

韩 显 卿 编著

提 高 采 收 率 原 理

石 油 工 业 出 版 社

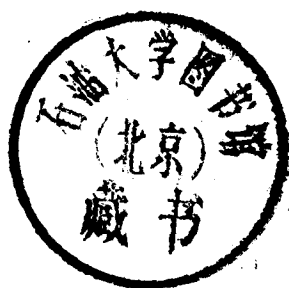
石油工业出版社
(北京)

067637

高等学校教学用书

提高采收率原理

韩显卿 编著



200421711

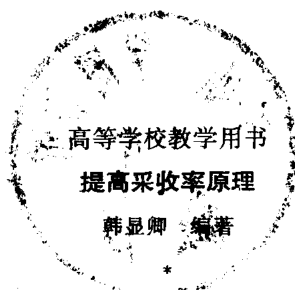


石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书系统论述水驱、聚合物溶液驱、微乳液驱、气体溶剂驱和热驱等提高采收率原理。对各种驱动的排驱机理进行了研究。它适合于油藏工程、采油工程及油田化学专业的教学使用,也可做为科研及矿场工程技术人员的参考书。



中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京科技印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11 3/4 印张 299 千字 印 1—4,000

1993 年 4 月北京第 1 版 1993 年 4 月北京第 1 次印刷

· ISBN 7-5021-0767-3 / TE · 723(课)

定价: 3.05 元

前 言

随着我国老油田原油含水量不断上升,有的已接近经济极限,采用各种方法提高采收率的工作愈来愈重要。作为石油院校,如何使有关专业的教学内容适应我国石油工业所面临的这一新任务是迫切考虑的问题。本书是我国第一本系统论述提高采收率原理的教科书,它是在十年的教学实践的基础上,经过五次修改补充后完成的。1981年第一次编写此教材,是作为西南石油学院油田化学专业的专业教材,当时的名称为《三次采油原理》,只包括聚合物溶液驱、表面活性剂溶液驱和气体混相驱三章。以后补充了水驱油机理一章。1986年第四次修改后,改名为《提高采收率原理》,同时在西南石油学院为油田化学、油藏工程和采油工程三个专业开课。这次修改由彭克淙教授补写了“热力采油”一章,使它成为一本内容较全面的提高采收率的教材。

本书在编写过程中考虑到了矿场工程技术人员自学需要,语言力求通俗易懂。所以,它不仅可作为石油院校的教学用书,同时也可作为矿场工程技术人员的参考书。

本书由秦同洛教授主审,在编写过程中得到秦教授的指导和帮助,在此表示感谢。

编者

1990年7月

目 录

绪 言	(1)
第一章 水驱油机理	(4)
第一节 微观水驱油机理	(4)
第二节 毛管数对残余油饱和度的影响	(12)
第三节 水驱油效率	(14)
第四节 宏观水驱油机理	(17)
第五节 水驱油采收率	(24)
第二章 聚合物溶液驱油	(32)
第一节 聚合物及其水溶液性质	(32)
第二节 聚合物溶液的流变性	(37)
第三节 聚合物溶液在孔隙介质中的流变性	(42)
第四节 聚合物溶液在孔隙介质中的流动特性	(45)
第五节 聚合物溶液驱油	(54)
第六节 调整吸水剖面	(65)
第三章 微乳液驱油	(74)
第一节 微乳液特性	(75)
第二节 微乳液驱油机理	(85)
第三节 微乳液驱油的采收率	(95)
第四节 微乳液驱油设计	(98)
第四章 气体混相驱油	(103)
第一节 CO_2 -原油的性质	(103)
第二节 混相气体驱油机理	(108)
第三节 最低混相压力	(115)
第四节 CO_2 驱油的采收率	(120)
第五章 热力采油	(131)
第一节 提高稠油采收率途径的探讨	(131)
第二节 蒸汽	(135)
第三节 注蒸汽过程中的热损失	(139)
第四节 油层加热	(149)
第五节 蒸汽驱	(157)
第六节 循环注蒸汽	(165)
第七节 火烧油层法简介	(168)
附录一 韦尔杰方程推导	(173)
附录二 巴克利和莱弗里特公式推导	(175)
附录三 非活塞驱压差、阻力与流速关系式	(178)
附录四 误差函数表	(180)
附录五 常用单位换算表	(182)

绪 言

在油田开采史上,依靠油层自身能量采油的方法曾经历了相当长的时期。在该时期,主要依靠油中溶解的天然气膨胀而将油举升到地面,当溶解气耗尽时,油便失去流动能力。此种采油法称为能量衰竭法采油,采收率一般只能达到 15% 左右。直到一百多年前,从一口生产井的封隔器漏失事故中,人们才发现了注水采油这一方法。那次事故起因于上部高压水层的水通过漏失的封隔器进入油层,使该井停止生产,但其周围的井产油量却上升了。由此,总结出了人工注水采油法,从而结束了仅依靠地层原有能量采油的古老方法。

