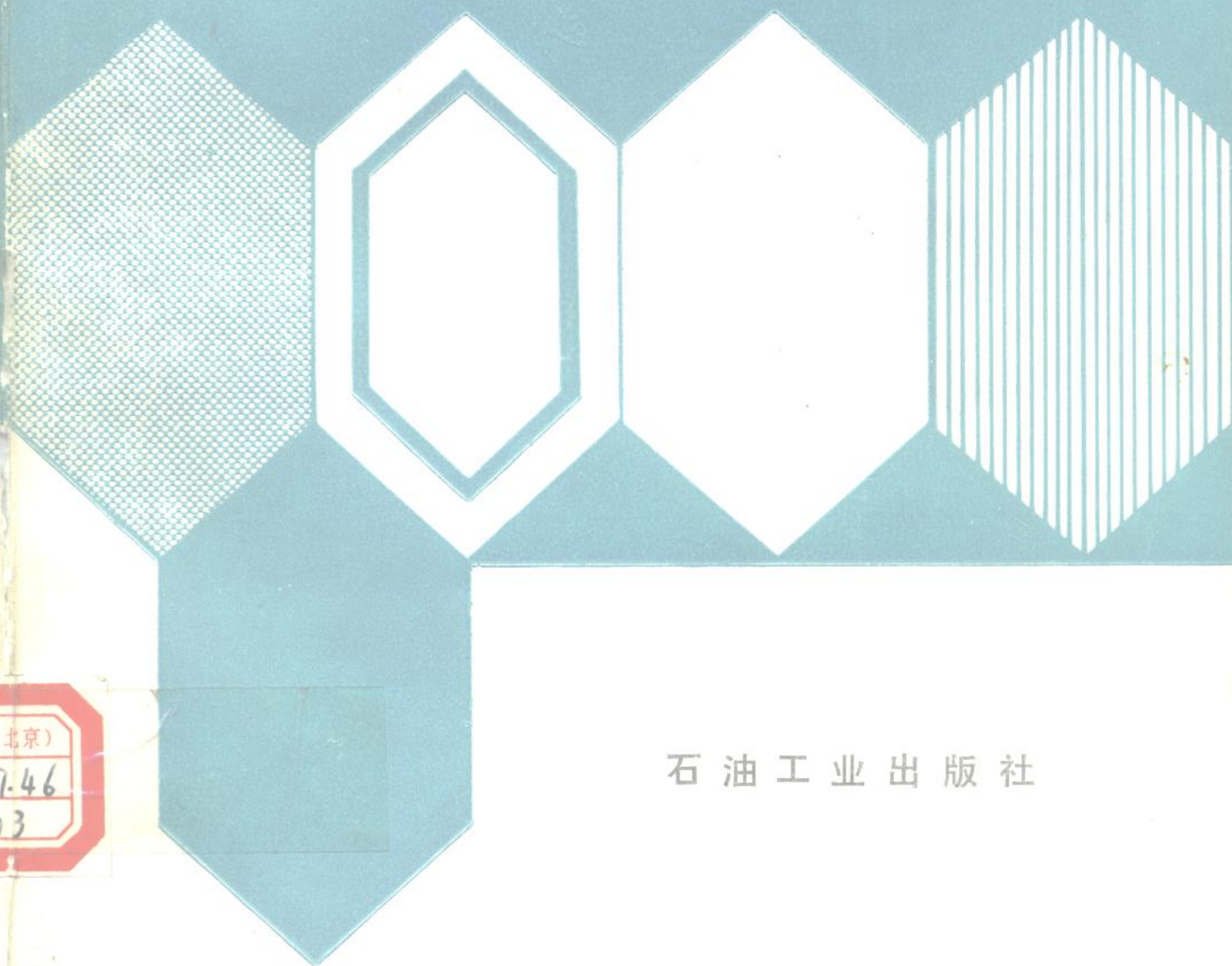


化学驱提高 石油采收率



杨普华 杨承志 译



石油工业出版社

学(北京)

357.46

003

社

071258

化学驱提高石油采收率

杨普华 杨承志 译

秦同洛 韩大匡 张朝琛 王鸿勋 校



200801070

石油工业出版社

内 容 提 要

本书的论文是精选自《表面活性剂和聚合物驱油提高石油采收率》和《化学驱油的表面现象》两部论文集。它综合了当代化学驱提高石油采收率科学技术研究的最新成果,主要包括化学驱油过程的基本特性;表面活性剂体系的微观结构;微乳液的结构、形成和相转换特性;胶束热动力学特性及有关现象;固-液界面现象及添加剂在岩石表面上的吸附滞留特性;聚合物溶液、微乳液和可溶性油通过多孔介质的流动特征;表面活性剂-聚合物的相互作用等。

本书可供从事三次采油和胶体与界面化学研究的科技人员、有关大专院校师生参考。

化学驱提高石油采收率

杨普华 杨承志 译
秦同洛 韩大匡 张朝琛 王鸿勋 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京昊海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16开本 22 1/4 印张 546千字 印1—2,000
1988年5月北京第1版 1988年5月北京第1次印刷
书号: 15037·2903 定价: 4.80元
ISBN 7-5021-0052-0/TB·52

目 录

导言	1
与采油体系有关的油藏物理化学环境	8
用表面活性剂采油的历史与现状	25
在油-盐水界面上产生超低界面张力必需的物化条件	43
化学驱油过程中相态关系的进一步研究	55
低界面张力研究的新进展	74
含表面活性剂流体界面的界面流变性	86
成膜物质对原油-水溶液动界面性质的影响	113
在固-液界面上吸附的物理化学特性：（一）基本原理	120
在固-液界面上吸附的物理化学特性：（二）石油磺酸盐-贝雷砂岩、高岭土	152
原油-水体系的界面流变性	167
磺酸盐的沉淀和再溶解及其在矿物上的吸附作用	179
高离子强度下混合离子型蒙脱土的离子交换	183
醇对胶束溶液平衡性质及动力学的影响	197
醇对表面活性剂通过油水界面传质及相关现象的影响	205
微乳液的结构、形成和相转换	219
评述微乳液驱的一些物理-化学特性	244
影响聚丙烯酰胺在多孔介性中吸附的因素及吸附对流动状态的影响	281
表面活性剂-聚合物驱油过程中聚合物溶液的最优含盐度	294
聚合物-表面活性剂相互作用及其对被毛细管圈捕的油的流动影响	305
胶束驱油：磺酸盐-聚合物相互作用	311
碱性水驱的采油机理	325

