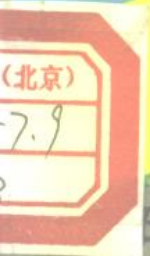


微生物提高石油采收率



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系美国石油科学进展丛书之一,介绍微生物提高石油采收率的技术及进展。本书不但系统介绍了应用微生物进行三次采油的条件、菌种、方法及今后的潜力,而且详细介绍了室内的研究方法、评价试验、驱油模型等,并介绍了美国各州油田的油藏条件及试验结果。并论述了有关微生物堵塞及细菌对人类的健康危害等问题。

本书共分十一章,由各方面有关专家编写,是一本较系统、较全面的微生物提高采收率的科技书籍,可供有关采油工程人员、研究人员、大专院校采油专业师生参考。

本书第一、二、三、四、六章由金静芷译;第五、十章由秦同洛译;第七、八、九、十一章由王修垣译。

DP41/22

图书在版编目(CIP)数据

微生物提高石油采收率 / [美] Donaldson, E. C 等著.
—北京:石油工业出版社, 1995.4 (石油科学进展; 22)
书名原文: Microbial enhanced oil recovery
ISBN 7-5021-1211-1

I.微…

II.D…

III.石油—微生物堵水—采收率(油气开采)

IV.TE357.9

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)
石油出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开 1/2张 229千字 印1—1200

1995年4月北京第1版 1995年4月北京第1次印刷

定价:18.00元

目 录

第一章 绪言	(1)
一、微生物提高原油采收率的必要性	(1)
二、本书梗概	(3)
三、提高原油采收率的技术限制	(5)
四、微生物增加原油产量的方法	(6)
参考文献	(8)
第二章 地下环境	(10)
一、引言	(10)
二、地下盐水	(10)
三、地下温度和压力	(12)
四、石油	(14)
五、注水	(15)
六、储层岩石	(17)
参考文献	(22)
第三章 油层内就地应用微生物的潜力	(24)
一、引言	(24)
二、历史回顾	(24)
三、油田试验	(26)
四、油层的限制	(28)
五、溶解固体	(34)
六、微生物提高石油采收率的应用	(42)
七、结论	(43)
参考文献	(44)
第四章 地质生物学与微生物提高原油采收率	(49)
一、引言	(49)
二、地质生物学	(49)
三、油层内就地利用微生物提高采收率	(49)
四、油层微生物学	(54)
五、原油的生物降解	(55)
六、微生物活动对油层的影响	(57)
七、与微生物提高原油采收率有关的微生物生态学的物理化学特性	(60)
八、结论	(61)
参考文献	(62)
第五章 在平板玻璃模型 (Hele-Shaw Model) 中用细菌和聚合物溶液驱油	(65)
一、引言	(65)

二、使用的材料	(65)
三、仪器	(66)
四、试验程序	(66)
五、结论	(74)
参考文献	(74)
第六章 依靠厌氧和兼性厌氧菌驱替原油	(75)
一、引言	(75)
二、微生物的油田应用	(79)
三、小结	(81)
参考文献	(81)
第七章 提高石油采收率中的微生物堵塞	(83)
一、引言	(83)
二、注水用的注入水中的细菌	(83)
三、细菌堵塞的前期研究	(84)
四、微生物在油田中堵塞的机制	(88)
五、微生物堵塞机制的证实	(89)
六、应用	(96)
参考文献	(98)
第八章 细菌通过富含营养物的人造砂岩柱原地采油	(100)
一、引言	(100)
二、材料和方法	(101)
三、实验结果	(104)
四、讨论	(106)
参考文献	(108)
第九章 用微生物和合成表面活性剂在肖氏狭缝型渗流模型中驱油	(109)
一、引言	(109)
二、实验用的材料	(109)
三、实验方法	(110)
四、普卢兰尼克表面活性剂的影响	(111)
五、用聚合物-表面活性剂溶液驱油	(116)
六、细菌培养物的影响	(117)
七、相关群	(119)
八、结论	(120)
参考文献	(120)
第十章 提高采收率方法中所用化学剂的生物降解	(121)
一、引言	(121)
二、生物降解与生物降解能力的基础	(122)
三、影响生物降解及降解速度的因素	(123)
四、在提高原油采收率中所用化学剂的生物降解能力	(124)
参考文献	(137)

第十一章 在微生物提高原油采收率中所用细菌的潜在健康危害·····	(140)
一、引言·····	(140)
二、健康危害·····	(140)
参考文献·····	(143)

第一章 绪 言

一、微生物提高原油采收率的必要性

当今从地下油藏开采石油所采用的工艺技术尚未发展到超出最终采油量只占原始地质储量的 $1/3 \sim 1/2$ 的阶段。所以,提高原油采收率技术的潜在储量目标比用常规方法可能产出的储量大(晏, 1986)。用化学方法提高原油采收率的工作处于边际成功,用其采油获得少量的经济增益。一种明显不同的提高原油采收率方法已被提出,1980年,美国能源部以赞助几项设在大学的研究项目的方式开始了一项新方法的研究,以便试验用微生物提高原油采收率的潜力。细菌能用来采油是 Beckmann (1926) 提出的,而 ZoBell (1947) 进行了补充试验,得出微生物能将油从砂粒上释放出。苏联科学家 Kuzenetsov (1961)、Kuznetsov 等 (1962)、Ivanov 等 (1982)、Belyaev (1983) 在微生物提高原油采收率领域中也做出了重要贡献。

美国能源部资助的研究的成果和其他的世界各地的研究成果发表在两届国际微生物提高石油采收率 (MEOR) 会议的论文集中 (Donaldson 和 Clark, 1983; Zajic 和 Donaldson, 1985)。

