

○ 廖广志 李立众 孔繁华 张思富 等编著
隋 军 主 审

常规泡沫驱油技术

Conventional Foam Flooding Technology

北京)

65

石油工业出版社

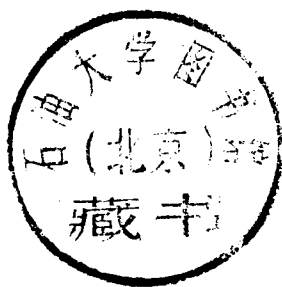
登录号	135166
分类号	TE 357.65
种次号	004

常规泡沫驱油技术

CONVENTIONAL FOAM FLOODING TECHNOLOGY

廖广志 李立众 孔繁华 张思富 等编著

隋 军 主审



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是根据 39 篇在历年国际石油会议及专业杂志上发表的各类关于常规泡沫驱油技术的文献编写而成的,较为全面地反映了 50 年代以来国际上在常规泡沫驱油技术方面的研究水平,全书分机理研究、数值模拟和矿场试验三部分。本书具有较高的理论意义和实用价值,可供三次采油专业相关的科研人员和工程技术人员阅读,对石油院校师生也具有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

常规泡沫驱油技术/廖广志等编著.

北京:石油工业出版社,1999.8

ISBN 7-5021-2782-8

I. 常…

II. 廖…

III. 泡沫驱油-技术

IV. TE357.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43272 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)

大庆石油勘探开发研究院彩印厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 500 千字 印 1—1000

1999 年 8 月北京第 1 版 1999 年 8 月大庆第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2782-8/TE·2181

定价: 36.80 元

前 言

大庆油田已进入高含水开发期，注水开发的平均采收率按 40%（OOIP）计算，还有 60%（OOIP）的剩余油有待于用注水开发技术以外的其他技术开采。开展有效的三次采油技术研究是延长大庆油田开发期，确保油田稳产的需要。经过“七五”、“八五”攻关，聚合物驱油技术具备了工业化应用的配套能力，三元复合驱也取得了一定效果。尽管如此，仍有 40%~50%（OOIP）的剩余油留在地下。为了挖掘这部分潜力，必须研究比聚合物驱和三元复合驱更好的三次采油方法。

泡沫驱既能显著地提高波及效率，又可提高驱油效率，因此它是有发展前途的一种三次采油方法。目前，大庆油田已在北二区东部萨Ⅲ3-7 层开展了 176m 井距的泡沫驱先导性矿场试验，并见到初步效果。为了满足广大从事三次采油工程技术人员的迫切需要，我们收集了 50 年代以来国外在常规泡沫驱油技术上的 39 篇论文，并按章节编著了本书，供我国从事石油开发，油田化学和三次采油的工程技术人员及石油大专院校师生参考。

在本书的编著过程中，得到了大庆石油管理局有关领导的支持，尤其是王德民院士给予了特别的关注，大庆油田高级人才培训中心（博士后科研工作站）、各采油厂和大庆勘探开发研究院给予了大力帮助，在此一并表示衷心感谢。

本书的编写工作由于时间仓促，水平有限，难免有许多不妥之处，恳请读者多加批评指正。

编 者

1999 年 3 月

目 录

第一章 泡沫驱油机理研究	(1)
第一节 多孔介质中泡沫流动的机理和应用.....	(1)
第二节 在玻璃球充填介质内泡沫的产生机理	(12)
第三节 泡沫存在时气体和液体在多孔介质中的渗流机理	(28)
第四节 组成泡沫的表面活性剂在 Berea 砂岩上的吸附研究	(41)
第五节 含油多孔介质中泡沫渗流的特征	(54)
第六节 原油对泡沫稳定性的影响：在多孔介质中泡沫驱油机理及所做的 实验论证	(62)
第七节 多孔介质中不稳定泡沫的实验与模拟	(78)
第八节 压力对泡沫稳定性的影响及泡沫筛选结果	(84)
第九节 高压砂岩中泡沫渗流的实验室研究	(95)
第十节 高温条件下气-液速度对泡沫稳定流动的影响	(106)
第十一节 毛管压力对流经孔隙介质的泡沫的聚合及其相流度的影响.....	(113)
第十二节 气体与发泡液在多孔介质中稳态和非稳态流动对比研究.....	(122)
第十三节 多孔介质中泡沫的物理特性及其对泡沫驱油的影响.....	(132)
第二章 数值模拟技术	(139)
第一节 多孔介质泡沫渗流数值模拟.....	(139)
第二节 泡沫在孔隙介质中的毛管和捕集现象	(145)
第三节 模拟在多孔介质中的泡沫流动.....	(156)
第四节 多维泡沫驱机理预测——总体平衡法	(176)
第五节 考虑总体平衡法和截断产生法的泡沫机理模拟器开发.....	(190)
第六节 多孔介质中泡沫作用的模拟和因次分析.....	(202)
第七节 用于聚合物、乳状液和泡沫驱替实验的新的相似准则	(212)
第八节 调剖用泡沫胶的评估模型.....	(229)
第三章 矿场试验及深部调剖封堵	(239)
第一节 泡沫现场试验：目前工艺水平及评述.....	(239)
第二节 Siggins 油田注泡沫矿场试验	(249)
第三节 现场试验设计和技术要求	(256)
第四节 油田使用化学剂的有效选择.....	(261)
第五节 Oseberg 油田减少生产井气油比的泡沫控制试验	(269)
第六节 泡沫用作油藏气堵剂的实验观察和参数研究.....	(275)
第七节 泡沫气堵机理.....	(287)
第八节 用作封堵剂的泡沫充填性能与凝胶的比较.....	(302)
附录 A 无因次变量及方程	(311)
附录 B 单位译名和换算表	(314)
参考文献	(315)

第一章 泡沫驱油机理研究

第一节 多孔介质中泡沫流动的机理和应用

一、研究现状

Fried 是最早研究采用泡沫在提高采收率方面增加驱油效率的研究人员。他的研究指出, 泡沫引起气相相对渗透率迅速降低, 进而延缓了气体的突破。泡沫法提高采收率主要归功于气体渗透率的降低。他注意到表面活性剂增加了残留气体的饱和度。其观察表明, 气体相对渗透率并非饱和度的单值函数, 当阻止流动的界面张力增加时, 曲线向左移动, 表明了泡沫流动阻力随表面活性剂浓度的增加而增大。因此, 气体有效渗透率也是一个表面活性剂浓度的多值函数, 因此可以认为气体有效渗透率取决于表面张力和表面粘滞力。他承认弱的泡沫不能封阻气流的事实。在弱泡沫的情况下, 他观察到泡沫不断地破灭和再生。

