陈铁龙编著.三次采油概论.石油工业出版社,2001 年 8 月第 1 版

根据石油开采及油田开发的投资过程，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。油田投资主要在钻井及油气集输两方面，也是油田开发的第一次投资过程，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资，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。由于三次采油的投资规模较大，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 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（聚合物一表面活性剂驱，聚合物一表面活性剂一碱三元复合驱，表面活性剂一气体泡沫驱，聚合物一泡沫驱等）；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。

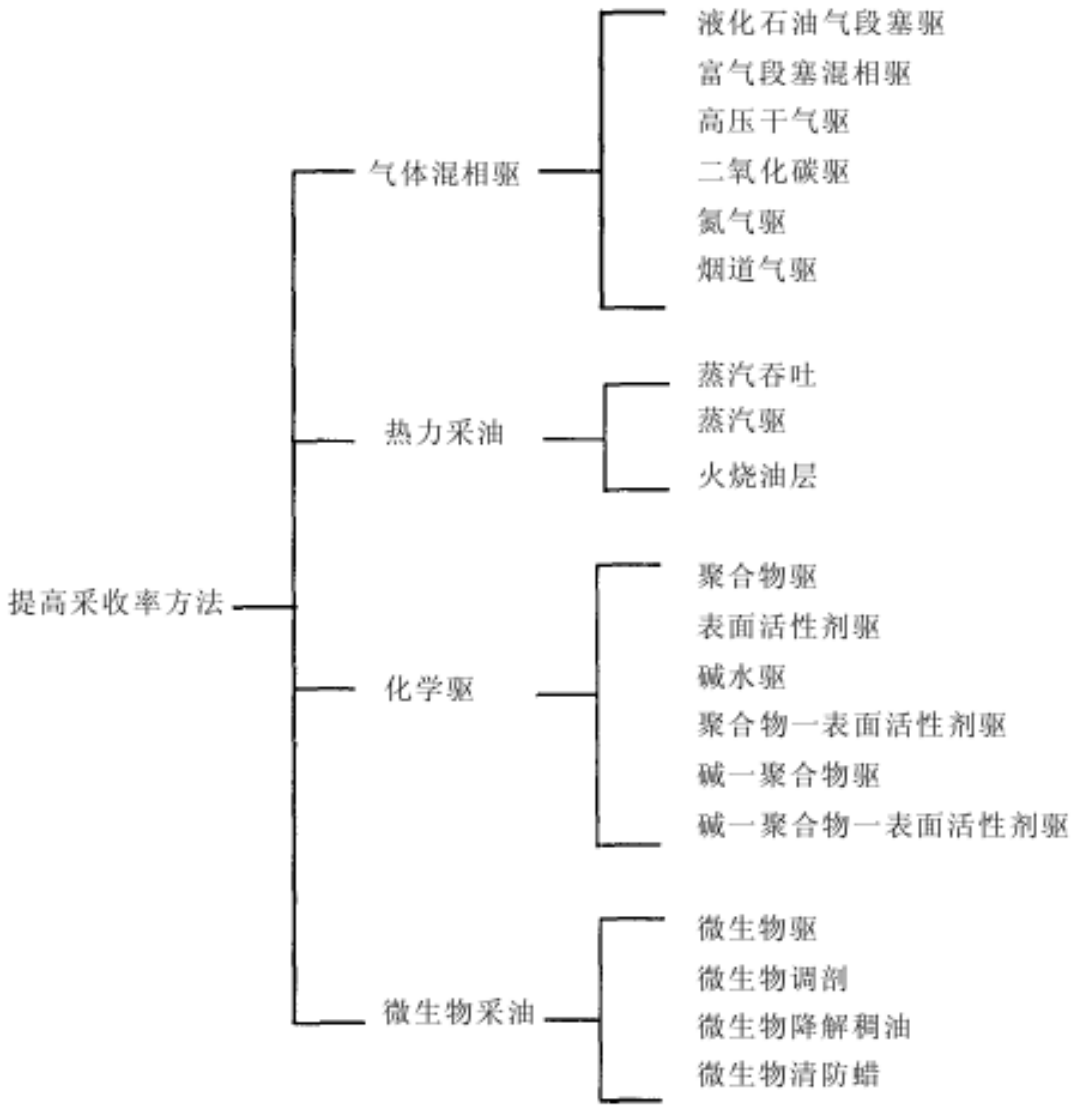


图 1－1　提高采收率分类框图

图 1 提高采收率分类框图

四、微生物采油

微生物采油是利用微生物及其代谢产物增加油井产量，提高油藏原油采收率的一种石油开采技术。微生物采油中应用的微生物是经过严格的筛选和培养的，要求注入的微生物在油藏条件（高温、高压、高矿化度）下具有迅速的生长、繁殖、代谢功能。在油藏中，依靠微生物及其代谢产物（酸、气体、表面活性剂、生物聚合物等），能够改变油藏岩石孔隙结构及表面性质、油藏原油性能，从而达到提高波及效率，降低残余油的目的。

根据微生物采油的应用工艺，微生物采油可以分为微生物驱、微生物调剖、微生物吞吐等方法。微生物驱是利用微生物代谢产物中的生物表面活性剂和生物聚合物，提高注入水的波及系数和降低油水界面张力。代谢产物中的酸、气体有助于提高地层压力，增大油层渗透率。微生物调剖是利用微生物本身及代谢产物的生物聚合物封堵高渗透带，使注入水分流到低渗透区，扩大注入水的波及系数微包括气体、酸、有机溶剂、生物表面活性剂等代谢产物，在开井生产时，由于井周围地带的原油粘度降低，岩石渗透率增加，有机沉积物消除等使油井产量增加。

微生物采油克服了气体混相驱和蒸汽驱中存在的重力分异以及化学驱成本高等缺陷，是一种非常有前途的 EOR 方法，尤其是微生物可以裂解重质原油组分的特性，使微生物的应用可以拓展到石油炼制中。如果能够研制出一种可在高温、高矿化度下迅速繁殖，且具有降解原油

重质组分能力的“超级”微生物，那将是微生物采油新纪元的开始。尽管各种提高采收率方法都能够提高油藏采收率，但各方法的机理不同，都存在一定的缺陷，表 1-1 为 MEOR 方法的对为各种比结果。

表 1-1 各种 EOR 方法的对比结果

EOR 方法	主要机理	主要缺陷
气体混相驱	降粘原油粘度 膨胀原油 混相驱替作用	重力分异导致的超覆现象 注入气源受限制 沥青沉淀降低渗透率
注蒸汽	降低原油粘度 原油轻质组分汽化 气驱作用	井热损失大 蒸汽超覆现象严重 蒸汽锅炉排放污染物
火烧油层	降低原油粘度 原油轻质组分汽化 重质原油热裂解产生的 CO_2 混相驱作用	蒸汽反燃烧方法产生的气体 超覆 燃烧难于控制 产出气污染环境 井下管柱腐蚀严重
聚合物驱	降低流度比，改善波及系数	聚合物在高温、高矿化度下增粘能力差，稳定性差，注入能力受渗透率限制
胶束—聚合物驱	改善流度比 降低界面张力	表面活性剂的吸附损失大 表面活性剂的稳定性差 聚合物高温高盐的稳定性差成本高
碱—聚合物驱	改善流度比 降低界面张力 润湿性反转	对原油组成要求严格 碱耗较大
微生物采油	生物微生物堵塞大孔隙 改善波及系数 生物表面活性剂降低界面张力 代谢酸性物质增加渗透率，代谢气体驱的作用 降解原油作用	微生物耐盐、耐高温性差 降解重质原油的微生物难于研制 微生物潜在污染水源

第二节　采收率的概念

一、采收率的定义

油藏的采收率定义为油藏累计采出的油量与油藏地质储量比值的百分数。从理论上来说，采收率取决于驱油效率（ED)和波及效率（EV)。采收率的定义式为：

$$\eta = E_D \cdot E_V \qquad (1-1)$$

式中 E_D——驱油效率，又称微观驱替效率，它是指注入流体波及区域内，采出的油量与波及区内石油储量的比值；

E_V——波及效率，又称扫油效率或宏观驱替效率，它是指注入流体及波区域的体积与油藏总体积的比值。

第二节 二氧化碳驱

利用二氧化碳驱提高采收率的历史可以追溯到本世纪50年代。1952年Whorton等人获得了第一项采用二氧化碳采油的专利权。当时二氧化碳是用作原油的溶剂，或来形成碳酸水驱。早期的研究结果表明，在一般的油藏压力下，二氧化碳不能直接与大多数原油混相，但是二氧化碳能够抽提原油中的轻质组分。70年代二氧化碳驱技术有了很大的发展，美国和前苏联等国家都进行了大量的二氧化碳驱工业性试验，并取得了明显的经济效益，采收率可以提高15%～25%。随着更多的二氧化碳气藏的发现和原油价格的攀升，80年代二氧化碳驱在美国得到了飞速的发展。二氧化碳驱的室内实验技术更趋完善，矿场试验规模越来越大，二氧化碳驱项目越来越多，同时其他产油国家对二氧化碳驱的兴趣也越来越高。仅在1986年，美国就有8个区块进行二氧化碳驱，世界上其他国家的二氧化碳驱项目也有十几个。

90年代的二氧化碳驱技术日趋成熟，根据1994年油气杂志的统计结果，全世界有137个商业性的气体混相驱项目，其中55%采用的是烃类气体，42%采用的是二氧化碳，其他气体混相驱仅占3%。由于美国联邦政府采取了多种税收优惠政策，鼓励提高采收率，开采难于用常规方法开采的原油，而且政府制订的法规对二氧化碳驱非常有利。因此，二氧化碳驱技术在美国得到了广泛的应用。目前美国绝大多数的化学驱项目已经被二氧化碳驱所取代，二氧化碳驱的原油产量在美国的提高采收率方法中占有举足轻重的位置。

2. 二氧化碳一原油性质

1) CO_2在原油中的溶解性

CO_2在原油中具有很好的溶解性。与在水中一样，CO_2在原油中的溶解度随压力的上升而上升；随温度的升高和原油分子量的增加而下降。相同条件下，CO_2在原油中的溶解度比在水中的溶解度高3～9倍，因而既使在低压下CO_2也是一种很好的非混相驱注入剂。而在高压下，CO_2则是一种很好的混相驱注入剂。由于CO_2在油中的溶解度远远大于在水中的溶解度，因此它可以从水溶液中转溶入原油中。在转变过程中，油水界面张力会逐渐降低，驱替方式也逐渐接近或达到混相驱。

