

文章编号:1673-5005(2007)01-0087-04

孔喉尺度聚合物微球的合成及全程调剖 驱油新技术研究

雷光伦¹, 郑家朋²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 冀东油田 采油工艺研究院, 河北 唐山 063004)

摘要:利用微材料合成方法,设计合成了孔喉尺度聚合物凝胶微球,并进行了微球在多孔介质中流动的室内实验和现场初步试验。显微图像表明,合成微球具有很高的圆球度和庞大的数量特征,可方便地在线注入油层。实验研究表明,微球具有良好的耐温性、耐矿化度特性和弹性变形能力,能在水中膨胀 1~5 倍;合成微球能在岩石孔隙中运移,使注入压力和阻力系数不断增加,后续注水后仍有很高的残余阻力系数;微球与聚合物溶液复合体系的阻力系数是纯聚合物驱时的 8 倍和水驱时的 25 倍左右,有加效效应和更高的提高波及体积能力。现场试验表明,孔喉尺度聚合物凝胶微球对油层具有良好的适应性,可显著降低高含水油井的含水率,增加原油产量。

关键词:聚合物;孔喉尺度;弹性微球;阻力系数;波及体积;调剖;驱油

中图分类号:TE 357.46

文献标识码:A

Composing of pore-scale polymer microsphere and its application in improving oil recovery by profile control

LEI Guang-lun¹, ZHENG Jia-peng²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Oil Production Research Institute of Jidong Oilfield, Tangshan 063004, Hebei Province, China)

Abstract:Reservoir pore-scale polymer gel microspheres were designed and composed by micromaterial composing method. And the lab experiment and field test of polymer microspheres flowing in porous medium were conducted. Micrographs show that composed microspheres have spheric and large number property, which can be injected in formation easily. Experiments indicate that composed pore-scale gel microspheres could resist high temperature and high salinity, whose volume could expand from 1 to 5 times in water and with good elastic deformation ability. The microspheres with high remnants resistance can move in rock pores which make the injection pressure and resistance factor constantly increase, and possess high residual resistance factor after the succeeding injecting water. The resistance factor of microspheres and polymer solution composite system is 8 times of polymer driving's and 25 times of water flowing's. The results of field tests show that pore-scale gel microspheres have good adaptability to oil reservoir nonuniformity, and can increase oil production and decrease water cut obviously in corresponding production wells.

Key words: polymer; pore scale; elasticity microsphere; resistance factor; spread volume; profile control; oil displacement

油田采收率受注入流体的波及体积和洗油效率影响。对我国油田而言,开发层系多,层间和层内非均质严重,进入高含水和高含水期后,注入流体波及系数小,采收率低。改变注入水流动方向、提高注入水波及体积是提高采收率的重要方法^[1-6]。研究表明,油藏岩石具有亚微米级孔喉尺度,合成与其孔

喉尺度匹配的聚合物凝胶微球,当数量庞大的微球随水注入油层,单个微球可在油层多孔介质中自由运移,在喉道处对水流产生阻力,改变其流动方向;多个微球同时在喉道处堆积时可产生封堵,使水完全绕流。凝胶微球具有弹性,封堵压差升高到一定程度时,会发生弹性变形,通过喉道继续向深部运

收稿日期:2006-06-29

作者简介:雷光伦(1963-),男(汉族),重庆人,教授,博士,博士生导师,从事提高采收率技术、微生物采油、油藏工程理论与方法研究。

移,实现全程调剖驱油。研究孔喉尺度聚合物凝胶微球的合成方法及其基本性质、运移行为和阻力因子,对建立新的孔喉尺度弹性微球的调剖驱油方法具有重要意义。

1 孔喉尺度凝胶微球合成及其基本性质

1.1 油层岩石孔喉尺度

渗透率、孔隙度与岩石平均孔喉半径有如下关系^[7]:

$$r = \sqrt{\frac{8k}{\varphi}}$$

式中, k 为岩石渗透率, μm^2 ; φ 为岩石的孔隙度, 小数; r 为岩石的平均孔喉半径, μm 。

当孔隙度取 0.25 时,由上式计算得渗透率为 $1\mu\text{m}^2$ 油层的平均孔喉直径为 $11.3\mu\text{m}$,渗透率为 2

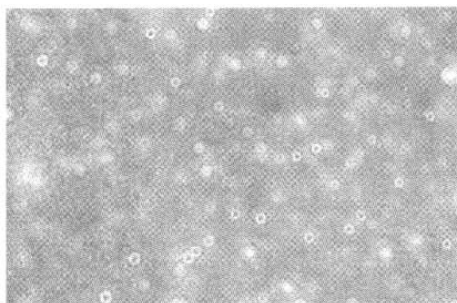
μm^2 油层的平均孔喉直径为 $16\mu\text{m}$,对于注水形成的大孔道其渗透率大于 $10\mu\text{m}^2$,平均孔喉直径在 $35.8\mu\text{m}$ 以上。可见油层孔喉尺度具有亚微米级特征。

