

油气藏水文勘探法及其应用

杨寿山 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书适应我国石油工业加速发展需要，阐明了油气藏水文勘探法的中国古代发明、世界现代体系和重要特点，包括干扰试井、脉冲试井、垂向试井和三维试井。概述了压力波物理学原理、理论解释图版、水文勘探曲线特征和解释方法。综合了中国、前苏联、美国和其他国家在油气田勘探开发中应用水文勘探法的 34 个实例，反映了从 40 年代到 90 年代油气藏水文勘探法应用成果、实践经验和技术水平。

本书主要供从事油气田勘探开发的地质和工程技术人员阅读，亦可供主管科研生产的领导干部工作中借鉴和大中专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气藏水文勘探法及其应用/ 杨寿山编著.
北京: 石油工业出版社, 1997. 12
ISBN 7 - 5021 - 2065 - 3

. 油...
. 杨...
. 油气藏 - 水文地质勘探
. P618 130 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 13562 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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 11 印张 278 千字 印 1 - 1000

1997 年 12 月北京第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 2065 - 3 TE·1741

定价: 28.00 元

序

杨寿山教授是我在大庆相识的一位老石油。一位为石油事业发展饱经风霜的老科技工作者。他于 1928 年出生于河南林县，1950 年毕业于西北大学物理系。一出校门，就与石油结下了不解之缘，四十多年辗转于玉门、大庆、江汉、胜利等油田，从事油田开发试验油藏工程研究，以及油田开发设计和地质技术管理等工作。为玉门油田挖潜增产，为大庆油田的分层开采，为江汉油田的高产稳产和胜利油田稠油上产，洒下了辛勤汗水，作出了重要贡献。当他从一线退下来，曾找我谈起，要把他几十年的工作经验进行总结，继续为发展我国石油工业服务。我为此而感动，并鼓励他完成此愿。两年后，足有尺高的一叠手抄的书稿，送给了我，并约我为此书写序。说实在的，杨教授是新中国石油战线的前辈，我有幸作为本书第一位求知者，受益非浅，愿把一点感受记录于后。

油气藏水文勘探法是探测和研究地下油气藏静态特征和动态规律的水动力学试井方法。它利用或创造激动、观察条件，了解井与井之间、层与层之间，甚至含油区、含气区与含水区之间的相应关系。从这一点出发，作者对油气藏水文勘探法的原理、由来及发展，特别是基于对国内外从 40 年代到 90 年代 34 个油气藏水文勘探法应用范例，论证了现代油气藏水文勘探法的内容。作者从大量实践活动中，指出现代油藏水文勘探法应包括干扰试井、脉冲试井、垂向试井和三维试井，四位一体组合成配套的现代水文勘探科学技术体系。

事实上，早在 1500 年前，我国古代人民就已发现地下储水层相互连通，井与井之间有水动力联系。直到 20 世纪 30 年代到 40 年代，由前苏联和美国学者通过科学试验和理论研究，把油气藏水文勘探法转入矿场应用。本书论述了这一历史发展过程。

任何科学方法的立论，都是有其理论基础的。本书充分论述了油气藏水文勘探法的理论基础是压力波物理学，并且在原来压力波物理学理论上，进一步综合归纳成四条原理，即压力波传播迭加原理、镜象映射原理、边界压力反应原理和椭圆定位原理。这样，与波动力学、地下渗流力学、几何光学和解析几何学的相关原理对应更加明确，更具普遍意义。

为了使油气藏水文勘探法更有效地应用于实际，作者系统总结了国内外油气藏在不同探测方式条件下的水文勘探曲线反应特征，归纳成 20 种典型类型，为矿场定性解释水文勘探试井成果提供了新的简便类比方法，使本书更具实际应用价值。本书还汇集了油气田在不同地理环境和地质条件下，在不同勘探开发阶段，借助不同仪器设备，采用不同探测方式进行水文勘探的实践经验，扩大了水文勘探法应用领域，不仅应用于油气田开发阶段，也应用于勘探阶段；

不仅应用于砂岩油气藏，也应用于其它岩性油气藏；不仅可在陆上油气田应用，也可在海上油气田应用；既可用于研究地质问题，又可用于解决工程问题。

总之，这本书是作者几十年理论研究和不断实践的结晶，凝聚着作者的心血和对石油事业发展的期盼。希望在油气田勘探开发实践中推陈出新，扩大应用成效。

老有所为，志在千里。杨教授仍在继续耕耘，他告诉我，还准备写一本《油气田地质开发力学》的书，将他的全部智慧、经验奉献给社会主义祖国的石油事业。我似乎又看见夕阳染红了天，将对我国油气田现代化高效开发提供新的科学依据。

1997年2月11日

前 言

在我国油气田勘探开发实践中，既有古代人民在采盐水井和天然气井中应用水文勘探法的悠久历史渊源，又有新中国在油气田上应用水文勘探法的成功经验，解决了许多地质、工程方面疑难问题，为新油气田滚动勘探开发部署和老油气田合理开发调整，提供了重要科学依据，见到显著成效。

随着世界石油工业的发展，油气藏水文勘探法日益得到广泛应用。．．雅科甫列夫在《油气层水文勘探》专著中阐述了前苏联40年代应用油气藏水文勘探法的矿场经验和科学原理；50年代以来，国内外石油专家们又在专题论文和著作有关章节中介绍了许多应用油气藏水文勘探法的新成果和科技新发展；但是至今尚未看到系统总结性的新专著，在学科概念和专业术语方面也很不统一。1993年当笔者撰写的“水文勘探法在中国油田开发中的应用”一文在《石油学报》刊登后，已引起石油界关注，国外已有专业期刊摘登，国内已有矿场同行复印，表明系统总结国内外应用水文勘探法的实践经验和科技进展，很适合当前油气田勘探开发的需要。为此进一步综合了国内外油气田应用水文勘探法的丰富经验和科学理论，构成配套的现代应用科学技术体系，经过几年努力，编写成《油气藏水文勘探法及其应用》这本新的专著，包括干扰试井、脉冲试井、垂向试井和三维试井的最新成果，有继承，有发展，希望能扩大水文勘探法应用领域，为加速我国油气田勘探开发现代化发展提供有益借鉴。