人工注水采油法,是在油层原有能量衰竭后,在油藏边缘或油藏内部打若干注水井,从地面向井内注水,从生产井采油的一种开采方法。注水的作用是补充油层的驱油能量,水作为油的排驱剂,它将油排走而占据油原来占据的孔隙空间。因此,注水后油层含油饱和度下降,而含水饱和度上升。

自从有了人工注水采油后,便将能量衰竭法采油称为一次采油,注水称为二次采油。在我国,自大庆油田投入开发以来,几乎所有新油田都在投入开发的同时便进行人工注水,称为先期注水。因此,没有明确的一次和二次采油之分。

注水采收率远比能量衰竭法高,它通常为 30~40%,个别油田可达 80%。由于水的来源广,价格便宜,采收率又高,所以,美国的油田自四十年代初便迅速发展起了注水采油。自 50 年代至 60 年代,注水开发的工程项目数达到了顶峰。但到 60 年代后期,注水开发工程项目一直在下降。原因是一些注水油田已进入开发后期,这时产水率持续上升,产油量却不断下降。当产水率增高到 95~98% 时,继续注水是不经济的,这时将被迫停止注水。

人工注水固然可以提高采收率,但注水后几乎尚有一半以上的油留在油层中,如何采出这些二次残余油(也称水驱残余油)是油藏工程师面临的问题。技术的发展使从 20 年代起,开采二次残余油便成为可能。这一开采技术主要是通过向油层注入化学剂或气体溶剂,对油层进行第三次开采,称为三次采油(Tertiary Oil Recovery)。但是,对于一些特殊油藏不宜注水,如稠油、轻质油以及低渗透性油层,提高这类油层的采收率,可以通过热采(稠油)或注气(轻质油和/或低渗透油藏)。另外,一些注水油藏,从提高采收率考虑,在注水中期便开始改注聚合物水。因此,现在人们一般采用提高采收率或强化采油(enhanced oil recovery——EOR)这一专有名词,它包括注水和其它提高采收率的方法。我国采用的油田开发技术除玉门外,都没有明确的一次采油和二次采油之分,故对我国油田使用提高采收率这一名词是更恰当的。本教材在特定情况下,若采用三次采油这一专有名词,是指油藏注水达经济极限后采用的提高采收率的措施。

EOR 技术以美国发展最快,这与美国对石油的需求量大,而近几十年新发现的油田又越来越少是有关系的。为了鼓励发展 EOR 技术,美国曾实施了一些优惠政策。特别是在原油价格暴涨的 70 年代,美国能源部对国家研究机构和有关大学给予 EOR 研究的经济支持,对石油公司则实行矿场 EOR 试验的成本分担。这些政策有力地促进了 EOR 技术的发展。但到 1981 年后,上述政策终断,新的政策有利于采用投资少(但提高采收率收效也低)的 EOR 工程项目,这促使一些石油公司停止了投资大(但提高采收率高)的 EOR 试验,这是 80 年代后美国 EOR 技术发展较缓慢的原因。特别是 80 年代中期以后,国际市场

原油价格暴跌，美国政府认为可以从中东获得稳定供应的低价原油，对 EOR 研究的经济支持减少，EOR 的发展受到较大冲击。

苏联油田在 50 至 60 年代处于注水鼎盛时期，其它的 EOR 技术几乎没有发展，直到 80 年代，苏联才开始重视发展除注水之外的其它 EOR 技术。相应地，苏联石油部成立了提高采收率司，EOR 技术从此有了较大发展。

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 水驱、聚合物水驱、 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，如辽河进行了蒸汽吞吐的室内和矿场试验，华北油田进行了注氮气的室内试验、玉门进行了微乳液驱室内试验，胜利进行了注聚合物室内试验，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。

提高采收率技术的发展经历了几十年，早在 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 年代初期提出来的。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。同时，在气体混相驱方面，由注昂贵的液化石油气 (liquid petroleum gas—LPG) 一次接触混相驱发展为 CO_2 多级接触混相驱。在热力采油方面，30 年代美国提出了火烧油层，40 年代又提出了注热蒸汽。迄今为止，热力采油已成为提高采收率诸方法中唯一获得工业应用的方法，除此之外，聚合物水驱已日趋成熟，在矿场应用也较多。但是，普遍认为最有效的方法是微乳液低张力驱与气体混相驱，若它们再与流度控制相结合，将对提高采收率产生极大影响。但微乳液驱油机理尚未研究成熟，化学剂的价格太高，尚未获得广泛的矿场应用。另一种提高排驱液粘度的方法是注泡沫液，此方法尚处于实验室研究阶段。

除注水之外，EOR 技术已发展了很多项目，归纳起来可分为三大类：

(1) 化学驱，以聚合物驱和微乳液低张力驱为代表。除此之外，泡沫驱、碱水驱、活性水驱、胶束溶液驱都属化学驱；

(2) 气体溶剂驱，以 CO_2 多级接触混相驱为代表。除此之外，尚有富气、干气、液化石油气、氮气和烟道气等气体溶剂驱；

(3) 热驱，它包括注热蒸汽、蒸汽吞吐和火烧油层等技术。

应当注意，没有一种可适用于任何油层的 EOR 方法，同样，没有任何一个油层对任何一种提高采收率的方法都适用。当决定对某油层施以 EOR 技术时，必须选择适合该油层特性的 EOR 方法。确定了采用的 EOR 方法后，尚需进行室内试验，目的是筛选工程参数，然后结合数值模拟，最后确定施工的工程参数。

