



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

油藏环境地微生物多样性 及微生物驱油机制

姚俊 王飞 蔡珉敏 刘海军 著
陈辉伦 马挺 石国新 刘猛

著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

油藏环境地微生物多样性 及微生物驱油机制

姚俊 王飞 蔡珉敏 刘海军 著
陈辉伦 马挺 石国新 刘猛



科学出版社

内 容 简 介

本书以极端油藏环境地作为科学研究切入点,系统阐述了油藏复杂环境中微生物群落结构特征及微生物驱油机制。全书分为4章,内容涉及微生物驱油技术的发展背景、油藏微生物的作用方式和影响因素、分子生物学技术在微生物驱油中的应用、油气同位素分析、原油的气相色谱-质谱分析、原油的生物标志物分析、油藏环境地微生物多样性分析、油藏功能微生物分子筛选、生物表面活性剂开发、注氧本源微生物驱油技术和油藏甲烷转化技术研究等方面,丰富了微生物驱油技术理论,为解决贫油层或即将采空油层开采效率低的科学难题提供了新的思路。

本书可供地球科学、石油工业、环境科学、环境微生物学和有机化学等研究领域的学生和相关科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

油藏环境地微生物多样性及微生物驱油机制/姚俊等著. —北京:科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060824-6

I. ①油… II. ①姚… III. ①油藏工程-环境微生物学-生物多样性-驱油-研究 IV. ①X172

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第047281号

责任编辑:霍志国/责任校对:杜子昂

责任印制:吴兆东/封面设计:东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019年4月第一次印刷 印张:8 插页:1

字数:159 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

石油资源在推动社会经济发展的过程中具有重要作用。在经历了自然开采、气驱、热驱、化学驱和水驱等第一次和第二次石油开采之后,各油藏原油开采率只有 35%~50%,而残余原油因较大的油水表面张力和油层孔隙毛细管力而难以开采。传统的石油水驱开采在大港油田已被运用 40 余年之久,在长期的水驱开采后,部分油井石油含水率高达 95%以上,研究表明当石油含水率高于 70%时,水驱开采模式就基本上不再适用。同时水驱过程会降低油层温度,使原油中的石蜡、沥青质等重质组分沉淀和富集在地层孔隙、管路和开采设备中,阻碍了原油流动。尽管利用化学溶剂、表面活性剂、石蜡抑制剂和热流体等能在一定程度上缓解这一现状,但是化学和热力学法成本过高,不利于普遍推广。如何解决贫油层和即将采空油层水驱开采过程中的瓶颈问题,提高原油采收率,最大限度利用不可再生资源,成为目前亟待解决的科学难题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》已将复杂地质油气资源勘探开发利用列入未来研究发展的重点领域和优先主题。我国低品位油气资源储量巨大,包括低渗透、稠油和高含水油藏。随着石油勘探开发程度的延伸,低品位储量所占的比例将越来越大,对能提高采收率的新技术的需求迫切。显然,传统的工艺技术已难以满足低品位油田开发的需要。实现大规模低品位油气资源的高效开发,必须探索新的技术突破口。

微生物驱油技术的发展为解决贫油层或即将采空油层开采效率低的科学难题提供了可能。油藏微生物具有产表面活性剂、产气和降解石蜡等功能,这些特性可降低原油黏度并增加原油流动性,有利于石油开采。研究石油水驱开采过程中的微生物群落结构特征,对于采取针对性的微生物驱油技术具有重要的指导意义。目前,基因文库构建等分子生物学技术的发展,使人们对水驱油藏微生物群落具有了全新的认识,然而对水驱石油开采过程中的微生物群落结构研究,更侧重于单纯比较油藏各微生境中微生物群落结构的差异,而往往忽视了水驱干扰过程与油藏微生物响应之间的关系。油藏作为一个复杂的极端环境,必然为微生物多样性提供了可能,同时也必会影响人们对水驱干扰过程下油藏微生物多样性的准确认识。同位素示踪技术的运用,为深入认识水驱石油

开采过程中注入水对油藏各微生境的影响提供了重要的参考信息,弥补了采样过程的随机性和不确定性,为系统、准确地研究水驱过程中的微生物群落结构特征及其微生物学响应提供了可能。