2）CO_2一原油系统的膨胀

一定体积的CO_2溶解于原油，可使原油体积膨胀，其增长幅度取决于压力、温度和原油组分，原油体积可增加10%～100%。由图2－11中可以看出：膨胀系数随溶解的CO_2摩尔浓度增加和原油的相对分子质量减少而增加。给定CO_2浓度下，轻质原油的膨胀系数大于重质原油的膨胀系数。Holm和Josendal还发现CO_2比甲烷能更有效的使原油膨胀，而且欠饱和原油比饱和原油膨胀程度更大。

3）CO_2一原油系统的粘度

CO_2溶解在原油中，使得原油的粘度显著下降，这也是CO_2驱的一个机理，溶解了CO_2的原油粘度下降程度取决于压力、温度和原油本身粘度的大小，在图2－12中，μ_o指原始原油粘度，μ_m指溶有CO_2的原油粘度。随着饱和压力的增加，溶解了CO_2的原油粘度急剧下降；在相同饱和压力下，中质和重质原油的粘度降低幅度比轻质原油的降低幅度大。由于CO_2能大大降低重质原油的粘度，所以CO_2主要应用于重质原油降粘开采。

二、CO_2驱机理

在CO_2驱中，CO_2的溶解气驱作用、混相驱替、膨胀原油作用、降低原油粘度、碳酸水提高岩石渗透率等作用都会有助于提高原油采收率。

第三章　热力采油

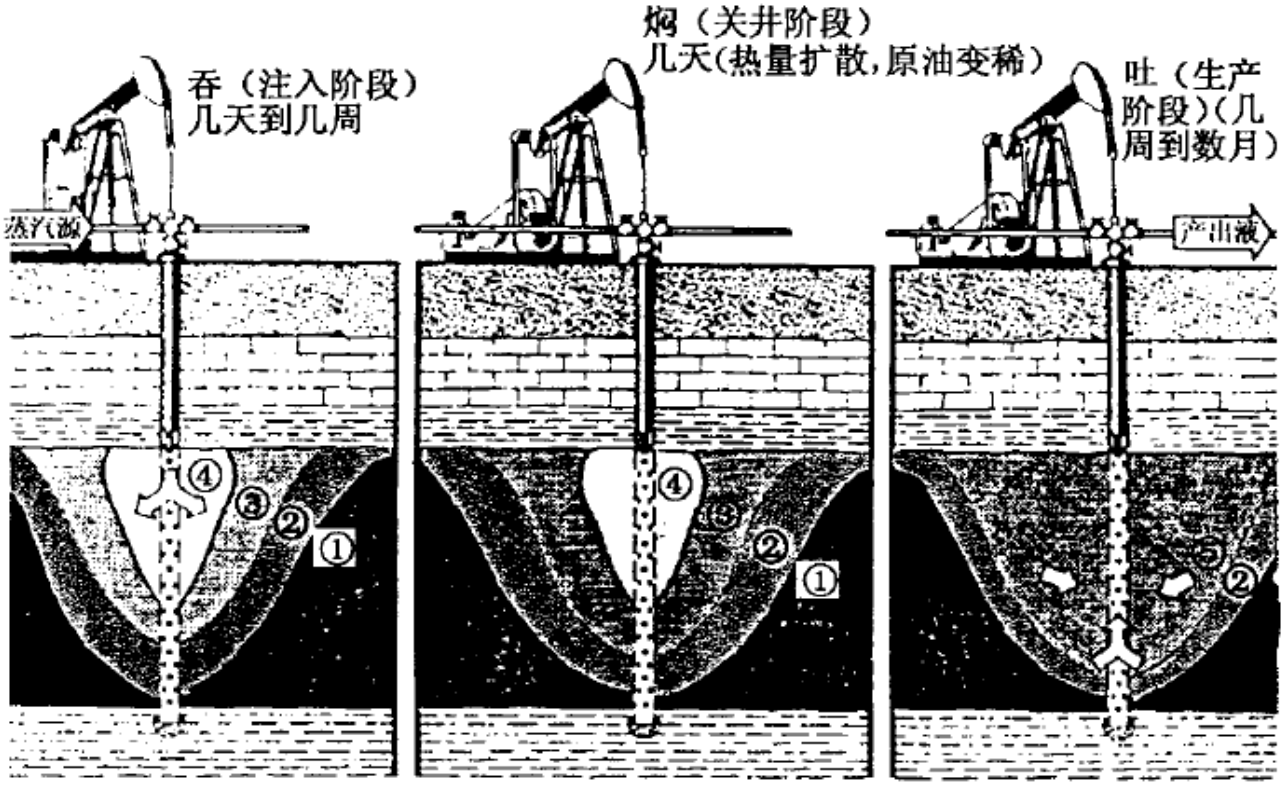
热力采油方法是指利用热能加热油藏，降低原油粘度，将原油从地下采出的一种提高采收率的方法。热力采油包括蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层三种常规的方法。把热量引入油层最早的方法是井下加热器法，Perry 和 Warner 获得第一个用井下加热器降低原油粘度，提高稠油产量的专利。20 世纪初 Lewis 报道了注空气采油的项目结果，认为空气可以氧化原油而放热。Wolcott 获得了原油地下燃烧的专利，将空气注入到油层，燃烧原油，产生的热量用来降低稠油粘度，同时产生驱替原油的驱动力。1933 年前苏联进行了第一批大规模的火烧油层试验。1942 年美国进行了首次火烧油层试验，结果发现生产井产出油的粘度大大降低，原油 API 重度增加。40 和 50 年代，美国在不同地层进行了一系列的试验，结果表明，火烧油层的热损失较大，燃烧控制难度较高。目前火烧油层方法应用最多的是罗马尼亚，而且成功的矿场实例较多。

第二节　蒸汽吞吐

蒸汽吞吐（Puff and Huff）就是将一定量的高温高压饱和蒸汽注入油井（吞），关井数天（焖井），加热油层及其原油，然后开井回采（吐）的循环采油方法。蒸汽吞吐方法是稠油开采中最

