

陈铁龙 编著

三次采油

An Introduction to Tertiary Recovery

概论

Petroleum Industry Press

石油工业出版社



三 次 采 油 概 论

陈铁龙 编著

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书旨在向广大读者介绍气体混相驱、热力采油、聚合物驱和微生物采油等提高采收率方法的理论及工艺技术。书中图文并茂，文字叙述简炼、通顺，是一本普及三次采油知识的好书。

本书可供从事油田开发的科研人员及石油院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三次采油概论/陈铁龙编著.

北京:石油工业出版社,2000.10

ISBN 7-5021-3068-3

I. 三…

II. 陈…

III. 三次采油-技术

IV. TE357.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 40794 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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 10.125 印张 276 千字 印 1201—3200

2000 年 10 月北京第 1 版 2002 年 8 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5021-3068-3/TE·2352

定价: 28.00 元

前 言

石油作为一种不可再生能源，其地下蕴藏量十分有限。在目前的水驱条件下，石油的采收率仅为 35% ~ 45%，也就是说，水驱结束后尚有大部分原油残留在地下。如何最大限度地采出地下剩余的原油，已成为石油工业的一个重要的任务。“发展西部、稳定东部”是我国石油工业的发展战略，提高东部油田高含水后期的地下原油采收率是我国石油工业的发展战略中稳定东部的一个重要组成部分。因此，提高采收率技术的发展和运用，对于实施我国石油工业的战略具有十分重要的实际意义。

提高原油采收率 (Enhanced Oil Recovery) 的概念是在 80 年代提出的，它的前身是三次采油。在西方，一次采油是指利用天然能量开采石油的方法；二次采油是指天然能量衰竭后，利用人工补充地下能量（如注水、注气），保持地层压力开采石油的方法；三次采油是指二次采油后不能进一步有效地开采地下原油时，通过注入化学剂、热量、混相溶剂等方法，改变油藏岩石和（或）流体的物理、化学性质，进一步提高采收率的方法。

根据石油开采阶段来划分的采油方法存在一定的局限性。例如油藏开发初期就进行注水、注热载体等不能作为一次采油方法，因此人们将除注水之外的开采石油的方法都称为提高采收率方法，简称为 EOR 或 IOR (Improved Oil Recovery)。由于“三次采油”概念在国内已被大多数工程技术人员所接受，因此，本书仍以“三次采油概论”为名，向读者介绍气体混相驱、热力采油、聚合物驱和微生物采油等提高采收率方法的理论及工艺技术。鉴于化学驱中的聚合物驱技术较为成熟，而且已处于工业应用阶段，因此本书主要介绍聚合物驱。

在提高采收率概述中，本书介绍了各种提高采收率方法的基

本内容、基本原理、优缺点以及应用的局限性，从波及效率和驱油效率的概念及其影响因素出发，导出各种 EOR 方法的理论依据。第二章介绍了二氧化碳驱、烃类气体混相驱和氮气驱的多次接触混相机理、油藏筛选和工艺实施技术。第三章讨论了蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层三种稠油开采方法的理论与实践。第四章介绍了微生物吞吐、微生物驱、微生物调剖、微生物清防蜡等微生物采油工艺技术。第五章聚合物驱介绍了流度控制，聚合物驱的室内评价和设计、现场实施和监测等方面内容。

在本书的编写过程中，得到了彭克宗教授的深切关怀和鼓励，同时也得到了蒲万芬副教授、王健博士的大力支持；在资料的收集、文字录入和图件绘制中，郑晓春、赵继宽、谭祖雪、黄爱斌等给予了大力协助，对此深表谢意。由于编者水平有限，书中难免不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

陈铁龙

1999 年 5 月 23 日于西南石油学院

目 录

第一章 提高采收率概述.....	(1)
第一节 提高采收率方法.....	(2)
第二节 采收率的概念	(15)
参考文献	(30)
第二章 气体混相驱	(32)
第一节 基本理论	(33)
第二节 二氧化碳驱	(40)
第三节 烃类气体驱	(73)
第四节 氮气驱	(89)
参考文献.....	(100)
第三章 热力采油.....	(103)
第一节 基本理论.....	(104)
第二节 蒸汽吞吐.....	(114)
第三节 蒸汽驱.....	(131)
第四节 火烧油层.....	(160)
参考文献.....	(171)
第四章 微生物采油.....	(174)
第一节 微生物基本概念.....	(178)
第二节 油层微生物学.....	(191)
第三节 微生物采油机理与筛选.....	(203)
第四节 微生物采油的应用.....	(212)
参考文献.....	(233)
第五章 聚合物驱.....	(235)
第一节 流度控制用聚合物.....	(236)
第二节 聚合物驱油机理.....	(242)

