(AM)共聚,只适用于温度小于95℃的油藏,对于温度大于95℃的油藏,需要引入其他抗水解单体抑制聚丙烯酰胺水解。N-乙基吡咯烷酮(NVP)是一种含有五元环的内酰胺类功能单体,其在高温条件下可以阻止酰胺基水解,增强聚合物在高温条件下的稳定性<sup>[10-13]</sup>,目前将NVP引入到AM和AMPS中共聚形成的三元共聚物用于钻井液的降滤失剂,有较好的效果,但较少用在化学驱三次采油提高采收率中。为此,笔者选择了常规HPAM和AM-AMPS-NVP抗水解多元共聚物,对比了两者的基本物化性能、流变性、黏弹性和驱油效果,重点研究了抗水解多元共聚物在120℃下的热稳定性,以期为适合胜利油区特高温油藏驱油用聚合物的研发和应用提供借鉴。

## 1 实验器材与方法

### 1.1 实验器材

实验仪器主要包括:磁力搅拌器及转子、乌氏黏度计、水解度测定仪、电热恒温鼓风干燥箱、安东帕公司生产的MCR301流变仪、TA公司生产的TGAQ500热失重分析仪、真空手套箱及室内物理模拟实验评价装置。

实验用聚合物为由法国爱森公司生产的常规HPAM和抗水解多元共聚物,其相对分子质量分别为 $1.350 \times 10^4$ 和 $1.330 \times 10^4$ 。实验用水为胜利油田V类油藏模拟水,总矿化度为44 465 mg/L,钙镁离子质量浓度之和为2 015 mg/L。实验原油为东辛油田

广利莱1西区块原油,地层原油黏度为10 mPa·s。实验岩心模型为单管石英砂填充岩心,长度为30 cm,直径为2.5 cm,岩心渗透率为470 mD。

### 1.2 实验方法

**聚合物溶液配制** 取一定质量的聚合物干粉,用模拟水配制质量浓度为5 000 mg/L的母液,熟化1 d后,稀释成不同质量浓度的目标溶液。

**聚合物基本物化性能评价** 取两种聚合物干粉,根据SY/T 5862—2008<sup>[14]</sup>分别测定干粉的水解度和特性黏数,同时测试模拟水配制的质量浓度为2 500 mg/L的聚合物溶液表观黏度。

**聚合物剪切流变性及其黏弹性评价** 在实验温度为95℃的条件下,选择质量浓度为2 500 mg/L的两种聚合物溶液,在剪切速率为1~300 s<sup>-1</sup>的条件下,测试两种聚合物溶液的表观黏度随剪切速率变化,并拟合剪切流变曲线,得到聚合物溶液剪切流变性能;在聚合物线性黏弹区下(应变小于20%),将频率固定在1 Hz,测试两种聚合物溶液的黏弹模量及相位角,得到聚合物的黏弹性能。

**聚合物驱油效果评价** 在实验温度为95℃的条件下,首先对岩心饱和油,然后水驱至含水率为95%,接着分别注入质量分数为0.25%的0.3 PV的常规HPAM和抗水解多元共聚物,注入速度为0.25 mL/min,最后后续水驱至含水率为100%,考察注入两种聚合物后含水率和注入压力变化情况,并通过曲线拟合得到聚合物提高采收率效果。

**聚合物干粉热稳定性评价** 取聚合物干粉0.5 mg,放入热失重分析仪托盘中,设置升温速率为10℃/min,温度设置范围为40~700℃,循环气体氛围为空气,评价随着温度的升高聚合物热失重速率的变化,分析得到聚合物干粉热稳定性。

**聚合物溶液黏度及水解度热稳定性评价** 取配制好的质量浓度为2 500 mg/L的两种聚合物溶液,在真空手套箱中通氮除氧,放在安瓿瓶中密封,放入120℃烘箱中,每隔一定时间测试聚合物溶液黏度和水解度变化。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 聚合物基本物化性能评价结果

基本物化性能评价结果表明,常规HPAM和抗水解多元共聚物特性黏数分别为1 880和1 875 mL/g,表明两个聚合物在只含有钠离子的盐水中分子流体力学尺寸相当,但地层水中除了含有钠离子,还含有钙镁离子,常规HPAM由于含有大量弱酸性羧