一、蒸汽吞吐开采过程

蒸汽吞吐采油过程可以分为三个阶段，即注汽阶段（吞蒸汽）、关井阶段（焖井）和回采阶段（吐蒸汽）。



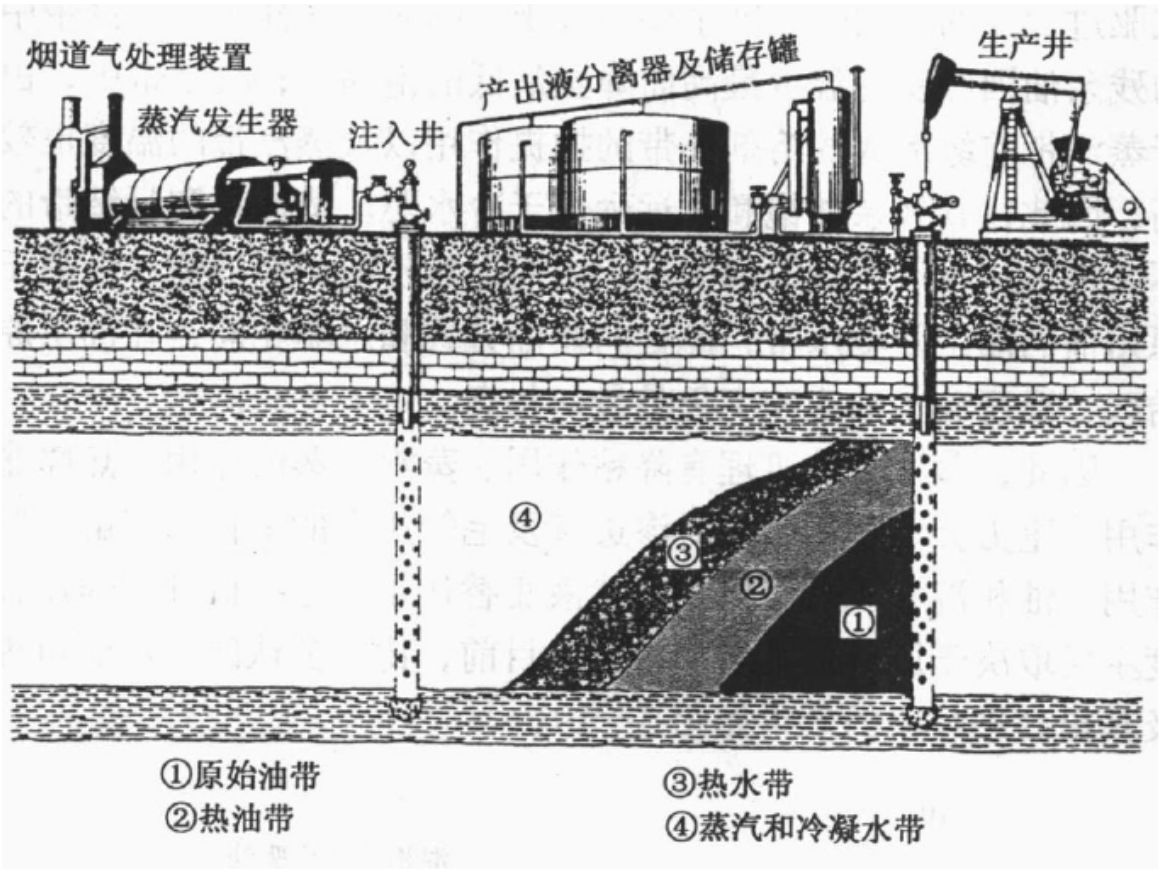


图 3－17　蒸汽驱过程示意图

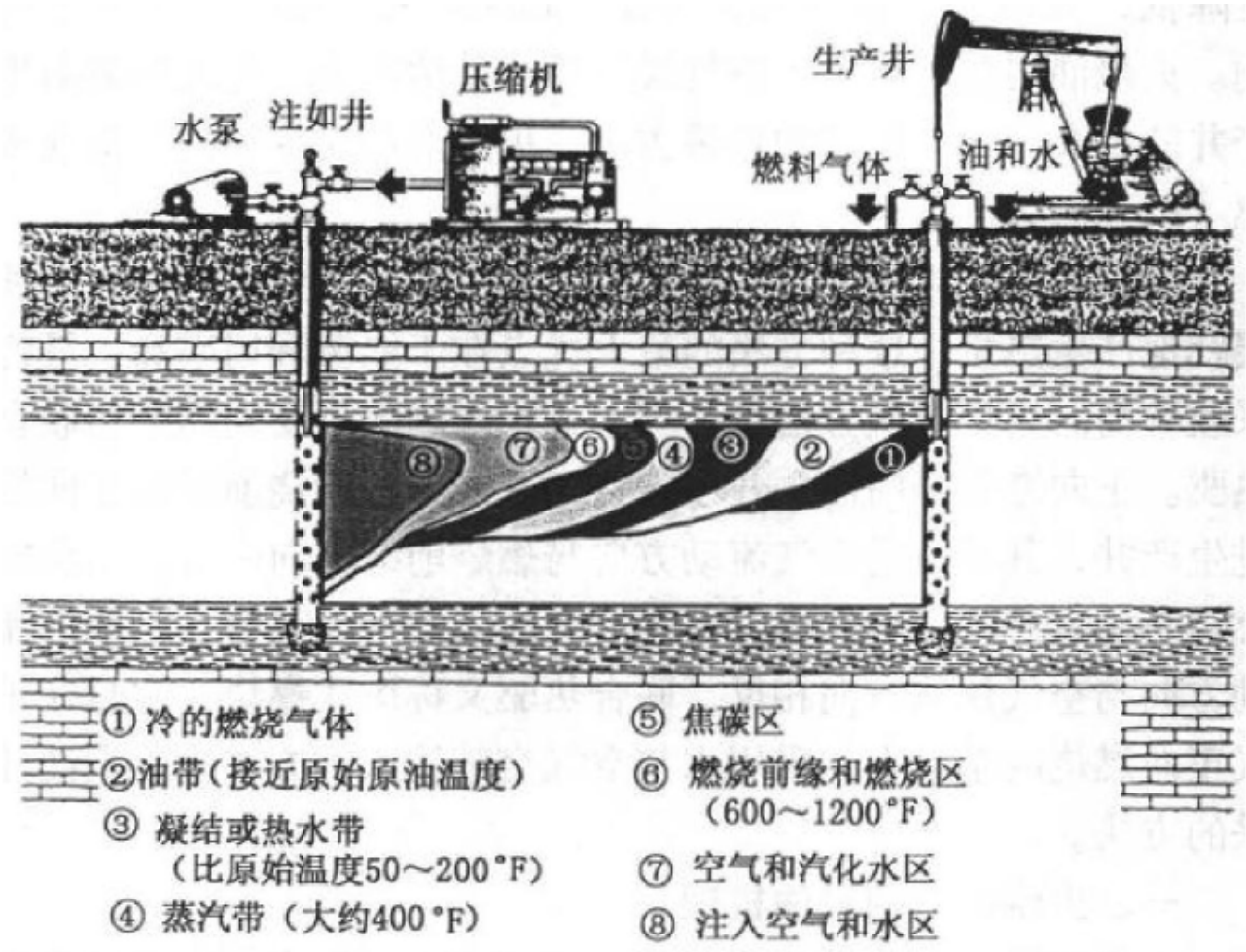


图 3－33　火烧油层示意图

微生物采油

一般来说，油藏经过一次和二次采油后，仍有 60%左右的原油剩余在油藏中而不能采出。目前最为有效的三次采油方法有热采、化学驱和混相驱等提高采收率方法。然而这些三次采油方法都存在技术上的缺陷，如：蒸汽驱的井筒和地层热损失大，蒸汽超覆和气窜现象严重；火烧油层消耗过量的不可再生能源，井下管柱热损坏；聚合物驱的聚合物剪切降解，产出液处理难；表面活性剂驱的吸附损失大，成本高及稳定性差；混相驱的气源、重力分异和气窜等。上述问题直接影响了油藏原油采收率的提高。此外，每年废弃井的数量大大增加，严重影响了油田的石油产量。

微生物采油的历史可以追溯到本世纪 20 年代。早在 1926 年，Beckman 就已经提出了用细菌采油的想法。 1940 年 Zobel 首先申请了把细菌直接注入地下提高油层采收率的专利。该项专利是使用一种能利用烃的硫酸盐还原菌处理油层，使油层发生物理化学变化，从而提高原油产量的。 1953年 Zobel获得了第二项专利，该项专利把所用的菌种范围扩大到了一种可利用氢的硫酸盐还原菌。1953年 Updegraff和 Wren 取得了一项关于往油层中注入糖浆作为硫酸盐还原菌生长所需营养物的专利。 1954 年美国在阿肯色的联合县，成功地进行了一次利用细菌大规模就地发酵，提高油田采收率的矿场试验。 Hitzman于 1962 年、1965 年、1976 年分别获得了 3 项使用非硫酸盐还原菌的微生物的专利，他建议使用的细菌为好氧菌和厌氧菌。

70年代初的世界石油危机大大促进了世界各国加强对微生物提高石油采收率的研究，有关的学术交流也更加频繁。 1975 年美国首先召开了“微生物在石油开采中的作用研讨会”。 1982 年 5月在美国俄克拉荷马的埃费顿召开了有 34 个国家参加的“世界微生物采油会议”，系统地交流了多年来的研究成果，并决定以后每两年开展一次国际会议。

1991年美国已把微生物采油技术列为继热驱、化学驱、气驱等三次采油之后的第四次提高原油采收率方法，并已在许多油田得到应用。前苏联也把微生物采油列为一种工业性应用的新的提高采收率方法。东欧各国、澳大利亚、加拿大等国也很重视对微生物采油的研究，并把研究成果应用于矿场。

微生物采油技术的发展迫切要求综合各学科的研究成果。通过各学科间技术的交叉，大大提高微生物采油的研究进程和微生物提高采收率的成功率。微生物学家必须依靠油藏地质学家和石油工程师提供的有关地层构造、油藏条件等资料，研究微生物在油藏条件的生长、繁殖及代谢过程；遗传学家必须按微生物学家和石油工程师的要求设计并培育菌种；环境工程师必须使注入微生物不污染水源，排放的废水不导致人类受害和环境污染；化学工程师必须进行微生物与油藏及流体反应产物的分析和化验，以及微生物注入方案监测；石油工程师依靠微生物学家和遗传工程师提供的菌种及其营养物结构，掌握细菌培养，实施微生物注入。

遗传工程学在微生物采油技术中起着越来越重要的作用。微生物采油成功的关键在于“超级细菌”的发现。这种超级细菌的要求为：

总之，微生物采油的成功是各学科的共同协作的成果。各学科人员在微生物采油中的地位与作用如下：

微生物学：是微生物应用的关键，研究微生物筛选、油藏原生细菌与接种细菌的相互作用，微生物在地下的生长、繁殖与代谢过程；

流体力学：存在界面现象的渗流，细菌代谢产物存在下的多组分多相渗流过程的数学模拟；

石油工程：借助于非细菌采油的手段，进行微生物采油机理的分析，微生物采油方案的实施及监测，室内微生物采油的物理模拟及配伍性研究，微生物采油的评价；

基因工程：利用基因工程技术，对细菌菌株进行改良，获取能在恶劣油藏环境中生长繁殖和代谢的优良菌种；

生物工程：提供定量描述微生物的生长、繁殖和代谢的量，模拟微生物及其他代谢产物在油藏中物质传递，设计出合适的微生物营养液注入量；

环境工程：接种到油层的微生物潜在的危害性研究，微生物采油产出液的排放，接种微生物对人类水源潜在的危害性。

将单个微生物细胞或一堆同种细菌的细胞接种在固体培养基表面或内部，当它占有一定的发展空间，并且给予适宜的培养条件时，该细胞就会迅速生长、繁殖，形成以母细胞为中心的一堆肉眼可见的、有一定形态的细胞聚集体，这就是菌落。

如果将某一纯种的大量细胞密集地接种在固体培养基中，结果形成的各“菌落”就会相互联结成一片，这就是菌苔。

细菌的菌落有自己的特征，诸如湿润、较光滑、较透明、较粘稠、质地均匀等。其原因是细菌属单细胞生物，细胞间没有形态的分化，因此，在固体培养基表面上生长的每一个个体，其细胞间隙中都充满着吸入水的毛管。所以细菌的菌落表现出上述特征。

五、微生物学常用术语

黄单胞菌胶 ：又称黄原胶或黄胞胶，是由黄单胞菌属细菌在发酵进程中产生的生物聚合物聚

多糖。
嗜热菌 ：适合于高温的微生物。
硫酸盐还原菌：将硫酸盐转变为硫化物的细菌。

第二节　油层微生物学

一、本源细菌

本源细菌是指油藏内部存在的细菌。了解本源细菌的分布情况，对设计一个成功的微生物采油工程是非常重要的。如果要在现场工艺条件下刺激本源细菌的生长，就必须鉴定本源细菌的菌株，了解在地层条件下微生物群落对注入营养物的反应。同时，如果要把可能注入的菌株引入油层，该菌株必须是占统治地位的菌株，或者能与本源细菌形成共生体系，以便获得较好的采油效果。油藏本源细菌的分类见表 4－6。

硫酸盐还原菌
硫酸盐还原菌是油层中分布最广的菌种，也是人们最早研究和利用的微生物提高采收率的菌种。硫酸盐还原菌的主要作用是降低油水的界面张力。实验证明，在以糖蜜或原油等为营养物时，可使原油粘度降低。
单纯用硫酸盐还原菌的不利因素主要在于：
对钢铁的腐蚀作用；
这些细菌产生的硫化氢在油藏中遇铁反应生成的硫化铁的胶状沉淀会堵塞地层；
硫酸盐还原菌相对缓慢的代谢活性。
利用烃的细菌
利用烃细菌是能够氧化气态和液态烃的细菌，主要是荧光极，另外，还有一些是假单孢杆毛杆菌(Pseudomonas fluorescens)菌菌株，以及某些硫酸盐还原菌。氧化甲烷细菌广泛散布于土壤、沉积岩层和水环境中。氧化甲烷菌是假单孢杆菌科假单孢杆菌属。氧化甲烷细菌可以作为石油勘探中鉴别含油区的一个标志。