导 言

D.O.夏 杨承志 译

由于世界范围内石油短缺及注水采油后几乎 65~70% 的原始石油储量仍留在油藏中, 三次采油方法对于采出更多的石油的重要性已为人们广泛重视。通常提高采收率方法主要分为二类: 热力方法和化学驱方法。油层就地燃烧、注入蒸汽、湿法油层燃烧等属于第一类; 碱水驱、表面活性剂驱、胶束-聚合物驱、 CO_2 驱等属于第二类方法。

注水采油后, 剩余油以不连续的油块被圈捕在储油藏岩石孔隙中, 作用于油珠上的两个主要力是粘滞力和毛细管力, 在一种采油方法中, 由这个力的比确定其微观驱油效率。麦尔鲁斯 (Melrose) 和布朗得纳尔 (Brandner) ^[1] 提出了一个参数, 即由粘滞力同毛细管力之比表示的毛细管数 (图1)。一般认为在注水采油之后毛细管数为 10^{-6} 左右。为了用化学驱法进一步采出石油, 毛细管数要增加到 10^{-3} 至 10^{-2} 左右。在具体油藏条件下, 可以用降低油-盐水界面张力使毛细管数改变 3~4 个数量级。一般原油-盐水界面张力在 20 到 30 达因/厘米范围内, 使用适当的表面活性剂体系, 在给定条件下, 界面张力能够降低到 10^{-3} 或 10^{-4} 达因/厘米。换句话说, 如果认为在油珠-盐水界面上的界面张力是该油珠通过砂粒间狭窄通道 (或孔颈口) 时阻止油珠形变的主要因素, 那么, 降低界面张力便减少了形变的阻力。

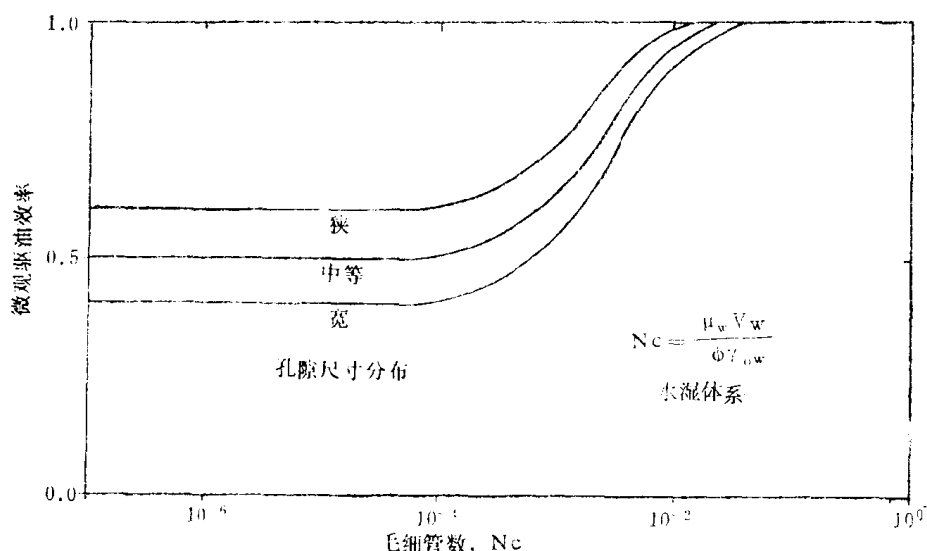


图 1 在不同孔隙尺寸分布的多孔介质中, 毛细管数 N_c 对微观驱油效率的影响

图2为油藏三维示意图。例如, 仅使用五点井网在油藏中注入表面活性剂溶液, 正象图2下部所示那样, 界面张力降低导致油珠流动以产生油墙。这个油墙被由清水驱替的聚合物缓冲溶液推向生产井。由于表面活性剂和聚合物段塞是表面活性剂/聚合物注入方法的主要组

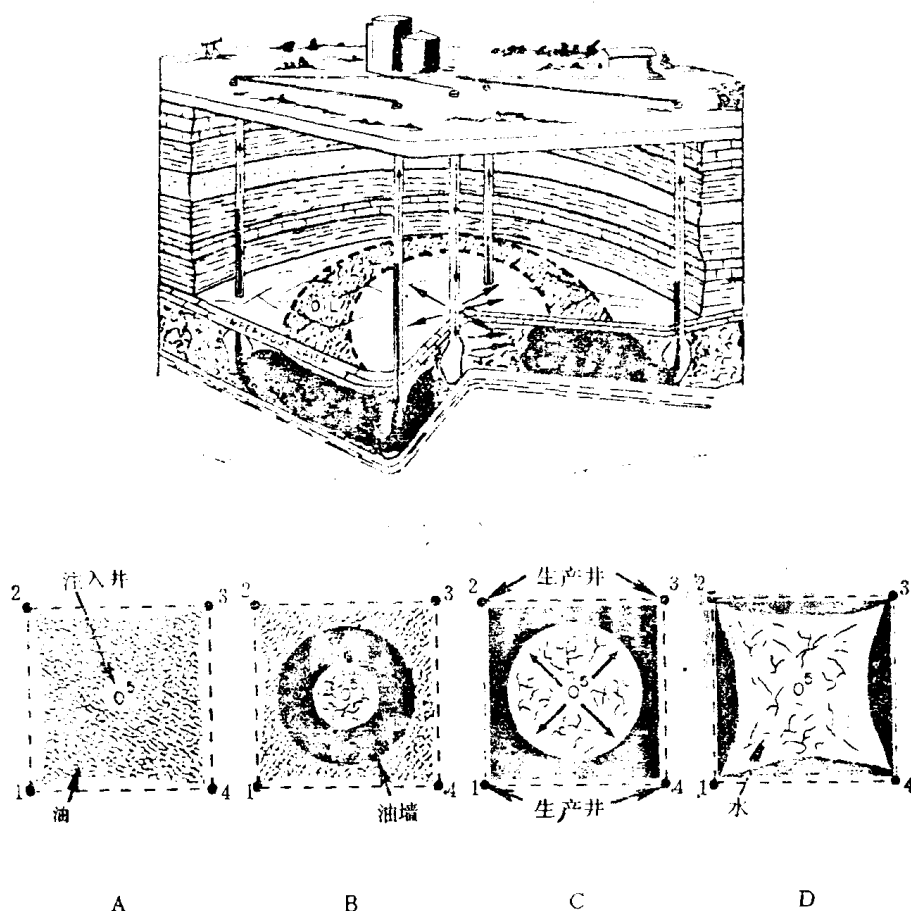


图 2 水或化学驱油藏中的原油(五点井网)

