

复杂油藏物理法、物理-化学复合法  
强化开采理论与技术丛书

卷五

# 低渗透油藏低频谐振波 化学复合强化开采理论与技术

◎ 蒲春生 刘 静 著

石油工业出版社

复杂油藏物理法、物理-化学复合法强化开采理论与技术丛书(卷五)

# 低渗透油藏低频谐振波 化学复合强化开采理论与技术

蒲春生 刘 静 著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书为丛书的第五卷,全面系统地介绍了低频谐振波、低频谐振波化学复合强化开采相关理论和技术,是复杂油藏物理法强化开采、物理-化学复合法强化开采的重要组成部分。

本书可供从事油气田开发工程、石油地质等方面的科研工作者和工程技术人员参考,也可以作为相关专业领域的博士、硕士研究生和高年级大学生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏低频谐振波化学复合强化开采理论与技术/蒲春生,刘静著.  
北京:石油工业出版社,2015.7

(复杂油藏物理法、物理-化学复合法强化开采理论与技术丛书;5)

ISBN 978-7-5183-0808-8

- I. 低…
- II. ①蒲… ②刘…
- III. 低渗透油层-石油开采
- IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 156877 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523541 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

---

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:17

字数:350 千字

---

定价:78.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 序

我国低渗透、特低渗透油藏资源十分丰富,近年来新发现石油地质储量中,低渗透、特低渗透油藏高达60%~70%。低渗透、特低渗透油藏注水开发难度大,普遍存在注水注不进、产量低、水窜严重、采收率低和油井注水效果程度差等问题,综合开发效益不高,是未来石油行业攻关的重要研究方向之一。

大功率低频谐振波采油技术利用波动物理场激励油层,通过强大振动力作用于地层,压力波在地层中的传播,使油层及流体产生各种物理和化学变化,改善油层渗流条件、解除油层堵塞、疏通油流通道、创造有利于原油流动的环境,达到油水井增产增注和提高油藏整体驱油效率与采收率的目的,是一种成本低、效益好、储层伤害小的生态物理采油方法。

近15年来,在前人研究基础上,蒲春生教授一直坚持在这一领域辛勤地耕耘,取得了一系列重要的成果,并完成了《低渗透油藏低频谐振波化学复合强化开采理论与技术》的编著。本著作重点分析了低频谐振波以及低频谐振波化学复合技术的研究现状,并从宏观及微观角度对低频谐振波以及低频谐振波化学复合作用机理进行了更加全面的认识与分析,首次创新性地将低频谐振波和低频水力脉冲波等物理采油方法与化学采油方法相结合的技术引入低渗透、特低渗透油藏的注水开发中,同时阐明低频波动物理场与化学剂场之间的协同促进作用机制;另外,著作中还更加全面地介绍了低频谐振波辅助化学剂复合强化采油技术的矿场应用情况,突破了单一技术的应用局限,为低频谐振波技术在低渗透、特低渗透油藏中实现高效注水开发提供了科学的理论指导。

本书是迄今为止第一部系统阐述低频谐振波对化学剂协同促进作用理论与技术的专著,是从事低渗透、特低渗透油藏高效注水开发方面的科研工作者和技术人员很好的参考书。同时,本书的出版也必将对相关学科领域理论技术研究起到重要的推动作用。

中国工程院院士

韩 旭

2015年5月15日

# 前 言

当前,我国石油工业面临严峻的形势,石油天然气产量的增加速度与国民经济的快速发展形成了尖锐的矛盾,东部地区的大庆、胜利、辽河、大港等老油田基本上都已陆续进入注水开发的中、高含水期,面临油田含水逐年升高、原油产量不断下降的难题。新发现并投入开发的油藏绝大多数属于低渗透、特低渗透、稠油、超稠油等难动用油藏,而且这些新增原油储量大部分处于生态环境脆弱的中西部地区(沙漠、戈壁、黄土高原、滩海和深海地区),储层类型多、埋藏深、地质条件复杂、地理条件恶劣,整体采收率低,资源浪费严重,开发成本很高,技术难度极大。同时,这些地区的生态环境极为脆弱,给油田的开发带来更为严峻的挑战。因此,如何在不断发展、完善油田现有开发及采油工艺技术的基础上,加快寻找、研究、发展一些效果好、成本低、不伤害油层、对生态环境不造成破坏的原油增产与提高采收率新技术和新方法,最大限度地提高难动用原油的产量和原油的采收率,保护油层和生态环境,降低综合成本,提高整体经济效益与社会效益,正逐步成为我国石油科技工作者共同关注的问题。研究开发适合我国难动用油藏实际的高效低成本物理法强化开采和物理-化学复合法强化开采与提高采收率新技术具有重要的意义。

