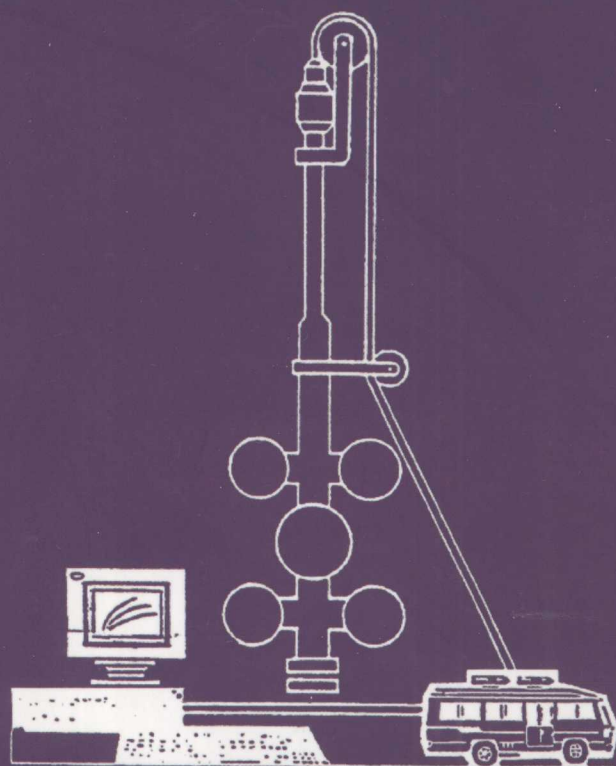


非牛顿流体注入动态分析方法研究文集

(上册)

徐建平 刘 聪 王承毅 赵平起 主编



石油工业出版社

非牛顿流体注入动态分析 方法研究文集

(上 册)

徐建平 刘 聪 王承毅 赵平起 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录论文 13 篇,主要介绍了国内、外非牛顿流体注入动态分析理论与实践的进展情况;比较详细地叙述了聚合物驱油及其试井解释技术在我国油田开发工作中的应用研究情况。本书从理论到实际应用,基本上反映了当前国内在这一领域的水平。

本书可供从事地层测试、试井、油藏工程、测井方面的地质和工程技术人员以及石油院校有关专业师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

非牛顿流体注入动态分析方法研究文集.上册/徐建平等主编.
北京:石油工业出版社,2003.2

ISBN 7-5021-4160-X

I. 非…

II. 徐…

III. 非牛顿流体-应用-驱油-文集

IV. TE357.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 004759 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京乘设伟业科技排版中心排版
北京密云华都印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 190 千字 印 1—1000

2003 年 2 月北京第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4160-X/TE·2939

定价: 48.00 元

《非牛顿流体注入动态分析方法

研究文集(上册)》

编辑委员会

主 编：徐建平 刘 聪 王承毅 赵平起
编 委：王华崇 贺子伦 陈瑞华 倪方天
孙广义 王连友 韩旭东 冀秀文
蒋 华 王志愿 刘继红

前 言

我国大部分油田已进入高含水期开发,由于油藏的非均质性以及油水的粘度差异,会造成注入水沿着注入井和生产井之间的高渗透层、大孔道或裂缝单层突进或指进,导致生产井过早水淹,高渗透层水淹严重,中、低渗透层动用程度较低或未动用,从而降低了水的波及效率和水驱效果。

注入非牛顿流体(高分子聚合物溶液驱油)作为扩大油藏波及体积,从而提高原油最终采收率的方法,已经从矿场试验阶段进入了工业化应用阶段,目前技术上也相对比较成熟,其驱油机理主要是靠注入流体的粘度改善不利的油水流动度比,提高驱替效果。

注入非牛顿流体提高原油采收率,在我国油田已进行了广泛的矿场应用,取得了显著的经济效益和社会效益。编写本书的目的就是为了对非牛顿流体注入动态分析方法进行系统和深入的总结,以进一步完善和指导这项技术的现场应用。

本套书分上、下两册,收录了多篇关于非牛顿流体注入动态分析方法的论文,既介绍了国外非牛顿流体注入动态的分析方法,也论述了我们自己开发的新的分析模型以及国内、外油田的现场应用效果评价。

本书还有两个附录:常用单位及其换算;非牛顿流体注入动态英汉名词索引,以便于读者查阅。

由于作者的水平及能力有限,错误之处在所难免,敬请读者和专家们多提宝贵意见,在此表示感谢!

