

水驱油藏大孔道 综合识别

张奇斌 李进旺 王晓冬 刘继生 张同义 编著

SHUIQU YOUKANG
DAKONGDAO ZONGHE
SHIBIE

石油工业出版社

水驱油藏大孔道综合识别

张奇斌 李进旺 王晓冬 刘继生 张同义 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细研究了基于试井理论、注入剖面测井方法、井间监测技术的识别评价大孔道的综合分析方法,矿场试验证明该技术识别大孔道准确、快速、经济、可操作性强,可满足油田开发中后期大孔道识别和评价的需要,对搞好油藏的进一步开发挖潜,具有十分重要的指导意义。

该书可供石油科技人员、工程技术人员和有关院校师生参考和借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

水驱油藏大孔道综合识别/张奇斌,李进旺,王晓冬等编著.

北京:石油工业出版社,2009.2

ISBN 978-7-5021-6991-6

I. 水…

II. 张…

III. 油田注水-研究

IV. TE357.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 008921 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.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京时代澄宇科技有限公司

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 354千字 印数: 1—1000册

定价: 55.00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

前 言

在水驱油藏中，大孔道是注入流体渗流的优势通道，能够导致注入水低效、无效循环，严重影响水驱油藏开发效果。目前大孔道的识别方法主要有地质分析、测井、试井和井间监测等，这些方法分别从不同的侧面描述大孔道特征，单一使用必然像盲人摸象一样，所获结论存在一定的局限性。因此，有必要开展各种方法优势互补的综合识别方法研究，力图准确识别大孔道，为调剖等油田开发方案制定提供依据。这样的研究结果对高含水油田持续高效开发有着重要的意义。

本书开展的大孔道综合识别方法是基于多种测试资料的，研究对象从注入井扩展到井间再到产出井。具体研究思路是：从判断区块中存在大孔道的单井段开始，逐渐识别层段、小层，进行纵向上厚层细分、平面上注水优势渗流方向描述，最后进行产出剖面验证，达到对大孔道综合识别和全面描述的目的。

利用多种测试资料建立综合识别大孔道的方法主要涉及四个方面：（1）对于注入井，通过研究大孔道中注水井压力降落试井资料的表现特征，建立合适的数学模型和分析方法，形成了注入井中配注层段的大孔道识别方法；（2）在注入井中，通过研究大孔道中注水井注入剖面分布特征，形成了多参数优势互补的五参数综合解释方法；通过研究时间推移测井、不同替注量和不同粒径同位素载体测井资料反应特征，改进了分析对比分析方法；通过研究电磁流量测井、中子氧活化测井资料，建立了厚油层内部大孔道描述的工艺技术和资料解释方法，提高了大孔道识别纵向分辨能力和准确性；（3）对于井间，试验研究了井地电位法、井地声波法、井间示踪以及井间脉冲四项监测技术用于描述大孔道流体渗流特征的可能性，结果优选了用于井间监测的井地电位法为测试识别大孔道的配套技术；（4）对于产出井，为保证各种研究结果的矿场实施，研制了高分辨率产出剖面测井含水率计，并提出高产水层测井识别方法及合层测量分层优化解释方法，形成了高含水井中特高产水层识别技术，由此解决了大孔道层在产出井中的识别和验证问题。

将本书的研究结果用于矿场试验，在大孔道识别试验区（喇9-203井区）进行了17口、71井次现场试验，明确了37个大孔道，在不考虑厚油层细分情况下，识别结果与地质分析完全符合的层位为25个，占67.67%，在试验区后续的大孔道调剖治理方案设计中，地质人员认可并采纳了测试综合识别结果。

论文的创新性工作主要表现在以下五个方面：

（1）研究了基于双重孔隙介质渗流模型的大孔道试井解释方法，大孔道与其他储层相比，孔隙度、渗透率均较大，形成了类似于裂缝与基岩组成的双孔介质，通过理论计算给出大孔道试井理论图版，利用该方法可初步判断注水井、配注层段是否存在大孔道。

（2）提出了注入剖面五参数测井识别大孔道的资料综合解释方法和突出大孔道特征的

测井工艺，利用涡轮流量与同位素流量之间的差别、时间推移、不同替注量、不同粒径同位素载体测井反应的大孔道信息，真实客观地反映井下各层吸液情况，准确识别大孔道。

(3) 研发了高含水产出剖面测井技术，优化了阻抗式含水率计结构和电路，设计了高含水井中识别特高产水层测井施工工艺，提出产出剖面测井资料优化解释方法，满足了产出井中大孔道层识别和验证的需要。

(4) 首次提出了利用试井、测井及井间监测资料综合识别大孔道的方法，定义了“广义吸液强度”、“吸液差别倍数”等参数，进一步给出了大孔道的测试定义，实现了识别技术的定量化。

(5) 研究形成了集试井测井识别、纵向上平面上细化及产出井验证于一体的大孔道综合识别配套技术。矿场试验证明该技术识别大孔道准确、快速、经济、可操作性强。

本书研究最终形成的大孔道综合识别方法和配套技术，具有准确、快速、经济，可操作性强等特点，又集试井测井识别、纵向上平面上细化及产出井验证于一体，可满足油田开发中后期大孔道层识别和检验的需要。

