

中途测试风险评估

付道明 编著

HONGTU CESHI
ENGXIAN PINGGU

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

中途测试风险评估

付道明 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是针对油气井中途测试风险评价需要而编写的,系统介绍了中途测试技术和风险评价方法。主要章节包括中途测试基础知识、中途测试工艺技术、试井理论与资料解释、风险评价方法、中途测试风险评价与中途测试风险评价实例分析等。

本书取材广泛、内容全面、针对性强,是一本供广大中途测试技术人员、试井资料分析人员、风险分析人员和钻杆测试风险管理人员使用的工具书,同时也可作为石油工程中途测试研究机构、石油院校相关专业师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

中途测试风险评估 / 付道明编著. —北京: 中国石化出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5114-3731-0

I. ①中… II. ①付… III. ①钻柱地层测试-风险评价
IV. ①TE27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 275045 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010) 84271850

读者服务部电话:(010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 362 千字

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

定价:58.00 元

序

根据国家“一带一路”的能源战略部署，油气勘探开发工程领域加大了“油气先行”新举措的实施力度。面对低油价的新常态以及复杂的国际地区形势，如何能够在复杂地质油气勘探开发过程中及时发现油气层和快速评价油气产能对提高勘探开发效率，节约测试作业成本，降低现场施工风险，提高资料评价水平，缩短建井周期等具有至关重要的作用。中途测试技术 Drill Stem Testing (DST)就是在钻井过程中发现良好的油气显示时，用钻杆测试方法来快速证实其工业价值，及时准确评价地层油气产能的关键技术。

随着油气勘探程度的不断深入和海外油气勘探开发工作的持续推进，发现和评价新油气层难度越来越大，钻完井和地层测试遇到的新油气层越来越复杂，多类型储层、多压力系统和多类型油气流体等地层特征表现突出。中途测试一次成功率低，测试管柱断、卡、漏事故时有发生，及早做好中途测试风险分析和预测，及时优化测试工艺和优选测试工具对提高地层测试成功率具有重要的指导意义。

作者以国家重大科研专题“中东复杂地层完井关键技术研究”项目研究为契机，在对中途测试技术分析及其安全风险评价基础上，结合中东地区中途测试工艺和地层压力高、井壁稳定性差和流体腐蚀性强特点，形成了中途测试风险评价方法和技术。该书内容系统、翔实、实用，既可供需要学习和了解中途测试及风险评价技术的工程技术人员学习之用，也可作为科研院所技术人员和大专院校相关专业师生参考用书。

宗皓

前 言

本着“系统、翔实、准确、实用”的原则，本书参考了《地层测试技术》、《安全评价方法》以及《完井工程技术手册》等图书和资料，并结合中国石化石油工程技术研究院和中国石化国际石油勘探开发有限公司的相关科研成果，整理编写而成。

该书由付道明主编，张同义、张宁主审。主编主要负责全书的内容和结构等详细设计，并负责全书的编写工作。编写小组成员有付道明、张宁、张同义、刘欢乐、梁永图、贾先起、姜夏雪等。其中第一章和第二章由付道明、刘欢乐编写；第三章由付道明、张同义编写；第四章和第五章由付道明、贾先起编写；第六章由梁永图、付道明、刘欢乐、姜夏雪编写。

本书在编写过程中得到了中国石化石油工程技术研究院路保平院长的耐心指导和大力支持，同时也得到了石油界众多老前辈、专家、学者的热忱帮助。值此图书出版之际，向所有为《中途测试风险评估》的编写和出版付出辛勤劳动和智慧的人员以及所引资料的作者表示衷心感谢！

本书涉及的内容多，专业领域广，加上作者水平有限，错误之处在所难免，恳请广大学者及工程技术人员批评指正。

目 录

第一章 中途测试基础知识	(1)
第一节 油气藏工程基础知识	(3)
一、油气藏类型	(3)
二、油气藏流体性质	(5)
三、油气层特征	(8)
第二节 矿物岩石分析评价	(13)
一、井筒矿物岩石分析	(13)
二、岩心分析内容及应用	(14)
第三节 储层敏感性评价方法	(20)
一、储层对流体的敏感性评价	(20)
二、储层应力敏感性分析	(33)
第四节 地应力及井壁稳定性理论	(43)
一、地应力基本原理	(43)
二、井壁岩石的应力状态	(48)
三、地应力与中途地层测试关系	(52)
第二章 中途测试工艺技术	(53)
第一节 地层测试技术基础	(53)
一、基本原理	(53)
二、地层测试类型	(53)
三、复合管柱测试工艺	(58)
第二节 地层测试设计	(59)
一、测试工具选择	(59)
二、测试坐封位置选择	(60)
三、测试压差选择	(60)
四、测试工作制度确定	(61)
五、测试开关井时间确定	(62)
第三节 常用测试工具及工艺	(64)
一、MFE 测试工艺及工具	(64)
二、APR 测试工艺及工具	(74)
三、全通径 PCT 测试工艺	(94)
四、膨胀式测试工艺及工具	(96)
五、地面测试工艺技术	(122)
第三章 试井理论与资料解释	(135)
第一节 测试分类与设计	(135)