当具备基本的营养物和合适的环境条件时,微生物培养物能将原油的一些组分合成各种生物化学产品。事实上,在最深到 2000m 深度的地下油藏中已发现各种类型的微生物群体 (Petzel 和 Williams, 1986)。一般的观念认为是由于钻井、完井、修井过程或二次采油的注水将微生物引入的。在俄克拉荷马大学进行的研究中,有小部分工作是确定微生物孢子能否在地下油藏中经历地质年代而存活。无论是新近引入的,还是由于油、水生产引起压力-温度变化而萌生的,在深的孔隙地层中存在微生物群体这个事实确证油藏中不是不能繁殖生物,这个事实对发现能提高原油采收率的微生物、方法、工艺等非常基本的理论研究起积极的促进作用。

由微生物作用石油产生的代谢产物的范围相当宽,取决于环境条件(压力、温度、盐度、pH 值和有无氧的存在)、维持细胞代谢的营养物(氮、磷等)与石油相互作用的特种细菌。一般来说,代谢产物可以是气体(甲烷、氢、二氧化碳、硫化氢)、羧酸(甲酸、乙酸、戊酸)、溶剂(醇类、醛类、酮类)、聚合物(蛋白质类、多糖类)、表面活性化合物(多阴离子类脂类)以及其他许多从单体到十分复杂的大分子的各种化合物。由于微生物产生的高分子量聚合物的分子是不相等的而且复杂,其中许多聚合物的化学结构尚未明确。然而,重新强调这些可能用于石油开采和加工的产物应引起对微生物生物产物的化学结构和性质的测定更多的重视。

就石油来说,进行微生物及其产物的研究为了:(1) 开发能提高二次和三次采收率的产物;(2) 通过降低粘度和界面张力使重油流动;(3) 使油胞能注入石油储集层,在层内就地产生生物产物提高原油采收率;(4) 研究油藏微生物生态学。本书的重点是第一条,目的说明一些发展的技术和微生物提高原油采收率具有的潜力。

微生物培养物实际用于地下油层时,对微生物培养物有若干限制。对原油采收率有实际

重要意义的任何一种原地应用法来说，微生物必须能运移到或被输送到油藏深部，而且，它们在地下环境条件下一定能增殖的，因此，必须在注入水中供应油藏中没有的而生长所需的营养物。

温度升高时，微生物受重金属的中毒度增加；由于在油层盐水中常存在重金属，在地底下温度的增加（ $25^{\circ}\text{C}+18^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 深度）可抑制微生物培养物原地应用的有效性。因此，应在地下的温度和压力条件下用储层流体试验准备用于油藏的微生物。Bubela (1983) 试验了油层环境条件对微生物培养物的影响，观察到以 60°C 和 20000kPa 压力的条件时铜的毒性加大，而形态由杆形变成球形、小球形。若代谢的改变（包括营养物需求和代谢产物）与形态的改变同时发生，则在大气环境条件下试验时显然可用于提高原油采收率的一些微生物在油藏条件下可能变得无用了。对微生物提高原油采收率的这些特性并没有全面作过试验，但这些特性可部分解释已报道的直接油田应用所取得的那些否定结果。为了说明这个论点，Marquis (1983) 报道了在所有的温度下高压使微生物生长速度下降。因此，应在模拟地下环境条件下试验准备供地下应用的微生物体系，或者在这样条件下分离所选的微生物培养物。或许油藏本身是一个寻找能原地提高原油采收率的微生物的较佳源区。对油藏生态学未曾全面调查过，但大家知道需氧菌群体在注入井周围生长，从深油层中已分离出兼性和厌氧菌。Grula 和 Sewell (1983) 从加利福尼亚州长滩的威明顿 (Wilmington) 油田 1000m 深度处的原油和盐水样中分离出与厌氧的脱硫弧菌一起的兼性细菌，这种兼性菌是革兰氏阴性无孢子生成的游动杆菌，可产生粘性生物聚合物。这表明一起生长时其与脱硫弧菌独特的协同关系，脱硫弧菌显得较通常生长快和硫化氢的产生增多。这个发现对石油生产来说并不是好事，因硫化氢产量增加可加重腐蚀，而粘性生物聚合物可抗用来控制脱硫弧菌的常规杀菌剂。尽管这些结果并不是期望的，但就微生物提高原油采收率而言，在油田深部发现可存活的产生聚合物的兼性菌是有意义的，因它意味其它细菌也可存在于油层中，确实可能对残余油的流动有影响。

Lazar (1983) 从适合油藏条件的不同地点分离出混合细菌培养物，混合培养物中鉴别出的菌种有假单胞菌、埃希氏菌、粘质节杆菌、分枝杆菌、微球菌、消化球菌、芽孢杆菌、梭状芽孢杆菌等。他们发现混合培养物较纯菌株释放原油更有效。对七个油田进行了接种，但只有两个油田反应良好，增加原油产量 $16\%\sim 200\%$ 。但这两油田增加原油产量持续了两年。其他油田没有良好反应是由于含盐量高和渗透率低的关系，因此，和选作供研究的油田常有的情况一样，选择作微生物提高原油采收率决定性的先导性研究的油田十分缺乏。

用好氧菌的混合培养物处理油田的原油在油层以外生产表面活性剂型的生物产物，随后加入注入水中的设想是由蒋和秦 (1983) 在中国进行研究中。他们发现原油需氧发酵产生的生物表面活性剂很易与原油和水形成微乳液，与原油相比其粘度降低很多。发酵产物与粘度为 2500 厘沱的原油以 $1:1$ 比率混合时，该混合物的粘度在 $12\sim 46$ 厘沱间。若能经济地大规模进行发酵并用于油田（尤其是高饱和原油的油田诸如上述高粘油的油田），无疑有可能显著提高原油产量。生物表面活性剂比大多数合成洗涤剂优越，因它们不像洗涤剂那样对大多数油田水中都有的溶解盐敏感。Hitzman (1983) 综述了有关微生物提高原油采收率油田应用的文献，介绍了 200 多个油田试验。虽然在大多数实例中接种的井位于物性很差的油田内（非均质、低孔隙度、低渗透率、低原油饱和度），但许多井对微生物处理有良好反应。由于从油田应用中取得了经验，才有较复杂的方法，在技术上取得进步。研究者们是以没有预处理的简单的单井接种开始的，发展到较复杂的注入低矿化度水缓冲带、注入各种营养