3．甲烷形成菌

甲烷形成菌是一类形态上各式各样的细菌种群，存在于各厌氧环境中。石油伴生气中的甲烷部分是由甲烷形成菌产生的。在油层和油田水中存在各类甲烷形成菌。甲烷形成菌分置于三个目中。

(1) 甲烷杆菌目（Order Methanbacteriales)：包括甲烷杆菌属和重新命名的甲烷短杆菌及甲烷栖热菌属。

(2) 甲烷球菌目（Order Methanococcales)：是由单一的甲烷球菌属所组成的。

(3) 甲烷微生物目（Order Methanomicrobiales)：分为甲烷微生物科（Methanomicrobiaceae)、甲烷八叠球菌科(Methanosarcinaceae）和甲烷游动菌科（Methanoplanaceae）三个科。

4．芽孢形成杆菌

对微生物来说，油层是一个相当不利的环境。虽然硫酸盐还原菌是油层中分布最广的菌种，但芽孢杆菌的菌株也很容易从油层液体中分离出来。这可能是由于芽孢杆菌细胞能形成芽孢（孢子），因而使其能进入油层并耐受油层中的不利条件。

在厌氧的条件下，还可从油田注入水中分离出产生生物表面活性剂的菌株，其中有苔状芽孢杆菌 JF—2 菌株（*Bacillus licheniformis* strain JF—2)，JF—2 表面活性剂的性质与精致芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）所产生的表面活性剂性质非常相似。

5．耐盐产气的梭状芽孢杆菌（*Clostridium* sp.）

梭状芽孢杆菌在微生物采油中发挥着重大的作用。这些细菌主要包括丁醇梭状芽孢杆菌、丁酸梭状芽孢杆菌、乙酰梭状芽孢杆菌、致软梭状芽孢杆菌和多粘梭状芽孢杆菌。这些细菌用于使糖发酵，产生大量气体和有机酸。许多芽孢杆菌种的菌株具有强大的产气、产酸和产溶剂的能力。试验证实，可产生大量天然气的梭状芽孢杆菌和厌氧细菌接种并加入糖蜜作为发酵碳源后，注入油井，可使高度枯竭的油藏增加产量。

二、地层条件对细菌的影响

用于采油的微生物必须能在地层中增殖。影响细菌在油层中的生长、繁殖、代谢的因素很多，这些因素包括氧化一还原电势、氢离子浓度、压力、温度、盐度、营养物的可利用性，以及不存在阻化剂或毒性因子等。如果深埋在地下岩层中的这些条件与微生物生长所需的营养基能够保证的话，微生物就能顺利地生长、繁殖和代谢。

1.岩性

地层中的硅酸盐和碳酸盐岩对微生物的活动几乎没有抑制作用。但是，多孔岩石中的粘土及某些其他矿物质的吸附作用却能 pH 值和离子强度条件下，影响微生物增产处理效果。在一定的粘土和岩石表面上都具有电荷。这对微生物能产生吸附作用，从而阻碍微生物在介质中的运移。蒙脱石型粘土的离子交换能力最强，高岭土最弱，伊利石居中。粘土因吸水膨胀阻碍了微生物在岩石基质中的扩散。粘土还能增大水相的粘度，从而影响微生物所需的某些气体和营养物质的渗透。

油层内巨大的表面面积对微生物的繁殖与活动也会产生不利影响。岩石表面能吸附营养液，使微生物在营养物质浓度很低的状态下生存。微生物也会吸附并栖居在岩石表面上，形成生物膜，从而阻碍后来注入的液体通过岩石基质。

为了使微生物进行有效的代谢，应提供易于发酵的蔗糖并添加或不添加硝酸盐。大多数情况下地层中都缺乏这些物质，必须将这些物质注入地层。此外，还需注入磷酸盐和氮。否则这两种物质将成为地层中对微生物起限制作用的物质。在高矿化度水中磷酸盐含量很有限，因为它们容易与二阶阳离子（如镁和钙）进行络合而形成沉淀。细菌利用磷酸盐产生化学能，合成核酸和磷酸脂。

必须弄清注入的营养物质与地层盐水和粘土的配伍性，以便有效地输送营养物质而不至于造成粘土膨胀和运移。

矿化度

油藏中发现氯化钠占平均总溶解矿物量的 90%。微生物对氯化钠的耐受能力是微生物强化采油工艺中所用的微生物的一个重要特性，有的微生物能在饱和的氯化钠溶液（约 30%）中繁殖。用于微生物采油的细菌必须是能耐盐的，应能在很宽的盐度范围内生长，这样的细菌有时叫做中等嗜盐菌。

大多数细菌有稳定的细胞形状，如球形、杆形、弹簧状螺旋和游丝状螺旋。细菌的平均大小是宽 $0.5\sim1.0\mu m$，长 $1\sim5\mu m$。渗透率为 $100\times10^{-3}\mu m^2$ 的油层，其平均孔喉直径为 $7\mu m$，因此，似乎是渗透率大于 $100\times10^{-3}\mu m^2$ 的油层就能成为进行微生物提高采收率的候选者。然而，该标准是以假设细菌细胞不能聚集在一起，单个细胞能穿过孔喉为基础的。但是，许多菌种的细胞倾向于聚集在一起，细胞分裂时，它们往往仍然互相依附着（依附方式通常是细胞的特征）。它们可以形成细胞链或膜，以及不规则的细胞团。细菌细胞的聚集增加了细菌细胞的有效体积，使之难以通过孔喉而形成堵塞，从而造成后继的细菌无法再向地层深部运移。

解决细菌细胞聚集问题方法包括：

选用成团倾向较小的菌种：

使用化学添加剂，如磷酸盐、焦磷酸盐和丹宁酸类等阴离子聚电解质以增加细菌细胞的排斥静电能，因为在生长的生理条件下细菌细胞的表面具有净负电荷。

表 4－8　常用的细菌以及代谢产物表

类　型	菌　　属	芽孢形成	需氧情况	特　　征
螺旋和弧状短杆菌	螺菌属（Spirillum）	—	好氧微氧性	有鞭毛，产生色素
	弧菌属（Vibria）	—	兼性厌氧	有鞭毛，对酸度敏感，pH值：6～8
	气单胞杆菌属（Aeromonas）	—	兼性厌氧	温度：20－40℃ 有鞭毛，有些产酸， 温度：20－30℃
	脱硫弧菌属（Desulfovibio）	—	专性厌氧	有鞭毛，还原硫酸盐，使铁氧化
短杆菌	假单胞杆菌（Pseudomonas）	—	好氧	有鞭毛，产色素，有氧化烃能力
	埃希氏杆菌属（Enterobacter）	—	兼性厌氧	有鞭毛，荚膜，pH值：7，温度：37℃
	肠杆菌属（Enterobacter）	—	兼性厌氧	有鞭毛的产酸并产气菌，温度：37℃
	黄杆菌属（Flavobacterium）	—	兼性厌氧	能运动的或不能运动的，产色素
	芽孢杆菌属（Bacillus）	+	严格或兼性厌氧	有鞭毛，荚膜，有些嗜热的产酸菌，其芽孢是抗热的
短杆菌	梭状芽孢杆菌属（Clostridium）	+	专性厌氧	有鞭毛，嗜温性及嗜热性
	产甲烷杆菌属（Methanobacterium）	—	专性厌氧	产生甲烷，对氧敏感
球菌	小球菌属（Micrococcus）	—	好氧	不能运动，耐盐（5% NaCl），产色素，有鞭毛
	明串珠菌属（Acinetobacter）	—	好氧，兼性厌氧	不能运动，能产生荚膜

类　型	菌
球菌	蛋白 (Le
	八 (Pe
放线菌	土 (Ar
	分 (Myc
	棒 (Cory
	纤 (Ce
	诺 (N

目前获
微生物，用
(1) 尺
的细菌难以
的细菌的量
指数式增长
(2) 厌
油层为还原
如果微生物
数油藏温度
特性。
(3) 耐
(4) 代

表 4－9　不同微生物的生长和繁殖的温度范围

微生物类别	最低生长温度 ℃	最适生长温度 ℃	最高生长温度 ℃	举　例
低温微生物	－5～10	10～20	25～30	活性淤泥
中温微生物	5～10	15～40	45～50	核状芽孢杆菌
高温微生物	25～45	45～65	70～100	黄单胞菌

3）微生物采油菌种选择的一般原则

对于选定的油藏和试验井，由于要解决的生产问题，即工程的目的不同，要求所用的微生物提高采收率的机理和代谢产物也不同，选择的菌种也不同。表 4－10 列出了不同微生物采油工程目的下选择菌种时的一般原则。

要成功地实施 MEOR 工程，菌种的选择必须要结合地层条件和微生物采油工程的目的，两个方面都要考虑。菌种的选择可以为单一菌种，也可以由两种或多种微生物混配。为了增强微生物采油的效果，可加入某种添加剂（微生物代谢产物，如生物表面活性剂或人工合成的化学剂）作为增效剂。增效剂可直接加入到微生物的配方中，也可作为微生物增产处理液的前置液。

表 4－10　不同微生物采油工程选择菌种的一般原则

微生物采油工艺	生　产　问　题	所用的微生物类别
微生物增产处理	地层压力不足，注入能力问题，由毛细管造成的束缚油	通常使用能产生表面活性剂、气体、酸和醇类的细菌
微生物洗井	结蜡问题	使用能产生表面活性剂和酸的微生物，能降解烃类的微生物
微生物强化水驱	由毛管力造成的束缚油	使用能产生表面活性剂、气体、酸和醇类的细菌
微生物调剖	波及效率低	使用能产生聚合物或繁殖能力特别强的微生物
微生物聚合物驱	粘性指进，不利流度比，过早水淹	使用能产生聚合物的微生物

3. 微生物采油的油藏选择

油藏包括油藏岩石和流体，它们的物理化学性质对微生物的生长、繁殖和代谢活动具有决定性的影响。油藏的埋藏深度、压力、温度、地层水化学组成和原油的成分等都是微生物生存活动的限制因素。为了实施 MEOR 工程筛选油藏时，应以油层条件是否适合细菌生长为最根本的依据。表 4－11 是美国国家石油和能源研究所提出的微生物采油的油藏筛选标准。

