

可动凝胶渗流规律研究现状与发展方向^{*}

马庆坤^{1,3} 吴行才^{2,3} 王玉海³ 游 靖³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 华北油田公司, 河北任丘 062552)

摘要:系统分析了可动凝胶与聚合物驱油机理和适用条件的区别以及在渗流规律方面的研究现状, 总结出了聚合物凝胶一般分类及其特性。提出了研究可动凝胶渗流规律需要分段试验研究流变关系来确定视黏度的变化规律, 需要确定视黏度下的相渗规律变化, 需要对可动凝胶的整个驱替过程统一考虑, 具体研究工作中应该进行分段研究的观点。该研究对指导可动凝胶渗流规律研究和可动凝胶在提高采收率中的应用具有一定的借鉴意义。

关键词:可动凝胶; 聚合物; 流变关系; 渗流规律

中图分类号: 357. 46 **文献标识码:** A

聚合物凝胶常用于油田开发中的油井堵水、水井调剖作业, 由聚合物 (如聚丙烯酰胺 PAM、部分水解聚丙烯酰胺 HPAM 等)、交联剂等组成。聚合物凝胶的流动性很差, 其黏度可达 $10\ 000\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ 以上, 故常称为本体凝胶, 主要用于堵塞部分地层。聚合物溶液则主要用作三次采油的驱替剂, 由聚合物 (如 PAM、HPAM 等)、稳定剂等组成, 主要作用是增加注入物驱替剂的黏度, 形成的黏度一般为 $35 \sim 45\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ ^[1,2]。介于上述二者之间的可动凝胶, 既有凝胶的高黏度特征, 又有聚合物溶液的可流动性。可动凝胶和聚合物溶液两者的共同点是聚合物原材料基本相同, 都可形成非牛顿流体增大注入液黏度, 都具有可流动性, 都是化学驱的一种形式。但形成的机理、表现特征有所不同, 驱油机理、渗流规律和适用对象有所不同。虽然国外的化学驱实施项目不断减少, 而在国内情况却相反, 包括聚合物、可动凝胶调驱等在内的化学驱却非常迅速。据 2005 年底中国石油学会召开的三次采油技术研讨会初步统计, 全国化学驱的应用单元超过了 200 个, 化学驱的采油量在 $1800 \times 10^4\ \text{t}$ 以上。随着国际石油价格的不断攀升, 对三次采油的投入也将加大, 化学驱的工作量也将不断增加, 可动凝胶的实施规模已经开始逐步增加, 深入研究可动凝胶的渗流规律对进一步提高应用效果, 更好地指导生产有重要意义。

1 可动凝胶驱与聚合物驱的驱油机理

最早发现和应用可动凝胶的 Mack J C 和 Smith J E^[3], 将其称为深度胶态分散凝胶 (CDG)。国内学者则根据其物理特性, 称做弱凝胶、弱黏弹性流体、深部调剖剂、深部液流转向剂、交联聚合物等。凝胶体系的不同特性来自于不同的交联方式和聚合物 / 交联剂浓度, 主要区别在于: 一是交联的作用机理是以分子内交联键为主还是以分子间交联键为主^[3]; 二是所用的聚合物浓度、交联剂浓度不同; 三是形成的凝胶黏度不同。一般而言, 用于调驱的凝胶都是可流动的。所以, 将其统称为可动凝胶更为确切。总结出的聚合物凝胶一般分类及特性见表 1。

在驱油作用方面, 可动凝胶呈现出 3 个特点: 一是其形成的黏度远大于被驱替油水的黏度, 因而降低了流度比, 有利于被驱替物的均匀推进, 提高了驱油效率; 二是其流动性比注入水差得多, 有较大的阻力系数和残余阻力系数, 从而能在地层中产生堵塞效应, 改变后期注入物的液流方向, 增加了波及体积; 三是由于可动凝胶的黏弹性效应, 可以驱替地层孔隙盲端的部分原油, 进而增大被驱替的孔隙体积^[4], 提高了采收率。它是通过调和驱的双重作用来提高采收率的, 较适合于非均质地层。