在 EOR 技术中，除注水外，其它技术都存在投资大、风险大的特点。因此，矿场大规模应用之前一般都先进行小型生产试验，它可以进一步暴露室内岩心试验中未曾暴露的问题。对于油层条件复杂，地质情况和开发动态掌握不够清楚的油藏，小型生产试验是必不可少的。往往矿场应用失败不是由于 EOR 技术本身，而是油藏描述未能反应真实的地质和开发动态。

EOR 技术的特点是向油层注入排驱剂来采油的，不同的排驱剂有不同的排驱机理。如

热驱，不是向油层注入热蒸汽就是注空气使地下油燃烧，依靠燃烧加热油层，使稠油能流动。而化学驱则是向油层注入化学剂，它们可能是用来提高排驱水的粘度，也可能用来降低多相流动的相界面张力。而气体溶剂驱则是通过注入的气体与地下原油混相，达到消除界面张力来驱油的。因此，EOR 技术的发展取决于对排驱剂和排驱机理的研究。以 70 年代发展起来的微乳液超低界面张力驱为例，它实际上是在对水驱油机理进行研究的基础上发展起来的。由于水驱油总是存在油水界面张力，致使水不能完全排驱它接触的油。为此，以降低界面张力为目的。曾研究过活性水驱。但界面张力降低有限，且活性剂吸附损失大，此法未得到矿场应用，它被 60 年代提出的胶束溶液所代替。胶束溶液具有两亲性质，可以消除与油和水的界面张力，而且胶束溶液的活性剂吸附损失较活性水低，是一种良好的排驱剂。但它的活性剂用量大、成本高，矿场很难采用。在对它的相态性质和排驱机理进行研究的基础上，进一步提出了微乳液驱油。微乳液的活性剂用量比胶束少，它虽不能消除与油或水的界面张力，但可达到 10^{-3}mN/m 以下的超低值，对其排驱机理研究后认为，在达到超低张力条件下，采收率接近胶束混相驱的采收率。现在，超低张力驱已成为一种最有效的提高采收率而费用相对胶束混相驱小的 EOR 技术。又如 CO_2 混相驱，也是在研究了 CO_2 与原油之间的相态性质和 CO_2 排驱机理后发展起来的。 CO_2 与原油不能一次接触混相，所以在气体混相驱中最初并无 CO_2 的地位。但是，当研究了 CO_2 对原油的多级抽提性质和 CO_2 在孔隙介质中的驱油机理后，发现 CO_2 多级抽提原油的过程与 CO_2 在孔隙介质中驱油的过程是如此相似，于是提出了 CO_2 多级接触混相驱，最近提出的复合体系（聚合物-碱；聚合物-碱-活性剂）驱油，更是利用已有的化学驱油剂复配后，在油层产生协同效应驱油。可见，任何一种 EOR 技术的发展都是在对排驱机理和排驱剂共同研究的基础上发展起来的。

EOR 技术是一门多学科的综合性很强的应用技术，它涉及的学科或知识面很广。根据不同的排驱类型，要求不同学科之间的合作。但无论那一种排驱类型，都涉及油藏描述、油层物理、渗流力学、数值模拟等学科或知识。对于化学驱类型，则还需要有高分子化学、高分子物理、表面化学等知识；对于气体溶剂驱则需要物理化学、有机化学等知识；对于热驱，则需要传热学、工程热力学等知识。

本教材的目的在于给予油藏工程、油田化学、采油工程及石油地质等专业的学生以基本的 EOR 概念，为今后从事 EOR 矿场应用或研究打下基础。

本教材的任务是研究目前正在广泛进行试验或已推广应用的聚合物溶液驱、微乳液驱、气体溶剂驱和热驱等 EOR 技术的排驱机理，也即研究或揭示在排驱过程中出现的各种现象的本质以及它们与采收率的关系。因为不同的排驱剂有不同的排驱机理，所以，本教材以排驱剂的驱油机理来分章。第一章水驱油机理，是以认识水驱油过程、二次残余油的形成和滞留机理为目的，它为以后各章讨论的提高采收率的方法奠定基础。

