

曾龙伟 郭洪岩 杨秀丽 王凤祥 编著

物理法采油技术

WU
A CAIYOU JISHU



石油工业出版社

物理法采油技术

曾龙伟 郭洪岩
杨秀丽 王凤祥 编著



石油工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理法采油技术/曾龙伟等编著.

北京:石油工业出版社,2001.8

ISBN 7-5021-3494-8

I.物…

II.曾…

III.物理-方法-应用-石油开采-技术

IV.TE35

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第057658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)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米32开本5.875印张150千字印1—1000

2001年8月北京第1版2001年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3494-8/TE·2587

定价:18.00元

前 言

近几十年来，许多近代物理学的新理论、新技术被引入石油开采领域，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。现已投入工业性试验或正在研究开发中的物理采油方法已达十余种，其中常见的有声波、超声波、电液压、电磁、高能气体压裂、水力振荡、人工地震采油技术等。美国和前苏联在上述各项技术的研究中一直处于世界领先地位。美国早在 50 年代就有人获得了声波采油技术专利，而且一直没有间断过这方面的研究，有不少人在声波采油泵、声波除垢解堵装置、声波造缝设备、声波钻井机械等方面取得了发明专利。前苏联在声波采油的机理研究、设备研制、矿场实验、以及电液压采油技术、高能气体压裂等方面的研究均十分活跃。近几年来，我国的大庆、吉林、新疆等油田也相继开展了有关物理采油技术的现场试验。物理采油技术的研究也日益受到了普遍的重视。高能气体压裂、电脉冲、超声波等采油技术已作为推广项目在油田应用。尽管这些技术还存在许多不完善之处，但却已经展示了它们在我国各油田应用的广阔前景。值得注意的是，上述技术的研究与应用目前还仅限于处理近井地带，作为一种解堵、增加单井产量、提高采油速度的工艺措施。面对其在处理整个油层、作为改善采油（IOR）和强化采油（EOR）技术的研究与应用还较少。

另一方面，尽管国内外现已提出了种类繁多的物理采油方法，但大都偏重于现场试验；在不同的油藏条件下，上述各种采油方法的应用效果差异很大，对其适用性评价不一。造成这种现象的原因在于：基础理论研究严重滞后于设备研制与技术应用；对物理采油机理及规

律性的认识仍停留在感性认识与定性解释的水平上，其工艺设计几乎完全是凭经验而定，导致了现场试验与技术应用在一定程度上盲目性。这正是物理采油技术至今尚未形成规模化应用的主要原因。目前，这一问题已经引起人们广泛的重视。

本书适合从事油气田开采工作的管理人员、工程技术人员，及石油院校石油工程专业的师生学习参考。

目 录

一、综 述	(1)
(一) 研究动态与发展前景	(1)
(二) 物理场激励法用于提高原油采收率的机理综述	(3)
(三) 现场应用及效果概述	(8)
二、波的基本性质	(12)
(一) 波的概念	(12)
(二) 声波的性质	(13)
(三) 流体中的波动方程	(19)
(四) 声波在固体介质中的传播	(23)
三、声波在油层中的传导和衰减特性	(25)
(一) 声波的性质及作用原理	(25)
(二) 声波在油层中的一维传导	(26)
(三) 声波在油层中的径向传导	(36)
四、波动作用在油层内引发的物理化学现象	(44)
(一) 声波在油层内的作用效应	(44)
(二) 冲击波对油层的作用	(53)
五、声波采油技术	(61)
(一) 声波采油技术的发展历程	(61)
(二) 超声波采油技术	(63)
(三) 水力振荡解堵采油技术	(65)
(四) 低频振动处理油层工艺	(70)
(五) 井下低频电脉冲采油技术	(73)

六、高能气体压裂技术..... (81)

 (一) 高能气体压裂机理与模型 (82)

 (二) 高能气体压裂工艺及其设计 (85)

 (三) 高能气体压裂的实验研究 (93)

 (四) 高能气体压裂的特点及选井方法 (94)

 (五) 高能气体压裂存在的问题 (96)

 (六) 高能气体压裂的发展趋势及前景 (98)

七、磁技术在油田生产中的应用..... (102)

 (一) 概 述 (102)

 (二) 磁场对油层流体物性的影响 (104)