物、建立细胞生长的发酵周期等等。在某些实例中，处理工艺是简单的单井清洗，应用如梭状芽孢杆菌的细菌在生产井周围造成高压，然后突然释压将微粒和其他碎屑驱入井筒。在另一些实例中，处理目的是长期促使大部分油层增产原油。在油层内微生物原地生长显然引起油层内的化学和岩石物性的变化，从而得出肯定的微生物提高原油采收率的结果。从综述中得出的主要结论是：适合微生物提高原油采收率的油层温度和压力可能与特定实验室条件所得出的不一样。但这个问题尚须进行细致的实验室和油田试验来解决。

已报道的几个油田的成功意味微生物提高原油采收率有可能是有经济效益的，因而是可行的。但那些失败的例子尚待全面了解，今后对油田应用方面的专门研究可能会解决其中的一些问题。

二、本书梗概

第二章从概略评述作为微生物生长和转移体系的地下环境开始。地下的可渗透的多孔的地质层组是一种与通常用来生长微生物的实验室环境大不相同的环境。其温度随深度而增高，从平均地面温度起每千米深度平均增温 18°C 。因此，在 1000m 深度处的温度约为 45°C ，在实验室条件下这样的温度是许多种细菌的极限生长温度。然而，有些微生物能在深达 2000m 的油藏中存活 (Petzel 和 Williams, 1986)，那里的温度约 63°C 、流体压力约 20MPa。大概由于高孔隙压力影响的缘故，微生物的形态从杆形变成球形。这些微生物明显适应高含盐量的油层，在实验室内高含盐量是细菌生长的另一种抑制作用。这些微生物还显然以能存活的细胞形式在缺少实验室条件下供微生物生长所使用的富有营养混合物的情况下继续存在很长时期。因此，从表面上分析地下环境对微生物生长的影响来看，显然是抑制生长的：高温和高压可限制生长；高的含盐量大大超过实验室条件下微生物生长的极限；缺少基本营养物（磷酸盐、氧、硝酸盐等）；以及孔隙介质阻止微生物的转移。地下环境必须能维持微生物生长，因此，应对建议原地应用的任何微生物培养物在大体上能模拟实际地下环境的装置中进行研究。应将微生物置于孔隙压力和温度与某特定地下深度的压力和温度相类似的含盐水的岩石中 (Donaldson 等, 1980)。

已达到二次采油经济产油量极限的油藏大概是应用微生物提高原油采收率的那些油藏，这些油藏只要在地面条件下分离出适合微生物提高原油采收率的培养物时都可应用该法。微生物随原先流体流动途径从注入井远移到生产井大概对提高采收率不会有效，除非微生物通过细胞生长而产生的生物聚合物和其他代谢产物或生物量对较大孔隙中的流体流动形成封堵，并吸附在孔隙表面（在第三章中详细论述），这就改善注入水波及系数，还使水改向进入未波及的高饱和油层带，如低渗透率层带。若注入的微生物产生大量生物聚合物，提高的产油量的相当部分可能是由于改善了注入流体的流度比的结果。另一方面，有些微生物在厌氧环境（如油层）中产生大量的二氧化碳，因此，若控制微生物生长，就可应用这类微生物长时期提高整个油层的压力，或通过油-水-岩石界面处二氧化碳的产生原地泄油。

在厌氧环境中的微生物显然不消耗石油的烃组分，因此，石油不能作微生物的营养物。所以，必须供应充分量的厌氧菌所需的营养物（溶解在注入水中）来维持微生物在油层内就地生长。一些油田的试验 (Donaldson 和 Clark, 1983) 表明：为了长期（一年或更长）维持油层中细菌的生长，需要周期性接种微生物与注入基本营养物的稀溶液。一些微生物如脱硫弧菌属在油藏中长期存在，而通过周期性的油层接种，长时间地维持了所注入油层的微生物。

物提高原油采收率的培养物的生长。

第三章专门讨论有关微生物提高原油采收率的原地微生物应用的潜力。留在原处的原油是被毛细管力和在油层矿物上的化学吸附力所截留的,所以,要驱替这些剩余油需要以化学作用、热或溶剂的形式向油层增加大量的能量。一种向油层和其他油田处理作业提供能量的可能来源来自微生物。各种类型的微生物(需氧的、厌氧的、嗜温的、嗜热的)产生大批化合物作为它们的代谢产物,产物的类型和产量取决于专门的微生物菌落、供其生长的营养物和主要的环境条件。这些产物的范围有气体(二氧化碳、氢、甲烷)、聚合物(多糖或蛋白)、表面活性化合物(一般是聚阴离子类脂)、低分子量溶剂(如醇和酮)、低分子量羧酸。实验室试验表明:(1)代谢产物中有些能从充填的砂柱和岩石中释出油;(2)有些培养物能降低重油的粘度;(3)聚合物可用于封堵高渗透率层带和通过流度比的控制驱替油。在微生物学家和工程师的共同监督下精确控制的先导性试验是为开发这个潜在新技术按油田大小确定工艺的规模所必需的。改善环境条件和营养物能在很大程度上控制微生物产物的类型和产量。此外,微生物经变异呈现出令人吃惊的适应新环境(环境和营养两方面)的性质,这些性质使工程师在应用微生物体系方面有相当大的灵活性(Grist, 1983)。

为此,在第四章讨论地球生物学。当微生物在地下的地质环境中展开活动时,地质、矿物、水文、地球化学等诸方面的环境将对微生物起深远的影响,换句话说,微生物群体对岩石和流体有些影响。地质上的最主要变化是:(1)溶解矿物的沉淀,尤其是碳酸盐;(2)由于孔喉中的沉淀使渗透率改变;(3)孔隙度改变(或增加或减小),视溶解盐的平衡和有机酸的产物而定。

