

【苏】A.M. 雅莎申著

钻开油层和地层测试

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对在钻井过程中钻开油层和进行地层测试的技术工艺作了详细阐述,而且是把测试作业与钻开油层作为一个技术整体来分析的。书中对用局部循环洗井液打开油层的方法的室内科学研究结果和现场作业所得的试验结果做了分析,详细地叙述了在苏联和外国进行地层测试所采用的地层测试器和试验工具的结构特点,对钻井过程中不用把钻具起出地面进行地层测试的方法,以及对地层测试的结果进行解释的问题作了专门的介绍。对外国专家在水动力学方面的研究结果也作了介绍。

本书的主要对象是从事石油和天然气钻井工作的工程技术人员和科研工作者,也可作为石油院校有关专业师生的参考书。

译者:绪论、第一章 李祖胜,第二章 金衍泰,第三、四章 张永一,第五、六、八、九章 方义生,第七章 李继康。

ВСКРЫТИЕ ОПРОВОБОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТОВ

А. М. Ясагин

МОСКВА, «НЕДРА», 1979.

*

钻开油层和地层测试

〔苏〕А. М. 雅莎申 著

方义生 张永一 金衍泰 李祖胜 译

李 继 康 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京计量印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14 1/2 印张 353 千字 印 1,200

1988 年 2 月北京第 1 版 1988 年 2 月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2790 定价: 3.20 元

ISBN 7-5021-0179-9/TE·177

前 言

近期来，在石油与天然气建井周期中，钻井的完井阶段具有很重要的意义。在这个领域里，国内外都正在进行着许多研究。

在苏联的科研和设计部门，如全苏石油科学研究院，北高加索石油科学研究设计院，全苏钻井技术科学研究所，全苏石油工业地球物理研究所，石油工业部伏尔加格勒石油科学研究设计院，全苏石油地质勘探科学研究院，以及苏联地质部 ВНИИГИС 都着手对钻井过程中的钻开油层和地层测试方面开展研究和实验设计工作，并对解释产层的测试结果进行理论性探讨。

在国外，对上述领域进行研究的有美国的江斯顿、哈利伯顿、莱茵斯和斯伦贝谢等一些公司。

在科学技术文献中，已经创立了一种对产层无需附加压力，而利用气态介质和泡沫，以及油基泥浆来钻开油层的新的工艺技术^[2,4,5,22,61]。

一些书籍和小册子已经涉及到在钻井过程中进行地层测试（即中途测试——译注）的开采技术和工艺，并创立了对测试结果的解释方法^[9,11,12,38,73,80,88]。

然而，他们对钻开油层和地层测试问题的涉及还是很不够的。近来，出现了怎样在贫瘠油藏开采残油的问题。与此有关并具有现实意义的是对低压油井钻开油层的方法。随着中途测试规模的扩大，测试结果的解释工作量也将显著增加。实际上，目前任何一种地层测试都要通过对流体动力学的研究和借助于产量与压力恢复曲线来进行。因此，对从事中途测试工作的专家来说更感兴趣的问题是井下来自地层的瞬时地层液（气）流的流体动力学与深井压力计上的压力曲线图的数学分析方法。这也是引起国外学者感兴趣的研究课题。

本书阐述了钻井过程中打开油层、试油与地层测试问题的研究。比较详细地分析其开采结果和在地层压力低的井中采用局部循环冲洗液的方法钻开产层的工业应用的结果，以及首先在未投入开发地区使用的结果。

在本书中，对中途测试和对测试结果的解释问题给予高度的重视。

目 录

绪论	(1)
第一篇 在钻井过程中钻开油层	(11)
第一章 在钻开地层的过程中井底区域岩石储集性质的变化	(11)
第二章 用洗井液局部循环法钻开地层	(15)
第一节 钻井时的洗井方法和局部循环的特点	(15)
第二节 从井底把岩屑送进岩屑捕集器	(20)
第三节 井底岩屑捕集法	(23)
第四节 用洗井液局部循环不用钻杆钻开油层的方法	(58)
第五节 转盘钻井时用局部循环钻开油层的方法	(60)
第二篇 在钻井过程中对地层进行测试	(78)
第三章 用钻杆下入井里的测试器进行地层测试	(78)
第一节 用钻杆下入井里的井底支撑式地层测试器对产层进行测试	(78)
第二节 用钻杆下入井里的非井底支撑式测试器进行地层测试	(94)
第四章 在钻井过程中对地层进行测试	(106)
第一节 不起钻进行地层测试的特点	(106)
第二节 水力式封隔元件的试验研究和分析	(107)
第三节 地层测试技术装备的试验研究和分析	(122)
第四节 用 ОПБ 测试器进行地层测试	(127)
第五节 用莱因斯公司的测试器进行地层测试	(131)
第五章 对产层进行综合研究和用测井试验器测试地层	(133)
第一节 在钻井过程中对地层进行综合研究	(133)
第二节 用测井试验器测试地层	(137)
第六章 地层测试结果的解释	(145)
第七章 在不同地层条件下的油、气、水层的物理性质	(154)
第一节 在地层条件下碳氢混合物的状态	(154)
第二节 按天然气组分确定地层的饱和特性	(155)
第三节 真实气体的物理性质	(156)
第四节 在水动力计算中采用的地层原油的物理性质	(164)
第五节 地层水的物理性质	(168)
第八章 钻井中途测试时要解决的水动力学问题	(170)
第一节 地层中液体运动的方程	(170)
第二节 地层中液体运动方程的解	(175)
第三节 压力恢复分析	(179)
第四节 求解在有限地层中液体径向流动方程	(183)
第九章 压力曲线图的数学整理方法	(189)
第一节 按照德·霍尔涅尔-阿·扎克和普·格里芬方法整理压力恢复曲线	(190)
第二节 德·霍尔涅尔曲线图的初步分析	(195)