物理法强化开采技术利用大功率声波、超声波、电磁波、电液脉冲波、爆燃气体高压冲击波等物理场来处理激励油气储层以实现注采井的增产增注和提高油藏整体采收率的目的,具有效果好、适应范围广、工艺简单、成本低廉、不伤害油层与生态环境等特点,是近年来低渗透、特低渗透、稠油、超稠油等难动用油藏高效开发的一个十分重要的发展方向。物理-化学复合法强化开采技术就是将各种物理场对油藏的激励作用和化学处理剂对油藏的化学作用有机地结合起来而形成的高效复合采油增产与提高原油采收率的新技术。1987年以来,笔者所带领的科研项目组针对我国低渗透、特低渗透、稠油、超稠油和中、高含水等难动用油藏实际,一直致力于储层液-固体系微观动力学、储层波动力学、储层伤害孔隙堵塞预测诊断与评价、波场强化采油、电磁波强化采油、高能气体压裂强化采油等领域的基本理论与工程应用方面的学习和研究工作,并逐步将低频水力脉冲波、声波、超声波、电磁波、电液脉冲以及高能气体压力波与化学强化开采技术相结合,系统研究物理-化学复合法强化开采理论与技术。特别是近10年来,项目组的研究工作被列入了国家西部开发科技行动计划重大科技攻关课题“陕甘宁盆地特低渗透油田高效开发与水资源可持续发展关键技术研究”(2005BA901A13)、国家科技重大

专项大型油气田及煤层气开发(项目编号:2008ZX05009)、国家 863 计划重大导向课题“超大功率超声波油井增油技术及其装置研究”(2007AA06Z227)、国家 973 计划“中国高效气藏成藏理论与低效气藏高效开发基础研究”三级专题“气藏气—液—固体系微观动力学特征”(2001CB20910704)、国家自然科学基金“油井燃爆压裂中毒性气体生成与传播规律研究”(50774091)、教育部重点科技攻关项目“振动—化学复合增产技术研究”(205158)、中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目“低渗油田大功率弹性波层内叠合造缝与增渗关键技术研究”(05E7038)、中国石油天然气股份有限公司风险创新基金项目“电磁采油系列装置研究与现场试验”(2002FX-23)、陕西省重大科技攻关专项计划项目“陕北地区特低渗油田保水开采提高采收率关键技术研究”(2006KZ01-G2)和陕西省高等学校重大科技攻关项目“陕北地区低渗油田物理—化学复合增产与提高采收率技术研究”(2005JS04)以及大庆、胜利、辽河、大港、长庆、延长油矿、塔里木、吐哈、吉林、中原等石油企业的科技攻关项目和技术服务项目,使相关研究与现场试验工作取得了十分重要的进展,获得了良好的经济效益与社会效益。在笔者及其合作者 20 年研究工作积累的基础上,结合前人有关的研究工作,形成了一套适合我国难动用油藏实际的高效低成本物理法和物理—化学复合法强化开采与提高采收率基本理论与配套技术的基本框架,总结撰写出了这套《复杂油藏物理法、物理—化学复合法强化开采理论与技术》丛书。在笔者 20 年的研究工作和本丛书的撰写过程中,自始至终得到了郭尚平院士、王德民院士、韩大匡院士、戴金星院士、罗平亚院士、袁士义院士、李佩成院士、张绍槐教授、葛家理教授、张琪教授、李士伦教授、陈月明教授、赵福麟教授等前辈们的热心指导与无私帮助。在此,特向先生们致以崇高的敬意和由衷的感谢。

本书为丛书的第五卷,全面系统地介绍了低频谐振波化学复合强化开采相关理论和关键技术,是复杂油藏物理法强化开采、物理—化学复合法强化开采的重要组成部分。

我国中低渗资源比较丰富,随着石油勘探开发的快速发展,低渗透油藏地质储量在当年新探明储量中所占比例高达 60%~70%。但是低渗透油田注水开发难度大,普遍存在注水注不进、产量低、水窜严重、采收率低和油井注水效果程度差等问题,因此综合开发效益差。所以中低渗透油田持续稳定的开发决定着我国石油行业稳定发展的重要潜力,也是未来石油行业公关的主要研究方向。因而随后开展了压裂、酸化、完井等一系列的补救措施,这些措施在暂时减缓采收率下降幅度和含水率的同时,可能造成水窜使得油藏无法恢复生产或者是油藏被伤害的严重后果,无法从根本上提高潜在的采出程度,因此寻找新的成本低、效益好、伤害小的提高采收率的方法和技术越来越迫切。