编 者

2002 年 9 月

目 录

石油开采中使用的聚合物及其流变性	(1)
均质油藏非牛顿幂律流体不稳定压力动态	(10)
裂缝控制油藏非牛顿流不稳定压力动态	(17)
非牛顿幂律流体不稳定球形流动	(26)
牛顿/非牛顿流体复合油藏干扰分析	(33)
用数值模拟求解非牛顿/牛顿流体复合油藏的不稳定压力动态	(39)
双渗透聚合物驱油藏不稳定压力解	(57)
多层混合油藏非牛顿幂律流体不稳定压力动态	(70)
考虑非线性吸附聚合物驱油藏的浓度分布与变化	(77)
考虑线性吸附聚合物驱油藏的浓度分布与变化	(83)
压力导数在非牛顿/牛顿流体试井解释中的应用	(90)
油藏中注入聚合物溶液的压力动态分析	(114)
提高原油采收率工程的试井解释	(131)
附录 I 常用单位及其换算	(145)
附录 II 非牛顿流体注入动态英汉名词索引	(146)

石油开采中使用的聚合物及其流变性

摘 要

本文介绍了聚合物驱在国内外的的发展概况,并且给出了聚合物溶液分子结构的描述,另外讨论了聚合物溶液的流变性及其在孔隙结构渗流中的流变行为,给出聚合物溶液在孔隙中渗流的剪切速率表达式以及粘度与剪切速率的幂率关系。

聚合物驱在国内外的的发展概况

20 世纪 50 年代以来,提高油田的石油采收率(EOR)日益成为石油企业界经营规划的组成部分,更是石油科技界的重大研究课题。提高石油采收率(EOR)是靠注入原来油藏中没有的各种物质进行采油,它包括各种类型的采油方法,也包括众多采油用的工作剂。这种定义并不把提高石油采收率局限于一个油藏开采历程中的某一特定阶段(如一次、二次、三次采油)。一次采油是靠各种天然驱动机理采油的,例如溶解气驱、水侵、气顶驱或重力泄油等;二次采油是指运用各种工艺技术,例如注气或注水等,其目的是为了使其局部保持地层压力;三次采油是指二次采油之后所采用的工艺技术。

EOR 技术以美国发展最快,早在 20 世纪 20 年代,美国就发表了注碱水提高采收率的专利。现在流行的化学驱中的稠化水驱以及气体溶剂驱中的注液化石油气都是在 50 年代初提出来的。60 年代,美国除对稠化剂由最初的纤维素改为聚合物外,对以后 EOR 技术有较大影响的是提出了胶束溶液混相驱。到 70 年代,美国就在胶束溶液基础上发展了注微乳液的超低张力驱。在 80 年代苏联开始重视除注水外的其它 EOR 技术。我国 EOR 技术研究最早的是新疆,1958 年开始研究火烧油层。大庆油田是在一投入开发时就开展了 EOR 研究的,前后研究过的项目有 CO_2 驱、聚合物驱、 CO_2 混相驱、胶束溶液、微乳液驱等项目,是我国 EOR 项目研究最多的油田。除此之外,辽河、华北、玉门、胜利、大港等油田已在 80 年代初进行了 EOR 研究,如大港进行了聚合物调剖和聚合物驱的室内和矿场试验。目前,我国老油田已面临产水率不断上升的局面,对它们实施 EOR 技术或对特殊油藏实施 EOR 技术已迫在眉睫。