在本书编写和出版过程中，中国石油天然气总公司教授级高级工程师、科技局石宝珩局长给予了鼎力支持和热情鼓励，对书稿进行了系统审阅指正，并撰写了精辟的序言；总公司总经理助理、大庆石油管理局丁贵明局长和总公司勘探局张文昭副局长给予了热情鼓励和宝贵指导。在此特向总公司石油界专家石宝珩同志、丁贵明同志、张文昭同志致以衷心的感谢！

在本书调研组稿和编写加工过程中，江汉石油管理局有关领导和江汉石油勘探开发研究院有关领导对我的学术著译给予了关心和鼓励；在文献检索、资料整理、标准单位换算、图幅复制和清稿打字过程中，江汉研究院许多同志作了大量辅助工作。在此谨向有关领导和同志们表示诚挚的感谢！

由于笔者专业水平有限，希望广大石油工作者对书中错误和不当之处，提出批评指正。

杨寿山

1997年5月

目 录

绪论.....	(1)
第一节 水文勘探法的发展历史.....	(1)
第二节 水文勘探法现代体系.....	(2)
第三节 水文勘探法重要特点.....	(3)
第一章 油气藏水文勘探压力波物理原理.....	(6)
第一节 压力波传播基本特点.....	(6)
第二节 压力波传播弹性公式.....	(9)
第三节 压力波传播反应原理.....	(10)
第二章 干扰试井.....	(13)
第一节 干扰试井探测方式.....	(13)
第二节 干扰试井主要用途.....	(14)
第三节 干扰试井解释方法.....	(15)
第三章 脉冲试井.....	(28)
第一节 脉冲试井探测方式.....	(29)
第二节 脉冲试井主要用途.....	(30)
第三节 脉冲试井解释方法.....	(30)
第四章 垂向试井.....	(38)
第一节 垂向试井探测方式.....	(39)
第二节 垂向干扰试井.....	(39)
第三节 垂向脉冲试井.....	(41)
第五章 三维试井.....	(52)
第一节 三维试井探测方式.....	(52)
第二节 三维干扰试井.....	(52)
第三节 三维脉冲试井.....	(54)
第六章 水文勘探曲线反应特征.....	(55)
第一节 水文勘探曲线特征影响因素.....	(55)
第二节 水文勘探曲线特征认识过程.....	(56)
第三节 水文勘探曲线特征类型分析.....	(57)
第七章 中国油气田应用水文勘探法实例.....	(64)
第一节 边缘注水开发油田干扰试井, 采取控制局部水舌有效对策.....	(64)
第二节 横切割注水试验区干扰试井, 了解见水层位水线形成特点.....	(66)
第三节 陡构造低渗透油藏干扰试井, 选择多盐断块油田注水方式.....	(69)
第四节 稠油断块油藏干扰试井, 评价常规注水开发效能.....	(71)
第五节 断层交错区块干扰试井, 确定开发系统注采井别.....	(74)
第六节 变质岩古潜山油藏脉冲试井, 测算详探试采阶段地质储量.....	(76)

第七节	超覆型古潜山油藏干扰试井, 研究不同类型储层接触关系.....	(79)
第八节	海域火山岩油藏干扰试井, 检验储层特性和驱动类型.....	(82)
第九节	狭长构造白云岩气藏干扰试井, 编制多层组气田整体开发方案.....	(84)
第十节	低渗透大气田干扰试井, 探测储层区域分布特征.....	(85)
第八章	前苏联油气田应用水文勘探法实例.....	(89)
第一节	抽稀井网试验油田干扰试井, 大规模探测油藏不渗透边界.....	(89)
第二节	复杂岩性多层油田干扰试井, 统筹不同层系注水开发井网.....	(91)
第三节	地台型边外注水油田干扰试井, 适应断层透镜体优化布井方案.....	(93)
第四节	沥青质泥岩裂缝油藏脉冲试井, 测算双重孔隙介质弹性系数比.....	(95)
第五节	高粘度原油油藏干扰试井, 确定储层内稠油流变特性.....	(98)
第六节	巨厚灰岩裂缝油藏干扰试井, 验证储层区间层间连通关系.....	(100)
第七节	相邻气田之间干扰反应观察, 结合气流动态复核气藏储量.....	(103)
第八节	砂岩油层与喷泉远距水文勘探, 探测供源区与迳流区水力联系.....	(106)
第九章	美国油气田应用水文勘探法实例.....	(108)
第一节	多条断层切割油田脉冲试井, 验证断层密封预测注水动态.....	(108)
第二节	疏松砂层断块油藏脉冲试井, 测定孔隙压缩性与细粒堵塞.....	(111)
第三节	低渗透层水力压裂区脉冲试井, 测算诱发裂缝方位和延伸长度.....	(114)
第四节	化学剂驱油试验区脉冲试井, 观察注聚合物油层渗流特性.....	(117)
第五节	裂缝性碳酸盐岩油藏干扰试井, 评价储层特性和制订开发规划.....	(121)
第六节	海上盐丘区气藏干扰试井, 检验地震勘探断层密封性.....	(125)
第七节	风成砂丘沉积储层干扰试井, 考虑凝析气藏保持压力规划.....	(127)
第八节	海侵滨面沉积砂岩干扰试井, 进行凝析气藏多层特性描述.....	(130)
第十章	其他国家油气田应用水文勘探法实测.....	(135)
第一节	高渗透大油田脉冲试井, 改善整体模拟油藏描述.....	(135)
第二节	页岩局部遮挡油藏脉冲试井, 指导储层高压注气混相驱油.....	(141)
第三节	分流河道砂水淹区脉冲试井, 研究油藏三次采油饱和条件.....	(145)
第四节	顶部侵蚀老油田脉冲试井, 搞清油藏形状和流体通道.....	(149)
第五节	高渗透断块油田干扰试井, 考虑储油层水驱波及效率.....	(151)
第六节	介壳灰泥岩油藏垂向试井, 测定淋滤储层垂向渗透率.....	(153)
第七节	多层砂岩断块油藏三维试井, 评价储层纵向横向非均质性.....	(156)
第八节	塔礁边底水驱油藏三维试井, 揭示礁体综合地质物理特性.....	(160)
参考文献	(165)