低频谐振波技术利用波动物理场激励油层来实现中低渗透油藏增产增注与提高采收率的目的,是一种成本低、效益好、伤害小的生态物理采油方法。对波场采油的研究国

外开始得比较早,苏联和美国从20世纪50年代就开始了大量的研究,60年代已开始进行现场试验,并在现场获得广泛的应用,取得了显著的经济效益。中国从90年代开始该项技术的研究,相继进行了大量室内实验研究,并获得了成功的矿场试验,但由于对低频振动作用下地层岩石孔隙中油水渗流微观动力学机制缺乏系统研究与认识,致使现场应用效果不稳定,90年代中后期,这项技术的研究与应用逐步趋于停滞。2000年以来,随着国内低渗透、特低渗透油藏开发的广泛开展和对环境保护力度的不断加大,低频谐振波技术又逐步引起石油行业的高度重视,有望成为低渗透、特低渗透油藏提高注水开发效率的一种高效低成本的有效手段。

项目组在低渗透、特低渗透波动-化学复合强化开采技术方面进行了近15年的研究工作,在以下几个方面取得了一些重要的进展:

(1) 基于国内外在低频谐振波领域研究成果的基础上,对低频谐振波单独物理作用机制的研究揭示了低频谐振波对低渗透、特低渗透储层原油黏度、岩石渗透率以及油水相对渗透率曲线的影响规律,探讨了影响相渗特征的内在微观作用机制主要为有效降低孔隙内流体黏附层厚度并激励盲孔内流体的流动。

(2) 揭示了低频谐振波对表面活性剂洗油性能、乳化性能、扩散性能、吸附性能影响规律的协同作用机制,并建立了不同低频谐振波参数下表面活性剂在地层岩石表面吸附的修正两阶段吸附模型。

(3) 建立了低频谐振波表面活性剂复合驱油动力学数学模型,揭示了低频谐振波波动参数对表面活性剂有效作用距离、有效作用时间、出口端浓度、不同位置处的含水饱和度和采出程度等参数的影响敏感性。

(4) 基于人工震源扰动系统的结构、工作原理以及人工震源检测系统的原理、仪器和现场应用,给出人工震源系统的扰动力、频率以及立柱支撑弹簧材料等重要参数的计算方法和优选值,并且研制了新型人工震源扰动系统,设计了小型实验样机的制造参数。

(5) 形成了低频谐振波化学复合强化采油现场配套工艺技术,优化了施工工艺参数,确保现场施工达到最佳生产效果。

全书共分十章。第一章阐述了低频谐振波和表面活性剂采油基本原理及技术研究现状;第二章介绍了低频谐振波对储层岩石的物性作用和影响规律;第三章阐述了低频谐振波对液滴、单管单相流、单管油水两相流、分支管油水两相流的作用机制;第四章阐述了低频谐振波对表面活性剂洗油性能、吸附性能、乳化性能、扩散性能等的影响,揭示其低频谐振波表面活性剂协同作用主控因素和影响规律;第五章建立低频谐振波表面活性剂复合驱油动力学数学模型,并对波动化学驱油进行敏感性参数分析;第六章介绍了低频谐振波扰动系统的结构、工作原理以及参数计算方法,并进行新型扰动系统研究;第七

章建立了低频谐振波扰动系统动力学模型,通过对模型求解确定震源参数,并进行实例计算;第八章建立了低频谐振波在地层中传播的动力学模型,分析了波场参数对储层渗流参数影响的主控因素和规律;第九章阐述了低频谐振波化学复合技术的现场应用情况,并进行效果分析;第十章对低频谐振波化学复合强化采油理论与技术发展趋势进行了展望。

本书所涉及的内容主要来自笔者及其所领导的研究小组以往的研究成果。同时,部分内容参考了近年来国内外同行专家在这一领域公开出版或发表的相关研究成果。由于笔者近 15 年的研究工作和在本书的编写过程中涉及的参考资料较多,书中未能一一标出,重要的参考资料都可以在参考文献目录里找到。特做此说明,并对他们致以诚挚的谢意。

在本书成果研究和编写过程中,课题组刘静参加了第一章、第二章、第三章、第四章、第十章的研究与编写工作,张鹏和贝君平参加了第五章、第六章、第七章的研究与编写工作,吴飞鹏参加了第八章、第九章的研究与编写工作。同时,课题组郑黎明、尚校森、宋元新、王蓓等学生们也对本书的成果研究与总结做了大量的工作。在此,对他们付出的辛勤劳动致以衷心感谢。

中国石油大学(华东)油气田开发工程国家重点学科 211 工程建设计划、985 创新平台建设计划和石油工业出版社对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