1.2 合成材料和方法

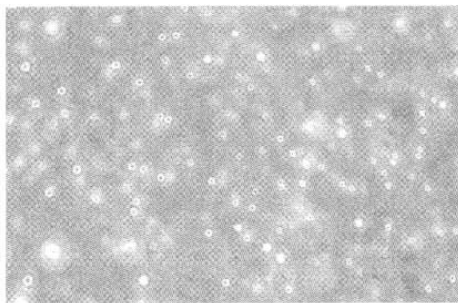
合成材料主要为聚合物、分散介质、聚合反应剂、催化剂、成球剂和其他助剂。

将分散介质在反应器中加热至反应温度,再将聚合物、聚合反应剂、催化剂、成球剂和其他助剂分别溶于水中,并按合成微球的孔喉尺度设计要求,将其均匀分散在分散介质中进行聚合反应^[8]。反应完成后,对反应生成微球进行沉淀分离,即得孔喉尺度聚合物凝胶微球。

图 1 为合成的凝胶微球水溶液在显微镜下放大 1000 倍时的显微照片。



(a) 8~20 μm 凝胶微球



(b) 3~15 μm 凝胶微球

图 1 合成的孔喉尺度凝胶微球显微照片

从图 1 可看出,合成的微球均匀,圆球度很好,是真正意义上的微球体,说明微球合成方法完全可行。

1.3 微球的基本物理性质

1.3.1 微球的数量特征

合成的凝胶微球具有孔喉尺度特征,在亚微米级。按微球体积进行计算,直径为 $5\mu\text{m}$ 的 1 kg 微球其数量为 2×10^9 个,直径为 $3\mu\text{m}$ 的 1 kg 微球其数量为 1×10^{10} 个。可见孔喉尺度凝胶微球有庞大的数量特性,大量的微球在注入油层后会广泛分布在油藏岩石孔隙中,对水流产生阻力,不断改变注入水的流动方向。

微球具有亚微米级的小尺度,能很好地分散在注入水中,随水顺利地在线注入油层,不需大型的注入泵站和专门的注入管线,适用于单井、小区块油田、海上油田等的调剖驱油。

1.3.2 粘弹性与膨胀性

合成微球体的基本材料是聚合物凝胶,因此具

有聚合物凝胶的基本粘弹特性,其强度远大于交联聚合物,凝胶微球具有固定的形状,是粘弹性固体,在孔隙中是靠物理阻挡的阻力作用使水绕流而扩大其波及体积,改变了交联聚合物仍然依靠流体高粘度的粘滞阻力来扩大其波及体积的方式^[3-5],因此微球的阻力系数更高。

微球的弹性使微球在弹性变形作用下通过喉道,并在下一喉道处恢复形状再次对水流产生阻力,以此不断向油层深处运移。

聚合物凝胶具有吸水膨胀特性,膨胀倍数受水的矿化度控制,凝胶微球在不同矿化度水中的膨胀倍数(称重法,实验温度 90°C)与时间的关系见图 2。

由图 2 可见,微球在自来水中的膨胀倍数最大,在 250 h 时膨胀可达 5 倍。随水矿化度的增加,膨胀倍数减小,在 20 g/L 水中 250 h 时,微球膨胀 1.3 倍。说明合成的凝胶微球具有很高的耐矿化度性能,并在 90°C 的高温条件下保持稳定,克服了交联