1963 年, Bernard 在实验室中发现当有泡沫存在时, 气驱效果增强。实验表明, 泡沫作为驱替剂, 在只含水的松散砂中非常有效; 而在只含油的松散砂中却不十分有效; 当松散砂含水含油时, 泡沫的作用介于两者之间。初步研究表明, 泡沫能提高气驱采油过程中的波及体积, 因为它选择性地降低了油藏中的气体渗透率。Kolb 认为大部分气体被圈闭在孔隙介质中, 仅有少部分气体成为游离气体, 游离气体可用达西定理描述。

1965 年, Bernard 等人证明了用泡沫驱油可从线性层状岩心中采收到比传统注水法更多的原油, 泡沫形成了圈闭气的高饱和, 并间接形成了一个较低的水相渗透率。而含油含水系统的圈闭气饱和度较只含水系统的要低。他们表明气体以非连续相流动, 而水以游离相流动。他们得出结论: 无论泡沫是否存在于系统中, 对于给定液体饱和度, 水的相对渗透率是一样的。他们重要的发现之一就是: 即使注入 $0.10 \sim 0.25PV$ 的水, 泡沫在无表面活性剂水通道中也不会破灭。

Marsden 和 Khan 认为泡沫的组成部分是同时流过孔隙介质的通道的。他们的结论同时表明, 随着质量提高, 泡沫流动性下降。当然, 随着孔隙介质绝对渗透率的下降, 流动性下降率也越低; 随着表面活性剂浓度的增大, 泡沫的表观粘度也增加, Holm 不同意这个观测结果, 他做了流体实验和目视的研究, 以观察孔隙介质存在泡沫时气、液流动机理。他记录说, 泡沫通过多孔介质时不像是做为一个整体。相反, 组成泡沫的气体 and 液体将分离, 泡沫膜破灭, 然后重新形成。当有足够泡沫存在时, 泡沫的气体流动停止, 液体流动减缓。因此他认为, 驱动泡沫通过油藏是不可行的, 但泡沫能通过减缓和阻隔高渗透率层的流动, 进而改善非均质油藏注液过程的驱替状况, 他观察到质量提高, 泡沫的流动性也增强。他报告说气体不能以连续相流动。这与 Marsden 和 Khan 的观点也有差别。他将这个差别归因于实验技术的差别。他强调, 由于 Marsden 和 Khan 使用的心心的压力降非常小, 泡沫膨胀得非常小, 导致一些小泡沫相对稳定, 产生较少的流动阻力。由于低质泡沫包含更多这样的小泡

沫，泡沫越湿，表观粘度越低，流动性也就越高。

Bond 和 Bernard 将泡沫流动描述为泡沫体中液、气的部分流过，主张只有余下的表面活性剂才能以自由相流动。他们总结说，液体流过孔隙介质是从固定通道走的，而与泡沫是否存在无关，并且这些通道完全取决于液体饱和度。这一结论是以 Chatenaver 的孔道流体理论为基础的。

Holm 报导了泡沫在选择性堵塞高渗透率通道上的成功应用，继泡沫之后注入气（而非水）会使堵塞效果最佳。尽管 Bernardeta 等人曾记载过在多次实例中孔隙系统渗透率（对泡沫阻层下的水而言）减至其初始值的 10% ~ 50%，但 Holm 却认为泡沫阻层下的水会冲淡泡沫溶液，并将它冲掉。他还认为，当通道的渗透率高，泡沫的堵塞效果最好。

Raza 曾对影响多孔介质中泡沫的产生，运移、质量和特性等变量因素做了详细的研究。与以前的研究人员不同，他发现泡沫在油藏的岩石中，在压力为 100kPa ~ 6700kPa，压降 1kPa/m ~ 110kPa/m 的条件下可以运移，而泡沫的质量则取决于泡沫剂类型、表面活性剂浓度、多孔介质的物理特性、压力值以及液体的成份和饱和度。他认为泡沫在孔隙介质中的流动特性就其高表观粘度而言很难精确描述。但泡沫有意义特性之，就是在孔隙介质中的泡沫会控制所有液体的流动。他还强调，限制最严重的就是气体的流动，即使泡沫破灭，水流限制已经减轻，气流限制也仍要持续较长时间。另一方面，烃类流动只是暂时被限制。他观察到随着泡沫阻层的增厚，注气能力持续下降，并渐渐地逼近一个低值。

Minssieux 观察到，对一给定岩心压差，泡沫速度持续下降直到气体流动完全停止。为克服种表面活性剂，泡沫与油接触后稳定性下降。他同意 Holm 的观察结果：泡沫是不断破灭和重新形成的，而非一个单相。他还发现气体在介质中运动比水快，并且不会形成一个连续相。正是由于泡沫流动期间这种泡沫的气、液分解，使得泡沫的表观粘度降低，质量提高。这个结果与在孔隙外观察的结果相反。这种出口端泡沫质量持续下降，使绘制一套稳定状态的相对渗透率曲线变得困难。他还观察到，泡沫的流动不能等同于气体的流动，因为对油而言，泡沫呈润湿相。进而，他认为可以假定水和泡沫的相对渗透率是一样的。他报告说泡沫质量越低，驱替效果越好。对孔隙介质而言，则流度比越低。在实验中，他演示了对均质孔隙介质而言，原油采收率比气驱大幅提高，但与注水法相比，无明显改善。他把与油接触面的粘度损失，以及吸附在界面上的表面活性剂分子膜上的污染归因于活性剂性能差。因此他建议对表面活性剂使用浓缩剂，以防因油的存在，使泡沫质量下降。

Heller 等人做了用 CO₂ 泡沫高温高压驱替实验，发现泡沫流动并不是恒定的流速。速度越高，流动性增加；他们还发现表面活性剂浓度增加，泡沫流动性下降，而提高泡沫质量，流动性只稍微下降。

Owette 等人使用了多孔介质的可视直观模型。他们将模型充满表面活性剂溶液，发现当单独注入气时，只在气、液界面后面形成几个界面。然而，当注入泡沫时，气泡增大了。他们还发现泡沫不能堵塞较大的通道，绝大多数气体都由这些大通道流动。他们还研究了泡沫稳定性与表面活性剂浓度的函数关系。他们发现表面活性剂的水溶液浓度为 1%，泡沫破灭很少；而浓度为 0.1% 时，很多泡沫破灭。该观察结果 Raza 早就得到过。

Wang 研究了 CO₂ 泡沫的驱替效果。结果表明压力增加，泡沫稳定性增强，而温度增加，泡沫稳定性下降，他总结出无论是原地还是外部产生的 CO₂ 泡沫，在与原油接触时，都易

