

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

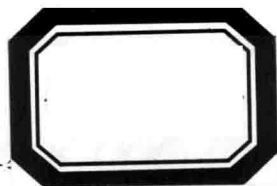
卷三

复杂油藏波场 强化开采理论与技术

◎ 蒲春生 王香增 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



复杂油藏波场强化开采 理论与技术

蒲春生 王香增 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为丛书的第三卷,全面系统地介绍了复杂油藏波场强化开采增产增注和提高采收率的基本理论与关键技术,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。

本书可供从事油气田开发工程、资源勘察工程、地质勘察工程、工程地质勘察工程以及工程力学、石油地质学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

复杂油藏波场强化开采理论与技术 / 蒲春生, 王香增著.
北京: 石油工业出版社, 2014.5
(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; 3)
ISBN 978-7-5183-0001-3

I. 复…
II. ①蒲…②王…
III. 石油开采-研究
IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 076870 号

复杂油藏波场强化开采理论与技术
蒲春生, 王香增著

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.cn
编辑部: (010) 64523536 发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 39.25
字数: 896 千字

定价: 150.00 元
(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)
版权所有, 翻印必究

序

随着我国各主力油田陆续进入开发中后期，面临含水逐年升高、原油产量不断下降的挑战，新发现和投入开发的油田储层地质条件复杂，多数为低渗透、特低渗透、稠油和超稠油油藏，开发成本高，技术难度大。研究和发展一些效果好、成本低、不伤害油层、不破坏生态环境的原油增产与提高采收率新技术和新方法具有十分重要的意义。

物理法强化开采技术利用大功率声波、超声波、电磁波、电液压脉冲波、爆燃气体高压冲击波等物理场来处理 and 激励油层，实现增产增注和提高采收率，具有效果好、适应范围广、工艺简单、成本低廉、不伤害油层与不破坏生态环境等特点，是近年来国内外低渗透、特低渗透、稠油和超稠油等难动用复杂油藏高效开发的一个十分重要的发展方向。波场强化开采技术是难动用复杂油藏最为有效的物理法强化开采技术之一。

近年来，在前人研究工作的基础上，蒲春生教授带领其科研团队锲而不舍地坚持从事复杂油藏波场强化开采增产增注与提高采收率的基础理论和配套工艺技术的研究工作，积累了丰富的经验，取得了系统的研究成果，已逐步成功地应用于国内一些油田的生产实践，显示出广阔的推广应用前景。

本书是迄今为止第一部比较系统深入地阐述复杂油藏波场强化开采基本理论和关键技术的学术专著，是从事油气田开发工程、资源勘察工程、地质勘探工程、工程地质勘察工程和工程力学等方面科学研究、工程实践的科技人员以及大专院校有关专业师生很好的参考书。同时，本书的出版也必将对相关学科领域的基础理论研究和工艺技术的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

韩 旭

2013年3月11日

前 言

当前,我国石油工业逐步面临严峻的形势,石油天然气产量的增加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田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,多数为低渗透、特低渗透油藏和稠油、超稠油,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,更增加了油田开发的难度。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储量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。物理法强化开采技术和物理-化学复合法强化开采技术就属于这类新方法。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十分重要的意义。

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,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、不伤害油层与不破坏生态环境等特点,是近年来低渗透、特低渗透、稠油、超稠油等难动用复杂油藏高效开发的一个十分重要的发展方向。物理-化学复合法强化采油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,以及中、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采油技术相结合,系统研究

物理－化学复合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）、国家自然科学基金：“延时式可控高能气体压裂技术动力学机理研究”（51104173）、“低渗油藏低频谐振辅助表面活性剂驱油机理研究”（51274229），山东省自然基金：“稠油热波耦合辅助层内催化化学催化裂解降黏技术研究”（ZR2010EM014）、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）、中国石油化工股份公司重大科技导向项目“稠油注蒸汽热波耦合催化裂解降黏技术研究”（[2011] 075）、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）、“提高延长主力油层开发效果关键技术研究”（2011KJTZ01）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－化学复合强化开采与提高采收率基本理论及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。

