

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

泡 沫 油 渗 流

盛 家 平

(加拿大 阿尔伯达)

1994 年 9 月 北京

泡沫油渗流

摘 要

重油储量很大,重油油田的产量和采收率往往比预测的要高得多,油气比要低。为了历史拟合油田动态,必须用反常的参数来计算。这些反常的动态,原因之一是“泡沫油”(Foamy oil)的作用。泡沫油渗流(Foamy oil flow)机理涉及到复杂的与速度、时间有关的流动过程。这些流动过程与泡沫的生成、成长和聚集过程有关系。很明显,溶解气开始释放出来后,以微小的气泡形式分散在重油中。只要时间足够长,分散的气泡会和重油分离而形成气相。但是,具体机理还很不清楚。

这篇论文主要是介绍一些有关泡沫油的研究成果,内容包括泡沫油的性质,油田现场观察结果,泡沫油驱油作用,理论和实验室研究,以及数值模型。泡沫生成理论也将论述,因为这些方面和泡沫油渗流密切相关。现有文献中,缺少的关键性材料也将指出。

这篇论文提供对泡沫油渗流研究的有价值的参考作用。它将引起中国石油工业对泡沫油研究的兴趣和重视。

引 言

在溶解气驱油藏中,井口油井油样往往呈明显的泡沫状,所以人们^[1]称这种油为“泡沫油”(Foamy Oil)。发表的文章^[2]中也用“油气组合物”和“混合流体”来描述这种油气混合物。气体以微小气泡形式弥散在重油中。目前,尤其在加拿大,很多石油公司进行了对这种泡沫油的研究。但是,有关这方面研究状况还没有详细论述等。

这篇论文论述发表的有关泡沫油渗流的研究成果,包括泡沫油的性质、油田现场观察结果、泡沫油驱油作用、理论和实验室研究、理论和数值模型。论文也简要地论述了有关气泡生成的研究。发表文章中所缺的资料也加以说明。

泡沫油性质

泡沫油是一种有气泡弥散在其中的重油。泡沫油的特征是,弥散的气泡随油流动;油相是连续相;在多孔介质中,油能够圈闭大量气。图1是泡沫油和常规油的示意比较图。“泡沫油渗流”则定义为一种特殊的油气两相多孔介质渗流^[3]。这种渗流可以解释某些重油油藏的高溶解气驱采收

率。

很显然,因为气弥散在其中,泡沫油比常规油更具有可压缩性。泡沫油的压缩系数将很大。Smith^[2]提出了油气组合物(泡沫油)的压缩系数 c_{fo} 为 β/p , β 大约可取0.25~0.4。这样的压缩系数大致为理想气体压缩系数的四分之一。因为弥散的气泡会慢慢地从液态油相中分离出来,泡沫油的体积是随时间变化的。图2是一泡沫油油样的体积变化曲线^[4]。从图2可知,当压力一下降到大气压后,由于气泡的生成,泡沫油体积急剧增加。尔后,由于气泡凝聚面从油中逸出,油的体积慢慢减小。对泡沫油的粘度,目前还没有公式来描述它,人们^[5,6]都认为它比常规油低。

Stewart等人^[6,7]做了灰岩溶解气驱的实验。他们发现,溶解气和外部注气驱的油水相对渗透率关系大不一样。他们的实验结果表明,在相同的气相饱和度和下,溶解气驱的油气相对渗透率比值比外部注气驱高。

泡沫油渗流的油田观察结果

在溶解气驱下,很多重油油田的井口油样显示泡沫的特征。产出的油为油连续相的泡沫。这种以油为连续相的泡沫油含有大量气,外观为巧

克力乳化状。这种泡沫相当稳定,可以在开启容器里存在几个小时^[5]。这些油井的产量异常地高,在溶解气驱下的产量要比用油层参数来预测的产量要高10~30倍^[7,9,10],甚至要高上百倍^[11]。历史拟合这些油井的一次采油量,往往要调整所测的参数到不实数值,例如增加绝对渗透率几个数量级^[6]、临界气饱和度调到35%^[10]以及异常的相对渗透率曲线^[11]。