作者根据近年来已有的工作基础,结合国家国际科技合作专项(2010DFB23160)、国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目(40920134003)、中德合作科研项目(PPP)(留金欧(2013)6007)、德国罗伯特·博世基金会项目和国家自然科学基金重点项目(41430106)等资助项目以及以中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室、北京科技大学国家环境与能源国际科技合作基地、南开大学、中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司、中国石油勘探开发研究院为依托,同时也依托美国耶鲁大学地球科学系及生物圈研究所、德国亥姆霍兹环境研究中心(UFZ)和德国联邦地球科学和自然资源研究所三家国际合作项目的合作单位的科研条件所取得的研究进展,并融合查阅到的国内外大量资料,历经5年终于完成了本书的写作。

本书共4章。第1章从理论和实践上论述了微生物驱油的发展和目前主要的研究方法及应用;第2章从原油结构出发,阐明原油的质谱和生物标志物的分析技术方法和结果;第3章从油藏环境地微生物多样性特征及驱油机制等方面阐述开发油藏环境地微生物的可行性,并提供工程微生物开发技术的基础数据;第4章阐明注氧本源微生物驱油技术和油藏甲烷转化开采技术研究,拓展第三次采油技术的选择面。

作者殷切希望广大读者和有关专家对本书提出批评指正,愿本书成为读者的良师益友,从而共同推动油藏环境地微生物多样性分析及驱油技术研究领域向前发展。

作者

2018年12月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 微生物强化采油技术的发展	1
1.1.1 微生物采油技术背景	2
1.1.2 微生物采油的分类	4
1.1.3 微生物采油的机制	6
1.1.4 微生物采油技术的应用要求	8
1.2 油藏微生物对油层的作用方式	11
1.2.1 微生物直接作用	11
1.2.2 微生物改变原油组成	11
1.2.3 微生物改变驱油环境	11
1.3 微生物驱油的影响因素	13
1.3.1 油藏地质条件的影响	14
1.3.2 油藏化学条件的影响	16
1.3.3 油藏营养物的影响	16
1.3.4 油藏本源微生物的影响	17
1.4 油藏微生物多样性	17
1.4.1 产甲烷菌	18
1.4.2 硫酸盐还原菌	19
1.4.3 发酵菌	20
1.4.4 硝酸盐还原菌	21
1.4.5 铁还原菌	21
1.5 原油降解功能基因多样性	22
1.5.1 烷烃羟化酶系统及其催化机理	23
1.5.2 膜结合烷烃羟化酶	25
1.5.3 细胞色素 P450 烷烃羟化酶	26
1.6 分子生物学技术在微生物驱油中的应用	27

1.6.1	基因文库分析	27
1.6.2	探针杂交技术	27
1.6.3	遗传指纹图谱分析	28
1.7	微生物驱油技术的优点	28
	参考文献	29
第2章	油田油藏原油结构	37
2.1	油气同位素分析	37
2.1.1	油藏碳氢同位素分馏研究	37
2.1.2	油气同位素分布	38
2.1.3	同位素分馏技术的应用	39
2.2	原油的气相色谱-质谱分析	43
2.2.1	油井采样点概述	43
2.2.2	原油总离子色谱图分析	45
2.2.3	原油组分及其降解分析	45
2.3	原油的生物标志物分析	49
2.3.1	生物标志物的概念	49
2.3.2	生物标志物的分析	50
2.3.3	原油的成熟度	53
第3章	油藏环境地微生物	55
3.1	油藏环境地微生物多样性分析	55
3.1.1	样品信息采集	55
3.1.2	微生物群落结构分析方法	60
3.1.3	典型水驱油藏微生物群落多样性	62
3.2	油藏功能微生物分子筛选	76
3.2.1	石油烃降解菌的培养	76
3.2.2	烷烃羟化酶基因兼并引物设计	76
3.2.3	功能微生物分子筛选	76
3.2.4	功能微生物降解十六烷实验	77
3.2.5	功能微生物能量代谢特征	78
3.2.6	研究结论	78
3.3	生物表面活性剂开发	84
3.3.1	菌株的生长动力学和生物表面活性剂的产生	84