本书为丛书的第三卷，全面系统地介绍了复杂油藏波场强化开采增产增注和提高采收率的基本理论与关键技术，是复杂油藏物理法强化开采、物理－化学复合强化开采的重要组成部分。

波场强化开采技术作为最为重要的物理法强化开采技术之一，通过利用大功率人工谐振波、水力脉冲波、声波、超声波以及电液脉冲波等波动场对油层的激励，达到增产增注和提高原油采收率的目的。

(1) 大功率波动场在地层中作用范围大，在储层中可以产生人工裂缝体系，大幅度增加储层岩石的渗透能力。室内实验表明，经大功率波动场处理后的致密岩心不仅产生了分叉的裂缝，而且岩心内还出现了清晰可见的微裂缝网络。

(2) 波场激励方法具有明显的“增油控水效应”。

波场激励可以改善渗流状态。波场能量作用于地层后，可使地层岩石骨架颗粒产生周期性振动，在液－固界面间形成振动剪切作用，同时在岩石孔道中产生“空化效应”，液－固界面特性可以得到改善，减小岩石颗粒表面对原油的吸附亲和力，使油膜从颗粒表面脱落。从而使岩石渗透率、润湿性、毛细管压力等影响流体渗流的重要因素得到有效的改善，提高地层渗流能力。

波场激励可以改变流体性质和流变特性。实验结果表明，经大功率波动场处理后，原油黏度可下降约 17%～25%。波场作用于地层流体可使其液体渗流的流变结构（其中包括孔道壁表面范围内的液体流变结构）受到破坏，提高了液体的渗流速度。在液－液界面间的产生振动剪切作用，改变孔隙介质中油、气、水界面特性，克服毛细管力的束缚滞留效应，结果使油水乳化、原油降黏、剩余油可被水携带着而聚集并重新分布，便于将其驱出油藏，从而提高原油采收率。

低频波场（如低频谐振波、低频脉冲波）与高频波场（如超声波）相比，其能量在地层中衰减较慢。例如，20kHz 的超声波在地层中衰减系数高达 6.85，100Hz 的低频脉冲波衰减系数为 0.0246，而 15Hz 的低频脉冲波在地层中的衰减系数仅为 0.00268。因此，低频波场的有效作用范围较超声波大得多，可达 200m 以上。低频波场强化开采技术是将波场强化开采由近井处理向油藏整体激励延伸，发展成为提高原油采收率的最有前途的物理法采油方法。

(3) 波场强化开采技术适用范围广。波场强化开采技术所使用的波场频率在低频的几赫兹到高频的几十万赫兹之间。这样一个大的频率变化范围使得波场强化开采既可以降低油田的含水率解决高含水油田的“稳油控水”问题，又可以改善流体性质和油层渗流条件，从而加强低渗、低压、稠油、超稠油等特殊油藏的开采。

(4) 波场强化开采成本低廉。国内外实践经验表明，波场强化开采技术普遍具有工艺简单的特点，整体成本很低，比如振动－化学解堵技术的综合成本不足常规酸化技术的 1/2，高能气体压裂技术利用爆炸波压开油层，综合成本不足常规水力压裂的 1/5。而且在许多情况下，波场强化开采技术的增产增注效果十分明显。

(5) 波场强化开采对油层不造成二次伤害, 不影响油田的后续开发。波场强化开采技术是借助振动波场使岩石骨架和地层流体自身产生相应的物理化学变化, 而不必向油层中注入任何外来介质, 因此可有效地保持油层的原始状态, 减少油层伤害。由于振动波场不会永久在地层内停留, 不会对油层造成附加的污染及伤害, 所剩余的原油可在将来利用更先进的技术进一步开采。

(6) 波场强化开采不破坏生态环境。由于波场强化开采是利用波场能量对油藏进行激励作业, 因此也就消除了化学法采油中化学药剂对环境所产生的不良影响, 降低了油田采油对环境污染的风险。