 (三) 磁作用机理和理论模型 (138)

 (四) 磁处理装置的设计与安装 (141)

 (五) 磁处理技术的应用 (153)

参考文献..... (174)

一、综 述

（一）研究动态与发展前景

作为一类改善采油（IOR）和强化采油（EOR）的新技术，利用物理场（超声波，低频脉冲波，电、磁、电磁波）处理油层，具有许多突出的特点：

（1）适应性强。许多物理场方法可适用于高含水中、后期的提高水驱采收率，也可用于常规技术无法处理的粘土油藏、低渗透油藏、致密岩性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。与聚合物驱、三元复合驱等相比，用物理场处理油层，其施工工艺要简单得多，投入成本低廉并且其效果明显。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提高采收率 10%。

（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为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（四次采油），而且还有望与化学驱（或水驱）组合应用，优势互补，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。国外（如美国、前苏联）早已注意到物理场激励法对于提高采收率的效果，并已开展了有关方面的研究。例如：早在 20 世纪 60 年代，美国就把声波采油技术列入了三次采油新技术的范畴。《世界石油》杂志也多次报导了声波强化采油试验所取得的新进展。前苏联石油部部长助理在 1981 年发表的“80 年代苏联采油技术的发展方向”一文中指出，“苏联需要探索低产油田处理油层提高采收率的新方法、新工艺，发展声波、电磁波、热声波等新技术”。据目前掌握的资料来看，国外（如美国、俄罗斯）已经开展了利用各种物理场（包括声场、水动力场、电场、磁场、电磁场、热场）处理油气层的理论研究。

可以预测，今后对物理采油技术研究的主要发展趋向是：

1. 机理研究由定性解释向定量描述发展

目前，大多数物理采油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。因此，目前物理采油的应用几乎完全是凭经验进行设计与施工。这样不仅难以保证各种工艺措施达到最佳效果，而且还有可能因实验的盲目性轻易否定具有良好应用前景的技术。为此，人们已经意识到进行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，使近代物理、生化采油工艺设计由目前的经验型向优化型发展。

2. 处理技术由单一方法向综合方法发展

每一种物理方法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。如果针对不同的油层及油井特性，将适当的方法组合起

来，利用其物理（如声、热、磁、电等）及物理化学作用的协同效应，可以开发出更有效、更经济的综合物理（或物理化学）采油技术。

3. 处理范围由近井地带向整个油藏发展

现已应用或正在进行现场试验的物理采油方法，大都是针对近井地带的处理。现已有人正考虑用物理场对整个油藏进行处理。例如在美国有许多关于向地层注水引起强声场的资料，其震源深度基本与注水深度相当。由此启发人们有可能建立起用低频声波对整个油藏进行处理的工艺技术。

（二）物理场激励法用于提高原油采收率的机理综述

就总体而言，物理法改善采油（IOR）及强化采油（EOR）的主要机理为：

- （1）作用于近井地带，解除井筒附近的污染；
- （2）作用于油藏，改善其孔隙结构与渗透性；
- （3）作用于原油（或地层流体），改善其流变性。

这里着重从物理场对油藏与地层流体的作用来阐述物理采油的基本原理：

1. 声场作用

1) 降低原油与岩层的亲和力

声波作用于油层时，地层流体及储油岩层随声波一起振动（压缩脉冲振动），由于油、水及岩石物质密度不同，各自产生的振动加速度和振动幅度也不相同，致使两种相态物质界面产生相对运动，到了一定强度就会有撕裂的趋势，从而使原油与岩层的亲和力减弱，使原油脱离岩砂。而水与油的界面在声波作用下则会形成油包水或者水包油型乳状液，有利于流至井筒内。

2) 改善油藏的孔隙结构、提高渗透率

声波作用于油层，其脉冲压缩波使油层岩石的应力发生脉动变化，在声波压缩时应力压强可达到上千个大气压，一张一弛，每秒钟

岩层承受着几万次甚至更高的冲击振动，当超过其疲劳强度极限时，可使岩层产生疲劳裂缝，从而改善油层的泄油剖面，可大大提高油藏的渗透率。据实验研究表明，在 30°C 时，超声波作用的岩心，其渗透率可提高 1 倍以上（见图 1-1）。