聚合物受矿化度、温度影响严重的缺陷。微球的膨胀特性又增加了微球进入油层深部以后的液流转向能力。

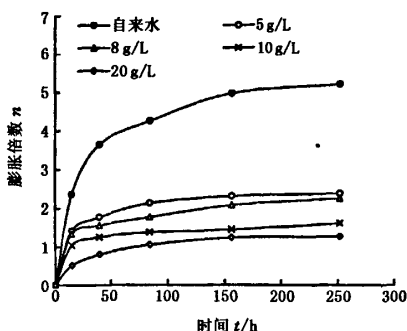


图2 凝胶微球在不同矿化度水中的膨胀情况

2 微球在多孔介质中的流动实验

2.1 阻力系数实验

用孤岛油田产出砂装填岩心管,岩心管长度为30 cm,直径为2.5 cm,并测其渗透率和孔隙度,然后以相同流量向岩心管注水,当压力基本不变后再向岩心管注入一定孔隙体积倍数的不同浓度凝胶微球溶液,测定压力和阻力系数的变化。

图3为1.5 g/L聚合物微球溶液注入渗透率为 $3.472 \mu\text{m}^2$ 岩心管时压力和阻力系数变化曲线。从图3可以看出,在开始注入时,岩心管的注入压力不断升高和下降,且变化幅度很大,这是因为微球封堵喉道时压力迅速上升,当压力升高微球变形往里运移后,压力又立刻下降。当注入微球不断增多后,岩心管的注入压力和阻力系数持续上升,原因是微球在岩心管中的数量不断增多,虽然微球也在孔隙中运移,但流动阻力呈持续上升状态。停注微球再后续注水时,岩心管中的阻力系数维持在水驱的3倍左右,表明后续注水时微球仍然在岩心中对水流产生较大的阻力。

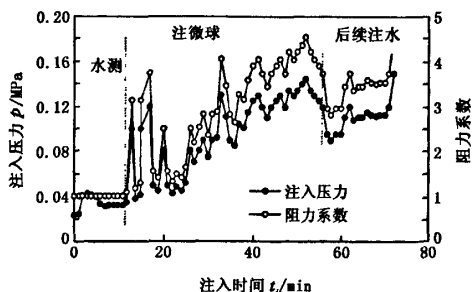


图3 凝胶微球注入过程中的压力和阻力系数变化

以上实验过程的压力变化形态与从理论角度分析弹性微球在多孔介质中运移时引起的压力变化情况一致。

2.2 运移实验

为进一步说明弹性聚合物微球可在岩石孔隙中运移,用总长度1.5 m、从入口端开始间隔350 mm分布有4个测压点的长岩心管进行实验。如微球不能在岩心孔喉中运移,而只在端面封堵,则只有注入压力上升;如微球可在岩心孔喉中运移,则各个测压点的压力均升高。因此可通过测压点压力的变化来判断微球的运移情况。

图4为0.5 g/L聚合物弹性微球溶液在渗透率为 $3.852 \mu\text{m}^2$ 填砂岩心管中运移时各测点的压力变化曲线。由图4看出,在岩心注水压力稳定后开始注微球,注微球后测压点1的压力最先开始上升,然后2,3,4测压点压力上升时间依次后延,且注微球后4个测压点的压力均上升。说明弹性微球能在岩心管中逐渐向出口端运移,微球前缘到达后相应测压点压力开始上升。实验说明孔喉尺度聚合物弹性微球具有在岩心孔隙中运移的能力。

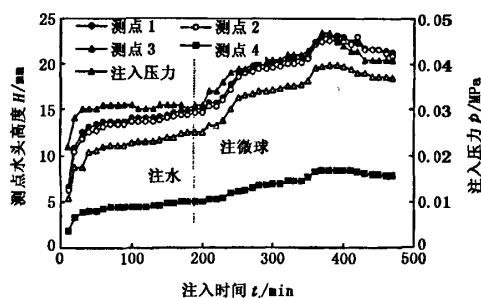


图4 微球运移时各测点压力变化

2.3 微球与聚合物溶液复合体系流动实验

图5为0.5 g/L聚丙烯酰胺溶液加1 g/L聚合物弹性微球组成的复合体系,在渗透率为 $2.445 \mu\text{m}^2$ 岩心管中进行流动实验时所测得的阻力系数变化曲线。