3.3.2	生物表面活性剂产生菌鉴定	86
3.3.3	盐度、pH 和温度对乳化性能的影响	86
3.3.4	生物表面活性剂的表征	88
	参考文献	90
第 4 章	先进的微生物驱油技术	92
4.1	注氧本源微生物驱油技术	92
4.1.1	好氧微生物培养体系的建立	92
4.1.2	三类本源微生物对原油的好氧降解作用	93
4.1.3	油层深层本源微生物对原油的好氧降解潜能	95
4.1.4	原油好氧生物降解的代谢产物	100
4.1.5	盐度对好氧代谢的影响	102
4.2	油藏甲烷转化开采技术研究	110
4.2.1	油气同位素分析手段	110
4.2.2	原油的厌氧降解及产甲烷作用	111

彩图

第1章 绪 论

我国油田基本上为陆相油田，油藏结构极其复杂，而水驱石油采收率却并不高。近年来，我国大部分油田长期的水驱开采导致产出油含水率达到80%左右，部分油井甚至高达90%及以上。普通油藏可采储量一般在60%以上，有的则会达到70%~80%。然而利用传统的一次采油和二次采油，却仅开采出油藏储量的30%~50%^[1,2]。

随着社会经济的发展，对不可再生能源——石油的需求不断加大。石油勘探规模不断加大，我国发现整装大型油田的概率却越来越小。为适应我国当前经济发展形势，石油勘探开采目标逐步转向低产、低压、低渗透油田，而贫油层、即将采空油层和废弃油藏也备受关注。近年来，随着油藏地质研究工作的不断深入以及油层开发工艺的长足进步，石油开发迎来了一个崭新的历史发展时期。目前，就大多数低渗透油藏而言，其往往具有岩性致密、孔隙半径小、地层结构复杂、渗流阻力较大等不利因素，这一情况将直接导致油藏采收率较低。目前，大多数油藏还在采用常规的水驱方式进行开采，然而，该方法阻力效应较为突出，注水困难，开采效率较低，长期水驱油藏含水率甚至超过95%以上，已满足不了原油开采的需求^[3,4]。同时，低渗透油藏储层通常不适宜水驱方式开采，如何开采油层中残余的不可再生原油和贫油油藏资源成为目前石油开采的关键科学问题^[5]。

1.1 微生物强化采油技术的发展

相关研究表明在经过一次采油和二次采油后，仍然有三分之二的原油存在于油藏之中^[1-3]。由此而诞生的原油第三次采油技术中，微生物强化采油（microbial enhanced oil recovery, MEOR）^[6,7]是一项绿色环保的、经济的、低毒的、生物可降解的、特异的、具有较强的适应性和广阔的应用前景的石油三采技术。

1.1.1 微生物采油技术背景

原油的第一次采油，是利用油藏本身的地层压力或者油井泵抽吸而开采的。随着第一次采油的进行，当地层压力减小或油井泵不能通过抽吸作用开采原油时，第一次采油过程结束。此时，一些采油井不再开采原油，而转变成为注入井，通过向这些注入井里面高压注入水或气体，从而增加地层压力，使得该油藏的其他油井继续产油，即为第二次采油过程。由于气水驱油具有工艺简单、容易控制以及成本低廉的优点，大多数的油藏都将其作为第二次采油技术。但是尽管采用了二采技术，油藏中仍然有三分之二的原油不能被开采出来，因此，第三次采油技术应运而生。

三采技术主要包括了化学强化采油技术（enhanced oil recovery, EOR），如聚合物驱油技术、表面活性剂驱油技术、碱驱油技术等，以及物理热力驱油技术，如注入高温蒸汽或原位燃烧技术等。但这些技术都存在着明显的环境问题，主要体现在采油废水的难处理、高成本以及驱油剂对环境和地层的污染问题。而另一项三采技术则是微生物强化采油技术，该技术利用微生物的生长代谢作用从多个方面提高原油采收率^[8,9]。自 1946 年以来，世界上产生了超过 400 项的有关微生物采油技术的专利。大部分有关微生物采油的应用研究都是来自于实验室或者模拟实验，许多的研究者证明了微生物强化采油技术是一项可行的提高原油采收率的技术^[10]。