第一章 水驱油机理

向油层注水，补充油层能量，同时，水也作为油的排驱剂，将原油向生产井推进，这种排驱过程称为水驱油过程。根据物质平衡原理，如果忽略油层岩石及流体的弹性膨胀，排出油层的原油体积便等于注入油层水的体积。水侵入的油层区域内含油饱和度下降，含水饱和度上升，是油水两相混合流动区。水波及区的油层范围随注水时间延长而扩大，当它扩大到生产井井底时，油井便结束了无水产油期，开始了油水同产期。油井的产水率，它定义为日产水量与日总产液量之比，随注水时间延长而上升，最终达到一经济极限值，继续注水则是不经济的。一般情况下，即便达到如此高的产水率，在水波及区平均二次残余油饱和度仍可高达 50% 以上。除此之外，尚存在大片水未波及的原始油区。这两种残余油的多少，涉及水的微观驱油效率 E_D ，宏观波及系数 E_V 以及井网效率 E_P 。水驱油采收率由下式计算：

$$E = E_P E_V E_D \quad (1-1)$$

本章将分别讨论影响 E_D 、 E_V 和 E_P 的诸因素。

第一节 微观水驱油机理

油水是两种不互溶液体，其界面张力高达 $30 \sim 35 \text{ mN/m}$ 。油层中油水接触处形成一弯液面，存在毛管力，故水驱油属非混相驱。

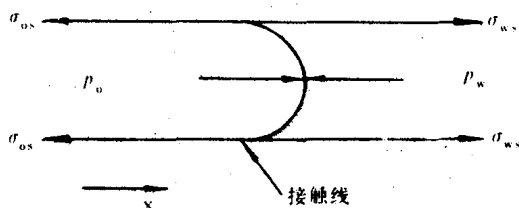


图 1-1 毛管中弯液面上的力平衡

油层是高度分散体系，界面性质对油水流动有着关键影响，特别是毛管力对油的滞留和排驱有着不可忽视的作用。油层岩石是由几何形状和大小都极不一致的矿物颗粒构成的，形成一个复杂的空间网络，矿物颗粒的组成不完全相同，这些因素决定了孔隙介质的微观几何结构和表面性质都是极不均一的。油层性质的非均质性，增加了水驱油的复杂性，直接影响微观水驱油效率 E_D 。

一、单根毛管中水驱油

最简单的流动空间中的水驱油机理是假设水驱油是在亲水毛管中进行的，这时只存在一个与排驱方向相垂直的油水界面，如图 1-1 所示，在平衡时 $\Sigma F = 0$ 。

$$\text{即} \quad p_o(\pi r^2) + \sigma_{ws}(2\pi r) - p_w(\pi r^2) - \sigma_{os}(2\pi r) = 0 \quad (1-2)$$

式中 p_o ——油相压力；

p_w ——水相压力；

r ——毛管半径;
 σ_{ws} ——水-固界面张力;
 σ_{os} ——油-固界面张力。

整理得

$$p_o - p_w = \frac{2(\sigma_{os} - \sigma_{ws})}{r} \quad (1-3)$$

考虑到

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta$$

式中 σ_{ow} ——油-水界面张力;
 θ ——接触角。

故

$$p_o - p_w = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta}{r} \quad (1-4)$$

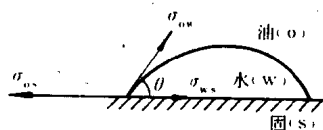
令

$$p_o - p_w = p_c$$

则

$$p_c = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta}{r} \quad (1-5)$$

称 p_c 为毛管力。它是弯液面两边因油相和水相存在压力差, 为了平衡此压力差而产生的一个附加压力, 其方向指向非润湿相, 它与弯液面两边油水相间的压差方向相反。对于亲水毛管, $\theta < 90^\circ$, 根据 (1-4) 式, 必然有 $p_o > p_w$ 。如果能测量出弯液面两边的压力, 将显示出油相压力大于水相压力。若将毛管插入装有油和水的容器中, 可观察到管内油水界面高于管外油水界面, 这是管内弯液面处毛管力作用的结果。若将毛管逐渐斜放直至水平, 如果管壁不存在摩擦力, 在毛管力作用下将自动实现水驱油。反之, 若毛管是亲油的, 毛管力则成为水驱油的阻力, 欲实现水驱油, 需人工建立压差克服毛管力。



亲油毛管表面水驱油后, 管壁上留下一层油膜。若管壁润湿性不均一, 在弱亲油的地方油膜薄, 而在强亲油的地方油膜厚。

最终, 薄油膜破裂, 向厚油膜处收缩形成附着油滴。附着于管壁的油滴能否被水排走, 取决于油-水-固三相交界处的界面张力。稳定状态液滴, 三相交界处的界面张力之间存在以下关系 (见图 1-2):

$$\sigma_{os} = \sigma_{ws} + \sigma_{ow} \cos \theta \quad (1-6)$$

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta \quad (1-7)$$

若 $\sigma_{os} - \sigma_{ws} > 0$, 则 $\sigma_{ow} \cos \theta > 0$ 。因为 σ_{ow} 不可能为负值, 故 $\cos \theta$ 必为正值, 即必须满足 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 。这表明, 固体表面优先亲水, 体系将自发地趋于增加水-固界面而减少油-固界面, 附着油滴趋于呈球形。若 $\sigma_{os} - \sigma_{ws} < 0$, 则 $\sigma_{ow} \cos \theta < 0$, 这时 $90^\circ < \theta < 180^\circ$, 固