第三节	按照阿·奥杰赫和弗·谢利格方法整理压力恢复曲线	(198)
第四节	按照尔·马克-金利、叶·米尔涅尔和德·乌奥连方法整理压力恢复曲线	(201)
第五节	对变产量条件下生产井测试结果进行分析	(206)
参考文献		(222)

绪 论

在建井—完井过程中钻开油层、测试与试油作业均称为完井作业。

完井是指在一口井中从钻开油层的瞬间到把井交付采油（在钻生产井时）和从钻开最后一个层位的瞬间到全井完成其地质目的（钻探井）时的一整套技术工艺过程。

在这些情况下，如果从探井中获得稳定的工业油（气）流，那么这口井就象生产井一样交付采油了。

钻生产井最常见的全套完井工艺技术是在钻井过程中钻开油层，进行地球物理测井，下油层套管并固井、射孔、为获得工业油（气）流而进行的试井，把井移交生产。

根据产层的地球物理特性和预先计划的开采方法，可以采用另外的称为井底不封固（裸眼）的工艺方法钻生产井。它可以同时开采几个生产层位，但必需在井底周围填砂固井，以改善井底岩石的储集性能。这时的完井作业可能要补充以下程序：封隔地层，下尾管并固井，强化引流（对地层进行压裂与酸化），用树脂处理地层，在井底下入筛管。

探井基本上采用两种工艺：一种是钻达设计井深，按“自下而上”的方式逐层进行测试；另一种是按“自上而下”的方式，在下套管前的钻井过程中，随着井的加深，逐段进行地层测试。

所以，在这些井中所进行的完井作业，就其全部工艺过程讲是有区别的。

在按“自下而上”的方式测试地层的完井作业中有以下程序：在钻井过程中钻开油层，进行地球物理测井，下套管并固井，射开最深的一个油层的套管柱，测试这一层然后将它封堵，再射开上面的一个地层的管柱，并对它进行测试。这种作业程序一直继续进行到该井地质剖面的最上一层试完为止。

当全部处于上面的认为有希望的层位，都在钻井过程中，随着井的加深而进行测试时，按“自上而下”的方式进行地层测试的完井阶段包括下面三个程序：钻开最下面的一个层位，进行测试和地球物理测井。

当生产井进行完井作业时，除了已指出的打探井时的全套完井作业过程外，还可能增加强化引流和对井底周围地层的岩石进行封固这样两道工序。

钻开层位，测试和试油在完井作业中占有最特殊的位置。因为这是该工作过程中的最初阶段，其质量好坏将关系到在生产井和探井中进行下一个程序的有效性。

最大限度地保持井底岩石集油性质是钻井过程中钻开油层的主要质量指标。而在已钻的井中进行试油和测试的目的是为了确定地层的原始地球物理参数。据此来确定钻开地层、测试和试油方法的基本发展方向。所以，完善钻开油层的方法应该按两个基本方向进行：创立钻开地层压力异常高的层位的技术与工艺和钻开压力低于静水压力的地层的处理方法。第一个方面基本上包括在探井和重新投入开发的油田上钻开油层的问题，而第二个方面包括在贫瘠油藏中，从那些尚未投入开采的油层采出残油而改善钻开油层的方法。

在钻井中，由于地质、物理和技术上的多样性，以及钻井的特点等原因，不可能创立一种万能的能够最大限度地保存井底地层岩石原始性能的钻开油层的方法。因此，完善钻开油

层的方法有几个途径，即寻找一种新型的泥浆化学处理剂来处理泥浆，和寻找专门的泥浆添加剂来暂时性地堵塞地层的岩石孔道；得到一种泥浆，它的液相的性质与地层液体的性质相同，和在地层上没有过剩的压力作用的钻开油层的处理方法。