微生物强化采油技术是在 1926 年首次由 Beckman 提出的，但直到 20 世纪 40 年代，ZoBell 和一些俄国的研究者才开始正式研究^[11]。当时，微生物学诞生还不到 100 年，其主要的研究关注点是微生物利用碳氢化合物的代谢能力^[12]。这些研究显示了微生物对糖类的代谢产物与原油化学驱油技术中常用的化学药剂十分相似，包括气体、溶剂、表面活性剂、聚合物、有机酸和生物体等^[13]。大部分的研究都是在大学实验室开展的^[14]，到 20 世纪 40 年代时才开始有美国的采油公司关注该项技术。

ZoBell 的第一项专利是向油井中注入 *Desulfovibrio hydrocarbonoclasticus* 培养液，同时注入硫酸盐和碳源如乳糖等，开展微生物驱油（ZoBell C. Action of micro organisms on hydrocarbons. Bacteriol Rev, 1946, 10: 1-49）；Updegralf 和 Wren 也提出了利用一种共生杆菌 *Desulfovibrio* 和蜜糖一起注入油层的微生物驱油方法。这些早期的方法在实验室都取得了较好的效果（Updegralf D, Wren G B. Secondary recovery of petroleum oil by *Desulfov. brio*. US patent 1953,

2660550), 但没有被用于生产实践。这主要是由于这些微生物虽然能在原油中生长, 但是在早期的研究中却没有证明它们能够在厌氧环境下代谢原油组分, 未能表明它们在油藏环境地下能持久地生存。

20 世纪 50~80 年代是微生物强化采油技术一段跳跃式的发展时期, 尤其是 70 年代石油能源危机的爆发促进了其平稳发展。而从 20 世纪 90 年代至今, 对该技术的研究范围逐步扩大, 提出了大量的研究结论^[16, 17]。

微生物强化采油技术的总体目标是达到经济性和有效性。1950~2000 年的大量研究主要集中在微生物是怎样提高原油采收率的^[18], 通过实验室研究, 相继提出了对专门产生物表面活性剂的特殊菌群的研究和注入微生物到油藏环境地而利用代谢产物驱油的研究。这些研究都应用了模拟岩心和培养菌剂, 其中的菌剂一般都能产生生物表面活性剂来提高砂岩和碳酸盐岩心中原油的采收率^[19], 而大量的岩心实验都作为实验室研究方案的有效模拟评价标准。

尽管如此, 实际的油井驱油实验的结果却不尽相同, 由于在油井中微生物的代谢活动, 如微生物的、化学的和物理的代谢过程, 并没有被充分了解^[20], 所以实际驱油实验的成功率往往很低。根据 Hitzman 的研究, 导致微生物采油技术在实验室的研究结果和实际的生产结果存在不同缘于诸多因素, 其中一项非常重要的因素是油藏的动态环境是非常难以在实验室复制或模拟的, 即使使用和设定了与油藏一致的岩心和反应参数, 但油藏环境地中本源微生物的繁殖而导致的物理和化学条件的改变是根本不能在实验室中复制的。另一个重要因素是对油藏环境地特征条件考虑不足, 由于微生物的生长依靠其生长的物理和化学环境, 因此必须将这些环境因素考虑全面, 包括 pH、温度、盐度、压力、离子强度、能量来源与营养元素等^[21]。此外, 对微生物采油技术前期, 油井厌氧条件下微生物的生长和代谢机理的不了解也是一个重要因素。

尽管微生物强化采油技术的发展尚不成熟, 但在近二三十年, 对它的研究和发 展仍备受关注。从美国到俄罗斯、从欧洲到中国、从加拿大到澳大利亚, 大量的研究不断涌现。第一个实际的微生物驱油实验是 1954 年在葡萄牙里斯本油田开展的。这些大量的实际研究主要是将混合厌氧微生物或特种厌氧微生物和营养物注入油田, 涉及的微生物主要包括 *Clostridium*、*Bacillus*、*Pseudomonas*、*Micrococcus*、*Mycobacterium*、*Arthrobacterium*、*Peptococcus* 等, 其营养物质主要为廉价的蜜糖。对这些微生物筛选的条件主要是基于其高产气性, 如甲烷、氢气、二氧化碳和氮气, 产有机酸, 如丁酸和乙酸等, 产溶剂, 如丙酮、丁醇和乙醇等; 产聚合物, 如多糖等; 产表面活性剂和自身生物量的