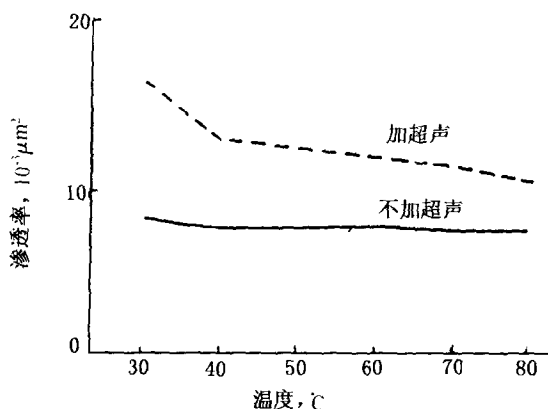


图 1-1 岩心的渗透率曲线图

3) 降低表面张力

声波作用于油层，油层内毛细管的直径将随脉动压力而发生周期性变化。当毛细管胀大时，其表面张力减小，毛细管内的原油很容易流入井筒。另外，由于声波的特殊性质将会使流体介质向声源方向流动，即所谓声流效应，从而提高了地层的驱油能力。

4) 降低原油粘度

在超声波场中，原油分子结构在剧烈振荡作用下，会产生周期性排列组合，尤其是空化效应，可使原油物质的分子键断裂、分子量减小，从而降低原油粘度，实验结果表明，在 $10 \sim 100 \text{ kW} \cdot \text{m}^2$ 的强声场作用下，频率为 20 kHz 时粘度下降 30% 左右（图 1-2）。

超声波具有机械振动作用、空化作用、热作用，并具有穿透能

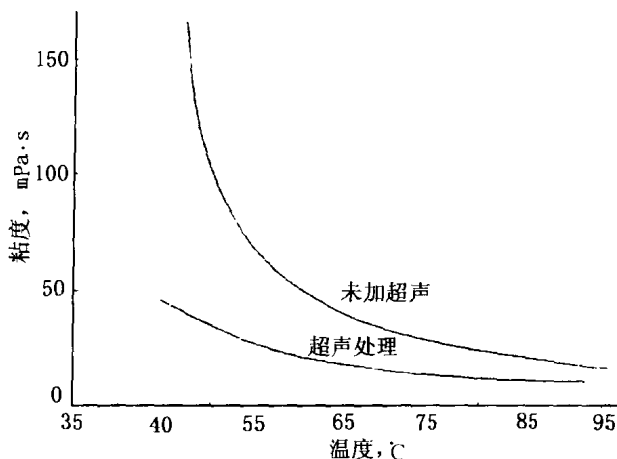


图 1-2 超声波降低原油粘度的试验曲线

力强、在液体和固体介质中传播距离远、传播方向性好等特点。所以用超声波处理油层能疏通油流通道，降低毛细管张力，提高渗透率，改变油层流体的流变性及流态，促进油、水、气的流动，提高地层的泄油能力，从而可提高最终采收率。可见超声方法是一种具有很大潜力的改善采油（IOR）和强化采油（EOR）方法。

2. 低频脉冲波作用

低频脉冲波与超声波相比，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，低频脉冲波的有效作用范围较超声波大得多，可达 200m 以上。低频脉冲波作用于油藏，提高采收率的机理主要有以下几个方面：

1) 产生宏观裂缝

室内实验表明，经低频脉冲波处理后的致密岩心不仅产生了分叉的裂缝，而且岩心内出现了清晰可见的微裂缝网。

2) 改善岩心微观孔隙结构

经低频脉冲波处理的致密岩心，其孔隙直径可增加一倍左右，其连通指数、储层指数也分别增大 10% 和 30% 左右。

3) 改善原油流变性

实验结果表明，经低频脉冲波处理后，原油粘度可约下降 17% ~ 25%。

4) 改善界面特性

在低频脉冲波作用下，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。同时，还可以改变孔隙介质中油、气、水界面特性，克服毛管力的束缚滞留效应，使呈油珠、油柱状分散在油层中的剩余油重新分布、聚并，便于将其驱出油藏。

5) 降低油水界面张力

国外实验证实：在振动场中，油水界面张力可降低 2~3 个数量级，形成 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{N/m}$ 的低界面张力体系，达到低界面张力驱油的指标界限。

