

波 采 油 场

胡博仲 主编

北京)

9

石油工业出版社

登录号	085475
分类号	TE357.9
种次号	001

油 采 场 波



200348631

博仲 主编

谢平安 周 翊 李 伟 副主编



00783002

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍了超声波采油技术、水力振荡解堵采油技术、低频振动处理油层工艺(人工地震采油技术)、井下低频电脉冲采油技术、高能气体压裂技术及磁采油技术的原理、方法及现场应用实例。阐述了在实践中遇到的问题,并对振动波在油层内的传播情况、不同振动波处理油层的半径范围做了尝试性的探索。本书可供从事油田开发、采油的工程技术人员参考。

* * *

参加编写本书的人员有 王玉山、张显忠、程子健、袁铁燕、谢朝阳、赵 敏、陈 凤、王雅茹、高树生

图书在版编目(CIP)数据

波场采油/胡博仲主编

北京:石油工业出版社,1996.1

ISBN 7-5021-1675-3

I. 波…

II. 胡…

III. 波场采油

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)

石油地球物理勘探局制图印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32开 $7\frac{7}{8}$ 印张 180千字 印1—5000

1996年1月北京第1版 1996年1月北京第1次印刷

定价:12.00元

前 言

近年来，随着石油工业的迅速发展，波场采油作为一种增产增注新技术，已在国内外油田得到日益广泛的应用。大庆油田自 80 年代开始，先后开展了低频振动波、声波、超声波、次声波、爆炸冲击波、电磁波及磁场采油等新方法新技术的试验研究。近两年，在黑龙江省石油工程学会采油工程学会的积极支持下，通过举办波场采油学术研讨会和论文发布会，总结交流了这一领域的最新技术信息。

为了促进我国波场采油技术的发展，我们将大庆油田有关这方面的试验研究论文以及国内外有关文献汇编成册，并就波场采油的有关问题提出了一些初步看法，供专家和同行们参考。我们感到，波场采油作为一项新的采油工艺技术，尽管在油田生产中已经取得不同程度的实际效果，但在其作用机理及实施工艺技术上，还有很多问题需要做进一步的探索和研究。我们希望这本书的出版，能促使更多的专家与同行们关心这项技术的发展，并积极投身到这一新的采油技术领域里来，同我们一起加快波场采油技术在油田生产中的实际应用，为提高采油工程措施效果，改善油田开发总体经济效益，努力开拓一条新的途径。

本书汇集了大庆油田近年来波场采油的试验研究成果。国内外有关资料的来源已在参考文献中指明。限于编著者的学术水平，在处理这样一个涉及多学科的技术新课题上，难免出现疏漏和缺陷，请广大读者和专家同行们给予批评指正。

本书成稿后，承蒙大庆石油学院崔振华、王明吉和孙礼煌教授校阅，在此一并表示感谢。

本书适合于从事采油工程工作的科研、生产及管理人员阅读，并可作为油田开发有关工程技术人员的参考资料。

编者

1995 年 12 月 5 日

目 录

绪 论	(1)
第一章 波的基本概念和一般性质	
第一节 波的概念	(6)
第二节 流体中的波动方程	(7)
第三节 声波在固体媒质中的传播	(9)
第四节 平面波动方程的解	(10)
第五节 声波在传播媒质中的衰减	(11)
第六节 冲击波的形成与衰减	(14)
第二章 声波在油层中的传播特性	
第一节 流管法地层模型中声波的传播特性	(17)
第二节 多孔介质中的声波传播特性	(24)
第三章 波动作用在油层内引发的物理化学现象	
第一节 声波在油层内的作用效应	(31)
第二节 冲击波对油层的作用	(41)
第四章 波动采油技术	
第一节 超声波采油技术	(50)
第二节 水力振荡解堵采油技术	(52)
第三节 低频振动处理油层工艺	(58)
第四节 井下低频电脉冲采油技术	(63)
第五节 高能气体压裂技术	(74)
第六节 波动采油技术处理油层的半径范围分析	(93)

第五章 波动采油技术的应用

- 第一节 超声波采油技术的应用…………… (100)
- 第二节 水力振荡解堵技术的应用…………… (113)
- 第三节 低频振动处理油层工艺的应用…………… (127)
- 第四节 井下低频电脉冲采油技术的应用…………… (133)
- 第五节 高能气体压裂技术的应用…………… (139)

第六章 磁技术在油田生产中的应用研究

- 第一节 磁场对石油及其驱替液物性的影响…………… (155)
- 第二节 磁作用机理和理论模型…………… (192)
- 第三节 磁处理装置的设计与安装…………… (195)
- 第四节 磁处理技术的应用…………… (211)