继微生物和油层间相互作用的一般理论论述后,第五章直接对实验室观察 Hele-Shaw 模型的采油情况进行讨论。Hele-Shaw 模型是将粘性流体封闭在间距很小的玻璃片之间组成的。当用低粘流体驱替这种粘性流体时,对前缘的不稳定(指进)、波及系数、界面效应能进行细致的观察和拍照。用这些模型研究了发酵单胞菌株对原油的驱替效率,试验了用生物生产的多糖驱替油。接着是论厌氧菌和兼性厌氧菌驱替原油的实验室和油田应用的第六章。发现活细胞吸附在砂岩上,联想到这类细菌如梭状芽孢杆菌的芽孢也许是在油层深部发育大量微生物群体的一种较好的办法。说明了耐盐梭状芽孢杆菌是通过原地生产气和溶剂提高原油产量的。

第七章发表了通过注入井周围好氧菌细胞降低渗透率达到深度封堵油藏内高渗透率层带的讨论。讨论包括迄今已在油层中发现的细菌的地质作用,所以,这章对微生物堵塞问题作了探讨,这些问题是文献中已报道的;并对决定堵塞作用的机理作了评价;对微生物培养物的一些特性进行了试验,这些特性是成功地注入微生物进行油层内原地微生物提高原油采收率所需要的。研究了细菌由于在注入井附近地带生长而导致注入率下降后,在第八章中对这个问题从细菌在孔隙介质中的转移机理的观点进行了探讨。根据实验室试样方面的直接经验和当今有关孔隙介质中微生物转移论题的文献的述评,对通过富含营养物、含油的油层岩石的细菌细胞的运移和生长进行了讨论。

第九章是简短的一章,探讨微生物生长和生物表面活性剂产生的最佳疏水性-亲水性平衡。作者们在实验基础上探讨了这个问题,并说明生长介质的疏水性-亲水性的平衡在烃发酵中很重要。

第十章分析提高原油采收率作业中所用的化学物的生物降解问题。这个问题说明是使用黄胞胶作流度控制剂的费用问题,因为黄胞胶一溶于水中好氧菌就攻击它。所以,必须用杀

菌剂保护溶液，并将溶液保存在密闭的无氧罐中。还有，多糖很易水解成聚丙烯酸和氨，然后被油层本源细菌例如脱硫弧菌属利用，引起旺盛的生长，并增加硫化氢的产生。讨论了影响生物降解和降解速度的因素，以及抑制降解的一些方法。

最后一章（第十一章）指出微生物提高原油采收率所用细菌可能损害健康的一些情况。这是文献中大都忽略的微生物提高原油采收率的一个方面；所以，在本书中列入简短的但有针对性的健康损害的讨论。

三、提高原油采收率的技术限制

为了尽可能多地采出一次和二次（或改良开采）注水后的剩余油，研究了当今的提高原油采收率的技术。一些文献（BETC Staff, 1980; 晏, 1982）的论述表明现有提高原油采收率的所有方法有许多缺点和限制。对每个传统的提高原油采收率的方法的一些问题扼要地作一论述。

（1）混相驱：二氧化碳混相驱提高原油采收率方法适合于深层轻油油藏。已证明 CO_2 与油的比率为 $8\text{kft}^3/\text{bbl}$ （按 $3\text{kft}^3/\text{bbl}$ 油层剩余油是有利可图的风险）。其缺点是早期或过早突破，对于精确的混相压力、单接触相特性和动态相态特性的预测都是假设的或未知的； CO_2 还能使沥青质沉淀。然而，若能满足 Hildebrand 溶解度参数，则能使沥青质溶于 CO_2 -水体系统中。

（2）表面活性剂驱：现有的认识指出吸附、与各种离子的化学反应、油层中的粘土矿物、温度的不稳定是表面活性剂驱实例中最有害的一些因素。另一重要事情是表面活性剂可与原油组分反应而使表面活性剂失效（晏, 1982）；也就是说，通常使用的阴离子石油磺酸盐型的表面活性剂能与原油中的有机碱（例如吡啶）反应生成水不溶性盐而失去活性。

（3）聚合物驱：应用合成聚合物（如聚丙烯酰胺）和天然聚合物（如多糖）改善波及系数。用聚合物处理的主要问题是它的机械的（剪切）、化学的、微生物的稳定性；另外，在一些油田试验中碰到了渗透率下降的问题（Smith 和 Fleming, 1980; Harpole 和 Hall, 1983）；问题之一是当酰胺与石油中的有机酸接触时产生离子化；随后交联网络将形成大颗粒，这些颗粒能堵塞孔隙。

（4）火驱：虽然火烧油层具有提供自身燃料的优点，但不但会遇到重力超覆问题，而且还会遇到套管、油管、泵、井身等的损坏问题。恶果之一是优质石油在地下转变成无用的焦炭。

（5）蒸汽驱：应用蒸汽提高原油采收率已是一项成熟技术，但依然存在热损失大和能量利用低的一些问题。需用水的供应量始终紧张。此外，没有改善波及系数的好办法。在多相流动中由于石油被蒸汽蒸馏而扩大的蒸汽超覆常降低波及系数。通常，需要加添加剂以稳定热敏性组分，以及形成泡沫。石油中的热敏性组分（即芳化环烷类）是从 Diels-Alder 型反应中生成的缩聚物（晏, 1982）。这种缩聚物能引起堵塞。

（6）碱驱：且不说常有的一些问题，酸值确定不了和化学剂损失致使碱驱的确切机理不清楚。对碱和各种石油组分间的相互作用也缺乏认真的化学研究。

上述讨论涉及已知的所有提高原油采收率的方法。几乎在每个实例中都有工艺和（或）经济的问题限制了这些方法的应用，其中有些问题能部分解决。目前，石油工业界正致力于改进用于特定情况的提高原油采收率工艺，并以限定的条件使用现有的这些方法。