与可动凝胶不同, 聚合物驱油则主要利用其与

作者简介: 马庆坤, 1960 年生。1982 年毕业于华东石油学院采油工程专业, 在读博士生, 主要从事油田开发管理工作。现任华北油田公司总经理助理, 教授级高级工程师。E-mail: kfb_mqk@petrochina.com.cn

表 1 聚合物凝胶的一般分类及特性

项目	本体凝胶 (BG)	可动凝胶	
		胶态分散凝胶 (CDG)	弱凝胶 (WG)
聚合物浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	>2000	<800	800 ~ 2000
交联反应形式	分子间为主	分子内为主	分子间为主,分子内为辅
成胶后的形状和流动性	有整体性和一定形状,不能流动的半固体	没有整体性,无固定的形状,可以流动	具有整体性,无一定形状,会缓慢地整体向前“漂移”
凝胶强度	较强	一般	较弱
适用对象	主要用于油水井堵水和调剖	主要用于无裂缝高渗透层	主要用于中低渗透的调驱或裂隙
配制矿化度要求	可以较高	低矿化度	低矿化度

地层原油相近的黏度和其与油交界面上较大的表面张力,驱替油膜状、孤岛状的残余油^[2]。所以聚合物驱油技术较适合于相对均质的地层。

2 可动凝胶驱的研究现状

2.1 发现与应用

Mack和 Smith^[4]在 80年代研究聚丙烯酰胺/柠檬酸铝配比性能试验时发现:聚丙烯酰胺/柠檬酸铝的摩尔比为 20 : 1 ~ 100 : 1时,高分子量、高水解度的聚合物形成的 CDG成胶性能较好,可流动凝胶所需聚合物浓度范围为 100 ~ 1200 mg/L。他们把这种低浓度的聚丙烯酰胺/柠檬酸铝交联体系称为“深度胶态分散凝胶 (CDG)”。

胜利油田于 1992年率先在国内开展了可流动凝胶驱油应用试验,随后其他多个油田相继开展了类似工作。矿场上使用的聚合物主要以 HPAM 为主,交联剂则主要由 Al()、Cr()、Ti()、Zr()等金属与适当的螯合剂形成,如柠檬酸铝、有机铬、柠檬酸钛、有机锆等。

2.2 室内评价

目前主要从 2方面对可动凝胶进行室内评价:一是可动凝胶的影响因素;二是可动凝胶的性能^[5,6]。

可动凝胶的影响因素包括:(1)聚合物的种类、分子量、水解度、浓度;(2)交联剂性质的种类、聚交比、浓度、熟化时间;(3)配液水的矿化度、各项离子的含量及 pH值;(4)油藏储层特征、温度等。

可动凝胶性能评价,主要是参照聚合物的评价方法,包括成胶性能、流变特性、在多孔介质中的流动特性和调驱性能。

可动凝胶的成胶性能、流变特性的评价内容包括成胶时间、成胶强度和成胶稳定性。成胶时间根据凝胶黏度与时间的关系曲线确定,成胶强度由转变压力法、孔隙阻力因子法、黏度测定法、目测法等

得到,成胶稳定性则包括剪切稳定性和长期热稳定性 2个方面。可动凝胶在多孔介质中的流动特征一般通过测定阻力系数和残余阻力系数得到。可动凝胶的调驱特性主要由具有不同渗透率双层或三层并联非均质模型的改善剖面能力试验和一维/平面模型的驱油试验给出。