体表面亲油，体系自发地趋于增加油-固界面，减少水-固界面，附着油滴趋于呈扁球形。对于不同附着形状的油滴，水排驱它们需要消耗的能量大小不同。排驱油滴所消耗的能量用附着功表示。例如，当油滴附着于固体表面时，存在界面能 σ_{os} ，若水将油滴自固体表面排开，形成两个新的界面，界面能为 σ_{ws} 与 σ_{ow} ，体系界面能的变化即为附着功 W 。

$$\text{即} \quad W = \sigma_{ws} + \sigma_{ow} - \sigma_{os} \quad (1-8)$$

将式(1-7)代入上式，得

$$W = \sigma_{ow}(1 - \cos\theta) \quad (1-9)$$

式(1-9)表示水自固体表面上排开油滴需做的功。由式(1-9)可见。当 σ_{ow} 一定时，在亲水表面 ($\theta < 90^\circ$)，水驱油的附着功小于 σ_{ow} ，而且，随亲水性增加 (θ 变小)，附着功减少。在强亲水条件下，附着功降低为 0，水完全自发地将油滴排开，不需另外做功。在亲油条件下 ($\theta > 90^\circ$)，附着功大于 σ_{ow} ，而且，随亲油性增加 (θ 变大)，附着功增加。只有当岩石表面为中性 ($\theta = 90^\circ$) 时，附着功等于 σ_{ow} 。水驱油时，油层中会形成无数形状不同的附着油滴，实际上不可能利用式(1-9)来计算每一个油滴的附着功，但式(1-9)说明，亲水表面的附着油滴易于脱离表面，随 σ_{ow} 降低，附着功减小。

二、并联毛管中水驱油

油层岩石的孔隙网络，是由无数形状不同通过孔喉互相连通起来的孔隙所构成的空间流动通道。这里讨论构成孔隙网络的最基本的流动单元中水驱油机理，即并联孔隙中水驱油机理，研究油滴形成、排驱和滞留的机理。图 1-3 表示了这一排驱过程。

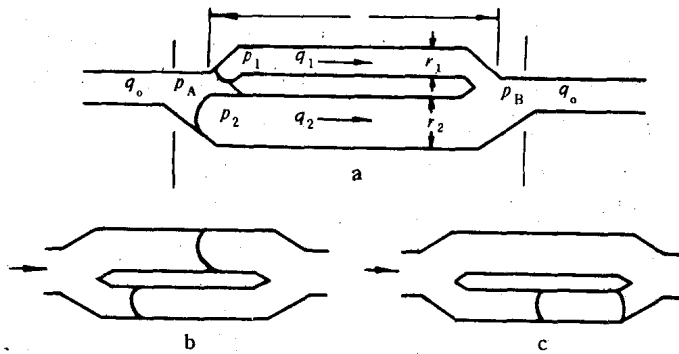


图 1-3 并联毛管中水驱油

1. 不存在毛管力的排驱机理

假设并联毛管长度为 L ，上毛管半径为 r_1 ，下毛管半径为 r_2 ，且 $r_1 < r_2$ ，孔隙中饱和有粘度为 μ_o 的油，粘度为 μ_w 的水自左端注入，A、B 两点间的压差为 $p_A - p_B$ ，考察油滴滞留机理。图 1-3a 表示水刚好到达 A 点，在上下毛管中分别形成两个油水界面。根据单根毛管中两相流公式：

$$v = \frac{r^2(p_A - p_B)}{8[\mu_w x + \mu_o(L - x)]} \quad (1-10)$$

式中 v ——油水界面推进速度;
 L ——A、B 两点间毛管长度;
 x ——油水界面距入口端 A 的距离。

由式 (1-10) 知, 流速与毛管半径平方成正比。考虑到 $\mu_w < \mu_o$, 随油水界面位置 x 增加, 分母变小, 故速度增加。在 $x=0$ 处, 公式 (1-10) 变为

$$v_{x=0} = \frac{r^2(p_A - p_B)}{8\mu_o L} \quad (1-11)$$

此时流速最小, 当 $x=L$ 时, 公式 (1-10) 变为

$$v_{x=L} = \frac{r^2(p_A - p_B)}{8\mu_w L} \quad (1-12)$$

此时流速最大。当 $0 < x < L$ 时, 有 $v_{x=0} < v_{x=x} < v_{x=L}$ 。

将上述关系用于图 1-3 的并联毛管, 并考虑到 $r_1 < r_2$ 。在 $x=0$ 处, 必然有

$v_{x=0} < v_{x=0}$, 其速度差为:

$$v_{x=0} - v_{x=0} = (r_2^2 - r_1^2) \frac{(p_A - p_B)}{8\mu_o L} \quad (1-13)$$

在 $x=L$ 处, 由于半径不同在两毛管中产生的速度差为:

$$v_{x=L} - v_{x=L} = (r_2^2 - r_1^2) \frac{(p_A - p_B)}{8\mu_w L} \quad (1-14)$$

