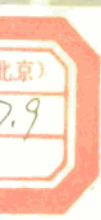


# 高新采油技术

王仲茂 王怀彬 胡之力 编



石油工业出版社

109820

TE3877

002

# 高新采油技术

王仲茂 王怀彬 胡之力 编



石油0112417



石油工业出版社

## 内 容 提 要

最大限度地提高原油的采收率,使地下原油更多地开采出来,这是石油工作者梦寐以求的。本书汇集了国内外先进的提高采收率高新技术及作者近年来的科研成果。每一章都从机理、工艺等方面进行阐述,并有生产实例。适合于石油开发工作者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

高新采油技术/王仲茂等编.

北京:石油工业出版社,1998.9

ISBN 7-5021-2418-7

I. 高…

II. 王…

III. 石油开采-技术

N. TE35

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第25870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)

北京密云红光印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 14.75印张 380千字 印1—2600

1998年9月北京第1版 1998年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-2418-7/TE·1998

定价:24.00元

## 前 言

石油工业是重要的基础工业之一。随着各行业的迅速发展,它在国民经济中的地位愈来愈重要。石油属于一次性能源,地下石油蕴藏量有限,为此,最大限度地提高已开发油田的原油采收率,是石油科技工作者的重要研究课题之一。

目前,我国多数油田,尤其是东部油田,经历了几十年高强度的强化开采,已进入“高含水、高采出程度、高投入”阶段,稳产基础变得较为薄弱。经过多次注采调整,地下剩余油分布比较零散,使过去行之有效的增产挖潜措施已不再得心应手,提高采收率变得十分困难。为此,探索采油新技术,是采油工作者的当务之急。在已开发的有限的资源中,即使采收率稍有提高,原油的产量也会大大地增加。可见,研究提高采收率技术的意义有多么重大。为此,笔者汇集了近年来国内外先进的提高采收率高新技术及作者近年来的科研成果,为石油科技工作者提供一本能够反映国内外采油高新技术的参考书。

本书的写作原则是:首先突出“新”字,即尽量反映采油新技术在国内外的新动态和实例;二是突出“高”字,即本书介绍的新技术具有高技术含量、高附加值、高投入产出比;三是具有可操作性,可直接指导生产实践。本书的特点是覆盖面较广,将物理的、化学的、生物的各种高新采油技术和进入工业化阶段与先导性试验的提高采收率采油技术编写在一起。每一章都从机理、工艺等方面进行阐述,并有翔实的生产实例。其中有一些是作者在多年来科研和生产实践中积累的较成熟的科研成果。在编写过程中,力求使本书体现科学性、系统性和实用性。

本书中微生物采油、聚合物驱油、二氧化碳驱油等技术,已得到各油田的广泛重视。其中聚合物驱油技术的矿场先导试验已获得成功,进入工业规模生产阶段。1997年我国聚合物采油量达750万吨,年增油量实现300万吨。我们根据聚合物驱油技术中的各个技术环节,进行了较为详细的讨论,突出了聚合物驱油机理中的降低流度比、提高波及系数这一技术关键,介绍了国内油田在聚合物驱油先导性试验中的生产实例。微生物采油、二氧化碳采油是正在研究、试验的三次采油技术。微生物采油中介绍了油层微生物学、微生物提高采收率可使用的微生物菌株、微生物采油原理、微生物的培养和筛选、微生物采油工艺和微生物采油实例。二氧化碳采油技术,近年来国内外许多油田已经开始应用。在混相驱油的技术中,二氧化碳驱油是成本较低的方法之一,加之二氧化碳的特殊的理化性质,引起了人们的强烈关注。本书介绍了二氧化碳的性质、来源、驱油机理、混相驱和非混相驱的条件、二氧化碳采油实例和二氧化碳采油工艺。随着油田注水开发时间延长,原油中的轻烃逸出,地层温度降低,随之带来的问题是近井地带发生有机堵塞,使油井产量降低,针对这一问题,提出了热化学采油技术,并在我国进行了首例试验。在油井中利用化学反应产生的大量反应热和气体,可使近井地带温度升高,解除近井地带的有机堵塞;在注水井中除可解除近井地带有机堵塞外,还可以利用反应中产生的气体在地层中变为泡沫,利用叠加的贾敏效应,对注水井进行深度调剖,使受效油井含水下降,产油量提高。该技术的反应产物对油气层基本无损害,受到国内同行的高度重视。本书热化学一章,详细地介绍了这部分内容。在保护油气层技术受到高度重视的今天,石油科技工作者对保护油气层和解除地层损害做了大量的工作,书中较全面地介绍了地层损害机理、地层损害的评价和地层清洗技术,旨在为防止油气层损害和解除地层损害提供可行的技术措施。震动采油技术是近年来提出的提高原油产量的新方法,该方法工

艺简单，成本低，增油效果显著，对地层无损害。根据笔者的科研和生产实践，真实地反映了该技术的内涵。水平井比普通的竖直井可增加原油产量五倍以上，本书侧重阐述水平井采油技术和增产措施，为采油工作者对水平井的管理提供依据。油井产水是油井的永远伴随者，调整吸水剖面，是增产措施中不可缺少的课题，本书为采油工作者提供了多种注水井调剖技术。本书还对燃烧压裂技术做了探讨，这些技术无不充满活力，具有广阔的应用前景。我们相信，这些采油高新技术的全面推广和应用，必将使老油田再次焕发青春，为“稳定东部、发展西部”再立新功。