根据微生物采油工程的油藏筛选标准和油藏对微生物的限制因素，可制定以下的油藏筛选程序（表 4－12）。

表 **4－11** 微生物采油的油藏筛选标准

油藏参数	建议范围
含盐量（含 NaCl）	＜10%，矿化度可高于此值
温度，深度	＜77℃，＜2438m
有毒矿物含量	＜10～15mg/L，矿物为砷、汞、镍、硒
地层渗透率	$>50\times10^{-3}\mu m^2$，高裂缝性地层例外
地层固有微生物	应与所选定的菌种配伍
原油重度	＞15°API
残余油饱和度	＞25%，可能有些例外
单井控制面积	＜40acre

表 **4－12** 微生物采油油藏筛选程序

油藏参数	筛选程序
可能选用的菌种	确定（推测）提高原油采收率的潜在机理
矿化度	应用配伍性试验评价微生物生长与代谢活动
温度，深度	在地层条件下用配伍性试验评价微生物的生长与代谢活动
有毒矿物	应用配伍性试验确定出对微生物生长和代谢活动有害的影响
地层渗透率	如果进行多井微生物处理，应进行单井注入能力试验和岩心驱替研究
地层中固有的微生物	在地层条件下应用配伍性试验评价微生物的生长和代谢活动

第四节　微生物采油的应用

微生物及其代谢产物可用于提高采收率。根据微生物生长、繁殖、代谢环境，微生物采油法可分为地面微生物法和地下微生物法。地面微生物法是指在地面完成微生物的生长、繁殖和代谢过程，并将微生物及其代谢产物注入油层，提高原油采收率的方法。根据地面产生的代谢产物主要成分，地面微生物法可进一步分为微生物表面活性剂法和微生物聚合物法。微生物代谢产物——生物表面活性剂可以取代人工合成的表面活性剂进行驱油，降低残余油饱和度，提高采收率；而微生物产生的生物聚合物可以代替人工合成的聚合物，进行封堵大孔道，改善流度比，提高注入水波及系数。

地下微生物法是指将微生物及其营养液注入到油层，使其在油层中繁殖，依靠微生物本身的性质及其代谢产物提高原油采收率的方法。根据微生物应用工艺，地下微生物法可分为微生物吞吐、微生物强化水驱、微生物调剖、微生物清蜡和降解稠油。微生物采油应用方法的分类框图如图 4－7所示。

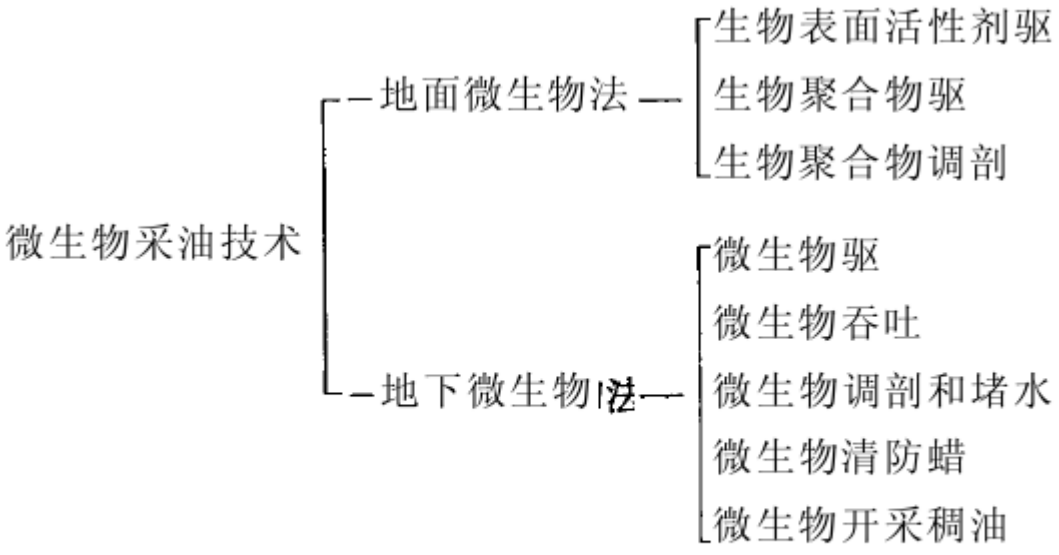
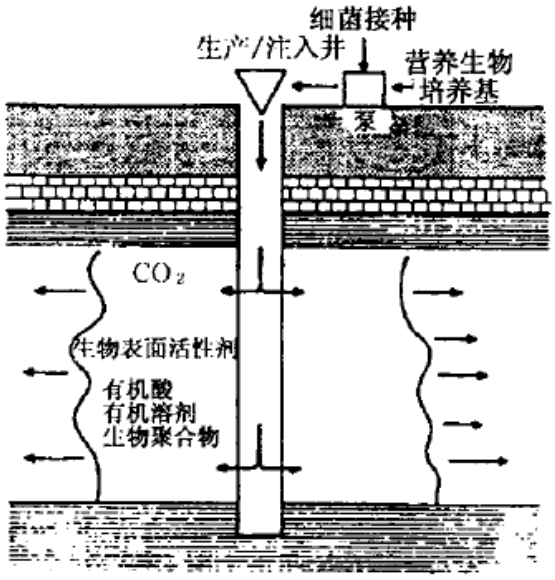


图 4－7　微生物采油应用方法分类框图

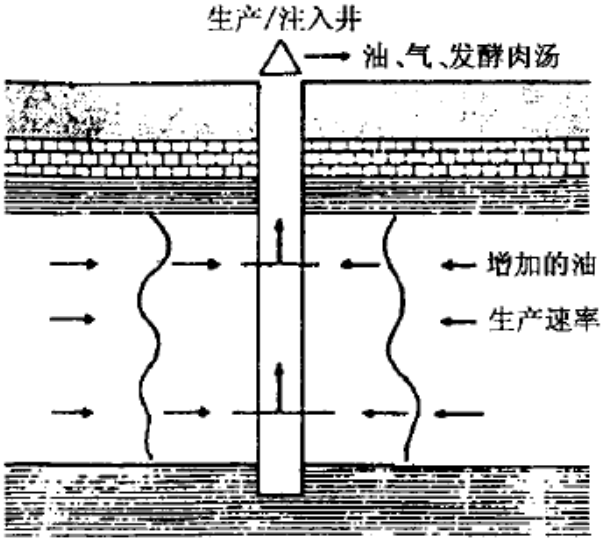
一、微生物吞吐

1.微生物吞吐采油机理

微生物吞吐又称生产井周期性注微生物。与稠油开采方法中蒸汽吞吐相似，微生物吞吐是往生产井中注入优选的微生物及其营养液，关井一段时间后，再开井采油，周而复始，所以又称周期性注微生物。关井时间一般为几天到几周，视微生物生长繁殖状况以及油层温度而定。当生产井的产量大幅度下降时，可再关井一段时间后继续生产，这种过程可周期性地重复。



(a) 注入井接种并关井后，井眼周围细菌迁移及代谢产物示意图（相当于吞吐工艺的“吞”阶段）



(b) 当井发生反应时，接种周期终端的原油生产示意图（相当于吞吐工艺的“吐”阶段）

图 4－8 微生物吞吐原理示意图

图 4－8 为微生物吞吐的原理示意图。在微生物吞吐中，一般是将微生物和营养液注入到油层，关井期间细菌在油藏环境中生长、繁殖、代谢，产生了包括气体（CO_2 等）、有机酸、有机溶剂和生物表面活性物及生物聚合物等代谢产物。这一过程称为注入井微生物接种。在这一过程中，井眼周围的细菌及其代谢产物由于井眼周围压力升高而向油层深部运移。这些细菌及代谢产物通过改善原油和岩石的物理、化学性质，例如有机酸通过溶蚀灰质胶结构，扩大孔道，增加油流能力；生物表面活性物质降低油水界面张力，乳化分散原油；微生物分解原油中的重质组分以及气体的降粘、溶蚀及增加岩石的渗透率。在开井生产过程中，由于井周围原油粘度的降低，岩石渗透率增加；地层能量增加，使原油产量上升，残余油饱和度下降。这一过程中，仍有一部分微生物及营养物留在地层继续进行生长、繁殖和代谢的生物化学反应，为下一个周期提供必要的接种基础。

2.微生物吞吐工艺

在微生物吞吐工艺中，吞吐井的选择至关重要。一般来说，油井有一定的含水，属于枯竭井，原油中含有较多的重质组分如蜡、沥青质等，井筒附近区域内具有一定的残余油。注入方式、注入速度以及注入接种的细菌浓度（密度）等注入参数必须结合油层特性、微生物生长特点和油藏环境，以便使微生物在地下这个微生物反应器中获得最大的活力。

微生物吞吐的方式有：

(1) 一次性从油套环空中注入地层一关井一生产；

(2) 多次从油套环空中注入地层一关井一生产；

(3) 多次从油套环空中注入地层，不关井。

我国胜利油田采用了（2）和（3）两种吞吐方式。

微生物用量的确定。微生物吞吐中每口井每次注入的微生物及其营养液的量和注入周期取决于油井的日产液量、含水率、原油的性质以及地层条件等多种因素。

在微生物吞吐实际操作中应注意：

(1) 微生物注入地层前先进行过滤，经过 $28\mu m$ 和 $10\mu m$ 的过滤器过滤；

(2) 确保微生物注入目的层，在注入井中下封隔器；

(3) 注入微生物之前，先用热水洗井，以使油套环空中的死油及其他污染物清洗干净；

(4) 要控制地层中硫酸还原菌生长产生的 H_2S 腐蚀井下管柱。

微生物吞吐中的监测内容有：

(1) 产出气分析。主要测定产出气中 CO_2 和 CH_4 的含量及其变化，以判断微生物是否代谢产生了 CO_2 和 CH_4。

(2) 产出水分析。测定产出水中的 Cl^-，H_2S，HCO_3^- 的含量及其变化，判断是否启动了未波及区。

(3) 产出油分析。测定原油的石蜡、沥青质粘度等，以及原油组分变化，判断微生物是否有降解原油、清蜡的效果。

(4) 产出液中细菌含量分析。判断微生物是否生长、繁殖良好。

(5) 产出液油水界面张力测定。判断微生物产物中是否有生物表面活性剂。

(6) 产出液中油、水及含水分析。判断微生物吞吐是否提高了原油产量。

3. 微生物吞吐实例：安塞油田王窑区

安塞油田为我国目前投入生产的较大型的低渗透油田，王窑区油藏为砂岩油藏。1996年在该区块进行了 10 口井的微生物吞吐的先导性试验，截止 1996 年 10 月底， 10 口措施井中有 6 口井见到了明显的效果，累计增油 541t。