同理, 在任何位置 $x=x$ 处, 由于半径不同在两毛管中产生的速度差为:

$$v_{x=x} - v_{x=x} = (r_2^2 - r_1^2) \frac{(p_A - p_B)}{8[\mu_w x + \mu_o(L-x)]} \quad (1-15)$$

分析以上三个公式可以看出, 在相同位置 x 处, 由于毛管半径不同而引起的速度差, 将随 x 长度增加而增加。

由于在 $x=0$ 处两毛管的速度便不同, 所以, 当油水界面到达 A 点时便产生速度差。经过 Δt 时刻后, 上下毛管中油水界面移动距离分别为 x_1 和 x_2 , 且知 $x_1 < x_2$, 这时两毛管中的速度分别为

$$v_{x=x_1} = \frac{r_1^2(p_A - p_B)}{8[\mu_w x_1 + \mu_o(L - x_1)]} \quad (1-16)$$

$$v_{x=x_2} = \frac{r_2^2(p_A - p_B)}{8[\mu_w x_2 + \mu_o(L - x_2)]} \quad (1-17)$$

对比上两式，因 $r_1 < r_2$ ，以及 $x_1 < x_2$ ，所以 $v_{x=x_1} < v_{x=x_2}$ 。这说明，当油水界面进入并

联毛管的入口端后，在忽略毛管力的条件下，在任何时刻 t ，大毛管中的速度都大于小毛管的速度。这一速度差的产生，起因于在 $x=0$ 处，因毛管半径不同而存在速度差，它导致经过相同时刻后，大毛管中油水界面移动距离大于小毛管油水界面移动的距离。油水界面位置的差别，又进一步助长了大小毛管中的速度差。因而，当大毛管的油水界面到达 B 点时（图 1-3b），小毛管中还存在油。大毛管的水在 B 点与小毛管的油相接触，产生一反向弯液面而形成油滴（图 1-3c）。

2. 存在毛管力的排驱机理

当考虑油水弯液面上的毛管力时，流速将受毛管力的影响而与上述驱油机理不同。假设管壁亲水，当水进入上毛管后，A、B 两点之间的压差表示为：

$$p_A - p_B = (p_A - p_{w1}) + (p_{w1} - p_{o1}) + (p_{o1} - p_B) \quad (1-18)$$

式中 p_{o1} ——油-水界面处油相一边的压力；

p_{w1} ——油-水界面处水相一边的压力；

$p_A - p_{w1}$ ——水相粘滞阻力产生的压降。

$$p_A - p_{w1} = \frac{8\mu_w L_w V_1}{r_1^2} \quad (1-19)$$

$p_{w1} - p_{o1}$ ——弯液面两边的压差，即毛管力。

$$p_{w1} - p_{o1} = p_L = \frac{-2\sigma \cos \theta}{r_1} \quad (1-20)$$

$p_{o1} - p_B$ ——油相粘滞力产生的压降。

$$p_{o1} - p_B = \frac{8\mu_o \Delta_o v_1}{r_1^2} \quad (1-21)$$

将式(1-19)、(1-20)、(1-21)分别代入式(1-18)，得

$$p_A - p_B = \frac{8\mu_w L_w v_1}{r_1^2} - \frac{2\sigma \cos\theta}{r_1} + \frac{8\mu_o L_o v_1}{r_1^2} \quad (1-22)$$

假设 $\mu_w = \mu_o = \mu$ 、由于 $L = L_w + L_o$ ，所以

$$p_A - p_B = \frac{8\mu L v_1}{r_1^2} - p_{c1} \quad (1-23)$$

式 (1-23) 中，等式右端第一项为粘滞力引起的压降，第二项为毛管力。

同理，在下毛管中，A、B点之间的压降为

$$p_A - p_B = \frac{8\mu L v_2}{r_2^2} - p_{c2} \quad (1-24)$$

式 (1-23) 和 (1-24) 说明，存在毛管力条件下，总压降是由粘滞力和毛管力共同产生的。故流速受它们共同控制。为了分析并联毛管中的速度差，首先分析单根毛管中毛管力和粘滞力对速度的影响。

设毛管半径为 r ， $\mu_o = \mu_w = \mu = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 润湿接触角 $\theta = 0$ 。利用式 (1-24) 计算 A、B 两点间的压降。表 1-1 列出了 r 为不同值时对应的粘滞力和毛管力以及总压降 $p_A - p_B$ 。

表 1-1 粘滞力和毛管力对总压降的贡献

$v = 3.53 \mu\text{m/s}$ $L = 500 \mu\text{m}$ $\sigma = 30 \text{ mN/m}$			
孔隙半径 $r, \mu\text{m}$	粘滞力压力降 ($8\mu L v / r^2$), Pa	毛管压力降 p_c, Pa	总压降 ($p_A - p_B$), Pa
2.5	2.26	24000	-23998
5	0.56	12000	-12000
10	0.141	6000	-6000
25	0.023	2400	-2400
50	0.0056	1200	-1200
100	0.0014	600	-600