不论哪种情况，钻开油层方法都应根据储集层的地球物理特性和地层液的物理化学性质来选择。这时首先要考虑地层压力的数值，井底区段的渗透率和物质成分，地层剖面中膨胀性粘土的存在，裂缝程度。

改变钻井液密度，是在高于和等于井底静水压力的条件下钻开油层的理想办法。这时，对钻井液提出的基本的要求是保证最低的失水性和保证固相物质最少地渗入井底段的岩层；不允许滤液与地层中的粘土物质相互作用；防止在地层孔隙空间形成非溶解性沉淀物；保证在高温高压下和遇地层水时，泥浆具有必要的稳定性；以及保证在试井时易于排除渗入地层的滤液和固体颗粒。

上述要求，对评价用于钻开油层的任何液体都是正确的，经验表明，在钻井中比较常用的水基泥浆，由于它对产层的消极作用，没有经过专门的化学处理，不希望用于钻开油层。

对地层原始性能有较小的不良影响的是由水和原油加入乳化剂（淀粉、羧甲基纤维素，膨润土等）制成的乳化液对地层自然参数的不良影响比较小。这种液体的密度小，失水小和润滑性能良好，比用普通的水基泥浆钻开油层的质量要好得多。在一些油田上采用油包水乳化泥浆，要比用清水和水基泥浆钻开油层所获得的单井产量要高出4~20倍^[30]。然而，乳化液中水的存在也会在地层中引起一定的变化。在油包水乳化液中减少水的含量就得到油基泥浆，它由原油或柴油加入不同的化学组分制成。这种液体的性能（粘度、密度、失水、稳定性等等）可以在很大的范围内调节。如油基泥浆的密度，可以从0.9变到2.2 g/cm³，失水可以达到零。这种液体在井底温度达到200℃时，还能够保持稳定性。这种液体中所含的水不超过3%，不致于对井底段的岩石造成本质性的影响。所以，在钻开油层时能够保证最大限度地保留地层的原始参数。

普通的石油也属于这种冲洗液。用原油钻开油层，以及用油基泥浆可以消除对油层的污染与水浸，从而保证了高质量地钻开油层。在多数情况下，使用本油田生产的原油来钻开油层。这是因为它与该地区原油具有相同的性质，在渗入地层后也不会在井底区段引起本质性的变化。

经验表明，使用原油或油基泥浆可以提高油井产量一点五倍或更多^[109]。

所指出的这种液体在美国的一些地层压力低的油田上使用甚为广泛^[17,18,61]。在苏联，它不仅用于钻开油层，而且还用于取心钻井^[29,58]。

在钻开油层的实践中，还使用一种带添加剂的液体来暂时封闭地层的微小通道^[15]。因为减小冲洗液的液相滤失和固相颗粒渗入地层，这两个问题在很大程度上取决于是否能够用人工合成的办法在井底区段的岩层通道中形成栅状物质。为此目的，在钻井液中加入标准的固相颗粒，使其在地层裂缝中迅速形成桥架。这种添加剂不同于钻井堵漏所用的填料，它应该能保证暂时性地堵塞地层通道，而又能在试油时很快地恢复井底区段的渗透性。

以上所讲的基本上都是与钻开地层压力高于静水压力的地层有关的问题。在钻开地层的完井课题中提高钻开地层压力低于静水压力的地层的质量问题占有特殊的位置。

如果在钻开高压产层时，在“地层与油井”系统中能够保证有较大的压降的情况下，利用在地层中建立足够的负压进行地层测试，钻井泥浆对地层的负作用可能会小些，那么，对

古
日

低压地层，泥浆对井底区段岩石所带来的危害就很难排除了。其困难在于在测试低渗透率地层时，在地层与油井间即使有足够的压降的情况下，也不能导致液体（气）从井底引流。因此，解决钻开低压油层和低渗透率地层的质量问题，具有极为重要的意义。

解决这些课题，需要研制专门的液体和清洗剂，以及钻开在井底区段没有压力的地层的方法。这些问题的基本特点是尽可能地把井底压力调整到一定范围，使其不高于地层压力。

可以通过改变钻井泥浆密度的办法来调整井底静水压力。但是钻井泥浆的密度只能在一定的限度内变化。因此，在多数情况下，钻开油层所采用的钻井方法是保证使井底压力维持在或者等于或者低于地层压力的状态（即平衡压力钻井和负压钻井）。

近来，国外在钻开高压低渗透油层时，采用负压钻井法。这种方法的实质是选择低密度泥浆，其对井底的压力总和低于地层压力。在这种条件下钻开地层就有可能伴随发生地层液侵入井内。然而这些钻开地层的条件只有在具备在生产层中钻进时能封住井口，并保持井筒与地面之间所产生的压降的可靠的井口装置（固定式和旋转式封井器）才能实现。