试井中发现压力随时间变化缓慢。这意味着存在高含气饱和度和高油层压缩性^[16]。

另一奇怪的事是,这些井在一次采油中生产能力较高,但蒸汽吞吐的产能却低^[9]。Karyampudi^[12]指出,Cummings油层蒸汽吞吐前后增加的产量较低,是由于注入蒸汽破坏了一次产油的增产机理。就是说,蒸汽注入改变了一次采油并建立起的压力梯度分布,以及消除了泡沫油的作用。

泡沫油驱油作用

人们提出了几种引起异常高产的可能性。这些可能性仍在研究中。砂岩膨胀和井底附近孔洞通常认为是增产原因。由于油井大量出砂,砂岩膨胀,地层渗透性增高,井底附近的孔洞增加了有效井底半径^[14]。但是,Lebel^[5]报告,根据数值模拟结果,如果不考虑泡沫油的作用,即使模拟中已经考虑了出砂增加油层的渗透性,重油采收率往往仍然较低。在数值模拟过程中,我们发现,如果不输入泡沫油的参数,累积产油量要远比实验室实测的低得多^[11]。在我们的实验室中,没有出砂问题。

Kraus, Mc Caffrey 和 Boyd^[14]指出,高渗透区的形成引起高的初始产量,而泡沫油的特殊作用使得油藏在一次采油中保持高产,低油气比,以及比预测高的采收率。

从上述讨论可知,虽然出砂可引起高产,泡沫油的作用仍不可忽视。泡沫油的作用是由于产生的大量的微小气泡,这些气泡增加油的流动性^[2]。这些微小气泡有效地增加产量,是由于微小气泡弥散在重油中,降低重油粘度。但是,Maini等人^[8]在他们的论文中指出,没有迹象表明生成的气泡增加了重油流量。相反,和在常规溶解气驱一样,由于气泡生成,原油的流量降低。他们所指的原油流量实际上是系统的总流量。

Maini等人^[8]提出,异常高产的另一原因,可能是生成地下非水基的油连续相泡沫。这样的非

水基泡沫稳定性由两种作用来保证。一种是由于液相(重油)的高粘作用减缓了毛管驱替作用。另一种是原油中介石膜粘滞作用(Plastic surface films)。最近,外部生成的非水基泡沫已发现有流量控制潜力的^[15,16],而且地下生成泡沫的可能性已证实^[17]。

实验室和现场研究发现,泡沫油的作用包括:
①增加流体压缩性,②保持油藏压力作用,以及
③推迟了产气的时间^[14]。

理论和实验研究结果

直接来自泡沫油的理论和实验研究结果是相当少的。这部分论述的内容大都是关于轻油的溶解气驱,过饱和现象和临界气饱和度,这两个溶解气驱过程的主要问题,将在这部分论述。和泡沫油密切相关的气泡生成理论也将论述。

过饱和现象

过饱和定义混合物的平衡压力与系统的当时压力之差^[17]。文献中也有其他定义^[18,19]。过饱和现象在所有的溶解气驱实验中碰到^[6]。过饱和现象发生在整个实验过程中,过饱和度随时间减少,到后期,实际上岩心中已没有过饱和现象^[20]。

同样,临界过饱和度的定义也有不同^[21,22]。这是由于实验技术条件不同,定义也不同。

文献中过饱和度值大不一样,表1为不同作者发表的结果。

压力降速度对过饱和度的影响是主要论点。在低压降速度下形成的过饱和度和在高速下形成的很可能不一样^[31]。实验数据表明,随压力降速度减低,过饱和度明显降低^[16,17,27,32-33]。但是,在低渗透岩心的内部气驱高压实验中,压力降速度为100psi/天,Kamath和Boyer^[19]发现,毛管作用引起的过饱和度为42~66psi,而动力过饱和度为6psi。因此,他们认为,压力降速度在低渗透油层,可能不会很重要。