酸根基团,因此水解度较高,达到23.0%,而羧酸根基团会与水中的钙镁离子产生强的络合效应,从而使聚合物分子链卷曲而导致分子流体力学体积大幅降低,表现为在水溶液中聚合物分子线团减小,分子间摩擦阻力减弱,因此相同特性黏数的常规HPAM表观黏度较低,仅为7.1 mPa·s。抗水解多元共聚物由于没有引入羧酸根基团,因此水解度为0,且引入的AMPS是含有强酸性磺酸根的强极性单体,它不会与二价的钙镁离子产生络合效应<sup>[15]</sup>,从而能够有效提高聚合物抗钙镁离子能力,同时抗水解多元共聚物还引入了NVP非离子单体,对外不显电性,不会与钠离子及钙镁离子相结合,AMPS和NVP两者的相互协同作用能够大幅提高聚合物抗钙镁离子的能力,在温度为95℃的条件下,质量分数为0.25%的抗水解多元共聚物黏度相对于常规HPAM提高了1倍以上,达到18.6 mPa·s,在胜利油田V类油藏高温、高盐、高钙镁离子条件下,高的黏度有利于聚合物在地层中扩大波及体积,提高原油采收率。

## 2.2 聚合物剪切流变性能评价结果

稳态剪切流变是非线性、大形变的剪切流动下的流变特性,与地层中的流动比较接近,它反映了聚合物在地层不同剪切速率下黏度变化,主要体现聚合物的黏性特征,同时得到的剪切流变曲线还可以反映聚合物弹性的变化。

剪切流变性能评价实验结果(图1)表明,两种聚合物溶液表观黏度随着剪切速率的增加逐渐降低,剪切流变曲线均呈现剪切稀释假塑性流体特征。通过对流变曲线进行拟合发现,两种聚合物溶液表观黏度与剪切速率均呈幂函数关系,即:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

(1)式中的 $K$ 值代表聚合物在水溶液中的增稠系数,其值越大,聚合物在水溶液中的增稠能力越强,越有利于驱油,常规HPAM溶液的 $K$ 值(14.320 mPa·s <sup>$n$</sup> )较小,说明聚合物在高钙镁离子盐水中增稠能力较差;抗水解多元共聚物的 $K$ 值(33.802 mPa·s <sup>$n$</sup> )相对于常规HPAM提高了1倍以上,说明引入AMPS和NVP单体后,大幅提高了聚合物抗钙镁离子能力,增稠能力大幅提高。(1)式中的 $n$ 值表示聚合物在水溶液中的幂律指数,其与溶液的假塑性相关, $n$ 值越大,说明聚合物分子在水溶液中相互作用越弱<sup>[16]</sup>,弹性越低,越不利于驱油,常规HPAM的 $n$ 值(0.798)较大,表明聚合物分子间相互作用能力弱,弹性较低,而抗水解多元共聚物 $n$ 值(0.683)较小,表明聚合物分子间相互作用强,弹性高,驱油性

能更好。

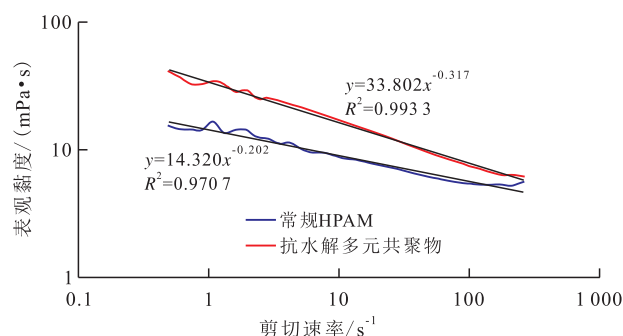


图1 常规HPAM和抗水解多元共聚物剪切流变性对比

Fig.1 Comparison of shear rheology between conventional HPAM and anti-hydrolysis multicomponent copolymer

## 2.3 聚合物黏弹性能评价结果

剪切流变性能评价只能定性得到聚合物的黏性和弹性大小,无法定量测试聚合物的黏弹性能,振荡剪切流变是对聚合物施加正弦剪切应变,而应力作为动态响应加以测定,能够定量得到聚合物的黏性模量、弹性模量和相位角等,黏性模量和弹性模量能够反映聚合物黏弹性能,黏性模量和弹性模量越高,黏弹性越好,高黏弹性有利于聚合物在地层中产生更高的拉伸黏度,从而扩大聚合物在地层中的波及能力。相位角反映聚合物弹性占比,相位角越低,弹性占比越高,有利于提高驱油效率<sup>[17-19]</sup>。