绪 论

目前，我国注水开发的油田，尤其是石油产量较高的几个大型油田，基本上都处于高含水中、后期开发阶段，面临油田含水逐年升高、采出程度不断提高的难题；新开发的油田多数为低渗透或特低渗透油田，普遍具有开采难度大的特点。由于油田储量结构变差，若仍然只利用传统的油田开发方法及采油工艺技术开发这类油田，原油生产成本将逐渐逼近油田工业性开发的经济边缘。

同时，我国经济正处于高速增长时期，各行各业对石油的需求量越来越大。因此，中国石油天然气总公司提出了“稳定东部、发展西部”的战略方针，以满足国民经济建设的需要。这就要求我们在发展、完善现有油田开发及采油工艺技术的基础上，继续寻找新方法、新技术，最大限度地增加石油产量，提高原油采收率，并获得好的经济效益。物理场激励油层法——即物理法采油技术就属于这种新方法。

利用物理场处理油层，具有许多突出的特点：

(1) 适应性强。许多物理场方法可用于高含水中、后期的提高水驱采收率，也可用于常规技术无法处理的含粘土油藏、低渗透油藏、致密岩层油藏以及稠油油藏的开采。

(2) 具有明显的“增油控水效应”。如果工艺参数设计适当，有可能利用电场、声场等在原油（或地层流体）中所表现出的特性差异改善地层中油相渗透率、降低水相渗透率，起到控制含水的效果。

(3) 工艺简单、成本低，并且其效果明显。据报导，前苏联现场实验表明，利用声波、低频脉冲波处理油层可在较大程度上提高原油采收率。

(4) 与化学驱优势互补。利用物理场技术提高原油采收率的基本原理是改善油层的渗透性和改善原油(地层流体)的流变性，使原油能够顺利地流入油井。而且，通过对技术参数的调整，有可能利用油、水的物性差异强化对剩余油区域的作用。物理法与化学驱提高采收率的机理不同，所产生的效果必然也不同。因此，物理法处理油层不仅可以成为有效的、相对独立的提高采收率技术，而且还有望与化学驱(或水驱)组合应用，形成复合型技术，用以提高化学驱(或水驱)的驱油效果。

(5) 对油层无污染。用物理场处理油层，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。

由于物理场提高原油采收率技术具有以上突出的特点及特殊的性质，适合于对油层进行无伤害处理，在油气田开采中可以发挥可观的作用。

根据处理地层和流体所用的物理场，物理法采油技术包括许多种，磁采油技术和波动采油技术是其中的重要组成部分，也是大庆油田应用较多的物理法采油技术。

大庆油田应用的磁采油技术，是在借鉴国外经验基础上发展起来的，也是目前大庆油田研究水平最高，推广规模最大的物理法采油技术之一。大庆油田从1985年开始在油田上试验应用磁增注技术，在十多年时间里，通过建立健全磁技术研究及检测机构，实现了对磁化水、磁化石油、磁化酸、磁化聚合物等流体磁化效应的系统研究和科学验证，并从分子

观点对磁化作用机理进行了解释，为磁技术在油田的广泛应用提供了科学依据。目前，大庆油田在磁采油技术的机理研究、应用方法、设计制造、推广规模及取得的经济效益等方面，已达到了很高的水平。

波动采油技术是用不同频率、不同性质的声波处理油层，引起油层及其中所含的饱和流体的物理—化学性质发生一定程度的变化，从而改善油层内流体的渗流状况，达到增加油井产油量，提高油层原油采收率的目的。

根据振动与波的理论，机械波是机械形变在弹性介质中的传播。其特征是：能量在介质中的传递是通过介质中扰动的传播，而介质本身并未作任何相应的整体运动。根据介质质点的运动与波本身的传播关系，机械波可分为横波和纵波。声波就是机械纵波，可在固体、液体和气体中传播。机械纵波的频率范围很大，其中 $0 \sim 10^{12}$ Hz 是声学研究范畴。

根据声波在媒质中传播时引起媒质应力变化的规律，又可将声波分为小振幅声波和大振幅声波。所谓小振幅声波是指媒质在这类声波作用下，质点的运动速度远小于声速、质点位移远小于声波波长、媒质的密度增量远小于静态密度。小振幅声波引起媒质的应力变化呈线性关系，即媒质的应力变化符合虎克定律。大振幅声波引起媒质的应力变化不符合虎克定律，其传播特点是波形各点的移动速度不同，也就是说这类波的传播速度不是恒定值。波中移动快的部位在传播过程中将超过移动慢的部位，使波阵面产生陡峭的前沿并形成冲击波。在普通声学问题中人们感兴趣研究的是小振幅声波的传播问题。例如，采油生产中的超声波采油技术、水力振荡解堵技术、低频振动处理油层工艺利用的就是小振幅声波。