于迅速破灭。进而，他建议只要在注入地层利用泡沫堵塞可渗透层或通道，结果石油采收率都会提高，他还发现超高浓度的表面活性剂形成泡沫遮挡，因此降低了波及效率。

Maini 和 Ma 研究过静态实验与孔隙介质中泡沫稳定性的差异。对于 EOR-200（乙醇、乙醚、磷酸盐），当浓度为 0.25% 时，泡沫破灭速度最低，而当浓度增大或减小时，泡沫破灭速度明显加快。当浓度不断增长至 0.5% 时，排液半排出期也持续增长。为何存在这最佳浓度，他们解释是吸附的表面活性剂单层对表面张力影响的结果。对同一表面活性剂，他们还得到了 25g/L 的最佳浓度，此时流度减至最低。

Borchard 等人对 40 种表面活性剂进行了比较，发现在有油存在的泡沫实验中，在一个大气压下，性能最好的表面活性剂在高压下性能仍最好。

Best 等人推测气体在表面活性剂溶液中以离散相流动，他们发现没有气体时，部分水与气一样流经岩心组织，甚至流经更细小的孔。他们认为部分水流经无气岩心孔的情况决定于孔尺寸分布、体积流速等，而且他们认为气体相对渗透率的减小，是由于毛细作用对形成泡沫的液面形成阻力所致。因此，他们声称气体相对渗透率的减小的数量级取决于孔的单位长度的界面数、气泡与孔的尺寸比例和气泡的稳定性。他们还得出结论，仅在非常稳定的界面膜处，水的振动对整个水的流动分布具有重要意义。

Khatib 等人提出了“极限毛细压力”的概念，即指当一个孔隙介质中，气体以一定速率流动，泡沫中气体分流量增大时毛细压力有个初始增长，随后逐渐逼近的特征值。他们发现如果达到极限毛细压力时，气体的分流量增加，那么泡沫结构被聚并粗化，而液体饱和度保持常数，气体相对饱和度开始与气液分流比率成正比。他们认为极限毛细压力由表面活性剂类型、气流速度和绝对渗透率决定。气体相对流动性则主要由气体流速和气流分流量决定。气流分流量少时，气体相对流动接近于常值，因此可以认为该区域的泡沫结构保持不变。另一方面，气流分流量较高时，气体相对流动性迅速增长。他们认为该增长与毛细压力极限值有关，聚并使泡沫结构粗化。观测结果与 1985 年 Hirasaki 和 Lawson 观察平滑毛细管的结果相似。对于给定表面活性剂浓度，绝对渗透率增大，极限毛细压力下降。这是由于增大的渗透率对流动泡沫来说是个不稳定因素。他们记录了气体流动性与渗透率之间有趣的关系。当渗透率增到 $12\mu\text{m}^2$ 时，气体流动性迅速下降，跟着是气体流动性对绝对渗透率无反应区域。进一步增大渗透率，气体流动性迅速增加。

Maini 研究了残余油对泡沫的流动性控制性能的影响，他承认存在一种表面活性剂与油相配伍，使得泡沫能有效地控制流动性。他还得到结论，为使注水后的残余油流动，无需使用泡沫来降低流动性。

Nicolov 等人研究了原油和纯烃存在时的泡沫稳定性。他们认为在存在油的情况下，泡沫的分离是个更为复杂的过程，而非“油滴扩散到泡沫膜面上，乳化了的油滴又从泡沫膜层游移 Plateau 边界（在那里准乳化膜的 Marangoni 效应、准乳化膜的张力、油滴大小和数目都将影响到泡沫结构的不稳定性）”。他们做了在压力和体积流速为定值时的驱替实验，得到了基本相同的采收率，并在气体突破之前，测得一个流速为定值时的最大压降。

Huh 和 Handy 分别用稳定状态法和不稳定状态法测得泡沫剂溶液-氮气的相对渗透率，他们将这些结果与没有起泡剂时的渗透率做了比较，发现气相的渗透率降低系数主要和膜层稳定性有关，而稳定和不稳定状态的相对渗透率也有明显差别。对不稳定状态流，气体相对

渗透率变化不明显, 表现为不具堵塞作用, 而稳定状态流, 只有气饱和度在 35% ~ 40% 以上时, 液气混流才稳定。他们认为这是由于不断提供泡沫溶液所产生的大量泡沫薄层所致, 并且气体部分相应越大, 封堵效果越好。

Fiedman 和 Jensen 发现没有油存在时, 孔隙介质中的泡沫结构随流速的增加而细化; 有油时, 存在一个油饱和度的最大值, 超过该值时, 泡沫便不能形成。

Isaacs 等人研究了温度上升时, 泡沫在孔隙介质中的流动情况。他们也认为存在一个最佳表面活性剂浓度, 超过该浓度时, 流动性不再降低。有油存在时, 该最佳浓度也有所提高。当表面活性剂与不可冷凝气体一起注入时, 他们获得了最高的原油采收率。

二、实验仪器和步骤

在进行该项研究时, 我们分别在均质岩心和有底水层岩心做了一系列驱替实验。将玻璃屑在湿状态下填充压实, 摇动岩心, 没有渣子掉落。这大概是由于玻璃屑大小均匀, 不像砂石。一旦将岩心填充好, 彻夜让空气通过填砂岩心以保证岩心干燥。将岩心减压成真空, 使蒸馏水浸透岩心。然后将岩心与泵相联, 将蒸馏水泵出。根据物理平衡, 计算该岩心孔隙体积。在岩心入口处用传感器记录压力。当压力稳定时, 记录压力用以计算绝对渗透率。这时注入油以建立残余水饱和度。注油时流速要高于预计的注水流速, 以防注水期间残留水流出。在注油时, 岩心应垂直放置, 油从顶部注入以保证驱替稳定性最佳 (对活塞式驱替来说的最佳位置)。当以适当的流度比 (≤ 1) 注油时, 油缓慢溢出, 并有极少的水分流。继续注油, 直到含水量低于总流量的 1%, 用了 1.2PV 才满足此条件。这时, 假定已达到残余水饱和度 S_{wr} 。岩心的填充工艺一直用作松散岩心的标准 (填充法), 用此法可获得可重复的结果。填充工艺的详细情况在其它地方有记载, 一旦岩心注过油后, 打开并将上部帽拿掉, 除掉顶部, 直至油层厚度达到所需数值。同时, 准备好一个用玻璃屑 (据所需筛网尺寸) 填充压实的湿润介质, 计算绝对渗透率。将这个水湿填充层放到岩心注油层的顶部。由于玻璃屑尺寸规格, 易于压实, 因此该附加层可假定具有与先前填充的玻璃屑一样的绝对渗透率。在此过程中, 流体没有重新分布, 因为油层仅含残余饱和度。加放底水层并轴向旋转岩心仅耗时几分钟, 这段时间不足以使油向水层排放。