3. 电脉冲作用

1) 机械作用

电脉冲对于油藏的机械作用与声波及低频脉冲的作用相同。井下放电过程产生的巨大压力脉冲与高能气体压裂相类似，会在地层中形成裂缝体系，由于压力脉冲速率要比高能气体压裂高出 1~2 个数量级，因此裂缝体系有较大的不同，裂缝网络更为复杂。

2) 化学作用

电脉冲的化学作用依赖于井下放电液体介质和地层的类型，对不同的地层采用适当的化学液，可加强电脉冲的作用效果。

3) 物理作用

电脉冲对于油藏和地层流体的物理作用主要指其对于地层电性的影响。由于油水的电特性差异较大，因此在同一电场内，它们所表现

出来的物理及力学特性也不同。在油水两相渗流情况下，当原油和含有溶解盐类的水受到电场激励时，双电荷层可动亚层内阳离子就会向阴极移动，阳离子又会把水分子带走。结果，根据电位梯度和压力梯度所产生的电流和流体动力流方向不同，可以提高或者降低水的渗流速度。由此可见，可以根据油、水的这种电性差异，利用电场来调节其相渗透率，达到控水增油的目的。

已有的实验结果表明，在电场作用下油水混合物通过岩心渗流时，随电场强度的增大，总会导致油相渗透率提高和水相渗透率降低。

4. 磁场与电磁场作用

1) 磁场对原油流变性的影响

在连续磁场作用下，原油（或流体）分子在磁场方向上定向排列，使其粘度值发生改变。其一般规律为：随着磁场强度的升高，液体粘度下降。

另外，有实验研究结果报导：在交变磁场内，油－水混合物的粘度增大（如图 1-3 所示），混合物中极性组分含量越多，粘度增加就越大，而且其粘度的增加与处理时间有关（曲线 2 和 3）。

综上所述，连续磁场与交变磁场都能改变原油（或混合物）的流变性，但其机理与效果不同。我们在用磁场激励油层时，可根据不同的情况与目的选择不同的处理方式。

2) 电磁场对原油流变性的影响

电磁场作用于油藏产生大量的热，从而改变原油的流变性。利用适当的装置，在井筒附近地层中产生电磁场，由欧姆和电介质机理的综合作用加热储层流体。这一方法对于低渗透、高粘原油开采是十分有效的。

当电磁场作用于油藏时，油层以两种方式吸收电磁能，即传导（离子）加热和电介质加热。当地层含水时，水提供传导或离子路径，造成传导和加热。原子，特别是极性分子通过电场时产生电介质加

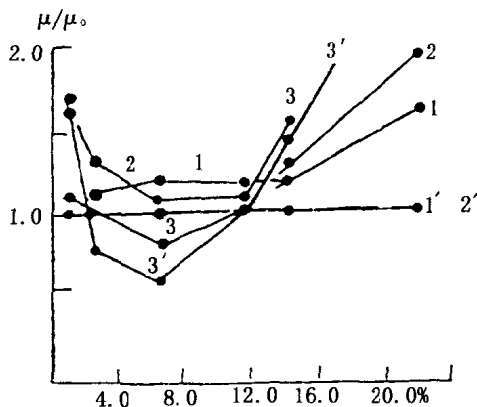


图 1-3 模拟油极性组分动力粘度与其含量的关系曲线
 1—接入磁场的情况下；2—处理 1h 以后；3—处理 24h 以后；1'—在没有磁场的情况下；2'—在无磁场条件下过 1h 以后；3'—在无磁场条件下过 24h 以后

热。因此，地层吸收电磁波的能力是原油含水的函数，含水越高吸收电磁能的能力越大。然而如果地层被加热到水分蒸发点以上，且排除了水蒸汽，则两种加热效应的作用就会迅速降低几个数量级。这就使得电磁波能够穿入储层深部。

以上所述的物理场提高采收率机理只是目前比较流行的一些定性解释与初步的实验结果。实际上，该领域的研究工作还只是刚刚起步，对于在物理场作用下储层物性、流体流变性以及渗流特性的认识还很不清楚，应该尽快加强这方面的研究。