参加本书编写者大多是油田从事采油工作多年，具有丰富的科研和实践经验的高级工程师、副教授和工程师等。

本书由王仲茂、王怀彬、胡之力、杨英、刘丽峰、李文忠分章编写。其中王仲茂编写第一章、第二章，刘丽峰编写第三章，李文忠编写第四章，王怀彬编写第五章，胡之力编写第六章、第八章、第九章，杨英编写第七章。由王仲茂、王怀彬、胡之力逐章审阅定稿。

本书编写过程中，得到了吉林石油集团公司钻采研究院有关同志的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免出现一些不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

1998年5月

# 目 录

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第一章 微生物采油技术.....                   | 1   |
| 第一节 油层微生物学.....                    | 1   |
| 第二节 微生物采油原理.....                   | 7   |
| 第三节 微生物培养与筛选.....                  | 9   |
| 第四节 微生物采油工艺与矿场实例 .....             | 14  |
| 第二章 震动采油技术 .....                   | 20  |
| 第一节 地震法采油技术 .....                  | 20  |
| 第二节 水力振动采油技术 .....                 | 27  |
| 第三节 声波采油技术 .....                   | 33  |
| 第三章 热化学采油技术 .....                  | 42  |
| 第一节 热化学采油原理 .....                  | 42  |
| 第二节 热化学采油药物 .....                  | 45  |
| 第三节 热化学施工工艺 .....                  | 45  |
| 第四节 矿场实例 .....                     | 48  |
| 第四章 高能气体压裂技术 .....                 | 53  |
| 第一节 高能气体压裂的基本原理 .....              | 53  |
| 第二节 推进剂 .....                      | 56  |
| 第三节 高能气体压裂的 $p-t$ 过程计算与测试曲线分析..... | 59  |
| 第四节 高能气体压裂参数 .....                 | 63  |
| 第五节 高能气体压裂适用范围及施工工艺 .....          | 69  |
| 第六节 矿场实例 .....                     | 74  |
| 第七节 提高高能气体压裂效率的途径 .....            | 77  |
| 第五章 水平井采油技术 .....                  | 79  |
| 第一节 水平井的产能及特点 .....                | 79  |
| 第二节 水平井热采技术 .....                  | 88  |
| 第三节 水平井增产措施 .....                  | 93  |
| 第四节 电潜泵采油.....                     | 111 |
| 第六章 地层清洗采油技术.....                  | 115 |
| 第一节 油气层损害机理.....                   | 115 |
| 第二节 油气层损害的矿场评价.....                | 122 |
| 第三节 地层清洗技术.....                    | 129 |
| 第四节 矿场实例.....                      | 131 |
| 第七章 聚合物驱油技术.....                   | 139 |

|      |                        |     |
|------|------------------------|-----|
| 第一节  | 聚合物驱油机理·····           | 139 |
| 第二节  | 用于驱油的聚合物·····          | 147 |
| 第三节  | 聚合物驱油室内研究·····         | 154 |
| 第四节  | 矿场试验方案设计及驱油效果评价方法····· | 159 |
| 第五节  | 聚合物注入工艺·····           | 168 |
| 第六节  | 矿场实例·····              | 170 |
| 第八章  | 二氧化碳驱油技术·····          | 173 |
| 第一节  | 二氧化碳的性质及与原油的作用·····    | 173 |
| 第二节  | 二氧化碳的运输和来源·····        | 177 |
| 第三节  | 二氧化碳驱油机理·····          | 178 |
| 第四节  | 二氧化碳驱油藏筛选·····         | 192 |
| 第五节  | 二氧化碳驱油的应用·····         | 198 |
| 第九章  | 注水井化学调剖技术·····         | 202 |
| 第一节  | 化学调剖原理·····            | 202 |
| 第二节  | 化学调剖剂·····             | 204 |
| 第三节  | 化学调剖技术的矿场应用·····       | 221 |
| 第四节  | 矿场实例·····              | 223 |
| 参考文献 | ·····                  | 229 |

# 第一章 微生物采油技术

一般地，一次采油和二次采油加在一起的总产量不会大于原始地质储量的40%，因而提高石油采收率的潜在目标要比靠常规方法采出量大。

目前最有效的三次采油方法是热驱法、化学驱法和混相驱法。然而，这些方法都存在许多技术上的限制和缺点。混相驱法的气源问题、驱替流体（如CO<sub>2</sub>）流度过大，出现过早突破的问题；表面活性剂驱的成本过高以及化学稳定性的问题；聚合物驱存在着机械、剪切降解、微生物稳定性差，造成地层伤害及突破后的原油破乳等问题；热驱法的火烧油层会造成井下设备的损害及使石油变成焦炭；蒸汽驱的能量的充分利用等问题，都是目前亟待解决和值得认真研究的。

利用微生物及其代谢产物来增加石油的产量，这种技术被称为微生物提高石油采收率技术（MEOR）。该技术是将经过选择的微生物注入油层，随之发生它们为生存而在油藏内增殖产物的激励和运移作用，这种作用将有助于进一步增加二次采油后枯竭的油井的产油量，减少二次采油后留在地层中的残余油。虽然微生物提高石油采收率本身也具有一定的局限性。然而，这种独特的方法在许多方面具有优越性，因为它将自身复制单元（称细菌细胞）注入油藏，并在油藏内就地增殖，其结果是可成比例地扩大所波及的范围。微生物在油层中产酸、产气、产生表面活性剂等物质，较注入这些物质有不可比拟的优越性和效果，再加上微生物采油有工艺简单、投入少的优点，因此，应用前景广阔。