超声波采油技术利用的是 20kHz 左右的声波处理油层。

由于超声波在媒质中传播时，能对媒质产生力学效应、热学效应、光学效应、电学效应和化学效应等一系列的作用，因此超声波技术在油田上的应用范围非常广泛，不仅用于处理油层，而且还应用于降粘、除垢、破乳、脱水、防蜡等。

水力振荡解堵技术采用的是 4kHz 左右的声波。该项技术是国外油田，尤其是独联体国家和地区油田理论研究水平最高、应用方法最成熟的物理法采油技术。

低频振动处理油层工艺（人工地震采油技术）是前苏联于 80 年代开发的一种新的声波采油技术。由地面振动系统发生 40Hz 左右的低频波或 20Hz 以下的次声波处理油层。该技术在现场试验过程中观察到了明显的增油降水效果，被认为是开发低渗透油田和水淹油田比较有前景的采油技术，目前该技术处于试验应用阶段。

井下低频电脉冲采油技术和高能气体压裂技术产生的是爆炸声。爆炸声是由一个或若干个持续时间极短、振幅较大的声脉冲所构成，因此属于冲击声波。在冲击波的作用下，固体媒质的变形不符合虎克定律，作用于地层时可使其内部产生微裂缝并经受高温作用。这两项技术产生于 70 年代的前苏联，与其它几种声波采油技术相比，在油田上的应用规模要大些。

本书结合大庆油田近年来开展磁采油技术和波动采油技术的研究应用情况，介绍了磁采油技术和波动采油技术的采油机理、应用方法和应用效果等，希望读者能从本书中获得有用的信息。为了使读者能够更深入地了解波动采油技术的实质，本书第一章介绍了与波动采油技术有关的声学基本概念；第二章介绍了声波在油层内的传播规律，及其与油层多孔介质骨架和孔隙内饱和流体之间的相互作用关系；第三章

介绍了声波引起的地层流体物理化学性质的变化及其与改善油田开发效果之间的关系；第四章介绍了波动采油技术的施工工艺、适用条件、选层原则、设计方法、技术特点和各种波动采油技术之间的相互关系等；第五章介绍了波动采油技术的发展和应用概况，并重点介绍了大庆油田应用情况及所取得的认识；第六章详细介绍了石油、注入水、土酸和聚丙烯酰胺聚合物磁化效应的科学验证、磁作用机理、磁采油技术的应用方法及大庆油田应用磁采油技术取得的经济和技术效果。

本书的部分章节借鉴了国内外波动采油技术专家已公开发表的技术文献和有关会议论文谨此一并表示衷心地感谢，并恳请各位专家对书中所述内容的不当之处，提出宝贵的批评意见。

第一章 波的基本概念和一般性质

我国的大部分油田都是采取注水方式开发，在油田开发中后期采用机械举升方式进行开采，这种原油生产方式本身就伴随着一种波动过程。一方面，高压注水会产生水力波，向地层注入的高压水使孔隙压力超过原始地层压力时，常常引起地震现象发生；另一方面，由于地层具有间歇出油特征和有杆泵的工作特点及抽油机机械系统运转的周期性和不平稳性，也可在地层或油井内产生波动作用。

近几十年来，许多近代物理学的新理论、新技术被引入到石油开采领域，逐步形成了以改善油水井近井地带渗透性、提高单井产量为目的的物理采油技术。虽然这类技术的研究起步较晚，但其发展却十分迅速，其中一个重要的组成部分就是波动采油技术。波动采油技术是利用不同频率和性质的声波激励油层，因此亦可称为声波采油技术，例如超声波、水力振荡、低频电脉冲、高能气体压裂、低频振动处理油层技术等。由此可见，不论油田是注水开发、有杆泵抽油还是波动采油，都与波有着密切的关系，对波的理解和掌握是研究和应用波动采油技术的基础和关键。

第一节 波的概念

波动是物理学中非常普遍的现象。例如，我们大家都熟悉的水波。此外，还有声波、光波、无线电波及其它电磁波。事实上，原子与亚原子粒子的力学的一种表述方法就叫做波

动力学。显然，在物理学中波的性质和行为非常重要。

采油生产中涉及到的波属于机械波。机械波是可变形介质（即弹性介质）中的波，空气中的声波就是其中的一个例子。机械波起源于弹性介质的某一部分离开它的平衡位置的位移，当介质质点偏离平衡位置时，出现内部恢复力。正是这些质点之间的弹性恢复力，与质点惯性结合在一起，使这部分介质在平衡位置附近振动。由于介质的弹性，这种振动就一层接着一层由近及远地传递出去。这种振动在介质中的传播就是波，而介质本身作为整体并不随着波一道向前运动。