目前,低频谐振波化学复合强化采油技术还很不成熟,诸多方面还处于探索阶段,加之笔者水平有限和经验不足,书中难免有不少缺点和错误,欢迎各位同行和专家提出宝贵意见。



# 目 录

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 第 1 章 低频谐振波和表面活性剂采油基本原理及技术研究现状 ..... | (1)   |
| 1.1 低频谐振波采油基本原理 .....                | (1)   |
| 1.2 表面活性剂驱油基本原理 .....                | (5)   |
| 1.3 低频谐振波采油技术研究现状 .....              | (7)   |
| 1.4 表面活性剂驱油技术研究现状 .....              | (12)  |
| 1.5 低频谐振波化学复合驱油技术研究进展 .....          | (17)  |
| 1.6 小结 .....                         | (17)  |
| 第 2 章 低频谐振波对储层岩石与流体物性影响机理研究 .....    | (19)  |
| 2.1 低频谐振波条件下储层流—固耦合运动模型与质点运动规律 ..... | (19)  |
| 2.2 低频谐振波室内动态模拟系统工作原理 .....          | (40)  |
| 2.3 低频谐振波对原油黏度的影响 .....              | (42)  |
| 2.4 低频谐振波对储层岩石渗透率和孔隙度的影响 .....       | (47)  |
| 2.5 低频谐振波对岩心润湿性影响实验研究 .....          | (51)  |
| 2.6 低频谐振波对油水相渗(相对渗透率)特征影响的研究 .....   | (53)  |
| 2.7 小结 .....                         | (69)  |
| 第 3 章 低频谐振波表面活性剂复合驱油实验研究 .....       | (70)  |
| 3.1 生物酶表面活性剂驱油实验研究 .....             | (70)  |
| 3.2 低频谐振波驱油实验研究 .....                | (77)  |
| 3.3 低频谐振波辅助生物酶表面活性剂驱油实验研究 .....      | (89)  |
| 3.4 低频谐振波辅助生物酶表面活性剂驱油机理分析 .....      | (103) |
| 3.5 小结 .....                         | (105) |
| 第 4 章 低频谐振波表面活性剂复合驱油协同作用机制研究 .....   | (107) |
| 4.1 低频谐振波对表面活性洗油性能的影响 .....          | (107) |
| 4.2 低频谐振波对表面活性剂乳化性能的影响 .....         | (111) |
| 4.3 低频谐振波对表面活性剂吸附性能的影响 .....         | (114) |
| 4.4 低频谐振波对表面活性剂扩散性能的影响 .....         | (121) |

|            |                                       |              |
|------------|---------------------------------------|--------------|
| 4.5        | 低频谐振波表面活性剂复合驱油实验研究 .....              | (123)        |
| 4.6        | 小结 .....                              | (127)        |
| <b>第5章</b> | <b>低频谐振波表面活性剂复合驱油数学模型研究 .....</b>     | <b>(129)</b> |
| 5.1        | 模型的假设条件 .....                         | (129)        |
| 5.2        | 基本模型方程 .....                          | (129)        |
| 5.3        | 模型求解 .....                            | (132)        |
| 5.4        | 波动化学复合驱油主要影响因素敏感性分析 .....             | (141)        |
| 5.5        | 小结 .....                              | (143)        |
| <b>第6章</b> | <b>低频谐振波强化采油系统及其作用动力学模型研究 .....</b>   | <b>(144)</b> |
| 6.1        | 人工震源系统简述 .....                        | (144)        |
| 6.2        | 人工震源系统动力学特征的简化 .....                  | (145)        |
| 6.3        | $M - m_e$ 系统运动微分方程的建立与求解 .....        | (148)        |
| 6.4        | $M - m_e$ 系统振动参数的确定 .....             | (156)        |
| 6.5        | 计算实例与振动系统运行参数优化 .....                 | (163)        |
| 6.6        | 小结 .....                              | (164)        |
| <b>第7章</b> | <b>低频谐振波强化采油扰动系统研究 .....</b>          | <b>(165)</b> |
| 7.1        | 人工震源核心扰动系统的结构 .....                   | (165)        |
| 7.2        | 人工震源核心扰动系统的工作原理 .....                 | (166)        |
| 7.3        | 人工震源核心扰动系统主要参数的计算 .....               | (166)        |
| 7.4        | 人工震源振动检测系统的研究 .....                   | (173)        |
| 7.5        | 新型人工震源扰动系统的研究 .....                   | (175)        |
| 7.6        | 小结 .....                              | (184)        |
| <b>第8章</b> | <b>强化采油系统低频谐振波在地层中传播动力学模型研究 .....</b> | <b>(185)</b> |
| 8.1        | 低频谐振波径向传播动力学数学模型研究 .....              | (185)        |
| 8.2        | 波场参数对储层渗流参数的影响规律研究 .....              | (193)        |
| 8.3        | 小结 .....                              | (199)        |
| <b>第9章</b> | <b>低频谐振波 - 化学复合强化采油技术现场应用 .....</b>   | <b>(200)</b> |
| 9.1        | 低频谐振波采油矿场应用 .....                     | (200)        |
| 9.2        | 低频谐振波表面活性剂复合采油矿场应用 .....              | (227)        |
| 9.3        | 小结 .....                              | (235)        |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 第 10 章 低频谐振波化学复合强化采油理论与技术展望 .....  | (236) |
| 10.1 低频谐振波化学复合强化采油研究成果总结 .....     | (236) |
| 10.2 低频谐振波化学复合强化采油理论与技术的发展趋势 ..... | (238) |
| 10.3 进一步发展需要研究解决的几个关键问题 .....      | (239) |
| 参考文献 .....                         | (246) |

