

钻柱测试解释方法 与油层评价

夏位荣 编著

(北京)

2

6

石油工业出版社

070057



钻柱测试解释方法与油层评价

夏位荣 编著

5048/08



200434351

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书重点阐明钻柱测试资料录取和解释方法以及现代试井的基本理论。同时,书中还介绍如何利用测试资料进行油层评价与计算机在资料解释中的应用。

本书可供钻柱测试、试油、试井、开发地质和油藏工程等方面的工程技术人员使用,也可作为高等学校有关专业的教材或参考书。

钻柱测试解释方法与油层评价

夏位荣 编著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

航空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 12 $\frac{1}{2}$ 印张 327千字 印1—2000

1993年3月北京第1版 1993年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0870-X/TE·813

定价: 6.95元

前 言

本书是根据作者长期工作经验和研究的成果，广泛收集国内外的最新成就，结合油田实际，为生产和教学需要而编写的。该书把资料录取、解释和应用看成一个有机的整体，并把传统的解释方法与现代试井解释方法紧密地结合起来，着重介绍钻柱测试的资料录取和解释方法以及现代试井的基本理论、油层评价方法与计算机在资料解释中的应用。

在编写本书的过程中，得到了中国科学院学部委员、中国石油天然气总公司勘探开发研究院总工程师童宪章高级工程师，中国石油天然气总公司勘探局副总地质师高锡伍高级工程师和中国地质大学教授徐怀大老师的热情帮助和指导，同时还得到其他许多同志的支持和帮助，在此作者谨向他们表示衷心感谢！

由于笔者水平有限，书中定有不少不足之处，敬希读者批评指正。

编著者

1991年9月

目 录

第一章 钻柱测试及原理	(1)
第一节 钻柱测试原理与工具类型	(1)
一、钻柱测试原理	(1)
二、测试工具类型	(1)
第二节 钻柱测试的程序设计和监视	(7)
一、钻柱测试的程序设计	(7)
二、现场程序设计	(9)
三、现场监视方法	(13)
第三节 钻柱测试的记录和处理	(17)
一、钻柱测试记录图	(17)
二、测试井的油(水)气产量	(19)
三、地层条件下的流体样品	(20)
第四节 钻柱测试记录图的定性解释	(21)
一、地层特征	(21)
二、采出流体类型	(22)
三、工具堵塞和底垫	(23)
第二章 测试资料解释的基本理论	(25)
第一节 不可压缩液体的稳定流动	(26)
一、流体渗流的几个特征	(26)
二、稳定渗流的应用	(27)
三、生产井周围的压力分布	(29)
第二节 弹性液体的不稳定渗流	(30)
一、弹性液体在多孔介质中不稳定渗流的过程	(30)
二、弹性液体向井不稳定渗流的基本微分方程	(31)
三、无限大地层的扩散方程解	(33)
四、压降叠加原理及应用	(36)
第三节 无因次变量及其解	(39)
一、无因次概念和常见的无因次变量	(39)
二、单井生产的无因次压力	(41)
三、井筒储集系数	(46)
四、表皮效应和表皮系数	(48)
第三章 钻柱测试资料的定量解释方法	(55)
第一节 压力曲线分析方法综述	(55)
一、早期段	(56)
二、过渡段	(56)

三、径向流动期或无限作用期	(57)
四、边界效应(或晚期段)	(60)
第二节 压力下降测试资料的分析方法	(60)
一、恒定生产的压降测试分析方法	(60)
二、产量变化的压降测试分析方法	(62)
三、典型曲线的分析方法	(67)
第三节 压力恢复测试资料的分析方法	(76)
一、压力恢复曲线的划分和径向流动段的识别	(77)
二、早期压力恢复数据分析	(82)
三、在无限地层中, 恒定生产井的压力恢复分析	(87)
四、有限油藏压力恢复分析方法	(94)
五、测试井产量变化的压力恢复分析方法	(97)
六、压力恢复典型曲线分析方法	(100)
七、晚期压力恢复分析方法	(105)
第四节 钻柱测试压力恢复的特点和分析方法	(111)
一、钻柱测试资料的特点	(111)
二、自喷井测试资料的分析方法	(112)
三、非自喷井测试资料的分析方法	(112)
第五节 双重介质压力恢复曲线分析方法	(129)
一、岩块模型不稳定压力恢复分析方法	(129)
二、垂直裂缝井不稳定压力分析方法	(139)
第四章 气井测试资料分析	(146)
第一节 气体稳定渗流	(146)
一、气体稳定渗流方程	(146)
二、等时试井	(149)
第二节 气井压降曲线分析	(150)
一、压降方程	(150)
二、计算假压力的方法	(152)
第三节 气井压力恢复曲线分析	(155)
第五章 油层评价	(160)
第一节 原始地层压力在油气田勘探中的应用	(160)
一、压力体系与水动力系统的实用意义	(161)
二、用原始压力划分不属同一层位的砂层	(161)
第二节 油层产能分析	(162)
一、生产测试和采油指数	(162)
二、预测含水率	(165)
三、描述油层模型和分析油井潜力	(165)
四、结点(nodal)分析	(167)
第三节 计算油气层边界	(171)
一、探边测试法	(175)