绪 论

油气藏水文勘探法是根据压力波物理学原理进行多井试井、三维试井，探测和研究油气藏静态特征和动态规律的新型水动力学试井方法。水文勘探法的主要优点是能够突破一般方法观察取资料的局限，利用或创造激动、观察条件，了解井与井之间、层与层之间，以及含油区、含气区与含水区之间的相应关系，研究解决油气田勘探开发中的地地质疑难问题。在解决某些特殊问题方面，应用水文勘探法比用其它勘探开发方法或工程技术手段相对经济一些，时间周期短，情况落实准确。因而水文勘探法可以与地质基础、地震测量、矿场地球物理测井、岩心分析、生产测试、重复地层测试、常规试井、开发动态分析和油气藏数值模拟、电子计算机优化处理等现代科学技术有机配合，综合解释，相辅相成，合理应用。但又各有其适用条件和特殊功能，并不能互相代替。

根据国内外文献调查，目前中国国内已有 14 个油气区推广应用了水文勘探法；国外已二十二个产油国家推广应用了水文勘探法，包括欧、亚、美、非、澳五大洲辽阔分布的油气田和地热田，充分表明水文勘探法在油气藏勘探开发中的有效性和重要作用。

第一节 水文勘探法的发展历史

根据中国和世界石油工业发展史考证，水文勘探法作为一门应用科学，是由中国古代人民在采盐水井和天然气井中首先发明和应用的，而于 20 世纪 30 年代到 40 年代，才由前苏联和美国学者们通过科学试验和理论研究，把油气藏水文勘探法转入矿场应用。随着新中国石油工业的飞速发展，我国石油工作者在油气田勘探开发中承先启后，进一步扩大了水文勘探法应用领域，不断提高应用成效和科学技术水平。

在申力生主编的《中国石油工业发展史》和李德生院士编著的《石油勘探地下地质学》中，都引证了我国古代人民进行水文勘探的历史文献依据。早在公元 265 ~ 420 年期间，我国晋朝时期，盛宏之所著《荆州记》一书中就有“浚一井则众井水皆动”的记载，说明早在 1500 年以前，我国人民已经发现地下储水地层是连通的，井与井之间有水动力联系。当新掘成一口井采水时，就会引起周围许多井中水的波动。这种波动就是“水力传导”或“压力波传播”的概念，成为世界上水文勘探法产生最早的萌芽。

到了我国明末清初时期，即 1644 年前后，这种对地下水层水动力联系的朴素认识便转入实际应用阶段。根据《川盐纪要》中记载：“最初，有人凿井百数十丈，尚不见功，验其土质色泽，则与他井异，以水化之，则咸量较黑水尤重，由是知为盐崖之发现。日以淡水灌入井中，复以寻常汲卤之法汲而煎之。……未几甲井入水而水不见，乙井不必入水，水反源源而来，推而至于丙、丁，莫不如此。……一日，某井户以粗糠和水入井试之，果由他井汲出，因知盐崖融化，逐渐沟通。遂公司商议，于四十余眼盐崖井中，只以一、二井专司灌水……”。这一历史记载表明，早在 350 年以前，我国四川自流井一带人民在灌水采盐卤过程中，早已采用向井中灌“粗糠和水”的办法验证各井之间的水动力联系，了解各井间裂缝的连通性，当时叫做“通腔”，实际上是用粗糠作指示剂，用水作载体来验证水文勘探法的有

效性。综合起来，至少总结了甲井、乙井、丙井和丁井等 4 口井的试验观察成果，推广应用到 40 多口灌水采盐井中，这是结合生产实践用水文勘探法进行多井试井的一种尝试和创举。

约在 200 多年前我国清朝时期，四川地区在开发自流井气田时就建立了科学的技术档案，用以记录钻井过程中地下地层的变化和见油、气、水的迹象。每口井建有井口簿，称“岩口簿”，在这些井口簿上记录有关于地层裂缝的描述，明确记载了“立缝见火”、“横缝见水”的特点，说明在 200 多年前，我国人民已经能从地下流体动态来判断地层静态结构特征。井中出水是反映有水平裂缝的标志，井中出气能点火是反映有垂向裂缝的标志，实际上是根据地下水力传导信息借以判断地层裂缝系统纵向和横向分布特征，联系到井和地层的相应关系。从历史唯物主义和辩证唯物主义的观点衡量，中国古代人民最早进行了水文勘探试验，在中国古代科学技术发明史上谱写了光辉的篇章，对世界石油工业的发展和油气藏水文勘探法的形成和创立作出了杰出贡献。

第二节 水文勘探法现代体系

人类历史上任何科学技术的发明创造都是与社会生产实践相联系的。尽管中国古代人民早已发明和应用了水文勘探法，长期以来并未引起人们足够重视和推广。直到 20 世纪上半叶，随着世界石油工业的发展，水文勘探法才逐步在油气藏勘探开发中扩大应用，并且向科学化、现代化发展。

在 1934 年，前苏联雅可甫列夫（ . . . ）提出了“勘探油层和自流水层的一种新的地球物理勘探方法，叫做水文勘探法”，以压力波物理学为理论基础，以激动井对观察井的压力干扰为试验依据，用以研究勘探开发油气藏系统中的水动力联系和不渗透边界等问题，在进行室内甘油实验、水力积分仪实验、淡水喷泉液面观察和矿场试验基础上，写成《油气层水文勘探》专著，论述了压力波物理学原理，列举了 40 年代前苏联油田应用水文勘探法实例。