## 第一节 油层微生物学

油层微生物学的研究范围包括：（1）本源细菌的分布；（2）油层条件下细菌的生理学（即在高温、高压、高盐度，并有原油、岩石、粘土及已加到驱替水中的化学剂存在的条件下）；（3）接种的细菌和本源细菌间的相互影响；（4）控制油层中微生物群落的活性，使可能注入的细菌菌株和本源细菌的活性得到激励，以利于提高采收率。

### 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MEOR工艺是非常重要的。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。

#### 1. 硫酸盐还原菌

硫酸盐还原菌是油层中分布最广的菌种，也是人们最早研究的利用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。

下面列出的硫酸盐还原菌都曾从含油的地下水中分离出来：脱硫螺菌（*Spirillum desulfuricans*）；河口短螺菌（*Microspira aestuari*）；嗜热脱硫弧菌（*Vibrio thermo desulfuricans*）；弧

菌 (*Vibrio* sp.); 脱硫弧菌 (*Desulfovibrio desulfuricans*)。

单纯用硫酸盐还原菌的不利因素主要在于: (1) 对钢铁的腐蚀作用; (2) 由于这些细菌产生的  $H_2S$  在油藏中遇铁反应生成的  $FeS$  的胶状沉淀会堵塞地层; (3) 硫酸盐还原菌的相对缓慢的代谢活性。

## 2. 利用烃的细菌

能够氧化气态和液态烃的细菌主要是荧光极毛杆菌 (*Pseudomonas fluorescens*), 另外, 还有一些是假单胞杆菌菌株, 以及某些硫酸盐还原菌。

氧化甲烷细菌广泛散布于土壤、沉积和水环境中, 是假单胞杆菌科假单胞杆菌属。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, 存在于各厌氧环境之中。石油伴生气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。甲烷形成菌以前分置于三个目中, 目前是由四科和十四属所组成。

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

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

3) 甲烷微生物目 (Order Methanomicrobiales) 甲烷微生物目分甲烷微生物科 (Methanomicrobiaceae)、甲烷八叠球菌科 (Methanosarcinaceae) 和甲烷游动菌科 (Methanoplanaceae) 三个科。甲烷微生物属 (*Methanomicrobium*) 含有一个种, 它是短的、革兰氏阴性的活动杆菌。甲烷螺菌属的细胞是革兰氏阴性的弯曲杆菌或长的、波纹状的丝状菌。产甲烷菌属 (*Methanogenium*) 是一个由革兰氏阴性的、活动的、不规则的球菌所组成的海洋属 (Romesser 等, 1979)。该属含有已知的三个种, 即 *M. carcaci*, *M. marisnigri* 和 *M. thermophilicum* (嗜热产甲烷菌)。

甲烷八叠球菌科由甲烷八叠球菌属和甲烷丝毛菌属组成。

甲烷形成菌最适合的底物有  $H_2 + CO_2$ 、甲酸、一氧化碳、甲醇、醋酸、甲基胺、二和三一甲基胺以及乙基二甲胺。高分子量石蜡烃也能作为底物被发酵形成甲烷, 反应式为  $4CH_2 + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2$ , 但反应速度较慢。

## 4. 孢子形成杆菌 (*Spore-forming Bacillus*)

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。Zajic 和 Mesa-Howard (1985) 对从美国得克萨斯州休斯顿 Conroe 油田分离出的芽孢杆菌属的菌株进行了遗传性质 (通过 [G+C] 和杂交) 及表型性质 (兼性厌氧性、憎水性、嗜热性, 芽孢 (孢子) 形成性质、在烃类中繁殖, 以及产生多糖产物) 分析, 并得出了它们不是嗜碱芽孢杆菌 (*B. lkalophilus*) 的结论。它们生活的适宜温度是  $25 \sim 55^\circ C$ , 在 4.0% 或更浓的盐溶液中生产的多糖最多 (所有在 10% 盐溶液中繁殖的菌落都出现粘液状的外观)。所有富集培养介质都用氯化钠, 并将 pH 值调节到 10.0, 利用这种碱性条件来选择细菌, 得到的结果一是所选出的细菌可与二次碱性水驱液一起注入油层, 或在油层已经碱水驱后注入; 二是碱性条件常增加多糖的产量。

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.)

梭状芽孢杆菌菌株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、致软芽孢杆菌和多粘芽孢杆菌。这些细菌适用于使糖发酵, 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的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、各种油层条件下细菌的生理学

微生物提高采收率取决于所选用的微生物转化某些基质的特征能力, 微生物是在这些基质上进行新陈代谢的, 某些代谢产物将以有利方向影响原油的运移。

用于采油的微生物必须能在要采油的地层条件下增殖。这些条件是氧化—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条件不配伍, 生物体的繁殖就将受到限制或完全被抑制。这些条件中的每一种都可能对生物体的繁殖起抑制作用。

#### 1. 氧化—还原电势

地层岩石中的氧化还原电势是不高的, 因为地层中不存在氧。这样, 就限制了生物体的繁殖, 使生物活动时不能将电子传递给作为终端电子受体的氧。在这种条件下生长良好的是能从没有分子氧参与的那类有机分子被氧化到较高氧化态的反应中获得代谢能。含氮、含硫的化合物可作为另一类终端电子的受体。

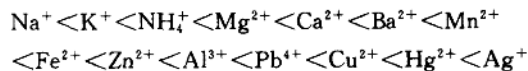
#### 2. pH 值

细菌繁殖的最佳 pH 值范围是在 7 附近的狭窄范围内。油层的 pH 值为 3~7, 而且往往是在 7 附近。例如甲烷生成菌对 pH 值是非常敏感的, 并且实际生成甲烷的场所都近于中性。在厌氧消化池中, 甲烷生成最适宜的 pH 值是在 7.0~7.2 之间。pH 值在 6.6 以下时, 产率急剧下降。pH 值在 6.2 以下则甲烷停止产生。产脂肪酸的细菌对 pH 值的敏感性较低, 并且在 pH 值下降至 4.5~5.0 时仍可继续产生。

