

强化泡沫驱提高 原油采收率技术

王增林 编著



中国科学技术出版社

强化泡沫驱提高原油采收率技术

王增林 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

强化泡沫驱提高原油采收率技术 / 王增林编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2007.1
ISBN 978-7-5046-4586-9

I.强 ... II.王 ... III.泡沫驱油 IV.TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 149125 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 12.125 字数: 350 千字

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5046-4586-9/TE·18

印数: 1-1000 册 定价: 40.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书以专题形式介绍了泡沫驱提高原油采收率技术的基本原理和应用方法,其中包括泡沫驱提高采收率机理和泡沫体系在多孔介质中的渗流特征;强化泡沫驱物理模拟研究,重点介绍强化泡沫体系静态筛选、强化泡沫体系堵调性能和泡沫驱油效果评价;泡沫调驱数学模型研究建立氮气泡沫驱渗流模型、泡沫体系作用机理与物化参数模型,并对泡沫驱数学模型的封闭性进行了分析;泡沫调驱数值模型重点介绍泡沫驱数学模型 IMPES 方法、泡沫驱半隐式数值模型和全隐式数值模型;泡沫驱提高原油采收率技术应用方法中介绍了泡沫驱油藏数值模拟优化设计方法,包括典型非均质概念模型设计方法、注采参数敏感性和泡沫驱注采方案优选方法,并通过典型非均质模型研究了不同驱替方式下的动态特征;泡沫驱提高采收率应用研究以胜利油区孤岛油田 28-8 井区、埕东油田西区、坨 11 断块为例对氮气泡沫驱先导性试验区选择、方案研究和矿场实施方案进行了详细介绍。

引言

中国大部分油田已进入高含水甚至特高含水开发阶段,如何提高此阶段的剩余油采收率,对于提高油田的整体开发效益显得尤为重要。由于聚合物驱、凝胶处理等化学驱方法受技术、经济等因素的限制,如聚合物的抗盐性、聚合物分子量、聚合物用量以及聚合物驱成本较高等问题,使其在矿场上的应用受到一定的限制。泡沫调驱由于矿场实施成本较低,工艺相对简单,提高采收率效果较明显(一般可提高采收率 10%~25%),正得到迅猛的发展,并有望成为进一步改善高含水阶段开发效果及聚合物驱后提高原油采收率的有效接替技术。因此,常规油藏泡沫驱提高采收率理论与应用将在泡沫体系性能评价与筛选、泡沫驱渗流理论、泡沫驱物理模拟与数学模拟以及泡沫驱油藏工程设计等方面进行深入研究,对于完善多相多组分驱替渗流理论和丰富提高原油采收率技术都具有重要的现实意义。

泡沫调剖驱提高采收率的基本思想就是:当气体在表面活性剂的作用下以泡沫状分散在液体中时,液膜起到滞留气体的作用,随水注入的聚合物可以进一步稳定液膜,延长液膜滞留气体的作用时间,从而大幅降低气相的流度,减弱了驱替液与被驱替液之间的流度差异,从而有效地改善了驱替前缘的指进现象,提高驱替体系的波及系数和驱油效率。这也是泡沫调剖比单纯水驱或气驱提高采收率效果明显的主要原因。

国内外部分油田的室内和矿场实验表明,泡沫可以改善不利的流度比、提高波及系数和扫油效率,延缓气体的突破时间,用泡沫体系代替昂贵的化学剂可以获得比三元复合驱更高的采收率和更好的经济效益。

胜利油区经过三十多年的开发,大部分油田已进入特高含水期,正面临含水高、采出程度高、采油速度高、储采比低、水驱采收率低的开发形势,勘探新增储量的难度越来越大,成本越来越高,进一步提高已探明、已开发储量的采收率已经成为十分迫切的工作,提高采收率技术越来越受到人们的关注。

目前应用较广泛的提高采收率方法有热采、聚合物驱、气驱等,聚合物驱油技术已经在胜利油区得到了工业化应用。胜利油区于 1992 年在孤岛油田中一区 Ng3 进行聚合物驱先导试验以来,规模不断扩大,截至 2002 年底,全油田共实施聚合物驱单元 18 个,动用地质储量 $2.17 \times 10^8 \text{t}$,各个单元不同程度地见到了降水增油效果,累积增油达 $602 \times 10^4 \text{t}$,聚合物驱已经成为老油田大幅度提高原油采收率,增加原油产量的主要手段。但是,实施过程中也暴露出一些问题。