在 1935 年，美国赛斯（C. V. Theis）“第一次对油藏任意点上，由于改变产量而引起的不稳定状态，压力随时间的变化提出了解法”。1941 年雅各布（C. E. Jacob）“应用干扰一词来描述由于其它井的产量变化而引起的关井压力变化”，把采用这种方式的试井命名为“干扰试井”。1949 年麦斯盖特（M. Muskat）在《采油物理原理》专著中，从研究合理井距出发，引用了 40 年代美国城市供水井之间干扰试验和油田内早期出油探井与后来新钻生产井之间相互干扰的观察试验实例。

1944 年在我国玉门老君庙油田已发现了油井之间的干扰现象。当在 L 油层顶部钻 51 号井和 52 号井时，发现构造顶部西侧低部位相距 600 m 的 12 号井产出泥浆，据推测这些井之间油层有裂缝连通，这是应用水文勘探法原理研究我国油田动态的开端。根据 1954 年进行顶部注气试验时的注气反应曲线，进一步证实了这种认识。

在 40 年代，美国文献中所述的“干扰试井法”就是中国和前苏联所应用的水文勘探法。

1966 年，约翰森（C. R. Johoson）等在美国单层含盐水砂岩和油气层矿场试验基础上，提出了“脉冲试井法”，作为“描述井间储层流动特性的一种新方法”，利用激动井多次、短期脉冲激动，在观察井测得相应压力数据，计算油层动态参数，可以弥补干扰试井延续时间长、区域性背景压力影响大等缺点，首先在美国油田推广应用。“脉冲试井”实际上是对“干扰试井”激动方式的一种改进，但也有其局限性，对于渗透率特低、井距很大，而井间

压力干扰反应周期相当长的情况不完全适应。

经过长期矿场实践，世界上产油国家针对不同油气田的具体情况，分别采用了“干扰试井法”或“脉冲试井法”；甚至两种方法并用。“干扰试井”和“脉冲试井”统称为“多井试井”或“多井水文勘探”，构成水文勘探法的基本内容。还有一种更广义的提法，把用压力恢复曲线求油藏边界和油藏动态参数的不稳定试井法称为“单井试井”或“单井水文勘探”。确切地说，水文勘探法是由不稳定试井法延伸出来而又独立发展起来的一种新方法，而在进行水文勘探过程中，也结合应用了压力恢复曲线和压力降落曲线两种形式。目前矿场习惯上把测单井压力恢复曲线求油气藏边界的试井称为“探边测试”或“探边试验”，表示与“多井试井”或“多井水文勘探”的区别。

1969年，伯恩斯（W. A. Jr. Burns）提出了“确定垂向渗透率的新的单井试井法”，把油气藏水文勘探法的基本原理应用于同一井眼中两组不同孔眼层段之间的试井。因此相邻井之间的多井试井用来确定油气层在横向上的性质，有时称为“水平试井”；而在同一井眼中不同孔眼层段之间的试井，则用来确定厚层内或分层间的垂向渗透率，因而称为“垂向渗透率试井”或“垂向试井”，首先在美国油田推广应用。

1982年，达克（L. P. Dake）首次介绍了用重复地层测试器（RFT）进行分层垂向和水平脉冲试井法。1985年，拉萨特（T. Lasseter）等用三维模拟装置解释重复地层测试器测量的双层脉冲试井成果，得出井间区域内垂向渗透率和水平渗透率，推测出断块几何形状。1986年，布恩（G. Bunn）和拉萨特把重复地层测试干扰试井与数值模拟模型、三维地震测量、矿场地球物理测井和岩心分析资料结合起来，进行综合分析，论述了“考莫朗特油田三维试井的设计、实施和解释”，首先在英国北海域油田推广应用，成为用水文勘探法结合现代科学技术研究油藏地质结构的最新范例。

从油气藏水文勘探法的萌芽、形成和发展历史来看，有一个由初级到高级，由观察井间干扰到主动进行矿场试验；由平面到垂向，再到三维油藏描述的发展过程。但是尽管派生出各种不同的激动和观察方式，都没有超越压力波物理学理论的应用范畴，因此统一采用“油气藏水文勘探法”这一术语比较符合客观实际，既科学，又全面。概括起来，现代“油气藏水文勘探法”应当包括“干扰试井”、“脉冲试井”、“垂向试井”和“三维试井”，四位一体，组合成配套的现代水文勘探科学技术体系。

第三节 水文勘探法重要特点

1949年新中国成立后，随着大批新油气田的发现和投产，老油气田转入科学正规开发，水文勘探法在我国油气田勘探开发中日益得到广泛应用。

1955年在玉门油区老君庙油田用水文勘探观察边缘注水效果，控制水舌；1961年在大庆油区萨尔图油田用水文勘探观察在内部横切割注水条件下排液井见水动态，验证套管外窜槽；1967年在胜利油区胜坨油田用水文勘探研究断块油田地层连通性，为注水开发提供依据；1970年在江汉油区王场油田用水文勘探侦察陡构造油藏水力传导特性，分析注水地质条件；1978年在河南油区双河油田用水文勘探验证断层系统的密封性，确定注采井别；1980年在四川油气区相国寺气田用水文勘探探测狭长构造气藏远距井间储层连通关系，指导整体开发；1982年在渤海油区428西油田用水文勘探了解火山岩油藏油层连通状况，判别油藏驱动类型；1984年在辽河油区东胜堡油田用水文勘探进行变质岩潜山油藏储层评价，

落实详探阶段地质储量。80年代后期到90年代，相继在华北、江苏、新疆、长庆、滇黔桂和冀东油区应用水文勘探法研究解决新油气田滚动勘探开发过程中的特殊问题，都取得了显著成效。根据我国油气田勘探开发中应用水文勘探法成功经验，结合国外油气田应用水文勘探法的典型实例，总结出应用水文勘探法的几个重要特点。

1 水文勘探法可应用于油气田勘探开发各个阶段

从进行区域水文地质调查，寻找新油气田开始，就可以应用水文勘探法。进行水文勘探最理想的条件是至少有两口对应井，一口作为激动井，另一口作为观察井，以便了解井与井之间储层是否连通和连通层特性。如果二者不可兼得，至少要有一口观察井，可以利用地面喷泉或地下潜水面变化作为天然激动源，观察其与油气田有关的水动力联系。