二、水静力学法	(175)
三、确定油水过渡带的高度	(175)
第四节 估算单井控制储量	(177)
第五节 预测地下烃类的相态	(178)
第六章 计算机在资料解释中的应用	(180)
第一节 数据采集和资料解释	(180)
一、利用计算机采集数据	(180)
二、促进解释理论和解释方法的发展	(180)
三、用计算机分析和解释试井资料	(180)
第二节 专家系统在试井资料解释中的应用	(182)
一、专家系统的基本内容	(182)
二、黑板模型	(183)
三、导数曲线的符号描述	(187)
四、识别流动段和确定解释模型	(189)
五、人工神经网络法	(190)
附图 1 均质储层中具有井筒储集和表皮效应的典型曲线图 (用无因次压力和无因次压力导数表示)	(193)
附图 2 双重介质无限储层具有井筒储集和表皮效应的典型曲线图	(194)

第一章 钻柱测试及原理

钻柱测试 (Drillstem Testing) 是近20多年发展起来的一项测试技术。用这种方法可以收集压力和流体样品数据, 分析短时间内的石油及天然气产量。最初地质人员用此方法来识别裸眼井段地层流体类型, 决定是否可以在该层完井、压力和流体样品数据。目前, 由于测试工具、仪表、传送技术、设计程序和解释方法的迅速改进, 该方法已成为油井投产前固定的工序和管理程序, 并在裸眼井、套管井、陆地和海上钻井中都得到了广泛的应用。它不仅能及时地为评价油层、确定新的井位和完井设计提供可靠的资料, 而且还能定量设计油层产能, 提出单井增产措施和选择投产初期有效的地面和井下设备提供抉择依据。

第一节 钻柱测试原理与工具类型

一、钻柱测试原理

钻柱测试是一种临时性完井方法。它以钻柱作为油管, 利用封隔器和测试阀把井筒钻井液与钻杆空间隔开, 在不排除井内钻井液的前提下, 对测试层段进行短期模拟生产。它的测试过程与自喷井生产过程类似, 即借助于地层压力与井底流动压力之差将地层中的流体驱向井底, 然后经测试管柱举升到一定高度或者喷至地面 (如图 1-1)。并在测试过程中取全油、气、水产量及压力和流体样品等全部测试资料。归纳起来, 钻柱测试是利用一套特殊的工具 (如MFE、PCT等), 在地层和井底之间形成压差, 使地层中流体的位能转化为动能。只要采出极少量的流体, 就能达到快速准确评价油层的目的。从图 1-1 看出, 根据测试过程中的流动特征, 从地下至地面可分为三个阶段:

第一阶段是地层渗流, 即地层流体在边缘压力和井底底压力之差的作用下流向井底。这种流动不仅与流体性质有关, 而且也与地层性质有关, 因而通过测试可以研究地层特性。

第二阶段是垂直管流, 即流体在井底流动压力作用下沿测试管柱上升。

第三阶段是地面管流, 即在井口压力作用下流体流至计量器或进入储存容器内。

二、测试工具类型

目前国内使用的测试工具有三种。

1. MFE 多流测试器

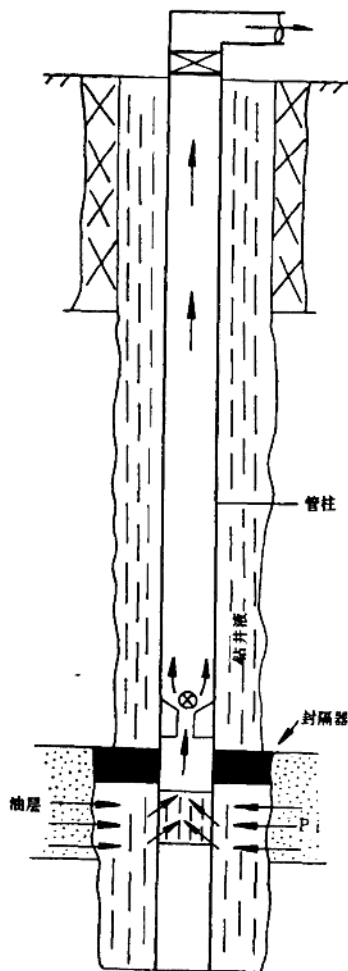


图 1-1 测试井生产系统

MFE多流测试器是目前应用最广的一种测试器。它适于在裸眼井和套管井中进行测试，而不能在海上钻井和斜井中进行测试。为了顺利进行测试，这种测试器井口有一套特殊的高压钻台管汇（如图1-2）。