#### 3. 盐度

引入微生物的地层水的盐度是个特殊问题, 它抑制微生物成功地繁殖。除了嗜盐细菌 (Halophilic bacteria) 能耐受高浓度的盐溶液之外, 一般细菌只能在低盐度环境中繁殖。盐浓度超过 0.5% 就可能对油层中繁殖细菌有不利影响, 而 5% 或更高的盐浓度就可以使细菌繁殖受到抑制。

溶液中个别的盐类使微生物的繁殖受到阻碍。有些地区的地下水中缺乏硫酸盐的还原作用, 这是由于二价阳离子的毒化作用所致。阳离子对微生物的抑制作用按下列顺序增大。



大多数浅油层中水的盐度是相当低的, 在深油层中的共生盐水一般含盐浓度较高。

#### 4. 温度

地层温度取决于地层深度, 从而使一般嗜温性微生物提高采收率的应用受到限制。如果选用代谢性符合要求的嗜热细菌, 则可使微生物提高采收率方法用于较深的地层。

讨论温度影响时, 必须区别残存的、繁殖的或“增殖的”细菌。虽然已知许多细菌在温度高达 90~100℃ 时还会残存下来, 但其生命过程已处于衰退状态。因此, 在应用微生物提高

采收率方法时,要求细胞快速地繁殖和合成一些代谢物。最佳繁殖温度的上限应不超过 55℃ (对兼性嗜热菌而言)。在选择候选油层时,了解细菌最佳生长温度是极为重要的。

## 5. 压力

若压力有数十兆帕时,压力是影响细菌细胞的重要因素。高压产生的影响可使生长条件变差和毒性元素浓度加大。高压往往改变细胞的形态。

静水压力对不同菌种所产生的影响相差极大。在地层水中广泛存在的脱硫弧菌最能耐压。脱硫弧菌还原硫酸盐的作用发生在 100MPa 条件下。

又如压力对赛氏杆菌属 (*Serratia marino*rubra) 形态的影响。这种生物体在 23℃ 和 0.1~10MPa 下培养 4 天时,繁殖成短杆菌的形态,在 40MPa 条件下,短杆菌变长,在 60MPa 条件下停止分裂,仍然存活的细胞则长成单独的菌丝体。当压力降低时,丝状体分裂成为一些单个活动的短杆菌。

一般地,压力对细胞代谢活性的影响比温度的影响要小些。因为细胞原生质的渗透压一般很高(由于原生质盐度的关系)。细菌的临界压力在 300~1200MPa 范围内。目前,人们将细菌在高压下的形态变化看作是 MEOR 工艺设计中的重要因素,因为细菌的形态对其在油层中的运移能力有很大的影响。

## 6. 营养物

在一般采用细菌提高原油采收率的方法中,是将细菌与营养物(如糖蜜)一起注入井内,溶液通过多孔岩石而扩散。选用的营养物必须使生物体能成功地繁殖,其代谢产物应对原油的运移有利,且营养物(培养基)价格较低,以保证细菌的繁殖和代谢产物的聚集。

微生物在地层中与原油接触时,其繁殖情况将影响原油的释放,但不会对原油的质量产生不利的影响。如果选定的微生物可以不靠一起注入的营养物繁殖,而是利用原油组分繁殖,就可以不用注入营养物质从而降低作业费用。

如果利用原油本身的组分来繁殖细菌,则必须供应其他一些基础营养物如氮源、磷源。因为油层本身是缺乏这类营养源的。在氮源不足的情况下,细菌繁殖缓慢,而且将碳源转化成为胞外粘液而不是形成细胞质。如果磷源不足,细胞不能合成足够的三磷酸腺苷(ATP)来维持代谢功能。在这些情况下,细胞只能简单地繁殖体积尺寸,却不能进行分裂。

## 7. 岩石基质

将微生物注入地层时,目的是让细菌细胞渗入地层并产生代谢产物。这些代谢产物与原油密切接触,可使原油向一个方向移动而被采出。想有效地将注入的微生物分布到整个多孔岩石中,了解细菌传播机理是十分重要的。试验证明,细菌传播的机理为细菌的布朗运动、营养物体的自然运动、细菌的增殖以及注入流体的流动等。

细菌及多孔介质的物理、化学和所带电荷的性质,对细菌的扩散倾向起着决定性作用。由于细菌倾向于粘附到岩石表面,降低了细菌注入岩石的能力。对此问题的研究表明,如果对表面电荷已了解,并进行了补偿,细菌在岩石表面上的粘附能力可以降低。当这种表面电荷最小时,细菌就可能最大限度地穿透多孔岩石,并相应地使原油的采收率提高。

Meyers 等人(1967)对于粘质赛氏杆菌(*Serratia marcescens*)被穿透到被油饱和和没有被油饱和的岩心中的情况进行了研究。他们发现透过速度和程度,与岩心的渗透率、孔隙度或岩心是否含油都没有关系。Yen 等人则发现岩石中存在原油,提高了芽孢和生活细胞(Viable cells)的穿透能力。Clark(1981)发现细菌穿透渗透率为 0.2~0.4 $\mu\text{m}^2$  的岩心时,细菌细胞的大小不是主要因素,产生影响的是离子浓度。注入高浓度的细菌悬浮液(每毫升含细