首先,聚合物驱油效果有待进一步提高。在研究化学驱三次采油机理过程中发现,由于储层的不均匀性,单一聚合物改善流度、提高原油采收率的作用是有限的。影响聚合物驱油效果的突出问题是油藏非均质性严重,大孔道存在,聚合物窜流严重,导致聚合物驱见效时间短,驱油效果差。其次,聚合物驱后需要进一步提高采收率。胜利油区水驱采

收率比较低,平均为 28.8%,孤东、孤岛、胜坨三个聚合物驱主力油田提高采收率 7%左右,聚合物驱后地下仍有大量的剩余油。第三,III、IV类油藏提高采收率问题。胜利油田有 I、II类储量 5.4×10^8 t,根据目前已实施单元的储量动用率,实际可动用储量仅为 3.5×10^8 t,“十五”末聚合物驱累积动用地质储量 3.1×10^8 t,剩余 0.4×10^8 t。“十五”后,III、IV类储量是三次采油的主阵地。III类储量提高采收率技术有待进一步攻关,而聚合物驱对存在边底水、大孔道相对发育的IV类储层风险较大,需要研究其他的驱油方法。

泡沫驱是一种用泡沫作为驱替介质的驱油方法。试验证明,泡沫视黏度高,可改善流度比,增大高渗层流动阻力,发挥低渗层作用;封堵调剖能力强,遇水稳定遇油破灭的特性增加了封堵的选择性,堵水不堵油;泡沫剂作为优良的活性剂,能降低油水界面张力,提高洗油效率。

强化泡沫体系是在泡沫体系中加入定量的聚合物,聚合物的加入可以提高泡沫体系黏度,增强泡沫的稳定性,同时可以减少泡沫剂在油藏中的吸附损耗。强化泡沫体系具有泡沫体系及聚合物的双重优点,起到协同增效的作用。因此强化泡沫体系将在改善聚合物驱效果、聚合物驱后进一步提高采收率及IV类油藏提高采收率方面发挥重要的作用。

目 录

引 言

第一章 国内外研究现状及矿场应用状况	(1)
第一节 泡沫驱理论研究概况	(1)
一、国外理论研究概况	(1)
二、国内理论研究概况	(7)
第二节 矿场应用概况	(10)
一、国外矿场应用概况	(10)
二、国内矿场应用概况	(11)
三、存在问题	(11)
第二章 泡沫驱提高采收率机理表征	(13)
第一节 泡沫流体	(13)
一、泡沫基本概念	(13)
二、泡沫流体的组成	(13)
三、泡沫的形成与稳定性	(17)
四、泡沫流体的基本性质	(25)
第二节 泡沫体系在多孔介质中的渗流特征	(26)
一、起泡剂浓度及在岩石表面的吸附	(26)
二、泡沫在多孔介质的生成机理	(28)
三、泡沫在多孔介质中的消泡机理	(32)
四、泡沫流体在多孔介质中流动特征	(36)
第三节 泡沫驱提高采收率机理表征	(38)
一、改善流度比	(38)
二、提高洗油效率	(40)
三、增加弹性能量	(41)
第三章 强化泡沫驱物理模拟研究	(42)
第一节 强化泡沫体系静态筛选	(42)
一、发泡能力	(43)
二、起泡剂的抗油性	(43)
三、耐盐、抗二价离子性能	(43)
四、抗老化性能	(43)