第三节	聚合物溶液性质·····	(248)
第四节	聚合物溶液在多孔介质中的流动特性·····	(267)
第五节	聚合物驱的室内评价与设计·····	(279)
第六节	聚合物驱现场实施与监测·····	(297)
参考文献	·····	(314)
附录	单位换算表·····	(317)

第一章 提高采收率概述

根据石油开采及油田开发的投資过程，可分为三个阶段：一次采油、二次采油和三次采油。一次采油是指利用油藏天然能量开采的过程，如利用溶解气驱、气顶驱、天然水驱、岩石和流体弹性能驱及重力排驱等能量，它是油藏开发的第一个阶段。油田投資主要在钻井及油气集输两方面，也是油田开发的第一次投資过程，因此称为一次采油。一般来说，一次采油的采收率低于15%。

二次采油是指采用外部补充地层能量（如注水、注气），以保持地层能量为目的的提高采收率的采油方法。一次采油后，要进一步提高采收率，需要对油田注水注气设备进行第二次投資，因此称为二次采油。以前，二次采油是在油藏能量衰竭时采用的提高采收率方法。现在，许多油藏一开发就进入了注水的二次采油过程。这样可以使注水后的采收率有所提高。二次采油的采收率可达45%。

二次采油之后，油藏中还存在大量的原油，为了获得更高的采收率，需要进行三次采油。作为第三次采油过程的三次采油，是指通过注入其他流体，采用物理、化学、热量、生物等方法改变油藏岩石及流体性质，提高水驱后油藏采收率。化学驱、气体混相驱、热法采油和微生物采油等都是提高采收率（Enhanced Oil Recovery，简称EOR）的方法。在第三次采油过程中，要投入大量的资金，建设注入化学剂、载热流体、混相气体的注入设备，注入流体也需要大量的资金。由于三次采油的投資规模较大，三次采油的采收率提高幅度较大，获利较大，因此三次采油具有很大的风险性。油藏经过三次采油后，采收率可达50%~90%。采收率提高幅度的大小取决于采用的方法、油藏条件以及

当时的技术经济状况等许多因素。

按上述采油阶段来划分石油开采方法的最大缺陷在于现在许多油藏的开发过程并非按上述过程进行的。如我国大庆油田的开发模式是油藏一开发就进行注水,以保持地层压力,提高水驱采收率。克拉玛依油田九区稠油油藏是以蒸汽吞吐和蒸汽驱方法开始开采的。这些例子表明,油藏不经过一次或二次采油,直接进行三次采油可获得更多的最终采收率,经济上更具有吸引力。因此,三次采油的概念已失去了一定的应用性,而提高采收率(EOR)的概念更为合理和更易为人们所接受。

第一节 提高采收率方法

提高采收率的定义为除了一次采油和保持地层能量开采石油方法之外的其他任何能增加油井产量,提高油藏最终采收率的采油方法。EOR方法的一个显著特点是注入的流体改变了油藏岩石和(或)流体性质,提高了油藏的最终采收率。EOR方法可分为四大类,即化学驱、气体混相驱、热力采油和微生物采油。其中化学驱进一步分为聚合物驱、表面活性剂驱、碱驱和复合驱(聚合物—表面活性剂驱,聚合物—表面活性剂—碱三元复合驱,表面活性剂—气体泡沫驱,聚合物—泡沫驱等);气体混相驱可分为二氧化碳驱、氮气驱、烃类气体驱(干气驱和富气驱)以及烟道气驱;热力采油方法可分为蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层等;微生物采油方法可分为微生物驱、微生物调堵及微生物降解原油等方法。EOR方法的细分类见图1-1。

一、气体混相驱

气体混相驱的目的是利用注入气体能与原油达到混相的特性,使注入流体与原油之间的界面消失,即界面张力降低至零,从而驱替出油藏的残余油。气体混相驱按混相机理可分为一次接触混相驱和多次接触混相驱。按注入气体类型可分为烃类气体混相驱(如LPG段塞驱、富气驱、贫气驱)和非烃类气体混相驱