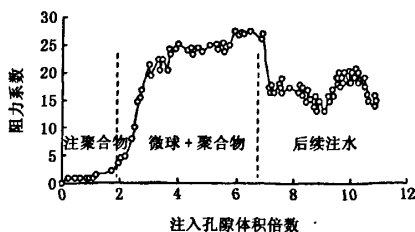


图5 微球与聚合物体系的阻力系数变化

从图5可以看出,0.5 g/L聚合物溶液通过岩心

时,其阻力系数逐渐增大到水驱时的2~3倍左右。注入微球与聚合物溶液复合体系后,阻力系数不断增加,注入6倍孔隙体积时,阻力系数是水驱时的25倍。后续注水的阻力系数保持在水驱时的15倍左右。可见弹性微球与聚合物溶液复合体系的阻力系数远比单纯聚合物体系的阻力系数要高,二者具有加效作用,有更高的提高波及体积能力,并能防止聚合物溶液沿高渗通道窜流,推迟油井见聚合物的时间。

3 现场初步试验

孔喉尺度聚合物凝胶微球尺度小,可很容易地分散在水中形成悬浮体系,使悬浮体系的粘度不增加。调剖驱油机理是靠微球体的物理阻塞使水绕流和通过喉道时的粘弹拖曳剥离剩余油,因此注入时不增加管线的阻力,可用比例泵直接将微球体系加入注水管线,因此无须改造注水管线和新建专门的注入泵站即可实现单井组的调驱。

2004年以来,先后在胜利孤岛、浅海、现河和青海等油田进行了近10个井组的矿场试验,试验井组的原始油藏渗透率为 $0.30 \sim 1.5 \mu\text{m}^2$,为高含水开发期,油层非均质严重,对应油井含水率差异大。试验采用在配水间用比例泵直接打入单井注水管线的在线注入方式,设计注入浓度为 $0.6 \sim 1.2 \text{ g/L}$,注入量为 $(0.05 \sim 0.1) V_p$ (V_p 为孔隙体积),试验取得了明显的增油降水效果。其中青海油田的一个井组注入3个月就增油3500 t,一口高含水油井从注入前含水率91%下降到3个月后的65%,说明微球对油层非均质性具有良好的适应性,可提高注入水的波及体积。

4 结 论

(1)用微材料合成方法成功地合成了与油层孔喉尺度匹配的聚合物凝胶微球。该聚合物凝胶微球具有良好的耐温性和耐矿化度特性,并具有庞大的数量特征,可实现在线注入。

(2)孔喉尺度聚合物微球可在岩心中运移,并有很高的阻力系数和残余阻力系数。

(3)微球与聚合物溶液复合体系在岩心中的阻力系数远高于纯聚合物溶液体系,具有加效效应,有更高的提高波及体积和阻止聚合物溶液在高渗孔道中窜流的能力。

(4)孔喉尺度聚合物微球对油层的非均质性有很好的适应性,可显著扩大注入水波及体积,降低油井含水率,增加原油产量。

参考文献:

- [1] 王德民. 大庆油田“三元”“二元”“一元”驱油研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 1-9.
WANG De-min. Study on ASP flooding, binary system flooding and mono-system flooding in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(3): 1-9.
- [2] 俞启泰. 论提高油田采收率的战略与方法[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 35-37.
YU Qi-tai. A study on strategy and approach to enhance ultimate recovery from oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 35-37.
- [3] 李明远, 董朝霞, 吴肇亮. 部分水解聚丙烯酰胺/柠檬酸铝交联体系分类探讨[J]. 油田化学, 2000, 17(4): 343-345.
LI Ming-yuan, DONG Zhao-xia, WU Zhao-liang. Classification of partially hydrolyzed polyacrylamide/aluminum citrate systems[J]. Oilfield Chemistry, 2000, 17(4): 343-345.
- [4] 雷光伦, 陈月明, 李爱芬. 聚合物驱深度调剖技术研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(3): 54-57.
LEI Guang-lun, CHEN Yue-ming, LI Ai-fen. Research of depth profile control technology in polymer flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(3): 54-57.
- [5] 袁士义, 韩冬, 苗坤. 可动凝胶调驱技术在断块油田中的应用[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 50-57.
YUAN Shi-yi, HAN Dong, MIAO Kun. Application of flowing gel profile control technique to complex block reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 50-57.
- [6] PENG Bo. Determination of the structure of polyacrylamide/aluminum citrate colloidal dispersion gel system[J]. Chinese J of Chem Eng, 1998, 6(2): 171-173.
- [7] 洪世铎. 油藏物理学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- [8] SHEN S, SUDOL E D, ELASSER M S. Control of particle size in dispersion polymerization of methyl methacrylate[J]. Journal of Polymer Science (Part A), 1993, 31: 1393-1398.

(编辑 李志芬)