胞数大于 10 个) 时会堵塞地层, 并因此减少了细胞的分散作用。Yen 等人 (1980) 发现注入  $10^{-3}\text{mol/L}$  的焦磷酸离子, 可使微生物细胞在砂岩中的穿透能力增高。Jang (1984) 曾经观察到岩石的表面电荷及荷电细菌细胞与荷电岩石表面之间的相互作用因焦磷酸盐的处理而改变。雅尔布鲁 (Yar Brongh) 和科泰在飞马石油公司油田科学研究所使用能产生多种酸和气体的梭菌属细菌试验表明, 渗透率在  $86 \times 10^{-3} \sim 760 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时对供试验岩心释放石油数量的影响极小。

另有人认为, 细菌在高渗透油层中采油的可能性最大, 在致密的岩层中用细菌释放原油是无效的。认为利用微生物采油的油层渗透率应大于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。多士托列克和斯珀奈在实验室用乳酸盐培养基培养的脱硫弧菌属, 在原油饱和度为 50%~60%、渗透率低于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的岩心中观测到, 由于细菌活动, 原油释放非常少, 而在渗透率为  $1 \sim 5 \mu\text{m}^2$ 、石油饱和度为 40% 孔隙体积的砂岩中, 细菌释放油的程度达到残留孔隙体积的 32%。

梭状芽孢杆菌种 (*Clostridium*) 及芽孢杆菌种 (*Bacillus*) 的芽孢穿透砂岩岩心和充填砂柱时, 比植物细胞 (Vegetative cells) 容易些。有人发现这种情况是芽孢上较高的电荷与岩石上的同类电荷相互排斥的结果。Knapp 等人 (1984) 指出, 在砂岩中, 可运动的微生物比不能运动的微生物的穿透速度要高 3~7 倍。

### 三、接种细菌与本源细菌之间的相互影响

接种细菌和本源细菌之间会相互影响, 接种细菌的分布有其特殊性, 而且受许多因素的影响。这些因素包括水侵入的速度和数量、油层及水层的构造、其他地质条件、油层采油史等。在一个成功的 MEOR 设计中, 注入的菌株应当是占优势地位的一种, 而且在注入营养物质时与地层中的微生物易形成有利于采油的共生体系。

美孚公司在某油田曾作了现场研究。这个研究在 6 个月的时间内, 按预定的程序注入了 18 个、每个容量为 840L 的醋酸盐梭状芽孢杆菌 (*Clostridium acetobutylicum*) 的淡培养悬浮液。在油田试验期内, 以平均为  $11\text{m}^3/\text{d}$  的流速, 连续地向地层注入 2% 的最好的糖蜜液。以 120m 外的一口井为观察井。发现在 70 天内淡水突破。在开始注入接种液后的 80~90 天, 在产出水和气体中发现了发酵产品和未被利用的糖蜜。

分析发酵产品的量及组成时, 其结果与从纯醋酸盐梭状芽孢杆菌发酵结果不同。这说明了本源细菌对其产生的影响。注入的糖蜜激励了本源细菌的活性, 这些细菌和醋酸盐梭状芽孢杆菌在利用糖蜜上发生了竞争, 或是利用了一次代谢产物生产二次代谢产物。

后来, 曾分离出一种梭状芽孢杆菌, 它可以将短链酸 (甲酸到丁酸) 转化为长链酸 (戊酸到己酸), 用测量  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$  比的方法对甲烷进行分析表明, 这种气体的 20% 是由现代的碳源 (即糖蜜) 衍生的。这说明甲烷细菌的存在。这种细菌将醋酸盐梭状芽孢杆菌 (或其他的梭状芽孢杆菌种) 生产的二氧化碳和氢转化为甲烷。这些甲烷的产生, 对提高采收率是有利的。由此说明, 本源细菌的存在不会抑制接种细菌提高采收率的效率。反之, 如果出现共生生态体系, 可能比单独存在接种细菌对提高采收率的效率高。

为了避免本源细菌与接种细菌的竞争, 可采用接种细菌在数量上大大超过本源细菌的方法, 同时定期接种注入菌。

在注入程序上, 为了避免营养物质首先刺激本源细菌的生长, 应首先注入预选的菌种, 接着注入营养肉汤。之后注入糖蜜时, 接种细菌已到达适当的位置并开始繁殖。这样易出现共生生态体系。