聚合物用于 EOR 主要有两个目的:改善流度比;调整吸水剖面。使流度比获得改善的技术措施有:①降低排驱介质的流度,它可通过提高驱替水的粘度、降低水的流度,从而大大地降低油水流度比,以减缓“指进”现象,改善油层横向及微观孔隙结构的非均质状况,缓解窜流、绕流等现象,增加驱替水波及面积来实现;②

提高油的流量,它可通过降低油的粘度来实现。

在水中加入聚合物,提高注入水的粘度,也就降低了排驱介质的流量。聚合物溶液用于调剖,同样是利用聚合物溶液的高粘度。舌进是降低波及系数的主要原因,当高渗透层的油水前缘达到生产井后继续注水,大部分的水仅仅无效地穿过高渗透层,不能有效地扩大低渗透层的波及面积。对于这类油层,只有通过增加高渗透层的阻力,降低吸水指数,才能提高低渗透层的吸水指数,扩大波及面积。

国内外的专家学者们在三次采油方面进行了多年的研究和探索,目前已形成了三种重要的三次采油方法,即热力驱、化学驱和混相驱。化学驱主要包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱以及由它们组合起来的复合驱等。而聚合物驱具有驱油机理不太复杂,技术比较简单,成本较低等优点,它比较适合我国大多数油田的实际情况。因此,深入进行聚合物驱的研究,对改善油田的开发效果,保持原油稳产,提高原油最终采收率具有重要的指导作用。

聚合物的类型及其结构

聚合物的定义是由大量的简单分子(单体)化合而成的高分子量的大分子所组成的天然的或合成的物质。

无数的单体分子通过聚合反应使起步单元链节由 2 变到 10^6 数量级。聚合物性质和行为可在较大程度上变化,这是由聚合物的单体、聚合度及分子构型而引起的。

贯穿在聚合物链中的重复单元称为链节。链节像链状般存在,聚合物具有线型、支链型、交链型三种构型。这些构型可由仪器分析确定,有利于判断聚合物的性质。线型高分子聚合物宜于降阻,交联的网状高分子宜于增粘。

驱油用的聚合物大致可分为天然和人工合成聚合物。天然聚合物从自然界中得到,如改进的纤维素类,有时也从细菌发酵得到,如生物聚合物的黄胞胶。工业上广泛应用聚合物的多为聚丙烯酰胺和黄胞胶(Xanthan),但黄胞胶比较昂贵,除非在高矿化度、高剪切的油层中使用外,一般都使用聚丙烯酰胺,因而对其研究成为必然。

聚丙烯酰胺有非离子型、阴离子型和阳离子型三类产品,其中应用于驱油的是阴离子型聚丙烯酰胺。柔顺的线性碳—碳链是它们的高分子骨架,分子中带有极性或电性基团。聚丙烯酰胺的分子量在 1×10^6 和 8×10^6 之间,分子尺寸大约为 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。

阴离子型聚丙烯酰胺习惯上也称部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),它可由 PAM 水解或丙烯酰胺与丙烯酸共聚得到。用水解度表示羧基的含量。

提高石油采收率用聚丙烯酰胺的水解度,一般可控制在 7% ~ 35%。如果水解度太小,则聚合物溶于水能力差;如果水解度太大,它的各种性质对溶剂中的含盐度、硬度等又会变得太敏感。部分水解聚丙烯酰胺溶于水后解离成荷负电的大分子,分子之间的静电排斥作用和同一分子上的不同链节之间的阴离子排斥力导致分子在溶液中伸展并能使分子之间相互缠绕。这是部分水解聚丙烯酰胺能使其水溶液粘度明显增加的原因。

如果增加水溶液中的一价或多价金属阳离子,则会促使碳—碳链间自由旋转引起分子的卷曲。这样高分子反离子(金属阳离子)的屏蔽作用会引起高分子的静电排斥作用大大减弱,从而也就减弱伸展分子间的相互缠绕。同时,分子的运动阻绊作用也大大减弱,水溶液粘度降低,甚至形成凝聚而沉淀。