三、化学用品

实验中用了以下物品:

(1) 孔隙介质: 80 ~ 120 目玻璃碎粒, 用于建立束缚水饱和度。200 ~ 240、80 ~ 120 或 20 ~ 30 目的玻璃碎粒, 用于模拟水饱和区。

(2) 油相: 被驱替相使用了三种不同的油:

a. MCT-10: 粘度为 50mPa·s。

b. 矿质润滑油 + 柴油: 矿质润滑油, 柴油 (60% 矿质润滑油 + 40% 柴油)。混合物粘度 7.5mPa·s。

c. Faxam-100: 粘度 200mPa·s。

(3) 水相: 注水全部用蒸馏水。

(4) 表面活性剂: 用它产生泡沫, 根据许多所做的其它实验, 它的性能最好。它含有活

性物 42%，属于磺酸盐基表面活性剂。

四、结果与讨论

做了三项不同的驱替实验。第一项实验是在只有水的情况下；第二项是研究在一均质岩心中不同参数的影响；第三项实验研究了有底水层的岩心中泡沫的堵塞作用。实验结果见表 1-1-1。

表 1-1-1 填砂模型特性和不同实验结果

序 号	模型绝对渗透率 μm^2	K_0/K_b	表面活性剂 浓 度	油粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	H_b/H_0	S_{wi}	泡沫体积 PV	油气比为 7000 时原 油采收率, % IOIP
1	16.0		0.01	50	0.00	10.8	0.04	28
2*	16.2		0.1	0	0.00	10.1	0.07	32
3	15.5		1.0	50	0.00	10.0	0.24	43
4	16.0		2.0	50	0.00	10.2	0.45	50
5	15.7		5.0	50	0.00	10.8	0.44	49
6	16.0		10.0	50	0.00	10.0	0.05	33
7	16.0		0.00	50	0.00	9.6	0.01	25
8**	16.2		2.0	50	0.00	10.1	0.40	43
9*	16.0		2.0	50	0.00	10.8	0.30	41
10	15.6	1.0	1.0	50	0.33	10.2	0.32	46
11	16.2	1.0	4.0	50	0.33	11.1	0.40	57
12	16.0	1.0	10.0	50	0.33	9.8	0.33	50
13	15.6	1.0	4.0	50	0.33	11.1	0.40	57
14	15.9	1.0	4.0	200	0.33	8.8	0.47	23
15	16.2	2.67	4.0	50	0.33	9.8	0.36	40
16	16.0	0.06	4.0	50	0.33	10.1	0.22	30
17	16.0	1.0	4.0	50	1.0	10.0	0.81	47
18	16.0	2.67	1.0	50	1.0	9.6	0.82	46
19	16.0	0.06	4.0	50	1.0	9.9	0.24	15
20	15.7	1.0	4.0	50	0.2	10.3	0.2	64
21**	16.2	1.0	10.0	50	0.33	9.5	0.33	44

注：* 注入压力 = 69kPa；** 注入压力 = 138kPa；+ 注入压力 = 340kPa；+ + 与不含表面活性剂的水驱交替注入

1. 注入顺序

在目前的研究中，用表面活性剂水和氮气交替注入。这项研究的目的在于模拟油田的动态驱替情况。油田从来没有过稳定状态的饱和状况，所以实验室中气/水合注的模拟往往是不正确的。因此既使在孔隙介质泡沫流动的研究中，水气合注有个理论值，在油田也不能得以应用。在油田实验中，通常作法是在固定注入压力下，先注入表面活性剂水，然后是氮气或空气。因此，油田驱替的前沿顺序为油、表面活性剂和氮气。许多学者都批评了由稳定状态模型模拟这种动力特性。动力驱替要求实验室去研究以固定流速注入表面活性剂水，然后再以固定注入压力注入氮气或空气的情况。该注入顺序已在目前的研究中采用。

2. 泡沫的产生

交替（注入）表面活性剂水和氮气产生泡沫。做了一系列初步实验，研究在只有水时各表面活性剂的效果。他们用了一透明的柱状岩心，里面填充玻璃碎粒注入蒸馏水达到初始饱和后，以 50mL/h 的流速注入表面活性剂水 75mL。氮气在 40kPa 固定注入压力下注入。收集出口的液体，监测气体突破的时间。当气体突破时，收集泡沫和液体相以做静态实验。气体

突破时间和液体流速表明泡沫层的存在。它等同于当有表面活性剂的 Δp 大于无表面活性剂的 Δp 时, 就可以推断泡沫层存在。图 1-1-1 为表面活性剂浓度不同时液体和气体的流出量。Raza 就曾经研究过表面活性剂浓度对泡沫的突破及相应的气-液产量的影响。事实表明好像存在一个最优表面活性剂浓度, 使气体流动性下降得最多, 说明泡沫表观粘度在最优表面活性剂浓度时数值最高。表面活性剂浓度非常低时, 不能产生泡沫, 而表面活性剂浓度高时, 表面活性剂的离解作用又使泡沫稳定性下降。同样, 从静态的泡沫稳定性(泡沫厚度为时间的函数)也能得此结论, Islam 和 Farouq Ali 通过几次模拟证明了这个最佳表现粘度将延缓气体的突破。

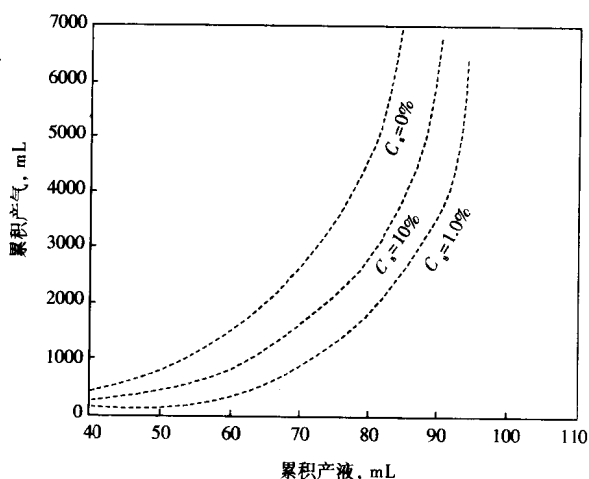


图 1-1-1 水存在下, 气量对液量关系曲线

一种有效的表面活性剂具有最低的气体流动性和低的表面活性剂损耗。气体流动性低还与稳定的泡沫多有关(在静态实验中)。这些是选择表面活性剂的基础。第一回实验是把表面活性剂水注入到一个水饱和的岩心里, 在出口测量表面活性剂浓度。图 1-1-2 显示了出口处表面活性剂浓度与表面活性剂初始浓度比率, 该表面活性剂最终被选作其它驱替实验用。曲线越陡, 表明表面活性剂被吸收和滞留的非常少, 同样, 它的气体流动性也最低。