# 第1章 低频谐振波和表面活性剂采油 基本原理及技术研究现状

低频谐振波采油技术,又称(人工)地震采油技术、低强度波动采油技术、低频谐振波采油技术,是利用强大的振动能量直接或间接作用于地层,通过振动波在地层的传播,使油层及流体产生不同的物理和化学变化,从而改善油层渗流条件,达到油水井增产增注目的的一种物理法采油技术。低频波动采油技术投入较少、产出相对高、工艺比较简单,对油层和环境无伤害,对于实现储层提高原油采收率,提高油田的整体开发效益,提供了一种新的技术措施<sup>[1-3]</sup>。

## 1.1 低频谐振波采油基本原理

20世纪50年代,低频谐振波采油技术兴起于苏联和美国,是一种伤害小、成本低、效益好的物理采油方法。低频谐振波采油技术应用于油田生产来源于自然现象对人们的启示<sup>[4-6]</sup>,1938年和1948年苏联老格罗兹尼油田和北高加索 Starogroznenskye 油田地震后,油井出现增油现象,并且时间持续长达数周,有的甚至增油45%左右<sup>[7-10]</sup>。首先,在低渗透、低产和低能井区进行了水力脉冲声波处理,获得理想效果;后来又发展了较大功率的声波发生装置,从而使振动作用范围明显扩大<sup>[4]</sup>。20世纪50年代,美国也开始了声波采油技术的研究,包括美国西弗吉尼亚大学、塔尔萨大学、休斯敦 SPOR 公司等科研单位取得了大量研究成果,并申请了多项声波采油专利。例如,1964年在俄克拉何马州的一口低产井上进行了现场试验,平均增产0.92t/d,有效期持续1年。低频谐振波采油技术在鞑靼斯坦(库兹涅佐夫等,2009)的多个油田进行了应用,采取该技术后,效果显著,实现了水井增注、油井复产、提高枯竭油藏采收率的目的<sup>[11]</sup>。加拿大 Alberta 和 Saskatchewan (Maurice B. Dusseault 等,2000)的40余口稠油油井采用低频脉冲水力振荡技术进行解堵,解除动射孔孔眼的砂粒或沥青质的堵塞、降低近井带表皮系数,达到了旧井复产、增产的目的,产油砂或原油井在振动后复产产量5~10m<sup>3</sup>/d,部分达到12~14m<sup>3</sup>/d,部分高含水井含水率明显下降<sup>[12]</sup>。美国俄克拉何马州 Osage 郡(R. V. Westermarck 等,2001)的浅层油藏高含水井利用了偏心管柱转动振动装置实施了井下低频振动试验,起到降低含水率的目的<sup>[13]</sup>。

中国开展低频谐振波采油技术研究较晚。1990年10月,国家地震局工程力学研究所与吉林油田钻采工艺研究院就开始进行人工地震采油技术探索性研究,一直到1993年6月,共进行了4个区块6次人工地震采油现场试验,其中500m浅油井4次,1250m

中深油井 2 次,均取得了增油效果,从此,开创了国内人工地震采油的先河<sup>[8]</sup>。之后,低频谐振波采油技术包括人工地面或井下谐振波采油技术、水力脉冲振荡技术和电脉冲技术等均在国内外许多油田进行了应用。1993 年大庆油田采油七厂和新疆克拉玛依油田 1764 井区、1996 年以来辽河油田、1998 年蒙古林砾岩油藏的蒙 13 计量站和蒙 17 计量站、1999 年河南油田下二门油区、2001 年濮城油田和卫城油田及中原油田文 51 北块、2004 年大庆油田朝 44 南一大榆树区块、2008 年延长油田甘谷驿油田麻科义试验区、2010 年大庆长垣外围低渗透油田、2010 年以来长庆西峰油田和华池油田的一系列油水井进行人工地震采油技术现场试验和油水井渗流特征改造,取得了较好的增油、增气、增注效果<sup>[14-26]</sup>。如该技术在河南油田下二门油区作业处理了 3 口注水井,注水量增加 25~35m<sup>3</sup>/d,13 口油井中,12 口井有效,日增油 11t,平均增产率达到 36%,平均有效期超过 3 个月;2001 年 5 月,中原油田在文 51 北块实施地震采油后日产液基本稳定,日产油增 10t,含水下降 3%,日产气上升 2000m<sup>3</sup>,第二周期累计振动 268h,震后产液基本稳定,日产油上升 6t 左右,含水下降 1%,日产气增 8000m<sup>3</sup>;大庆油田从 2002 年 10 月至 2005 年末共在 70 口井上进行了低频水力振动注水矿场试验,措施有效率为 100%。平均降低注入压力 2.5MPa,平均单井增注 19.8m<sup>3</sup>/d,增注幅度 98%,70 口井累计增注 45.64 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,对应受益油井 191 口,累计增油 4.26 × 10<sup>4</sup>t。