2.3 调驱机理

在可动凝胶调驱机理研究方面,国内外学者主要围绕如何有效调整地层渗透率,提高驱油效率,改进凝胶的物理参数和力学参数等作了大量研究工作,得出了一些有意义的结论性意见^[3-4,6-9]:(1)可动凝胶主要进入高渗透的大孔道中,很少进入低渗透部位,具有较好的渗透率选择性;(2)作为一选择性封堵剂,它降低了地层传递水的能力,但不影响原油的流动;(3)微观驱油实验证实,后续注入水不能进入已被可动凝胶占据的孔隙空间,但可进入未波及到的孔道将油驱出,且由于水的黏度较低,它可冲开并携带某些孔道中的部分可动凝胶,形成流动通道,受水作用向前“漂移”的凝胶遇到较小孔道时会再次停留,进而起到改变水流方向、改善注入水波及效率的作用;(4)溶液注入地层深部后,会发生交联反应形成微凝胶,在近井地带受大的注入压差作用,能像聚合物一样流动,成为连续的驱油流体,在远井地带由于注入压差较小很难流动,从而形成堵塞条带,起到封堵大孔道或高渗层的作用。

2.4 可动凝胶调驱渗流理论及数值模拟研究

可动凝胶驱替属于非常规驱油方式,在国外算不算提高采收率 (EOR)方式并没有界定。近年来,由于成本和税收政策等原因,包括聚合物驱在内的化学驱呈现下降趋势^[10],相应的研究工作也受到影响,特别是像渗流规律这样的基础工作并没有很深入开展,建立新的渗流数学模型还需要做大量的研究工作。

(1)国外的研究成果近年鲜有见到关于可动凝

胶渗流理论的报道,国内的研究在 2000 年之前基本以本体凝胶调剖为主要研究对象^[11-16],1991 年袁士义给出了二维两相多组分的地下交联调剖数学模型之后,1995 年时富庚等给出了三维两项六组分油田化学堵水调剖数学模型。1996 年朱维耀对化学剂堵水调剖渗流理论进行了研究,建立了聚合物交联防窜驱油组分模型。2000 年杨正明等利用缓交联聚合物驱油组分模型模拟器,分析了各种因素对缓交联聚合物驱油效果的影响。田根林等对交联聚合物剪切特性及渗流规律进行了研究。2002 年朱怀江、刘玉章等研究了弱凝胶对油水相对渗透率的影响,论述了注入前后油水相对渗透率的影响。

(2)总体来说,可动凝胶呈现非牛顿流特性,它在多孔介质中的渗流也表现出非达西特性。目前研究主要集中在可动凝胶体系的合成、调驱机理及试验效果的表现描述上。在理论上多是研究驱替物驱油的机理和规律,较少研究驱替物的流动特征——渗流规律。所以,应该把驱替物和被驱替物作为一个整体来研究。

(3)在数值模拟方面,国际上先进的软件大多具备功能模块化、数据流程一体化、前后处理可视化、大规模精细油藏描述并行化、高速共轭解法及加密粗化网络等多项技术。目前国内一些较为优秀的化学驱软件,在运算上也表现得比较优秀,但大多建立在二维两相和三维两相的基础上;功能比较单一,难以用同一套软件进行多种驱油方案的优选和评估;由于考虑因素过于简化以及模拟节点、运算精度和速度、可视等的限制,难以满足油田现场以区块为整体的大规模精细油藏数值模拟的要求。出现这些问题的根本原因是目前尚无比较理想的数学模型。国内在可动凝胶数学模型建立和数值模拟方面,进行了数值解法论述;考虑了水、油、聚合物、助剂等 12 个组分,主要是针对聚合物驱时的防窜问题,相当于是以调剖为主要研究对象的^[13]。

3 可动凝胶渗流规律的研究方向探讨

研究可动凝胶的渗流规律,主要是要研究可动凝胶在整个驱替过程中的流体流变和渗流关系,特别是要总结出视黏度和此视黏度下相对渗透率的变化规律。因为可动凝胶既不像水那样的牛顿流体(因其在特低渗条件下也会表现出非牛顿特性),也不像聚合物溶液那样的非牛顿流体,而有其自己的特性。即使是比较简单的牛顿流体(比如水),在复