由表 1-1 可见，在油层常见速度下，对于强亲水油层，润湿相排驱非润湿相时，压降总是负值。负的压降并不意味着排驱方向逆转。在亲水毛管中，毛管力的方向与油水相之间的压差方向相反，正是在毛管力作用下水平毛管自动实现水驱油。表 1-1 数据说明，在亲水单根毛管中水驱油，粘滞力对毛管力是阻力。

对于并联毛管，A、B 两点间的总压降对两并联毛管是相同的，若在两根毛管中都实现水驱油，油滴将在流速慢的毛管中形成。根据式 (1-23) 和 (1-24)，在毛管 1 和 2 中可能出现的速度和相应的总压降可能有以下几种情况 (表 1-2)：

表 1-2 并联毛管中速度和压降关系

$v_1 = 0$	$p_A - p_B = -p_{c1}$	$v_2 = 0$	$p_A - p_B = -p_{c2}$
$v_1 > 0$	$p_A - p_B > -p_{c1}$	$v_2 > 0$	$p_A - p_B > -p_{c2}$
$v_1 < 0$	$p_A - p_B < -p_{c1}$	$v_2 < 0$	$p_A - p_B < -p_{c2}$

欲在两根毛管中都实现水驱油，流速都应为正值 ($v > 0$)。这种情况仅在 $p_A - p_B > -p_{c1}$ 和 $p_A - p_B > -p_{c2}$ 时才会发生。考虑到 $r_1 < r_2$ ，故 $p_{c2} < p_{c1}$ ，即 $-p_{c2} > -p_{c1}$ 。因此，同时在毛管 1 和 2 实现水驱油的条件是 $p_A - p_B > -p_{c2}$ 。当两毛管都实现水驱油时，在流速慢的毛管中将形成油滴。下面通过一实例对比并联毛管的速度差。

假设 $V_2 = 3.53 \mu\text{m/s}$, $r_1 = 2.5 \mu\text{m}$, $L = 500 \mu\text{m}$, $\sigma = 30 \text{mN/m}$, $\mu_0 = \mu_w = \mu = 1 \text{mPa} \cdot \text{s}$, $\theta = 0$ ，在表 1-3 中列出不同的 r_2/r_1 值，求出 r_2 ，由式 (1-24) 计算 $p_A - p_B$ 。当已知 $p_A - p_B$ 后，由式 (1-23) 计算 v_1 。表 1-3 列出不同 r_2/r_1 值对应的 $p_A - p_B$ 和 v_1 。

表 1-3 不同 r_2/r_1 值计算的总压降和小毛管速度

r_2/r_1	$p_A - p_B, p_a$	$v_1, \text{cm/s}$
2	-12000	1.88
4	-6000	2.81
10	-240	3.38
20	-120	3.56
40	-60	3.66

由表上数据可见， v_1 比 v_2 大 4 个数量级。这说明，当孔隙是强亲水时，并联毛管中总是小毛管内的油排干净，在大毛管留下油滴。在图 1-3 中，当毛管 1 中的油排完时，油水界面已越过 B 点，B 点的压力转变为弯液面水相一边的压力，故 B 点压力下降，出现 $p_A > p_B$ 。 $p_A - p_B$ 是毛管 1 粘滞阻力造成的压力降，它是排驱毛管 2 中油滴的动力。

油滴能否被排驱，不仅取决于压差 $p_A - p_B$ ，还取决于油滴两端弯液面上的毛管压力差，图 1-4 所示的油滴处于静止状态时 (图 1-4a)。毛管力造成的压差由下式计算：

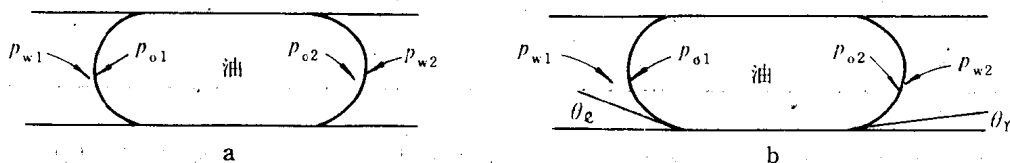


图 1-4 静止油滴弯液面上的毛管力

$$p_{w1} - p_{w2} = (p_{w1} - p_{o1}) + (p_{o2} - p_{w2}) \quad (1-25)$$

式中 p_{w1} ——左端弯液面水相压力；

p_{w2} ——右端弯液面水相压力；

p_{o1} ——左端弯液面油相压力;

p_{o2} ——右端弯液面油相压力。

因为

$$p_{w1} - p_{o1} = \frac{-2\sigma\cos\theta}{r_1}$$

和

$$p_{o2} - p_{w2} = \frac{2\sigma\cos\theta}{r_r}$$

式中 r_1 和 r_r ——分别为油滴左、右端弯液面处的毛管半径。

$$\text{故 } p_{w1} - p_{w2} = \frac{-2\sigma\cos\theta}{r_1} + \frac{2\sigma\cos\theta}{r_r} \quad (1-26)$$