二、微生物驱油

1. 微生物驱油的机理

微生物驱油的机理包含了微生物采油的所有机理，微生物及其代谢产物在微生物驱中都发挥了作用。但其中微生物本身、代谢产物生物聚合物和生物表面活性剂的作用更为明显。微生物驱油的示意图如图 4－10。

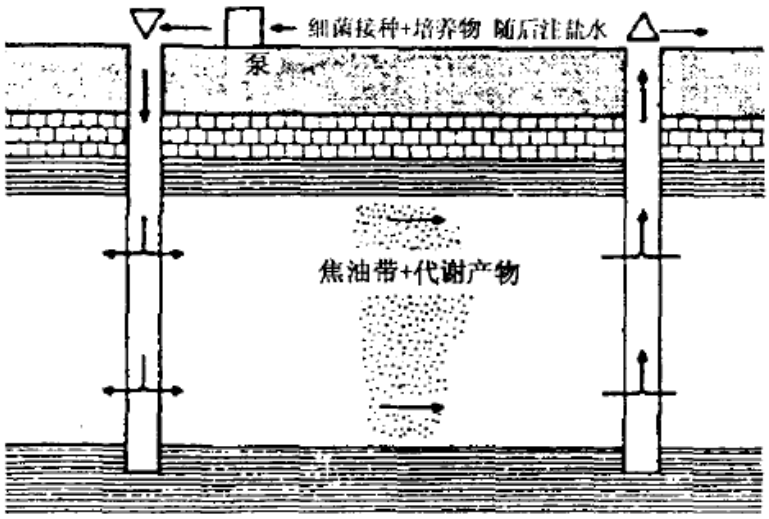


图 4－10　油层中接种细菌的代谢产物驱油示意图

微生物驱既改善了油藏的波及效率，又提高了驱油效率。微生物在地下的代谢过程中产生的生物聚合物，大大地提高了驱替相的粘度，降低了水驱油流度比；同时由于生物聚合物的吸附性，降低水相渗透率，降低水相分流量；此外，生物聚合物还可以堵塞高渗透地层，调整油层吸水剖面，提高注入水的波及区域，增加注入水的扫油面积，提高采收率。生物聚合物与人工合成的聚丙烯酸胺相比具有抗剪切、抗盐、不易水解降解等特点。因此，在高盐油藏提高采收率中具有良好的应用前景。微生物中能产生生物聚合物的细菌列于表 4－14 中。

生物表面活性剂。它能降低油水界面张力和乳化原油，改变油层界面的润湿性，从而改变油水对岩石的相对渗透特性；有的表面活性剂还能降低重油的粘度，增加原油的流度，降低剩余油饱和度。当然，微生物在地下发酵过程中产生的有机酸、酮类、醇类等有机溶剂也可降低表面张力，促进原油乳化，促进原油采收率的提高，但在此不归入生物表面活性剂。表 4－15为生产表面活性剂的常用菌种及其产生的生物表面活性剂。

表 4－15　能产生表面活性剂的细菌

微生物	微生物表面活性剂
裂烃棒杆菌	蛋白—脂类—糖类混合物
野兔棒杆菌	棒状杆菌分支菌酸
酵母嗜石油假性酶母	含蛋白脂类
枯草杆菌	枯草菌溶素
铜绿色假单胞菌	鼠李糖酯 PG—201
热带假丝酶母	多糖—脂肪酸混合物
球拟酶母	槐二糖脂
地衣杆菌株 JF—2	地衣菌类

生物表面活性剂和合成表面活性剂相比具有无毒，生产工艺简单，成本低（其成本为合成表面活性剂的 30%），驱油效率高（比合成表面活性剂的驱油效率要高 4～8倍）等特点。原西德的 F. Wagner 实验室提供的海藻糖脂等表面活性剂在北海油田进行的 EOR 试验中，驱油效率提高了 30%。同一般的合成化学表面活性剂相比驱油效果提高了 5 倍以上。

英国的 QMC公司研制的生物表面活性剂，可使油水界面张力降低到 10^{-2}mN/m 以下，采收率提高 37.7%。国内的渗流力学研究所成功地配制了低界面张力的稀表面活性剂体系，界面张力为 2×10^{-2}mN/m，耐温耐盐性均好，物理模拟实验的采收率比水驱高 20%～25%。

2. 微生物驱工艺技术

微生物驱油的设计程序是：

(1) 微生物菌种的筛选；

(2) 微生物在油藏条件下的繁殖试验；

(3) 微生物驱油岩的流动试验、物理模拟；

(4) 微生物驱油数值模拟、方案设计、优化；

(5) 微生物驱油矿物试验。

在微生物驱现场施工的注入阶段，大多采用现有注水工艺和设备条件，将细菌培养物（包括细菌、营养物和代谢产物）直接注入所选油层。可以混合后注入，也可以按顺序注入。若采用顺序注入方式，大多先注入营养物质再注入细菌菌体。营养物质主要为含氮和含磷的化学物质。向注入井中注入微生物和糖浆后，观察注入井压力，以及细菌繁殖代谢情况。

在微生物注入油藏后的关井及采油阶段，关井一段时间，待微生物及其代谢产物发挥作用以后即可开井采油。监测注入井压力、生产井的产油、产水、细菌浓度等参数。

微生物驱油一旦有效，在生产井就有反应：

(1) 对应油井原油产量上升，含水下降；

(2) 油井中产出菌浓度明显增加；

(3) 油井产出原油的物质性质发生变化；

(4) 油井井底流压和动液面上升。

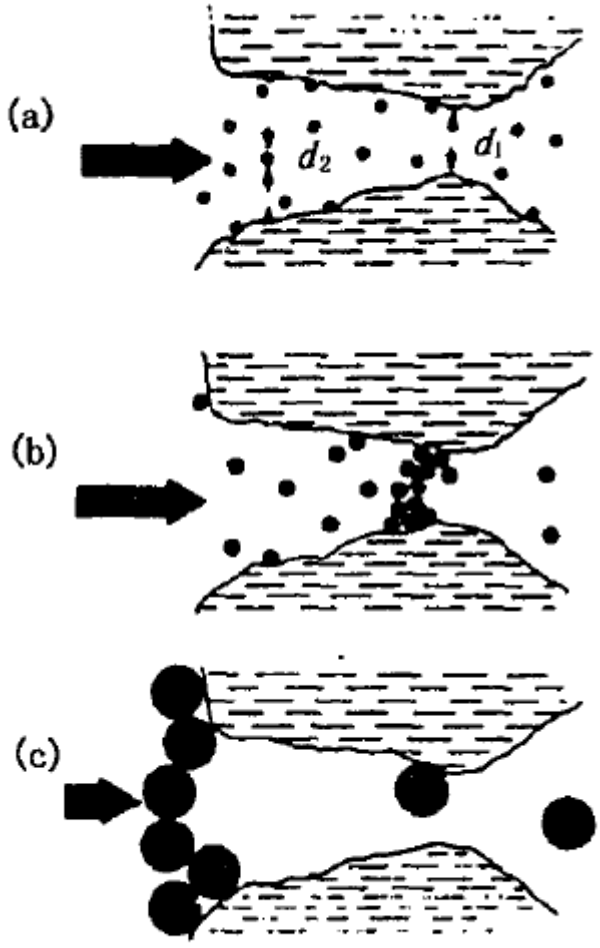


图 4－13　微生物堵塞机理

可按照相连的空隙间喉道的大小（d_1）与微粒直径（d_2）的之比，将微粒堵塞分成三种不同的体系：(a) 表面吸附在岩石表面上，引起较小的渗透率降低，$d_1/d_2 \geqslant 13$；(b) 不仅有表面吸附效应，也在岩心内孔隙喉道中堵塞，$d_1/d_2=4\sim6$；（。)除了堵塞和表面吸附效应外，还在岩心的进口面上形成滤饼，$d_1/d_2 \leqslant 2.6$

1）微生物堵塞

繁殖的微生物由于微粒效应（即微生物等视为有一定尺寸的微小颗粒），产生吸附滞留，而使岩石渗透率降低。微生物的微粒堵塞，取决于岩石孔道大小与细菌细胞或聚集体的大小之比。因此致密油层中更易被堵塞。因为在致密油层中，即使是单个细胞也会使孔吼堵塞，而在渗透率较大的油层中，只有较大的细胞聚集体才能堵塞孔道。

2) 生物膜形成堵塞

微生物的生物膜使微生物粘附在岩石壁面，在岩石孔隙壁面形成生物膜（其主要成分为胞外多糖剂生物体），它可从注入水中吸收一部分细菌参与堵塞，使堵塞机会增多，从而有效地减小高渗透层孔喉尺寸，降低其渗透率。

3) 生物聚合物的作用

微生物在地下通过代谢而产生的生物聚合物具有一定的分子尺寸，它可在孔道壁面上吸附。一方面导致孔隙的截面积更小，阻碍流体流动；另一方面可以降低水相渗透率，阻止水相流动，从而使注入水改变流向，扩大注入水波及面积。

2. 微生物调剖时应注意的问题

1) 增加微生物深入地层的深度

采用饥饿培养法培养有吸附性和繁殖力的瘦小细菌或没有吸附力的超微细菌。作用：有吸附性和繁殖力的瘦小细菌可预先吸附在大孔道壁面，无吸附力的超微细菌可进入油藏更深处，并在油藏深部的微小孔隙中滞留下来。在注入培养液过程中，吸附在大孔道中的饥饿的瘦小细菌就会恢复其原来大小，而且产生大量的胞外多糖代谢产物，进一步降低渗透率。

2) 充分考虑营养液中各组分在地层中的吸附量

由于存在物理吸附、化学吸附以及沉淀等作用，营养液中的各组分在地层中的吸附量不同。因此，在营养液注入过程中尽可能不将营养液各组分混合在一起同时注入地层。而应按滞留能力大小的顺序，优先注入滞留量大的组分，后注入滞留量小的组分，从而最大限度地降低营养液在井筒附近的消耗量。