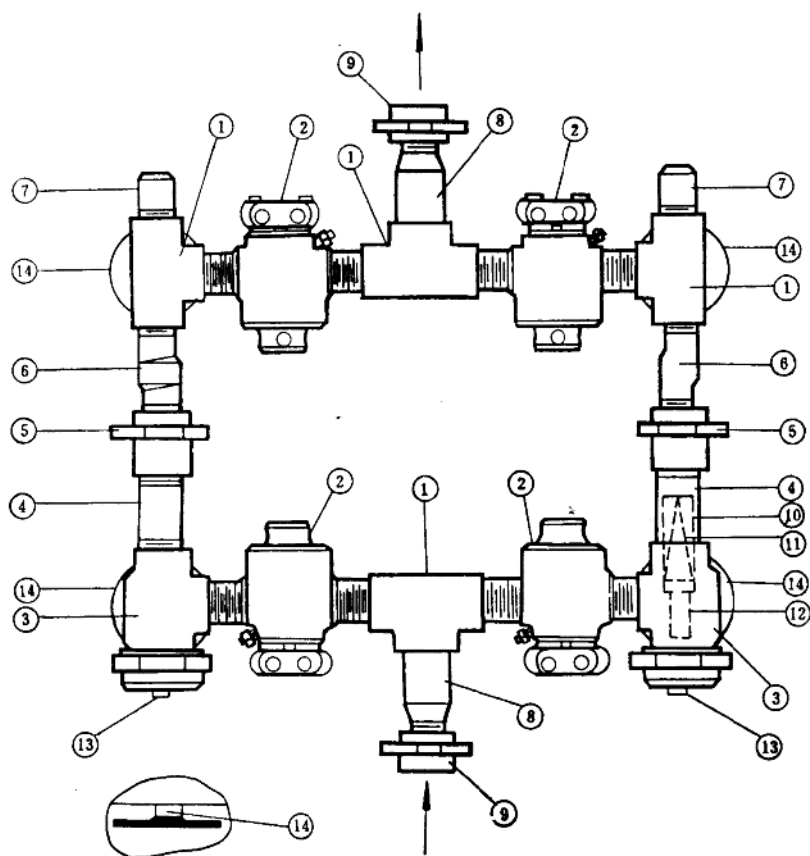


图 1-2 钻台管汇

①三通；②旋塞阀；③阻流器三通；④阻流器短节；⑤由壬；⑥短节；⑦堵头；
⑧大小头；⑨由壬；⑩衬套；⑪节流；⑫阻流器滤网；⑬管堵；⑭支座

MFE测试的基本管柱结构如图1-3。它包括基本工具和辅助工具两个部分（从井底向上）。

基本工具有：

- ①压力计（三只）；
- ②筛管；
- ③封隔器；
- ④安全密封；
- ⑤多流测试器；

- ⑥钻柱；
 - ⑦控制头。
- 辅助工具有：
- ①安全接头；
 - ②震击器；
 - ③旁通阀；
 - ④反循环阀；
 - ⑤井底油嘴；
 - ⑥地面油嘴。

MFE测试器有一套合理的操作工艺，在下井过程中，测试控制阀是关闭的，井内钻井液不会进入钻柱内，但旁通阀是打开的，钻井液经旁通阀进行循环（见图1-4(a)）。

当钻柱把测试工具送至预定井深后，利用管柱施加压缩载荷，于是封隔器控制胶筒膨胀，把测试层与其它层位和井内钻井液隔开，旁通阀关闭。测试阀随即打开，测试层的流体经筛管和测试控制阀流入钻柱内（如图1-4(b)）。如果地层压力较高或气量较大，地层流体可以流至地面。若钻柱内未加水垫或气垫，则测试层在开阀瞬间的回压接近于大气压力，在这种大压差的作用下，地层流体迅速流出，获得地层最大产量。随后关井测该层的压力恢复曲线，同时取样器获得终流动末期的流体样品（如图1-4(c)）。如果需要多次打开和关闭测试控制阀，只要在地面上提、下放测试管柱就能实现。在完成测试任务后，立即解封，封隔器收缩，旁通阀打开，钻井液自由循环（如图1-4(d)）。起出井内全部测试工具，则该层测试结束。如果需要测试其他层位，则要起出管柱后重复上述工序。

2. PCT测试器

PCT测试器是一种用压力控制的测试器，它是为海上浮船钻井和斜井测试设计的，它与MFE测试器的主要区别有两点：一是用PCT测试器（包括HRT）控制测试过程的开关；二是在测试管柱中配有伸缩接头。它适用于套管井测试，由于只有一个封隔器，所以只能进行单层测试，封隔器以上的套管不能射孔。PCT测试器井下管柱的主要组成部分如图1-5。