(如 CO_2 驱和 N_2 驱)。

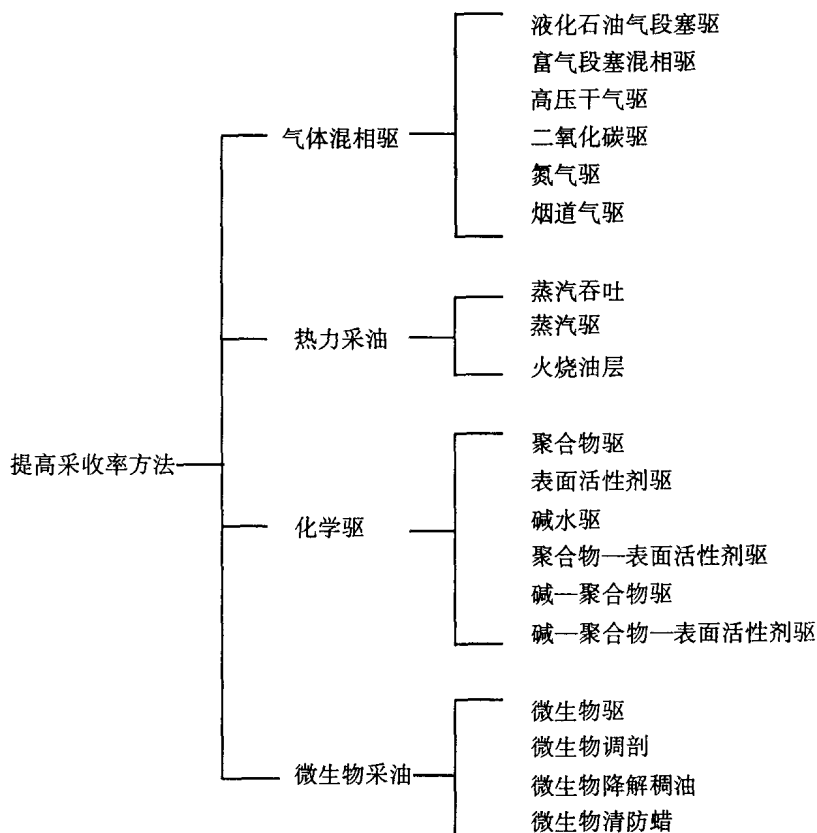


图 1-1 提高采收率分类框图

1. LPG 段塞混相驱

液化石油气 (简称 LPG) 段塞混相驱是指首先注入与地下原油能一次接触达到混相的溶剂段塞, 如 LPG、丙烷等, 然后注入天然气、惰性气体或水。LPG 段塞混相驱工艺示意图如图 1-2 所示 (图 1-2 中水段塞是用来控制流量、提高波及效率的)。一般来说, LPG 段塞尺寸约为 10%~15% 孔隙体积, 而后续的天然气或水的段塞尺寸就非常大。

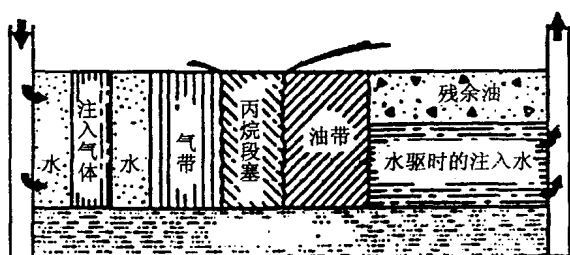


图 1-2 LPG 段塞混相驱工艺

LPG 段塞混相驱非常有效。注入的 LPG 段塞与原油达到混相后，残余的油滴及可动油都可能被采出，因此这种方法的采收率较高。此外，混相压力低、适应性强等都是 LPG 段塞混相驱的优点。但是，LPG 段塞混相驱的成本高以及波及效率低等因素限制了该方法的应用。

2. 富气混相驱

富气是富含丙烷、丁烷和戊烷的烃类气体。富气混相驱是指往油层中注入富含 C_2-C_6 中间组分的烃类气体段塞，然后再注入干气段塞，通过富气与原油多次接触达到混相来提高采收率的方法。注入富气与原油接触时，注入气中的 C_2-C_6 组分凝析而进入油相，形成一个由 C_2-C_6 富气和原油的混相带，如果注入的富气能保证足够的量时，混相带就会向前不断地把油推向生产井，其工艺示意图见图 1-3。由于富气成本要比干气高，因此通常是富气段塞后紧接的是干气。尽管富气驱的成本低于 LPG 段塞驱，但是要求的混相压力相对较高。富气驱的优点是基本上能完全驱替油层内所接触的残余油，而且一旦混相带被破坏能后自身修复，重新获得混相。