在试验中还提出一种新方法, 即用一种细菌噬菌体去控制不需要菌种。噬菌体有选择性

地将不需要的菌种杀死，以防止本源细菌的某些菌种对接种细菌的影响。

#### 四、微生物菌株

对微生物的物性进行研究，筛选出有利于采油的微生物，是一项非常重要的工作。表 1-1 列出了许多研究工作者对普通微生物的研究结果。

表 1-1 可在油层内就地使用的微生物

| 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<br>( <i>Spirillum</i> )           | —    | 好氧，微氧性  | 有鞭毛，产生色素                          |
|          | 弧菌属<br>( <i>Vibrio</i> )              | —    | 兼性厌氧    | 有鞭毛，对酸度敏感，pH: 6~8                 |
|          | 气单孢杆菌属<br>( <i>Aeromonas</i> )        | —    | 兼性厌氧    | 温度: 20~40℃<br>有鞭毛，有些产酸，温度: 20~30℃ |
|          | 脱硫弧菌属<br>( <i>Desulfovibrio</i> )     | —    | 专性厌氧    | 有鞭毛，还原硫酸盐，使铁氧化                    |
| 短 杆 菌    | 假单孢杆菌属<br>( <i>Pseudomonas</i> )      | —    | 好 氧     | 有鞭毛，产生色素，有氧化烃类的能力                 |
|          | 埃希氏杆菌属<br>( <i>Escherichia</i> )      | —    | 兼性厌氧    | 有鞭毛，夹膜，pH: 7，温度: 37℃              |
|          | 肠杆菌属<br>( <i>Enterobacter</i> )       | —    | 兼性厌氧    | 有鞭毛的产酸和产气菌，温度: 37℃                |
|          | 黄杆菌属<br>( <i>Flavobacterium</i> )     | —    | 兼性厌氧    | 能运动的或不能运动的，产生色素                   |
|          | 芽孢杆菌属<br>( <i>Bacillus</i> )          | +    | 绝对或兼性厌氧 | 有鞭毛，夹膜，有些嗜热的产酸菌其芽孢是抗热的            |
|          | 梭状芽孢杆菌属<br>( <i>Clostridium</i> )     | +    | 专性厌氧    | 有鞭毛，嗜温性及嗜热性                       |
|          | 产甲烷杆菌属<br>( <i>Methanobacterium</i> ) | —    | 专性厌氧    | 产生甲烷，对氧敏感                         |
| 球 菌      | 微球菌属<br>( <i>Micrococcus</i> )        | —    | 好 氧     | 不能运动，耐盐 (5%NaCl)，产生色素             |
|          | 明串珠菌属<br>( <i>Leuconostoc</i> )       | —    | 好氧，兼性厌氧 | 不能运动，能产生夹膜                        |
|          | 蛋白分能菌属<br>( <i>Peptococcus</i> )      | —    | 专性厌氧    | 产生色素                              |
|          | 八叠球菌属<br>( <i>Sarcina</i> )           | —    | 专性厌氧    | 四联的，耐 pH: 0.9~9.8                 |
| 放 线 菌    | 土壤杆菌属<br>( <i>Athrobacter</i> )       | —    | 专性厌氧    | 多型性 (pleomorphism)                |
|          | 分枝杆菌属<br>( <i>Mycobacterium</i> )     | —    | 好 氧     | 不能运动                              |
|          | 棒杆菌属<br>( <i>Corynebacterium</i> )    | —    | 兼性厌氧    | 不能运动，多型性，能形成夹膜产生色素，温度: 37℃        |
|          | 纤维素单孢菌属<br>( <i>Cellulomonas</i> )    | —    | 好氧，兼性厌氧 | 多型性，溶解纤维素                         |
|          | 诺卡氏菌属<br>( <i>Nocardia</i> )          | —    | 兼性厌氧    | 形成菌丝体，产生色素                        |

## 第二节 微生物采油原理

在油田开发中,利用微生物提高原油产量,即提高原油采收率,一般是使细菌在油层中发酵,把油层作为巨大的生物反应器,将选择的微生物注入其中,由于细菌活动及代谢产物的作用,使油层中的残余油采出,从而提高采收率。

(1) 微生物在油层中增殖,形成生物量。特别是产粘液的细菌,当密集成团时,可选择性或非选择性地堵塞地层中的孔道,从而改变流动方向,扩大扫油面积。由于菌体通常粘附在岩石表面,改变岩石表面的润湿性,从而将岩石上附着的油膜排代下来。

(2) 能降解烃类的微生物可将高分子的石油烃类降解为低分子的烃类,从而降低石油的粘度和凝点,增加原油的流动性。

(3) 微生物的代谢产物有的可产生气体,如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$  等,使油层压力增加,从而提高产能。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等在一定压力条件下可以部分溶解在原油中,从而使原油体积膨胀,粘度降低,大大提高采收率。产生的  $\text{CO}_2$  气体可溶解于地层水生成碳酸,使地层中的碳酸盐岩部分溶解,从而使地层孔隙度增加,提高地层的渗透率。

(4) 就地发酵产生的有机酸和气体使井筒周围得到清洗。气体的作用是从死空间内推出原油以及清除堵塞孔隙的渣屑,平均孔隙尺寸得以增大,从而使井筒附近的毛细管压力变得有利于原油的流动。

(5) 微生物代谢产物有的可产生表面活性剂,从而降低水—岩石—原油体系的界面张力,提高洗油效率。

(6) 微生物的代谢产物生成的聚合物,如黄胞胶,可用于驱油。作用是可增加驱替液的粘度,从而降低流度比,提高波及系数,并可选择性封堵或非选择性封堵地层。

使用微生物提高采收率技术的优点在于:只要碳源(糖蜜或烷烃)和其他营养物质充足,便可在油藏就地产生代谢产物或使细胞生长,扩大其使用范围。此外,经过精心地设计工艺过程,可以综合利用几个机理,而不同于常规的化学驱油的单一机理。下面根据工艺过程分别叙述所涉及的一些机理。

### 一、井筒清洗

当水油比上升至不能再经济地开采的数值时,使许多油井处于或即将达到废弃的状态。生产井附近的毛管压力关系分析表明,采油量衰减的原因在于油井附近平均毛管压力发生了不利的变化。随着细小颗粒(粘土、矿物质、蜡和沥青质等)自地层向生产井附近迁移并使孔隙尺寸减小,毛管压力特征缓慢地出现变化,结果是邻近井筒处的毛管压力负值更高。伴随井筒附近毛管压力负值的增加,即水驱油过程中水相的相对渗透率增加,油井达废弃状态时,水淹油藏内的平均含油饱和度仍可能高于该井的残余油饱和度。除非采用有效的清洗井筒方法,否则增加原油产量是相当困难的,采用微生物清洗井筒是有效的方法。