PCT测试器井下管柱自上而下有：

- ①断销式反循环阀；
- ②伸缩接头；
- ③泵压式反循环阀；
- ④PCT测试器；
- ⑤液压标准工具（HRT）；
- ⑥压力计；

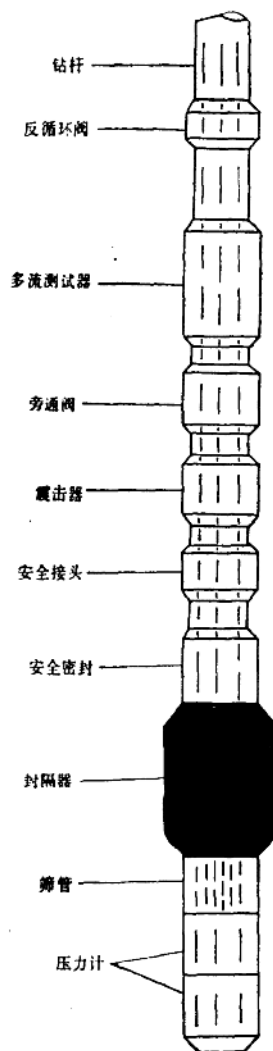


图 1-3 单封隔器裸眼MFE
测试管柱

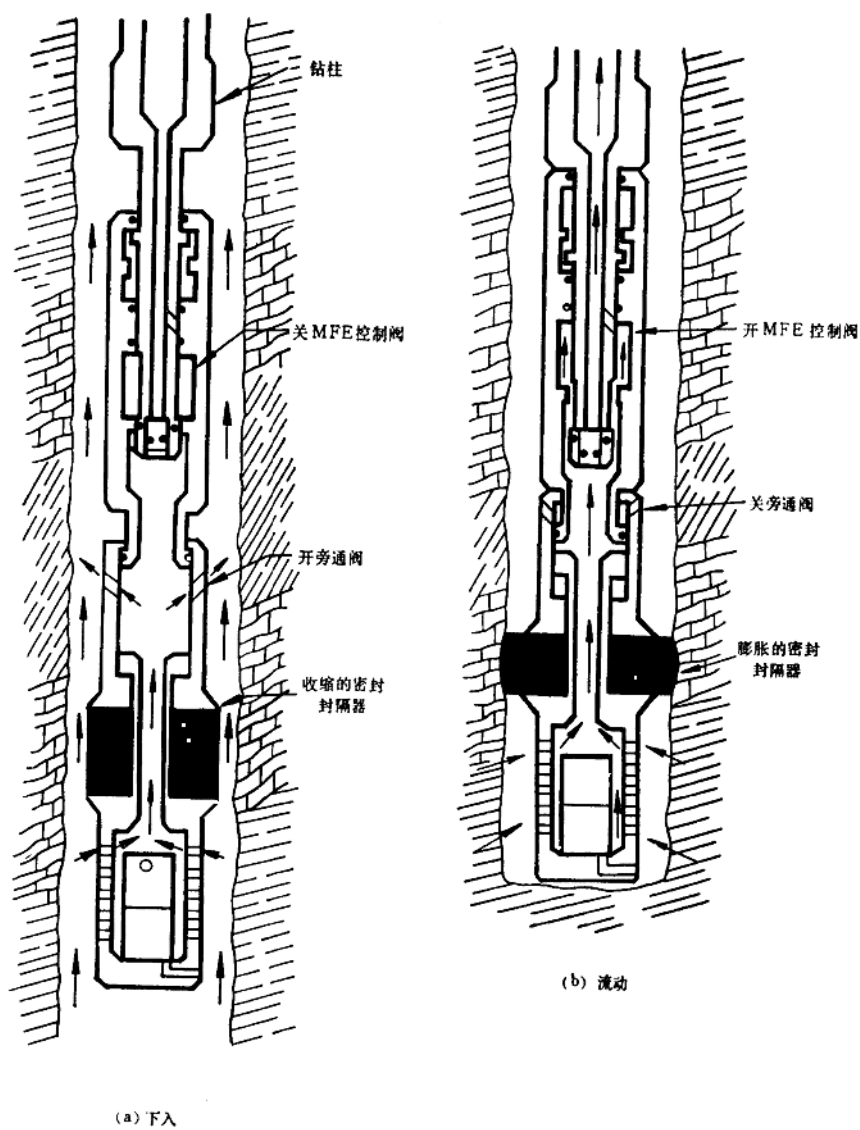


图 1-4

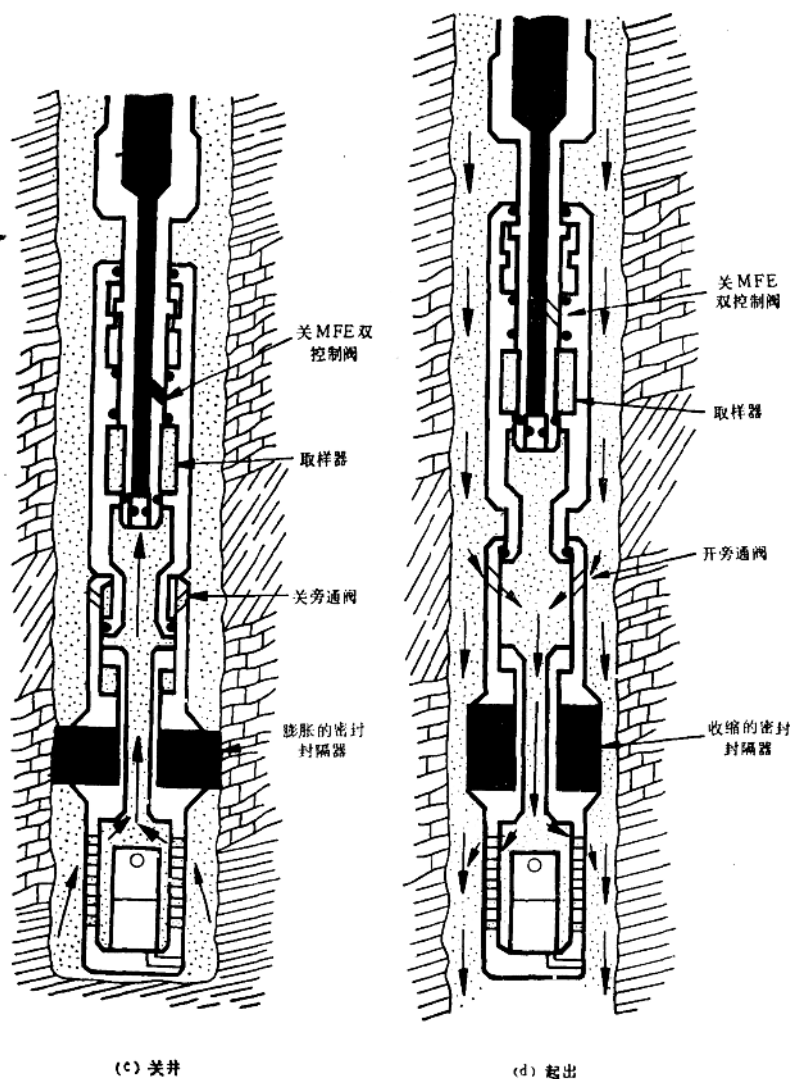


图 1-4 MFE测试器井下工作状态

⑦封隔器；

⑧封隔器以下的部分与MFE相同。

在测试过程中，上述各阀的开关由PCT控制。PCT测试器主要由取样腔和氮腔组成，下井时，氮腔上下都与井内钻井液连通（如图1-6）。