由两种聚合物黏弹模量对比实验结果(图2)可知,在相同浓度下,抗水解多元共聚物弹性模量、黏性模量和复合模量均大幅高于常规HPAM,表明在高盐、高钙镁离子水溶液环境中,抗水解多元共聚物分子链更加舒展,有利于分子链之间相互缠绕,增强聚合物的黏弹性能,常规HPAM由于分子链中的羧酸根与盐产生离子效应,分子链卷曲严重,同时在高钙镁离子环境下,羧酸根与钙镁离子发生强的络合效应,使得分子链聚集产生沉淀,导致聚合物分子与水产生相分离,水溶液中的聚合物分子有

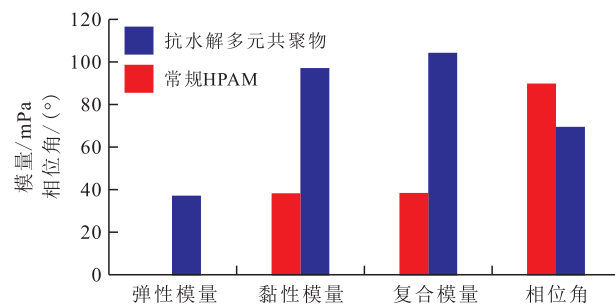


图2 常规HPAM和抗水解多元共聚物黏弹模量和相位角对比

Fig.2 Comparison of viscoelastic modulus and phase angle between conventional HPAM and anti-hydrolysis multicomponent copolymer



效浓度大幅降低,减弱了分子链间相互作用,因此,常规 HPAM 所测相位角为 90°,没有弹性,只有黏性,无法依靠弹性作用扩大波及体积,提高驱油效率。

### 2.4 聚合物驱油效果评价结果

对比两种聚合物的驱油效果(图3)可知,在胜利特高温、高盐、高钙镁离子的油藏条件下,在水驱至含水率为95%以上,分别注入0.3 PV抗水解多元共聚物和常规 HPAM 后,前者由于具有更高的黏弹性能和弹性占比,注入压力(0.075 MPa)更高,比常规 HPAM(0.05 MPa)提高了50%,扩大波及能力更强,因此采出液含水率降低漏斗(1.2~1.9 PV)比常规 HPAM(1.5~1.9 PV)更宽,最终采收率(81.6%)相对于水驱(64.4%)提高了17.2%,而常规 HPAM 由于黏弹性能和弹性占比较低,最终采收率(74.0%)相对于水驱仅提高了9.6%,说明抗水解多元共聚物具有更好的驱油效果。

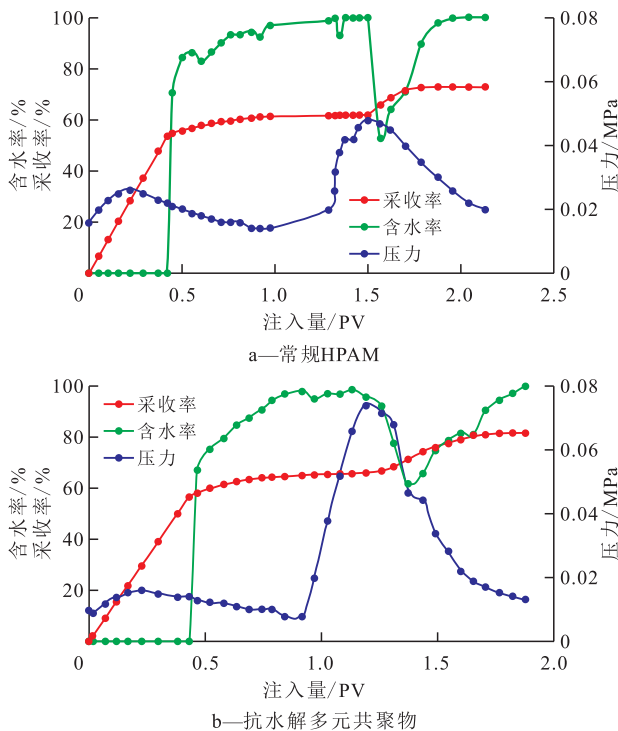


图3 常规HPAM和抗水解多元共聚物驱油效果对比

Fig.3 Comparison of oil displacement between conventional HPAM and anti-hydrolysis multicomponent copolymer