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 大孔道形成机理及识别技术研究现状	(2)
第二节 如何解决大孔道识别与评价	(13)
第二章 注入井压降试井识别方法	(15)
第一节 注入井试井资料特征分析	(15)
第二节 试井分析方法	(21)
第三节 PI 决策识别大孔道方法	(61)
第四节 结论	(66)
第三章 注入井段生产测井识别方法	(67)
第一节 注入剖面五参数测井识别方法	(67)
第二节 厚油层内部注入强度细化分析方法	(75)
第三节 注入剖面其他测井识别方法	(78)
第四节 结论	(82)
第四章 注采井井间监测识别方法	(84)
第一节 井—地电位方法	(84)
第二节 井间微地震方法	(90)
第三节 井间示踪方法	(93)
第四节 井间脉冲试井方法	(100)
第五节 结论	(130)
第五章 产出井生产测井识别方法	(131)
第一节 测井仪器及测井工艺	(131)
第二节 测井解释优化方法	(136)
第三节 矿场试验与优化分析	(141)
第四节 结论	(145)
第六章 综合识别方法及其标准化	(147)
第一节 测试定义及综合识别标准的建立	(147)
第二节 综合识别方法试验方案	(150)
第三节 综合识别方法试验实例	(154)
第四节 结论	(189)

第七章 总结 (190)

 第一节 主要成果 (190)

 第二节 论文的创新性 (192)

符号说明 (193)

参考文献 (196)

附图 (202)

第一章 概述

储层的孔隙性及渗透性是储层的重要物性，大孔道是储层的一种特殊孔隙。对于河流相砂岩储层来说，后天形成的大孔道可能导致油田开发中后期严重的低效无效水循环、整体开发效果变差。探讨大孔道的分布及其在注采过程中的表现特征，对高含水油田的可持续发展具有重要意义。

本章从大孔道的概念、形成机理及室内实验、识别与验证方法及矿场实施技术三个方面总结了大孔道识别的意义及技术现状。在此基础上，阐明了利用测井、试井及井间监测等资料综合识别大孔道的方法。

大庆油区等多数国内油区经过多年的注水开发，现已进入高含水、特高含水期开发阶段，大孔道引起的低效无效水循环日益加剧^[1-2]，严重制约了油田的持续发展。

大庆油区的主力——喇萨杏油田剩余可采储量主要集中在葡萄花等主力厚油层（表 1-1），基础井和一次井网剩余可采储量比例占喇萨杏油田水驱剩余可采储量的 80% 左右，而这部分油层已进入特高含水开采阶段。

表 1-1 大庆油田提交探明储量变化情况

年份 (年)	总储量 (10 ⁴ t)	葡萄花油层		扶杨油层（含黑帝庙）		海拉尔油田		萨零组	
		储量 (10 ⁴ t)	比例 (%)	储量 (10 ⁴ t)	比例 (%)	储量 (10 ⁴ t)	比例 (%)	储量 (10 ⁴ t)	比例 (%)
2000	6559	6559	100	—	—	—	—	—	—
2001	6609	4128	62.5	1145	17.3	1336	20.2	—	—
2002	5284	4611	87.3	—	—	673	12.7	—	—
2003	6726	2814	41.8	3912	58.2	—	—	—	—
2004	10409	5071	48.1	203	2	5135	49.3	—	—
2005	10212	3454	33.8	1410	13.8	3345	32.7	2003	19.6
2006	10621	5228	49.2	5393	50.8	—	—	—	—

剩余油研究结果表明，除由于层间矛盾使得部分油层动用情况较差外，虽然厚油层已水淹，但在以河道砂岩为主的厚油层（有效厚度大于 1.0m）内部仍有近 70% 的剩余地质储量，主要分布在厚油层的顶部或多段韵律的变差部位（图 1-1），这些剩余油的存在大部分是由于储层的非均质性造成的^[3]。这种层间及层内的非均质在注水开发过程中表现为波及效果差、低效无效循环严重，通过对喇嘛甸油田注水井历年注入剖面监测资料分析发现，厚层内吸水段厚度比例由 1990 年的 93.1% 减少到 2005 年的 87.8%，其中主要吸水段厚度比例从 1990 年的 51.7% 减少到 2005 年的 33.1%，但 33.1% 的有效厚度吸水量占了这部分层总注水量的 78.7%，说明目前厚油层内注水量主要沿大孔道突进^[4]。随着含水上升，水油比急剧增加，同时带来了如污水处理等一系列问题，油田开发投资、成本加大，经济效益、社会效益逐渐变差。