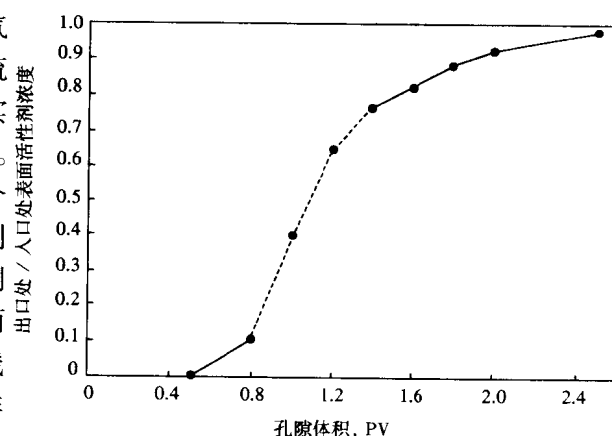


图 1-1-2 出口处表面活性剂浓度

3. 有油存在时均质孔隙介质中的泡沫流动

为研究表面活性剂浓度、体积注入速率对采收率、泡沫突破和泡沫质量的影响, 还做了原地产生的泡沫性能比较实验。

4. 表面活性剂浓度的影响

第 1 到第 6 回实验检验了表面活性剂浓度对原油采收率的影响。所有这些实验, 泡沫都在原地产生, 即氮气和表面活性剂交替注入。首先注入 0.2 孔隙体积 (PV) 的表面活性剂水, 然后注入氮气, 再注入表面活性剂水。由图 1-1-3 可见, 表面活性剂浓度低时, 最终原油采收率接近于氮气注入时的采收率(第 7 回实验的 OOIP 采收率为 25%)。值得注意的是最终采收率是气-液比达 7000 时的采收率。为了对不同实验进行比较, 我们随机地选定该数值。还应该注意, 就是这些采收率没有一个达到以传统的注水法获得的采收率。据记载, 在同一情况下, 传统注水法可获得 64% 的 OOIP 最终采收率。图 1-1-3 表明最佳表面活性剂

浓度为 1% ~ 8%。对这一区段的表面活性剂浓度，泡沫突破明显延缓。在所有实验期间，同样产生了明显数量的油—水乳状物，该乳状物数量随流出的游离气的增加而增加。由此推断乳化作用由于游离气体在孔隙介质富油区的流动而加强了。流出物的微缩照片表明确定存在乳状物层。泡沫突破后，气液比和泡沫的质量迅速提高，同时，采出的原油也极少。当泡沫质量提高时，加注了表面活性剂水，同时加入氮气，通过新产生的泡沫提高原油产出，但额外采收的原油数量不明显。在这些实验中，氮气注入压力固定在 69kPa。最终用泡沫产生的最终原油采收率是只用氮气时的两倍。

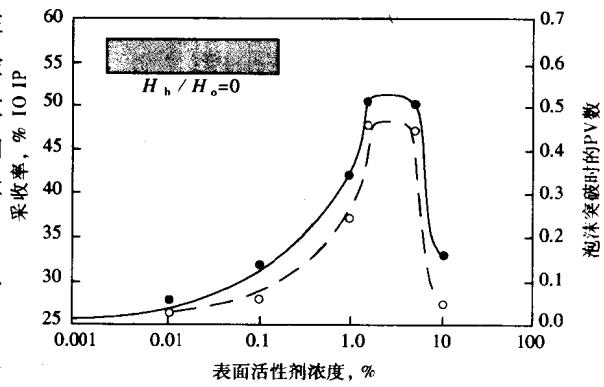


图 1-1-3 表面活性剂浓度对采收率曲线 (均质岩心)

5. 注入压力的影响

图 1-1-4 是第 4、8 和 9 回实验的最终石油采收率的比较图。这些实验中，表面活性剂浓度均为 2%，但注气压力不同。该图表明使用的 Δp 对最终采收率影响很大，同样对突破时采收率影响也很大。 Δp 值高时，产生了明显数量的油—水乳状物。这可能就是 Δp 值高时原油采收率低的原因之一。注入压力对原油采收率的影响关系与先前 Marsden 和 Khan 研究的结果是一致的。无论何种原因，依赖于注入压力 (或者气体注入的体积速度) 的情况，使用简单的一套相对渗透率曲线说明孔隙介质中模拟泡沫流动变得非常困难。

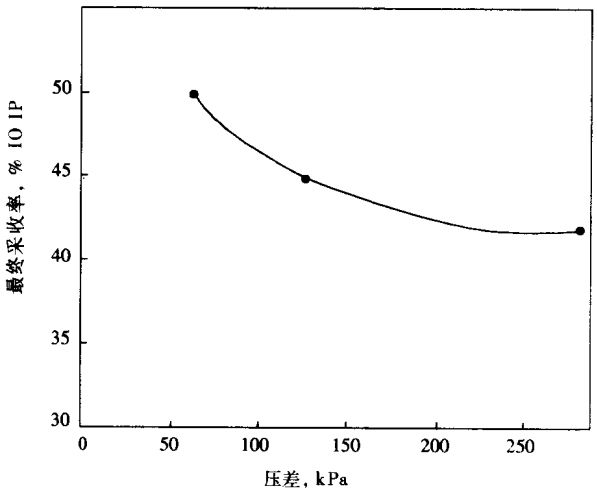


图 1-1-4 注入压力对采收率的影响 (均质岩心)

另外，还观察到驱替实验的后期，在出口有四种不同的相流出：含水相、油相、泡沫和游离气体。乳状物的出现使整个过程更为复杂。这种复杂的流动现象需要对油存在的流动机理做进一步研究。

6. 有底水层时的泡沫流动

第 10 ~ 21 次实验研究了表面活性剂浓度、油—水层厚比、油—水粘度比、油—水层绝对渗透率比等因素的影响。

7. 表面活性剂浓度的影响

第 10 ~ 12 次实验研究了表面活性剂浓度的影响。三个实验的表面活性剂的浓度分别为 1%，4%，10%。三个实验都往油层中加了薄的底水层 ($H_b/H_o = 0.33$)。同样，底水层与油层的渗透率相同。图 1-1-5 比较了这些实验的原油采收率，以及以前曾记载过的只用蒸馏水驱和空气交替注入的实验。正如图中所示，表面活性剂确实提高了采收率。然而，与在均质