四、微生物增加原油产量的方法

当今，利用微生物及其代谢产物激励原油产量重新引起世界范围的兴趣。这项技术是向油层注入选择的微生物，这些微生物为了生存就地生长，其产物随之发生激励和运移，这将有助于进一步降低二次采油结束及留在储层中的残余油。微生物提高原油采收率法不太可能取代常规的提高原油采收率方法，因这方法本身有某些限制。但看来这个独特方法在许多方面有其优越性，因将自身重复单元（称细菌细胞）注入油层，并依靠它们就地增殖，就放大了它们的有利影响。表 1—1 列出了这些微生物剂能够激励原油释放的某些机理。由发酵作用产生的 CO_2 和 / 或 CH_4 和酸产品对储层岩石的中和作用可降低水的 pH 值和使油层重新提高压力。一些溶剂、初级醇如甲醇、乙醇、丙醇、异丁醇、正丁醇、还有甲醛和丙酮能降低原油粘度。图 1—1~图 1—4 示出用细菌开采残余油的方法。

表 1—1 微生物的产物及其对提高石油采收率的作用（仿照 Janshekar, 1985）

生物产物	作用
酸	改善油层岩石 增大孔隙度和渗透率 与碱质岩反应并产生 CO_2
生命体	选择性或非选择性封堵 对烃类粘附引起的乳化作用 改善固体表面 降解和变质原油 降低原油粘度和原油倾点 原油脱硫作用
气 ($\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{H}_2$)	使油层增加压力 原油膨胀 降低粘度 由于通过 CO_2 对碳酸盐岩的溶解作用而提高渗透率
溶剂	溶解原油
表面活性剂	降低界面张力 乳化作用
聚合物	流度控制 选择性或非选择性封堵

尽管采油专家担心利用微生物可能会有不良影响，由于代谢作用缘故，诸如这种工业水发秽臭和油层因 H_2S 而变酸性。目前认为，可恰当设计工艺来避免这种无控制的代谢活动。这就可能在常规采油法结束后增加石油采收率。

从最初在石油微生物学方面的发现，通过 ZoBell (1947) 的研究及在东欧进行的早期油田试验，到现在，对微生物提高石油采收率特性的了解不断深入。但到目前为至，微生物

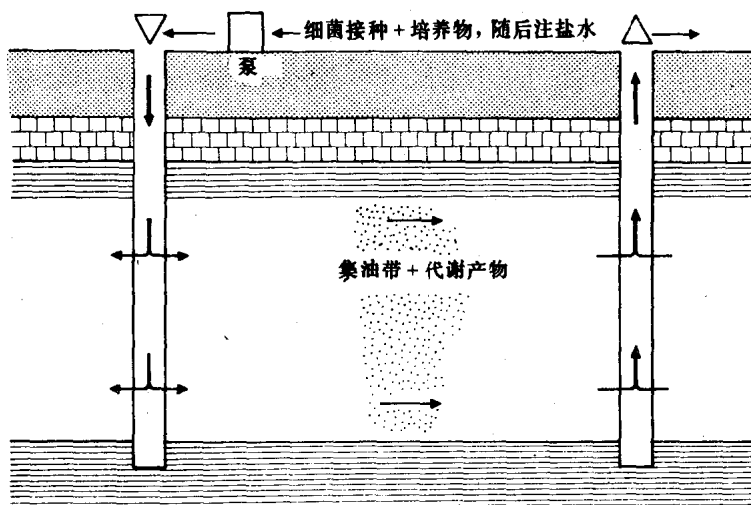


图 1—1 在油层中就地生长的接种细菌的代谢物驱替原油示意图

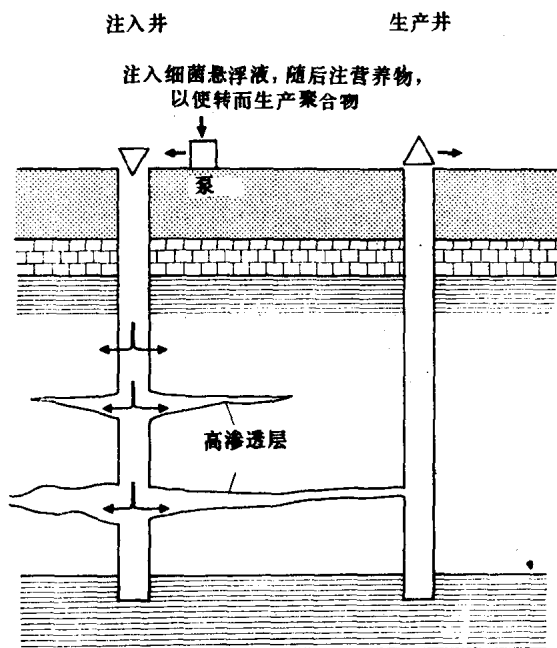


图 1—2 用细菌选择性封堵高渗透层, 注入含蔗糖的营养物溶液使转为生产胞外聚合物

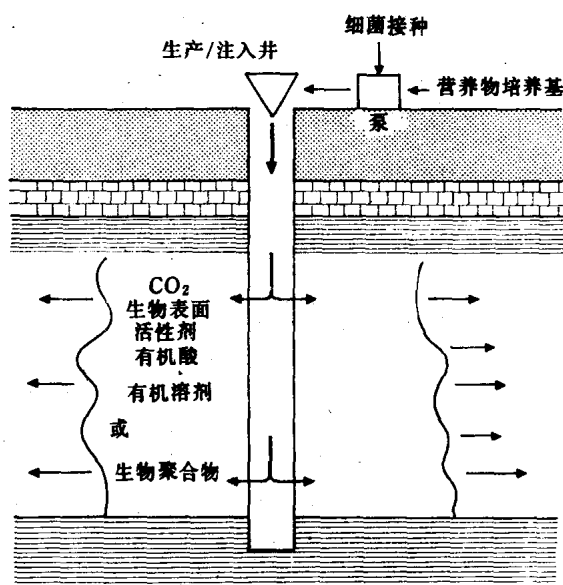


图 1—3 注入井接种并关井后, 井眼周围细胞的迁移和低代谢产物的合成示意图
(相当于吞吐工艺的“吞”阶段)