但是，富气驱仍然成本较高，而且重力超覆、粘性指进现象严重，波及效率较低。

3. 高压干气混相驱

干气是甲烷含量超过 85% 的天然气。高压干气混相驱是指在高压下将甲烷为主的干气连续地注入到油层，通过干气与原油

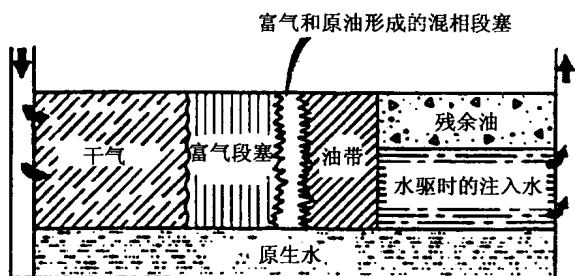


图 1-3 富气驱工艺示意图

多次接触达到混相的驱替过程。注入的干气与原油多次接触后形成了一个由富含 C_2-C_6 的气体与原油的混相带，如图 1-4。这种方法不象富气驱是通过富气中 C_2-C_6 中间组分凝析到原油中而达到混相，而是干气从原油中抽提出中间组分加富自己，使注入气体的组成和与之相接触的原油的组成接近，从而达到混相。

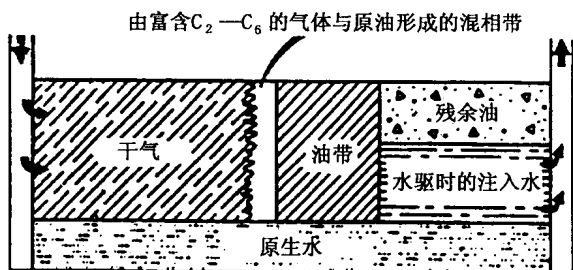


图 1-4 高压干气驱工艺示意图

如果原油中富含 C_2-C_6 组分，而且地层压力很高，干气驱才能是混相驱。高压干气驱方法的优点在于成本低，干气可循环注入。但是，高压干气驱的注气压力要求很高，对注入设备和原油的组成要求很严，因此其适用性较差。此外，重力分异效应较严重，尤其是在非均性油藏中更为突出。

4. CO_2 驱

CO_2 驱是指注入的 CO_2 段塞通过降低原油粘度、膨胀原油

体积，以及多次接触混相等机理提高油藏采收率的方法。在中等压力下注入的 CO_2 开始与原油接触时，并不能立即达到混相，但可以形成一个类似于干气驱的混相前缘， CO_2 抽提原油中大量的 $\text{C}_2\text{—C}_6$ 组分达到混相。但是在高压下， CO_2 有时又类似于富气驱， CO_2 可以溶解于原油中，相当于富气驱的中间组分凝析到原油中那样。图 1-5 为 CO_2 驱工艺示意图。在 CO_2 段塞前缘是 CO_2 —原油混相带，其中富含 $\text{C}_2\text{—C}_6$ 组分。为了控制 CO_2 驱的流度，通常采取 CO_2 —水交替注入方法。

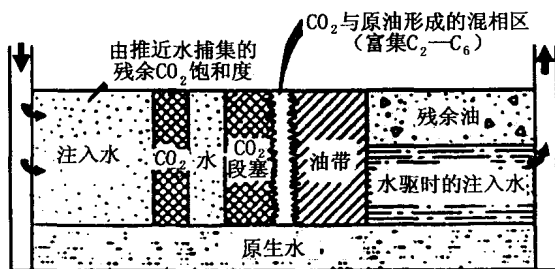


图 1-5 二氧化碳驱工艺示意图

一般注入的 CO_2 段塞尺寸为 12% ~ 40% 孔隙体积，后面接着注入的是泡沫或水。因为 CO_2 泡沫或水—气交替注入可以大大地降低流度比，提高注入流体的波及效率。相对来说， CO_2 驱在低压下能够达到混相，比高压注干气方法的应用范围更广，但受到 CO_2 资源量的限制，除非存在大型天然的 CO_2 气藏。此外， CO_2 驱会带来严重的腐蚀、结垢、沥青沉积等问题。尽管如此， CO_2 驱仍是应用最广的气体混相驱方法，在提高采收率方法中占有显著的位置。