分, 因此, 这里将对这些溶液的结构特性作一个简单的介绍。

图 3 表示表面活性剂水溶液中分子聚结过程^[2,8], 在非常低的表面活性剂浓度下, 表面活性剂在溶液中保持单个分子状态与表面活性剂分子吸附膜的相平衡(图 3B)。当表面活性剂浓度增加时, 表面活性剂分子在被称为临界胶束浓度(CMC)的、非常狭窄的浓度范围内开始形成聚结体或胶束(图 3A)。表面活性剂浓度的进一步增加形成了单个分子浓度保持为常数的更多的胶束。胶束的内核提供了一个可以增溶油的非极性环境。这样, 油能够增溶在胶束内, 形成更大的肿胀胶束(图 3D)。在存在聚合物时, 表面活性剂和聚合物分子或者联合或者产生相分离, 取决于表面活性剂及聚合物的结构和物理-化学条件。温度、盐的浓度及二价和多价阳离子的出现对胶束尺寸及 CMC 值有显著的影响, 胶束是生命只有毫秒级的动力学结构^[4]。胶束动力学强烈地受短链醇加入的影响^[5], 因此, 可以推测由于胶束溶液动力学的原因, 表面活性剂分子从体相溶液向油-盐水界面的传质速度显著地受短链醇加入的影响^[6]。

当表面活性剂浓度增加时, 产生了从球形胶束到圆柱状胶束到层状胶束等的不同结构转变(图 4)。应当强调指出, 图 4 仅仅是观察到的一般的结构转变示意图, 并不是每种表面活性剂都经历所有这些结构的转变的。然而, 一般说来, 许多表面活性剂都显示了相似的结

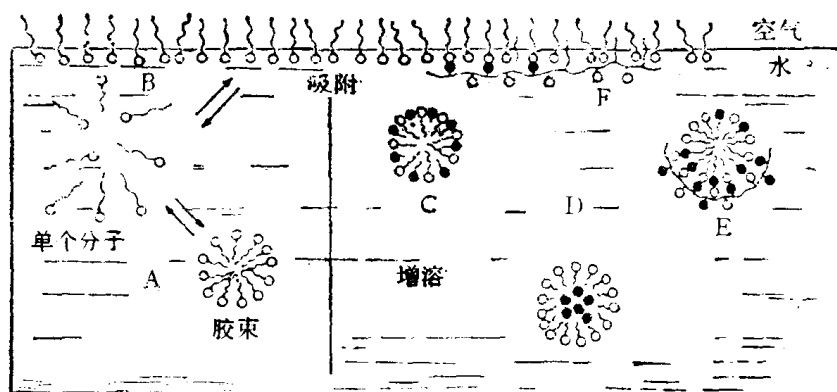


图 3 吸附、胶束形成、增溶和在胶束表面的相互作用

构转变，它取决于表面活性剂的结构、浓度和物理-化学条件如温度、pH 和是否有电介质的存在等。应当强调的是单个分子浓度和把表面活性剂分子排驱到界面吸附层的力随这些结构的转变而改变，因此表面活性剂溶液的微观结构对于界面张力值、增溶程度、流动性、吸附和其它化学试剂损失机理都是很重要的，这些结构的稳定性对于从整个溶液中向油-盐水界面的传质速度也是很重要的。

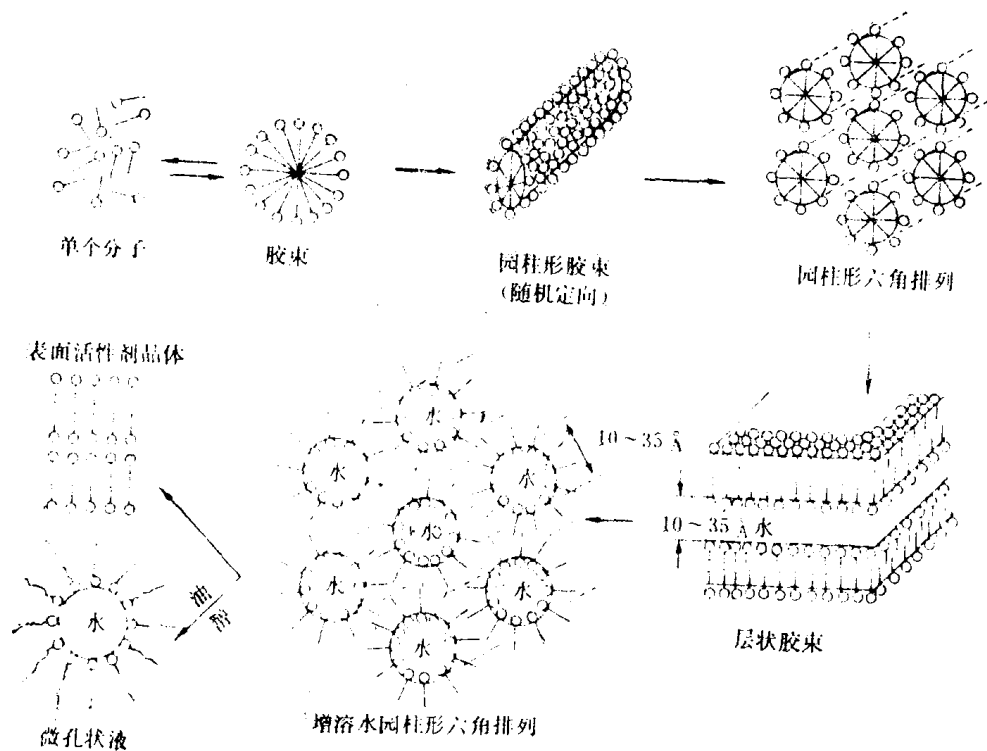


图 4 表面活性剂溶液中结构形式

多孔介质中油珠驱替机理。图 5 示意描述了超低界面张力对于一个被围捕的油珠通过狭窄孔颈移动的作用。正如前面所述，超低界面张力减小了油珠通过狭窄孔颈移动时界面变形所需的功，使用适当的表面活性剂体系，大量的油珠都能移动，这些油滴随后的联合是形成油墙的必要条件。已知高的界面粘度阻止了油滴的联合，而低的界面粘度却促进了这种联合。这样，正象图 6 所示，非常低的界面粘度对于油珠联合形成油-盐水墙是合乎需要的。