一、地层测试设计	(135)
二、试井分类	(138)
第二节 测试资料解释基础	(149)
一、地层流体流态特征	(149)
二、试井模型及曲线特征	(153)
第三节 地层测试资料解释	(161)
一、常规试井分析方法	(162)
二、段塞流试井分析方法	(165)
三、图版拟合方法	(168)
四、试井软件解释程序	(168)
第四章 风险评价方法	(172)
第一节 风险评价基础知识	(172)
一、风险评价的基本概念	(172)
二、风险评价发展历程	(173)
三、风险评价的目的和意义	(174)
四、风险评价的分类	(176)
五、风险评价的程序	(184)
第二节 安全检查分析法	(185)
一、安全检查法	(185)
二、安全检查表分析法	(186)
第三节 故障树分析法	(187)
一、故障树分析的目的和特点	(188)
二、故障树分析步骤	(188)
三、故障树分析数学基础	(190)
四、故障树的编制	(191)
五、故障树分析方法应用	(195)
第四节 LEC 作业风险评价法	(197)
一、方法介绍	(197)
二、方法特点及适用范围	(199)
第五节 层次分析法	(199)
一、方法介绍	(199)
二、方法特点及适用范围	(201)
第五章 中途测试风险评价	(202)
第一节 风险源的辨识方法	(202)
一、风险源的定义	(202)
二、风险源的产生	(202)
三、风险源的分类	(204)
四、风险源的辨识	(205)

第二节 风险源评价单元划分	(214)
一、评价单元定义	(214)
二、评价单元划分原则	(214)
三、中途测试风险单元	(215)
第三节 中途测试主要风险源辨识	(217)
一、中途测试地面风险源	(217)
二、MFE 提放式测试风险源	(219)
三、APR 压控测试风险识别	(220)
第六章 中途测试风险评价实例	(222)
第一节 中途测试风险评价软件	(222)
第二节 测试参数输入	(223)
一、地层参数	(223)
二、管材参数	(224)
三、组分参数	(224)
四、测试参数	(224)
第三节 风险评估结果分析	(225)
一、地层出砂	(225)
二、井壁失稳	(226)
三、套管磨损	(226)
四、管柱破坏	(227)
五、水合物	(227)
六、反凝析	(228)
七、酸性腐蚀	(228)
参考文献	(229)

第一章 中途测试基础知识

在油气田勘探和开发评价钻井过程中,为了及时掌握新发现油气层段或已发现的油气层的油气产能、流体性质和储层特征,用钻具将地层测试器下到预定位置进行地层测试的方法叫做中途测试,又叫钻杆测试,中途测试在国外称作 DST,即 Drill Stem Testing。中途测试的工作原理是利用封隔器将被测试层段隔开,使其不受封隔器以上井筒液柱压力的影响,使测试地层与井筒底部形成一定生产压差,使地层中流体流入井筒,再通过测试管柱流出地面,以达到试油目的。其特点是在钻井过程中或在完井投产前进行的地层测试,测试目的层段一般为裸眼井段。

中途测试其实是地层测试的一种,主要是在钻井过程中发现油气显示以后的一种临时完井测试方法。在钻井过程中如果发现良好油气显示后需要及时确定地层含油气情况,可以停止钻进,对可能的油气层进行测试求产。中途测试减少了储层受污染的时间和多种后续井下工程对储层的影响,可以有效保护储层,是提高低压低渗和易污染油气层勘探成功率的有效手段之一。中途测试往往也使油气层提前被发现,争取了时间,便于及时安排油气田下步开发评价工作。

中途测试采用钻杆或油管将地层测试器送入井筒的方法测试。这类地层测试器一般包括控制井下流动开关阀、封隔测试层的封隔器、便于压井的循环阀等井下工具及井下压力计。相比电缆送入的地层测试器,该套工具价格高,但可以不动管柱产生测试压差,较快地探测储集层边界,并能直接测量流体产能数据。