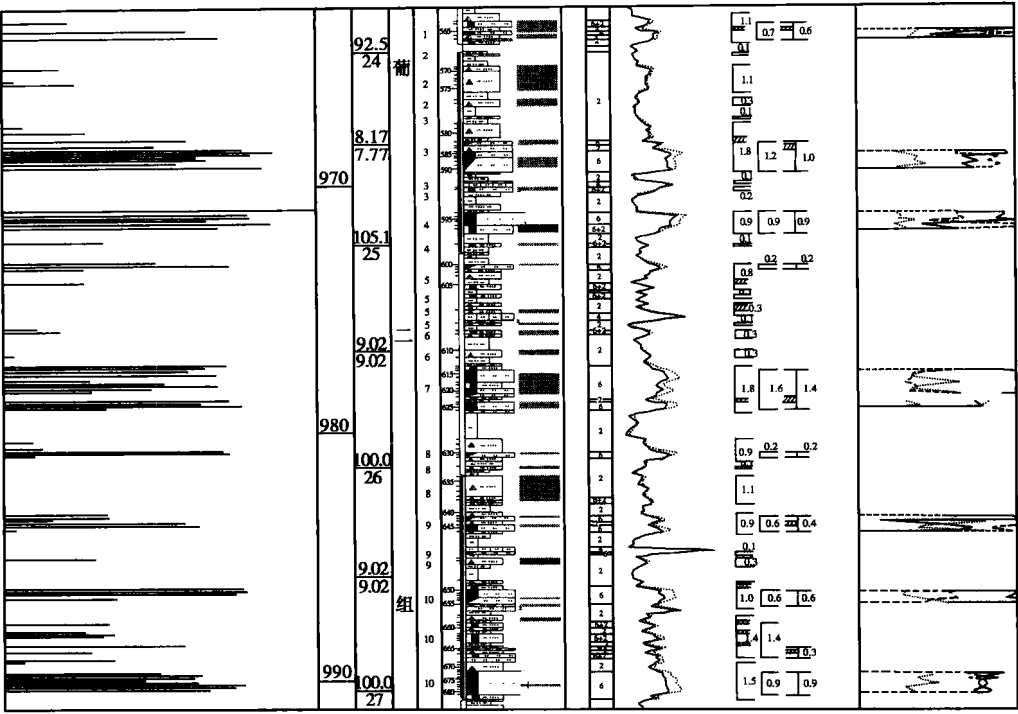


图 1-1 中 342-检 21 密闭取心水洗柱状图

关于造成低效无效水循环的大孔道治理问题，相关研究机构开展了油田地质等系列研究，工作主要集中在大孔道形成机理及室内实验、识别与验证方法及技术、调堵措施及效果评价技术，研究成果在油田开发中应用取得了一定的成效。上述研究工作中，大孔道识别是减小其对油田开发不利影响的关键，是调堵等改造技术应用的前提和基础^[5]。目前研究形成的识别方法一般仅局限于单项技术的独立使用，识别技术的系统性和可操作性以及定量化程度还不够，特别是多项技术优势互补性研究工作较少，还没有形成大孔道识别和检验的配套技术，急需开展深入的研究工作，以保证油田采收率的提高和可持续开发。

第一节 大孔道形成机理及识别技术研究现状

在材料学中，“大孔道结构”是一种广泛存在于各种不同类型晶体之中的特殊结构^[6-7]。在油田开发中类比和借用了材料学领域的“大孔道结构”概念。大孔道是一种特殊孔隙，是流体渗流的优势通道，是一个相对的概念，属层内非均质的范畴^[8-11]。在油田开发中，对大孔道的定义多为对地质、开发现象的描述，定义还不是非常明确，但这一概念已经在生产中约定俗成。

一、大孔道形成机理及实验研究进展

在油田开发中，后天形成的大孔道是由于河流相储层自身向上变细的旋回性和渗透率的差异性，加上油水的重力分异作用，造成油田开发中注入水优先沿着河道砂岩主体带底部向油井突进^[12-13]；在长期注水冲刷条件下，黏土矿物被冲走或冲散，岩石中胶结物减少，颗

粒表面油膜剥离,导致孔隙半径增加,流动通道迂曲度发生改变,渗透率提高,岩石吸附能力减弱和极性物质脱附,岩石表面向亲水方面转化,逐渐形成油水井间相互连通的高渗透强水洗通道^[14-16]。这种高渗透、特高渗透层条带在油田生产实践中称之为大孔道,开发中表现为低效无效水循环^[17-18]。大孔道不利于纵向上、平面上的水洗厚度的提高和水洗波及体积的扩大,水驱油效率降低,油井含水急剧上升,开发效果明显变差^[19-20],对油田可持续开发构成了极大的威胁。

针对大孔道形成机理问题,大庆油田、胜利油田等相关研究机构开展了油田地质等系列研究。

(1) 大庆喇萨杏油田因油层本身的非均质性,经过长期的注入水冲刷,油层的孔隙结构及孔隙内黏土矿物的存在形式发生了较大的变化,形成了优势通道,加剧了正韵律油层的层内矛盾,使底部强水洗段渗透阻力越来越小而成为注入水的畅流通道,即注入水顺着强水洗段被大量采出,水驱油效率降低,油井含水急剧上升,开发效果明显变差^[21-22]。通过对萨北开发区精细地质研究、井组注水开采动态的变化对比分析,根据水力探测试验结果,结合高渗透条带展布方向与油水井连线方向的关系、注采井点渗透率的差异及油层发育特点分析,大孔道的分布规律主要有以下几点:

①高渗透条带的方向与油水井连线的方向平行者易于形成大孔道,垂直者不易形成;

②油水井间高渗透带直接连通分布,易于形成大孔道,之间有低渗透遮挡或高低渗透带相间分布,不易形成大孔道;

③高注低采,不易形成“大孔道”;低注高采,易于形成大孔道。

大孔道的表现形式是线性的,某个油层出现大孔道,表示层内局部水洗严重,其他部位剩余油饱和度可能仍然很高,存在着剩余油富集区。加深层状砂岩油田地质认识、研究大孔道和剩余油分布以及探索治理挖潜的有效途径具有实用价值,对高含水后期控制注入水的低效和无效循环,降低开采成本,改善开发效果具有重要意义^[23]。

(2) 胜利孤岛油田为河流相正韵律沉积的砂岩油藏,渗透率高,泥质胶结疏松,易出砂,油层非均质性严重,油水黏度比大。经过长期强化注水开发,油藏储层孔隙结构变化大,形成次生“大孔道”,使大量的注入水沿大孔道做无效循环,降低了水驱波及体积。大孔道形成的原因主要包括以下五个方面:

①泥质胶结疏松砂岩油藏,长期注入水冲刷,造成大量出砂及微粒运移,使储层孔隙度、渗透率、泥质含量发生了很大变化,促使形成大孔道;

②正韵律沉积,非均质性严重,随着注水时间增加,注入水主要沿高渗透层突进,增加了层间、层内矛盾,加剧了大孔道的形成;

③河流相沉积,在水驱油过程中,注入水总是优先进入河道,并沿河道向下游方向突进,到特高含水期易形成大孔道;

④油水黏度比大,注水后水沿高渗透带“指进”严重;至特高含水期成为水的渗流通道,冲刷淘洗形成大孔道;