5. N_2 驱

N_2 混相驱与高压干气驱类似，是指注入 N_2 与原油通过多次接触达到混相的一种 EOR 方法。注入的 N_2 与原油接触，抽提原油中的 $\text{C}_2\text{—C}_6$ 中间组分，而使 N_2 自身不断地富化，接近原油的组成，从而达到动态混相。在 N_2 驱时，除了混相驱机理

外, N_2 的重力排驱及保持油藏压力效应均有助于提高采收率。

N_2 驱要求原油中必须含有足够的 C_2-C_6 中间组分, 而且地层压力较高, 因此, N_2 驱适应于高压轻质油藏。 N_2 驱成本低, 气源来源于空气, 其成本是天然气的 $1/4$, 是 CO_2 的 $1/3 \sim 1/2$ 。 N_2 气源还可以从烟道气中获得, 从而缓解环境压力, 变废为宝。但是, N_2 驱混相的条件较为严格, 只有在高压、轻质油藏, 才能达到混相。在相同条件下, N_2 与原油达到混相所需的压力比 CO_2 和富气高得多。此外, 烟道气可以产生严重的井下管柱腐蚀问题。

二、热力采油方法

热力采油是指将热量引入油层、降低原油粘度, 从而提高采收率的方法, 包括蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层等方法。热水驱也属于热力采油范围, 它是蒸汽驱的一个特例, 即蒸汽干度为零的蒸汽驱。

1. 蒸汽吞吐

蒸汽吞吐是指将蒸汽注入单井后, 关井一段时间, 注入蒸汽携带的热量传给油层, 加热地下原油, 然后开井生产的周期性注蒸汽过程。这种注蒸汽、关井、生产过程可重复多个周期。随着吞吐周期的增加, 油井增产效果越来越差, 直到最后吞吐转为蒸汽驱。

在蒸汽吞吐中, 原油的热降粘、热膨胀、蒸汽的闪蒸与抽提都对增加稠油油井产量有贡献。由于蒸汽吞吐加热油层范围有限, 因而蒸汽吞吐的最终采收率低, 一般为 10% 左右。为进一步提高稠油油藏采收率, 蒸汽吞吐之后进行蒸汽驱采油。此外, 在深井中, 由于热损失量大, 蒸汽吞吐受到一定的限制。蒸汽吞吐是投资少、见效快的一种 EOR 方法, 也是进入工业化应用的 EOR 方法。

2. 蒸汽驱

蒸汽驱是指将蒸汽从注入井注入到油层, 蒸汽将稠油变稀并推向生产井的一种热采方法。蒸汽驱提高原油采收率的机理有原

油的粘度降低、受热膨胀、蒸汽蒸馏、汽驱以及相对渗透率和润湿性改变等。在地层中注入的蒸汽干度达到零时，蒸汽驱变为热水驱。

蒸汽驱中最大的问题是蒸汽超覆和提前突破。由于蒸汽与原油的密度差、垂向渗透率非均质性以及平面非均质性导致蒸汽沿油层上部窜进和沿高渗透带提前在生产井中突破，导致低的波及体积，降低了蒸汽驱稠油采收率。因此，在蒸汽驱中流度控制技术已变得越来越重要。尽管人们已采用了蒸汽泡沫技术，但效果并不是很好。此外，蒸汽发生器排放污染、结垢、热效率不高也是蒸汽驱所遇到的问题。尽管如此，蒸汽驱已成为最有吸引力的EOR方法，也是已进入工业化应用阶段的EOR方法。蒸汽驱的采收率可达50%~60%。蒸汽驱工艺示意图见图1-6。蒸汽前缘为蒸汽凝结的热水和热油，热水前缘是原始油带。

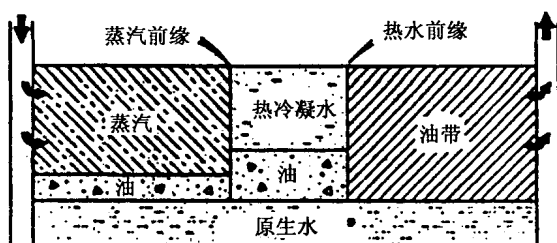


图 1-6 蒸汽驱工艺示意图

3. 火烧油层

火烧油层是通过注入空气（或氧气）与地层原油接触，采用人工井底点火或油层自点火后，油层中部分重质原油作为燃料，产生的热量和燃烧产物用以降低原油粘度、膨胀原油体积、驱动地层原油从而达到提高采收率的目的。火烧油层与蒸汽驱的最大区别在于火烧油层是在油层内产生热量，而不是象蒸汽驱那样在地面产生热量。火烧油层的机理非常复杂，除了蒸汽驱的机理外，还包括原油就地热裂解和烃类混相驱等。火烧油层的技术进一步可分为干式正向燃烧法、反向燃烧法和联合热驱（湿式燃