岩心中观察的结果不同,最大原油采收率是在表面活性剂浓度为4%时获得的。估计这是注入的表面活性剂水接触到底水被稀释的结果。但是,由于该混合物的确切特性不清楚,因此不能从一个均质岩心中获得的数据就预先推定其最佳表面活性剂浓度。第10~12次实验的比较结果是,在进行以后的有底水层实验时,选择4%的表面活性剂浓度。

8. 粘度比的影响

第11、13、14次实验研究了在底水层岩心中,油—水粘度比对泡沫性能的影响。

这三次实验的油—水粘度比分别为50, 7.5, 200。对于均匀孔隙介质,如果其它的液体物性(如油/水界面张力等)相近,则油粘度越低,最终原油采收率往往就越高。但对于有底水层而言,就不能假定有上述性能,有底水层时使用泡沫期间发生的不同的现象就说明了这点。油—水粘度比值高对用水驱油很不利,但对于有底水层时的泡沫注入,油—水粘度比值高则有利于泡沫侵入底水层,使底水层的水和注入水的流动性降低,因此油—水粘度比在采油中起了双向作用。图1-1-6比较了这些实验的原油采收率曲线,同样,该图比较了油—水粘度比不同时的最终原油采收率。

从图可见,第13次实验原油采收率最高($\mu_o/\mu_w = 7.5$),估计这次实验的流动比最合适。而第11次实验($\mu_o/\mu_w = 50$)的采收率非常接近第13次实验的,这表明泡沫的有效性是可逆的。事实上,对于传统注水法实验,7.5mPa·s和50mPa·s粘度的原油,其采收率截然不同。第14次实验尽管比第11回实验的采收率低得多,但要记住,由于原油粘度非常高,即使第14次实验只采收了原有原油的极少一部分,但采用泡沫法仍便高粘度的原油采收率比注水或注气法提高了至少10倍。事实上,比较有底水层岩

心不同原油粘度的泡沫性能,会发现随着原油粘度的提高,泡沫法(比注水或注气)的加强效果就越好。实验中还观察到随着原油粘度增加,产生的乳状物体积减小。这种现象可能就解释了为什么油粘度越高,其相对性能就越好,乳状物存在不利于油的总产量,因为组成乳状物层的油不算计入(油的产量),乳状物的特性决定了其要从水相中分离出油相很困难,除此以外,低粘度油的泡沫质量也低。低质量泡沫相对高质量泡沫的泡沫尺寸较小。在有底水层的情况下,大泡沫对气体流动阻力较大,这种阻力在底水层上表现得更为明显,这是因为泡沫流动的阻力最小,使大多数泡沫都潜入了该底水区。

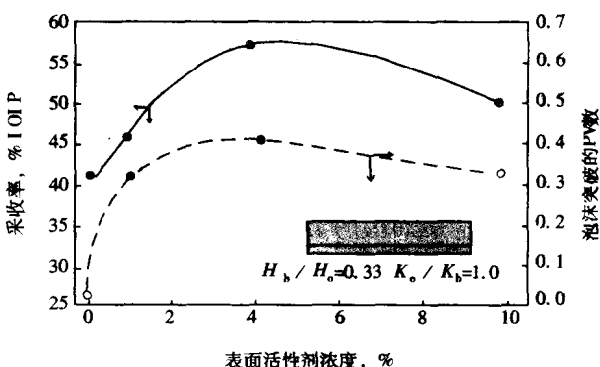


图 1-1-5 表面活性剂对采收率的影响
(在底部含水带呈现时)

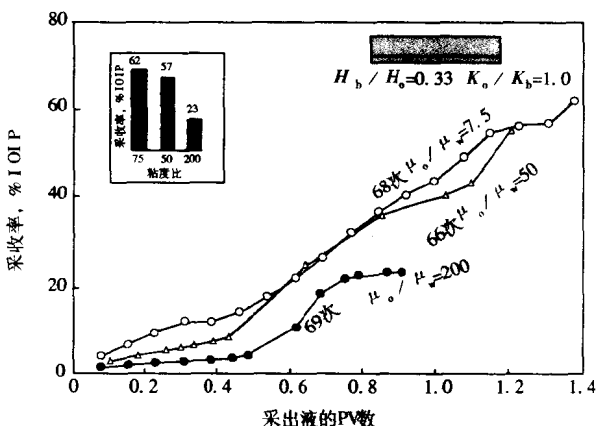


图 1-1-6 油水比对采收率的影响
(在底部含水带呈现时)

9. 底水层渗透率的影响

第 11、15 和 16 次实验研究了底水层渗透率对注入泡沫性能的影响。三个实验的底水层渗透率分别为 16.6 和 $270\mu\text{m}^2$ ，油—水层厚度比均为 3。图 1-1-7 是三个实验的采收率比较图。由图可见，存在着最佳的油—水区渗透率比，更为重要的是，油—水区渗透率比率最大并不代表着最终原油采收率最好。在有底水层的同一系统中，发生了两种不同现象。当底水区渗透率增加时，该系统通入底水区的窜流增加，进而原油采收率下降。但绝对渗透率对泡沫的阻塞作用却有不同的影响。曾有

记载，当绝对渗透率高时，泡沫的阻塞作用增强。近期却发现，存在一个优化值 ($12\mu\text{m}^2$)，此时气体流动性最低。这次研究也观察到类似现象。有些学者试图以泡沫的剪切特性来解释。在本次研究中，发现均质岩心的 Δp 值增加时，泡沫尺寸和表观粘度下降，导致最终原油采收率下降。先前也有一些研究人员观察到此现象。低渗透率等价于固定注入速率时的高 Δp ，或等价于固定注入压力时的低体积注入速度。本次研究做了氮气的固定压力注入。因此，当底水区渗透率降低时，对底水层的体积注入速度下降，如果泡沫事实上属于准粘滞性质，则低的剪切力会产生高的泡沫粘度，进而在有底水层的岩心中，随着底水层渗透率的下降，流入底水区的泡沫减少，使氮气注入初期的低渗透率底水区的原油采收率高于高渗透率底水区的石油采收率。继续注入氮气，由于只有少量泡沫穿过底水层，泡沫质量和泡沫尺寸增加了对底水层的气体流动的阻力减少了，注入的氮气首先地穿过底水层使最终原油采收率低于底水渗透率高时的原油采收率，对于高渗透的底水层而言，泡沫的尺寸可能太小，不足以产生堵塞作用。然而，泡沫成群地聚在一起时，会产生足够的阻塞能力，使原油采收率比传统注水法成倍提高。在这种情况下，传统注水法的石油采收率是为 70%。