增长。每一项机制或这些机制的组合^[22]都能有效地提高原油采收率。

近年来,随着科技的进步尤其是随着现代分子生物学技术的发展,许多研究发现在油藏中存在着丰富的本源微生物。Brown 指出了油藏环境地存在着自然的本源微生物群落,并且提出了能开展应用微生物驱油的油藏特征。至此,微生物强化采油的研究进入了第四个发展阶段:各现存油井开采量日益减少,原油价格提高,人们了解微生物采油机制的需求日益迫切^[11]。

许多研究从深层油藏发现、分离和培养了适用于微生物强化采油技术的新菌株^[7],它们能够在油藏的极端地层环境(如高盐度和高温等)下生长。其代表菌株如下: *Thermoanaerobacter brockii* subsp. *lactiethylicus* strain 9801^T, 筛选于法国 2100m 深层油井,温度 92℃,最佳生长温度为 55~60℃; *Thermoanaerobacter tengcongensis* strain MB4^T, 筛选于中国热泉,生长温度为 50~80℃。

此外,有关微生物驱油的建模也在逐步发展,一个好的数学模型^[23],能够有效用于重要参数的识别和对实际应用的指导。但是,微生物驱油的数学模型的建立是一个极具挑战性的课题,它不单单要考虑各微生物的自然差异,还必须要了解复杂油藏环境地中能影响微生物生长的各项物理和化学变量。其主要模型包括:根据吸附方程建立的在多孔渗透媒介中的油水多相多维体系,微生物、代谢产物和营养液的吸附与扩散体系,渗透相关体系,以及盐度影响和微生物吸附及界面张力和润湿性降低的联合体系等模型^[24]。

毋庸置疑,利用微生物及其代谢产物能够提高原油的采收率,但是如何经济、切实、科学有效地利用微生物的这种能力以及将实验室成果转化为实际生产应用的问题,仍需不断探索和发掘^[25]。

1.1.2 微生物采油的分类

虽然许多研究者提出了各不相同的微生物强化采油技术,但是大多数微生物强化采油技术的最终目的都是减少油藏中的剩余原油^[26]。根据目前的研究成果,微生物强化采油技术可以分为两大类:外源微生物采油技术和本源微生物采油技术。其主要应用方法包括:周期性微生物单井处理、微生物水驱和微生物调剖。

周期性微生物单井处理(图 1-1),是将微生物和营养物质注入产油井中,再将油井封闭一段足够长的时间,由几天至几周,使得微生物在井筒周围及近井地带充分生长、代谢产物充分释放,然后再开井、对油井进行开采,一般持续时间为几周至几个月。当原油的开采量下降时,同样的微生物和营养物注入