波的能量包括介质的动能与势能，因此，媒质质点的总能量等于动能与势能之和，它可以由波动传递到相当远的地方，而在单位时间内到达垂直于声波传播方向的单位面积的能量平均值称为声波的强度。但是，能量的传递是通过介质而从介质的一部分传到相邻的另一部分，并不是通过介质本身的任何长距离的运动。所以机械波的特征是：能量在介质中的传递是通过介质中扰动的传播，而介质本身并未作任何相应的整体运动。

按照介质质点的运动与波本身的传播关系，机械波可分为横波和纵波。声波就是机械纵波，可在固体、液体和气体中传播。机械纵波可在很大频率范围内发生，其中从 0 到 10^{12} Hz 属于声学研究范畴。

第二节 流体中的波动方程

一、理想流体媒质中的波动方程

液体中声波传播过程的研究，联系到几个基本的声学方程，首先我们把传播声波的媒质看成是理想的，即媒质为连续、均质而且各向同性，并在热力学平衡下处于静止状态，声

波所引起的运动只是对该平衡状态的一种微小扰动。声波在这种理想媒质中不存在任何能量的耗散过程，关于这种媒质中的方程在一些书中已有详尽的推导^[7]。

液体中声压 p 满足波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (1-1)$$

式中 p —— 声波引起压力的变化；

c —— 声波在媒质中的传播速度。

波动方程式 (1-1) 表示声所借以传播的流体中的压力对时间的导数与其空间导数之间的关系。

理想媒质中的波动方程也可用质点速度和位移表示为：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right) \quad (1-3)$$

式中， u 和 ζ 分别为质点振动速度和位移。

二、考虑粘滞阻力时的波动方程^[5]

实际媒质总是非理想的，声波在非理想媒质中传播时，会出现声波随着传播距离增加而逐渐衰减的物理现象，产生了将声能转变为热能的耗散过程，称为媒质中的声衰减，或叫声波的吸收。

如果流体媒质具有粘滞性时，媒质对声波产生吸收。媒质的粘滞性是声波衰减的一个主要原因。当粘滞媒质中相邻质点的运动速度不相同，即它们之间产生相对运动时会产生内摩擦力，也称粘滞力。因此，粘滞力应该是速度梯度的函数。对于一维问题（为了讨论问题方便，在本书的其它章节里均以平面声波为例），单位面积上的粘滞力可表示成与速

度成正比的关系

$$F_{\eta} = \eta \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1-4)$$

(1-4) 式中的比例系数 η 称为粘滞系数。一般来说, 它应由两部分组成, 一是切变粘滞系数 η' ; 另一部分是容变粘滞系数 η'' 。在一般流体力学问题中, η'' 常被忽略, 但在声传播问题中它却起着相当重要的作用, 所以 η 应表示为 $\eta = \frac{4}{3}\eta' + \eta''$ 。这样, 对于粘滞流体媒质而言, 运动方程

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-5)$$

中还需计及粘滞应力的部分, 它等于

$$p' = -F_{\eta} = -\eta \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1-6)$$

取负号是因为压强的增量与粘滞应力所取的方向相反, 将 (1-5) 式中的 p 代之以 $p + p' = p - \eta \frac{\partial u}{\partial x}$, 并以声压 $p = -K_s \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ 表示压强的增量, 即可得粘滞流体媒质中的波动方程为:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = K_s \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^2 \partial t} \quad (1-7)$$

式中 ρ_0 ——流体的静态密度;

K_s ——流体的体弹性系数。

公式 (1-7) 就是粘滞媒质在一维坐标下的纳维—斯托克司方程。

第三节 声波在固体媒质中的传播

一、固体媒质中的声波^[3]

在固体中一般除了能传播纵波外, 同时还能传播横波, 即

切变波。这是由于一般固体媒质除了能产生体积形变外，还会产生切形变，它除了体弹性外，还具有切变弹性，由此可见，理解和分析固体中声波的传播要比流体复杂得多。

对声波在固体中传播的正确描述，已有许多文献很详尽地论述了这个内容。我们在这里只要注意到有两种波（即纵波和切变波）可以在固体中传播就够了。

纵波在固体中的传播与纵波在液体中的传播基本上相同，它的速度 c_l 可以用拉密常数 λ 和 μ 表达如下：

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1-8)$$

切变波在固体中的传播速度 c_T 是

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1-9)$$

式中， ρ 是固体的密度。

二、拉密常数与扬氏模量、泊松比的关系^[3]

对于各向同性固体拉密常数中的切变弹性系数 μ 的物理意义是明确的，它的定义为切应力与切应变之比，然而， λ 的含义就不十分清楚。为此人们常常喜欢采用另外两个物理意义比较明确的弹性系数——扬氏模量 E 和泊松比 ν 来表示其弹性性质。拉密常数 λ 和 μ 与扬氏模量 E 和泊松比 ν 之间的关系为：

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

第四节 平面波动方程的解

如只考虑一维情况，方程 (1-1) 解的普遍形式是