### 2.5 聚合物热稳定性能评价结果

聚合物除了需要具有良好的增黏性、黏弹性和驱油效果外,在地层中的热稳定性同样影响其长期驱油效果,因此进一步研究了聚合物干粉的热稳定性和水溶液的长期稳定性。

#### 2.5.1 聚合物干粉热稳定性

由两种聚合物干粉的热失重 DTG 曲线(图4)可

知:随着温度的升高,常规 HPAM 整体出现3个大的热失重峰,在温度为40~200 °C时,主要为聚合物中的水分及不稳定添加剂的热失重峰;温度为200~300 °C时,由于常规 HPAM 侧基的羧酸根中有不稳定的羰基,因此易发生碳氧键断裂降解,形成侧链羧酸根的热失重峰;而当温度大于300 °C时,主要为亚酰胺基的分解和主碳链的降解所形成的热失重峰。而抗水解多元共聚物由于水解度为0,不含有羧酸根,在温度小于330 °C时,只有聚合物中的水分和不稳定添加剂的热失重峰,在温度大于330 °C时才出现主碳链的降解,因此抗水解多元共聚物干粉的热稳定性相对于常规 HPAM 干粉呈现大幅度提高。

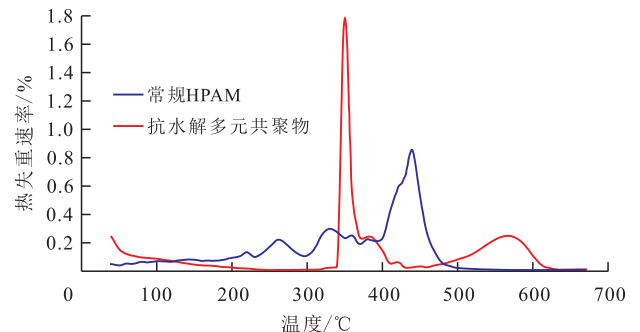


图4 常规HPAM和抗水解多元共聚物热失重DTG曲线对比

Fig.4 Comparison of thermogravimetric DTG curves between conventional HPAM and anti-hydrolysis multicomponent copolymer

#### 2.5.2 聚合物溶液热稳定性

聚合物溶液注入地层后,由于聚合物分子和水发生水解反应,因此聚合物干粉的热稳定性不能完全代表聚合物溶液的长期稳定性,需要对油藏温度下聚合物溶液的长期稳定性做进一步研究。

两种聚合物溶液长期热稳定性对比结果(图5)表明:随着老化时间的增加,7 d后常规 HPAM 黏度保留率降至10%以下,30 d后黏度保留率降至5%以下,主要因为常规 HPAM 含有较多的酰胺根基团,在温度为120 °C的条件下,酰胺根极易水解生成羧酸根,30 d后水解度可达100%,水解产生的大量羧酸根与高钙镁离子发生络合反应生成沉淀,导致聚合物分子与水产生相分离,黏度大幅降低,无法在特高温油藏中长期发挥扩大波及的效果;而抗水解多元共聚物热老化30 d后,黏度保留率在95%以上,主要因为抗水解多元共聚物中含有较少的酰胺根基团,且 AMPS 空间位阻较大,同时 NVP 的存在会进一步抑制氢氧根对酰胺基的进攻,从而阻止酰胺根水解成羧酸根,30 d后水解度仍为0,大幅度提高了聚合物溶液的长期热稳定性,因此在胜利特高温