⑤采用强注强采开采方式,随注水倍数增加,也会加剧大孔道的形成^[24-25]。

(3) 综合各油田大孔道类型,可分为三种:一是层间矛盾形成的大孔道;二是层内部矛盾形成的高渗透条带;三是储层平面非均质性、注采不平衡形成的大孔道。根据试验井组动、静态资料分析,大孔道在油田开发中“低效无效水循环”主要表现特征为:注水压力低、油层启动压力低、吸水指数大;油层水驱速度快,存水率低;吸水剖面差异大,强吸水

层厚度与总油层厚度之比远远小于对应吸水量之比；注水井压力指数 PI 值小^[26-27]。

(4) 油层物理研究能够揭示大孔道形成的内在机制。储层岩石在受到注入水长期冲刷后，注水开发对砂岩储层的影响主要表现在非均质性，尤其是微观非均质性的变化上，毛细管压力曲线研究取得了一些较好的成果。根据注水开发前后从毛细管压力曲线所获得的储层岩石参数的变化，可分析砂岩储层注水前后孔隙结构的改变^[28-30]。另外，利用填砂玻璃板模型对疏松砂岩油层大孔道形成机理进行物理模拟。根据物理模拟普遍接受的长宽比例，物理模型尺寸为长宽比 2.5:1 的玻璃板填砂模型，按照孤东油田的渗透率和油砂粒度中值，确定实验使用油砂粒径为 100~120 目，气测渗透率为 1.21D，孔隙度为 30.8%。分别采用低黏度水和孤东稠油作为介质，在不同的渗流速度下进行模拟实验，研究沉积特征、油层物性（渗透率、胶结程度、原油黏度）、开发过程等因素对“大孔道”形成和发展的影响。研究表明，大孔道的形成主要有以下几个影响因素：

- ①油层渗透率（层间渗透率差异大易形成）；
- ② 岩石胶结程度（胶结不好易形成）；
- ③原油黏度（黏度小易形成“大孔道”）；
- ④开采速度（长期强注、强采易形成），出砂时的临界开发速度正比于砂岩渗透率、砂岩胶结程度，反比于流体黏度^[31-32]。

理论和实验研究明确了大孔道形成机理，地层本身的非均质是内因，注水开发是外因。

二、大孔道识别方法研究现状

大孔道描述的根本问题就是储层非均质性分析及表征。储层非均质性在油田内一般定义为宏观（层间、平面、层内）非均质性和微观（孔隙、颗粒、填充物）非均质性^[33]。

1. 基于地质特征的分析方法现状

油藏开发初期，根据油层物性、天然能量差异和相似性，以油层组为单元划分开发层系，此时油层组作为一个相对均质的流动单元，油田开发重点为减弱层系间的矛盾。随着油田开发的深入，开采对象的研究从油层组向油砂体内部转移，注入水优先流动部位和剩余油富集部位都是储层物性相对均质的流动单元，此时流动单元的规模进一步缩小，层内矛盾成为油田开发首要解决的问题^[34-36]。基于地质特征的研究方法就是在地层非均质性研究的基础上，利用统计的方法定性判断是否形成大孔道，并半定量计算、定量估计表征大孔道的地质参数和开发参数，研发的大孔道特征分析方法和软件在目标油田中应用见到了一定的效果^[44]。以下结合油田开发实例说明之。

大庆油田特别关注对厚油层的非均质性的地质分析。统计萨尔图、喇嘛甸油田 15 口井相渗实验资料，分油层组、渗透率区间统计的最大驱油效率表明，高渗透层最大驱油效率平均为 70.0%，中渗透层最大驱油效率平均为 65.0%，低渗透层最大驱油效率平均为 60.0%。另外，对近年来检查井强水洗段驱油效率状况统计表明，长期注水条件下，强水洗段的驱油效率多数集中在 60%~70% 之间，平均值接近 70%。综合以上大量的相渗分析资料及密闭取心检查井资料，确定喇嘛甸油田萨尔图油层主体河道砂岩大孔道的判别条件为：层段对比驱油效率最高、渗透率最大；驱油效率在 70.0% 以上；位于正韵律油层底部^[3]。

孤东油田七区西油藏埋藏浅，储层胶结疏松、渗透率高，粒度多为正韵律分布，在注水开发过程中出砂严重，特别是实施强注强采方案后出砂程度加剧。一些井间形成了特高渗透带（即大孔道）。采用实验模拟方法研究了大孔道形成的机理和影响因素（油层渗透率、岩石胶

结程度、流体黏度、开采速率), 出于降低成本考虑, 提出了利用生产数据诊断、描述大孔道的方法^[37-39]。用灰色理论计算各种因素间的相关关系, 以诊断大孔道的存在; 并利用简化的数学模型, 计算大孔道参数(方向、厚度、渗透率、孔喉尺寸等), 编制了相应的软件^[40]。注水开发的稠油疏松砂岩油藏, 在开发后期, 平面大孔道和层间窜槽是影响三次采油和改善水驱开发效果的关键。为了解决这一问题, 运用数学及油藏工程方法, 进行大孔道及层间窜槽机理、大孔道参数定量描述等研究, 并编制大孔道描述软件, 应用该软件对孤东油田 20 个开发单元 1650 口油水井进行了计算, 通过动态监测资料证实, 符合率达到 80% 以上^[32]。

储层原始沉积物性差异大是造成层间矛盾的前提, 后期注入水对高渗透率储层长期冲刷改造以及层间治理的工艺适应性差, 加大了这种层间差异, 导致层间矛盾越来越突出。在半定量研究分析黄骅拗陷枣园油田枣南孔一段油藏强水淹储层的孔喉结构变化的基础上, 提出了分析强水淹储层孔喉结构变化的简便方法, 把流体简化为单一水相, 并把单砂体简化为均质, 根据平面径向流公式, 利用达西定律, 半定量求出一定时间内储层的渗透率与孔隙度比值, 再据此求取孔喉半径^[41]。