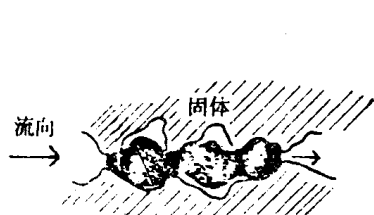


图 5 界面张力对油珠通过狭窄孔颈运动的影响。为使油珠移动，油-水界面张力最好是 0.001 达因/厘米

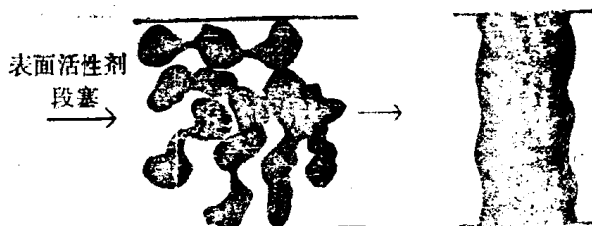


图 6 被驱替的油珠必须联合以形成连续的油墙（应当指出油墙内还包含一些盐水，下同），为此，最好有一个很低的界面粘度值

图 7 描述了油墙的推进及其随后同其它油珠的联合。如果在表面活性剂段塞-油墙界面上没有保持超低界面张力，那么大量的油将由于圈捕作用而损失^[6]。因此，一个有效的石油开采方法需要在油墙的后缘存在超低界面张力。

除了前面已指出的因素之外(例如：超低界面张力及油珠的联合)，油墙和表面活性剂段塞的浓度控制对于一个成功的提高石油采收率方法是重要的必须要求。正如图8所示，聚合物溶液可作为提高石油采收率过程的恰当的流度控制的驱替液。表面活性剂、聚合物、油和盐水在流动中的分散能够导致形成乳化和（或）因表面活性剂-聚合物的不可配伍性而产生的相分离^[7]。在驱油过程中应当尽量减少高粘度结构或相态的形成。

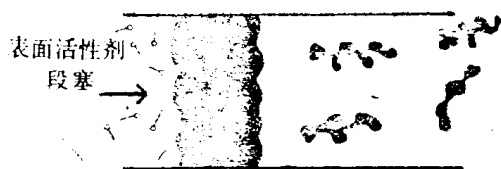


图 7 油墙通过多孔介质的有效推进需要在油墙后缘有超低界面张力

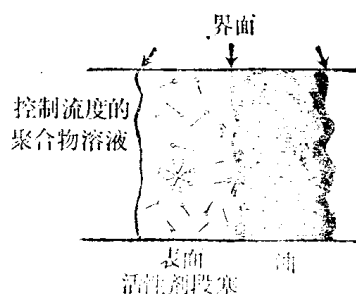


图 8 油墙、表面活性剂段塞和聚合物溶液通过多孔介质的流动产生了乳状液和表面活性剂加聚合物的混合区域，有效的石油采收率应使稳定的乳状液形成和表面活性剂加聚合物的高粘度结构降到最低