其它一些因素同样会影响过饱和度。过饱和度和岩石及流体有关^[29]。岩心均质性越差^[27],颗粒越大^[29],渗透率越高^[17],过饱和度就越大。过饱和度和随毛管力^[32]或介石张力^[27,31]增加而增加。

1. 临界气饱和度

临界气相饱和度在溶解气驱中是很重要的参数。在临界饱和度下,连续气相形成并开始流动。决定于不同的实验技术和数据处理方法,人们^[19,20,31,35~42]定义了不同的临界气相饱和度。

通常外推外部注气的气相相对渗透率来得到临界气相饱和度。另一种不常用的方法是,内部气体膨胀的条件下,测得气相开始流动的饱和度。这两种方法,测得的临界气相饱和度也不一样^[39]。在文献中出现的所测临界饱和度为 0.5% 到 38%。通常人们认为,临界饱和度随压降速度增加而增加(见表 2)。

Kortekaas 和 van Poelgest^[31]发现压降速度和稳定的临界饱和度成半对数关系。这样的关系可能用来估算油田压降速度下的临界气相饱和度。

其它因素也影响临界气相饱和度。过饱和度和降低,临界气相饱和度也很低^[20,35]。溶解气量影响气相饱和度的建立,对临界饱和度值很少影响^[31]。不同渗透率岩心实验结果表明,临界饱和度和不取决于渗透率,而多孔介质结构,在建立临界饱和度和中似乎很重要^[21]。油气的介孔张力增加,临界饱和度降低。但这种变化趋势不能外推到很高的介孔张力^[31]。

2. 多孔介质的气泡生成研究

有关液态中的气泡生成文章很多。Yortsos 和 Parlar^[21]作了简要的论述。相反,有关多孔介质中液态变化和气泡生长文献非常少。气泡形成后,气相扩展的基本研究结果也很少。实验研究^[7,16,20,29,39]集中在压降速度对起泡的影响,但是没有决定性的结果。Danesh 等人^[24]用玻璃微观模型做了类似实验。很多人^[21,27,32,36]做了肉眼观察实验。

压力降低或体积膨胀形成的气泡数量要比孔隙数量少几个数量级^[17,18,27,33,34]。较高的压降速度可能会导致生成更多的气泡^[7,17,31]。但是,在一般油田和实验室条件下,扩散作用和体积膨胀作用引起的气泡成长主要是由吸入渗流(Invasion Percolation)控制^[24]。Kamath 和 Boyer^[19]以及 Li 和 Yortsos^[37]认为,在一般情况下,估计压降速度对气泡成长的动力学没有多大影响。

随着过饱和度增加,气泡的形成速度也将增高^[29,30]。原油中沥青质是一种浮化稳定剂^[40],所以它将促进气泡形成^[41]。

和玻璃/原油介孔或原油本身相比,气泡观察

到优先在石英/原油表面上形成^[42]。同样认为,粗糙表面和锐缘的接触不会有助于气泡形成^[24,42]。

理论模型

几个有关的溶解气驱,气泡生成模型将论述如下。

Smith^[2]提出的一个理论模型,考虑了应力、应变、渗透率变化,同时考虑了和压力有关的多相渗流参数。他提出,某些重油油藏的溶解气驱牵涉到重油和其中微小气泡的拟组分渗流。他定义了这个拟组分的渗透率、粘度、密度和压缩系数。他提出了重油拟压力函数,并用这个拟压力函数来表达达西定律和扩散方程。他的理论成功地用于分析压力和重油油藏溶解气驱特征。预测结果和 Lloydminster 油层动态一致,而不需要用负的表层系数和比实验室高的渗透率。但是,在他的模型中,气泡形成,生长和聚集的非平衡过程没有能够考虑。他的泡沫油扩散方程是

$$\nabla^2 p^{B+1} = \left(\frac{\phi \mu f_0 c_{f_0}}{k} \right) \cdot \left(\frac{\partial p^{B+1}}{\partial t} \right)$$