五、起泡剂的洗油能力·····	(43)
六、起泡剂的吸附性能·····	(44)
第二节 强化泡沫体系堵调性能研究·····	(44)
一、泡沫封堵能力试验研究·····	(44)
二、泡沫调剖能力试验研究·····	(46)
第三节 氮气泡沫驱油效果评价 ·····	(49)
一、不同渗透率双管模型单一泡沫驱·····	(49)
二、聚合物驱后复合泡沫驱油试验·····	(50)
三、不同渗透率双管模型注入强化泡沫体系·····	(51)
四、不同渗透率双管模型极限条件下驱油试验·····	(52)
五、强化泡沫驱不同驱替方式驱油效果比较·····	(54)
六、强化泡沫驱与聚合物驱驱油效果比较·····	(55)
第四章 泡沫调驱数学模型研究·····	(58)
第一节 泡沫流变性 ·····	(58)
一、液体的流变特性·····	(58)
二、泡沫流体流变性·····	(58)
三、泡沫流变性能参数·····	(62)
第二节 氮气泡沫驱渗流数学模型·····	(63)
一、渗流数学模型·····	(64)
二、泡沫体系作用机理与物化参数模型·····	(64)
三、泡沫驱数学模型的封闭性·····	(68)
第五章 泡沫调驱数值模型研究 ·····	(69)
第一节 泡沫驱 IMPES 数值模型·····	(69)
一、IMRES 方法求解思路 ·····	(69)
二、隐式压力数值模型·····	(70)
三、显式饱和度数值模型·····	(71)
四、显式组分浓度数值模型·····	(72)
五、井点处理方法·····	(73)
第二节 泡沫驱半隐式数值模型 ·····	(75)
一、隐式差分形式·····	(75)
二、半隐式处理方法·····	(76)
第三节 泡沫驱全隐式数值模型 ·····	(81)
一、全隐式数值模型·····	(81)
二、非线性数值模型求解方法·····	(83)
第四节 数值弥散与 IMPES 稳定性处理方法·····	(87)

一、传导系数处理·····	(88)
二、IMPES 稳定性·····	(90)
三、泡沫调驱数值模拟软件设计·····	(91)
第六章 泡沫驱油藏数值模拟优化设计方法·····	(93)
第一节 非均质概念模型设计·····	(93)
一、抽象地质模型·····	(93)
二、非均质性特征·····	(94)
三、非均质储层渗流特征·····	(96)
第二节 泡沫驱注采参数设计方法·····	(109)
一、注采参数敏感性分析·····	(109)
二、泡沫驱注采方案优选·····	(111)
第三节 泡沫驱动态特征分析·····	(114)
一、基本非均质地质模型·····	(114)
二、不同驱替方式动态·····	(115)
第七章 泡沫驱提高采收率应用研究·····	(125)
第一节 泡沫复合驱单井试注先导试验·····	(125)
一、单井试注试验选井·····	(125)
二、单井试验方案·····	(126)
三、试验历程·····	(126)
四、单井试注试验结果·····	(127)
第二节 埕东油田西区泡沫驱先导性试验·····	(134)
一、强化泡沫驱试验区选择和条件分析·····	(134)
二、试验区油藏地质特点·····	(138)
三、水驱开发评价及剩余油分布研究·····	(144)
四、强化泡沫驱方案数值模拟研究·····	(149)
五、矿场实施方案·····	(160)
第三节 坨 11 断块泡沫驱先导性试验·····	(165)
一、试验井组地质模型·····	(165)
二、水驱开发历史拟合研究·····	(167)
三、试验井组剩余油富集分析·····	(171)
四、氮气泡沫调驱参数设计与效果预测·····	(177)
参考文献·····	(177)

第一章 国内外研究现状及矿场应用状况

第一节 泡沫驱理论研究概况

一、国外理论研究概况

1. 泡沫生成机理

泡沫生成的主要机理包括泡沫捕集、液膜分断和液膜滞后, Chambers和Radke在微蚀刻模型中发现泡沫捕集有三种类型, 分别为“前颈”捕集、颈捕集和线性捕集, 每一种类型都存在于特定的条件。Arthur、Owete and Brigham也在这方面做了相关研究; Mast首先在蚀刻玻璃微模型中确定了另一种液膜生成方式, 即液膜分断; Owete and Brigham和Chambers and Radke的研究揭示了泡沫生成的另一个主要机理, 即液膜滞后。