部分水解聚丙烯酰胺分子还能够同多价金属离子如 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 或 Al^{3+} 及 B^{4+} 等进行络合交联反应生成三维网状结构的凝胶,生成的立体三维网状凝胶具有很高的粘度,在多孔介质中流度很低,能够起到封堵高渗透率层带的作用。

HPAM 是聚丙烯酰胺水解后的产物。若由 n 个丙烯酰胺分子聚合成聚丙烯酰胺, n 则称为聚合度,其基本单元是丙烯酰胺,聚丙烯酰胺加 NaOH 水解生成部分水解聚丙烯酰胺,其基本单元如图 1 所示。



图 1 水解聚丙烯酰胺基本单元

由于聚合物是由很多基本单元连接起来的,根据基本结构单元的化学结构,即分子内原子或原子团的种类以及它们的结合方式,单个高分子化合物就有不同的结构形式。它分为下述三类。

1. 线性结构

基本结构单元联成一条线型的长链大分子,如图 2 所示。

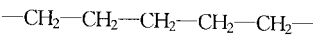


图 2 线性结构

2. 支链结构

长链分子两侧连接相当数量的侧链,如图 3 所示。

3. 体型结构

高分子化合物链与链之间有交链连接时形成体型结构,如图 4 所示。

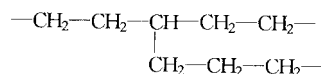


图3 支链结构

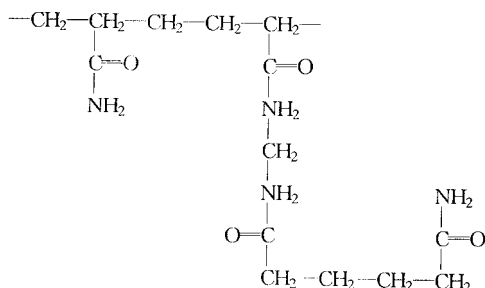


图4 体型结构

与低分子化合物不同,高分子聚合物因其分子体积大,分子的形态也就成了重要的物理性质之一,它直接影响到溶液的粘度和流变性。

单个高分子的形态是由高分子的化学结构和分子所处的环境决定的。以碳原子相连接而成分子主链的线性分子,如部分水解聚丙烯酰胺,具有很大的柔曲性,而具有环状结构的线型分子黄胞胶便是柔曲性极小的分子。主链上的单键产生内旋转是分子具有柔曲性的关键因素。这种由于C—C单键内旋转而形成的短链就会产生许多形态。大分子上有上万个C—C单键,因此,整个分子的形态千变万化,像杂乱的线团,称为无规线团。将分子的形态成为构象,无规线团的构象数量大,符合构象熵总是自发趋于最大的原则。所以自然卷曲的无规线团是最稳定的。环境可以使分子的构象改变,柔曲性越好的分子,构象越易随环境而变,但当使其构象改变的环境消失后,分子将按照构象熵总是趋于最大的原则自发恢复为无规线团状。

可供工业部分水解聚丙烯酰胺产品有凝胶、乳液和固粉三种状态。凝胶呈半固态,一般有效浓度为5%~10%;乳液为部分水解聚丙烯酰胺呈分散状态的油包水乳状液,有效浓度为30%~50%;固粉是聚合物产物经滚筒、传送带或流化床上干燥、研磨而成的粉末状固态颗粒,颗粒越小水溶越快,有效成分一般在85%以上。

聚合物溶液的流变性

研究流体流动和变形的问题属于流变学的范畴,其模型主要通过本构方程来表征。过去,人们一直致力于从唯象的观点发展流变状态方程。在唯象方法中,强调建立应力分量和形变(或形变速率)分量之间的关系,这种关系应正确描述出材料对某一给定形变的响应。在一个给定的流变状态方程中的常数可认为表示