(7) 波场激励方法可以与常规的化学法开采技术有机地结合起来形成优势互补。物理法与化学法强化开采的机理完全不同, 所显示出来的优势也必然不同, 如果物理场与化学场有机地结合起来, 形成高效、低成本的物理 - 化学复合法强化开采技术, 可以大幅度提高现有常规的原油增产与提高采收率技术的效果。因此, 物理法处理油层不仅可以成为有效的、相对独立的增产与提高采收率技术, 而且还有望与化学增产与化学驱 (或水驱) 组合应用, 形成物理 - 化学复合型技术, 用以提高化学方法的增产与驱油效果。

由于波场强化开采技术具有常规开采技术难以实现的特殊优势, 美国、加拿大、苏联等国家从 20 世纪 70 年代就开始了波场强化开采技术的研究, 目前已发展起来的波场强化开采技术主要包括机械振动装置开采技术、水力波场强化开采技术、超声波开采技术、人工地震开采技术、电脉冲开采技术、振动压裂技术、高能气体压裂技术等, 已形成系列技术装备和配套的现场工艺技术。尤其在俄罗斯, 波场强化开采技术已成为应用最为广泛的一种处理近井地带的方法之一, 已处理井底地带的油水井 2 万口以上, 增产原油上亿吨, 经济效益非常显著。国内对波场强化开采技术的研究始于 20 世纪 90 年代, 在跟踪国际先进技术的基础上, 经过十几年的努力, 使得波场强化开采技术发展很快, 已经发展起各类从低频到高频适合我国国情的波场强化开采技术装备和工艺技术, 在国内吉林、大庆、中原、胜利、长庆等十几个油田获得现场推广应用, 每年的作业工作量逐步上升, 显示出巨大的技术与经济前景, 但与国外相比还存在较大的差距。

笔者带领项目组在复杂油藏波场强化开采理论与技术方面进行了近 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) 使波场强化开采的机理研究由定性解释为主向动态定量描述方面发展。目前, 大多数波动场强化开采的机理解释还停留在定性水平上, 无法根据不同油藏、油水井的具体情况选择最佳方式及优化技术参数。通过系统深入地研究波动场在储层多孔渗

流介质中的固—液耦合传播机理和基本规律，建立波场强化开采增产增注过程中波动场在储层多孔介质中固—液耦合传播理论模型，并以此获得波场参数与储层岩石形变规律之间，波场参数与储层流体形变规律之间，以及波场参数与储层岩石骨架、流体形变差异规律之间的定量关系，进一步从微观上认识波场激励提高储层岩石渗流能力、实现增产增注的机理。通过上述相关技术基础理论研究的重要性，并逐步深化对各种采油方法的机理研究，定量地描述其各种影响因素及规律性，为其工艺的优化设计提供可靠的理论依据，使物理法采油工艺设计由目前的经验型向优化型发展。

(2) 使波场处理技术由一元波场激励向多元复合波场激励方面发展。每一种波场对于油藏或原油的作用机理各异，适用条件不同。因此单一方法的作用不仅在使用范围上受到了限制，而且其效果也很有限。通过研究低频大功率二元叠合波场在地层中传播时叠合机理与相互干涉的基本规律，建立复合波场在地层传播过程中的叠合与干扰理论模型，建立干扰点波场强度与发射波场和储层物性之间的定量关系，为定量预测和评价多元复合波场传播中波场分布和复合波场对油水井近井和远井地带储层的激励作用奠定理论基础；研究了低频大功率二元叠合波场在对储层岩石渗流特性和油水分布影响时的协同效应，建立叠合波场参数与岩石渗流特性和水驱油效果之间的相关规律。从而可以针对不同的油层及油井特性，适当地将不同性质的波场有机地组合起来，利用波场之间的协同效应，可以开发出更有效、更经济的综合复合波场强化采油新技术。