2. 微生物调剖时应注意的问题

1) 增加微生物深入地层的深度

采用饥饿培养法培养有吸附性和繁殖力的瘦小细菌或没有吸附力的超微细菌。作用：有吸附性和繁殖力的瘦小细菌可预先吸附在大孔道壁面，无吸附力的超微细菌可进入油藏更深处，并在油藏深部的微小孔隙中滞留下来。在注入培养液过程中，吸附在大孔道中的饥饿的瘦小细菌就会恢复其原来大小，而且产生大量的胞外多糖代谢产物，进一步降低渗透率。

2) 充分考虑营养液中各组分在地层中的吸附量

由于存在物理吸附、化学吸附以及沉淀等作用，营养液中的各组分在地层中的吸附量不同。因此，在营养液注入过程中尽可能不将营养液各组分混合在一起同时注入地层。而应按滞留能力大小的顺序，优先注入滞留量大的组分，后注入滞留量小的组分，从而最大限度地降低营养液在井筒附近的消耗量。

四、微生物清防蜡和降解原油

有些油井结蜡现象非常严重，常常导致抽油杆被卡而停产。过去采用热油循环、化学溶剂和分散剂、机械刮蜡片等方法控制结蜡。有些井清蜡频繁，导致采油成本大幅度上升。微生物清蜡是向油井套管的环行空间注入一定量（注入量由井深和动液面确定）的细菌溶液，然后关井一段时间，使微生物能分散和接种到井筒和井近地层，通过微生物减低石蜡和其他重质组分的含量的方法。

众所周知，在油藏条件下，原油中石蜡组分溶解于原油中，在采油过程中，由于体系的温度和压力发生改变，致使体系的相态发生变化，石油中原来处于液态的石蜡就会以固态的形式沉淀下来。石蜡的沉淀、运移的粘土及其他微粒，以及沥青质的沉淀等结合在一起，就可造成井筒及井眼附近地层堵塞。一般来说，酸化清洗井筒时，对石蜡是无效的。而微生物可以降解石蜡，使石蜡的分子结构变化，不至于沉积下来。

在石油生成学说——有机成油学说中，石油是有机物转化而形成的。有人认为微生物在石油从有机物转化的过程中起着重要作用，细菌破坏轻质碳氢化合物以及碳氢化合物的易挥发性，使原油中芳香烃大量地积累，从而形成重油。此外，在油井附近地面，储罐等原油渗漏处，原油溢到地面土壤里，由于微生物的降解以及低分子量的碳氢化合物的蒸发，经过几个月的时间，这些渗出的原油就完全消失。上述两个例子说明了微生物与石油的关系。

由于有些细菌对蜡类脂肪烃的代谢速度高于芳香烃，对长链脂肪烃的代谢速度高于短链脂肪烃。这样，这些细菌在井筒中与原油接触后，优先使长链的高分子脂肪烃降解，从而达到清蜡的作用。此外，细菌的某些代谢产物（如溶剂）对井筒或近井区域孔隙中的蜡沉淀有良好的溶解作用，从而使油井恢复产能。

微生物清蜡和降解原油的机理在于：

(1) 降低重质原油的平均相对分子质量，即细菌能把重油中产生相对分子质量高的物质如沥青烯、树脂酸等分解，产生相对分子质量微低的化合物。由于重油产生相对分子质量的降低，使重油粘度大幅度下降。

(2) 细菌以重油中的烃类或重油中的其他组分为碳源，细菌生长过程中产生的生物化学反应，生成生物表面活性剂，将重油乳化，形成了水包油或油包水的乳状液，从而降低重油粘度。

因此，用于清蜡和重油降粘的细菌必须具备以下两个条件：一是该细菌可以生长在稠油中，并以稠油作为唯一的碳源和能源；二是细菌可以产生生物表面活性剂。用于清蜡和降低原油粘度的微生物见表 4－19。

表 4－19 与石油降解和合成有关的生物种类

小球菌	无色球菌	假球菌	诺卡氏菌
八达球菌 *Lutea*	棒状杆菌	彩色细菌	假丝酵母菌
沙曾氏菌 *Maruxaarubia*	分枝杆菌	节细菌	*Cladiosporum*
假单孢菌	芽孢梭菌	不动细菌	青霉菌 *Glaucam*
红假单孢菌	脱硫弧菌 *Desulfuricans*	黄杆菌	曲霉苏
		短杆菌	*Protothca Zopfh*

微生物清蜡是一种可以取代化学清蜡（溶剂和分散剂）、机械清蜡的一种新的清蜡技术。这项技术具有施工简便，见效期长，成本低，无环境污染等优点。而溶剂和分散剂等化学清蜡中使用的化学剂常常会污染环境，热法清蜡会消耗大量燃料，而且

常常导致地层伤害。尽管微生物清蜡有许多优点，但由微生物产生的负面效应液不可忽视。一是清蜡细菌会改变原油的性质和品位；二是清蜡细菌会促使硫酸还原菌的生长，导致严重的腐蚀问题。因此，在实际应用中对产出液进行严格的监测，定期测量产出液中细菌的个数，分析产出液中的悬浮固体、溶解氧、硫化氢及铁离子等，一旦发现有硫化氢产生，必须采取措施抑制硫酸盐还原菌的生长，从而降低硫化氢的产出量。

2.微生物清防蜡实例（胜利桩西油田）

微生物清防蜡应用在胜利桩西油田取得了比较明显的效果，下面将介绍胜利桩西油田清蜡试验中的油井结蜡、菌种选择、注入工艺及应用效果。

2) 菌种选择

根据桩西油田的油井和地层条件，选择了微生物 Para—Bax.s和 Ben—Bac 两种细菌作为清防蜡的菌种。前者主要用于控制结蜡，后者用于处理胶质沥青。这两种细菌分别以石蜡和胶质沥青为自己的营养基。将长链烃类降解为碳链相对较短的烃类，直接减少原油中含蜡量和胶质成分，从而可以降低凝固点和粘度。Para—Bax.s和 Ben—Bac微生物应用条件见表 4－21.

3) 注入工艺

采用的工艺为吞吐法。步骤是:

(1) 注微生物前，先用热水洗井，清除井筒中的死油和其他污染物及对细菌生长不利的物质;

(2) 从环空中注入微生物及 2%KCl水溶液;

(3) 关井 3d，待微生物在井底和近井地带繁殖后再开井生产;

(4）生产 15～30d后再补充注入一定量的微生物及 2%KCl盐水，以保证油层和井底仍存有一定量的微生物。

4 应用效果

在采用微生物清防蜡措施的 10 口井中，有 8 口见效，微生物清蜡后原油性质参数变化及油井增产效果见表 4－22。

另外两口油井无效的原因在于：一是油层渗透性差，单井产液量太低；二是油层温度太高（115℃），已处于所用微生物的极限应用温度。这一点可以根据该井原油性质在采取增产措施前后无变化的特征判定为微生物不能在地下生存。

小　　结

随着微生物学中遗传工程学和基因工程学的发展，越来越多的适合于不同油藏条件下的微生物被应用于提高采收率中。即使在现有的技术经济条件下，微生物采油仍然是一种有经济潜力的提高采收率方法。该技术可以用于油井近井地带及井筒处理，油藏深部的调剖，以及整个油藏的驱油，还可以用于地下原油的改性，甚至可进行原油就地裂化。微生物采油具有投资少，见效快，无污染，施工工艺简单，最终采收率高等优点。但也存在着微生物聚集体污染地层，堵塞地面注入设备，硫酸盐还原菌产生 H_2S 带来的腐蚀，以及微生物降解已注入的表面活性剂或聚合物等问题。因此在微生物采油实施过程中尽可能加以考虑，使之产生的负面效应降到最低。

要使微生物采油技术获得成功，必须进行详细的地质研究，通过测井、地震、岩心分析、试井、示踪剂注入以及油藏数值模拟等手段，进行油藏精细描述；广泛开展室内的微生物配伍性实验，为油藏筛选出良好的微生物菌种。在微生物采油现场试验中，应用各种监测技术，对产出液中的油气水进行全面分析，定期测量产出物中细菌的含量、水中盐离子的变化，为微生物采油方案的调整提供依据，进一步提高微生物采油的效率。

由于微生物采油技术涉及边缘性和交叉性学科，需要包括微生物学家、油藏工程师、地质学家、化学家等各学科的研究人员团结协作和共同努力，培育出适应性广、易于控制、高效率的微生物菌种，对微生物采油机理（特别是注入细菌及其营养液与油藏岩石、盐水间复杂的相互作用）、微生物采油的油藏数值模拟软件开发和完善、微生物采油的优化以及监测技术等方面进行坚持不懈的研究，使微生物采油成为一项工业化的提高采收率方法。

第五章　聚合物驱

聚合物驱（Polymer Flooding）是指通过在注入水中加入水溶性高分子量的聚合物，增加水相粘度和降低水相渗透率，改善流度比，提高原油采收率的方法。聚合物驱只是在原来水驱的基础上添加了聚合物，因此它又称改性水驱（Modified Water Flooding）。聚合物驱的机理是所有提高采收率方法中最简单的一种，即降低水相流度，改善流度比，提高波及系数。一般来说，当油藏的非均质性较大和（或）水驱流度比较高时，聚合物驱可以取得明显的经济效果。

聚合物驱始于50年代末和60年代初。美国于1964年进行了第一次聚合物驱矿场试验，随后在1964～1969年间，进行了61个聚合物驱项目，从70年代到1985年，共进行了183个聚合物驱项目，且一般都取得了明显的经济效益。那时美国之所以开展了如此多的聚合物驱项目，其原因在于当时美国国内优惠的税收政策以及国际油价的上升。除美国之外，前苏联的奥尔良油田、阿尔兰油田，加拿大的Horsefly Lake油田、Rapdan油田，法国的Chatearenard油田，以及德国、阿曼都进行了聚合物驱工业化试验，原油采收率提高了6%～17%。但是，随着国际油价的下跌，国外的聚合物驱项目越来越少，美国甚至停止了聚合物和其他化学驱项目的研究和试验。而在加拿大、德国及中国，聚合物驱在提高采收率方法中仍占有明显的地位。