过程继续开展，周而复始。在这种方法中，微生物波及深度和区域是一个重要评价参数，它往往取决于微生物注入速率和微生物活动的动力学参数。

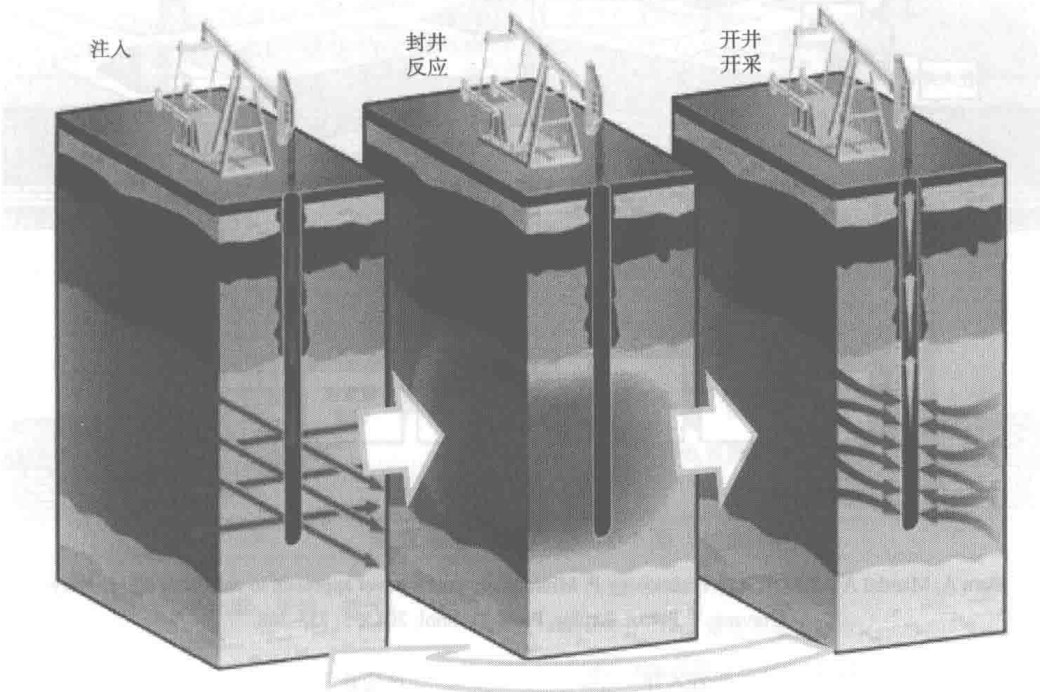


图 1-1 周期性微生物单井处理示意图

参照“蒸气吞吐法” (Cyclic Steam Stimulation, CSS), <http://zh.scribd.com/document/252261845/Pioneering-Expertise-in-Thermal-Recovery>.

微生物强化驱油应用方式是微生物水驱，如图 1-2 所示。在这种应用方式下，如果地层中的本源微生物十分丰富，可以直接在注水井中注入营养物质激活地层本源微生物活动，促进整个地层的本源微生物的代谢活性。如果所需的本源微生物代谢活动没有发生，此时可以将外源微生物连同营养物质一同加入。对于某些油井，运用此方法后，需要停止注水生产，以满足微生物生长和代谢的时间要求。同时，在该方法的基础上，提出了一种联合方法，即在进行了营养物和（或）微生物注入后，向注水井中继续注入无机盐水溶液，由于油井中的剩余原油本身就是碳源，这样就能经济有效地、大范围地刺激微生物的增长，从而达到利用微生物强化采油的目的。

微生物调剖技术主要是利用微生物的生长代谢堵塞油藏深层的高渗透区的水驱通道，从而使注入水向低渗透区转移（图 1-3）。对于这种方法，由于注入水的驱动，营养物质和（或）产聚合物的微生物被优先注入高渗透区，此时能促进该区域的生物量和聚合物类代谢产物的增长，导致该区域的渗透性降低。