国外的经验表明，使用这种方法可以取得肯定的结果^[41]。

在地层压力低于井筒中的静水压力的产层中钻进会伴随发生钻井液局部漏失，而在裂缝严重的地层中还可能发生全部泥浆漏失。此时若用普通的钻井方法来钻井就会使地层的渗透率急骤下降，因为钻开地层是在井眼与井底地层间有巨大的压降条件下进行的。

钻开低压产层较为理想的方法是无负压钻井法。顿钻是此法中最常见的一种。在顿钻过程中，没有泥浆的压力降，消除了它给地层带来的有害作用。

正是因为这样，而且还由于这种钻井方法（在设备轻、设备的成本低等）较之旋转钻井法优越，所以这种方法在美国的一些油田上常用于浅井中钻开油层。美国曾在一个很长的时期内采用综合方法钻低压井，即在产层之前用旋转钻井法，而在钻开油层时采用顿钻法^[15]。

为了提高钻开低压层的质量，还可采用空气或其他气体钻井法，即清洗井底的洗井液用气体发生剂代替，它不会给产层造成回压，钻开油层时将会伴随着地层液体或天然气进入井筒内。此外，这种方法能够保证大大地提高钻井速度，同时可以减少钻开油层的时间。

经验表明，在气田上钻开产层时，利用邻井的天然气作为介质来从井底将钻下的岩屑清除掉是十分经济的。可是在地层液体的产量很大时，空气（或天然气）的耗量要增加2~3倍，或使用专门的泡沫物质。在这种情况下钻开油层，要用充气液或泡沫（两相或三相）来清洗井底^[25]。

根据压入井里的压缩空气（气体）与钻井泥浆量的比例关系，可以造成一定的井底压力。

美国在油田钻井中，相当广泛地使用气体发生剂、充气液和泡沫泥浆^[22,56]。苏联在采用上述方法钻开低压层或低渗透层方面也同样积累了一定的经验^[24,57,71]。

在苏联的油田上，还利用“油井—地层”系统的压力平衡关系，广泛采用局部循环法来钻开油层。在已开发油田上，推广地钻水平多底井。

只要所采用的方法能够保证它的效益能获得客观的评价，那么这种方法就是钻开油层的合理的方法。运用与邻井相似资料与新钻开产层的采油特性相对比的方法，评价采用这种或哪种钻开油层的方法的效益可以认为是正确的。因为选择来对比的油井，其试油作业都是在下套管固井和射孔之后进行的。

特别指出，对一些位置相距很近的油井（如古比雪夫地区的穆罕洛夫油田的一些井）的分析表明，其采油参数常常有相当大的差异^[8]。

因此，最好不确定钻井液对已钻完的井的初产量的影响程度，而是确定钻井液对井底区段地层的渗透率的变化和相应的对井的初产系数的影响程度。这些参数，以及产层的其他特性都应在钻井过程中测定。那么，就不需要钻开油层和进行地层测试这些中间的工艺过程了。所以近十年来，完善地层测试的方法，都是按照在下套管前尽量接近钻开目的层的测试过程的途径进行的^[10]。

最早的方法是完钻完井并下套管后，按“自下而上”的方式进行地层测试。

这种方法使井长期地处于测试阶段，直到油井投入试采和取得目的层的所必须的资料为止。而且，下套管后的地层测试工作是在钻井液对地层长时间作用之后进行的，这就极大的降低了地层的自然参数；在固井时水泥浆对地层也有一定影响；存在着一段射了孔的管柱也对地层资料的真实性有影响；最后，从一个目的层转移到上一层还需花费许多时间和物资。还应指出，如果不是生产井，用这种方法进行地层测试要浪费许多套管、水泥和固井时间。因此，这种方法只用来在生产井中测试地层，在生产井中地质剖面已经清楚，对生产层进行测试实际上是试油工作的一个组成部分，随后，就将井交付采油。这种方法也用于在探井中在复杂地质条件（存在不稳定的地层、漏失层及可能发生井喷等）下钻成的探井中进行地层测试。

近来，国内外广泛应用“自上而下”的中途测试方法。即在下套管前，用一种专门的井下仪器——地层测试器，随着井的不断加深，按井段进行裸眼测试。国内外大都使用钻杆把地层测试器下入到井底。

“自上而下”的试油方法具有许多优点。因为在钻开地层与地层测试的工序之间，无需进行其他技术工艺作业，因此，缩短了这两者间的周期，减少了测试前钻井液对井底区段的副作用。中途测试所需的时间甚少，可以节约许多物资。根据所得到的中途测试的资料，如果目的层没有油气，则可在下套管前更改原井的设计任务，从而节约了套管。