了材料特性。

有两种类型的流变状态方程,即速率型和积分型。速率型流变状态方程包含应力张量的微商或形变速率张量的微商,或同时包含这两个微商;而积分型流变状态方程的应力可表示为在形变(或应变)历史上的积分。考虑至现在时刻为止的过去应力历史的一般理论首先是 Green 和 Rivlin 提出的,而后由 Coleman 和 Noll 重新系统表述。基于这个理论的流变状态方程描述的流体称为“记忆流体”或“简单流体”。

在 20 世纪五六十年代,许多学者从聚合物材料植被和聚合物加工两种观点出发,研究分子参数与流变性之间的关系,虽然在此期间取得了一些进展,但在这方面的理论发展远非完善。后来一些学者实验研究了分子特征与材料流变性之间的关系。Rouse、Zimm 和 Kirkwood 及 Riseman 等学者基于化学势的概念和坐标轴的正交变换,发展了线性聚合物稀溶液的分子理论,讨论了串珠连段模型。但是 Rouse 和 Zimm 理论模型均不能描写聚合物材料的剪切依赖性的粘度。国内一些学者也研究刚性聚合物稀溶液和哑铃式聚合物稀溶液的分子流变性,由于研究问题的条件不同,使得研究结果各有差异。

在石油工程领域,自 60 年代以来,国外对聚合物溶液的流变性质进行了系统和深入的研究,建立起若干流变模型,其中大部分研究限定在聚合物溶液的粘滞特性上。由于聚丙烯酰胺高分子结构和构象极为复杂,根据唯象分析和分子理论推导的成熟理论流变模型很少报道过,因此许多学者在实验研究基础上,已经获得了许多经验流变模型,如 Carreau、Meter、Cross 和 Ellis 模型等。自 80 年代以来,国内也开始了聚合物溶液流变性的实验研究,但这些研究与分析主要针对聚合物溶液的粘性特性和聚合物驱油田的实际情况而进行的。

聚合物溶液中的聚合物分子受到应力的作用时,可以产生两种流动:一种为粘滞流动,表征聚合物溶液的非牛顿粘性,描述分子链之间相互滑动的一种不可逆的整体变形;另一种为粘弹性流动,表征聚合物溶液的粘弹特性,描述聚合物分子通过围绕化学键自由旋转的链断面而使平衡构造产生变形,是一种与时间相关的可逆过程。

聚合物溶液是一种非牛顿粘弹性流体,但粘弹性在流速较高时才能够明显表现出来。在聚合物的实际应用中,聚合物浓度一般不大于 3000mg/L,此时聚合物溶液是非牛顿流体,而且在一般情况下为假塑性流体,表现为剪切稀化特征,即表观粘度随剪切速率的增加而减少,其流变曲线如图 5 所示。在一定聚合物浓度和水的矿化度下,剪切速率 $\gamma \leq \gamma_{\min}$ 或 $\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2$ 时,粘度为定值,可看作牛顿型的。 $\gamma \geq \gamma_2$ 时,粘度随 γ 的增加而增加,则溶液为膨胀性流体,这种情况在地下渗流过程中很少出现。大多数情况下, $\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_1$, 此时粘度随 γ 的增加而降低,粘度和剪切速率间关系可用幂律模型描述。