当工具下至预定深度坐封后，液压标准工具（HRT）进口关闭，这时在地面通过环形空间加压，压缩氮腔，使地层流体通过工具流至地面。关井时，去掉井口压力即可。总之，PCT测试器是由地面加压或泄压实现井下测试工具的开关状态，从而达到测试的目的。

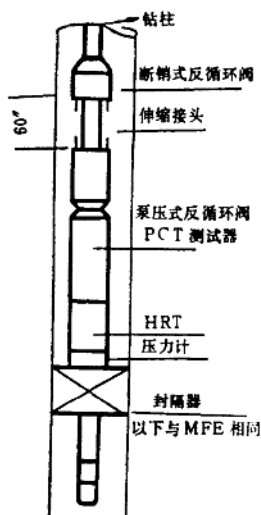


图 1-5 PCT测试器井下管柱

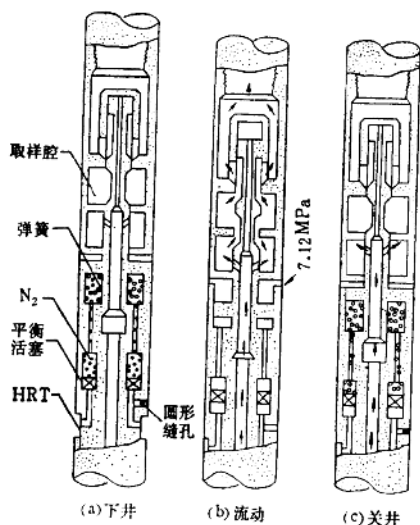


图 1-5 PCT测试器井下工作状态

3. 膨胀封隔器测试器

目前大多数油田使用MFE多流测试器，这种工具使用的封隔器是尾管封隔器，它需要把钻柱下至井底，然后利用钻柱的重量使封隔器膨胀而和井壁保持良好的密封。这要求必须保持井底清洁和封隔器以下的井壁稳定。采用膨胀封隔器测试器就能克服这个缺点。它不需要钻柱下至井底。这种工具的组成自下而上是：