目前,中途测试采用的地层测试器类型有 MFE 测试器、HST 测试器、APR 测试器、膨胀式测试工具、PCT 测试器及智能远程脉冲控制双阀 IRDV 测试器等。该测试工艺可实现常规单封隔器坐封测试或双封隔器跨隔分层测试,负压开井诱喷测试,可获得多次开井生产流动测试资料和井下关井压力恢复曲线,也可实现井下流体的高压物性取样。中途测试操作时,用钻杆或油管将测试工具(包括压力温度记录仪、封隔器、测试阀等)下入井筒后,通过地面操作和控制使井下封隔器胶筒膨胀坐封于测试层上部裸眼段或套管内,将测试层与封隔器之上钻井液或完井液隔离开来,然后通过地面控制将井下测试阀打开,测试地层流体流入测试管柱,并到达测试井口,再经过地面油嘴管汇、分离计量装置进行计量求产、取样化验,最后经地面放空管线流到燃烧处理装置或回收装置进行处理。井下测试阀是由地面进行控制的,可以进行多次井下开井和关井,开井流动求得产量,关井测压求得压力数据。用电子压力计记录测试全过程井下压力和温度变化情况,根据测得的压力、温度数据,进行压力恢复测试来评价解释测试层的特征和产能性质。测试结束后,通常先打开循环阀循环压井,再解封封隔器,确认压稳后,起出测试管柱。

中途测试的分类,按照封隔器坐封对象不同划分为坐套测裸和坐裸测裸两种测试方式。坐套测裸中途测试封隔器坐封在套管上,由于套管内坐封井壁规则、套管支撑测试管柱的强度高,封隔器不易出现坐封不严、漏失及封隔器下滑等作业风险;坐裸测裸中途测试封隔

器坐封于裸眼内，封隔器坐封通常采用尾管支撑坐封，也有采用膨胀式地层测试器旋转胀封封隔器。尾管支撑式坐封测试，支撑尾管在测试期间承受压缩变形并静止不动，易发生吸附卡钻。同时测试期间井壁掉落的岩块或沉砂易于井底堆积，掩埋卡钻。另外，支撑式坐封测试封隔器之下管柱直接接触井底，在测试期间发生井壁失稳卡测试管柱的风险大。膨胀式地层测试器旋转胀封封隔器，是一种适用于不规则裸眼井的单封隔器测试和跨隔双封隔器测试的地层测试工具，具有下入一次测试管柱即可进行分层测试、多次测试的特点。旋转胀封封隔器坐封测试方式可减少封隔器以下的管柱长度，减少管柱阻卡风险。

由于中途测试期间产生的负压直接作用于测试裸眼地层，易造成严重的井周岩石应力破坏，而这种应力破坏严重的井壁又无支撑防护，因此与其他有完井工具支撑井壁的完井测试及正常钻进的钻井作业相比，通常具有更大的井壁失稳埋卡或砂卡管柱井下安全风险。

由于中途测试多在裸眼井中进行，测试环境复杂，风险较大，容易发生事故。对于一个未知区块，如果能在已知邻井相关数据的基础上，通过建立数学模型对风险进行评估，来判断该区块是否可以采用中途测试，这样不仅可以节省时间和人力物力，又可以有效地规避风险。地层测试器诞生于 19 世纪中叶，经过不断地改进，终于研发出适用于裸眼井的 MFE 提放式测试器和适用于套管井的 APR 压控式测试器。随后，又出现了膨胀式测试器，使裸眼井中的测试更加快捷。随着海洋勘探的发展，又研发出 PCT 全通径压力测试器，大大提高了测试成功率。近年来产生的测试与射孔联作技术，不仅使测试速度进一步提高，还令其获取的资料更为准确。我国于 20 世纪中后期才引进中途测试技术，并逐步在各区块的勘探中推广使用。尽管各国都在逐步完善中途测试技术，但因其测试环境复杂，且大部分在裸眼井中进行，出现过许多问题。我国华北油田测试公司在苏 402 井测试时，发生了严重的卡钻事故，直接经济损失达 25 万元，延误了工期。在川东北气藏测试时，曾出现过因测试层高温高压而导致井下工具损坏、测试管柱断裂的情况。

在国外地层测试工作中，也常出现地层测试问题，特别是伊朗雅达油田、叙利亚油田现场测试过程中问题较多。伊朗雅达油田 APP1 井在测试时，由于测试层温度较高，计量套在下井之后无法正常工作，无法进行测试作业；APP1 井由于油管腐蚀严重，在测试结束起钻后发现油管断裂，17 根油管和其连接的测试工具一并掉入井底，经过三次打捞才起出全部工具，耽误工期近 30 天；在地面测试流程方面，受测试压差影响，出现凝析气藏相态转化，影响油气流体分析和资料解释；在伊朗雅达油田的测试流体中硫化氢和二氧化碳含量较高，对地面管路及井下测试管柱和测试工具的腐蚀严重，增加了油管断裂的风险，同时对施工人员的安全造成威胁，给测试施工带来了较大的困难。在中途测试过程中存在较大的安全隐患。正是因为复杂井中进行中途测试时成功率不高，为了防止事故发生，人们通常选择坐套测裸和坐套测套等测试方式，从而降低测试风险，在测试方式确定之前对其开展风险评估工作，再根据评估结果选择合适的测试方式，这样既规避了风险，又缩短了测试时间，并可以节约测试成本。