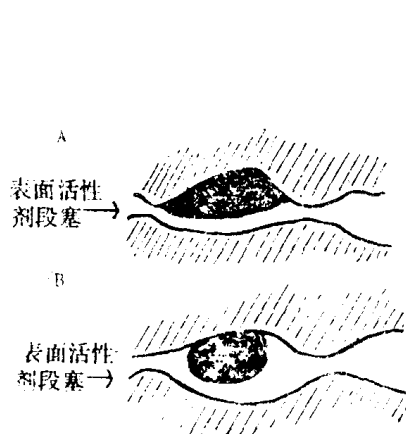


图 9 岩石表面润湿性对多孔介质由一个油滴的接触角的影响，(A)代表了油湿岩石表面，而(B)代表了水湿岩石表面

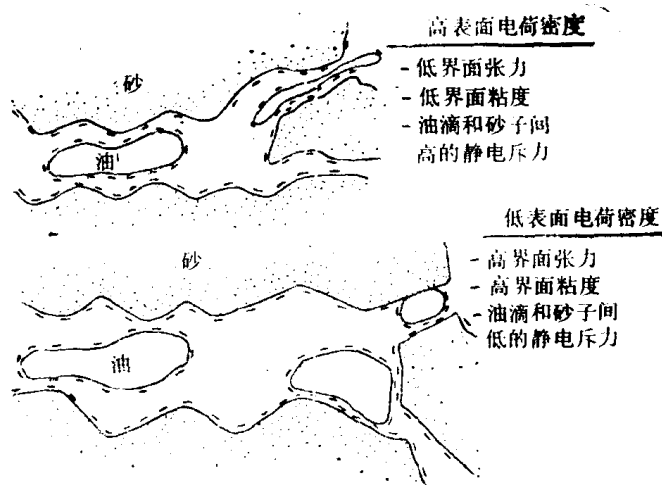


图 10 油-盐水界面上表面电荷密度对驱油过程的影响〔引自文献〔8〕〕

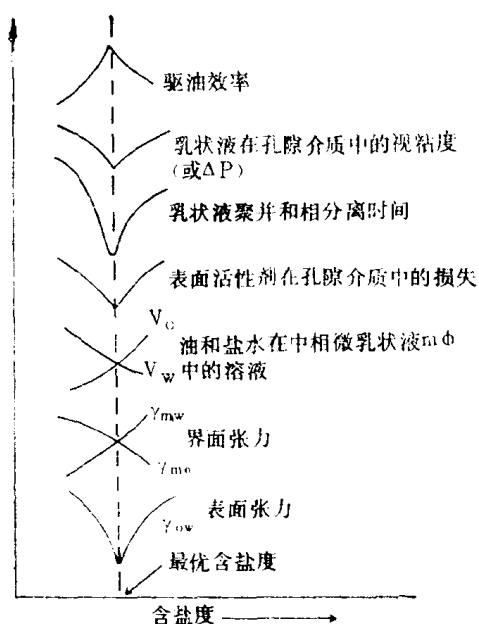


图 11 油-盐水-表面活性剂-醇体系在最优含盐度下产生的与驱油效率有关的不同现象

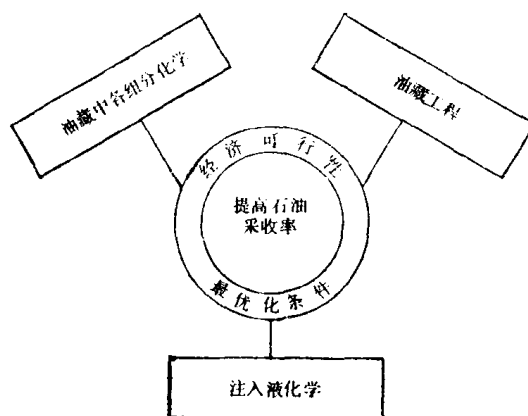


图 12 提高采收率研究的三个主要领域

正如图 9 所示,油在岩石表面上的接触角取决于岩石润湿性。因此,表面活性剂段塞驱油受岩石表面润湿性影响。

根据对原油的室内研究,我们已经指出过油珠的表面电荷密度显著地影响其驱替效率。高的表面电荷密度导致低的界面张力、低的界面粘度和油滴、砂粒间的强静电斥力(图 10)。

油-盐水-表面活性剂-醇体系常常在一个适宜的含盐度范围内形成中间相微乳状液。中间相含有等体积的油和盐水时的含盐度定义为最优含盐度^[9]。在最优含盐度下,油-微乳状液和微乳状液-盐水的界面张力都在毫达因/厘米范围内,并且石油采收率最大^[6,9]。此外,我们已经指出过,在最优含盐度下,对于油-盐水-表面活性剂-醇体系,油滴联合时间或相分离时间最短。当该体系泵入多孔介质时,在最优含盐度下观察到最小的压力降或最小的视粘度^[10],所有在最优含盐度下发生的这些现象,都综合在图 11 中。在最近的研究中,我们还发现,在最优含盐度下表面活性剂在多孔介质中的损失最小。因此,除超低界面张力之外,被移动的油珠的有利联合过程,油堵的最低视粘度(或最小 ΔP)和最少的表面活性剂损失是在最优含盐度下对最大石油采收率有贡献的其它因素。

图 12 表示提高采收率研究的三个主要领域,即油藏各组分的化学、注入液化学和油藏工程。为了成功的应用不同提高石油采收率方法,希望更清楚地了解注入液体和油藏中各组分(例如:油、盐水、岩石、粘土和各种矿物等)之间复杂的相互作用。经济可行性和最优化条件对于实现各种提高石油采收率方法是必须考虑的两个准则。

这本论文集包括由 J.J.塔布尔(J.J.Taber)教授撰写的题为“提高采收率的过去、现在和将来”及 H.F.艾克(H.F.Eike)教授撰写的“表面活性剂溶液中的聚结体、胶束和微乳状液的形成和性质”二篇特邀综述文章。这本论文集的六部分内容集中在驱油特性的如下方面:(1)驱油过程的基本特性,(2)表面活性剂体系的微观结构,(3)乳状液流变性和驱油机理,(4)润湿性和驱油机理,(5)吸附、粘土和化学剂损失机理,(6)聚合物的流变性和表面活性剂-聚合物的相互作用。作者希望这本论文集的论文反映了提高石油采收率方面当代科学发展水平,并强调了当前需要解决的问题。

参 考 文 献

1. J. C. Melrose and C. F. Brandner, J. Canadian Petr. Tech., 58, Oct.-Dec., 1974.
2. D. O. Shah, Chem. Eng. Edn., 11, 14 (1977).
3. V. K. Bansal and D. O. Shah, in "Micellization, Solubilization, and Microemulsions," K. L. Mittal, ed., Vol. 1, Plenum Press, New York, p: 87, 1977.
4. E. Koffmann, H. Nüsslein, and W. Ulbricht, in "Micellization, Solubilization, and Microemulsions," K. L. Mittal, ed., Vol. 1, Plenum Press, New York, p. 263, 1977.
5. R. Zana, in "Surface Phenomena in Enhanced Oil Recovery," D. O. Shah, ed., Plenum Press, New York (in press).
6. M. Y. Chiang and D. O. Shah, SPE 8988 presented at the Fifth International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry held in Stanford, California, May 28-30, 1980.
7. S. P. Trushenski, in "Improved Oil Recovery by Surfactant and Polymer Flooding," D. O. Shah and R. S. Schechter, eds., Academic Press, Inc., New York, p. 555, 1977.
8. M. Y. Chiang, K. S. Chan, and D. O. Shah, J. Canadian Petr. Tech., 17, 1, Oct.-Dec., 1978.
9. R. L. Reed and R. N. Nealy, in "Improved Oil Recovery by Surfactant and Polymer Flooding," D. O. Shah and R. S. Schechter, eds., Academic Press, Inc., New York, p. 383, 1977.
10. S. Vijayan, C. Ramachandran, H. Doshi, and D. O. Shah, in "Surface Phenomena in Enhanced Oil Recovery," D. O. Shah, ed., Plenum Press, New York (in press).