提高石油采收率方面的许多论点仍在争论, 而且得到确切评价的系统方法几乎没有。油藏机理和微生物提高采收率动态之间的相互关联复杂。从理论研究和实验数据中得知, 许多因素能影响细胞在孔隙介质中的穿透, 这些因素有: (1) 岩石的物理和化学性质, 如渗透率、孔隙尺寸的分布、孔隙度、润湿性、表面电荷、原油类型 (即极性与非极性)、地层水的总含盐量和离子组成等; (2) 细胞的特性, 如形状、大小、游动现象、细胞生长型式 (单个或成簇或链状)、表面电荷、被膜和粘液的产生、化学反应产物 (酸或气) 等; (3) 注入方式,

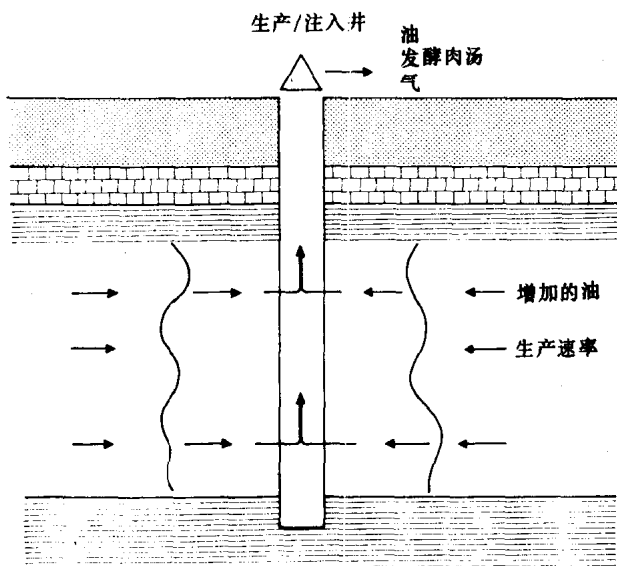


图1-4 当井发生反映时, 按种周期结束时正原油生产示意图 (相当于吞吐工艺的“吐”阶段)

如注入速率、注入水含盐量、细胞悬浮液的密度等。当考虑到以上所有因素时, 有必要将整个油层作为生物反应器那样对待, 并且在油导条件下研究细菌泄油的适用范围和驱替效率。必须研究细菌注入油层后润湿性的改变和原油相对渗透率的改善。不管怎样情况, 需要添加促进生长的营养物, 以便获得所希望型的最大细菌活力。从理论上来说, 使气、酸和表面活性剂的产生遍及整个含油层是主要的目的。理想的是, 不管无关微生物生成范围的扩大, 可将特定微生物的细胞或孢子与营养物一起注入地层, 或在营养物前或后注入地层。只要通过多学科合作, 微生物提高原油采收率能成为在技术上验证的和可行的方法。

参 考 文 献

- Beckmann, J.W., 1926. The action of bacteria on mineral oil. *Ind. Eng. Chem. News*, 4 (Nov. 10): 3.
- Belyaev, S.S., 1983. The dynamics of development of aerobic and anaerobic bacteria during aeration of an oil-bearing stratum to enhance oil recovery. In: T.F. Yen (Chairman), *Symposium on Biological Pressures Related to Petroleum Recovery*. Div. Pet. Chem., Am. Chem. Soc., Seattle, Wash., March 20-25, pp. 810-812.
- BETC Staff, 1980. *Technical Constraints Limiting Application of EOR Techniques to Petroleum Production in the United States* (revised September 1980, TI 80/4; January 1984, RI-83/9). NTIS, Springfield, Va.
- Bubela, B., 1983. Combined effect of temperature and other environmental stresses on microbiologically enhanced oil recovery. In: E.C. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 118-123.
- Donaldson, E.C. and Clark, J.B. (Editors), 1983. *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., 219 pp.
- Donaldson, E.C., Kendall, R.F., Pavelka, E.A. and Crocker, M.E., 1980. *Equipment and Procedures for Fluid Flow and Wettability Tests of Geologic Materials*. NTIS, Springfield, Va., DOE/BETC/IC-79/5, 40 pp.
- Grist, D.M., 1983. Microbial enhancement of oil recovery—an operator's view. In: *Biotech 83. Proceedings International Conference on Commercial Applications of Biotechnology*. Online Publications, Northwood, pp. 463-474.
- Grula, M.M. and Sewell, G.W., 1983. Microbial interactions with polyacrylamide polymers. In: E.D. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 129-134.
- Harpole, K.H. and Hall, C.J., 1983. *Evaluation of the N. Stanley Demonstration Project*. NTIS, Springfield, Va., DOE/BC/10033-6, February.
- Hitzman, D.O., 1983. Petroleum microbiology and the history of its role in EOR. In: E.C. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 162-218.
- Ivanov, M.V., Belyaev, S.S., Laurinavichus, K.S., Obratsova, A.Y. and Gorlatov, S.N., 1982. *Microbiologia*, 4: 336.