- ①阻力弹簧；
- ②下封隔器；
- ③钻铤；
- ④带眼接头；
- ⑤上封隔器筛管短节；
- ⑥膨胀泵；
- ⑦安全接头；
- ⑧震击器；
- ⑨内压力计；
- ⑩水力开关工具；
- ⑪反循环接头。

这种工具的“心脏”是膨胀泵，利用它可把井内液体打入封隔器密封胶筒内使封隔器膨胀。膨胀泵由钻柱右旋启动，在大约15min以后，膨胀泵每分钟旋转30至90次，直到封隔器压力远远大于流体静压力（即膨胀压力高于钻井液压力10.3个MPa）时，膨胀泵自动停止工作，同时用单流阀保持密封胶筒内的压力。膨胀后的封隔器能够支撑钻柱的重量。膨胀封隔器测试工具与普通封隔器测试工具的主要区别是：钻柱重量不是用于坐封封隔器或保持封隔器密封，而是用于操作控制阀（即压力开关工具），只要下放钻柱加压，则控制阀立刻打开；上提钻柱减压，控制阀关闭。开井时，下放钻柱对控制阀施加钻压可把控制阀打开，控制阀打开需要的时间随温度、控制阀中油的类型和钻柱重量的不同而不同。关井时，用88MPa至225MPa

的拉力上提钻杆，控制阀就立刻关闭。需要多次开关测试工具时重复上述操作即可。这种测试工具最主要的优点是能在不规则的井眼中牢固坐封，另外，由于封隔器坐封不依赖钻柱重量，因而它尤其适用于测试浅层。

第二节 钻柱测试的程序设计和监视

任何钻柱测试的程序设计，都包括选择测试设备，现场监视程序和解释方法等。其目的都是根据测试的要求，通过最优化程序设计，从钻柱测试中获得所需的资料。尤其是对低渗透层、探边、衰减等测试井或其他特殊目的测试井更为重要。

一、钻柱测试的程序设计^{〔1〕}

1. 测试层的厚度

测试层的厚度以薄为好。因为地层流体（油和水）必须首先部分或全部替换井底口袋中（即封隔器以下的工具 and 井筒之间的环形空间（见图 1-7）的钻井液。若井底口袋体积比较小，测试时就容易获得地层真实流体，至少在测试工具的取样室中能够得到真实流体。而且关井时井筒储集效应也将随着井底口袋体积的减小而减小。

测试层段的选择是根据电测、录井或取心资料，由地质人员按照不同的要求提出的，一般是电测解释的油气层或可疑层。为了识别油气层，测试层段厚度最好薄一点，即把测试的目标尽可能缩小，使测试资料更具有代表性。但测试的层数不宜太多，如果在疏松地层的裸眼井中测试，则测试层数决定于裸眼井允许的安全测试时间，而套管井的测试时间则不受限制。

2. 底垫

底垫越少越好。在钻柱测试中，不管是水垫或气垫都要合理使用。但底垫使用过多是经常的。测试时，因底垫对地层产生的回压过大，阻止流体向井中流动，这会造成流体产量难以确定。根据实践经验，有四种情况应该使用底垫：

① 测试层太深。当深井测试或钻井液密度较高时，钻柱内外压力相差较大，为了防止钻柱破裂需要使用底垫（当测试层深度小于3000m时，一般不用底垫）。

② 控制封隔器上下的压差。在初流动开始时，为了控制封隔器上下的压差，防止流体穿过封隔器，需要使用底垫。在井底温度正常时，对裸眼井测试控制的压差是35MPa或更小，对套管井测试控制的压差是53MPa或更小。

③ 防止地层坍塌。当测试未胶结的地层或砾石充填完井的油气井时，为了防止砂层表面或完井衬管上的压差过大，应保持砂层表面的压差低于28MPa，以阻止地层砂或压裂支撑剂的流动和砾石衬管的堵塞。