但是，上述方法并非在一切钻井条件下，都是可用的，其效率也不尽相等。

例如，存在着两个或几个钻开了的油层，以及在被测试的地层剖面上存在几个岩石渗透率各不相同的层位，这时如果用座底式地层测试器来测定各单个层位的物理参数就不可能了。此外，也不可能确定地层液体来自地层的那一部分。

对距井底很高的位置上的对象进行测试工作是十分复杂的。因此，为了保证测试质量，不得不停止钻进，而进行测试。

的确，在实际测试中曾使用过双封隔器座底式地层测试装置，但此种类型的地层测试器只能在目的层距井底不高的条件下使用。

所以，迄今为止进一步完善中途测试方法这一迫切性的课题仍然是最大限度地尽力使钻开油层与地层测试过程相接近。使所有这些工作（包括取心、地球物理测试和试油）都直接在钻井过程中进行，而且尽可能使地层测试工作，无论是按“自下而上”还是按“自上而下”的方式，不管测试对象处于井底的什么位置，都在下套管之前完成。

这方面的成果，开创于下入井里的绳索式地层测试器，在起钻后可以用它来测试一段不太厚的地层。由于测试方法的关系，这种工具能够不以目的层距井底位置为转移来完成测试工作。但是，从少量的取样中（6~8 L）并不是常常都能获得地层特性的一切资料。而且在

非均质地层中，取出的点上的微少试样还可能导致错误的结论。即使如此，绳索式地层测试器在国内外仍然得到了推广。

在油井里进行测试与试油，同中途测试从地层里所得到的资料，无论在技术、工艺和取样的数量上彼此都有差别。

借助钻杆把地层测试器下到井里的中途测试，通常就可以把足够量的地层液（气）样品取到钻杆里，以满足研究地层流体力学的需要。

用试油器在钻井过程中进行试井，就可以在取样器的工作筒里取出少量的地层液（气）和记录到地层压力和温度。

根据测试结果确定下列油层参数：地层压力 p_{na} ，温度 t ，液体流动系数 kh/μ ，压力渗透系数 κ ，测试段渗透率 k ，井底堵塞系数 k_s ，平均采油系数 η 与饱和度。

根据对地层试油的结果确定地层压力和温度值，井底饱和度，油气水界面及不同渗透率的夹层厚度。所以，地层测试能够在钻井过程中对产层预先提出评价。的确，为了确定地层的物理参数，作了很多努力对试油结果进行解释，这对提高测试中所取得的资料的可靠性具有重大意义。但是，这一课题目前还只是处于试验阶段。

在苏联的油田上，从1967年以后的十年里，中途测试的应用范围从10.3%增加到70%，即增加了七倍。

在这个时期，地层测试不仅在应用范围上有变化，而且在测试条件方面——井深增加了（表1），井底条件复杂了（静水压力达100 MPa，井底温度达200~250℃）。

表 1

联 合 企 业	分 年 度 测 试 的 最 大 井 深						
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
克拉斯沃顿油气田	5030	4668	5030	5278	5310	5410	5090
尼日涅沃斯克油气田	5120	5510	5520	5560	5620	5387	5500

在深井和超深井钻井地区积累了丰富的深井测试经验。四千米以上深井测试在工艺技术上已经过关。虽然在这个领域取得了成绩，但中途测试的效率不高的问题还没有解决。

当前的根本任务，不仅要在测试工艺技术操作的数量上有所增长，而且需要在施工质量上有提高，并取得必要的产层资料。

从测试失败的原因中应该剔除与搞清测试目的层对象和搞清在测试过程中安装封隔器的井段等有关的地球物理测井质量低劣，以及违反测试工艺等原因。

经验表明，测试过程中所取得资料的意义取决于这些资料反映井底段岩石的原始特性的程度。因此，要进行地层测试的井的准备工作必须从钻开油层开始，以保证确定地层的物理参数能最大限度地接近其原始特性。测试井的准备工作应该预先在钻井设计中加以规定。

提高中途测试的效率有下列途径：提高钻开要进行测试的产层的质量，提高对它的地球物理测井的质量；进一步完善用钻杆把地层测试下到井里进行测试的技术和工艺；建立新的地层测试手段；提高地层测试设备和控制计量仪表等技术手段的制造质量。

对地层测试井的准备工作最基本的要求是保证能用地层测试器安全地工作和预防卡

钻。因此，在把工具下到井里之前要分段洗井、划眼。而且这些准备工作必需在钻开地层的同时进行，还必须采用能最大限度地保持产层的原始储油性能的钻开油层的方法。

许多试井工作和钻开油层的实践经验表明，在钻井时由于钻井泥浆的滤液和固相颗粒渗入地层中上述性能是会变化的。因此，对冲洗液的质量与钻开油层方法的选择，要必须满足对井底岩石的影响尽可能地小的基本要求。