- Janshekar, H., 1985. Microbial enhanced oil recovery processes. In: J.E. Zajic and E.C. Donaldson (Editors), *Microbes and Oil Recovery, I*. Bioresources Publications, El Paso, Texas, pp. 54-84.
- Kuznetsov, S.I. (Editor), 1961. Geologic Activity of Microorganisms (translated from Russian by Consultants Bureau, New York, 1962). *Tr. Inst. Mikrobiol. Akad. Nauk SSSR*, IX, 112 pp.
- Kuznetsov, S.I., Ivanov, M.V. and Lyalikova, N.N., 1962. *Introduction to Geological Microbiology* (translated from Russian by P.T. Broneer and C.H. Oppenheimer). *Introduction to Geological Microbiology*, McGraw-Hill, New York, N.Y., 252 pp.
- Lazar, I., 1983. Microbial enhancement of oil recovery in Romania. In: E.C. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhanced Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 140-148.
- Marquis, R.E., 1983. Barobiology of deep oil formations. In: E.C. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 124-128.
- Petzel, G.A. and Williams, B., 1986. Operations trim basic EOR research. *Oil Gas J.*, 84/6 (Feb. 10): 41-45.
- Smith, R.V. and Fleming, P.D., 1980. Fundamental mechanisms influencing recovery of crude oils. *Proc. 10th World Pet. Congr.*, 3: 127.
- Yen, T.F., 1982. Chemical problems related to EOR. *Symp. on Chemical and Geochemical Aspects of Oil Recovery. Annu. Meet. Am. Chem. Soc., Kansas City, Sept. 1982*.
- Yen, T.F., 1986. *A State-of-the-Art Review on Microbial Enhanced Oil Recovery*. Unpublished report, University of Southern California, Los Angeles, Calif., 278 pp.
- Zajic, J.E. and Donaldson, E.C. (Editors), 1985. *Microbes and Oil Recovery I*. Bioresources Publications, El Paso, Texas, 370 pp.
- Zhang, Z. and Qin, T., 1983. A survey of research on the application of microbial techniques to the petroleum production in China. In: E.C. Donaldson and J.B. Clark (Editors), *Proceedings, 1982 International Conference on Microbial Enhancement of Oil Recovery*. NTIS, Springfield, Va., pp. 135-139.
- ZoBell, C.E., 1947. Bacterial release of oil from oil-bearing materials, Parts I and II. *World Oil*, 126(13): 36-47 (I); 127(1): 35-41 (II).

第二章 地下环境

一、引言

鉴于利用油层内能生存的微生物培养物,通过这些微生物的代谢活动提高原油采收率,就面临一个在地下的不寻常环境。这种环境对适应地面条件的生命系统来说,不但是完全陌生的,而且根据通常预测法,这种环境随着离地面的深度的增加而变化。沉积层的孔隙度和渗透率随埋深度而减小;其压力和温度随埋深度而增加;通常,地下水含盐量也随深度增加。

虽然某些种类的微生物在地面条件下能很快繁殖,并产生明显有利于提高原油采收率的代谢产物,但它们在深的地下环境中不可能存活。若它们在地下条件下生长了,但它们不会产生相同的代谢产物,因受地下水的高含盐量和高温的有害影响。此外,已知有些微生物在高压下形状发生改变,可能引起代谢变化。

已对好几千种微生物作了分类和检验,确定它们所需的营养物、它们的代谢产物以及它们能忍受的环境条件的范围。以环境忍受范围为基础可分为4大种分类:(1)好氧菌,只有在氧存在下生命才能继续;(2)厌氧菌,在无氧条件下存在,其能量从氧化的分子的降解中获得;(3)兼性菌,能存在于有氧或无氧环境中;(4)上述三类中嗜温的(能在45℃温度以下生存的)或嗜热的(能在45℃以上的持久温度环境下生存的)种类。在这几大类中,有些微生物是代谢产生气体的(甲烷、氢、氮、二氧化碳)、聚合物的(多糖、蛋白质)、表面活性化合物的,一般为聚阴离子类脂类、以及从简单醇到非常复杂分子的许多其他化合物。对代谢产物的品种和产量,可通过改善环境条件和营养物在很大程度上加以控制。另外,在适应新环境方面(环境的和营养物的),微生物显示出令人吃惊的变异性质。这些性质给工程师在使用微生物体系时有相当大的灵活性(Donaldson, 1982)。

虽然已分离出许多不同类型的微生物,而且已充分表征,但并不意味已发现所有的微生物了。或许有许有尚未发现的微生物体系已在地下深油层中存在,或者若供给代谢所需的营养物时是能在那里生存的。发现这类微生物并用于采油及其他作业的可能性肯定存在。

二、地下盐水

通常,地下隙间水的总溶解固体量(TDS)随深度加大而增加,在很深深度时,总溶解固体量可达到的值超过350g/L,达到超饱和。按照埋深来看,在雨水能循环到的露头的沉积层中,地下水可能较淡,但一般含碳酸氢盐和硫酸根离子。而深层地下水是不流动的,盐度很大,其浓度梯度达每千米深度50000ppm,最高可达350000ppm TDS(Donaldson, 1980)。

含油气的地下储集层一般是由砂岩或碳酸盐岩构成的沉积层,最初是在海相环境中沉积的(Levorsen, 1966)。与油气共生的地下水原来就在岩石中,或者是从地面迁移到地下孔隙岩石中的。最常采用的油与地下水共生的理论是,油从原来位置(生油岩)偶然地迁移到

孔隙沉积中, 这些沉积是由岩石构造运动形成的孔隙圈闭, 或由不渗透页岩在孔隙层顶部形成圈闭 (Collins, 1975)。

在注水开采的油田内, 对随油产出的水充气, 完成氧化作用并沉淀氧化物, 然后回注到产油层, 将油驱至生产井。因此, 当这种注入水到达油层时, 已完全被氧所饱和。

Ivanov 和 Belyaey (1983) 检验了注水井的微生物区系, 发现细菌对油的氧化作用发生在注入低盐度水和该油层地层水之间相接触的层带。原油有氧破坏的产物激励了产甲烷菌的活动性。他们还检验了水淹油田中微生物的分布和细菌产生甲烷的速率, 发现当地层水被注入的低盐度盐水淡化时, 微生物群体及甲烷产生速率增加。这个情况不但与有机碳的减少和碳酸氢盐浓度的增大相关, 而且还与甲烷的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 组分变少和碳酸氢盐的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 组分变多相关。因此, 原油的细菌氧化过程发生在注入的淡水和油田地层水之间的接触带。