通常，绝对渗透率的变化会引起一些变化，但仅从表观粘度的角度很难解释清楚：例如类比试管来说，渗透率高相当于试管的半径较大。因此，高渗透率应该致使表观粘度高，但这与其它一些观察结果相矛盾，其它观察结果表明，由于绝对渗透率低，低的速率会导致剪切力降低，进而应导致表观粘度提高。因此从流动性（有效气体渗透率与气体表观粘度的比率）的角度考虑泡沫的阻塞机理比单独从表观粘度角度考虑要更合适。应该注意的是，在某些情况下，有效气体渗透率和气体表观粘度并非同向变化，二者间的平衡就确定了有效的流动性比。

10. 水—油层厚度比的影响

第 17~19 回实验的水—油层厚度比为 1，因此可以与第 11、15、16 和 20 回实验进行底水层厚度影响的比较，厚度比分别为 1.0、2.67 和 0.06。这些实验的最终采收率比较见图 1-1-8。为便于比较，还把第 4 次实验（无底水层）包括进来。由图可见，更致密底水层的特性反常。当 $K_o/K_b = 2.67$ 时，最终采收率随底水层厚度增长缓慢上升。当 $K_o/K_b = 1.67$ 时，

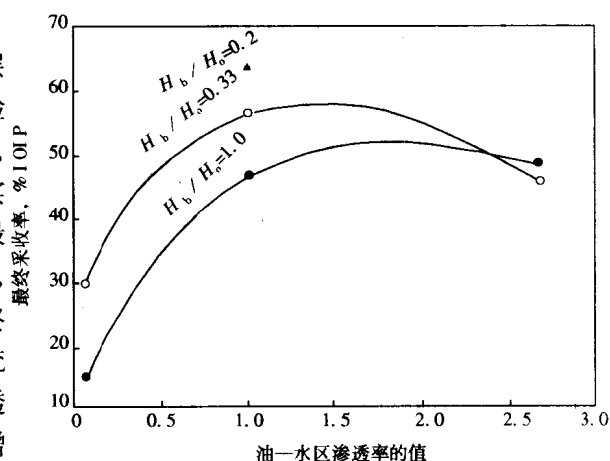


图 1-1-7 油—水区渗透率比对采收率的影响

均质岩心采收率最低。对于有底水层情况, $H_b/H_o = 0.2$ 时, 性能最佳。采收率随 H_b/H_o 值增大而逐渐下降。当 $K_o/K_b = 0.06$ 时, 采收率对水—油层厚度比最为敏感。从体积流量的角度讲, 底水层厚度增长相当于渗透率增长, 这导致泡沫表观粘度的下降。进而, 初期形成的泡沫流入底水层, 对接着的氮气流进入底水层产生堵塞作用。结果, 原油层被优先驱替, 原油采收率提高。

图 1-1-9 比较了泡沫注入法与注水法的增长百分率。由图可见, H_b/H_o 值为 1.0 的岩心最终原油采收率高于均匀介质岩心

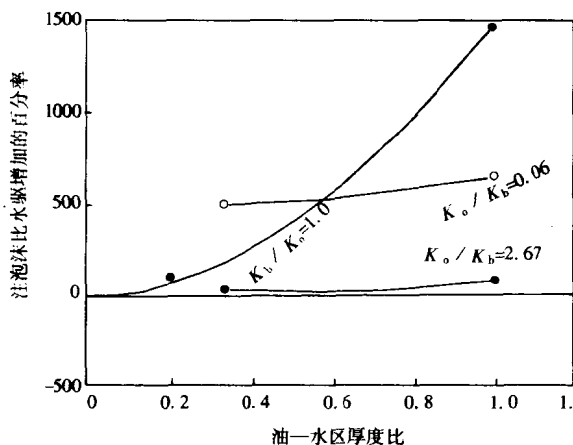


图 1-1-9 不同油—水区厚度比和
比水驱增加的百分率关系

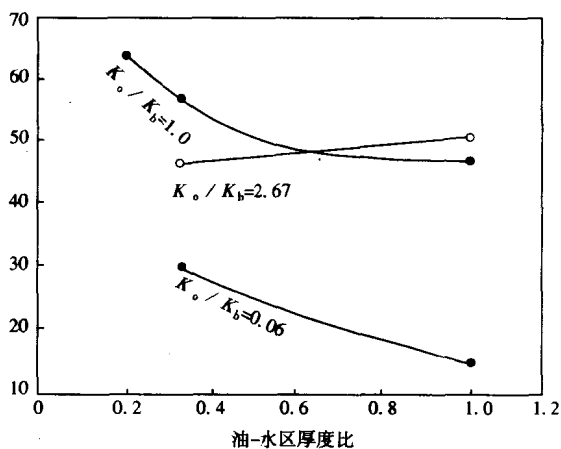


图 1-1-8 油—水区厚度比对采收率的影响

的采收率。正如前面所述, 对于均质岩心, 泡沫注入法不分最佳采收工艺, 但有底水层时泡沫的堵塞效果更好, 因为底水起了流动性控制泡沫的载体作用。这个情况在均质岩心中是不存在的。

11. 注水对泡沫的影响

第 21 次实验用于研究注水对底水层泡沫堵塞机理的影响, 并与第 12 次实验做了比较。第 12 次实验的表面活性剂浓度相同, 没有进行水和泡沫的交替注入。两次实验 K_o/K_b 均为 1, H_b/H_o 均为 0.33。第 21 次实验在注水期间没有产生泡沫, 表明可能被水“冲洗掉”了。Holm 也曾记载过这种情况。注水以后又开始注气直到产生 1.16PV

的液体。注入氮气期间, 即使产生了大量泡沫, 水油比也一直很高 (可能是因为即使被原生水 and 注入水稀释, 也有足够的表面活性剂产生泡沫)。氮气注入后, 再次注入 0.5 油层孔隙体积的表面活性剂溶液, 接着再注入氮气, 水油比明显下降时, 气—液比开始迅速上升。当气—液比达 7000 时, 驱替实验结束, 总采收率为 44% OOIP。注气后再注水的方法看来对采收率没有任何积极影响。这次实验结束时, 采收率为 50% OOIP, 该值显然高于前次实验的 44%。这两次实验的唯一区别在于第 21 次实验在注气之后又注水。这也表明泡沫对气体产生的阻塞作用比对注水产生的阻塞作用要强。Holm 也曾得到类似结果, 他观察到若使用气而不是水, 则堵塞效果更好。