与地层测试的效率有关的另外一些工作是地球物理测井，它能够找到测试目的层并提供稳定而又坚实的岩石井段，以便在测试时安装地层测试器的封隔器。

只有排除对所谓“干层”的测试，才能准确地找到有希望的油层，而确定岩石稳定的井段又能提高封隔器的坐封密闭率并减少在下井的非生产性起下次数。

目前，苏联已成批生产成套的地层测试工具（КИИ），井眼直径为 75~295 mm，适于在封隔器的最大压降为 35 MPa 和井底温度为 130~170℃ 的条件下使用。组合式地层测试工具配有 16、25、40 和 60 MPa 的深井压力计。这样，这项技术可以在井底静水压力不大于 50 MPa 和在一定的井底温度的井里进行地层测试。此外，借助于组合式地层测试工具还能进行双流测试、即在测试中，只能开关井两次，从而限制了组合地层测试工具的应用。

上述问题在出现多流地层测试器之后部分地得到了解决。北高加索石油科学研究所已研制出了各种尺寸系列的多流液压地层测试器（МИГ），可在井径为 97~295 mm，封隔器压降达 45 MPa 和井底温度达 200℃ 的条件下使用。

与一般测试方法相比，多流地层测试器的特点是能够进行多次开井与关井测试，作出产量与压力恢复曲线。这种测试方法应用范围扩大，并且能够更加准确地发现具有工业价值的产层。

技术手段的另一个改进方向是由全苏石油工业地球物理科学研究所研制的“测井—测试—测井”的地层测试方法。这种测试方法开始时用装在组合式测试工具里的地球物理仪器进行地球物理测井，随即在地层出油（气）后，再重复进行一次类似的测井，采用这种工艺，甚至能准确地找到渗透率极低的产层，因而提高了测试结果的可靠性。

在完善测试技术手段的同时，还必须解决一系列的工艺技术问题。

到目前为止，在使用组合式地层测试工具的地区对测试层的储集特性没有得出统一评价的测试工作还占很高的百分比。对结果的分析表明，多数工艺技术作业违反规程测试的打开和关闭周期与压降值的连续时间。同时，对测试的结果也没有深入研究。于是出现了一种强烈的要求，就是在推荐应用组合式测试工具工艺技术时，应该综合国内各个不同地质区域使用这种测试工具的丰富经验，介绍测试规范和使用方法。

除测试规范外，从事地层测试的专家们特别注意解决工具下井时，工具是否沿井筒畅通，以及怎样保证在封隔器与井壁之间出现大间隙时，封隔器的密封性等工艺技术问题。

机械压缩式封隔器用于间隙不大的油井。通常，这种封隔器的封隔系数 K 值 ($K = D_{\text{о.н.}} / D_{\text{н.н.}}$ ——井径与封隔器直径之比) 多采用 1.06~1.11，对于较普遍的 190~214 mm 的井筒来说，封隔器外壳与井壁之间的间隙为 5~10 mm。

在这种间隙条件下改善工具的通过性能和保证封隔器的封隔性能，将取决于周密的测试准备工作，或者采用一种可以在大间隙条件下使用的封隔器。

目前，已找到了一种由两部分组成的机械压缩式封隔元件。这种封隔器可以使系数 K 值增大到 1.15。为此，采用一种金属的活动轴承可以把 K 值提高到 1.18。

采用液压封隔器能够完全解决在大间隙条件下的工具通过性能与保证封隔器的密封问题。

用这种封隔器测试地层的实践表明，在 $K = 1.4 \sim 1.7$ （井眼径向间隙达 $38 \sim 60 \text{ mm}$ ）的情况下，仍能保证其密封性能。

全苏钻井技术科学研究所与 НИИРП 合作研制了直径为 162 mm 的橡胶液压封隔器，可用于坐封直径为 190 与 214 mm 的井眼，封隔器承受压降为 25 MPa ，井底温度为 100°C 。全苏钻井技术科学研究所在此基础上又研制了与标准地层测试器相配套的 КИИ-146 型液压封隔器，可用于常规测试，也可用于井底坐封或井壁坐封测试。

提高测井与试油所获得的信息的可靠性的一个基本方向是最大限度地把这些技术工艺过程与钻开地层的作业互相接近起来。为此目的，全苏钻井技术科学研究所研制了借助于 ОПБ 型钻井地层测试器来测试油层方法和借助于地层测试综合装置（КОИП）对地层进行综合测试的方法。

钻井地层测试器可以直接在钻开油层后，不起出钻具就进行地层测试，它把钻开生产层和对它进行测试的工艺过程合为一个工艺过程。

地层测试综合装置把在生产层中钻进和取心、对已钻开的层段进行试油和进行地球物理测井结合起来进行，同样也可以不必起出钻具。

用 ОПБ 钻井地层测试器试油时，可用通常的转盘钻井法钻开油层。钻开要试油的层段后，用投入到钻杆里的取样器把地层液（气）体的试样收集起来，然后用打捞筒把取样器捞出地面，借助于液压封隔元件的变形把井筒封闭。用钻井泵在钻杆内建立的压力降使液压封隔元件产生变形。