但是, 当许多油田依靠其他机理开采时, 不需要向产油层注入盐水。在这类油田中, 产出的盐水是废弃物, 采取注入到不采出液体的地层中的办法进行处理。

油田盐水中含有各种阳离子和阴离子的浓度范围变化很大。油田产出的盐水的离子总浓度从不到 100mg/L 到 200000mg/L 以上不等。Collins (1975) 列出了产生于各种地质年代 (第三纪、白垩纪、侏罗纪等) 岩石中的油田水分析结果 (表 2—1)。不同地质层的水的离子浓度以及即使是同一层的不同区域处的浓度差得很大。由于盐浓度的范围很大, 所以没有典型的油田盐水。大多数产出盐水的主要成分是氯化钠和氯化钙, 而在有些盐水中主要是镁、硫酸盐和碳酸氢盐。存在的其他一些离子为次要成分, 而在有些盐水中含有如溴和碘离

表 2—1 海水和美国不同地质年代沉积盆地的地下盐水中的
各种离子的平均浓度(经允许摘自 Collins 的 1975 年表 5. II. 7. IV—7. $\times 111$)

成分	海水	第三纪	白垩纪	侏罗纪	二叠纪	宾夕法尼亚纪	密西西比纪	泥盆纪	志留纪	奥陶纪	寒武纪
锂	0.2	4	4	10	3	7	9	50	37	20	17
钠	11 000	39 000	31 000	57 300	47 000	43 000	41 500	48 000	49 100	31 000	23 400
钾	350	220	130	140	170	170	430	3 100	1 900	990	400
铷	0.1	0.24	0.10	0.10	0.80	0.55	1	4	4	2	3.3
铯	—	0.20	0.10	0.10	0.13	0.15	0.40	0.4	0.4	0.2	0.6
钙	400	2 530	7 000	25 800	8 600	9 100	8 900	18 000	21 000	6 100	4 000
镁	1 300	530	900	2 500	2 000	1 900	1 600	2 900	4 300	1 300	1 300
锶	7	130	200	320	7	600	630	1 000	730	340	125
钡	—	60	40	10	—	30	5	40	15	6	—
硼	5	36	20	13	8	15	40	30	30	20	7
锰	—	—	—	—	—	60	12	175	—	56	—
铜	—	0.63	—	—	0.88	—	3	2	—	—	—
氯化物	19 000	64 600	62 000	141 000	92 700	87 000	85 000	115 000	122 000	62 000	46 100
溴化物	65	85	550	1 200	46	490	410	1 060	520	300	520
碘化物	0.05	28	25	16	3	210	110	30	17	25	18
碳酸氢盐	—	560	260	140	77	130	185	155	115	270	260
碳酸盐	—	75	—	—	36	40	450	30	—	25	—
硫酸盐	—	320	280	210	730	430	540	450	830	1 070	1 170
有机酸	—	140	—	12	170	430	370	130	90	520	30
铵	—	230	23	—	24	300	210	110	80	140	60

子的量具有商业经济价值。根据 Collins (1970) 分析, 可以干扰微生物体系的次要阳离子和阴离子的最大浓度为: 锂—400、钡—670、硼—450、溴—6000、碘—1400 (单位为 mg/L)。

对比现在的海水组分 (表 2—1), 假定原始盐水与现在海水大致相同, 那么地下水已经历了很大的变化。有些水被渗透的雨水或压实过程的液体所稀释, 压实时的液体为埋藏过程中由于压实作用从泥浆和页岩中挤压出的水。其他一些水的含盐量的增加, 或许是由于与水相接触的岩石上溶解离子而增加的 (Rieke 和 Chilingarian, 1975)。

现今微生物提高原油采收率的重点是, 为了注入微生物培养物而提高经过注水后的油田的原油采收率, 或提高较浅的重油油藏的采收率。在前一种情况中, 油田盐水被注入的低盐度的地面水所调节, 而且水中被氧饱和。因此, 注入活培养物前, 为了微生物生长, 必须仔细考虑到微生物对油田水或地面处理的注入水的适应性。几株梭状芽孢杆菌属和芽孢杆菌属的菌株已被分离出, 它们能耐 50000mg/L 的氯化钠; 但供油田实际使用可能需要更大的耐盐性 (Grula, 1982; Knapp, 1982)。对于重油油藏来说, 耐盐问题没有那么严重, 因大多数重油油藏的埋深不到 1000m 。含低盐度的盐水, 或许是由于与雨水接触的关系。

三、地下温度和压力

通常, 对地层的静压梯度是假定压力约等于水柱的静水压头进行计算的。当得不到具体数据时, 这个近似值是有用的, 但盐的浓度、地层中有气存在以及承压含水层内的异常高压带对特定储层内的实际压力均有影响。图 2—1 示出在那些压力大多与油气有关的沉积内存在的两种压力梯度。静水压力梯度为 10.5kPa/m , 位于另一边的是岩石静压力梯度, 约是 22.6kPa/m 。

由于在地下有溶解气存在, 总溶解固体物急剧减少或增多以及地下温度的变化, 致使静水压力梯度发生异常。虽然在某些储层中遇到了异常高压, 例如在美国墨西哥湾的地压区域内, 在深度大于 3000m 处, 但这些层的压力梯度仅增加了约 20.3kPa/m , 因为没有地层裂缝和释放高压, 不可能超出岩石静压。

可以预计长期处于注水作业下和作为微生物提高采收率候选层的油藏中的正常静水压力梯度。

正常地热梯度与压力梯度的趋势相似, 随深度加大而增高, 如图 2—2 所示。自平均地面温度起, 约按 18.2°C/km 深度 ($1.0^\circ\text{F}/100\text{ft}$) 升高。所以, 假若平均地面温度为 26.7°C 和储层深度为 1524m 时, 可预计温度约 54.4°C , 再参照图 2—1, 其压力为 16.0MPa 。

若油田已注水很长时间, 则该地层内将有一个温度梯度, 自井筒的较冷水处径向外扩到达到正常储层温度的地层处。

由于从深的地幔传递热, 所以存在温度梯度。由于岩性变化的关系, 地层的热传递不规则, 或不同地层的传热系数不同是导致偏离正常地热递度的主要原因。因此, 某些地层的温度较其他一些层高, 因盖层的传热系数较低, 其作用像一条“毯子” (Tissot 和 Welte, 1978):

$$\text{来自地幔的热量} = 2 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$$