当 $p_A - p_B > p_{w1} - p_{w2}$ 时, 油滴可能流动。但是, 油滴从静止到流动之前, 因动力滞后, 弯液面首先要变形, 润湿角发生改变 (图 1-4b), 假设 $r_1 = r_r = r$, 这时, 两端弯液面的毛管力差由下式表示

$$p_{w1} - p_{w2} = \frac{2\sigma}{r} (\cos\theta_r - \cos\theta_l) \quad (1-27)$$

式中 θ_l 和 θ_r ——分别为左右弯液面的前进角和后退角。

式 (1-27) 是存在动力滞后使油滴流动所需的最小压力, 称为附加毛管阻力。

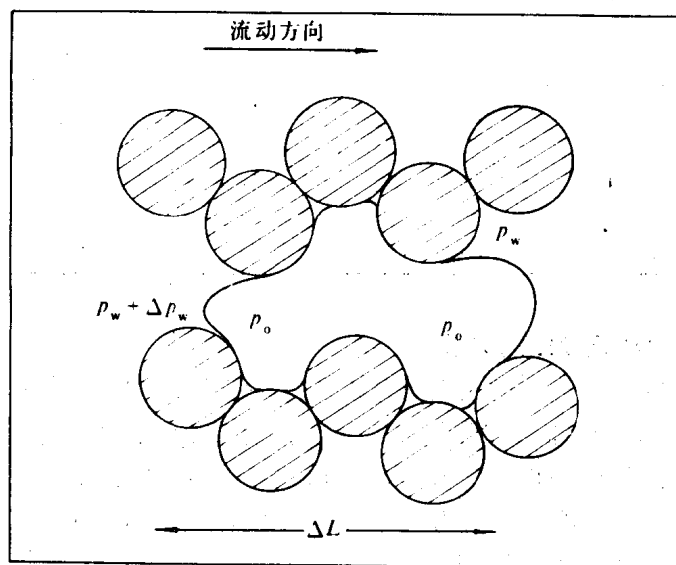


图 1-5 油层中的油滴形状

虽然, 油层中油滴的形式并不像图 1-4 所示的那么规则, 它更多地像图 1-5 所示, 占

据几个孔隙空间，形成具有若干弯液面形状不规则的油滴。但是，并联毛管基本反应了油滴形成、滞留和起动的机理。它说明，毛管力对油滴形成、滞留起着关键作用。

第二节 毛管数对残余油饱和度的影响

一、毛管数的意义

油滴能否流动不仅取决于油滴两端人工建立的压力降，而且，取决于弯液面上附加毛管阻力，即取决于施加在油滴上的动力和阻力。用压力梯度 $\Delta p / l$ 表示油滴受到的动力 (l 为油滴长度， Δp 为施加在油滴上的压差)。关于阻力，按照式 (1-27)，它与 σ 、毛管半径和动力滞后有关。除 σ 外，其它都是难于确定的量，所以，定量描述阻力往往只涉及 σ 。对于一定润湿性和一定半径的毛管，油滴能否流动取决于毛管数 $\frac{\Delta p / l}{\sigma}$ ，当此值达到一定值时，油滴便能流动。考虑到流动是发生在孔隙介质中，将压力梯度按照达西公式换算为水的粘度 μ 与渗流速度 v 之积。因此，对于一定性质的孔隙介质，毛管数定义为 $\frac{v\mu}{\sigma}$ ，用 N_c 表示，即

$$N_c = \frac{v\mu}{\sigma} \quad (1-28)$$

N_c 是一无因次数，它表示在一定润湿性和一定渗透率的孔隙介质中两相流动时，排驱油滴的动力，即粘滞力 $v\mu$ ，与阻力 σ 之比。

表 1-4 残余油饱和度与毛管数关系

$v, \text{ mm/s}$	μ_0/μ_w	$\sigma, \text{ mN/m}$	残余油饱和度(PV)		
(初始排驱条件)			<u>Torpedo</u>	<u>Elgin</u>	<u>Berea</u>
0.007	1.0	30	0.416	0.482	0.495
(改变粘滞力)					
0.7	1.0	30	0.338	0.323	0.395
0.007	0.055	30	0.193	0.275	0.315
(改变毛管力)					
0.007	1.0	1.5	0.285	0.275	0.315

二、毛管数与残余油饱和度的关系

二次残余油饱和度与毛管数的关系可从表 1-4 看出。表中所列数据来自三个油田岩心的资料。数据说明，增加粘滞力或降低界面张力都使残余油饱和度下降。表 1-4 也说明，对于不同岩心，在相同排驱条件下，残余油饱和度不相同。这正是式 (1-28) 定义的毛管数未考虑渗透率、润湿动力滞后等阻力因素所致。由摩尔 (Moore) 和斯洛伯德 (Slobed) 定义的毛管数则考虑了润湿性，毛管数 N'_c 用下式表示：

$$N'_c = \frac{v'\mu}{\sigma \cos \theta} \quad (1-29)$$