取样器里装有两只深井压力记录仪（装在有孔的工作筒里）记载进行地层测试时的压力的变化。这种试油方法的技术工艺过程是：钻开地层并对它进行试油；对已钻开的层位重复进行测试；再把井加深，钻开下一个层段并进行测试；对已钻开的层位重复进行测试。

由于液压封隔器可以在井内连续使用 8 次，因而测试工作一直可以进行到钻头完全磨损，此后起出全部钻具。

随着对自喷层段进行测试的工艺技术进一步发展，已经建立了借助于地层综合测试装置（КОИП）对地层进行综合研究的方法。其操作程序为：钻开地层同时取心，用活动取心筒取心并捞出地面；再往钻杆里投入或用绳索往钻杆里下入取样器对已钻开的层段进行试油，然后借助于用电缆下入钻杆里的仪器进行地球物理测井。

这种地球物理测井和试油可以连续进行多次，顺序不限。

采用电通道将井底仪器与地面联系可以把取样器里的压力与温度变化信息传递给地面仪器，并能够以很高的精度确定短时间内流来的地层液（气）体充满取样器工作腔的速度。通过对岩心、测试结果的解释和地球物理测井的解释的研究，可以得到详细的，非常接近于井底地层原始状态下的岩石性能资料。因为全部作业都是在很短的时间里完成的。

将地层测试与地球物理测井综合起来进行具有重大的组织上的意义。因为在当前石油生产联合企业机构里，地层测试工作是由地球物理服务处来完成的。如在斯塔夫诺帕油气联合企业在油田上组织地层测试工作就是一个例子，那是首先采用钻井中途测试方法的第一个油区之一。

斯塔夫诺帕油气联合企业钻井处的地层测试服务站，有两个地球物理小队（库姆小队和

喀夫喀什小队) 和一个油田地球物理勘探队。小组是基本生产单位。有的小组负责地球物理测井与地层测试工作(如库姆小队)。这样的小组由五人组成(组长、操作工程师、测试技师、测井技师和机械员)。此外, 有的小组只负责地层测试工作, 它由五个支队组成(如喀夫喀什小队), 每个支队配备两名测试技师(其中一名为老练一点的)和一名机械员。这些专门人员到井上去, 既从事地层测试工作, 还进行测试仪器的检查与小修工作。

每个测试小组配备有用于 118~295 mm 井径的 КИИ 组合地层测试工具; 用于 161~295 mm 井径的 МИП 多流地层测试器及 МГП—3 М, МГИ—1 М 与 МИ—1 型深井压力计。每个小组都配有供修理设备、汽车的工棚和移运测试工具的专用设备。

钻井公司是地层测试的甲方, 他与乙方(油田地球物理站)签订进行地层测试工作的技术合同。其内容包括地质面积、井号、组合测试工具与测试规范的说明。乙方负责按批准的合同计划组织测试, 取得高质量的深井压力曲线并对测试结果进行解释。

库姆站每年都要在 1300~4225 m 深的井里进行 200~240 次地层测试工作。近两年来主要在深井(2300~3800 m)里进行地层测试。

按标准每个层位的测试时间与井深有关, 其幅度从 15.5 h(井深 1000 m)到 47 h(井深 5000 m)和 62 h(井深 7000 m)范围内变化。一个小组每小时的费用为 24 卢布 59 戈比。此外, 要预付使用双封隔器费用(24 卢布 59 戈比)和必要的误井费(每小时 17 卢布 22 戈比)等补充费用。

单层测试实际消耗的时间为 14 h(井深 2500 m)到 46 h(井深 4500 m), 按这个定额计算测试费用。

这样, 2745 m 左右的井的地层测试的费用, 包括请测试小组及他们行驶 30 km 距离的费用在内, 大约需 800 卢布。这比国外同类型的地层测试费用要低得多。

现在国外基本上也采用中途测试方法。例如, 美国在探井中有 85% 左右的地层是用中途测试方法进行的。

在美国从事地层测试与试油工作的有以下公司: 江斯顿公司是用钻杆把测试工具下放到井底和井壁上进行地层测试的; 哈利伯顿也是专门生产用钻杆下入的测试工具的公司; 莱因斯公司生产座底式和非座底式的地层测试器都用钻杆下入井内, 而试油器是投入式的; 斯伦贝谢公司生产用电缆下入井内的地层测试器。此外, 还有一些别的地层测试装置和检测仪器, 由波文公司(机械式、水力式与安全接头), 和卡斯切尔公司(自动记录的深井压力计与温度计)生产。