在油气田详探阶段、试采阶段、一次采油阶段、二次采油阶段和三次采油阶段，都有应用水文勘探法的成功实例，包括改进储层描述、探测断层和不渗透边界、取得储层动态参数、研究井网井距和开发层系，为测算油气藏地质储量、编制油气田开发设计和调整方案、开展三次采油试验、了解增产措施作用范围等问题提供可靠依据。

2 水文勘探法可应用于研究各种复杂类型油气藏

水文勘探法是一种水力侦察性手段，对各种地质物理特性的油气藏都能使用，包括多层砂岩、裂缝性碳酸盐岩、淋滤性介壳灰泥岩、白云岩、白垩岩、火山岩、变质岩、沥青质裂缝性泥岩、鳞片状细层页岩等各种类型油气藏都有应用水文勘探法的成功实例。

3 水文勘探法可以突破其它勘探开发方法的界限

水文勘探法所利用的压力波传导是一种快速的动能传导，它在一定压差条件下同一流体的渗流运动和不同流体的界面移动要快得多；而应用压力波直射、反射、折射和吸蚀的信息，却可以探测地层中流体渗流的通道和不渗透屏障、连通孔隙介质的特性和不同流体界面的位置。用水动力学方法测算井间储层性质，常会受到非均质性或相变影响而出现异常，或存在不确定性；如果靠钻井来弄清储层区域性变化或流体动态，不但不经济，而且是无法控制的；用矿场地球物理测井解释资料进行地层连通对比，有时受到井间错层尖灭、小断裂或岩性物性变化影响，难以解释某些特殊矛盾；用地震测量可以确定大断层的位置，但不能确定断层的密封性；用不稳定试井法可以探测出井周围不渗透边界的存在，也不能确定不渗透边界的位置和密封性，但是应用水文勘探法却可以确定断层或不渗透边界的方位和密封性；用岩心分析研究双重孔隙介质的导流能力和储油能力相当困难，而用水文勘探法能有效地提供评价双重介质储层的产能与储层参数和基质与裂缝的弹性系数比。因此水文勘探法可以弥补其它勘探开发手段的不足，使能配套解决地质疑难问题，减少许多假设和不确定性，直接得出验证结论。

4 水文勘探试验一般要求有高精度微差压力仪器

水文勘探科学技术的进步，依赖于测试压力仪器精度的提高。为了保证在各种复杂的地下、地面条件下使水文勘探一次成功，要求按照难度大的情况考虑。对于井间距离远、油层渗透率低的油气藏，必须用高精度微差压力计，才能反应出微弱的压力波干扰信号。许多油气田由于受仪器精度限制，所以应用水文勘探法不如应用常规试井法广泛。随着水文勘探法应用成效日益显著，许多矿区已配备了高精度仪器设备，进一步在油气田生产过程中推广应用水文勘探法，与常规试井方法配合，及时研究解决油气田地质开发问题。因为配备一套精密测压装置，比购置其它生产设备费用要少得多，而进行水文勘探对改进油气田开发策略得到的效益却大得多，可以达到“事半功倍”。对于井距较小而渗透率较高的油气藏，用常规

的压力计同样可以观察到压力干扰反应，不一定为等待高精度仪器而延迟应用水文勘探法进程，需要具体分析，灵活应用。

5 水文勘探试验始终与油气田生产息息相关

在某些情况下，可以利用油气井试采、注水井试注或压裂酸化增产措施施工的开关井激动条件，进行水文勘探，既解决了油气田地质开发问题，又不影响正常生产。但是在很多情况下由于特殊原因，必须创造条件，才能进行水文勘探，包括对激动井或观察井进行必要的井下作业，对观察井及邻井必要的关井等，会在一定程度上影响油气田产量，因而进行水文勘探的时机最好选择在油气田详探和试采阶段，这样解决的问题比较关键，探测范围大而影响生产小。在油气田投产后，进行水文勘探的区域一般应在重点井组或生产试验区内，用局部的水文勘探成果指导全油气田开发调整。尽管水文勘探试验在某种程度上影响油气田产量，但它却是直接为油气田增储上产服务的重要手段，这就是油气藏水文勘探法不断扩大应用领域的主要原因。

6 进行水文勘探要求精心作好试验设计

试验设计是指导水文勘探顺利进展，达到预期目标的重要环节。根据岩心分析、试油和试井资料，对进行水文勘探的地面、地下条件要作周密考虑，对仪器设备要作好充分准备，对试验延续时间和可能出现的问题要有初步预测，要作好最顺利和最困难两种可能性打算，这样可以有计划有步骤地调节试验进程，做到“胸中有数”。有时发现压力反应比预计的要快，可以成倍缩短试验时间；有时发现意外情况，需要改变试验程序或中途延长观察时间，甚至需要重复验证，务必达到试验目的。

7 水文勘探法必须结合有关油气田地质研究成果综合应用

水文勘探法有独立解决某些特殊问题的优点，但是在大多数情况下必须与用各种先进科学技术手段得出的油气田地质研究成果结合，进行综合解释，才能得出中肯的结论。在很多情况下水文勘探验证的结果与地质解释和动态分析判断的结论是一致的，水文勘探只是起到澄清疑点和“画龙点睛”的作用；在另一些情况下，得出的结论会有矛盾，甚至完全相反，这就需要反复推敲，重新认识，也可能会使矛盾统一，得出更全面的正确结论；必要时宁可改变探测方式，重新试验，进一步落实，该肯定的肯定，该否定的否定，不留“尾巴”。国内外油气田有许多用水文勘探数据与三维地震、数值模拟、地质分析和生产动态综合解释的实例，使水文勘探法在油气田勘探开发中发挥更大的作用。