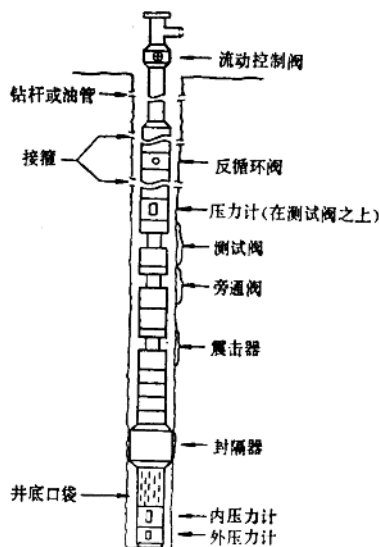


图 1-7 典型钻柱测试管柱

④ 测试有腐蚀性流体的层段。当测试层含有腐蚀性流体时，应使用能防腐蚀的底垫，以保护钻具不受腐蚀。

3. 测试工具

选用测试工具的标准是：

①提供最大的密封面积。

②使用最大操作力时而钻具（或油管）旋转圈数最少。由固定钻机上下操作工具是最可靠的测试工具。浮动钻机操作测试工具，需要压力启动测试工具系统。对开关工具来说，压力启动测试工具的有效动力较小，所以需要更可靠保险地操作。套型闸比全经闸可能有更大的密封面积，因而操作可靠。旋转操作的测试工具，监视它的开关较为困难，这种工具的开关限制为固定圈数（通常为两圈）。正常操作时，规定向井内下入工具或从井内提起工具应无转动，实际上，完全阻止工具在井内转动是困难的。虽然如此，对浅井（小于600m）的裸眼钻柱测试，旋转工具是唯一推荐的合理工具。对套管井来说，为了减少对油层的污染，最好选用带射孔装置的测试工具，并在低于地层压力的条件下进行射孔。

4. 封隔器

在裸眼井测试中，长的封隔器不如较短的封隔器好，但这并不意味着封隔器越短越好。看起来一个长的封隔器应当与井壁产生更大的接触面积，事实上，由于它弯曲变形，反而变成了一个较短的封隔器，长的和短的封隔器膨胀后与井壁的接触面积基本上相同。

5. 井筒条件

井筒条件主要包括以下各项：

①井径规则，尽量减小井斜，防止坍塌；

②适当循环处理钻井液，清除井底任何沉淀。并用井径仪进行测试，以便帮助选择封隔器的底封位置；

③要尽量减小钻井液对油层的污染，一般说，低粘度、低失水的钻井液会为钻柱测试成功创造条件。为此要求钻井液失水量小于或等于10ml，粘度小于或等于80s，另外，井壁上泥饼越薄越好。特别是象特低渗透性低压油层更是如此。钻井液堵塞特别严重的低压井，堵塞物好象一个套管，可能阻止地层流体流向井底，象这种情况，只有将井壁清洗干净后才能进行测试。否则测试的资料不能代表测试层段的情况。对套管井的测试，要重视射孔对油层的损害，往往射孔对油层的损害大于钻井液对油层的损害。

6. 选择封隔器的座封位置

裸眼井的封隔器座封位置，应当选择在坚硬和致密地层，这种地层与封隔器对油井环形空间才能产生有效的密封。根据井径测井、钻时曲线和岩样分析，在对裸眼井进行钻柱测试时，封隔器的座封位置应当是胶结的砂岩、垂直裂缝不发育的灰岩和白云岩，而不是页岩和未胶结的砂岩（见图1-8）。套管井钻柱测试座封隔器的位置，应当避开接箍和射孔位置。

7. 井底压力计和井底温度计

现在的钻柱测试至少需要三只压力计。在测试时，为了能测量流动压力和关井压力，在测试阀之下，通常使用两只压力计（一只压力计用于记录工具系统内部的压力变化，叫做内压力计；一只压力计用于记录封隔器以下的环形空间压力变化，叫做外压力计）。第三只压力计放在测试阀之上（见图1-7），记录钻柱内的压力变化，帮助分析以下问题：

①观察下钻操作和关井期间测试工具和钻柱的渗漏情况；

②计算实际流体在钻柱内增加的速率（因为在这个位置和测试工具之间不产生压力降）。

目前,选择电子压力计或机械压力计,主要根据处理资料的要求、测试工艺和操作简单方便进行选择;其次根据压力计测量的精度与灵敏度进行选择。电子压力计比机械压力计具有更高的精度和更大的分辨力。在绝大多数钻柱测试中,电子压力计的这种优点对工程结果不产生明显的差异。众所周知,机械压力计在金属片上产生的图形,必须借助于手工数字化或计算机的图数转换,无论用什么转换方法,机械压力图读数的结果是有误差的。而电子压力计则可避免这些误差。