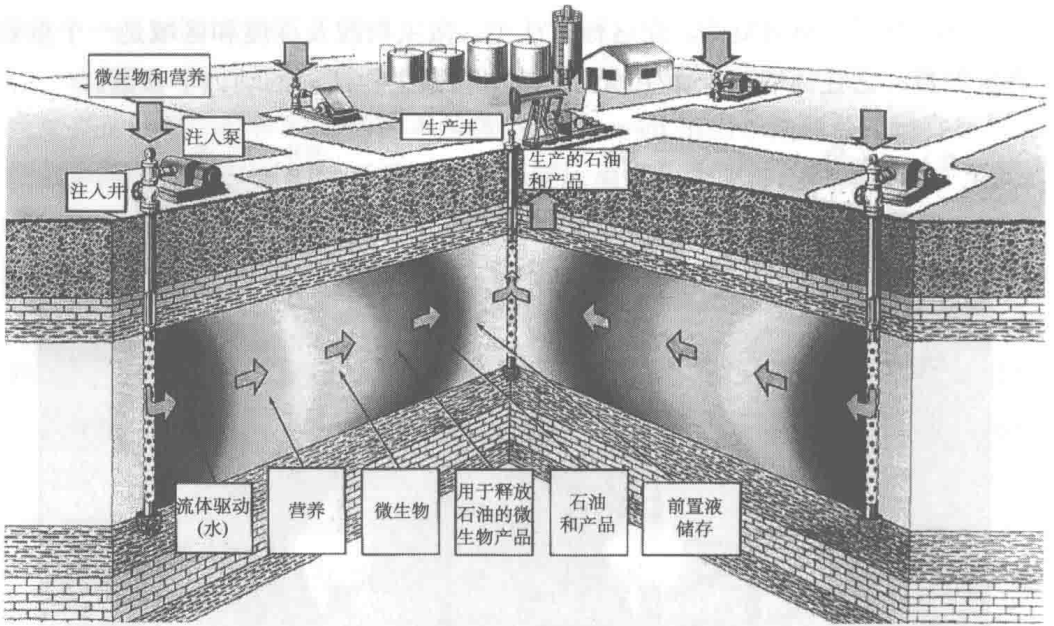


图 1-2 微生物水驱示意图

Bera A, Mandal A J J o P E, and Technology P. Microemulsions: a novel approach to enhanced oil recovery: A review. J. Petrol. Explor. Prod. Technol, 2015, 5: 255-268.

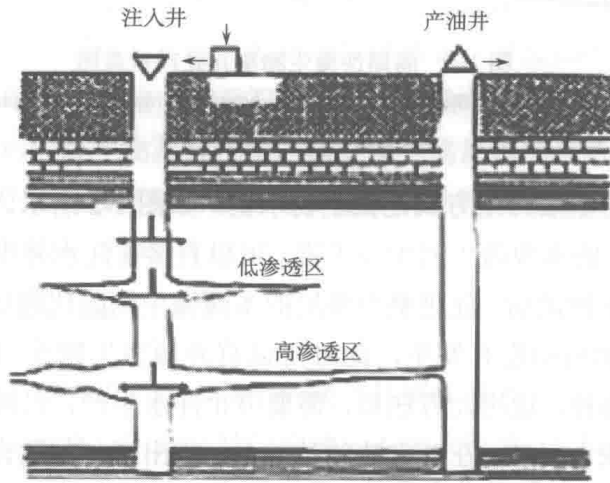


图 1-3 微生物调剖技术示意

1.1.3 微生物采油的机制

多年来, 针对微生物采油机制的研究, 主要是从微生物自身生长及其代谢活动和代谢产物方面来研究的, 目前所公认的机制主要包括降低原油黏度、溶解岩心和降低岩心渗透性等^[27], 具体如表 1-1 所示。事实上, 这些机制与已开

展工业化应用的化学驱油技术的机理类似,其主要的不同是这些能够用来提高采收率的化学物质来自于微生物的代谢活动,并且这些作用是联合实现的。

表 1-1 微生物代谢产物及其在微生物强化采油中的作用

代谢产物	作用
酸	改变储层岩层
	改善岩心多孔性和渗透率
	促进二氧化碳和钙质岩层的反应
	选择性或非选择性封堵
生物物质	通过对石油组分的吸附实现乳化
	提供大的表面积
	降解原油
	降低原油黏度和流动点
气体(二氧化碳、甲烷、氢气)	原油脱硫
	增加地层压力
	使石油膨胀
	降低石油黏度
溶剂	通过溶解碳酸盐类岩层增加岩层渗透率
	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

对以上机制进行总结,微生物采油的基本理论大致可以分为以下几类:

(1) 微生物可以用来代谢分解逐渐积累在采油井中的蜡质组分,以疏通采油通道,提高采收率。

(2) 微生物能够通过人工异位培养,产生大量生物表面活性剂,以注入油层加大原油与水的乳化程度,提高采收率。

(3) 微生物能够在油井中高渗透区域,通过自身的生长或代谢,形成选择性封堵^[28],封堵高渗透带,提高波及效率,提高采收率。

(4) 微生物采油技术能利用微生物的代谢产物提高原油的采收率。例如,一些细菌能够利用原油产生酸及一些有机组分^[29],它们能够溶解碳酸盐,从而增大油层的渗透率。如图 1-4 所示,岩心为碳酸盐型,经过实验室模拟的微生物