另一方面, 在微模型研究过程中观察到的泡沫生成的影响因素还包括: ①毛细管压力波动。Rossen的研究指出毛细管压力波动是产生泡沫捕集所必须的液体压力梯度的首要条件, 但是这种影响因素对于液膜分断、液膜滞后机理产生的泡沫而言却不是必需的。②孔喉几何形态。William、Chambers、Radke和Roof的研究认为孔喉几何形态决定了泡沫捕集中毛细管压力波动的相对范围, 也决定了液膜分断过程中气泡侵入分支孔道交汇处孔喉的毛细管压力。③孔隙网络的拓扑结构。Rossen、Ranshoff和Radke的研究认为孔隙网络的拓扑结构决定了泡沫捕集中的毛细管压力衰变时间, 孔喉结构中分支点的数量(液膜分断)以及气体流动方向上的汇集(液膜滞后)。④流动速度。流动速度通常与整个泡沫体系的流动性或泡沫流动过程中的压力梯度相关, 但与泡沫生成机理并没有直接的关系。⑤岩石表面的润湿性。William和Radke认为由于毛管压力波动与岩石表面的润湿性相关, 因此, 岩石表面的润湿性在很大程度上影响着泡沫的生成机理。

2. 泡沫稳定性研究

泡沫稳定性研究主要涉及三个方面, 即泡沫聚并、泡沫结构和流动性以及油相对泡沫稳定性的影响。影响泡沫聚并的因素主要包括以下五种: ①表面活性剂类型和浓度; ②液相饱和度、泡沫流变性等, Chambers 和 Radke、Shirleyin、Owete 和 Brigham 在微模型研究中发现, 对于低液相饱和度或高特征值泡沫体系, 泡沫稳定性变差, 具有较高的聚并速度; ③气体流速。如同在泡沫产生过程中气体流速起较大作用一样, 足够大的气体流速会使泡沫稳定性下降; ④孔喉的几何形态。如果在多孔介质中液相饱和度较低, 大的孔喉尺寸可使液膜过度膨胀, 从而导致泡沫聚并。Kovscek 和 Radke 的研究认为, 孔喉几何形态与影响泡沫聚并的其他因素相比, 可能会强化泡沫“生成和破灭”, 泡沫控制气体流度的效果就会变差, 甚至完全丧失; ⑤气体扩散。气体从小气泡扩散到大气泡会导致分散小气

泡的消失, Mast、Hirasaki、Kovscek 和 Radke 等人通过微模型在这方面做了较多的研究。

3. 泡沫流变性研究

长期以来, 由于泡沫流动的复杂性, 研究结果甚至相互矛盾, 泡沫应用受到很大的局限。例如有人认为泡沫为牛顿流体(Persoff *et al.*; Ettinger和Radke; Rossen和Wang); 有人认为是剪切一变稀性流体(Hirasaki和Lawson; Falls *et al.*; Friedmann *et al.*); 有人认为是剪切一变稠性流体(Patzek和Koinis); 还有人认为是牛顿流体和剪切一变稀性流体的混合体系(Parlar *et al.*; Vassenden和Holt); 另外还有人认为, 泡沫强度随着泡沫干度的减少而增加的(Lee和Heller); 也有人认为是随着泡沫干度的增加而增加的(Chang和Grigg)等等。

1992年, Osterloh 和 Jante确定了两种泡沫流变系统, 即低干度泡沫系统和高干度泡沫系统。在低干度泡沫系统中压力梯度不依赖于液相流速而与气相流速有关; 高干度泡沫系统中压力梯度不依赖于气相流速而与液相流速有关。两种泡沫体系的划分是通过气体分流量 f_g^* 实现的。Parlar *et al.*、Robert和Mack、Rossen和Wang采用Berea cores岩心进行的泡沫驱替实验都证实了这种情况。

4. 泡沫体作用机理研究

(1) 半经验模型

1987年和1990年, Marfoe 和 Islam 先后提出了半经验关系式模型, 将有泡沫存在时气体的流度表达为流速、气体分数、表面活性剂浓度和其他因素的函数。此类模型用半经验关系式将有泡沫存在时气体的流度表达成流速、气体分数、表面活性剂浓度和其他因素的函数。以 Marfoe 和 Islam 的模型为例。Marfoe 通过提高气体黏度来反映气体流度的降低, 泡沫存在时气相黏度为:

$$\mu_{gfm} = \mu_g [1 + 0.01 C_{ws} (S_w - S_{wr}) f(u_g)] \quad (1.1)$$

$$u_g = \frac{v_g}{\phi} \quad (1.2)$$

式中, $f(u_g)$ — 气相真实流速的函数式;

u_g — 真实流速;

v_g — 达西流速;