对于风险评估方法，目前国内主要应用的领域有经济分析、环境污染、煤矿安全和工具可靠性分析等，针对中途测试的风险评估工作研究较少，大部分处于定性评价阶段，只对某几个作业环节进行定量分析，通用性较差。目前尚未发现研究人员系统地开展对中途测试定

量化的风险评估工作。尹正钰采用预先危险分析方法对海上中途测试设计工艺进行评价,并提出应按照测试各阶段寻找可能发生的危险,分析其产生原因并讨论解决对策,以此来指导现场测试工艺,它是靠定性分析的方法,其分析结果主要依靠专家经验,主观影响较大;西南石油大学的陈伟等对试井设计进行风险评价,主要对象是地层完井测试,将蒙特卡洛方法应用其中,通过概率分布估算出未知参数的取值,该法的应用基于大量的统计数据,若对于未知区块,其评价结果则基于工程经验的估计,有一定主观性。陈伟等提出测试设计合格率的概念,来优选测试工作制度,但此方法考虑的因素较少,没有对测试整个流程可能出现的主要问题加以分析。由于缺少大量的历史数据,在对中途测试进行风险分析时可以考虑采用事故树分析法和 LEC 分析法,这两种方法在工程上都得到了广泛应用,如果能将二者应用到勘探开发的中途测试中,必将进一步扩大中途测试的应用范围,从而促进我国石油工业的发展。在事故树分析法方面,张军等针对坍塌事故,防止人员伤亡,采用安全工程里的事故树分析,建立了建筑物坍塌的事故树总图,求解最小割集或最小径集,并分析结构重要度,找到了导致坍塌的主要原因,从而得出预防此类事故的方法;周寅等运用事故树分析方法,对矿场爆破飞石的事故进行分析,绘制事故树,并计算结构重要度,系统分析了爆破飞石事故产生的原因,提出了相应的防范措施,为爆破的安全管理提供了依据;曹邱林等针对泵站工程进行风险分析,首先绘制泵站运行风险的事故树,并结合层次分析法,输入指标权重和基础事件概率,最终计算出泵站系统的风险概率值,并判断风险等级。在 LEC 分析法方面,王卸云以浙江省某个易发生事故的矿井为对象,用 LEC 法进行半定量分析,找出了其中潜在的主要风险;朱渊岳等针对 LEC 法的局限性,加入了管理系数 M 值,提出了改进的 LECM 法,并用于水利水电工程的风险评价中,以提高人们的管理水平;王建平等将升船机施工的风险分为三类进行辨识,并运用 LECM 法进行评价,确定各自的风险等级,从而提出降低风险的有效措施。针对中途测试,其测试过程的安全性以及取得数据的准确性就显得格外重要。目前国内外尚未形成一套完整的中途测试风险评估体系,难以表示测试的风险程度。影响中途测试效果的因素有很多,需要对其各环节辨识风险源,选择适当的方法进行风险评估,规避风险;同时对测试方案进行定量分析,规范现场工艺,保证中途测试顺利进行,最终有助于实现油气探测的突破。由此说明,建立一套中途测试风险评估体系显得尤为重要。

第一节 油气藏工程基础知识

一、油气藏类型

油气在圈闭中的聚集称为油气藏,一个油气藏具有同一压力系统和统一的油气水界面。从开发地质的角度来说,油气藏是由几何形态及其边界条件、储集及渗流特性和流体性质这三个独立的因素组合而成的,缺乏其中任何一个因素就构不成油气藏。

(一) 按储层孔渗特征分类

按照油气储集空间和流体流动主要通道的不同,可将油气藏划分为 9 种类型(表 1-1),

下面介绍常见几种油气藏类型。

表 1-1 储层类型及储集/渗流空间体系分类

序号	类 型	储集空间发育程度/%			裂缝相对孔隙度/%			裂缝/基块 渗透率比
		孔隙	溶洞	裂缝	大裂缝	中裂缝	小裂缝	
1	孔隙型	>75	<25	<5	0	0	100	≤1
2	裂缝孔隙型	>50	<25	>5	25	25	50	≥10
3	微裂缝孔隙型	50~95	<25	<25	0	10	90	≥3
4	裂缝型	<25	<25	>50	30	30	40	∞
5	孔隙裂缝型	25~75	<25	25~75	40	40	20	≥10
6	溶洞裂缝型	<25	25~75	25~75	50	40	10	∞
7	溶洞型, 裂缝溶洞型	<25	>75	5~25	50	40	10	∞
8	缝洞孔复合型	25~75	25~75	5~50	30	30	40	≥10
9	似孔隙型	>50	<1	≈50	0	0	100	1