烧) 3 种方法。

1) 干式正向燃烧法

图 1-7 为干式正向燃烧工艺示意图。靠近注入井的是空气区, 空气区前为燃烧前缘, 该区内的温度可达 700°C 。燃烧前缘的前面是蒸发区, 主要包括蒸发的轻质烃类、蒸汽以及余下的焦炭。在冷凝区内, 是可动的热油和冷凝的轻烃以及热水等。冷凝区前为富集油带, 随着空气的不断注入, 集油带将不断地向生产井推进, 直到产出地面。干式正向燃烧法的热效率很高, 大大超过蒸汽驱, 而且可以从生产井直接获得部分轻质油。但是, 油层燃烧后剩余了大量的热量, 降低了热量利用率, 火烧油层的燃烧前缘难于控制, 采油设备的腐蚀、压缩空气的成本以及产出气中存在有害气体都是火烧油层的限制因素。

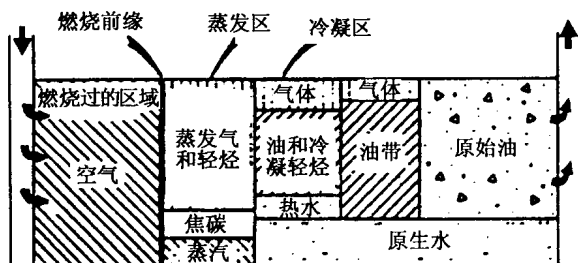


图 1-7 火烧油层工艺示意图

2) 反向燃烧

反向燃烧是指空气从注入井注入, 而点火在生产井进行, 燃烧前缘逆向注气方向移动的火烧油层方法。反向燃烧可以弥补正向燃烧中靠近生产井的原油难于流动的缺陷, 可以开采超稠原油。它与正向燃烧的一个区别在于燃烧的是相对较轻的烃类, 而不是像正向燃烧那样燃烧的是相对较重的烃类。

3) 联合热驱

联合热驱是干式正向燃烧与水驱结合的一种热采方法。这种方法最大的优点在于可充分利用油层火烧后残余的热量, 使热能

利用率达到最高限度。联合热驱还可以避免高温带进入生产井，损坏生产井管柱，缓解干式正向燃烧中的腐蚀问题。

三、化学驱

化学驱是指通过在注入水中加入聚合物、表面活性剂、碱等化学剂，改变驱替流体与油藏流体之间的性质，达到提高采收率目的的方法。化学驱可进一步分为聚合物驱、表面活性剂驱、碱驱以及复合驱（如聚合物—胶束、聚合物—碱、聚合物—碱—表面活性剂、表面活性剂—气体等）等方法。化学驱既可以改变油水界面张力，也可以降低流度比。因此从理论上来说，化学驱可以大幅度提高原油采收率，降低残余油饱和度。但实际应用中由于化学剂成本较高，这种方法的应用也受到一定限制。

1. 聚合物驱

聚合物驱是一种流度控制技术，是指在注入水中加入少量的聚丙烯酰胺或生物聚合物黄胞胶来提高水相粘度，降低水相渗透率，从而改善水驱油流度，提高波及效率的一种 EOR 方法。在聚合物驱中，聚合物浓度一般为 $300 \sim 1500 \text{mg/L}$ ，段塞尺寸为 $0.1 \sim 0.4$ 孔隙体积。聚合物驱可提高采收率 $5\% \sim 15\%$ 。图 1-8 为聚合物驱示意图。

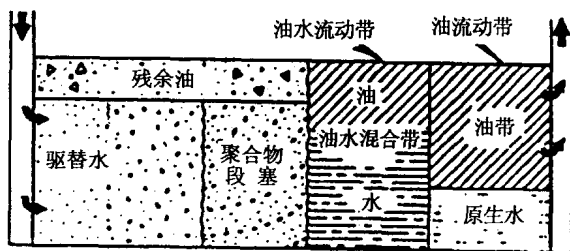


图 1-8 聚合物驱工艺示意图

聚合物段塞的流动可以改善粘性指进和舌进现象，提高平面和纵向波及系数。由于聚合物在高温和高矿化度的油藏条件下的稳定性较差，抗剪切性能弱，因此，聚合物驱的应用也受到了一