随后由于地震增油现象,开始进行模拟地震采油装置的研制。根据震源工作原理的不同可以分为机械打击式震源、液压式震源、气体爆炸震源、电磁激励震源等<sup>[7,27]</sup>。按照震源与油层位置不同,可以分为井下震源和地面震源<sup>[28]</sup>。

由于美苏两国较早开始对低频谐振波采油技术进行研究,因此美苏两国在地震采油装置研发方面要领先于其他国家。1990 年苏联 Kuznetsov 等用 20t 可控震源对油井进行处理,使用频率为 17Hz 和 18Hz,处理后油井产液量明显增加;20 世纪 70—80 年代的另一种振动方法是用电磁锤地面震源,是在电磁作用下锤头作上下运动锤击底座,底座则借助井中波导管或埋入地下的桩将振动传给油层。此外,国外的井下震源还有美国的气体爆炸震源、电火花震源,苏联的液压脉冲、冲击脉冲和机械震源。地面震源有苏联戈麦尔特种工艺设计局制造的固定式大功率震源,可产生 10<sup>6</sup>N 振力;西伯利亚分院矿场地球物理专业设计局的双模块非平衡震源,可产生 10<sup>5</sup>N 振力,工作频率 2~10Hz;西伯利亚分院矿业研究所制造的撞击脉冲震源;美国的气动震源;加拿大 Phexion 公司的振动解堵设备等。国内低频振动采油技术起步较晚,也发展了多种震源,进行了振动解堵和振动采油试验<sup>[29-31]</sup>。井下震源主要有西安石油学院的高能气体压裂、中国石油大学的自激波动采油、河南油田的电脉冲等。地面震源主要有国家地震局和辽宁地震勘测设计研究院的单轮和双轮震源(图 1.1)。与国外同类技术相比,国内的振动采油增产技术装备存在功率较小、能量利用率较低、有效作用半径较小、结构复杂、加工精度要求高、现场工艺条件要求较苛刻等缺点,从而限制了振动采油技术的推广应用。

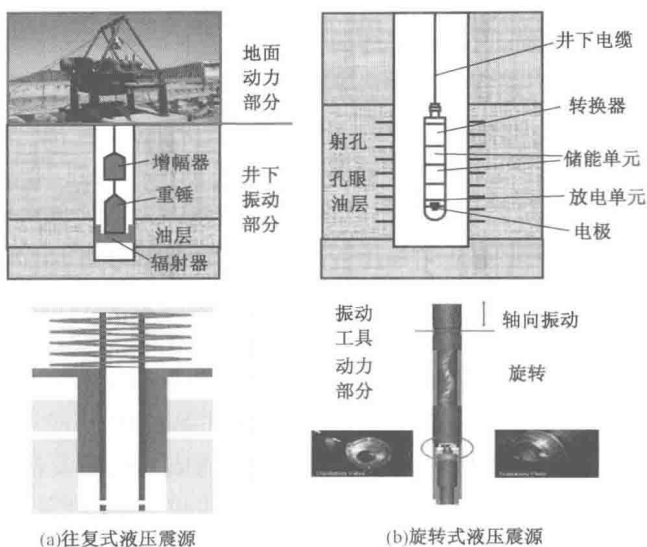


图 1.1 不同震源结构示意图

从目前的发展状况看,应用的低频波动开发技术方法主要包括人工地面或井下振动技术、水力振荡技术以及低频电脉冲技术三类。

(1)人工地面或井下振动技术。人工地面或井下振动震源利用大功率可控震源产生的低频波作用于油层,改善地下流体物性及地层渗流条件,达到一处振动、多井受益,对一定范围内的油层进行整体处理。地面振动震源,由于地表软土层使振动能衰减太大,致使传输到油层的能量相对很弱,而对于油层埋藏较深的井,能传到油层的振动波更少。井下振动震源放在油层部位,振动波直接作用于油层,消除了地表软土层的影响,减少了振动波从震源向油层传播衰减造成的能量损失,增强了对油层的作用强度。