1. 孔隙型油气藏

以粒间孔隙为储油气空间和渗流通道, 故也称为孔隙性渗流, 如砂岩油气藏、砾岩油气藏、生物碎屑灰岩油气藏、鲕粒灰岩油气藏。

2. 裂缝型油气藏

天然裂缝既是主要的储油气空间, 又是渗流通道。可能不存在原生孔隙或有孔隙而不连通、不渗透。裂缝孔隙度一般不超过 6%, 如致密碳酸盐岩油气藏、变质岩油气藏、泥页岩气藏。

3. 裂缝孔隙型油气藏

以粒间孔隙为主要储集空间, 以裂缝为主要渗流通道, 称为双孔单渗介质渗流, 其裂缝往往延伸较远而孔隙的渗透率却很低。我国任丘的碳酸盐岩油藏、美国的斯普拉柏雷油藏均属此类油藏。

4. 孔隙裂缝型油藏

粒间孔隙和裂缝都是储集空间, 又都是渗流通道, 亦称为双孔双渗介质渗流, 其裂缝发育而延伸不远, 储层基块孔隙度较低。

5. 缝洞孔复合型油藏

溶洞、孔洞、孔隙和裂缝既是储集空间, 又是渗流通道。储集层均属可溶性盐类岩石, 以次生孔隙为主, 也称为三重介质油气藏。

(二) 按油气藏几何形态分类

油气藏按几何形态可分为块状、层状、断块和透镜状 4 类。

1. 块状油气藏

油气藏的油气层有效厚度大(大于 10m), 油藏可以有气顶和底水, 气藏可以有底水。油气藏具有统一的水动力系统和良好的连通性, 底水具有一定的补给能力。在选择完井方式时要考虑油藏有无气顶、底水, 气藏要考虑底水是否活跃等。一般采用射孔完井或裸眼完井方式。

2. 层状油气藏

此类油气藏多属背斜圈闭，构造完整，具有统一的油气水界面。油气层在纵向上分层性好，层数多。各单层的有效厚度小，单层厚度 5~10m 为厚层状，1~5m 为中厚层状，小于 1m 为薄层状，层间渗透率差异较大。油藏的边水驱动能量较弱，在注水开发过程中应充分应用分层注水、分层压裂、分层堵水等工艺，调整注采剖面，提高注水效率，故一般采用射孔完井方式。我国大庆萨尔图油田、胜利胜坨油田、长庆马岭油田均属此类油藏。

3. 断块油气藏

油气藏断裂十分发育，构造被切割成为许多大小不等的断块。有些断块面积小于 0.5km²，纵向上含油层系多，含油井段长。每个断块甚至同一断块内，不同油组不但有不同的油水界面，而且油气的富集程度、油层物理性质、天然驱动能量大小差异都较大。其中封闭型的断块，初期依靠弹性能量开采，后期宜采用选择性的点状注水；开启型的断块宜采用边缘或边外注水。由于这类油藏油层层系多，层间差异大，一般采用射孔完井方式。我国胜利东辛油田、中原文明寨油田均属此类油藏。

4. 透镜状油气藏

砂体几何形态的地质描述一般以长宽比划分。长宽比小于或等于 3 的砂体称为透镜体，透镜体呈零星分布，大面积为尖灭区。透镜体相互交错叠合时，含油气井段纵向上就出现多个油气层。

(三) 按油气藏流体性质分类

一般按油气藏所产流体分为天然气藏、凝析气藏、挥发性油藏、常规油藏、高凝油藏和稠油油藏。

(四) 按油气藏开发地质特征分类

王乃举等根据中国陆相油藏的主要开发地质特征及开发方式，将中国陆相油藏划分为 10 个大类：①多层砂岩油藏；②气顶砂岩油藏；③低渗透砂岩油藏；④复杂断块砂岩油藏；⑤砂砾岩油藏；⑥裂缝性潜山基岩油气藏；⑦常规稠油油藏；⑧热采稠油油藏；⑨高凝油油藏；⑩凝析油气藏。

二、油气藏流体性质

(一) 原油性质

原油是由各种烃类、沥青、少量硫及其他非烃类物质构成，故其物理和化学性质变化相当大。原油的重要物理性质包括密度、黏度、凝固点等，应考虑地面（标准状态）和油层两种状况。