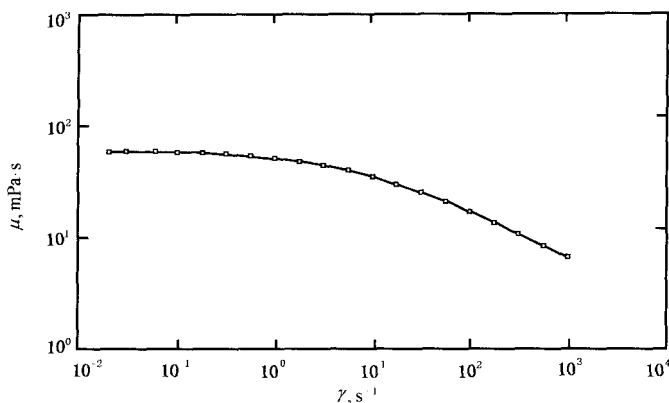


图5 聚合物粘度与剪切速率的关系

深入研究不同浓度聚合物溶液的流变模式,在矿场聚合物实际应用浓度范围内的聚合物溶液,一般显示如下典型特征:在双对数坐标上,在很低的剪切速率下显示出牛顿流体的特征,其表观粘度不随剪切速率而改变;当剪切速率高达一定程度,其表观粘度几乎随剪切速率的增加而直线下降,即表现为假塑性流体的特征;当剪切速率继续升高至某一较大的数值(一般大于 10^4s^{-1})时,又显示出牛顿流体特征。由此可见,聚合物溶液显示出复杂的流变特性,在一定的范围内,可以用幂律模式反映其流变行为。

在幂律区,剪切速率与粘度的关系可用幂律模式来描述,基本本构方程为:

$$\mu = A\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

一般认为,聚合物溶液剪切变稀行为的理论解释如下:

(1)在速度梯度的流场中,大分子构象发生变化。在第一牛顿区,切变速率较低,构象基本不变,流动对结构没有影响,故服从牛顿定律。随着切变速率增大,大分子构象发生变化,长链分子偏离平衡构象而沿流动方向取向,使大分子之间的相对运动容易,粘度随剪切速率的增大而减小,即为非牛顿区。当剪切速率增大到某一个值,使大分子取向达到极限状态,取向程度不再随剪切速率的增大而变化,流体又服从牛顿定律,即进入第二牛顿区。

(2)分子形变引起流体力学相互作用的变化。由于柔性长链分子之间相互扭曲成结(几何缠结)或大分子间形成的范德华交联点,形成分子链间的缠结。这种缠结点通过分子的无规热运动,可以在一处解开而在另一处又迅速形成,始终处于与外界条件(温度、外力等)相适应的动态平衡。在低剪切速率下,流体被切力破坏的缠结能及时重建,缠结点的密度保持不变,所以粘度不变,属牛顿流动。随剪切速率增大,缠结点的解开速率大于重建的速率,导致缠结点随剪切变速率的增大而下降,表观粘度也随之减小,呈现非牛顿运动,当剪切速率大到某一值,缠结点的解散来不及重建,则粘度降到最小值,并不再改变,进入第二牛顿区。在现有实验条件下,一般无法测得溶液的第二牛顿区的流变特性。

聚合物溶液在渗流过程中的流变性

聚合物溶液作为一种非牛顿流体,在多孔介质中,其流变行为可概括为剪切降粘和弹性效应。聚合物这种不同于牛顿流体的性质源于聚合物大分子性质,同时又受多孔介质性质制约。许多研究结果表明,在通常聚合物驱所采用的聚合物浓度及注入条件下,部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)溶液粘弹性效应可以忽略,然而在较高聚合物浓度,尤其是在较高流动速度下,其粘弹性效应不容忽视。

聚合物溶液在孔隙介质中呈现的流变性与在等径的毛管中所呈现的流变性不完全相同,在等径毛管中,溶液只遭受剪切力。但在孔隙介质中存在收缩—扩大的流道,有拉伸应力产生,出现粘弹行为。流体反抗拉伸表现为阻抗随流速上升而上升,有效粘度增加出现胀流性特性。空隙介质的孔道连续收缩—发散,聚合物溶液在孔隙介质中流动既有剪切流动,也有拉伸流动。当聚合物溶液在一定低速范围内通过孔隙介质时,以剪切流动为主,在孔喉处不会出现大的流速和拉伸速率,这时,大分子在剪切力场的作用下顺流动方向伸展定向,流动阻抗随速率增加而下降,流变性呈假塑性。当流速增加到一定程度后,继续增加流速,孔喉处的流速和拉伸速率都显著增加,这时分子的弹性显示出剪切增稠。经聚合物溶液通过的岩心,在等速下用水冲洗至冲洗渗透率,若降低压差,流量不是按达西定律成比例下降,而是比达西定律预测的流量小得多,这是滞留分子粘弹性效应造成的附加渗透率降低。当注入速率超过临界注入速率时,聚合物的粘弹性作用通过有效粘度的增加来加以反映,有效粘度由剪切粘度和应变粘度构成,临界注入速率取决于聚合物的浓度、水解程度、相对分子质量、岩心渗透率、矿化度及温度。聚物流经空隙时因分子的旋转而不产生应变,但由于剪切作用而导致剪切粘度。但是,对具有一定几何形状的孔隙介质,聚合物分子会产生变形而导致应变粘度的增大。