卞东油田油层的非均质性主要体现为渗透率分布的不均匀。由于沉积物及地质作用的影响, 渗透率在纵向上的分布具有随机性的一面, 利用概率统计方法描述渗透率在纵向上的分布规律, 通过测井解释资料或常规监测资料建立渗透率分布函数, 用数值方法计算油水井含油层段的高渗通道地质参数, 包括渗透率及厚度和孔道半径, 定量估计了油层的非均质性^[42]。

有效识别大孔道和准确计算封堵技术参数是问题的关键, 考虑储层异常渗流通道特点, 将其分为无异常储层、高渗透带、裂缝、大裂缝、未完全发展大孔道和完全发展大孔道六种情况, 利用专家系统模糊判别理论建立了大孔道定性识别模型, 通过研究各种不同介质的流动规律和特点, 综合运用渗流力学和流体力学理论, 建立了从孔道线性渗流到粗糙管湍流的统一大孔道流态定量分析和参数计算方法, 可直接计算出大孔道纯体积和直径, 从而为油田确定大孔道选堵剂用量和封堵颗粒大小提供直接依据^[43]。

2. 生产测井分析方法及应用现状

利用生产测井技术识别大孔道的方法, 主要是考虑大孔道在注水井中主要表现为吸水能力较其他层强, 注入井按照注入工艺分为合层注入和分层配注两种方式(图 1-2), 而反映注水井分层吸水能力的注入剖面测井方法主要有流量计测井、井温测井和放射性同位素载体示踪测井等, 其测试资料能够直观地体现出大孔道的渗流特征。

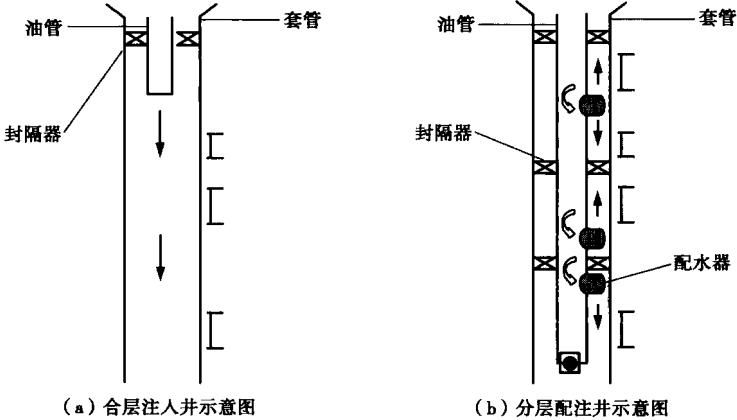


图 1-2 合层注入井和分层配注井注入工艺示意图

流量测试法通过在不同测试环境下选用合适的流量计（涡轮流量计、靶式流量计、电磁流量计、中子氧活化测井仪、示踪流量计等），测得注入井各层（段）流量，了解注入井的注入状况^[45-46]。涡轮流量计法在注入剖面测井中是比较常用的一种，它的测量范围可达 $500\text{m}^3/\text{d}$ 以上，在正常注水条件下，通过测量注入水在各注水层间井筒中的流动速度，进而求解各注水层段日注水量，此法最大的特点是不受地层物性的影响，能够直接求解各小层的注水量，适用于管柱下到注水层顶部以上的合注井和分层配注井。中子氧活化测井（能谱水流测井）是近年开发出来的新的测井方法，属于脉冲快中子次生伽马能谱测井。这种测井方法通过测量井筒中水的流动速度，对油管内外的分层注水量进行计算，可用于注聚合物液井、三元复合液井和配注井中流量的测量^[47]。由于该方法不使用任何放射性示踪剂，不存在沾污、沉降及污染等问题，测井结果不受岩性和孔渗参数以及射孔孔道的影响，只与套管和油管中流体的流速和流动截面积有关，与地层其他参数无关，仪器测量范围为 $10\sim 600\text{m}^3/\text{d}$ ，因此对识别和解释大孔道具有很好的优势^[48-49]。同位素载体示踪法是利用放射性核素人为地提高地层伽马射线强度，研究地层注入状况的一种测井方法。它采用放射性核素释放器携带放射性核素载体在预定的井深位置释放，活化悬浮液段塞按地层的吸水能力分配予各吸水层。由于放射性核素载体（微球）粒径大于地层的孔隙喉道，载体滤积在井壁地层表面，地层的吸水量与滤积的同位素载体量及载体的放射性强度成正比。测井时，若所选示踪载体的粒径小于高渗透层的孔隙喉道，示踪载体不能稳定地滤积，因此在释放同位素后，比较在不同时间追踪到的同位素幅度，可以用于识别大孔道^[50-53]。

胜利油田针对不同特点的地层进行了不同粒径放射性同位素测井试验，并将不同粒径放射性同位素试验结果进行对比发现，对同一地层，不同粒径放射性同位素测井结果相差较大。大量试验证明，孔隙度大于30%的高孔高渗油田（如孤岛、孤东等油田），用直径为 $100\sim 300\mu\text{m}$ 小颗粒载体时，同位素易被推入地层深处，同位素曲线显示幅度低，求出的吸水量不能反映地层的实际吸液状况；而用直径为 $600\sim 900\mu\text{m}$ 大颗粒同位素载体时，同位素滤积在岩层表面，求出的相对吸水量数值较准确，能代表地层吸水情况。在地层孔隙度为20%左右的油田使用直径为 $300\sim 600\mu\text{m}$ 中等颗粒同位素载体，在地层孔隙度小于15%的地层使用直径为 $100\sim 300\mu\text{m}$ 小颗粒同位素载体效果较好。运用吸水剖面测井资料及大孔道分析软件，识别吸水层内的大孔道井段，实现了大孔道定性、定量描述^[54-55]。