1. 密度

密度是单位体积内所含物质的质量，以 ρ 表示，物理制单位为 g/cm³，SI 制为 kg/m³，标准状况即压力为 0.101MPa，温度为 20℃ 时的密度被规定为石油和液体石油产品的标准密度，以 ρ^{20} 表示。

美国常用 *API* 度表示石油的密度，换算关系如下：

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{60^{\circ}F \text{ (15.6}^{\circ}C) \text{ 时的密度}} - 131.5 \tag{1-1}$$

随密度增加，*°API* 反而减小。

2. 黏度

黏度是指液体(或气体)分子之间做相对运动时所产生的摩擦力。SI 制黏度的单位是 Pa·s，油藏工程中常用 mPa·s，原油的黏度变化范围很宽。我国根据黏度将原油划分为常规油和稠油两大类，将油层温度下的脱气原油黏度小于 50mPa·s 者称为常规油，大于 50mPa·s 者称为稠油。稠油又有自身的划分标准，稠油是沥青基原油，我国通称稠油，是按黏度而言。国际上通称重油，是按相对密度而言。我国和国际上都是以黏度作为主要指标，以相对密度为辅助指标，稠油实际上就是重油，只是称呼不同而已，由于各国稠油成因不尽相同，因而划分标准时也略有差异。我国稠油划分标准见表 1-2，由联合国培训研究署(UNITAR)推荐的重质原油及沥青分类标准见表 1-3。

表 1-2 中国稠油分类

稠油分类		主要指标 黏度/mPa·s	辅助指标 相对密度	开采方式
名称	级别			
普通稠油	I —1	50~150 ^①	>0.9200	常规或注蒸汽
	I —2	150 ^① ~10000	>0.9200	注蒸汽
特稠油	II	10000~50000	>0.9500	注蒸汽
超稠油(天然沥青)	III	>50000	>0.9800	注蒸汽

①指在标准状况下的黏度，其他指油层温度下的脱气油黏度。

表 1-3 UNITAR 推荐的重质原油及沥青分类标准

分 类	第一指标	第二指标	
	黏度 ^① /mPa·s	密度(60°F)/(g/cm ³)	密度(60°F)/°API
重油	100~10000	0.934~1.0	20~10
沥青	>10000	>1.0	<10

①指在油层温度下的脱气油黏度。

普通稠油中级别 I —1 类大都可用注水开发，如胜利孤岛、孤东、埕东、胜坨等油田；级别 I —2 类应采用注蒸汽开发。

特稠油、超稠油(级别 II 类、III 类)都必须采用注蒸汽开发，如辽河高升、曙光、欢喜岭油田，新疆克拉玛依油田九—6、7、8 等区，胜利单家寺、乐安油田和河南井楼油田等。

稠油油藏的储层大多属泥质胶结的中粗粒砂岩、砂砾岩。胶结疏松，易出砂。

3. 凝固点

在一定的试验条件下，原油冷却至某一温度，当流面倾斜 45°角经 1min 仍不流动，这个最高温度点则为凝固点。凝固点高的原油富含石蜡。

我国原油凝固点大于 25℃ 的约占 90%，其中 15% 大于 30℃，还有不少凝固点大于 40℃。辽河沈阳油田原油凝固点平均为 55℃，最高达 67℃。我国将原油凝固点大于 40℃ 的油藏定为高凝油油藏。辽河沈阳油田高凝固点原油是世界上罕见的，高凝油油田的开发关键

是原油的流温必须高于凝固点，才能维持正常生产。

(二) 天然气性质

天然气在油气田呈几种状态存在，包括伴随原油产出的溶解气、油藏气顶产出的游离气、气藏中的游离气和地层水中的溶解气。

天然气的成分主要是甲烷，还含少量的乙烷、丙烷、丁烷、戊烷和较重的烃类。非烃气体包括 N_2 、 CO_2 、 H_2S 、He 等。

若地层水中溶解有 CO_2 ，当压力降低时，可引起 CO_2 分压的降低，导致 $CaCO_3$ 垢的形成。

H_2S 是天然气的常见成分，特别是以碳酸盐岩为储层的油气藏，一般均含有不同数量的 H_2S 气体。根据非烃气体的类型及含量的气藏分类见表 1-4(引自 SY/T6168—1995 气藏分类)。如我国川东北罗家寨高吉硫气藏、普光特高含硫气藏(H_2S 含量 $150\sim 264g/m^3$)。当含有一定量的 H_2S 和 CO_2 酸性气体时，它会危及操作人员的安全，对钻井完井、油套管防腐设计、井口装置、天然气处理及运输都应有特殊的要求。