Yortsos 等人^[21,26,37,43]提出了多孔介质中气泡生成的理论分析模型和网格模型。他们的模型包括气泡生成,相态平衡,扩散作用,对流作用,毛管作用和粘滞作用。分析了单个气串和多个气串的成长,应用了统计模型,象渗透模型(Percolation)和 DLA(Diffusion-Limited-Aggregation)。在低过饱和度条件下,他们提出了渗透方法(Percolation Approach),从气泡生成和孔隙结构特征估算临界气相饱和度和相对渗透率。他们的最终论点是,临界气相饱和度和在高压降速度下,随压降速度增加而增加,但在足够低的压降速度下,和压降速度无关。

Firoozabadi 和 Kashchiev^[17,22]指出,石油文献的理论和结果表明,多孔介质中气相的形成是一种瞬间形成过程。因此,古典气泡形成理论(非均质气泡理论和均质气泡理论)都描述不了溶解气驱。他们提出了两种气泡形成理论:渐进式生成和瞬间式生成。他们论述了多孔介质中气泡是瞬间式生成的,气泡成长是由扩散作用控制。Firoozabadi 和 Kashchiev^[17]的理论分析表明,多孔介质中气泡生成所需的过饱和度和受到压力速度或者体积膨胀速度的 $\frac{1}{2}$ 次方的影响。这样,由于速度的影响,实验室的采收率和油田采收率将不一样。

数值模型

至今发表了三种模型。它们是常规数值模型、拟泡点压力模型和改进的分流模型。

1. 常规数值模型

人们尝试用现有的常规数值模型,通过依据泡沫油的作用,调整有关参数,来历史拟合油藏动态。主要调整参数是临界气饱和度、油/气相对渗透率、流体和岩石的压缩系数、与压力有关的原油粘度和绝对渗透率。

显然,常规数值模型不可能描述泡沫油的主要特征,尤其是非平衡过程。模型预测的结果不会可靠。

2. 拟泡点压力模型

Kraus 等人^[1]提出了拟泡点流体性质模型,并且提出了从常规 PVT 数据计算泡沫油流体性质的方法,计算出的泡沫油参数用于常规数值模型中来拟合油藏动态。在他们的模型中,拟泡点压力是可调参数。模型假设是,当压力高于拟泡点压力时,所有形成的气泡仍弥散在油相里,低于这个拟泡点压力,仅有一部分形成的气(α)仍弥散在油相中。 α 随压力降低而线性地降低。见图(3)。图3表示了不同压力下的弥散在油中的气体体积分数和摩尔分数。弥散的气看作是油相的一部分,但它的摩尔体积和压缩系数则按自由气来算。气液平衡常数 K 值,按拟泡点压力来修改。根据弥散在油相中的气量,计算增大了的油相压缩系数,如图4所示,把这个压缩系数代入常规模型中的死油组分的压缩系数。他们通过算例说明,在油藏数值模拟中考虑泡沫油的性质,预测的结果表现了泡沫油油藏所观察到的三个异常生产特征,即高采收率,低油气比和天然压力得到保持。

在他们的模型中,关键是用增大了的压缩系数,但泡沫油的粘度、相对渗透率和临界气饱和度没有调整。与时间有关的泡沫油的参数无法考虑。

3. 改进的分流模型

在数值模拟各种几何形状的高渗透油藏动态中,Lebel^[2]使用了改进的分流模型。在这个模型中,泡沫油的流动性能表示在图5直线段“A”。当气饱和度开始从零增加,气相的分流量相应增加。当弥散的气在油中的体积分数超过一定值后,超过的气体就变成自由气。这部分气体开始聚集,

流动,分流量按图5中B段曲线表示。泡沫油的粘度随着气相体积分数增加,略有减少(当有14%气相时,粘度减少7%)。泡沫油密度是由油的组分和气组分的体积加权来得到。模型中用了气液平衡 PVT 数据。他们用这种模型历史拟合了饱和岩石放空实验的油气量。