C_{ws} — 水相中表面活性剂的质量浓度, %;

S_w 、 S_{wr} — 水相饱和度和残余水饱和度, f ;

μ_g 、 μ_{gfm} — 无泡存在和有泡存在时的气相黏度, Pa·s。

Islam 模型对 Marfoe 模型作了改进, 用下式模拟泡沫存在时的气体黏度:

$$\mu_{gfm} = \frac{\mu_g [1 + Df_c(C_{ws})(S_w - S_{wr})f_k(k) + f_p(\nabla p)]}{(1 + ES_o^2)} \quad (1.3)$$

$$f_p = b_1(\nabla p) - b_2(\nabla p)^2 \quad (1.4)$$

$$f_c = \begin{cases} \sqrt{c_1 C_{ws} - c_2 C_{ws}^2} & C_{ws} \leq C_{ws}^* \\ c_3 & C_{ws} > C_{ws}^* \end{cases} \quad (1.5)$$

$$f_k = \begin{cases} \sqrt{K_1 k - K_2 k^2} & k \leq k^* \\ K_3 & k > k^* \end{cases} \quad (1.6)$$

式中, D 、 E —经验常数;

f_c — C_{ws} 的函数;

f_k —绝对渗透率 k 的函数;

S_{wr} —束缚水饱和度;

S_o —油相饱和度;

f_p —压力的函数;

∇P —压力梯度;

b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 K_1 、 K_2 、 K_3 —常数, 由实验确定。

上式表明, 在小于某一临界值的情况下, 泡沫的黏度随着孔隙介质绝对渗透率的增加而增大, 气体流量降低, 泡沫黏度随着压降升高而迅速增大。Fisher 模型是在通常的三相模型的基础上考虑了泡沫流变性行为, 由达西定律有如下关系式:

$$\lambda_{rg} = \lambda_{ra}^* \cdot f_g / (1 - f_g) \quad (1.7)$$

式中, λ_{ra}^* —对应临界毛管压力时的水相流量;

f_g —气体分数;

在聚并区, 气体流量如下:

$$\lambda_{rg} = \lambda_{ra}^* \cdot (\lambda_{ra}^* / \lambda_{ra}) \quad (1.8)$$

由于 λ_{rg}^* 、 λ_{ra}^* 、指数 n 是气体流速和表面活性剂浓度的函数, 则上式可以进一步写为:

$$\lambda_{rg} = \lambda_{rg}^* \cdot \left(\frac{f_g / (1 - f_g)}{f_g^* / (1 - f_g^*)} \right)^{n/(n+1)} \quad (1.9)$$

$$\lambda_{ra} = \lambda_{ra}^* \cdot \left(\frac{f_g / (1 - f_g)}{f_g^* / (1 - f_g^*)} \right)^{-1/(n+1)} \quad (1.10)$$

n 越小, 表明非均质越严重; $n \rightarrow \infty$ 时为均质情况。当有油存在时, 取:

$$\lambda_{rg} = 10 \lambda_{rg}^* \cdot (\lambda_{ra}^* / \lambda_{ra})^n \quad (1.11)$$

(2) 泡沫总量平衡模型

Friedmann、SHChang、Ettinger 和 Radke、Kovscek、Fergui 和 Bertin 等分别在 1986~1998 年提出多种机理物化模型, 它们都属于泡沫总量平衡模型范畴, 该类模型在模拟有泡沫存在时的气体流量时考虑到泡沫驱的各种机理, 如泡沫的生成、破灭、聚并、运移、滞

留、启动等。

本模型在模拟有泡沫存在时的气体流度时考虑到泡沫驱的各种机理，如泡沫的生成、破灭、聚并、运移、滞留、启动等。考虑了泡沫对气相相对渗透率和视黏度的影响，模拟了静态泡沫和流动气泡。总量平衡模型在通常的组分或热采模型上作了如下改进：修改气相流度，引入表面活性剂的守恒方程；引入泡沫总量平衡方程。作了两点基本假设：扩展的达西定律适用，泡沫只影响气相相对渗透率和黏度；气泡圈闭过程瞬时完成，流动气泡的平均密度和静态气泡的平均密度达到平衡。