表 1-4 根据非烃气体含量的气藏分类

类型	亚类/分类指标						
含硫化氢 气藏	亚类	微含硫气藏	低含硫气藏	中含硫气藏	高含硫气藏	特高含硫气藏	硫化氢气藏
	$H_2S/(g/cm^3)$	<0.02	0.02~5.0	5.0~30.0	30.0~150.0	150.0~770.0	≥ 770.0
	$H_2S/(g/\%)$	<0.0013	0.0013~0.3	0.3~2.0	2.0~10.0	10.0~50.0	≥ 50.0
含二氧化 碳气藏	亚类	微 CO_2 气藏	低含 CO_2 气藏	中含 CO_2 气藏	高含 CO_2 气藏	特高含 CO_2 气藏	CO_2 气藏
	$CO_2/\%$	<0.01	0.01~2.0	2.0~10.0	10.0~50.0	50.0~70.0	≥ 70.0
含氮 气气藏	亚类	微 N_2 气藏	低含 N_2 气藏	中含 N_2 气藏	高含 N_2 气藏	特高含 N_2 气藏	N_2 气藏
	$NO_2/\%$	<2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~50.0	50.0~70.0	≥ 70.0

(三) 地层水性质

地层水是天然存在于岩石中，并且在钻井以前一直存在的水。油田水是指任何与油气藏伴生的水，这些水有某些突出的化学特征。原生水是至少在地质时期的大部分时间中已经同大气失去接触的化石水。地层水的物理性质主要是密度、黏度、压缩性等，因这些性质随压力温度变化较原油小，一般查图表确定。所以地层水的化学性质显得更为重要，所含盐类主要由 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 、 SO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 等离子组成。总含盐量一般以 mg/L 为单位，也称总矿化度(TDS)。

1. 地层水的组成及性质

油田水中含有各种可溶的无机和有机化合物，经常存在的主要元素是钾、钠、钙、镁、氯以及碳酸根、碳酸氢根和硫酸根。油田水中的各类元素和离子通常以如下浓度存在：

$10^3\sim 10^5 mg/L$	K^+ 、 Na^+ 、 Cl^-
$10^3\sim 10^4 mg/L$	Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-
$10^1\sim 10^3 mg/L$	K^+ 、 Na^+ 、 Sr^{2-}
$10^0\sim 10^2 mg/L$	Al^{3+} 、 Ba^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Li^+

地层水中微量元素含量一般如下：

10⁻³mg/L(多数油田水) Cr、Cu、Mn、Ni、Sn、Ti、Zr
10⁻³mg/L(某些油田水) Be、Co、Ga、Ge、Pb、V、W、Zn

阳离子中的 Ca²⁺可形成 CaCO₃或 CaSO₄垢，Ba²⁺、Sr²⁺也可形成硫酸盐垢，如长庆马岭油田的油管结垢、大庆油田聚合物驱采油井油管中硫酸钡垢。Cl⁻含量高表明腐蚀性大，生产管柱应考虑防垢、防腐的问题。地层水性质主要包括 pH 值、总矿化度等。

① pH 值。地层水的 pH 值受碳酸氢盐体系的控制，碳酸钙和铁的化合物的溶解度在很大程度上取决于 pH 值。pH 值越高，结垢趋势就越大。pH 值低，结垢趋势减小，但腐蚀性增大。大多数油田水的 pH 值在 4~9 之间。在实验室储存期间，多数油田水的 pH 值升高，原因是碳酸氢根离子离解成为碳酸根离子。

② 总矿化度。通过水分析报告中给出的阳离子、阴离子的浓度总数计算。高矿化度水（如中原油田地层水矿化度达 30×10⁴mg/L）腐蚀性强，套管伤害严重，在生产过程中油管结盐常堵死油管。

根据水中溶解盐类的不同组合，可将水型划分为 4 种基本类型，进一步细分为组、亚组和类。一般工程上仅描述属于哪一种类型。表 1-5 列出每类的特性系数，亦即划分标准。

表 1-5 原生水型的特性系数及地层水分类

水 型	以毫克当量百分数表示的浓度比		
	$\frac{Na^+}{Cl^-}$	$\frac{Na^+-Cl^-}{SO_4^{2-}}$	$\frac{Cl^--Na^+}{Mg^{2+}}$
氯化钙型	<1	<0	>1
氯化镁型	<1	<0	<1
碳酸氢钠型	>1	>1	<0
硫酸钠型	>1	<1	<0