(3) 使波场强化开采技术处理范围由近井地带向油藏内部发展。目前，已应用或正在进行现场试验的波场强化开采方法，大都是针对近井地带的处理。通过研究掌握低频大功率二元叠合波场在地层中传播时的叠合机理与相互干涉的基本规律，建立复合波场在地层传播过程中的叠合与干扰理论模型，建立干扰点波场强度与发射波场和储层物性之间的定量关系，为定量预测和评价多元复合波场传播中波场分布和复合波场对油水井近井和远井地带储层的激励作用奠定了重要的理论基础。

(4) 由单纯的波动物理场作用油层向波动物理场激励与化学场激励相结合的方向发展。波动物理法和化学法采油的机理完全不同，所显示出来的优势也必然不同。项目组通过将大功率人工波动场与化学场有机地结合起来，将大功率波动场与化学解堵剂有机地结合起来，系统地研究在大功率波动场动态作用下，化学处理剂与地层岩石、地层液体之间的“动态”反应机理、主要影响因素及其相关规律，不仅促进了化学解堵剂的化学反应速度，提高化学作用效果，而且可以大大延长化学作用的处理距离。作为一种“动态解堵”工程，既有利于渗流，又减少或抑制了堵塞物的二次形成，从而保持了化学处理效果，延长了作用有效期。

(5) 使波场强化开采技术由波动激励解堵降阻增渗机理为主向层内整体造缝增渗方向发展。提出了油气储层内大功率二元叠合波干涉造缝增渗的技术路线,建立了大功率二元叠合波层内干涉造缝的波动力学理论,掌握了叠合波在裂缝中传播过程中由于倍频倍幅而使裂缝扩展的重要机理及其规律,建立了大功率二元叠合波层内干涉造缝工艺优化决策控制系统,为进一步利用大功率波动场对复杂油藏进行层内整体定向造缝改造增产与提高采收率提供了重要的理论依据。

(6) 为满足低渗透、特低渗透、稠油、超稠油等难动用油藏大功率波场强化开采和大功率波场-化学复合强化开采的需要,在机理、动力学特征和工艺优化设计基础上,采用耐高温、耐腐蚀、耐磨损、高强度的新型材料和新的高精度加工工艺技术,使研制的新型井下大功率声波和新型井下大功率双重振动水力脉冲波发生装置具有功率大、可控频率幅度大、工艺简单、操作成本低等特点,且在高温、腐蚀和磨损的恶劣条件下寿命长,增产增注效果大大提高。

全书共分 21 章。第 1 章阐述了弹塑性介质应力-应变基本力学特征;第 2 章阐述了弹性介质中弹性波传播动力学模型;第 3 章阐述了弹性波在双相弹性介质中传播固-液耦合 BIOT 波动力学模型;第 4 章阐述了弹性波在双相均匀各向同性弹性介质中传播固-液耦合 BISQ 波动力学模型;第 5 章阐述了弹性波在双相各向异性弹性介质中传播固-液耦合 BISQ 波动力学模型;第 6 章阐述了声波在储层多孔介质中的传播波动力学模型;第 7 章阐述了声波在均匀介质中传播的衰减规律;第 8 章阐述了声波在储层多孔介质中传播的衰减宏观介质模型规律;第 9 章阐述了声波作用油层强化采油机理实验研究;第 10 章阐述了超声波作用油层强化采油机理室内实验研究;第 11 章阐述了超声波作用油层强化采油波动力学模型;第 12 章阐述了低频谐振波作用油层强化采油机理实验研究;第 13 章阐述了低频人工谐振波作用油层强化开采波动力学模型;第 14 章阐述了低频水力脉冲波对油层岩石渗流特征影响规律实验研究;第 15 章阐述了低频波动-化学复合强化采油机理实验研究;第 16 章阐述了低频人工谐振与水力脉冲二元叠合波对储层渗流影响规律实验研究;第 17 章阐述了二元叠合波作用条件下储层多孔介质波动渗流力学数学模型;第 18 章阐述了储层岩石的强度及其破坏准则;第 19 章阐述了储层岩石二元叠合波造缝增渗机理及其波动力学模型;第 20 章阐述了复杂油藏波场强化开采工艺技术与矿场试验;第 21 章阐述了复杂油藏波场强化开采理论与技术展望。