这种模型考虑了油中含有一部分弥散气这个重要的泡沫油特征。使用这种模型,只需要调正相对渗透率和有关组分参数。但是,泡沫油的与时间有关的变化性质没法考虑。需要用试算法才能找到正确的分流曲线。

所缺资料

泡沫油研究处于早期研究阶段,更多的成果有待发表。据我们所知,以下资料还没有发表,但对泡沫油渗流却很重要。

1. 泡沫油的性质

由于非平衡过程,泡沫油的性质是与时间有关的。显然,泡沫油要比常规油更具有可压缩性。与时间有关的体积变化需要能够描述。对泡沫油的粘度,我们还不清楚是比单相油高还是低,弥散在油相中最大气体分数是多少?气体分数达到最大后,以什么样的速度从油中释放出?对这些问题的回答是描述泡沫油的关键。

2. 气泡生成研究

什么气泡生成理论可以用于泡沫油渗流,有待进一步研究。同样,重油的一些特殊性质,如高粘度和高含沥青质,对气泡生成、聚集有什么作用,有待探索。

3. 数值模型

以上讨论的数值模型考虑了一些泡沫油的特征。但是最主要的特征,非平衡过程,还没有得到合适的处理。重油生产中,急需要一个能够描述泡沫油渗流的数值模拟模型。

结 束 语

这篇论文力求提供一个对泡沫油研究有价值的参考资料。由于篇幅有限,文献的论点没有详细地讨论。读者对泡沫油研究有兴趣,或者正在进行这方面的研究,鼓励去读有关的文献。

致 谢

Wendy Faid 搜集了大部分参考文献,加拿大矿业能源技术中心(CANMET)提供了部分研究经费,中国石油总公司留学服务中心提供了宣读这篇论文的国际旅费。对此,作者深表感谢。

名 词 注 释

- c ——压缩系数(Lt^3/m)
- k ——渗透率(L^2)
- K ——气液平衡常数,小数
- p ——压力(m/Lt^2)
- s ——饱和度,小数
- t ——时间(t)
- x ——摩尔分数,小数
- 希腊符号
- α ——弥散在泡沫油中的气相摩尔数占蒸发的气相摩尔数的分数
- β ——系数,无因次
- ϕ ——孔隙度,小数
- μ ——粘度(m/Lt)
- 下标符号
- pbp——拟泡点
- e, o——油相中弥散气组分
- fo——泡沫油
- sc——临界气
- o——油
- o, o——油相中油组分