2. 地层水分析的应用

地层水与油、气、岩石共生，具有相同或相似的演化历史，因此在地层测试中水分析资料具有重要的价值。应用如下：

- ① 水的化学组成分析，可帮助判别出水来源及可能的产水量，对于气基流体钻开的层的钻井设计十分关键。
- ② 根据地层水的性质配制实验流体，评价储层敏感性和工作液的伤害程度。
- ③ 测地层水电阻率 R_w ，可根据测井数据求取油、气饱和度，准确识别油气层。
- ④ 判断结垢类型及趋势，研究其与钻井完井液、射孔液、压井液、压裂液、酸液等的配伍性。
- ⑤ 配制保护储层的完井液。

三、油气层特征

油气藏类型是决定完井方式的主要依据。但在具体油气藏完井设计时，还必须综合考虑油气层特性的诸多方面。如油气层岩性、渗透率及层间渗透率的差异、油气藏压力及层间压力的差异、流体空间分布及层间流体性质的差异，以及有无气顶，有无边、底水等。

(一) 储层岩性

目前重要并且分布最广的储集岩是各类砂岩、砾岩、石灰岩、白云岩,此外还有少量的火山岩、变质岩、泥岩、煤岩等。要从产层中高效地采出油气,必须研究储层性质,使钻井、完井工艺能够最大限度地发挥油气藏的潜力。

1. 碎屑岩

碎屑岩主要包括各种砂岩、砂砾岩、砾岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等,它们是我国目前最重要的储集岩类型。碎屑岩的物质成分主要由颗粒和胶结物两部分组成。其胶结物主要为硅质、钙质、黏土矿物,有时为原油或沥青胶结。黏土矿物类型多,含量变化范围宽(3%~25%),其性质易受外来流体的影响,是造成各种作业过程中储层伤害的主要因素。而且我国砂岩油气藏多为层状,压力系数变化范围大,以中-低渗透层为主,在开发中采用多层同井合采、分层注水、增产措施等。多数采用套管(或尾管)射孔完井,极少数采用裸眼或割缝衬管完井,一般适合完井地层测试。

2. 碳酸盐岩

碳酸盐岩主要是石灰岩和白云岩。碳酸盐岩在我国约占沉积岩总面积的55%,特别在西南和中南地区很发育,且时代愈老碳酸盐岩所占比例越大。据估计世界石油储量的一半左右在碳酸盐岩中。我国除华北的碳酸盐岩古潜山油藏外,大部分碳酸盐岩主要作为天然气储层,如四川盆地侏罗系大安寨介屑灰岩气藏、川东石炭系鲕粒灰岩气藏和陕甘宁盆地中部古风化壳碳酸盐岩气藏。

碳酸盐岩在很多方面不同于砂岩。它们主要由动物和植物(藻类)的遗体组成,并且几乎是存在和生长在同一地点。碳酸盐矿物易被水溶解,所以在沉积之后的成岩作用过程中被溶解和重结晶是常见的。碳酸盐岩比砂岩脆得多,裂缝、溶洞较发育,裂缝和溶洞的储渗作用也相对重要。

碳酸盐岩大多坚硬、致密,储渗空间为孔隙、裂缝和孔洞,也可能存在底水、气顶,开采过程中大多数井都要采取酸化、酸压或压裂等增产措施。对于孔隙性的碳酸盐岩如川中磨溪雷口坡气藏,渗透率 $0.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,孔隙度8.35%,其完井方式可按砂岩油层来对待,可以采用酸化、前置液酸压或加砂压裂。裂缝性古潜山碳酸盐岩可用裸眼完井,如华北任丘古潜山油藏。但近年来国内外趋于套管射孔完成,这样有利于控制底水和进行增产措施。近年来采用水平井开发碳酸盐岩油气藏已成为一种必然发展趋势,如川中磨溪雷口坡气藏水平井开发效果良好,塔里木塔河油田、哈萨克斯坦肯基亚克盐下油气藏也在大力应用水平井开发。该类储层井眼一般相对稳定,适合于裸眼中途测试和完井地层测试。

3. 其他岩石类型

除碎屑岩和碳酸盐岩之外,其他岩类储层有岩浆岩、变质岩、泥页岩和煤岩等。我国及国外均发现了这种类型的油气藏,对其研究不可忽视。岩浆岩及变质岩油气藏大都为古潜山油气藏,岩石本身是致密的,存在裂缝或孔洞等,这类油气藏大多采取将不整合面的风化壳钻开后裸眼完井,如辽河东胜堡油田的斜长角闪岩、混合花岗岩等以及胜利、辽河油田片麻岩,克拉玛依油田板岩,江苏油田玄武岩,辽河油田安山岩等,当然这类油藏也可射孔完成,该类储层比较适合裸眼中途地层测试,对于射孔完井亦可开展完井地层测试。