根据上述水文勘探法的特点，适应我国油气田勘探开发增储上产和高效开发的需要，调查研究了国内外文献中上百个油气田水文勘探试验成果、应用成效、先进科学技术和实践经验。本书向广大石油专业工作者介绍油气藏水文勘探法在勘探开发中的应用成效，旨在集思广益，进一步扩大水文勘探法的应用领域，为我国石油工业实现新的飞腾提供有益借鉴。

第一章 油气藏水文勘探压力波物理原理

油气藏水文勘探法的理论基础是压力波物理学。在基础物理学科中，与水文勘探法有关的是波动力学和光学。波动力学研究的范围较广，包括水波、声波、光波、无线电波、地震波等；光学研究的范围有几何光学和物理光学。前苏联学者雅可甫列夫于 20 世纪 30 年代到 40 年代，为了研究和解释油气藏水文勘探机理，吸取了水文地质学、地球物理学、地下水动力学、波动力学和几何光学中有关原理和定律，通过室内科学实验和矿场生产试验，创立和逐步形成了压力波物理学这门新兴应用科学。随着世界石油工业的发展，从 50 年代以来，随着世界石油工业的发展，从 50 年代以来，许多石油科技工作者在水文勘探试验技术和解释方法方面又有所改进和发展，但在压力波传播机理方面仍有些需要补充和完善。因此，本章以原作者“压力波的物理学要点”为基础，尽量吸收有关文献中现代科学的新概念、新方法和新理论，总结我国油气田进行水文勘探的矿场实践经验和科学机理研究的新认识，综合进行论述。

第一节 压力波传播基本特点

众所周知，油气层的水力学机理，主要是流体在不稳定运动中的水力机理。如果油层中流体和岩石是绝对刚体，则在任何距离上压力变化的传递会以无限大的速度在瞬息间发生，在油气层中可以维持一种符合于达西定律和相应排量下的压力。实际上，油层中流体和岩石是可压缩的，因此在油层中任何一部分发生压力变化，其沿油层传递的压力变化并不是瞬息的，而是有一定有限的速度。由于油层中流体和岩石具有弹性，所以即使在渗透性很好的油气层中，油井中的液面位置或压力水平并不等于油层无弹性时按达西定律所测算的结果。只有全面了解流体不稳定运动的渗流物理原理和运动规律，才能根据油井中静液面或压力变化预测油藏动态，判断油藏大小和几何形状，探测不渗透边界分布和油层的其他物理性质。

一、压力波传播井下液面观察

1933 年雅可甫列夫用自制液面仪观察了井与井之间压力波的传播，提出了几点认识。

(1) 在距离激动井 100 ~ 200 m 的观察井中，用液面仪探索到渗透性油层中的压力变化，是在激动井改变排量发送冲击波后，隔几秒钟到几分钟就开始的。这种压力降落的传播速度，与以天数或以星期数计算的说法出入很大，但是比声速要慢许多倍。

(2) 在观察压力反应的井中，压力增长与时间的关系曲线，不是平常简谐振动的正弦曲线形式。

(3) 压力传播是一次冲击所发生的，不是一连串的完全周期性振动，而仅仅是单一的半波，与物理学上的其他弹性波（声波、震波等）不同。

根据观察结果认为在充满自流水层孔隙的液体中，压力变化的传播，既不同于声波，也不同于水力冲击波及其他的波，而是一种完全新的弹性半波。为了要着重这种压力变化在机理上呈波纹状，借以提示它在实用上的可能性，命名为“压力波”。这种微振波可以用来观察生产层是否有不渗透边界存在，也可以用于作油层对比，测定油藏的刚性程度和孔隙空间

的容积，以及油藏相互之间的连通性等。于是根据压力波传播机理，提出了这种新型地球物理勘探法，命名为“水文勘探”。

二、压力波传播油层模型试验

在实际矿场进行水文勘探中，不可能全面观察压力波的传播过程，只能在一口井或几口单井中观察油层静止压力的变化，这种变化是由于开采同一油层的另一口井或几口井的产量有了某些改变而引起的。关于地层的性质，只能根据电测资料、岩心分析资料，结合自喷井和抽油井的产量作某种程度的判断。在这些井中所测得的液面、压力和产量随时间的变化曲线，是唯一衡量地下水动力情况的可用指标。可以根据这些曲线的形状和参数，来得出所研究油藏系统的物理性质、几何形状和水动力联系等特点。

为了正确解释这种水文勘探曲线，需要借助于标准油层模型试验。对于一个完全均质的、不受任何边界限制的油层，其渗流物理参数是已知的，可以在这种标准油层中改变模型激动井的排量，而在模型观察井中测量液面或压力变化。已知这种标准油层的曲线参数，又知道所研究油层的参数与标准油层的参数有那些不同，可使曲线参数产生怎样的变化，并把标准曲线的参数与矿场实测水文勘探曲线的参数进行比较，就可以判断所研究油层的参数与已知标准油层的参数有那些不同和相差多少。这些标准曲线是在厚度、渗透率、孔隙度、流体粘度和压缩系数均为一定的油层模型上作一定的排量改变后所产生的。所以，知道了标准曲线的参数，是正确解释矿场上实测水文勘探曲线的必须条件。

在矿场上进行水文勘探时会得出许多形状不同的水文探曲线，但是不能清楚地分辨出这些曲线中哪一条曲线代表绝对均匀的油层，因为无法保证这样的均匀性，也不可能完全知道油层的各项参数。

在实验室中复制理想条件的油层模型，虽然可以得出表明油层中均质情况的曲线，但却不能明确显示油层水侵过程的某些重要特性。要得到这些曲线的正确概念，必须取得压力波连续传播的真实照片，进行运动机理研究。在实验室用常规物理模型表达压力波，牵涉到极大困难，因为模型尺寸必须很大，因此根据“弹性重量相似”原理，制成一种新型压力波传播弹性油层模型。