8. 测试类型

选择封隔器的个数越少、钻井液对地层浸泡时间越短的测试更易获得成功。因而不同的测试类型可能有不同的测试效果。

①常规封隔器井底钻柱测试是裸眼井最易成功的测试(图1-9(a)),因为只有一个封隔器,而且地层钻穿之后,钻井液浸泡时间短,所以滤液对地层的损害最小。

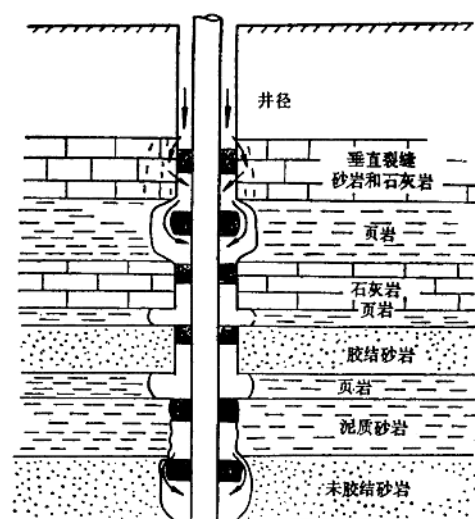


图 1-8 选择封隔器的座封位置

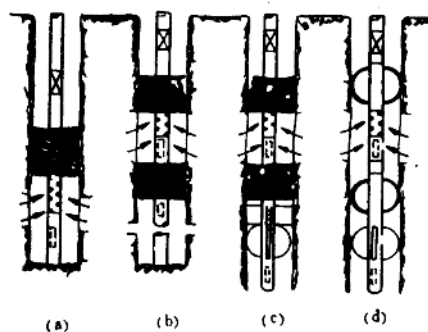


图 1-9 测试类型

- (a) 常规封隔器井底钻柱测试;
- (b) 常规井底跨隔测试;
- (c) 常规跨隔测试;
- (d) 膨胀封隔器跨隔测试

②常规井底跨隔测试是裸眼井中绝大多数能够成功的测试(见图1-9(b)),这种测试系统封隔器习惯上从靠近测试层的上、下座封。当测试层距井底大于90m时,可用常规跨隔测试(见图1-9(c))。

③膨胀封隔器跨隔测试是较难获得成功的测试(图1-9(d)),因为这种测试是使用膨胀封隔器,这种封隔器比常规封隔器更易受到损伤,钻柱重量对膨胀封隔器的座封和密封不起作用,所以增加了测试成功的难度。在套管井测试时,一般不使用这种系统。当裸眼井钻柱测试的主要目的是识别地层流体或下套管的关键问题悬而未决时,才使用膨胀封隔跨隔测试。它的主要优点是:

- (a) 能对不规则的井眼进行测试;
- (b) 不需要清理井底,也不会出现封隔器在选定测试层之上座封。

二、现场程序设计

现场程序设计通常包括两个方面:一方面是流动和关井的次数及测试时间;另一方面是安全操作和保证获得全部数据的现场监视。

根据钻柱测试要求的资料类型很容易确定流动和关井次数以及不同阶段的要求。标准测试是由两次流动和两次关井所组成，有时也需要三次流动和三次关井，每次测试的时间可由现场经验确定，本书推荐一个参考时间。

1. 初流动

初流动仅仅是为了排除井底口袋中的钻井液，而不是从地层中排除大量流体的测试。初流动时间一般是5min或更少，较长的初流动时间，可使井底口袋中产生更多的气体，井底附近地层产生越来越多的井底储集效应。这样，意味着初关井时，获得无井底储集的恢复数据的可能性变小。

2. 初关井

初关井的唯一目的是获得无井底储集效应的井底压力恢复数据或原始压力。这个阶段的钻柱测试时间（即关井时间）决不应小于60min。很明显，精确地预测需要获得半对数外推恢复数据的关井时间是不可能的。然而根据钻柱测试的经验，只要初流动时间不超过5min，在一般的钻柱测试中，关井60~90min就可以满足半对数分析的要求；但对低渗透测试层，关井时间可能更长，需要获得一批井层的关井时间之后才能确定。

3. 终流动时间

钻柱测试终流动的最低目标是生产一定数量的地层流体，至少在终关井之前，地层流体足够到达测试工具取样室。生产等于井底口袋体积地层流体所需时间是能够计算的，在这段时间中，测试的主要目的是取得工程数据。假若测试的目的是了解井底损害范围、油层尖灭和边界所产生的干扰，则终流动期应需足够长的生产时间。根据文献^[2]记载，当 $10^2 \leq C_D e_2$ ， $\leq 10^4$ 时，能用典型曲线分析流动压力数据的大致生产时间是：

$$t_p = \frac{0.278 \mu \phi C_t r_w^2 t_D}{K} \quad (1-1)$$

$$t_D = C_D (1 + 1.5 \log 10 (C_D e_2)) \quad (1-2)$$

无因次井筒储集常数为：

$$C_D = \frac{0.159 c}{\phi h C_t r_w^2} \quad (1-3)$$

井筒储集常数为：

$$c = 4613.087 \frac{r_p^2}{\rho} \quad (1-4)$$

式中 t_p ——生产时间，h；
 t_D ——无因次时间，无因次；
 C_D ——无因次井筒储集常数，无因次；
 μ ——流体粘度，mPa·s；
 ϕ ——孔隙度，%；
 C_t ——综合压缩系数，MPa⁻¹；
 r_w ——井眼半径，m；
 K ——地层有效渗透率，μm²；