在克拉玛依油田老区，对部分孔喉半径大、受注入水冲刷程度严重的井，通过改用大粒径同位素载体测量吸水剖面，使吸水层位得到明确划分，大孔道层得到有效识别。当注水量达到 $60\text{m}^3/\text{d}$ 以上时，采用同位素载体粒径为 $1200\sim 1800\mu\text{m}$ 、 $2000\sim 2800\mu\text{m}$ 较为适合，对裂缝发育油藏，采用 $2000\sim 2800\mu\text{m}$ 或更大的同位素载体粒径较为适合^[56]。

中原油田储层为物源内陆相沉积，层间非均质性强，岩石粗细不均，孔喉半径相差悬殊，胶结程度各异，长期的高速开采和注水冲刷，致使不少区块及层系形成大孔道。根据注水剖面测井资料异常响应特征总结出了五种行之有效的识别大孔道方法：①利用时间推移测井方法识别大孔道；②利用同位素追踪法识别大孔道；③结合井温曲线识别大孔道；④结合流量计曲线识别大孔道；⑤结合注水量和注水压力识别大孔道。在现场测井实施过程中，主要使用了注水剖面五参数测井技术，较好地解决了由于长期注水等原因所造成的大孔道识别问题，为对油水井采取相应的措施提供了重要依据^[57]。

利用注入剖面测井是识别大孔道的有效方法，特别是“结合”的思路是必由之路，但其中也存在一些问题，如同位素载体不可能无限地放大，测井过程中还要兼顾非大孔道层等。

在产出井中，大孔道主要表现为高产液和高含水。目前主要利用产出剖面测井方法反映分层产液能力和含水率。

产出剖面测井技术作为分析产液层动用状况的必需手段，也随着油田开发的实际需要逐步的发展和完善^[58-59]。在国外，传统的产出剖面测量方式以连续全井眼测量为主，如 PLT 测井仪器测量磁性定位、流量、持水率、密度、井温、压力等参数，多应用于大流量和低含水率油井中^[60]；斯仑贝谢公司推出的流体剖面数字图像分析仪，测量电极由 8 个成阵列电导探针构成，主要应用于高产液井（通常含水率也较低）含水率的测量^[61]。在国内，产出剖面测井已发展到多种集流方式、多参数组合测井。在形成了一套性能稳定、量程宽的仪器系列的同时，通过采用新方法、新工艺，提高了仪器的灵敏度和测量精度。随着大孔道日益严重等原因油田含水率的逐年上升，国内产出剖面测井技术大多向着研发适应高含水条件、提高含水解释精度方向发展。

产出剖面测井仪器主要的含水率测量方法有电容法、电磁感应法、超声法、放射性法、阻抗（电导）法及同轴介电相位法，基于这些方法形成了取样式电容含水率计、平衡式持水率计、过流式电容含水率计、分离持水率计、超高频含水率计、放射性含水率计、阻抗式含水率计以及同轴介电相位含水率计^[62-66]。表 1-2 给出了常用的含水率计的性能对比结果。可以看出，同其他含水率计相比较，只有阻抗式含水率计适合用于高含水井的测量，可用于大孔道识别和验证。但是，由于在高含水油井中各产层间含水率差异越来越小，所以要从众多产层中确定出最高含水率的产层，阻抗式仪器的含水率测量分辨率还有待于进一步提高。此外，产出剖面测井在分层解释方面，一直沿用传统的递减法解释。但是由于流量测量精度、含水率测量精度以及井口计量等原因限制，采用递减法进行产出剖面测井分层产液、分层含水率计算时，会造成分层解释结果误差的放大。

表 1-2 常用的含水率测量技术优、缺点对比表

含水率计名称	优点	缺点
取样式电容含水率计	(1) 含水率测量范围宽，仪器响应与含水率呈良好线性关系； (2) 测量不受水矿化度的影响	(1) 不能实现连续测量，测量结果受含水率波动影响； (2) 电极易受沾污影响； (3) 在含水率 95% 以上时测量分辨率降低
平衡式持水率计	(1) 含水率测量范围宽，仪器响应与持水率呈良好线性关系； (2) 测量不受水矿化度的影响； (3) 既可点测也可连续测量	(1) 限于流量超过 100m ³ /d 以上的高产井的含水率测量； (2) 仪器的上下连通孔极易被环套空间的死油堵塞； (3) 电极易受沾污影响
过流式电容含水率计 (分离式持水率计)	(1) 含水率测量范围宽； (2) 可克服产液波动的影响； (3) 可实现过流测量含水率	限于低含水、产液低于 20m ³ /d 以下的低产井的含水率的测量
超高频含水率计	(1) 含水率测量范围宽； (2) 可克服产液波动的影响； (3) 可实现过流测量含水率	(1) 测量易受矿化度和温度的影响； (2) 测量精度低（约为 ±10%）
阻抗式含水率计	(1) 可实现过流测量； (2) 能够体现含水率波动变化； (3) 含水率越高仪器测量分辨率越高	必须在水为连续相条件下测量，含水率测量范围通常限于 50% ~ 100% 范围内

3. 不稳定试井分析方法及应用现状

随着油田开发的不断深入,部分油田大孔道逐渐形成,调剖堵水工作发展到以注水井调剖为中心的区块综合治理阶段,即从区块整体出发,以注水井调剖为中心,全面发挥各种综合治理措施的作用,以达到改善区块开发效果的目的。目前提出了两种区块整体调剖的决策技术。一种是在油藏精细描述的基础上用最优化方法进行决策;另一种是由注水井压力降落曲线计算所得的注水井压力指数并结合其他测试数据进行决策,即 PI 决策技术。