参 考 文 献

- 1 Sarma H, Maini B B. Role of Solution Gas in Primary Production of Heavy Oils. paper SPE 23631 presented at the Second Latin American Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, 1992. 5: 8~11
- 2 Smith G E. Fluid Flow and Sand Production in Heavy Oil Reservoirs Under Solution Gas Drive. SPE Prod. Eng, 1988. 5: 169~80
- 3 Maini B B. Foamy Oil Flow. teaching notes at a workshop for PRI members, 1994. 4. 27
- 4 McCaffrey W J, Bowman R D. Recent Success in Primary Bitumen Production. paper No. 6 presented at 8th Annual Calgary Univ. et al. Heavy Oil & Oil Sands Tech. Symp., Calgary, AB, 1991. 3. 14
- 5 Lebel J P. Performance Implications of Various Reservoir Access Geometries. paper presented at the 11th Annual Heavy Oil & Oil Sands Technical Symposium, 1994. 3. 4
- 6 Stewart C R, Craig F F, Morse R A. Determination of Limestone Performance Characteristics by Model Flow Tests. Trans., AIME (1953) 198: 93~102
- 7 Stewart C R, Hunt E B, Jr, Schneider F N, Geffen, Berry V J, Jr. The role of Bubble Formation in Oil Recovery by Solution Gas Drive in Limestones. Trans., AIME, 1954, 201: 294~301
- 8 Maini B B, Sarma H K, Geoghe A E. Significance of Foamy-Oil Behavior in Primary Production of Heavy Oils. JCPT, 1993. 11. 32 (9)
- 9 Poon D C, Kisman K. Non-Newtonian Effects on the Primary Production of Heavy Oil Reservoirs. paper CIM/AOSTRA 91-33 presented at the CIM/AOSTRA 1991 Technical Conference, Banff, Canada, 1991. 4. 21~24
- 10 Loughhead D J, Saltuklaroglu M. Lloydminster Heavy oil Production: Why So Unusual? paper presented at the Ninth Annual Heavy Oil and Oil Sand Symposium, Calgary, Alberta, 1992. 3. 11
- 11 Yeung K C, Adamson M F. Burnt Lake Project-Bitumen Production from the Cold Lake Oil Sands Deposit without Steam. paper presented at the AOSTRA/CHOA "Fueling the Future" Conference, Calgary, AB, 1992. 6. 10~12
- 12 Karyampudi R S. Evaluation of Cyclic Steam Performance and Mechanisms in a Mobile Heavy Oil Reservoir at Elk Point Thermal Pilot. paper CIM 93~48
- 13 Elkins L F, Morton R, Blackwell W A. Experimental Fireflood in a Very Viscous Oil-Unconsolidated Sand Reservoir, S. E. Pauls Valley Field, Oklahoma. paper SPE 4086 presented at the 1972 SPE Annual Meeting, San Antonio, TX (Oct. 8-11, 1972)
- 14 Kraus W P, McCaffrey W J, Byrd G W. Pseudo-Bubble Point Model for Foamy Oils. paper CIM 93-45 presented at the CIM 1993 Annual Technical Conference, Calgary, Alberta (May 9-12, 1993)
- 15 Hanssen J E, Haugum P. Gas Blockage by Non-aqueous Foams. paper SPE 21002 presented at the International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Anaheim, CA (Feb. 20-22, 1991)
- 16 Irani C A. Oil Recovery Using Surfactants in Non-aqueous Drive Fluids. U. K. Patent