油藏条件下,抗水解多元共聚物能够在地层中长期保持较高黏度,持续发挥驱油作用。

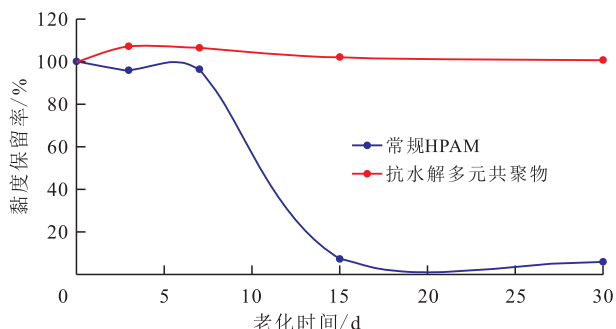


图5 常规HPAM和抗水解多元共聚物热稳定性对比

Fig.5 Comparison of thermal stability between conventional HPAM and anti-hydrolysis multicomponent copolymer

### 3 结论

抗水解多元共聚物引入了非离子NVP抗水解单体和强极性AMPS抗钙镁离子单体,NVP单体对外不显电性,抑制了聚合物分子与盐离子的结合,而强极性AMPS单体不会与钙镁离子产生络合效应,从而能够有效增大聚合物分子的流体力学体积,相对于常规HPAM具有更高的表观黏度。

抗水解多元共聚物引入NVP和AMPS单体后,在水溶液中仍表现出剪切稀释放塑性流体特征,但相对于常规HPAM,抗水解多元共聚物剪切增稠系数更大,且幂律指数更小,具有更高的黏弹模量和弹性占比,因此在岩心中扩大波及能力更强,提高采收率能力更高。

抗水解多元共聚物不含羧酸根,当温度小于330℃时,只有聚合物中的水分和不稳定添加剂的热失重峰,温度大于330℃后主碳链才发生降解,因此抗水解多元共聚物干粉热稳定性相对于常规HPAM大幅提高,同时在温度为120℃、总矿化度为44 465 mg/L、钙镁离子质量浓度之和为2 015 mg/L的盐水中放置30 d后,由于聚合物不水解,长期放置后仍具有较高的黏度,可在油藏中长期发挥驱油作用,因此抗水解多元共聚物有望应用在胜利油区油藏温度为95~120℃的特高温油藏化学驱提高采收率中,突破化学驱提高采收率温度界限。

#### 符号解释

$K$ ——增稠系数,  $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$ ;

$n$ ——幂率指数,  $f$ ;

$\gamma$ ——剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;

$\eta$ ——剪切黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

#### 参考文献

- [1] 周治岳,温中林,杨伟,等.低矿化度水驱后聚合物驱提高采收率实验[J].断块油气田,2019,26(6):771-774.  
ZHOU Zhiyue, WEN Zhonglin, YANG Wei, et al. Experimental research on recovery efficiency improved by polymer flooding after low salinity water flooding [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(6): 771-774.
- [2] 徐辉,曹绪龙,季岩峰,等.高钙镁离子下超高分多元共聚物流变性研究[C].西安:2018油气田勘探与开发国际会议,2018.  
XU Hui, CAO Xulong, JI Yanfeng, et al. Rheology study on super high molecular weight copolymer under the conditions of high calcium and magnesium [C]. Xi'an: 2018 International Field Exploration and Development Conference, 2018.
- [3] 李宗阳,王业飞,曹绪龙,等.新型耐温抗盐聚合物驱油体系设计评价及应用[J].油气地质与采收率,2019,26(2):106-112.  
LI Zongyang, WANG Yefei, CAO Xulong, et al. Design evaluation and application of a novel temperature-resistant and salt-tolerant polymer flooding system [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 106-112.
- [4] 孔柏岭.聚丙烯酰胺的高温水解作用及其选型研究[J].西南石油学院学报,2000,22(1):66-69.  
KONG Bailing. Study on the hydrolysis of polyacrylamide at high temperature and its selection [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(1): 66-69.
- [5] 卢军,唐金星.高温油藏条件下HPAM聚合物的水解规律研究[J].石油天然气学报,2007,29(3):272-275.  
LU Jun, TANG Jinxing. Hydrolysis change of HPAM polymers at elevated temperature [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 272-275.
- [6] 朱麟勇,马昌期,李妙贞,等.水溶性AM/AA/AMPS共聚物的高温水解[J].应用化学,2000,17(2):117-120.  
ZHU Linyong, MA Changqi, LI Miaozhen, et al. Hydrolysis of AM/AA/AMPS copolymer at high temperature [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2000, 17(2): 117-120.
- [7] 孙刚,李勃.大庆油田抗盐聚合物研制与应用[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):265-271.  
SUN Gang, LI Bo. Preparation and application of the salt-resistant polymer in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 265-271.
- [8] 孙刚.TS型抗盐聚合物溶液黏度特性及驱油效果[J].大庆石油地质与开发,2019,38(1):104-109.  
SUN Gang. Viscosity characteristics and oil displaced effects of Type-TS salt-resistant polymer solutions [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(1): 104-109.
- [9] 曹绪龙,季岩峰,祝仰文,等.聚合物驱研究进展及技术展望[J].油气藏评价与开发,2020,10(6):8-16.  
CAO Xulong, JI Yanfeng, ZHU Yangwen, et al. Research advance and technology outlook of polymer flooding [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(6): 8-16.
- [10] 张玉平,叶彦春,郭燕文,等.P(AM/DAAM/NVP)三元共聚物的