物产酸代谢后,岩心遭到了严重腐蚀,其渗透率增大。一些微生物能产生气体代谢产物,从而增加油藏压力、降低原油黏度来提高采收率。此外,微生物产生的生物表面活性剂、乳化剂和溶剂也能降低原油黏度,而产生的生物聚合物能增加注入水的黏性,从而提高原油采收率。

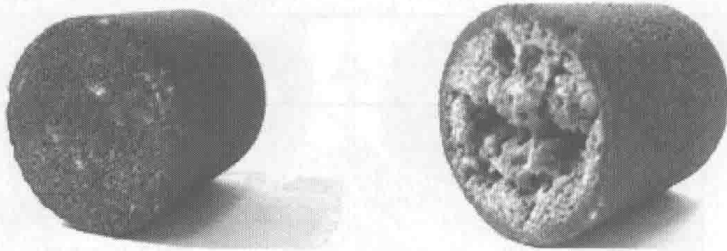


图 1-4 微生物产酸腐蚀前后的岩心^[11]

因此,目前的研究重点是如何采用经济、科学的手段来充分利用微生物开展驱油。

1.1.4 微生物采油技术的应用要求

微生物强化采油的机制会因微生物的不同而不同,因此,在选择微生物采油技术时应充分了解油井和油藏环境地的要求。但并不是所有的油井都能采用微生物强化采油技术开展工作。一般而言,微生物强化采油技术主要应用于随开采时间加长原油采收率日渐降低的油井。此外,还需要对油井开展相关评价,美国能源部和俄罗斯国家科学院生物研究所提出了适合微生物强化采油技术应用的油井的标准,如表 1-2 所示^[7]。

表 1-2 微生物强化采油油井的相关标准

美国	
油藏相关参数	建议范围
深度	< 2440m
温度	< 76.67℃
矿化度	NaCl 含量< 10%
有害元素浓度	As、Hg、Ni、Sn 含量< 10~15mg/L
孔隙率	> 50×10 ⁻³ μm ² 或与地层裂缝相当
本源微生物	与所用驱油微生物具有配伍性
原油类型	> 15° (API 度)
剩余油饱和度	> 25%
单井辐射面积	< 40acre (16.2×10 ⁴ m ²)

续表

油藏相关参数	俄罗斯	
	建议范围	最优范围
油藏厚度	100~4000m	
油藏深度	< 10m	3~10m
孔隙率	12%~25%	17%~25%
绝对渗透率	$> 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	$> 150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
地层压力	< 40MPa	
地层温度	20~80℃	30~50℃
地层水矿化度	< 300g/L	< 100g/L
注入水矿化度	< 60g/L	< 30g/L
硫酸根浓度	< 100mg/L	< 5mg/L
含水率	40%~95%	60%~80%
原油黏度	10~500mPa·s	30~150mPa·s
硫化氢含量	< 30mg/L	0mg/L

注: $1 \text{ acre} = 0.404856 \text{ hm}^2$ 。API度, 美国石油学会 (American Petroleum Institute) 制订的用以表示石油及其产品密度的一种量度。

标准主要针对油藏环境地的深度、温度、矿化度、孔隙率、地层压力、有害元素浓度、原油黏度、绝对渗透率、单井辐射面积、硫酸根浓度和硫化氢含量等相关参数提出建议。

当油井符合上述标准后, 在选用微生物强化采油技术作为三采技术时, 同样要考虑所选用的微生物采油技术是否满足以下要求: ①该技术能够与其他技术联合应用; ②该技术能够实现多种采油机制; ③随着孔隙率的增加, 处理效果能够有效提高; ④低建设成本和低运行成本。

当然, 对于实际应用的微生物强化采油技术, 需要有除上述条件以外更加严格的要求。例如, 还需要考虑针对各个不同特征油井的微生物或营养物的选择, 环境友好和低耗能的要求, 等等。以下是微生物驱油技术应用时的主要难点和待解决的问题。

(1) 外源微生物的筛选。

由于油藏地层的特殊环境 (主要为高温、缺氧和高压), 外源微生物^[30]的筛选是外源微生物采油技术的难点之一。工程所需的微生物既要能适应油藏的特殊极端地质环境, 又要能满足微生物采油的要求, 虽然很多研究者开发了各式各样的采油微生物, 但其应用效果并不理想。除此之外, 由于各油井地层环