在中国，聚合物驱得到了充分的发展。自1972年在大庆油田开展小井距的聚合物驱试验以来，特别在“八五”、“九五”期间，在聚合物驱室内研究、数值模拟技术、注入工艺以及动态监测技术等方面进行了大量的研究和试验，为聚合物驱在中国进入工业化应用阶段奠定了基础。目前，聚合物驱在中国的大庆、大港、河南、吉林、胜利等油田已进入工业化应用阶段。到“八五”末，中国已进行了19个聚合物驱矿场试验，聚合物驱增产原油168×10^4t。1997年累计注入聚合物干粉23700t，工业应用面积达101.3km^2，全国聚合物驱年增产原油达303×10^4t。中国大庆油田的聚合物驱已成为世界上最大的聚合物驱项目。到2000年中国聚合物驱年增产原油将达$500\sim700\times10^4$t。

本章将介绍流度控制用聚合物类型，聚合物溶液性质，聚合物溶液在多孔介质中流动特性，聚合物驱室内研究与设计，以及聚合物驱的实施与监测等方面的内容。

二、生物聚合物黄胞胶（Xanthan）

黄胞胶（Xanthan）是由黄单胞菌属野茹菌（*Xanthomonas Campestris*）微生物接种到碳水化合物中，经发酵而产生的生物聚合物。

1. 黄胞胶的化学结构

黄胞胶的化学结构如图 5－1 所示。其主链为纤维素骨架，其支链比 HPAM更多。黄胞胶掺氧的环形碳键（吡喃糖环）不能充分旋转。因此黄胞胶的这种分子靠分子内相互阻绊作用，在溶液中形成较大的刚性结构，从而增加水的粘度。

从黄胞胶的化学结构可以看出，黄胞胶每个链节上有长的侧链，由于侧链对分子卷曲的阻碍，所以它的主链采取较伸展的构象，从而使黄胞胶有许多特性，如增粘性、抗剪切性和耐盐性。

2. 黄胞胶的生产

生产黄胞胶采用发酵工艺。经过仔细筛选的能够产生需要的黄胞胶的菌种在营养液中发酵。培养液的体积逐步扩大，直到细菌的数目达到可在 $50m^3$ 的发酵罐中到处生长，其养料基本是糖及一些盐类。

发酵过程中的主要问题是要保持发酵罐无菌，从而保证没有其他的菌类生长。停止发酵罐的通风就等于终止了发酵。发酵得到的产品是高粘的淡黄色肉汤状液体，其有效聚合物含量因发酵条件和菌的活性而异，一般在 2%～4%之间。对发酵液的电镜观察发现，在溶液中的死菌彼此分离，其平均长度在 $0.8\mu m$ 左右。这些死菌是堵塞油层的潜在因素。

可以通过有机溶剂沉淀或蒸发的方法将其制成粉末，也可以用超滤的方法将其浓缩至 10%～12%。这种发酵产品由于浓度较低，所以提浓和制成固体耗能大，而且运输费用也较大。但在应用这种胶的油田或现场附近生产可以减少上述费用。

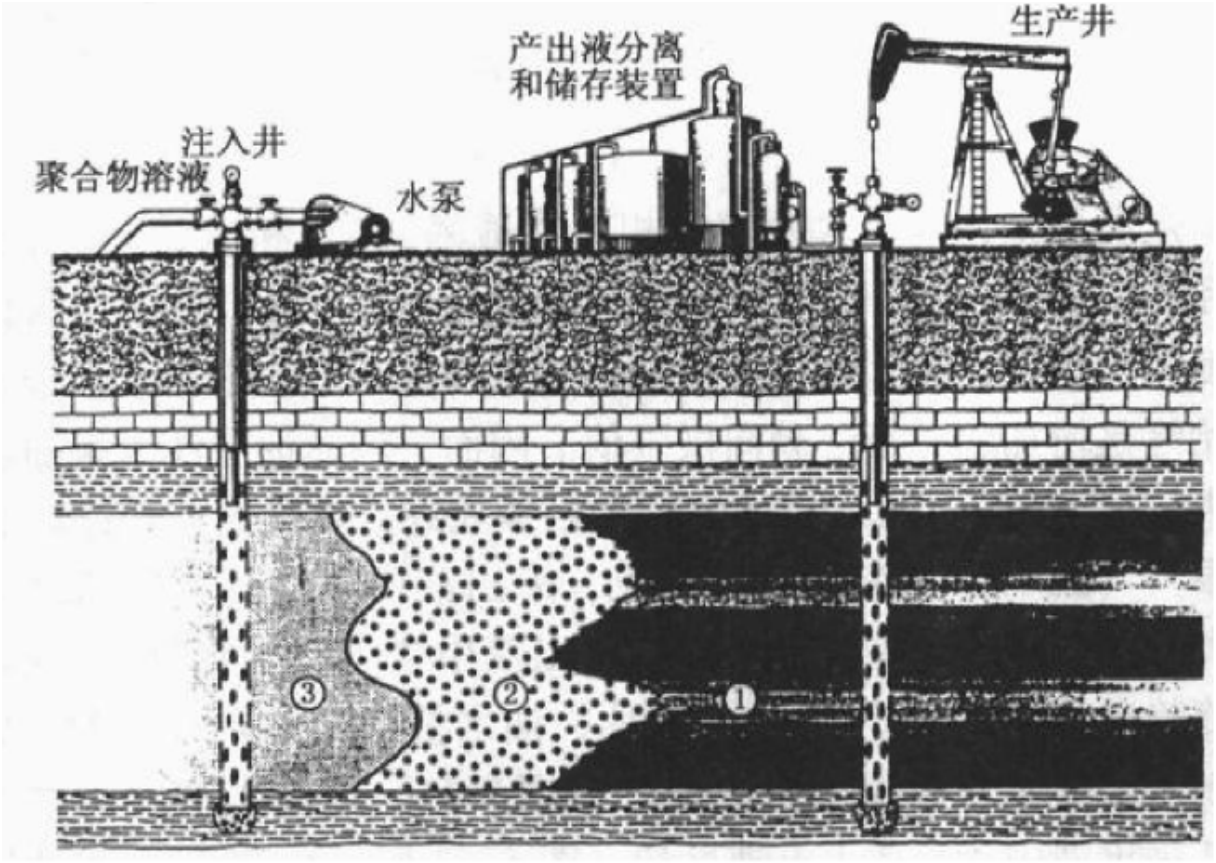


图 5－2　聚合物驱示意图

1—油带；2—聚合物溶液；3—驱替水

二、聚合物的调剖作用

调整吸水剖面，扩大水淹体积，是聚合物提高采收率的一项主要机理。因为在聚合物的调剖作用下，油层水波及体积的扩大，将在油层的未见水层段中采出无水原油。这就是说，油层水淹体积扩大多少，采出油的体积也就增加多少。

聚合物的调剖作用只有在油层剖面上存在渗透率的非均质状态时才能发生。在通常水驱条件下往往发生注入水沿不同渗透率层段推进不均匀现象。高渗透率层段注入水推进快，低渗透率层段注入水推进慢。加上注入水的粘度往往低于原油粘度，水驱过程中高流度流体取代低流度流体的结果，导致注入水推进不均匀的程度加剧，甚至在很多情况下会出现高渗透率层段早已被注入水所突破，而低渗透率层段注入水推进距离仍然很小的情况，致使低渗透率层段原油不能得到有效的开采。

在注入聚合物的情况下，由于注入水的粘度增加，油、水粘度比得到了改善，不同渗透率层段间水线推进的不均匀程度缩小。因此，向油层中注入高粘度的聚合物溶液时，可以加大高渗透率层段水突破时低渗透率层段的水线推进距离，调整吸水剖面（图 5－5），在图 5－5 中，由于 $K_2>K_3>K_1$，水驱时注入不沿 K_2 层位舌进，当注入水从 K_2 层到达生产井后，K_1 和 K_3 层还留有大量的原油未被波及。但是当注聚合物后，聚合物段塞首先进入高渗透的 K_2 层，由于粘度增加以及吸附（滞留），导致 K_2 层中流动阻力增大，迫使后续注入水进入 K_1 和 K_3 层，从而启动低渗透率层位，提高垂向涉及效率。扩大油层的水淹体积，提高油层的采收率。

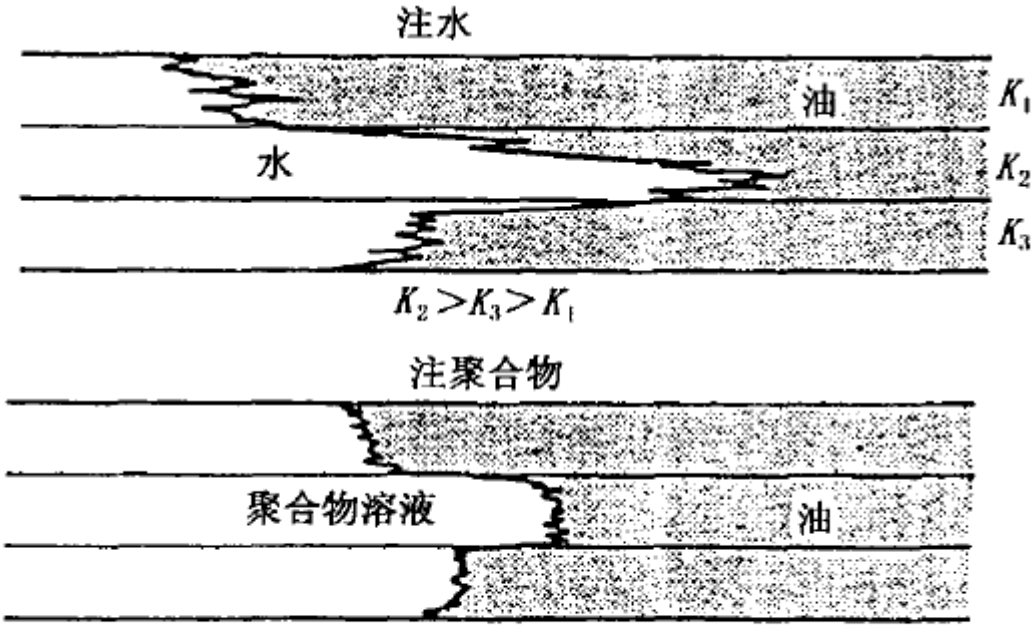


图 5－5 渗透率级差对垂向波及系数的影响

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应用，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。