将微生物与蔗糖营养物一同注入,微生物产生的代谢产物( $\text{CO}_2$ 、有机酸、酮、醇,还有甲烷和氢)对生产井周围的孔隙有很好的清洗作用。

#### 1. 酸

酸与许多矿物质,特别是与碳酸盐岩反应,可疏松粘土颗粒及其他的无机沉积物。

#### 2. 溶剂

溶剂可使有机沉淀物溶解,从而改善油相的流度。

### 3. 生物气体

大约关井 1~4 周使厌氧菌生长后, 井筒周围压力上升。当开井时, 可清除出数量可观的淤渣和钻井液。

微生物清洗井筒法与“吞吐”微生物采油方法机理十分类似, 二者都是同时利用水基代谢产物和生物气体产生的压力。不同之处仅在于工艺设计不同。在井筒清洗过程中, 只是一小部分油藏受到了处理, 且原油是从被处理的井产出, 而微生物吞吐采油过程中, 要处理油藏中较大的面积, 且注入接种井与生产井有一定距离。

## 二、选择性封堵

微生物可进行选择性封堵, 使非均质油藏的渗透率变异系数降低。美国的科学家进行了室内研究实验, 并取得了很大的进展。他们在双岩心渗透率实验中, 将细菌悬浮液经过支管在相同压差下注入到两个平行的岩心中, 因两个岩心渗透率不同, 细菌和营养物质优先分流进入渗透率较高的岩心, 使细菌在原有渗透率较高的岩心中快速聚集生长。结果原来渗透率较高的岩心渗透率降低比另一个岩心快得多。换言之, 两个岩心的渗透率差异变小。在驱油实验中证实了这一点。

## 三、生物“吞吐”驱油

美国南加州大学 (USC) 研究组发展了一种就地生物“吞吐”营养物驱油法, 用于实验室规模的充填砂柱中开采重油。在接种之前先将营养物充入柱内。接种后, 将培育/释压/营养物驱过程反复循环多次, 以此方法实现就地生物“吞吐”/营养物驱油, 此工艺明显表现出几个优点。对重油开采尤其如此。

(1) 尽管接种细菌的用量很大, 并且最多的细胞分布仅限于进口部位, 但在静态培育期间内, 细胞能够在柱中扩散和游动。由于这种杆菌 (*Bacillus* sp.) 细胞具有周缘鞭毛, 所以, 流动性对细胞的运移有增强作用。

(2) 静态培育过程中, 培养物同时也转化成有助于使油移动的代谢产物。

(3) 借助于补充新鲜的营养物恢复油藏内的就地活性, 采油循环可进行多次。更重要的是不只一种采油机理对提高采收率发生作用。

(4) 未发生堵塞孔隙的作用, 且重油的存在有利于细菌的运移。

根据各类菌株固有的习性以及现场试验的结果, 有以下几点认识。

### 1. 产生代谢产物

静态培育期间, 由于细胞在油层内的扩散和迁移, 形成了生物表面活性剂和二氧化碳。生物表面活性剂改变了油水之间的界面张力且润湿了砂粒。于是在孔隙介质中, 推动油穿过毛细孔道所需的压力就会降低。

### 2. 溶解气驱和毛管压力的改变

产生的二氧化碳使压力上升的程度不足以造成原油膨胀, 而是二氧化碳溶解在水相中, 且在突然释放压力形成的冲击波作用下, 对围闭在微小毛细管死孔隙中的油起到释放作用。油在孔隙介质中的这种重新分配, 改变了水驱二次采油期间所造成的油、水相之间的毛细管压力。那么原油富集带形成以后及随后的营养物驱的过程中, 原油驱替更为容易。

随着溶解气的膨胀, 自水相分离出一些残余油和增殖的培养基, 细胞也被明显地推向出口。上述作用必然有助于细胞在油层内的渗透。而且, 如果有些孔隙曾被细胞聚集物堵塞的话, 溶解气驱和压力冲击可使之解堵。

### 3. 原油富集带的形成和代谢产物的再生

补充营养物驱油的作用, 在于将培养期间已被生物表面活性剂所解脱出的油以及溶解气驱过程中自死孔隙中释放出的油驱替出来。此外, 还能驱出代谢生成的废物并激发细胞的活性。因此, 细胞继续生长并进一步向孔隙介质中迁移, 同时再生成更多的代谢产物。这样可以进行多次采油循环。

## 第三节 微生物培养与筛选

借助微生物的活动及代谢产物来提高油田采收率, 必须保证微生物的生命活动并使其在地层中繁殖。在其生命过程中, 首先要求有利于微生物生长的环境, 在这个前提下, 必须不断地从外界环境吸收各种物质, 以获取其生命的能源及碳源, 这个过程就是微生物的培养。此外, 还要把适用于地层条件、有利于提高采收率的细菌通过对比筛选出来。

### 一、培养

#### 1. 营养物

培养微生物, 要先了解微生物生长所需要的营养元素。这些营养物质, 少量是以气态分子(如  $H_2$ 、 $N_2$ 、 $CO_2$ ) 形式提供, 大量的以有机物或无机化合物形式提供。根据这些营养物在微生物细胞中的生理功能不同, 将它们分为能源、碳源、氮源、无机盐、生长因子和水六种营养要素。

1) 能源 提供微生物生命活动的营养物质称为能源。能源可分为光能和化学能两类。少数微生物可利用光能, 大多数微生物是依靠各种生物化学反应, 氧化各种化合物而获得能量。可作能源的物质很多, 如  $NH_4^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_2S$ 、 $S$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $H_2$  可作某些自养细菌的能源; 糖类、脂肪、蛋白质以及它们的各种降解物, 还有烃类、醇类、有机酸等是异养微生物的能源。许多有机物既作能源又可兼作碳源或氮源。譬如葡萄糖既是异养菌的能源, 又是碳源, 而蛋白质、氨基酸有时可兼有能源、氮源、碳源三种功能, 甚至四种功能。