压力指数 PI 值与地层渗透率和流动系数反相关,对于注水开发油藏,其注水井 PI 值是对压力降落速度和变化幅度的量化,地层渗流特性越好,吸水能力就越强,解释数据中流动系数就越大,若地层中有大孔道或高渗透层存在,则 PI 值就很小,反之 PI 值就大^[67]。对于大孔道识别、治理,在区块及措施井的选择上,除了利用地质上的动静态资料外,所用的动态监测技术主要是注水井压力降落测试技术,即利用 PI 决策技术选区块、选措施井,而识别区块内大孔道走向主要利用多井脉冲试井和井间监测技术。

临盘采油厂利用水井压力降落技术(PI 决策技术)在小断块油田中开展了选择“堵驱结合”措施方式,在井口测注水井压力降落曲线,计算出井口的压力指数 $PI(90)$ 值,根据 PI 值的大小来判断堵驱结合的方式, PI 值小的井采用“先堵后驱”的方法, PI 值中等的井采用“先驱后堵”的方法, PI 值大的井采用“驱油”的方法。为使各注水井 PI 值具有可对比性,把区块注水井平均日注量归整,对 PI 值进行修正。应用上述方法,在临盘采油厂 3 个区块开展了“堵驱结合”措施,调剖后初期日产油上升,综合含水下降,达到了预期效果^[68]。

胜利油田利用 PI 值判断区块调剖的必要性,为使注水井 PI 值能与区块其他注水井相比较,将 PI 值校正到同一注入量下,并且就近归整。按 PI 修正值的大小顺序排列胜利油田二区 74-81 单元注水井,区块中注水井 PI 值的极差较大,说明非均质较严重,需整体调剖;利用 PI 值确定区块需调剖的注水井, PI 值低的井需调剖,中等不予处理或近井增注,远井调剖处理, PI 值高则需进行增注;选择适当的调剖剂,每种调剖剂都有它使用的 PI 值范围,这个范围可由统计得到,用于指导调剖剂的选择;确定堵剂用量。利用 PI 决策技术对该单元进行治理,有效地改变了该单元的整体开发状况^[69]。孤岛采油厂利用 PI 决策技术对孤岛油田调剖井进行了效果评价,从总体评价效果看,不同的地质条件和工艺条件调剖效果不一样:注水井井口压力指数越低的井调剖效果越好;调剖前注水压力低的井调剖效果好;调剖前注水量越大的井调剖效果越好;堵剂用量越大调剖效果越好^[27,70]。孤东油田将 PI 决策技术运用到区块的整体堵水调剖决策中,为使注水井 PI 值能与区块中其他的注水井相比较,将 PI 值修正到同一吸水强度的条件下,计算出所有有待筛选的注水井的 PI 值后,利用半梯形分布模型,求得每口注水井的压降曲线决策因子,以此为依据选择调剖井,调剖后注水井压力指数大幅上升,说明了这些区块的高渗透带或大孔道得到了有效的封堵,对应油井降水增油效果明显^[71]。

中原油田大孔道普遍存在,开发效果变差,通过分析中原油田地质特点,开展封堵大孔道技术研究,形成了配套的试井 PI 决策技术、示踪剂油藏监测技术、多段塞封堵技术、分层封堵及施工工艺技术。自 1995 年以来,利用 PI 决策技术先后在多个区块进行了整体调剖堵水,如广利油田莱 38 块,利用 $PI(90)$ 决策技术进行区块调剖,取得了令人满意的效果^[72-75]。

华北油田内蒙古林砂岩油藏油层薄,主力层单一,油层平面矛盾突出,利用修正 PI 值,判断区块调剖的必要性,选择需要调剖的井,选择适当的调剖剂类型,确定单井调剖剂的用量,评价调剖效果,确定调剖重复施工时间,利用 PI 决策技术实施整体调剖起到明显的增

油降水效果^[76]。

新疆火烧山油田发育有显裂缝、隐裂缝、微裂缝三种类型，储层非均质性极强。利用 PI 决策技术对 H3 层进行整体决策、优化设计、优化调堵剂类型，确定堵剂用量及重复治理时间等。整体治理后井口注入压力普遍升高，表明封堵住了原来的主要水流通通道，降低了高渗透层的渗透率，低渗层得到启动，水驱效率提高^[77]。

利用合层压力降落特征分析可能存在大孔道的井，利用分层压力降落确定存在大孔道的层段，再结合其他的信息识别大孔道，这种方法已被各油田采用，应用中见到的一定的效果。在压力试井资料中，还包含着更多的大孔道信息，有待于深入挖掘，可使利用试井资料识别大孔道更为准确和进一步量化。

4. 井间监测分析方法及应用现状

井间监测技术近些年来得到快速发展，采用定性或定量的方式描述注采井间地层中流体的流动特性，进而给出地层的非均质性等评价，已被应用于大孔道描述。目前投入现场应用的井间监测技术主要有三种方法，即井间示踪监测、井地电位监测和井间微地震监测。

井间示踪监测是从注入井注入示踪剂段塞，然后在周围生产井监测其产出情况，并绘出示踪剂产出曲线，不同的地层参数分布和不同的工作制度导致示踪剂产出曲线的形状、浓度高低、到达时间等不一样，示踪剂产出曲线包含了油藏和油井的信息，通过分析来判断地层参数的分布以及数值大小^[78-80]。井间示踪监测技术是对油藏进行精细描述的一个重要手段，可定性地判断地层中高渗透条带、大孔道、天然裂缝、人工裂缝等的存在与否，通过数值模拟可定量分析地层渗透率、平均含油饱和度、裂缝渗透率等参数^[81]。按照示踪剂种类发展过程划分，第一代是 20 世纪 50 年代发展起来的化学示踪剂技术^[82]，第二代是 80 年代发展起来的放射性同位素示踪技术^[83-84]，第三代是 90 年代发展起来的非放射性稳定同位素示踪剂技术^[85-86]，第四代是 21 世纪发展起来的微量元素示踪剂技术。这些最新研究成果，把井间示踪技术推向更加实用和指导油田开发的新阶段。