- 17 Firoozabadi A, Kashchiev D. Pressure and Volume Evolution During Gas Phase Formation in Solution Gas Drive Process, paper SPE 26286 (Unsolicited Manuscript of SPE (USMS), 1993)
- 18 Kennedy H T, Olson R. Bubble Formation in Supersaturated Hydrocarbon Mixtures. *Trans.*, AIME (1952), 195, 271~78
- 19 Kamath J, Boyer R E. Critical Gas Saturation and Supersaturation in Low-Permeability rocks. Paper SPE 26663 presented at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX (Oct. 3-6, 1993)
- 20 Firoozabadi A, Ottesen B, Mikkelsen, M. Measurements of Supersaturation and Critical Gas Saturation, *SPEFE* (Dec. 1992) 337~43
- 21 Yortsos Y C, Parlar M. Phase Change in Binary Systems in Porous Media; Application to Solution Gas Drive. paper SPE 19697 presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, San Antonio, Tx (Oct. 8-11, 1989)
- 22 Kashchiev D, Firoozabadi A. Kinetics of the Initial Stage of Isothermal Gas Phase Formation. *J. of Chemical Physics* (March 15, 1993) 98, 6, 4690~99
- 23 Moulu J C. Solution Gas Drive, Experiments and Simulation. *J. Pet. Sci. & Eng.*, 2 (1989) 379~86
- 24 Danesh A, Peden J M, Krinis D, Henderson G D. Pore Level Visual Investigation of Oil Recovery by Solution Gas Drive and Gas Injection. paper SPE 16956 presented at the 62nd Annual Technical Conference and Exhibition of SPE, Dallas, TX (Sept. 27-30, 1987)
- 25 Madaoui K. Critical Gas Saturation in Depletion Drive. reports of International Symposium on Hydrocarbon Exploration, Drilling and Production Techniques (Dec. 10-12, 1975) 203~20
- 26 Abgrall E, Iffly R. Physical Study of Flow by Expansion of Dissolved Gas. *Revue de L'Institut Francais du Petroe* (1973) v28 n5 667-92
- 27 Chatenever A, Indra M K, Kyte J R. Microscopic Observations of Solution Gas Drive Behavior. *JPT* (June 1959) 13-15
- 28 Handy L L. A Laboratory Study of Oil Recovery by Solution Gas Drive. *Trans.*, AIME (1958) 213, 310~15
- 29 Wieland D R, Kennedy H Y. Measurements of Bubble Frequency in Cores. *Trans.*, AIME (1957) 210, 122~25
- 30 Wood J W Jr. Bubble Formation in Rangely Field, Colorado. MS thesis, Texas A&M U., College Station (1953)
- 31 Kortekaas T F M, van Poelgest F. Liberation of Solution Gas During Pressure Depletion of Virgin Watered-Out Oil Reservoirs. *SPEFE* (Aug. 1991) 329~35
- 32 Dumore J M. Development of Gas Saturations During Solution-Gas-Drive in an Oil Layer Below a Gas Gap. *SPEJ* (Sept. 1970) 211~18
- 33 Wall C G, Khurana A K. Saturation/Permeability Relationships at Low Gas Saturations. *J. Inst. Pet.* (Sept. 1971) 57, 261~69
- 34 Wall C G, Khurana A K. The Effect of Rate Pressure Decline and Liquid Viscosity On Low-Pressure Gas Saturations in Porous Media. *J. Inst. Pet.* (Nov. 1972) 58, 335~45
- 35 Moulu J C, Longeron D L. Solution-Gas Drive; Experiments and Simulation, *Proc.*, Fifth European Symposium on Improved Oil Recovery, Budapest, Hungary (April 1989)
- 36 Li X, Yortsos Y C. Visualization and Numerical Studies of Bubble Growth During Pressure Depletion. paper SPE 22589 presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of SPE, Dallas, TX (Oct. 6~9, 1991)
- 37 Li X, Yortsos Y C. Critical Gas Saturation: Modeling and Sensitivity Studies. paper SPE 26662 presented at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX (Oct. 3~6, 1993)
- 38 Aldea Gh. Mechanism of Heavy Oil Recovery by Dissolved Gas Expansion. *Revue de L'IFP*, 25, 12 (1970) 1403~17
- 39 Hunt Jr E B, Berry Jr V J. Evolution of Gas from Liquid Flowing through Porous Media. *AIChE J* 2 (Dec. 1956) 560~67
- 40 Coskuner G. Oil Field Emulsions PRI Report 1988~18 (Nov. 1988)
- 41 Islam M R, Chakma A. Mechanics of Bubble Flow in Heavy Oil Reservoirs. paper SPE 20070 presented at the 60th California Regional Meeting, Ventura, CA (Apr. 4~6, 1990)

- 42 Bemath L. Theory of bubble Formation in Liquids. *Industrial and Engineering Chemistry* (June 1952)1310~13
- 43 Li X Bubble Growth during Pressure Depletion in Porous Media. Ph. D thesis, University of Sothen California(1993)

- 44 Wit K. Solution Gas Drive in Heavy Oil Reservoirs. paper presented at the Symposium on Heavy Oil recovery , Maracaibo (Uuly 1~3,1974)

表 1 文献中过饱和度和数据

作 者	过饱和度和 (psi)
Firoozabadi et al. (1992) ^[20]	1-150
Moulu (1989) ^[22]	1-10
Danesh et al. (1987) ^[24]	360
Madouli (1975) ^[25]	假设为零
Abgrall & Ifly (1973) ^[26]	假设为零
Chatenever et al. (1959) ^[27]	7
Handy (1958) ^[28]	40-200
Wieland & Kennedy (1957) ^[29]	14-25
Stewart et al. (1954) ^[7]	20-90
Stewart et al. (1953) ^[6]	0-72
Wood (1953) ^[30]	27
Kennedy & Olson (1952) ^[16]	30-770