五、泡沫的流动性控制机理

图 1-1-10 为注水、无表面活性剂水注气和有表面活性剂水注气的相对份额。比较结果以

H_b/H_o 值为 0.33 和 K_o/K_b 值为 1 的

实验为依据。由图可见,由泡沫注入法采收的原油的主要一部分还是由空气自己采收的,但是空气不能在底水层产生持久阻塞,如果持续注气后不进行交替注入水,原油采收率将降低。表面活性剂溶液的注入生成泡沫产生了对层中后来气流的阻力而加强了堵塞作用。结果表明,注气法的最终采收率高于仅注水法的最终采收率。只有在高渗透性通路存在(例如底水层)时,才会有类似结果。

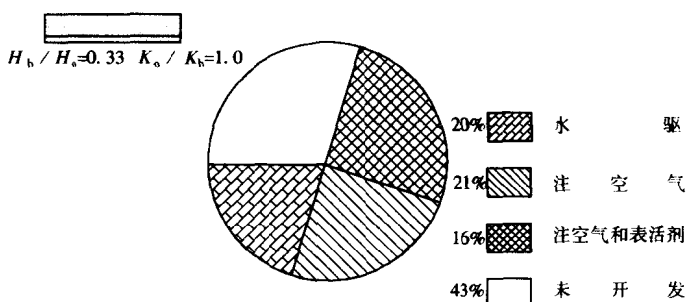


图 1-1-10 在底部水驱存在时,氮气和泡沫驱对采收率贡献百分比

六、结论

现有的多孔介质中泡沫流动原理已被评论,对均匀和非均匀(包含底水层)孔隙层的泡沫流动做了实验研究。基于这些实验研究,可得到下列结论:

(1) 泡沫在油和水存在时产生。有油存在时,泡沫流体产生一定数量的乳状物,其数量随注入压力和泡沫质量的上升而增多。

(2) 在仅含水、均匀多孔介质中含油和有底水多孔介质中含油这三种情况中,都存在着最佳表面活性剂浓度。有底水层时该浓度值最高。在某些情况下,底水层的存在有利于用泡沫提高采收率。

(3) 注入压力在泡沫特性中起了重要作用,随着注入压力的增高,最终采收率下降。

(4) 当油-水粘度比增大时,最终原油采收率下降。但有底水层时,随着粘度比的增长,泡沫法得到的原油采收率却相对提高了。进而泡沫在不利的环境中更为有利。

(5) 油-水层绝对渗透率比和厚度比对泡沫提高原油采收率起了关键作用。当 K_o/K_b 约为 2。油层比底水层厚 5 倍时,泡沫效果最佳。

(6) 无表面活性剂的注水会“冲走”泡沫,明显破坏了泡沫的原油采收率。

本节符号说明

H_o ——油层厚度;

H_b ——底水层厚度;

K_o ——油层绝对渗透率;

K_b ——底水层绝对渗透率;

Δp ——压降;

S_{wi} ——残余水饱和度;

μ_o ——油粘度;

μ_w ——水粘度。

PV ——油层孔隙体积;

WOR ——水—油比;

OOIP ——原始地质储量;

第二节 在玻璃球充填介质内 泡沫的产生机理

蒸汽驱是一种常见的热采技术，它用来开发因较稠而不能用常规水驱技术开发的油田，和蒸汽驱非常紧密的两个问题是重力超覆和粘性指进，发生重力超覆是因为蒸气要比它所驱替的油的密度要小，从而使蒸汽超越油墙。发生粘性指进是因为蒸汽的粘度比它驱替的油的粘度小，从而形成通道或舌进，因此，蒸汽可绕过油带。

Fried 建议这些流度问题可以通过注蒸汽泡沫的形式得到改善，现场试验已经证明泡沫能明显地增加蒸汽驱的效率，泡沫也可在 CO_2 驱中做为普通的流度控制液。

为了消除泡沫的概念上的混乱。我们定义多孔介质中的泡沫是气体分散在含有薄膜的连续液体中的体系，这个定义和以前 Falls 等人所给的定义是相同的，定义中的关键点是气体可能以连续的或非连续的形式存在，而泡沫不是“大块”泡沫，换句话说，气泡的大小和孔道一样的数量级，结果，气泡和孔壁的相互作用制约着在多孔介质中的泡沫的流态。

泡沫做为驱替液的好坏部分是由它被注入多孔介质时的表观粘度决定的，泡沫会增大气流的阻力也就减小了重力超覆的速率从而改善流度比。因而也减少了指进的趋向。Hirasaki 和 Lawson 的认为泡沫在多孔介质中的特性和表观粘度很大程度上取决于它的结构（如气泡大小及分布），而泡沫的结构又受到泡沫产生方式的强烈影响。因此，在预测泡沫驱的效率时对泡沫产生阶段的认识是非常重要的。

泡沫驱是一个包含压降、驱替效率等参数变化的驱油过程的极好例子，而这些宏观特性取决于目前还未被完全理解的微观或孔隙级的各种现象。如气泡的形成和液膜的破裂等。正是因为这些原因，我们试图研究泡沫在不同孔隙大小的介质中产生的机理和所涉及的物理过程，首先来探讨泡沫在玻璃球充填介质中产生的机理，然后来研究珠子的大小、气体的流速和表面活性剂的类型对泡沫产生过程的定量的影响。

一、实验方法

我们共进行两种普通类型的试验。第一部分是观察试验，16mm 胶片记录的泡沫在玻璃球上产生的基本机理，第二部分是在各种参数条件下的试验，气体流速和分流、珠的大小和表面活性剂的类型对泡沫产生机理的影响主要通过这部分试验来确定，这种试验可以被进一步分为定量和定性，定量试验的结果用来验证缩颈分离开始时的临界速度理论；定性的试验结果可用来观察泡沫产生过程。

所有的试验都是在透明的有机玻璃球充填的具有长方形截面的玻璃管中进行的。如图 1-2-1，充填空间的尺寸是 $6\text{mm} \times 25\text{mm} \times 165\text{mm}$ ，管束的高度 $h = 6\text{mm}$ 是用玻璃球以 1mm 或更小的间隙排列，重力相对毛管力来说比较小，例如，综合比例值 $N = \Delta\rho g R_g h / \sigma$ （远小于 1），液体的入口，气体入口，压力传感器的放置点，和出口装置都连结在管束上，压力传感器测量通过整个管束的气相压降。