杂断块油藏条件下就可能出现多解的情况,而对于可动凝胶这种非牛顿流体的非达西渗流,流动过程会更为复杂。

3.1 可动凝胶流变的研究方向

从非牛顿流体的类型来看,主要分为纯黏性的和黏弹性的两大类,在纯黏性的分类当中又可分为与时间有关的和与时间无关的两类,对纯黏性的非牛顿流体目前已经研究和总结的比较多了^[17],各类别的模型也相对完善和成熟。而对黏弹性或黏塑性非牛顿流体研究的相对较少,主要是这类流体的力学性质多种多样,本构关系也相对复杂。

所谓流体的本构关系,就是流体应力与应变率满足的关系,研究本构关系的目的是主要找出视黏度的变化关系,为渗流方程的建立和应用奠定基础。一般的本构关系可表示为

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \text{ 或 } \dot{\gamma} = g(\tau) \quad (1)$$

$$\text{其视黏度 } \mu_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (2)$$

可动凝胶是在地层中进行交联的,其本构关系的研究应该从两个方面进行分析,因为在地下它不是一种流体形式,一是近井地带未成胶溶液状态下的本构关系,溶液状态下类似于聚合物溶液,目前对聚合物溶液本构关系研究的基本观点是属于拟塑性流体,多用幂律型流体^[18],对于可动凝胶未成胶前的溶液本构关系,还有待于实验研究的进一步证实。二是较远地带凝胶状态下的本构关系,目前对成胶后的本构关系研究较少,需要通过实验确定类型、确定相关系数。从前期的分析来看,认为是下列的复杂类型

$$\tau = \tau_0 + A \dot{\gamma}^m + B \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

值得注意的是,要研究凝胶状态下当地流速下的流变关系,特别是低剪切速率下的流变关系,因为可动凝胶的交联是在远离井筒的地层中,当地流速很低。

3.2 可动凝胶渗流规律的研究方向

对于相对简单的非牛顿流体来说,其本构关系已经成型,对纯黏性的非牛顿流体的渗流规律也有了基本的模型,要做的工作是对已有模型的相关系数进行确定。例如:对于稳态情况下幂律流体的平面径向渗流,地层压力变化满足的关系为^[17]

$$p = p_e - p_w = \frac{\mu_e}{k_e} \left(\frac{Q}{2\pi h} \right)^n (n-1) [k_w^{1-n} - R^{1-n}] \quad (4)$$

而对于稳态情况下 Bingham 流体的平面径向渗

流,则有

$$p = p_c - p_w = \frac{Q\mu}{2kh} \ln \frac{R}{r_w} + (R - r_w) \quad (5)$$

其他类型流体的渗流关系也可从有关文献中检索查找,通过试验确定其相关系数。对于黏弹性的流体渗流规律比较复杂,只能在确定流体类型之后,从基本的渗流方程推导。

对于可动凝胶来说,必须首先确定可动凝胶的流体类型及视黏度关系,在进行体系流变实验的基础上,需要进行地层条件下的流动实验,进行相渗规律的实验研究,用相对渗透率代替达西公式中的绝对渗透率。需要进行可动凝胶的驱替能力实验,找出驱替速度和驱替流量的关系。有了视黏度的变化规律,有了渗透率的变化规律,有了驱替速度和流速的变化规律,就可总结出可动凝胶的渗流关系。

在进行可动凝胶渗流规律研究中,边界条件应当考虑可动凝胶驱替时地层渗透率、润湿性的变化及其影响,还应该考虑可动凝胶在地层中黏度的变化及其影响。当然井网、地层原油性质、地层水性质、剩余油分布等因素也要考虑。