对于剪切速率 γ ,人们常把聚合物溶液流过多孔介质时所受到的剪切应变速率称之为等效剪切速率,它是联系聚合物溶液自身的表观粘度和多孔介质中流动表观粘度的纽带。

多孔介质孔隙结构的复杂性以及聚合物分子在多孔介质中的吸附滞留,使得精确计算多孔介质中聚合物溶液等效剪切速率困难很大。但是,根据一定的简化条件推导出的多孔介质等效剪切速率计算公式,经经验证明还是比较实用的。下面的表达式是通过表观流速表示剪切速率。

目前的公式主要有以下几种:

(1)Hirasaki 和 Pope 由幂律流体修正 Black—Kozeny 模式出发,利用其表达式与多孔介质等效剪切速率的关系,推导出多孔介质等效剪切速率计算公式:

$$\gamma = \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \frac{12v}{(150K\phi)^{0.5}} \quad (2)$$

(2)许多研究工作者使用 Black—Kozeny 模式,并运用平行毛管束模型,推导出幂律流体在多孔介质中等效的剪切速率计算公式,Christopher 和 Middleman 得出的结果为:

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n} \frac{12v}{(150K\phi)^{0.5}} \quad (3)$$

Gogarty 在实验基础上对系数进行了修正:

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n} \frac{50v}{(150K\phi)^{0.5}} \quad (4)$$

(3)对于幂律流体,利用平行毛管束模型可直接导出多孔介质等效剪切速率计算公式:

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n} \frac{\sqrt{2}v}{(K\phi)^{0.5}} \quad (5)$$

观察以上公式,可以看出,多孔介质等效剪切速率可以写成以下通式:

$$\gamma = \frac{Dv}{(K\phi)^{0.5}} \quad (6)$$

根据美国 W. Littmann 的实验工作表明,式(5)计算精度最好。

结 论

(1)本文一般性地介绍了聚合物驱在国内外的的发展概况,并且给出了聚合物溶液分子结构的描述。

(2)讨论了聚合物溶液的流变性及其在孔隙结构渗流中的流变行为,给出聚合物溶液在孔隙中渗流的剪切速率表达式以及粘度与剪切速率的幂律关系。

符 号 说 明

μ ——流体粘度, mPa·s;

γ ——剪切速率, 1/s;

A ——稠度系数, Pa·sⁿ;

n ——幂律指数, 无量纲;

ϕ ——地层孔隙度, 小数;

h ——地层厚度, cm;

K ——渗透率, μm^2 ;

v ——表观流速, cm/s。

参 考 文 献

- [1] 夏惠芬著. 粘弹性聚合物溶液的渗流理论及其应用. 北京: 石油工业出版社, 2002
- [2] [美] W. 利特马恩著, 杨普华, 杨育森译. 聚合物驱油. 北京: 石油工业出版社, 1991
- [3] 吴文祥, 白玉, 宋考平编著. 聚合物驱分子量优选研究. 北京: 石油工业出版社, 1996

均质油藏非牛顿幂律流体不稳定压力动态

摘 要

本文研究了聚合物驱油藏井筒不稳定压力动态,过程中考虑到粘度是剪切速率变化函数,建立了幂律流体不稳定渗流方程,并对模型进行了求解。从绘出的典型曲线可以看到,在双对数图上,压力导数径向流表现出与牛顿流截然不同的特征。该解可用于产生理论曲线进行实测数据分析。