2) 碳源 凡可被微生物用来构成细胞物质或代谢产物中碳架来源的营养物通称碳源物质。碳源物质通过微生物的分解利用, 不仅为菌体本身的合成提供碳架合成来源, 还可为生命活动提供能量, 碳源也往往可作能源。微生物细胞物质及代谢产物几乎都含有碳, 所以微生物对碳源的需要量最大, 是微生物所需的最基本的营养要素。

可作微生物碳源的物质极其广泛, 种类很多。常用的有糖类、醇类、有机酸、烃类、蛋白质及其降解物。微生物的种类不同, 利用这些含碳物的能力也不相同。有的能广泛利用各种不同类型的含碳物。如假单孢菌属中有的菌可利用 90 种以上的碳水化合物。有的微生物利用碳源物质的能力极为有限。如某些甲基营养型细菌只能在甲烷或甲醇中生长。一般来说, 对异养微生物而言, 糖类是最好的碳源, 用于采油的微生物通常以廉价的糖蜜为营养物。

3) 氮源 凡能被微生物用于构成细胞物质和代谢产物中氮素来源的营养物称为氮源。氮源物质一般不作能源用, 只有少数自养菌能利用铵盐、硝酸盐既作氮源又作能源。在特殊环境中如有些厌氧菌在无氧和缺糖时也可把氮源(氨基酸)当作能源用。

氮源物质种类很多。实验室和生产上常用的有机氮如牛肉膏、蛋白胨、酵母膏、鱼粉、豆粉、血粉、蚕蛹粉、花生饼粉、玉米浆等; 常用的无机氮有各种铵盐、硝酸盐。此外, 尿素和氨水也是常用的氮源。

4) 无机盐 无机盐为微生物生长提供必需的矿质元素。常用的无机盐有硫酸盐、磷酸盐、

氯化物以及含有钾、钠、钙、镁等元素的化合物。根据微生物对无机盐的需求量不同，通常将无机盐分为主要元素和微量元素两类。微量元素需求量极少，因此，混杂在水或其他营养物质中的极微量数量就足以满足微生物的需要。

5) 生长因子 生长因子是指某些微生物不能用普通的碳源、氮源物质进行合成，而必须加入少量的生长需求的有机物质。按它们的化学结构分成维生素、氨基酸和嘌呤（或嘧啶）碱基三种。不同的微生物需要不同的生长因子。

绝大多数生长因子以辅酶与辅基的形式参与代谢中的酶促反应，少数生长因子还具有其他特殊生理功能。实验室中常用酵母膏、蛋白胨、牛肉膏等作为各种生长因子的廉价原料添加在培养基中，以满足某些微生物对生长因子的需要。

6) 水 水是微生物最基本的营养物。它在微生物细胞中的含量达 70%~90%。

## 2. 培养基

培养基是人工配制的适合于微生物生长繁殖和积累代谢产物的营养基质。根据微生物对营养的不同需求，人们设计了数以千计的培养基。培养基按用途大致可分为以下几类。

1) 基础培养基 营养要求相似的微生物所需要的营养物质除少数几种外，其他大多数成分相同。因此，将它们所需的共同成分配制在一起，组成一个基础配方，再根据某种微生物的特殊需要，在这基础配方中添加所需物质。培养光合作用微生物的基础培养基如下。

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  : 0.2g;     $\text{K}_2\text{HPO}_4$  : 1g;  
 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  : 0.05g;     $\text{CaCl}_2$  : 0.02g;  
 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  : 0.02g;     $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : 0.001g;  
 水: 1000ml.

如果用这个基础培养基培养绿硫细菌或紫硫细菌，需再添加  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1g,  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  1g,  $\text{NaHCO}_3$  5g。

2) 加富培养基 指在普通培养基内加入额外营养物质（如血清、动植物组织液或生长因子）的一类营养丰富的培养基。常用于培养某种或某类对营养物质要求苛刻的异养微生物。

3) 鉴别培养基 指含有某种代谢产物指示剂的培养基。微生物在这类培养基上生长后分泌的代谢产物与指示剂起反应，产生某种明显的特征性变化。根据这种变化可将该种微生物与其他微生物区别开来。

4) 选择性培养基 这是根据某种（类）微生物的特殊营养要求或对某种物理化学因子的抗性而设计出来的一类培养基。利用这种培养基可将某种（类）微生物从混杂的微生物群体中分离开来。例如以石油作唯一碳源的培养基，可以有选择地分离到利用石油的微生物。

另外，还可根据对培养基的了解程度、培养基的物理状态和使用目的进行分类。

培养基的好坏直接关系到所从事工作的成败。因此，如何设计与选择培养基是必须掌握的技术。设计培养基要注意以下几点。

(1) 设计培养基应根据不同营养类型的微生物制备不同的培养基。如果要培养或分离某种特殊类型的微生物，还需采用特殊的培养基。

(2) 各种营养物比例要适当。营养配比不适当，微生物生长不好。

(3) 培养基的物理化学条件要适宜。因培养基中的 pH 值、渗透压、氧化还原电位等对微生物生长影响很大。

(4) 在设计培养基时，应尽量利用容易获得，价格低廉的原料作培养基成分。尤其在微生物大规模应用中，培养基用量非常大，只有价格低廉的培养基才能降低成本。