(2)水力振荡技术。利用流体通过井下振荡器腔型结构时产生的周期性剧烈振动,在目的层段产生振荡压力波作用于油层,在近井地层中造成岩层破碎和偏移,从而达到解除油层伤害和堵塞、改善油层近井地带的渗流状况、提高渗透率和增加产量的目的。该项技术的主要工具为水力振动器,目前我国油田推广使用的水力振动器主要有腔室振动结构和外筒旋转式结构两种。由于作用频率相对较高,因而作用半径不是很大。现有的研究表明,目前水力振动的作用半径一般为 $0.1 \sim 0.2\text{m}$ ,是一种典型的近井地带处理方法。对于特低渗透油层而言,不会产生明显的处理效果。水力振动解堵技术选井原则:①水井附近地层堵塞、伤害;②注水初期吸水能力较强,后因油层堵塞吸水变差;③与附近油井连通性较好,井距不易过大;④固井质量良好。水力振动器主要由外筒、柱塞和储能器三大部分组成。该装置中有一个密封柱塞,通过结构的合理设计,注水过程中在这一柱塞两端将产生较大压差。当柱塞位于上死点时,该振动器上部的压力逐渐

升高,柱塞在压差的作用下逐渐下移,并同时部分能量储存于下部的储能器中。当柱塞下移至下死点时射流孔打开,向地层注入流体,完成下冲程。此时,振动器属于泄压过程。当压力泄至某一值时,柱塞在储能器释放的能量(压力)作用下,开始上移,完成上冲程。如此反复,便形成一定频率与振幅的振动。

(3)低频电脉冲技术。低频电脉冲技术又称为电液压冲击技术或电爆法,通过井下仪器的放电部分在正对油层的位置进行脉冲放电,放电的瞬间释放出储存在电容器中的大部分能量,在两个电极间形成一个高压等离子区,产生很强的冲击波,击穿充满井内的油、水及其混合物,通过射孔孔眼作用于地层,即在很小的放电孔道内迅速释放出大量的能量,通过对地层激发周期性压力波和强电磁场,达到增强近井油层的渗透性的目的。作为振动采油技术中一个重要组成部分,它除具有振动采油技术的成本低、见效快、增产增注效果显著等特点外,还兼有施工方法简便,占用井场时间短,成功率高的优点。电脉冲采油设备由地面控制仪器和井下放电仪器两部分构成。地面设备为一体积很小的整流变频器,井下设备是整套技术的核心部分,分为升压单元、储能单元、放电单元和电极4个单元。

不同震源有不同工作原理,但其作用于地层采油机理是相同的,总体来说振动可使油层产生微小形变,使储层原油黏度降低,从而加快储层中原油的流速,改变储层内油、气、水的分布。振动还可增加毛细管孔隙压力,改善岩石表面的润湿性,利于降低采出液的含水率。同时振动还有利于清除油层堵塞,提高油层渗透率等。

低频谐振波对油层的主要作用机理为:

(1)解除地层堵塞。流体流经孔道由于黏滞性形成的附面层会使毛细管流动半径减小,渗流量降低。若储层流体内部含有的细小固体物质吸附在附面层上,就可以造成地层堵塞。波具有的穿透能力可以穿透附面层并引起油层的固体介质和液体介质的非同相振动,破坏剥落附面层,使“黏着”的颗粒脱落。当波强度和频率达到一定值时将产生空化现象,也可将黏附在孔隙或裂缝表面的颗粒清除掉,从而达到地层解堵的目的。

(2)使储层产生微裂缝。当谐振波在地层内传播时,不同介质内的波之间会发生耦合作用,在自由界面或两种介质的交界处产生新的波,会形成应力集中的现象,称为会聚效应。会聚效应造成不连续的应力分布,可在岩石抗拉强度较小处形成微裂缝而不破坏整个岩层的结构,从而使储层产生微小的裂缝,提高流体的流动能力。

(3)提高储层渗透率。储层在受到波的作用时,其内部会产生一些直流定向力,其中最主要的是径向辐射压力和伯努利力。直流定向力的产生破坏了油层原有的压力平衡,能使毛细管半径变大,此时表面张力就以半径的平方缩小,毛细管力就以半径的三次方缩小,从而打破了毛细管力和重力的平衡关系,束缚在毛细管中的残余油就会在重力与波的振动作用下流入井内。强波场在液体中传播时,由于媒质吸收了波的能量和动量,流体会产生非周期流动,通常具有涡旋特性。由于无波场作用时地下流体在孔道中

流动呈指进形状,毛细管中心处的流速远大于管壁处的速度,涡旋所产生的逆于渗流方向的波速度可以忽略,而在边界处引起的流动与流体渗流方向一致,减弱了指进现象的发生,使整体运动速度得到提高,从而提高了流量。

低频谐振波对流体的主要作用机理为:

(1)降低流体黏度。

① 解聚降黏。解聚作用针对高分子化合物的流体,在高频强度的波场作用下强迫剪切力作用下,使分子内和分子之间具有较大的加速度,能通过剪切作用降低原油的黏度,提高原油在地层中的流动速度,利于提高水驱效率及采收率。