其基本思想是在控制体内：气泡增量=流入量-流出量+生成量-聚并量+源汇项；用公式表达为：

$$\frac{\partial}{\partial t}[\phi S_g x_f n_f + \phi S_g x_i n_i] = -\nabla(n_f \bar{v}_g) + \phi S_g (k_1 u_w u_g^{1/3} - k_2 u_g n_f) + n_f q_g \quad (1.12)$$

式中， n_f —流动气泡的平均密度， m^{-3} ；

n_i —静止气泡的平均密度， m^{-3} ；

x_f —流动气体的分流量；

x_i —静止气体的分流量；

k_1 —由试验测定的气泡生成速度常数， m^{-3}/s ；

k_2 —聚并速度常数， s^{-1} ，是含水饱和度的函数；

$$k_2 = k_2^0 \left(\frac{1 - S_w}{1 - S_w^*} \right) \quad (1.13)$$

式中， S_w^* —对应极限毛管力时的含水饱和度；

u_w, u_g —分别为水和气体的真实流速， m/s ；

q_g —气相注入或产出速率， s^{-1} ；

ϕ —孔隙度；

S_g —气体饱和度；

v_g —气相达西流速， m/s 。

下式表明了流动气泡和静止气泡之间的平衡：

$$n_i = K_f A_f n_f / (1 + K_f n_f) \quad (1.14)$$

式中， A_f, K_f —气泡圈闭参数， m^3 。

静态泡沫造成气相相对渗透率的降低，由下式表达(a 由实验测定)：

$$k_{rgf} = k_{rg} / a \quad (1.15)$$

泡沫黏度由下式计算：

$$\mu_{gf} = \begin{cases} \mu_g F_g k^{3/2} n_f (v/v_{ref})^{n-1} & \mu_{gf} > \mu_g \text{ 时} \\ \mu_g & \mu_{gf} \leq \mu_g \text{ 时} \end{cases} \quad (1.16)$$

上式中 $(k^{3/2} n_f (v/v_{ref})^{n-1})$ 表明泡沫的剪切变稀特性；

式中, F_g —几何因子;

v_{ref} —参考速度;

n_f —由总量平衡方程确定。

当气相流速 v 大于临界流速 v_c 时产生流动泡沫, v_c 与注入的液体量 v_l 有关:

$$v_c = 1.52v_l^{-1.54} \quad (1.17)$$

气泡生成速度 G_f 由下式模拟

$$G_f = \begin{cases} k_1 \cdot \frac{10(v/v_c - 1)}{1 + 10(v/v_c - 1)} \cdot [1 + (\frac{n_f}{n_c})^5]^{-1} & \frac{v}{v_c} \gg 1 \text{ 时} \\ 0 & \frac{v}{v_c} < 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (1.18)$$

式中, k_1 —由试验测定的气泡生成速度常数, m^{-3}/s ;

n_c —临界泡沫密度, m^{-3} 。

当液膜破裂时, Friedmann 等考虑了表面活性剂浓度和气泡个数的影响:

$$C_f = k_2 n_f C_{ws}^{-1.4} \quad (1.19)$$

式中, k_2 —聚并速度常数, s^{-1} ;

C_{ws} —水相中表面活性剂浓度, %。

另外还有一对关于泡沫生成速度和聚并速度的表达式:

$$G_f = k_1 u_w u_g^{1/3} \quad (1.20)$$

式中, u_w, u_g 分别为水和气体的真实流速, m/s ;

$$C_f = k_2 u_g n_f \quad (2.21)$$

式中, k_2 —聚并系数, 是含水饱和度的函数;

$$k_2 = k_2^0 \left(\frac{1 - S_w}{1 - S_w^*} \right) \quad (2.22)$$

式中, S_w^* —对应极限毛管力时的含水饱和度;