引 言

国内外很多学者研究过孔隙介质中非牛顿流体的流动问题。1969年 Savins 即进行过比较详细地研究。同年, Van Poolen 和 Jargon 发表了理论研究结果,该文中考虑到剪切速率对粘度的影响,将粘度视为几何空间的函数,对非牛顿幂律流体流动的稳态和非稳态问题的偏微分方程采用有限差分数值求解,结果表明,非牛顿流瞬态压力响应特征与牛顿流特征很不一样。1978年, Odeh 和 Yang 得出非牛顿幂律流体 Laplace 变换空间井筒压力响应解。同年, Ikoku 和 Ramey 采用修改的 Blake-Kozeny 一维幂律流体的流动方程也得出拉氏变换空间井筒压力解。但是前面的文献中都没有考虑到井筒储存和表皮效应的影响。1980年 Odeh 和 Yang 又考虑到表皮效应的影响,并采用 Cinco-Ley 和 Samaniego 井筒储存模拟器的方法(褶积法)用数值模拟的方法给出包含井筒储存影响的井筒压力求解方法,但没有给出解的具体表达形式。本文采用 Savins 粘度与剪切速率关系式,并且进行了一些计算和 Ikoku 和 Ramey 的数值计算结果进行了比较,二者显示出很好的一致性。

NWLTS 解的导出

对于非牛顿幂律流体,地下渗流粘度 μ 是随剪切速率 ν 的变化而改变的,根据二者关系划分出三个区,在低剪切速率区,流体粘度趋于最大值,而在高剪切速率区粘度趋于最小值,在二者之间广阔的范围,粘度与剪切速率指数的乘积 $\mu\nu^{1-n} = A$ 为常数,式中 $n \rightarrow 1$ 时则 $\mu \approx A$ 成为牛顿流,采用 Savins 形式:

$$\nu = \frac{1.5 \times 10^3 q}{hr \sqrt{K\phi}} \quad (1)$$

对于二维径向微可压缩流体流动方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left(\frac{r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right)}{\partial r} = \frac{\phi C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

考虑关系 $\mu = A\nu^{n-1}$, 上式化为幂律流体渗流方程:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{n}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = Br_D^{1-n} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (3)$$

式中

$$B = \frac{A\phi^{\frac{3-n}{2}} C_t h^{1-n}}{K^{\frac{1+n}{2}} (1.5 \times 10^3 q)^{1-n}}$$

初始条件与边界条件:

$$p = p_i \quad (t = 0) \quad (4)$$

$$p \rightarrow p_i \quad (r \rightarrow \infty) \quad (5)$$

$$p_w = p_{r=r_w} + S \left(-r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} \quad (6)$$

$$C \frac{dp_w}{dt} + \frac{2\pi Kh}{\mu} \left(-r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} = q \quad (7)$$

采用无量纲变量, 以上流动方程变为无量纲形式:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{n}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = r_D^{1-n} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (8)$$

$$p_D = 0 \quad (t_D = 0) \quad (9)$$

$$p_D \rightarrow 0 \quad (r_D \rightarrow \infty) \quad (10)$$

$$C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} + \left(-r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \quad (11)$$

其中:

$$p_D = \frac{0.02\pi h^n (1.5 \times 10^3)^{1-n} K^{\frac{1+n}{2}}}{q^n r_w^{1-n} A\phi^{\frac{1-n}{2}}} (p - p_i)$$

$$t_D = \frac{0.01t}{Br_w^{3-n}}, r_D = \frac{r}{r_w}, C_D = \frac{C}{2\pi h\phi C_t r_w^2}$$

对方程进行 Laplace 变换, 得:

$$\frac{d^2 \bar{p}_D}{dr_D^2} + \frac{n}{r_D} \frac{d\bar{p}_D}{dr_D} = r_D^{1-n} Z \bar{p}_D \quad (12)$$