化学示踪剂主要包括无机盐、染料、卤代烃、醇类四种类型^[87]。示踪剂使用之前要进行严格的室内筛选实验，取样 3~7 天测定示踪剂在实验区块的背景浓度，另外还要做示踪剂/地层水配伍性实验、示踪剂吸附实验、示踪剂热稳定性实验、岩心物理模拟实验等；在适应条件方面，化学示踪剂应用有一定地层条件要求，如果区块岩石表面电性特殊易引起吸附、地层背景浓度较高、低渗油田等都不能用化学示踪剂；化学示踪剂用量大，成本高，有时存在环境污染问题。

放射性同位素示踪剂主要是放出 β 射线的含氟化合物及释放 γ 射线的 Sc-46、I-131 等。同位素示踪剂用量少，易检出，投放时由于有环保问题，需持证专业人员操作，用专门的投放装置在井口或井底投入^[88-89]。取样周期在 3 个月到半年左右。放射性同位素示踪监测缺点是放射性同位素示踪剂需由专门部门投放和检测，并受到有关法律的限制，无法普及使用。

稳定同位素示踪剂基本原理是：在注水井中投加稳定同位素示踪剂，在生产观察井取样，并利用原子反应堆激活稳定同位素，再用 γ 能谱仪分析样品，以获取样品中同位素示踪剂的含量。稳定同位素示踪剂无高温转化，既可用于常温井的动态监测，也可用于稠油油藏蒸汽吞吐、气驱开采等高温井的监测；无放射性危害引起的安全环保问题；现场操作简便，由专业人员和现场管理人员在井口直接操作；用量少，通常只用几克，无作业费，而且地层吸附损失小，对其他工艺技术的开展无任何副作用；可同时投入和测试多种示踪物质；

测量精度高，达到 10^{-9} (ppb 级)^[90]。该方法的缺点是测试工艺复杂、费用高。

微量物质示踪剂通过油田水本底监测，经筛选合成地层中没有或含量极少的微量物质，目前已能合成十几种示踪剂^[91]。与前三代示踪剂相比，微量物质示踪剂具有以下特点：①无放射性，不污染环境，安全稳定性好，用量少，加入时间短，直接从井口加入，不用起下管柱作业；②分析精度高，与以往使用的示踪分析相比，一般化学分析只能达到 10^{-6} (ppm 级)，而微量物质分析可达 10^{-12} (ppm 级)；③微量物质示踪剂可选种类多，可分层、分阶段加入，因此可以解决诸如：确定油水井的连通情况、层间差异、确定油层平面纵向上的非均质性，结合其他手段综合确定流场的分布以及剩余油动用及分布等；④较好地跟踪地下流体的运动状况，既可用于常规水驱，也可用于聚驱、汽驱、蒸汽吞吐开采以及部分非混相驱的生产动态监测。

可以看出，非放射性同位素示踪剂由于其检测方法太复杂，不适宜在油田大量应用，而化学示踪剂、放射性同位素示踪剂和微量元素示踪剂各有其特点和优缺点，而且施工成本相差不大，应该根据具体试验区地质条件要求和监测目的来选择最适合的示踪剂。表 1-3 给出了三种示踪剂适用条件和优缺点对比。

表 1-3 三种示踪剂适用条件和优缺点对比表

示踪剂名称	优 点	缺 点	适用条件
化学示踪剂	示踪剂容易获得；应用范围较广；无放射性污染，无毒无害；检测容易	用量大；施工复杂，需要施工队伍；测试精度低；生物稳定性差；对原油后加工有影响	区块岩石表面电性特殊易引起吸附、地层背景浓度较高、低渗油田等都不能用
放射性同位素示踪剂	用量少，施工简单；易检出，精度较高；用自动监测仪取代人工取样分析，获得的数据资料连续性好，准确度高，减少了监测费用	有放射性污染，有安全环保问题；需由专门部门投放和检测，并受到有关法律的限制	除特低渗透油田之外的地层条件都能用；施工现场无放射性环保要求
微量元素示踪剂	无高温转化；用量少，通常只有几千克至几十千克；现场操作简便，由专业人员和现场管理人员在井口直接用专用工具进行加入操作；无放射性危害引起的安全和环境问题；同井可分层同时投入和测试多种示踪物质；测试简单、费用较低、测试精度高	检测需用特殊检测仪器，一次性投入成本较高	适合于砂岩油藏，水驱、聚合物驱、蒸汽驱、火驱等；对于作为示踪剂的元素其本底值应小于 10^{-10} mg/L；地层孔隙度大于 10%，渗透率大于 8mD，油井含水率高于 20%

井间示踪技术已在长庆油田、辽河油田、吉林油田、华北油田、胜利油田、新疆油田、中原油田等得到成功的应用，并已逐渐成为描述有关井间油层非均质性和流动特性的重要手段。其中应用最多的有大港油田、胜利油田，主要确定井组连通性、油水井间高渗层、断层性质、测定剩余油饱和度等；吉林油田主要监测低渗油田裂缝发育及剩余油分布；辽河油田确定稠油油田水驱监测、汽窜监测、非混相驱监测等，这些油田每年都要完成几十至上百个井组的监测任务；另外，江苏、中原、河南、新疆等油田一年也有十几个井组的监测任务；聚合物驱井间示踪监测方面做得最多的是大庆油田。药剂主要选取化学示踪剂、放射性同位素示踪剂和微量元素示踪剂，解释手段主要包括解析法、数值模拟法和半解析方法。

油水井注入的示踪剂到达油井的时间称为示踪剂突破时间，这一指标代表了注入水的水