泡沫的黏度用下式表示:

$$\mu_f = \mu_g + \frac{an_f}{u_g^{1/3}} \quad \text{时} \quad (1.23)$$

式中, a —与表面活性剂结构和浓度有关的黏度系数, $(Pa \cdot s)^{2/3} \cdot m^{10/3}$;

n_f —流动气泡的密度, m^{-3} ;

u_g —气相流速, m/s;

气相相对渗透率为:

$$k_{rgf} = x_f k_{rg}(S_g) \quad (2.24)$$

式中, x_f —是流动气体的分流量, 反映流动泡沫和静止泡沫的比例, 由实验测定。

(3) 临界毛管力模型

Rossen 分别在 1991 年、1994 年和 1996 年提出临界毛管力模型, 该模型运用毛管力、泡沫结构和气体流度的关系式。它实际是气泡总量平衡模型的一个特例(局部平衡模型)是针对毛管力起主导作用的情况。作为一种局部平衡模型, 它不能描述与流速有关的泡沫特性。

本模型运用毛管力、泡沫结构和气体流度的关系式。它实际是气泡总量平衡模型的一个特例(局部平衡模型)是针对毛管力起主导作用的情况。作为一种局部平衡模型, 它不能描述与流速有关的泡沫特性。此外, 由固定临界毛管力模型还可以得到分流理论模型, 从而可以求出解析解, 可与数值解进行比较。

(4) 阻力系数模型

Shchang 发展了一个阻力系数模型, 该模型实质上也是一种半经验关系式模型。阻力系数以查表的形式输入。此处阻力系数 R_f 定义为 CO_2 / 盐水混合物流度与 CO_2 / 表面活性剂溶液流度之比(两流度均在同一气液比下测得)。泡沫阻力系数与表面活性剂浓度、注入速度。泡沫干度及岩心渗透率有关。阻力系数模型实质上也是一种半经验关系式模型。阻力系数和流度表达式为:

$$R_f = \frac{M_{\text{CO}_2+BR}}{M_{\text{CO}_2+SS}} \quad (1.25)$$

$$M_{\text{CO}_2+BR} = M_w + M_g$$

$$M_{\text{CO}_2+SS} = M_{ss} + M_g^f$$

式中, M_{CO_2+BR} — CO_2 /盐水混合物流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / \text{mPa} \cdot \text{s}$;

M_{CO_2+SS} — CO_2 /表面活性剂溶液流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / \text{mPa} \cdot \text{s}$;

M_w —水相流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / \text{mPa} \cdot \text{s}$;

M_g —气相流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / \text{mPa} \cdot \text{s}$;

M_g^f —有泡沫存在时气相流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / \text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

假设泡沫只影响气体流度, 则 $M_{ss} = M_w$, 有

$$M_g^f = \frac{1}{R_f} (M_w + M_g) - M_w \quad (1.26)$$

(5) 组分方法

加拿大 CMG 的 Coolnbe 等将泡沫液膜看成是一个分散的组分, 液膜组分是气体和表面活性剂反应的生成物。这种模拟方法也容易在一个标准模拟器中实现问题是必须确定气

体一表面活性剂反应的化学计量系数。有一些研究者用这种方法成功地进行现场泡沫驱模拟。

(6) 渗滤和网络模型

Rossen 和 Gauglitz、Laidlaw 等用渗滤的概念来描述泡沫在孔隙介质中的生成和传播。最近, Kharabaf 和 Yortsos 等用修正的渗滤方法提出了一个网络模型, 在给定截断几率的条件下可以模拟泡沫流动。他们还将此方法用于模拟不均质孔隙介质。

二、国内理论研究概况

1994 年, 杨争鸣等提出了一个实用的注蒸汽加泡沫过程的油藏数值模拟模型, 该模型考虑了泡沫损耗的各种机理和泡沫的流动阻力, 用修正气相渗透率和束缚气饱和度的方法描述泡沫的流动阻力。泡沫的流动阻力受泡沫剂浓度、温度、含油饱和度、渗透率以及水相和气相达西流速的影响。对河南井楼油田零区的注蒸汽加泡沫先导试验方案的模拟结果表明: 在非均质油藏注泡沫可以改善蒸汽的波及体积, 提高原油采收率。