在天然油层中，当油层压力下降时，原来处于压缩状态的岩石和流体就会发生膨胀。由于流体膨胀使单元体积岩层中的液体体积增加；同时由于岩石骨架变形而使单元体积岩层中孔隙体积缩小。因为在储油岩层中固体物质是处于承压状态，随着油层压力的降低，孔隙介质中的基质颗粒或固体物质发生膨胀，使单元体积岩层中孔隙体积缩小。另一方面储油岩层中的固体骨架部分支撑了上面岩层中岩石和流体重量的大部分，这种覆盖层的静载荷压力趋向于压缩油层，并且受到岩石的机械强度和孔隙中油层压力的抵制。随着油层压力的降低，抵制覆盖层压力的力量减小了，因而使储油层的厚度受压缩而减薄。这样，固体物质的体积增大了，单元体积岩层的总体积缩小了，必须导致孔隙体积减小。由于流体体积膨胀和孔隙体积缩小的综合影响，就迫使一部分多余流体从油层流向井底，这就是弹性流体在不稳定渗流状态下弹性能量释放与消耗的过程。雅可甫列夫把这种由于压力下降而靠弹性能量释放排出的多余液体称为“弹性余额”，而利用从油井采出液体，引起测压面改变的特点进行水文勘探。

在研究压力波传播模型时，用水平圆管充填砂粒作为油层孔隙介质，在管壁上装置等间距的垂直玻璃量管，以小孔与水平圆管内连通，可以用玻璃量管中的液面高度变化代表压力大小，而用玻璃量管中液柱高度重量位能的变化代表弹性能量消耗的变化。在水平圆管进口

端可以连接压头水箱用以控制垂直玻璃量管内原始静水柱液面水平，在出口端可以连接带标度储水罐用以计量排出液量，从不同位置上的各个垂直玻璃量管观察液面高度变化。这样就可以利用弹性重量相似原理，在实验室内用一种新型小尺寸压力波传播油层模型代替大尺寸压力波传播油层模型，从而模拟在天然油层中弹性流体不稳定渗流动态与压力波传播特点。由于模型油层与天然油层有水动力学理论上的相似性，经过矿场试验检查结果与用这种模型试验所得出的结果正巧相符合。压力波传播油层模型试验装置见图 1—1。

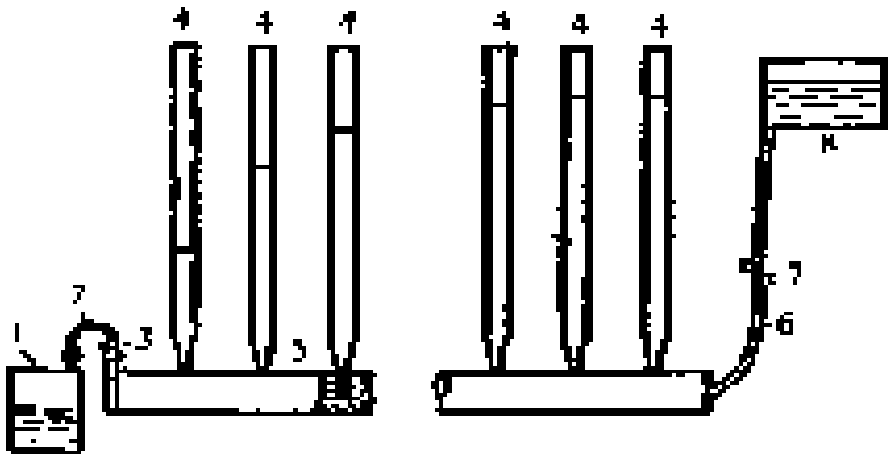


图 1—1 压力波传播油层模型试验图

1—储水罐；2—自喷井（出口）；3—开关；4—玻璃量管量；
5—充填砂粒的紫铜管；6—橡皮管；7—夹子；8—压头水箱

根据压力波传播油层模型试验所找到的经验规律，进行了理论分析和矿场试验验证，证明所得出基本公式的正确程度取决于对水文勘探曲线的数学解释是否恰当。在这些公式中，一部分所表征的渗流物理现象在数学上是正确的，而另一部分则是近似的。1940 年雅可甫列夫根据试验研究结果，进一步得出压力波传播特点的概括结论。

(1) 由于液体和岩石的压缩性，在油层中任何一点上压力变化沿油层的传播并非瞬息的，而是以一定有限

的速度呈弹性波的波动形式传播的。在孔隙介质中，液体的弹性变化速度，即使紧挨着激动井，也要比放置在储罐中同样液体的变化速度小许多倍。随着离激动井距离的增大，波前线的运动速度便减小，其减小程度与距激动井的距离成反比。

(2) 在渗透性砂岩中，虽然波前线从激动井驶出不大距离，需要不到一分钟时间；但是在推进较大距离如几十 km 到几百 km 时，则需要几星期、几个月或几年，具体传播时间取决于传导介质的性质和水力体系的大小。

(3) 在排出过程中，要得到稳定的压力和稳定的液体流动则需要更长的时间。这种情况牵涉到井中排量变化及改变排量的井数等，在油层中要使流动稳定几乎是永远不可能的，所以在油层中总是以不稳定的水力机理占优势。

(4) 根据液面或压力随时间变化的水文勘探曲线形状，如果在距激动井几百米的观察井中观察压力变化，在压力波从边界反射回来的波前线到达观察井以前，以及跟着而来的波动还未明显扰动水文勘探曲线时，就不会发现远处有水文边界反应。所以在较短时间内，对于大部分水力系统来说，不可能完全正确了解最远处的水文边界，也无法确定这些边界的物理性质、水力体系的封闭条件、油气储量、驱动方式和未来的压力动态。

(5) 用常规试井方法在井中排出液量并测定其液面，进行几小时到几天，只能了解最近时间内油井动态的近似概念，不能解答某一口井及整个油层的长远未来动态。

(6) 为了使根据试井所得的压力动态预测更正确而久远，就必须知道水力体系的各项水动力参数，这些参数都是测定水力体系大小及静液面对排量改变反应的状况和速度的。

(7) 如果有足够精确的测量仪器，必须对水力系统进行长时间的充分观察试验，但不一定要排出大量液体。正如在地球物理勘探中的地震工作一样，炸药的最少消耗量取决于检波仪器的敏感性；在水文勘探中，充分研究水力体系所必须的液体流量，也取决于测量压力波