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。

在本书的编写过程中，田宇同志参加了第2、第3、第4章的部分编写工作；宋向华同志参加了第5、第7、第8章的部分编写工作；贝君平同志参加了第6、第9、第20章的部分编写工作；许洪星同志参加了第10、第11、第20章的部分编写工作；孔令乐同志参加了第6章的部分编写工作，徐涛同志参加了第7章的部分编写工作；李强同志参加了第15章的部分编写工作；韩勇同志参加了第16章的部分编写工作；王蓓同志参加了第17章的部分编写工作；曹晶、许飞和宋渊娟同志参与了书稿的最后校对与修改工作。在此，特向他们的辛勤劳动致以感谢。

中国石油大学（华东）油气田开发工程国家重点学科211工程建设计划和985创新平台建设计划、西安石油大学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，复杂油藏波场强化开采增产与提高采收率理论和技术的研究还很不成熟，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 弹塑性介质应力 - 应变基本力学特征	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 弹塑性介质的形变类型特征	(1)
1.3 弹性介质中的应力场	(4)
1.4 弹性介质中的应变场	(14)
1.5 弹性介质中应力场与应变场的相关规律	(26)
1.6 塑性介质的应力与应变关系	(41)
第 2 章 弹性介质中弹性波传播波动力学模型	(44)
2.1 弹性介质的运动平衡方程	(44)
2.2 弹性介质的机械能	(47)
2.3 各向异性介质中弹性波传播波动力学	(50)
2.4 水平各向同性介质弹性波传播波动力学模型	(55)
2.5 不均匀各向同性介质中弹性波传播波动力学	(58)
2.6 水平均匀弹性介质中弹性波传播波动力学	(65)
2.7 不均匀各向同性弹性介质中弹性波传播波动力学	(76)
2.8 均匀各向同性弹性介质弹性波传播波动力学	(79)
第 3 章 弹性波在双相均匀各向同性弹性介质中传播固 - 液耦合 Biot 波动力学模型	(85)
3.1 概述	(85)
3.2 低频弹性波在含流体多孔介质中传播 Biot 固 - 液耦合波动力学理论	(86)
3.3 高频率弹性波在固体多孔介质的流体中的扩散理论	(107)
第 4 章 弹性波在双相均匀各向同性弹性介质中传播固 - 液耦合 BISQ 波动力学模型	(134)
4.1 概述	(134)
4.2 弹性波在双相弹性介质中传播固 - 液耦合 Squirt 波动力学模型	(134)
4.3 弹性波在双相弹性介质中的传播固 - 液耦合 BISQ 波动力学模型	(148)
4.4 Biot 理论与 BISQ 理论的对比	(162)

4.5 关于 BISQ 耦合理论的改进	(176)
第 5 章 弹性波在双相各向异性弹性介质中传播固 - 液耦合 BISQ 波动力学模型	(184)
5.1 概述	(184)
5.2 基于固 - 液耦合各向异性的波动力学关系	(186)
5.3 Biot 理论中流体压力的表达式	(187)
5.4 BISQ 模型中流体压力的表达式	(189)
5.5 多孔弹性波动方程	(194)
5.6 多孔弹性介质有效压力的黏滞系数张量	(195)
5.7 波的耗散和衰减	(197)
5.8 结论与讨论	(209)
第 6 章 声波在储层多孔介质中的传播波动力学模型	(210)
6.1 概述	(210)
6.2 多孔介质中的声波传播特性	(211)
6.3 多孔介质中影响声速的主要因素	(217)
第 7 章 声波在均匀介质中传播的衰减规律	(228)
7.1 概述	(228)
7.2 均匀介质对声波的黏滞吸收	(228)
7.3 均匀介质声波的热传导吸收	(235)
7.4 均匀介质对声波吸收的斯托克斯 - 克希霍夫理论	(236)
7.5 均匀介质分子弛豫声吸收	(238)
7.6 声波在流体介质中的散射衰减	(243)
7.7 声波在流体和固体中的衰减系数	(244)
7.8 声波在多孔性材料中的衰减	(244)
第 8 章 声波在储层多孔介质中传播的衰减宏观介质模型规律	(248)
8.1 概述	(248)
8.2 恒定 Q 值模型	(249)
8.3 摩擦损耗	(252)
8.4 Q 值控制因素	(252)
8.5 局部饱和的影响	(255)
8.6 波动诱导孔隙流体流动机理	(258)
8.7 松弛、衰减与耗散	(262)