4 结论

(1)可动凝胶与聚合物驱具有不同的驱油机理,前者主要是作为高黏度的驱替剂通过降低黏度比起到一定的阻塞作用,改变后期注入物的液流方向等提高采收率;后者主要是通过提高注入物的黏度、降低油水黏度比来提高采收率。目前对可动凝胶的研究多集中在配方研究、性能改进和影响因素实验等方面,对渗流规律的研究没有聚合物驱研究得深入。

(2)可动凝胶渗流规律的研究方向应该从流体的本构关系入手,并统一考虑分段研究,一段是溶液形式,一段是可流动凝胶形式。结合流变实验和流动实验的结果进行渗流规律的综合研究。

(3)作为一项基础性工作,对研究剩余油分布、数值模拟、方案编制等都有非常大的指导作用,应该得到有关部门的大力支持和高度重视,以更好地发挥这一三次采油方法提高采收率的作用。

符号说明:

h ——地层有效厚度; k ——地层有效渗透率; m, n ——指数;
 p_c, p_w ——地层压力和井底压力; Q ——流量; r_w, R ——井筒半径和供给半径; ϵ ——应变率; τ ——切应力; μ ——流体的黏度; ∇p ——压力梯度。

参考文献:

- [1] 韩大匡,韩冬.胶态分散凝胶驱油技术的研究与进展[J].油田化学,1996,13(3):273-276
- [2] 王启民,廖广志,牛金刚,等.聚合物驱油技术的实践与认识[J].大庆石油地质与开发,1999,18(4):1-5.
- [3] MACK J C, SMITH J E. In-depth colloidal dispersion gels improve oil recovery efficiency [R]. SPE/DOE 27780, 1994.
- [4] 周万富,王贤君,李建阁,等.胶态分散凝胶用于聚驱后进一步提高采收率[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):69-71.
- [5] 郭松林,陈福民,李霞.交联聚合物成胶性能影响因素研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):36-38
- [6] 张燕,翁大丽,刘喜林,等.微凝胶微观驱替试验研究[J].河南石油,2002,16(6):36-38
- [7] 岳湘安,张立娟,刘中春,等.聚合物溶液在油藏孔隙中的流动及微观驱油机理[J].油气地质与采收率,2002,9(3):4-6
- [8] 王平美,罗建辉,李宇乡,等.弱凝胶调驱体系在岩心试验中的行为特性研究[J].石油钻采工艺,2000,22(5):48-50
- [9] 陈铁龙,郑晓春,吴晓玲.影响胶态分散凝胶成胶性能因素研究[J].油田化学,2000,17(1):62-65.
- [10] GUNTIS MORITIS著.2004年世界提高原油采收率技术调查[J].刘嘉译.世界石油工业,2005,12(1):54-58
- [11] 袁士义.聚合物地下交联调剖数学模型[J].石油学报,1991,12(1):49-59.
- [12] 时富庚,钱玉怀.油田化学堵水调剖三维两项数值模拟研究[J].石油勘探与开发,1995,22(增):59-64.
- [13] 朱维耀.交联聚合物防窜油组分模型模拟器[J].石油勘探与开发,1996,23(1):43-46
- [14] 杨振明,朱维耀.缓交联聚合物驱油效果数值模拟研究[J].试采技术,1999,21(3):9-11.
- [15] 田根林,菊岩,孙广煜,等.交联聚合物剪切特性及渗流规律研究[J].油气采收率技术,1997,4(4):19-24.
- [16] 朱怀江,刘玉章,绳德强,等.弱凝胶对油水相对渗透率的影响[J].石油学报,2002,23(3):69-72
- [17] 孔祥言.高等渗流力学[M].安徽合肥:中国科学技术大学出版社,1999-07.
- [18] 刘慈群.聚合物溶液多维定常渗流[J].大庆石油地质与开发,1998,17(1):32-33.

(收稿日期 2006-03-28)

编辑 景 暖]

crease of water saturation. Weighted to saturation based on viscosity of mixed oil and water fluid, established unified experiment model of starting pressure gradient, which is suit for single and two phases flow, and has preferable self isolate.