1997 年, 李和全等人根据泡沫复合驱油机理(如低界面张力、流度控制等)和驱替过程中出现的各种物化现象(如聚合物溶液的流变性、泡沫的流变性、化学剂的吸附损耗、离子交换、碱耗及其与表面活性剂之间的协同效应等)建立了一个泡沫复合驱(碱 / 表面活性剂 / 聚合物 / 泡沫)数学模型。可进行泡沫复合驱效果预测及其可行性研究。该模型可以模拟泡沫复合体系岩心驱替过程, 进行机理研究、矿场试验设计、矿场动态模拟和动态跟踪研究等。

1997 年, 樊西惊综合研究了泡沫驱油过程中原油对泡沫稳定性的影响, 运用热力学分析方法分析了原油与泡沫相互作用的强弱, 将原油存在情况下泡沫的稳定性与液膜数联系起来。通过研究表明: 原油对泡沫稳定性影响的程度与原油性质有关, 一般来说泡沫在轻质原油存在下的稳定性比在重质原油存在时差。

1998 年李和全等人通过对 ASP-FOAM 提高原油采收率机理的研究, 建立了 ASP-FOAM 的基本数学模型和数值模型。对 ASP-FOAM 在岩心中驱替进行了数值模拟。实例计算表明, 间注小泡沫段塞在现场是可行的。ASP-FOAM 驱比水驱提高采收率 25% 以上, 比 ASP 提高 5% 以上, 比常规泡沫驱提高 7%, 以混合注入效果更好。

1999 年, 周静、谭永生从理论上对泡沫衰变机理及其稳定性影响因素作了系统的阐述, 得出了影响泡沫稳定性的关键是: 起泡溶液的表面张力、表面黏度、溶液黏度、压力、温度等因素。在此基础上, 用正交设计方法对各影响因素进行了试验研究, 筛选出了一套稳定性较好的泡沫配方。同年, 李和全等人建立了一个考虑各种影响因素的泡沫有效黏度模型以及一个气液两相泡沫驱数学模型, 从该模型可以得出以下结论: 表面活性剂浓度越大, 产生泡沫液的黏度也越大, 并呈直线上升趋势。岩石的渗透率越大, 所产生的泡沫液的黏度也越大, 即在渗透率较高的介质中产生的泡沫具有较强的降低气体渗透率的能力。有泡沫时, 地层的气相压力上升比较慢, 注采井呈现的压力梯度较大。

2000 年, 张烈辉等提出了泡沫驱经验模型及其应用, 该模型需要的实验数据量少, 只需增加一个额外的表面活性剂流动方程等, 在软件研制方面具有简单易行的特点。张烈辉提出对气相相对渗透率计算的改进公式:

$$k_{rgf} = k_{rg} FM \quad (1.27)$$

其中

$$FM = [1 + M_{RF} \cdot SC \cdot OT \cdot CN \cdot CNG]^{-1} \quad (1.28)$$

$$SC = \left(\frac{C_{ws}}{C_{ws \max}} \right)^{e_s}$$

$$OT = \left(\frac{S_{o \max} - S_o}{S_{o \max}} \right)^{e_o}$$

$$CN = \left(\frac{N_c^{ref}}{N_c} \right)^{e_v}$$

$$CNG = \left(\frac{x_m^{cr} - x_m}{x_m^{cr}} \right)^{e_x}$$

$$N_c = \frac{u_g \mu_g}{\gamma \phi}$$

式中, FM —泡沫流度;

M_{RF} —流度减少因子;

C_{ws} —表面活性剂浓度(摩尔分数);

$C_{ws \max}$ —相关的最大表面活性剂浓度;

$S_{o \max}$ —无泡沫存在时的最大原油饱和度;

N_c^{ref} —临界泡沫时的毛管数;

N_c —毛管数;

x_m^{cr} —油中轻质组分的临界摩尔分数;

x_m —油中轻质组分的摩尔分数;

μ_g —气体黏度;

γ —界面张力;

e_s —影响表面活性剂浓度参数;

e_o —影响原油饱和度参数;

e_v —影响毛管数参数;

e_x —影响轻质油组分参数。

2000年,程浩、郎兆新在三维多组分模拟器上发展了泡沫驱机理模型,通过总量平衡