第 9 章 声波作用油层强化开采机理实验研究	(267)
9.1 概述	(267)
9.2 声波辅助驱油及其对岩石表面润湿性影响规律研究	(269)
9.3 声波作用油层强化开采机理分析	(278)
第 10 章 超声波作用油层强化采油机理室内实验研究	(282)
10.1 超声波对储层岩心毛细管渗吸作用的影响规律	(282)
10.2 超声波作用对油层原油黏度影响的规律研究	(294)
10.3 超声波作用对储层岩心渗透率影响规律与机理研究	(298)
10.4 超声波处理对水驱采收率影响的规律实验研究	(302)
10.5 超声波解除近井带无机物伤害实验研究	(311)
10.6 超声波解除近井带有机物沉淀和聚合物伤害实验研究	(317)
第 11 章 超声波作用油层强化采油波动力学模型	(328)
11.1 超声波提高油层渗流能力机理波动力学模型研究	(328)
11.2 超声波对储层孔隙固相堵塞解堵波动力学模型研究	(340)
第 12 章 低频谐振波作用油层强化采油机理实验研究	(346)
12.1 低频谐振波对岩心润湿性影响规律实验研究	(346)
12.2 低频谐振波对岩心毛细管压力曲线影响规律实验研究	(349)
12.3 低频谐振波对原油黏度影响规律实验研究	(352)
12.4 低频谐振波对岩心单相渗流特征影响规律实验研究	(354)
12.5 低频谐振波对油层岩心油水两相渗流特征影响规律实验研究	(361)
12.6 低频谐振波对岩心水驱采收率影响规律实验研究	(365)
12.7 结论与讨论	(371)
第 13 章 低频人工谐振波作用油层强化开采波动力学模型	(373)
13.1 人工谐振波在油层中传播动力学特征矿场测试分析	(373)
13.2 低频人工谐振波作用油层强化开采波动力学模型	(377)
13.3 谐振载荷对油井产能的影响	(385)
第 14 章 低频水力脉冲波对油层岩石渗流特征影响规律实验研究	(387)
14.1 低频水力脉冲波对岩心单相渗透特征的影响规律研究	(387)
14.2 低频脉冲波对岩心油水相对渗透率曲线影响规律实验研究	(392)
14.3 低频脉冲波对储层天然岩心水驱效率影响规律实验研究	(394)
第 15 章 低频波动—化学复合强化采油机理实验研究	(396)
15.1 低频谐振波—化学解堵机理实验研究	(396)