表 2 文献中的临界气饱和度和数据

作 者	S_{gc} %PV	dp/dt psi/天	压降速度的影响
Kamath & Boyer (1993) ^[19]	3,10	20,100	影响较小
Firoozabadi et al. (1992) ^[30]	0.5-2	200-3000	dp/dt ↓, S_{gc} ↓
Kortekaas & Poelgeest (1989) ^[31]	7-27	10-350	dp/dt ↓, S_{gc} ↓
Moulu & Longeron (1989) ^[32]	6,12	0.435, 72.5	dp/dt ↓, S_{gc} ↓
Danesh et al. (1987) ^[33]	35	1440	dp/dt ↓, S_{gc} ↓
Madaoui (1975) ^[34]	4.4-26.4	3-120	不确定
Wit (1974) ^[44]	0.6-2	13-300	不确定
Abgrall & Ifly (1973) ^[35]	1.7-26.4	3-15	不确定
Aldea (1970) ^[36]	5-38	0.7-200	不确定
Handy (1959) ^[37]	4-11	4000-2(10 ⁴)	dp/dt ↓, S_{gc} ↓
Stewart et al. (1954) ^[7]	2-20	10-230	不确定

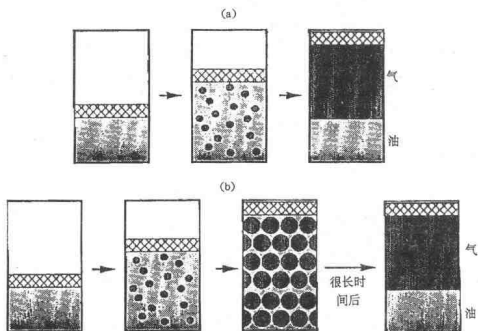


图1 (a)泡沫油和(b)常规油的比较示意图

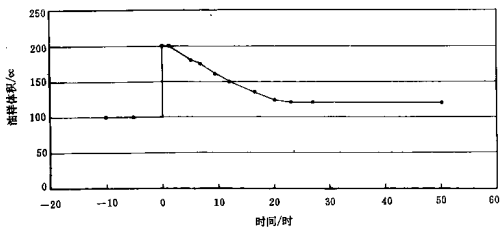


图2 Clearwater 油层原油的膨胀曲线
油样压力从 3800kPa 突然降低到大气压

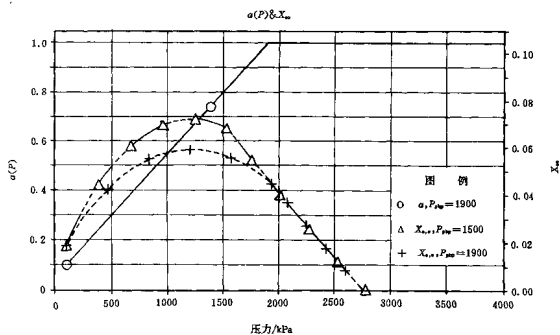


图 3 弥散在重油中气体分数 $a(P)$ 和 $X_{e,o}$ 与压力的关系

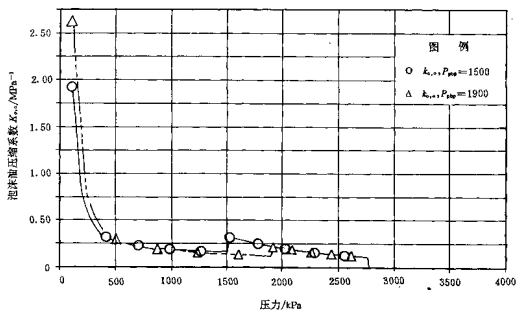


图 4 不同压力下泡沫油的压缩系数

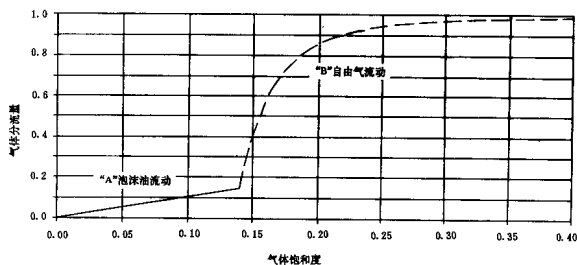


图5 数模中的气体分流量

石油物探局制图印刷厂
照排印刷