与采油体系有关的油藏物理化学环境

L.A.小威尔逊 扬普华 译

摘 要

本文综述了油藏的物理化学环境，特别是着重于这些环境对采油过程的动态会产生怎样的影响；评述了各种化学驱过程，并着重指出了原油性质在这些过程中的重要性；给出了束缚水分析和油藏岩石矿物分析的实例；讨论了束缚水和岩石矿物组成，以及地质、岩性和油藏温度对采油过程的影响；并叙述了防止出现某些问题的方法。

范 围

美国提高石油采收率的潜力，估计 约达 600 亿桶。杰芬(Geffen)、哈瑟伯(Hasiba)和威尔逊(Wilson)以及夏普(Sharp)^[1~3]发表了他们的估计；并设想这些潜力中大约百分之六十可能取自化学驱替过程。就本文来说，化学驱指的是包括各种“水基的”驱替过程，诸如胶束和表面活性剂驱、碱水驱和聚合物驱。这些过程都对油藏中通常存在的某些环境因素敏感。本文的目的就在于评述这些驱替过程的体系与油藏环境的相互作用，及其对成功地应用这些采油方法可能产生的影响。

结论和意义

这篇综述性文章探讨了可能影响化学驱过程的五种油藏环境因素。它们是油藏中的油和水、矿物、岩性以及温度。已经发现，原油可能影响驱替过程的选择及化学段塞的组成；水可能影响流体的注入顺序、碱水和表面活性剂段塞的寿命和稀释程度、段塞驱油的效率、表面活性剂和聚合物溶液的流度，并从而影响流度控制。

矿物的影响程度在于它提供二价离子数量的多少，它还影响表面活性剂、碱和聚合物的吸附。由于这些离子和吸附作用影响着段塞的稀释和流度控制，这二者都是决定碱水和表面活性剂驱过程效率的因素。岩性影响流体的注入能力；影响聚合物溶液的性能（因其阻力系数和剪切降解受岩性的作用）；并且由于不可及孔隙体积对聚合物流动的作用，它也影响流度控制。油藏温度可能影响表面活性剂段塞的相稳定性、聚合物溶液的化学稳定性、碱水驱的反应速度和润湿性倒转。

于是，这些都是化学驱当前研究工作中试图解决的问题。

驱替过程综述

图 1 是我们所要讨论的驱替过程的示意图。

1. 表面活性剂驱

我们将应用表面活性剂驱这个“总称”来概括文献中通常称为表面活性剂驱、洗涤剂驱、磺酸盐驱、微乳液驱、乳状液驱、胶束驱和可溶油驱的驱替过程（图 1-a）。这些过程的主要目的是把一种能使残余油流动的表面活性物质段塞注入到油层中，把残余油通过驱替

采出来。这种表面活性剂段塞（仅以总孔隙体积的分数表示）再被后继的稠化水段塞（聚合物溶液）驱动通过油藏，稠化水段塞接着又被水或盐水驱动。每个段塞的流量都调节到使其旁通和串通现象减到最小程度，以改善该过程的波及效率。理想的情况是表面活性剂驱接近于混相驱。

尽可能长地保持段塞的完整性是很重要的。它们对油藏的某些因素很敏感，这些因素可能使其过早地被稀释。

2. 聚合物驱

如同上述，在表面活性剂驱中注入聚合物溶液以帮助该过程获得好的体积波及效率。聚合物溶液也可以与水驱联用以达到同样的目的，如图 1-b 所示。它就好像我们仅仅观察表面活性剂驱的后面部分，而在聚合物溶液下游残余油尚未开始流动似的。

注入聚合物的目的是降低水的流度，与单独注入相比，这样做可迫使水流经岩石更多的流动通道。

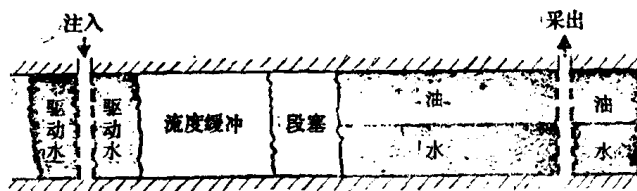


图 1-a 表面活性剂驱

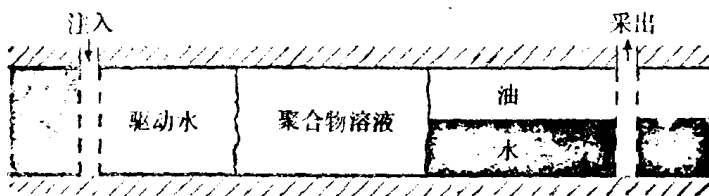


图 1-b 聚合物驱

3. 碱性水驱

碱水驱就是把含苛性物质的水段塞注入油层，接着再用水或盐水驱动（图 1-c）。该段塞可能含有多达百分之五的氢氧化钠，大约占百分之十五的孔隙体积。碱水驱提高采收率的机理为以下的一种或几种：（1）岩石润湿性向有利方向转化，（2）低界面张力驱替，和（3）改善波及效率。

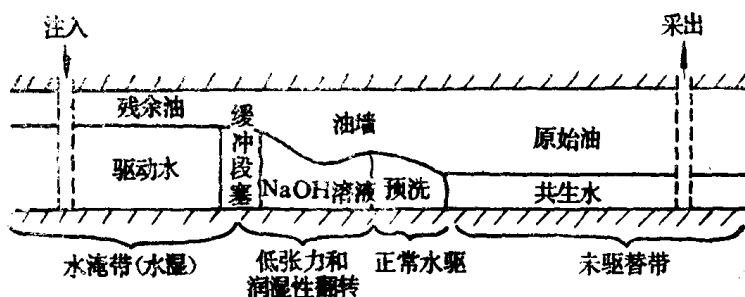


图 1-c 氢氧化钠水驱

油藏的环境因素

下面我们将讨论五种可能强烈影响这些驱替过程的油藏环境因素。这就是油、束缚水、地质岩性、矿物和温度。

1. 油

油的性质可能以不同方式影响着这些过程。粘度可能影响过程的选择。正如波埃特曼 (Poettman) [4] 所论述的那样, 其粘度可能适于或已经适于水驱的油一般说来也适合于化学驱。粘度的上限可稍微超过水驱, 但一般说来, 适于化学驱的油其 API 重度要大于 20° (比重 < 0.934 , $60^{\circ}/60^{\circ}$) 地层原油粘度要小于 100 厘泊。在这个粘度范围内, 聚合物驱是唯一适用于粘度大于 50 厘泊的一种化学驱。