15.2	稠油油藏低频脉冲波辅助波动—化学驱强化采油机理实验研究	(407)
第 16 章	低频人工谐振与水力脉冲二元叠合波对储层渗流影响规律实验研究	(415)
16.1	概述	(415)
16.2	人工谐振与水力脉冲叠合波对油水单相渗流影响规律实验研究	(415)
16.3	二元叠合波储层岩心水驱油效率影响规律实验研究	(422)
16.4	结论与讨论	(427)
第 17 章	二元叠合波作用条件下储层多孔介质波动渗流力学数学模型	(429)
17.1	二元叠合波在储层多孔介质传播中的叠合与干扰	(429)
17.2	二元叠合波在储层多孔介质中无能量衰减传播波动渗流力学模型	(432)
17.3	二元叠合波在储层多孔介质中能量衰减传播波动渗流力学模型	(446)
17.4	二元叠合波在储层多孔介质中传播波动渗流力学模拟计算	(454)
17.5	储层多孔介质中二元叠合波动渗流数学模型验证	(462)
17.6	结论与建议	(466)
第 18 章	储层岩石的强度及其破坏准则	(467)
18.1	储层岩石的抗压强度	(467)
18.2	储层岩石的抗拉强度	(468)
18.3	储层岩石的抗剪强度	(470)
18.4	岩石结构面对岩石强度的影响	(474)
18.5	储层岩石的破坏准则	(478)
第 19 章	储层岩石二元叠合波造缝增渗机理及其波动力学模型	(493)
19.1	储层多孔介质二元叠合波层内叠合干涉造缝原理	(493)
19.2	脉动压力在油层岩石缝隙中传播扩展波动力学机理研究	(496)
19.3	脉动压力在油层岩石缝隙中传播动态模拟实验研究	(505)
19.4	冲击波对油井固井水泥环和射孔孔眼强度的影响	(511)
19.5	基于双波叠合干涉层内造缝增渗的大功率低频冲击波震源设计的基本思路	(512)
19.6	结论与讨论	(513)
第 20 章	复杂油藏波场强化开采工艺技术与矿场试验	(514)
20.1	水力振动脉冲强化开采技术	(514)
20.2	井下低频电脉冲强化开采技术	(539)
20.3	大功率超声波近井处理增产增注工艺技术	(553)
20.4	井下大功率低频人工谐振波强化开采技术	(560)

第 21 章 复杂油藏波场强化开采理论与技术展望	(587)
21.1 复杂油藏波场强化开采理论与技术的发展趋势.....	(587)
21.2 复杂油藏波场强化开采理论与技术进一步发展需要研究解决的 几个关键问题.....	(587)
参考文献.....	(595)

第1章 弹塑性介质应力-应变基本力学特征

1.1 概述

根据其对外力作用的反应,可以将物体划分为刚体、弹性体、塑性体和黏性体。一个物体在外力作用下发生平移或转动,并可沿力的作用方向传递力的作用,称为刚体。当一个物体受到外力作用,在它的内部质点间发生位置的相对变化,从而使其形状改变,称为应变。处于应变状态的物体,为保持其平衡状态,在内部质点间产生内力作用,称为应力。当外力作用取消后,物体的应力、应变状态立刻消失,并恢复原有的形状。这类物体称为弹性体。有一种物质,当外力作用停止后,物体逐渐恢复其原有形状,或者不能完全恢复其原有形状,而保留一定的变形,称之为塑性体,或不完全弹性体。

波场强化开采技术采用人工振动的方法施加给油层按一定频率和振幅周期性变化的作用力,使储层多孔岩石和孔隙内的流体发生周期性的机械振动,从而提高油水井注采能力和油藏整体采收率。一般情况下,在声波、超声波、人工谐振波、水力脉冲波等人工震源的作用下,储层岩石表现为弹性变形,岩石中产生的机械振动可以看作是弹性介质中的弹性振动,此时岩石中传播的波可以看作是弹性波。本书重点阐述油层在弹性波的作用下提高岩石渗透能力、增产增注和原油采收率的主要机理、基本理论与规律^[1~17]。

1.2 弹塑性介质的形变类型特征

物体在载荷作用下,首先发生的物理现象是形变。随着载荷的不断增加,或在恒定载荷作用下,随着时间的延长,物体的形变逐渐增大,最终导致物体破坏。物体的变形有弹性变形、塑性变形和黏性变形3种。

(1) 弹性 (Elasticity): 物体在受外力作用的瞬间即产生全部的形变,而去除外力(卸载)后又能立即恢复其原来的形状和尺寸的性质称为弹性,产生的变形称为弹性变形,具有弹性性质的物体称为弹性体。弹性体按其应力-应变的关系又可分为两种类型: 线性弹性体(或理想弹性体),其应力-应变关系是直线关系,如图1.1(a)所