(三) 现场应用及效果概述

1. 声波处理油层

据国外现场试验报导，利用声波处理油层可使原油采收率提高 10%~15%。

1969 年 9 月 17 日，在俄克拉何马州华盛顿县的一口低产井上，采油高频超声发生装置进行了现场试验。该井处理前产量为 2.18t/

d, 处理后产量为 3.1t/d , 平均增产 0.9t/d , 其有效期持续了一年以上, 增产率为 42.2% 。产水量由处理前的 $4.77\text{m}^3/\text{d}$ 下降至 $1.27\text{m}^3/\text{d}$ 。从观测效果上看, 其附近的邻井产油量也有所上升, 产水量也都有所下降。

从 20 世纪 60 年代末到 90 年代初, 前苏联用各冲振动法处理采油井在 1.2 万口以上, 注水井 2500 口左右, 增产原油 900 多万吨, 增加注水量 $300 \times 10^4\text{m}^3$ 左右。如在兹阿兹石油企业的油田中用此技术处理了 1624 井次, 平均有效期为 12.1 个月, 共增产原油 $22 \times 10^4\text{m}^3$, 其实际经济效益达 236 万卢布。在鞑靼、巴什两个石油企业的油田中, 共进行了 940 井次的声波激励试验, 平均有效期为 13 ~ 15 个月, 增产原油 $46.57 \times 10^4\text{t}$, 经济效益达 45 万卢布。

上述声波采油工艺只是对单井进行处理, 以提高单井产量为目的。目前, 国外已尝试将物理场激励法扩展到油田整体开发上应用, 以提高原油最终采收率为目的。前苏联在中亚一个报废油田上进行了声波激励试验。这个油田经过二次采油后还有残余储量 $45 \times 10^4\text{m}^3$ 。预计通过声波—超声波处理后可再采出 $1/4$ 的原油储量。经过 3 个月的声波处理后, 这个油田重新投入了生产, 其采油成本低于常规采油。他们还准备将声波处理与注气结合起来, 其效果将会更好些。

我国各油田现也已开展了声波采油的现场试验, 并且取得了良好的增产及提高采收率效果。现将国内外利用声场效应提高原油采收率的方法及设备统计于表 1-1 中。

2. 电磁波处理油层

伊利诺斯 IIT 研究所在美国能源部资助下, 于 20 世纪 70 年代开始研究用电磁波加热开采重油, 并进行了一系列现场试验。其结果表明, 向储层输入 100kW 的电, 产量增加 10 倍左右 (如图 1-4 所示)。这种方法可以在没有热流体与储层相接触的情况下加热储层。有些储层因为物理特性 (如有断层或高渗透率的“贼层”) 不能用蒸汽有效地加热; 有些储层由于含有粘土, 与水接触后即行膨胀, 降低

储层的渗透率，不能采用蒸汽加热。而在上述所有情况下均可采用电磁波加热法。从能耗的角度来看，电磁波加热法与一般循环蒸汽方法相比，每采一吨原油其能量消耗要少若干倍。这种方法还可以和其他提高采收率方法结合应用，提高原油的流动性。目前，在美国电磁波加热开采原油已成一种商业性的改善采油（IOR）和强化采油（EOR）新技术。

表 1-1 声场效应提高原油采收率的方法及设备

作业方式	作业目的	所用设备	作用机理
提高生产层中注入表面活性剂的效率	提高表面活性剂向介质的渗透率	水动力型深井转换器	提高在声场中孔隙介质的渗透率，储层颗粒机械活化
在开采高粘度、含蜡油和沥青时提高热处理效率	提高地层被加热的深度，扩大加热范围	在深井转换器的基础上，用热声仪器、电声仪器、多孔发生器	热声学：在声场中地层的导热系数成倍地提高
提高地层的吸收能力	提高注水井的注水能力	电声型深井转换器	在声场中孔隙介质的渗透率提高
调整注水井的吸收剖面	调整低渗透和高渗透储油层的渗透性	电声型深井转换器	在声场中孔隙介质的渗透率提高
调整注入井的吸收剖面	调整低渗透和高渗透储油层的渗透性	同上	同上

3. 对于物理法改善低（或特低）渗透油藏采油的认识

从对我国目前物理采油技术的应用与现场试验的统计来看，超声波等方法应用于低（或特低）渗透油田的效果远不如应用于高渗透油田。这主要是目前的物理采油方法的选择及其技术参数与低渗透油藏