原油的化学特性对表面活性剂驱和碱水驱都是重要的。表面活性剂驱要求段塞与其所接触流体间有低的界面张力。油的化学性质之所以重要, 是因为它影响界面张力, 从而影响表面活性剂的选择和段塞组成。比如法斯特 (Foster) 指出, 对一种特定的石油磺酸盐来说, 当含这种磺酸盐的盐溶液和中间石蜡基原油之间获得最低界面张力时, 与典型的环境烷基原油相比, 其氯化钠浓度较高而表面活性剂浓度较低。最近, 卡希 (Cash) 等人 [6] 报告了有关原油类型与界面张力的补充资料。这个关系示于图 2, 它是一种石油磺酸盐-氯化钠-

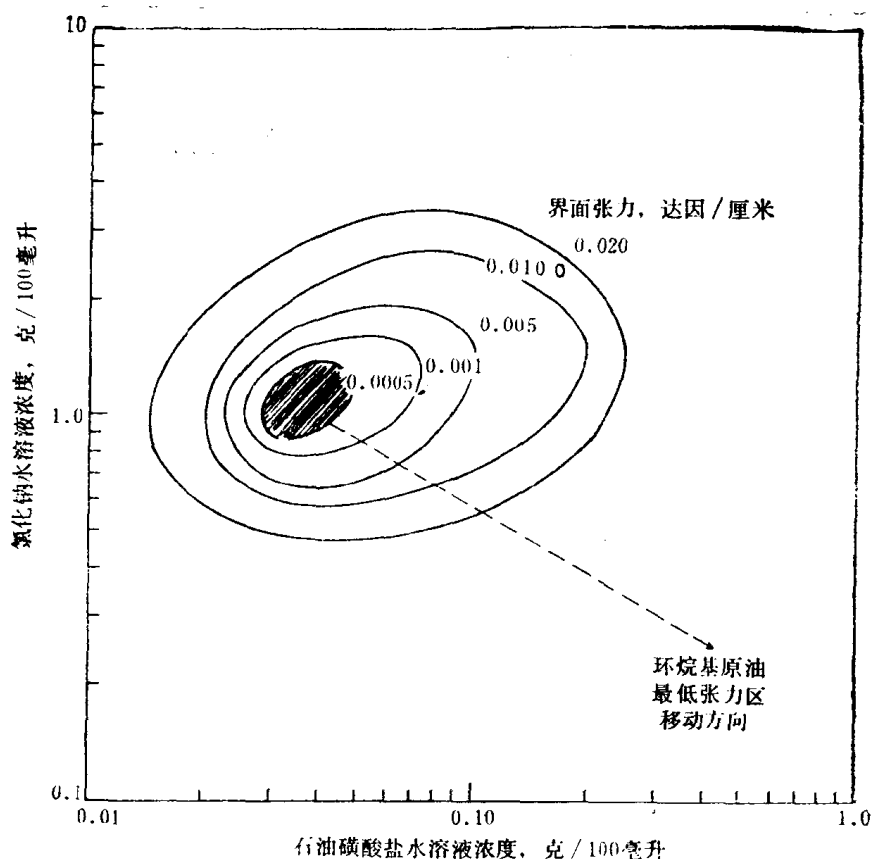


图 2 石油磺酸盐-NaCl-水体系与中间石蜡基原油之间界面张力等值图

水体系与一种中间石蜡基原油之间界面张力的等值图。如果油是环烷基的，最低张力区将向下和向右移动，如箭头所示。

应用碱水驱，原油必须具有可与碱反应形成表面活性剂的酸性组分。欧立奇(Ehrlich)和魏戈尔(Wygal)^[7]曾指出，酸值大于 0.1~0.2 毫克 KOH/克油的原油，其碱水驱的采收率可以大大超过水驱，而酸值较低的原油其采收率增加不多。杰宁斯(Jennings)^[8]曾把原油对碱性溶液的表面活性与酸值、API 重度以及粘度关联起来。

溶解在油中的酸性气体，如 H₂S 和 CO₂，在碱水驱中可能与碱反应而消耗一部分碱，要不然这部分碱是可以用来进行有效反应的。

2. 束缚水

束缚水中的某些化学组分可显著地影响化学驱的动态，而这种水的组成变化可能很大。表 1 所示就是不同地方和不同深度的地层水样品的分析结果。试图用这些资料来说明油藏盐水组成的巨大变化，但这并不是说在水分析和地理位置之间有一个独特的关系。在水分析中特别有意义的是一价、二价和三价离子浓度的变化。硼对某些聚合物特别重要，水中酸性组分与刚才提到的油中的酸一样也可能与碱发生反应。

进行碱水驱时，如 Ca⁺⁺和 Mg⁺⁺等二价离子可与碱反应而沉淀形成不溶的氢氧化物，把碱性损耗掉。然而，钙离子可能还具有更深一层的作用。同时，氯化钠的存在看来可使碱降低界面张力的作用加强。杰宁斯等人^[9]曾论述了这种作用，如图 3 所示。可注意到，存在 Ca⁺⁺会使界面张力明显增大，水中的 NaCl 则使界面张力降低。杰宁斯等人^[10]和库克

表 1 采出水的分析结果(根据 Case 和 Crawford 资料)^{[88], [84]}

组 分 (ppm)	来源/(深度)					
	俄克拉何马 3875英尺	俄克拉何马 4150英尺	俄克拉何马 5728英尺	俄克拉何马 7084英尺	堪萨斯 3310英尺	新墨西哥 3841英尺
Na ⁺	4869	66933	7060	20100	7500	3085
Ca ⁺⁺	278	17120	2177	1269	876	1308
Mg	102	2248	373	175	370	676
SO ₄	171	380	115	664	825	674
Cl	7800	139720	23879	37306	13150	7446
HCO ₃	636	75	52	222	746	1891
CO ₃	无	无	0	0	无	无
Fe ⁺⁺	痕迹	30	痕迹	—	痕迹	痕迹
B	—	—	5	187	—	—
H ₂ S	有	无	—	—	有	有
有机酸 (如醋酸)	—	—	1562	48	—	—