反应的压力计灵敏度。

(8) 不预先知道新钻开油气藏水力体系的分布范围及其他性质, 就不能事先预计水文勘探曲线的形状和特征。得到这种曲线的唯一办法是直接从矿场实践中观察, 而不是用水力体系的任何解析方程来预测。得到了这种特征曲线以后, 才能据此作出有关水力体系的构造形状和大小的结论。

第二节 压力波传播弹性公式

用于表达压力波传播特点和规律的弹性公式是压力波物理学理论基础的集中体现, 是解释水文勘探试验成果的科学依据。这些公式是结合压力波传播油层模型试验、矿场水文勘探试验和多学科理论研究综合推导出来的。各国学者们采用了不同的术语、符号和表达方式, 在具体进行水文勘探试井资料整理和成果解释中, 编制了多种多样的标准曲线和解释图版, 但基本公式是大同小异, 而基本原理则是共同确认的。

一、压力传播时间公式

在均质的、无限大的油层中, 压力波由激动井到观察井所需时间与井间距离的平方成正比, 与油层孔隙度、地层流体和岩石孔隙体积的总压缩系数、流体的粘度成正比, 而与油层的渗透率成反比。压力传播时间公式表示如下:

$$t = C_k \cdot \frac{C_t \mu R^2}{k} \quad (1-1)$$

式中 t ——压力波经过距离 R 所需时间, min;

C_k ——综合常数;

C_t ——总压缩系数, $1/0.1 \text{ MPa}$;

——油层有效孔隙度, f ;

μ ——流体地下粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

R ——激动井至观察井的距离, m;

k ——油层有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

二、压力变化幅度公式

在均质无限大地层中, 一口生产井在弹性作用条件下以稳定流量生产, 由于排出流量会引起井周围多孔介质中弹性流体的压力变化, 经过 t 时间后, 在距井底 R 处的压力与原始油层压力的差值, 可以用弹性不稳定平面径向流公式表示。在进行水文勘探试井过程中, 可以把距激动井 R 处的观察井作为生产井周围的一个测压点, 则在观察井中的压力变化幅度, 同样可以用弹性驱动平面径向流公式表示:

$$p_t = - \frac{q\mu}{4 kh} E_i \left(- \frac{R^2}{4 t} \right) \quad (1-2)$$

式中 q ——激动井中流量的变化 (地下值), cm^3/s ;

p_t ——观察井在 t 时间内的压力变化, 10^{-1} MPa ;

μ ——地层流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;
 k ——油层有效渗透率, μm^2 ;
 h ——油层有效厚度, cm ;
 R ——激动井至观察井距离, cm ;
 ——油层导压系数, cm^2/s ;
 t ——自激动井改变生产方式起算时间, s ;
 $E_i\left(-\frac{R^2}{4t}\right) = E_i(-X)$ ——幂积分函数。

第三节 压力波传播反应原理

在油气藏水文勘探中, 压力波的传播是由于激动井排量变化所引起的压力对时间和空间的复杂演变过程, 有其不同于其他弹性波运动的特殊性或个性; 另一方面压力波物理学基本原理又有与物理学中某些分支科学原理的相似性或共性。为了掌握压力波传播演变规律, 通过油层模型试验和矿场试验, 证明压力波的不稳定传播过程, 同样可应用波动力学中某些机理和几何光学中主要定律, 这样就能有效地指导水文勘探矿场试验和合理地进行试井成果解释。

一、压力波干扰迭加原理

在油气田开采过程中, 很不容易从停产井中测出比较单一的压力随时间变化的水文勘探曲线。常常由于任何一口生产井的一次排量改变所发送的冲击波, 经过一段短时间, 便会因此井或邻井又改变了排量而造成新的冲击波迭合到测压面上, 造成压力干扰, 使水文勘探曲线原来的变化趋势改变, 出现转折点。室内实验、理论研究和矿场经验都证明, 压力波在空间上和时间上出现的干扰规律, 与物理学中其他已知的弹性波完全一样。当把两个或两个以上压力波的等时线互相迭合以求得总等时线或压力场时, 可将压力波所有各等时线或压力场的纵坐标相加起来并取其代数和, 便能得出复合等时线或测压面瞬时位置的纵坐标。

进行水文勘探时, 在油层中任一点上, 同时自几口激动井发送压力波得出的压力随时间变化曲线是相类似的, 每一条曲线本身的绘出, 与有无其他井得出的各条曲线毫无关系。把各曲线相同时间的压力纵坐标值相加得出代数和, 正值迭加, 负值消减, 便可得出水文勘探综合曲线的压力纵坐标, 这些复合纵坐标的变化, 即表示在油层中某一点上各单波互相迭合结果的动态。这就是说压力波干扰规律符合于迭加原理。当同一口井有不同的排量改变时, 引起压力随时间变化曲线之间的区别, 只在于相应的压力纵坐标值及正负号的不同而已。如果激动井排量增加二倍, 则在观察井中测出的水文勘探曲线压力纵坐标值也相应增加二倍, 余可类推。

二、压力波界面反应原理

在均质无限大地层中, 由激动井排量变化引起的压力波传播是以直射波或原波形式向远处运动的。当直射波前线遇到某一种水文边界时, 则压力波按照边界地质特征和物理性质而发生反射、吸蚀或曲折, 这些反射、吸蚀和曲折的规律都符合几何光学有关定律。当压力波前线到达不渗透边界上相应的某点后即向相反方向返回而成为反射波, 并且遵守光线反射角等于入射角的定律。随着反射前线后面的反射波, 与原波相干扰, 其干扰情况与各原波的干扰情况完全一样。当反射波到达用以观察原波的观察井后使水文勘探曲线变形。正如原波之间的一般干扰一样, 正号反射波的到达, 使水文勘探曲线的压力纵坐标和陡度增大, 将原波