- 耐温抗盐性能研究[J].精细化工,2006,23(5):494-496.
- ZHANG Yuping, YE Yanchun, GUO Yanwen, et al. Study of the temperature-resistant and salt-tolerant terpolymer of acrylamide (AM), Diacetone acrylamide (DAAM) and N-Vinyl-2-pyrrolidone (NVP)[J]. Fine Chemicals, 2006, 23(5): 494-496.
- [11] 薛丹, 杨倩, 解桥娟, 等. 基于丙烯酰胺的三元疏水缔合聚合物的合成[J]. 应用化工, 2018, 47(2): 312-314, 318.
- XUE Dan, YANG Qian, XIE Qiaojuan, et al. Synthesis of hydrophobic associated terpolymer based on acrylamide [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(2): 312-314, 318.
- [12] 苟绍华, 罗珊, 马永涛, 等. AM/NVP/N-MAM 三元共聚物驱油剂的合成及性能研究[J]. 应用化工, 2014, 43(8): 1 399-1 402, 1 407.
- GOU Shaohua, LUO Shan, MA Yongtao, et al. Synthesis and performance evaluation for the P(AM/NVP/N-MAM) as enhanced oil recovery chemical [J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(8): 1 399-1 402, 1 407.
- [13] 赖南君, 彭琴, 叶仲斌, 等. 水溶性驱油剂 AM/AA/NVP/EDMA 的合成及性能[J]. 化学研究与应用, 2014, 26(1): 81-85.
- LAI Nanjun, PENG Qin, YE Zhongbin, et al. Synthesis and properties of a water-soluble AM/AA/NVP/EDMA Tetra-copolymer for oil displacement [J]. Chemical Research and Application, 2014, 26(1): 81-85.
- [14] 孙刚, 祝仰文, 李长庆, 等. 驱油用聚合物技术要求: SY/T 5862—2008[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- SUN Gang, ZHU Yangwen, LI Changqing, et al. Technical criterions of polymer for oil displacement: SY/T 5862-2008[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [15] 王海英. HPAM 溶液粘度影响因素研究及络合剂的选择[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- WANG Haiying. Study on the factors that influence HPAM solution viscosity and select the complexing agent [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [16] 程杰成, 沈兴海, 袁士义, 等. 新型梳形抗盐聚合物的流变性[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(4): 119-121.
- CHENG Jiecheng, SHEN Xinghai, YUAN Shiyi, et al. Study on rheology of polyacrylamide copolymer used in enhanced oil recovery [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004, 20(4): 119-121.
- [17] 钟会影, 李园园, 尹洪军, 等. 盲端孔道内黏弹性聚合物驱油两相渗流规律[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 100-105.
- ZHONG Huiying, LI Yuanyuan, YIN Hongjun, et al. Two-phase fluid flow of viscoelastic polymer flooding in dead end channels [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 100-105.
- [18] 王德民, 王刚, 吴文祥, 等. 黏弹性驱替液所产生的微观驱动力对驱油效率的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 43-55.
- WANG Demin, WANG Gang, WU Wenxiang, et al. Influence of the micro-force produced by viscoelastic displacement liquid on displacement efficiency [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(1): 43-55.
- [19] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 45-51.
- WANG Demin, CHENG Jiecheng, YANG Qingyan. Viscous-elastic polymer can increase micro-scale displacement efficiency in cores [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 45-51.

编辑 常迎梅