续表

组 分 (ppm)	来源/(深度)						
	密执安 2840英尺	科罗拉达 3130英尺	蒙大拿 3000英尺	怀俄明 5250英尺	怀俄明 7350英尺	路易斯安那 15225英尺	密西西比 8100英尺
Na ⁺	75709	873	2835	10012	649	29765	76200
Ca ⁺⁺	33088	8	35	486	340	1600	37700
Mg	7670	0	痕迹	103	78	117	2410
SO ₄	86	279	28	10946	1523	360	64
Cl	197570	2092	1566	8316	222	49612	190100
HCO ₃	痕迹	610	4900	355	795	451	—
CO ₃	无	痕迹	—	痕迹	0	0	—
Fe ⁺⁺	14	—	—	—	—	—	298
B	—	—	—	—	—	66	—
H ₂ S	无	—	—	—	—	—	—
有机酸 (如醋酸)	—	—	—	—	—	—	—
							Mn 105
							Pb 101
							Zn 367
							Sr 2290

(Cooke) 等人充分地讨论了水中的成分对碱水驱的影响。

表面活性剂驱和聚合物驱对束缚水的化学组成都很敏感。一价和二价金属离子都可影响表面活性剂溶液。这些离子的浓度也会影响溶液的界面张力、粘度和相稳定性。希尔(Hill)等人^[12]曾提出,对特定的原油-表面活性剂溶液体系来说,看来存在一个最佳氯化钠浓度。如果由于与束缚水混合而使 NaCl 浓度发生了变化,界面张力可能增加,采收率就可能降低。霍尔姆(Holm)和乔森达尔(Josendal)^[13]提出, NaCl 浓度在 2% 以内可能是令人满意的。希尔等人^[12]以及道本(Douben)、弗罗宁(Froning)^[14]曾试图证实这一点。希利(Healy)和里德(Reed)^[15]以及希利、里德和斯坦马克(Stenmark)^[16]曾讨论了最佳含盐量在延长“局部混相”驱中的作用,正如三角相图中三相区最小所说明的那样。

NaCl 的影响示于图 4。对一个固定的磺酸盐组成来说,该溶液或者可能是最佳的,或者其活性增加或减小,或者形成两相,都取决于 NaCl 浓度的改变。

钙、镁离子可使磺酸盐沉淀,伯纳德(Bernard)^[17]把这一机理作为其降低驱油效果的部分原因。然而它们还可能引起其它预料不到的,也许更加不利的作用。希尔等人^[12]指

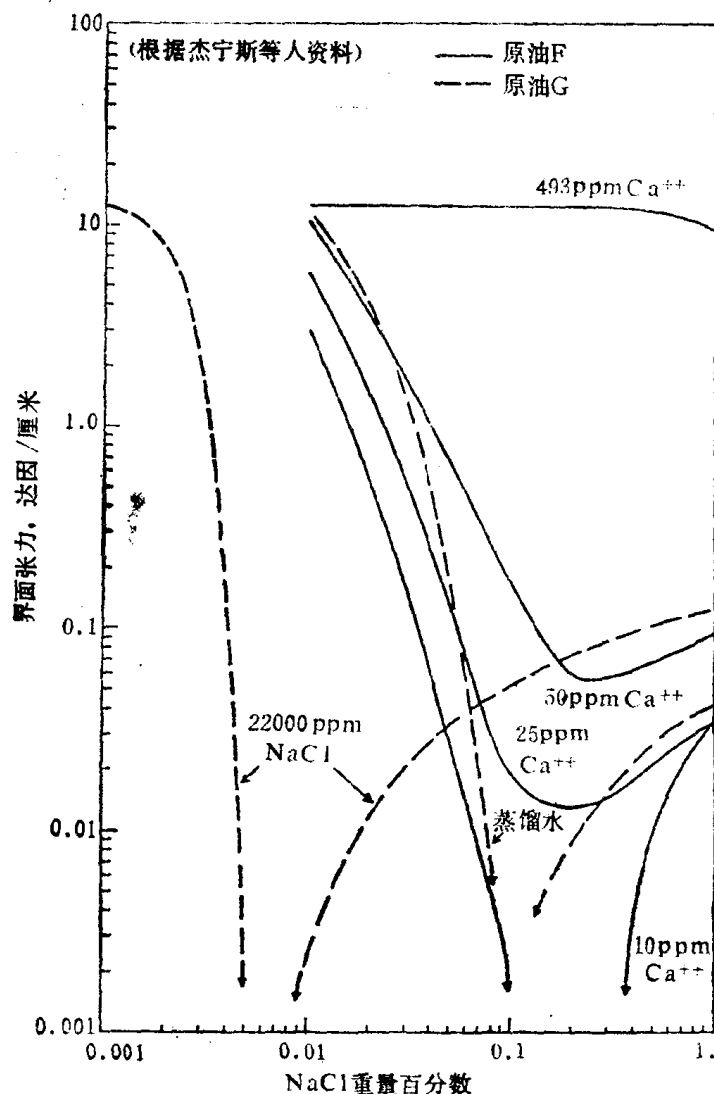


图 3 氯化钠和 Ca^{++} 对界面张力的影响

出，正象NaCl那样，界面活性存在着明显的依赖于 Ca^{++} 浓度的趋势。图 5 存在一个最佳界面活性区间，它显然是表面活性剂溶液中 Ca^{++} 含量的函数。比较微小的改变 Ca^{++} 浓度就可能引起表面活性剂溶液粘度的明显变化。图 6 用特鲁申斯基 (Trushenski) ⁽¹⁸⁾ 所报告的资料说明了这一点。这种粘度的增加可能破坏体系的流度控制。

采油中常用的聚合物是聚丙烯酰胺，或生物聚合物。它们的作用机理是降低水的流度而改善波及效率。

聚合物降低流度的作用或者靠增加粘度；或者靠降低渗透率；或二者兼而有之。正如麦克威廉斯 (MacWilliams) 等人 ⁽¹⁹⁾ 所指出的那样，到底那种机理占优势主要是由聚合物性质和电解质含量所决定。聚合物溶液降低流度的一个指标是阻力系数，它的定义是同一岩石内水的流度与聚合物水溶液流度之比。两类聚合物都对一价和二价离子敏感，但其程度不同。聚合物溶液的任何变质都可使其性能变差。