② 热降黏。波在传播媒质内部的吸收,不同介质的分界面处、边界处的摩擦作用及空化作用在气泡崩溃期间都会释放出大量的热。热作用的结果可以提高流体的温度,降低原油黏度。黏度越低,流体中分子之间的相互作用力就越小,流体流动阻力也就越小。

(2)机械振动作用。

机械振动作用可以破坏流体与储层岩石之间的凝聚力,从而产生松动作用。流体都具有黏滞性,当流体流经孔道时,由于其黏滞性,会在孔道中产生附面层。随着附面层的形成,毛细管流动孔径变小,造成渗流量降低。由于波的机械振动作用,从而使得液滴与岩石之间的流体薄膜在波场的破坏作用下,会发生剥落,使“黏附”的液滴脱落,以达到提高采收率和解除堵塞的作用。

从低频谐振波对储层和流体的作用机理,深化了低频谐振波对渗流影响的作用机理,其主要包括以下几点:

① 岩石固体颗粒的周期性振动作用,使岩石喉道周期伸缩,具有变动渗透率效应,可有效解除油相的贾敏效应,增加油相渗透率<sup>[32]</sup>;

② 液—固界面间的振动剪切作用,使岩石表面润湿性发生变化,油膜脱离岩石表面而聚集和运移;

③ 由于近井地带堵塞颗粒与岩石在振动情况下其加速度和振幅都不相同,使堵塞物剥落,从而达到解堵的目的<sup>[33]</sup>;

④ 压力波的持续作用使岩石发生疲劳破坏,从而产生微裂缝,提高岩石的渗透率;

⑤ 均质液体渗流的流变结构受到破坏,从而提高了液体的渗流速度;

⑥ 液—液界面间的波动剪切作用,使油水乳化、原油降黏、剩余油被水携带而聚集和重新分布。

## 1.2 表面活性剂驱油基本原理

常规的采油方法分为一次采油和二次采油,随着开采过程中采油难度越来越大,原油被滞留在岩石孔隙中,剩余原油流动性差,单靠增加驱替压差是很难办到的,利用物理



化学的方法强化开采剩余的储量,可以使得采收率提高到 80%。在用化学物质进行驱油的过程中,我们把用表面活性剂驱油的方式称为表面活性剂驱,表面活性剂驱就是加入少量的表面活性剂就可以大幅度降低油—水界面张力使得残余油流动的驱油方式<sup>[34-36]</sup>。

根据所采用的体系不同,表面活性剂驱可分为活性水驱、胶束驱、微乳状液驱、泡沫驱、增稠水驱、正向异常液驱等<sup>[37,38]</sup>。

### (1) 活性水驱。

活性水驱属于稀表面活性剂体系,其表面活性剂浓度小于临界胶束浓度,是一种最简单的表面活性剂驱,其驱油机理主要包括以下几点:

① 降低油水界面张力,用低浓度的表面活性剂水驱时,活性剂吸附在油水界面上,降低油水界面张力,从而减小了油滴通过狭窄孔喉的阻力,残余油容易被驱动并在油层中逐渐聚并成油墙。

② 一般而言,表面活性剂的亲水性大于亲油性,它在地层表面吸附,可使亲油的地层表面反转为亲水,油对岩石表面的润湿角增加,减小黏附功,也就是提高了洗油效率。

③ 驱油用的表面活性剂的亲水疏水平衡值(HLB)一般为 7~18,它在油水界面上的吸附,可以形成稳定的水包油的乳状液。乳化的油在前移的过程中不易重新黏附地层,提高洗油效率。且乳化的油在高渗层产能叠加的贾敏效应,可使水在较均匀的地层推进,提高波及系数。

④ 提高表面电荷机理。当驱油表面活性剂是阴离子表面活性剂时,它在油珠和地层表面吸附,可提高表面电荷密度,增加油珠与地层表面之间的静电斥力,使油珠被驱替介质带走,提高洗油效率。

### (2) 胶束驱。

胶束溶液也属于稀表面活性剂体系,其中表面活性剂浓度大于临界胶束浓度,但其质量分数不超过  $2 \times 10^{-2}$ 。

与活性水驱相比表面活性剂的浓度超过临界胶束浓度,因此溶液中有胶束存在,并且胶束具有增溶作用可以增溶原油,另外由于在胶束溶液中加入醇和盐等助剂,调整了水相和油相的极性,使得亲油和亲水得到充分的平衡,从而最大限度地吸附在油水界面上,产生超低界面张力,这是胶束提高驱油效率的主要原因。

### (3) 微乳状液驱。

微乳状液属于浓表面活性剂体系,其表面活性剂质量分数大于  $2 \times 10^{-2}$ ,由水、油、表面活性剂、助表面活性剂和盐 5 种组分组成。微乳状液驱具有胶束驱油的全部机理,即:

- ① 低界面张力机理;
- ② 润湿反转机理;
- ③ 乳化机理;