Key words: micro size; low permeability; starting pressure gradient; filtering flow; model

DENG Yu-zhen^{1,2}, 1. Research Institute of Geology Science, Shengli Oilfield Ltd. Co., Dongying 257000, Shandong, China; 2. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, China University of Petroleum, Changping 102249, Beijing, China

Study situation and development orientation of moveable gel flow through porous medium. MA Qing-kun, WU Xing-cai, WANG Yu-hai, YOU Jing. ODPT, 2006, 28(3): 41-44

Abstract: Analyzed study situation of oil displacement mechanism of moveable gel and polymeric system, and its applicable condition and flow rule were also studied, summarized general classify and characters of polymer gel. Proposed that it is needed to study flowage relationship by fragment experiment to determine apparent viscosity during study on moveable gel flow through porous medium, and it is needed to determine phase flow changes under apparent viscosity, and account for moveable gel through displacement with fragment experiment view. This study can provide direction to study on moveable gel flow rule and enhanced oil recovery.

Key words: moveable gel; polymer; flowage relationship; percolation rule

MA Qing-kun^{1,2}, 1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China

Study on injection rate of third level formation with polymer flooding in Daqing Oilfield. YANG Er-long, SONG Kao-ping. ODPT, 2006, 28(3): 45-49

Abstract: Injection rate is one of the important factors that influences polymer flooding effect. But because of the limitation of postulated condition of numerical simulation model, injection rate determined cannot reflect the influence of polymer solution elasticity. The purpose of this paper is to give reasonable injection rate for third level formation in Daqing oil field. The displacement experiments were done to study oil displacement efficiency of water flooding and polymer flooding at different displacing rate. Experiment result shows that the relationship between polymer flooding enhancing efficiency and displacing rate can be expressed by quadratic polynomial. Based on this relationship, the reasonable injection rate model

was established combining with seepage flow rate of fluid in the formation obtained by principle of potential superposition. And proposed reasonable injection rate was 0.288 PV/a for third level formation in Daqing oil field at the present well spacing of 100 meters. The method has important signification for drawing up development plan of oilfield.

Key words: polymer flooding; third level formation; flooding efficiency; visco-elastic property; injection rate

YANG Er-long, Department of Petroleum Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, Heilongjiang, China

Performance evaluation and field experiment of polymer gel block agent. YAN Jian-wen, LI Jian-ge, LIU Hui-wen, WANG Xian-jun, LI Guo, LIU Jian-jun. ODPT, 2006, 28(3): 50-52

Abstract: In view of invalid of water injection in high water cut oilfield, and formed high permeability zone, block of it by chemical block agent is effective. The performance of block agent effect the effectiveness of blocking, so laboratory and field experiment of polymer gel block agent were done to enhance its blocking effectiveness. Sealing characteristics, resist erode performance, flow gelled performance, and flow orientation change capacity were tested in laboratory by core and tri-tube experiments. Also, field blocking testing was done by polymer gel block agent made up by polymer gel and sewage of oilfield. The experiment shows that polymer gel has preferably seal and resist erode capability, and has perfect intensity, two wells application have obtained evidently effectiveness, which provide successful experiences for polymer gel applications in high permeability zone.

Key words: polymer; gel block agent; performance evaluation; field experiment

YAN Jian-wen^{1,2}, 1. Department of Petroleum Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. Department of Petroleum Engineering, Study Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, Beijing 100083, China

Study on control of constant liquid level by surface driven screw pump. LUO Min, ZHANG Xiao-long, WANG Shiyong, LI Ju-bao. ODPT, 2006, 28(3): 53-55

Abstract: The control of constant liquid level is beneficial to raise pump effect and reduce lose rate of equipments such as the sucker rod and pump etc., and studied one of control method and developed corresponding software. Based on real-time measured parameters such as rotational speed, torque etc and combined with production capacity of reservoir and type of