例如美国贝克集团的莱因斯公司就可以作为在国外的油田上组织地层测试工作的例子。

公司专门研究和制造压气式(水力式)封隔器, 以及与这些封隔器同时使用的地层测试工具。

在对探井进行测试时钻井工作应服从于寻找与勘探隐蔽产层的任务或者取得有关地质剖面的最多的资料。这就是为什么在用取心方法钻开层位时的根本任务是在于获得最高的取心收获率, 而不是最大的机械钻速或钻头进尺的道理。

地球物理仪器下井前要认真细致地做好准备。为了避免下放过程中仪器空转, 下井前应对所有的井下传感器进行认真检查与校正。

为了高质量地完成地球物理测井工作需要花费很多时间。如沃明克州, 在井深 4700 m 处进行地球物理测井, 整整持续了 5 h, 全面优质地完成了任务。

下面给出了用莱因斯公司的地层测试器在不同井深下进行单层测试的价格、所列的价格包括多流测试，以及使用诸如双封隔器，液力泵和压力补偿器等这些采油设备。使用其它的可能列入地层测试的设备另外付款。

目的层井深, m	0~1830	1830~2135	2135~2440	2440~2745	2745~3050	3050 m 以上井段 每 305 m 的价格	测试不成功
价格, 美元	809	836	865	894	902	36	812

测试仪器中较贵的部件是压气式水力封隔器，它的使用价格见表 2。

表 2

封隔器外径 mm	封隔器的使用价格, 美元 (下部封隔器的下入深度, m)			
	0~2135	2135~2440	2440~2745	≥2745
127	278	319	358	397
143	317	362	407	452
152	396	454	510	566
178—187	480	550	618	686
193	504	576	648	720
200	530	606	682	757
229	580	662	745	828
279	665	750	853	949

每下一次井要向甲方征收 188 美元, 每下一只直径小于 121 mm 的安全接头收 30 美元, 大于 121 mm 的要收 65 美元。

这样，在井深 2745 m 左右，使用 178 mm 封隔器从上面和下面封隔地层进行选择（按井段）测试，所需全套测试装置的价格是：

$902 + 686 \times 2 + 188 + 65 = 2527$ 美元

为了进行对比，表 3 引入了用带机械式封隔器的哈利伯顿型普通钻杆地层测试器进行一般测试的价格。

为了进行比较，要在表 3 所列的价格中加上使用封隔器及其他附件的价格。例如在井径

表 3

井 深, m	测试费用, 美元	井 深, m	测试费用, 美元
0~1220	394	3350~3650	661
1220~1525	427	3650~3960	692
1525~1830	466	3960~4270	724
1830~2135	497	4270~4570	755
2135~2440	536	每 350 m	30
2440~2745	569	4570 m 以下	30
2745~3050	598	测试不成功	166
3050~3350	630	测试不成功	166

大于 254 mm 的井中测试时使用了封隔器，还应向甲方补收第一组橡胶元件的价格 272 美元，此后为 191 美元，以下类推。另外还要补收往井下下放仪器和安全接头的高税率费用。

在同样的 2745 m 左右的深井，用哈利伯顿型工具进行测试的费用为：

$$598 + 272 + 188 + 65 = 1123 \text{ 美元}$$

即比用莱因斯公司的工具测井费用低一半以上。

这是莱因斯公司的测试工作量不大的原因。

但是，莱因斯公司的地层测试器也有它自己的使用范围，就是在那些不能用带机械式封隔器的地层测试器进行测井的地方使用。

设备部件的修理包括拆卸、更换磨损了的零件、装配。不能就地修理和修复零件。

设备的修理工作由在井上进行测试的人员负责进行。所以，准备工作的质量在很大的程度上决定了测试工作质量，从而，在装修地层测试器的工作中能提高工作人员的技术素质。

第一篇 在钻井过程中钻开油层

第一章 在钻开地层的过程中井底区域

岩石储集性质的变化

在钻井过程中，由于本区地质结构的特点，在井底区域可能会发生各种复杂情况，这会对继续钻进带来一定的影响。根据地层的矿物-岩石特性，以及油-气-水的出现情况，会使井筒破坏，形成洞穴，发生崩落、垮塌、地层水力压裂、钻井液漏失等。在钻井过程中消除这些复杂情况，就不会对此后的油井的投产或取得所必需的地质剖面资料产生严重的影响。

即使由于很小的复杂情况而造成在生产层中的井底区段的变化，都具有十分重要的意义，它们不仅影响到钻井过程，更重要的是影响到在试井时取得的最终结果。无论是钻生产井还是探井，这些变化都是不希望有的，因为它们会降低生产井的初产量，而且使探井中测试层的天然特性失真。在钻开油层过程中要达到完全保存油层的天然特性，采用现代化的装备实际上也是实现不了的。只能力求在生产层中钻进时保证井底区段的变化最小，而这一点只有在这种情况下方可实现，即要知道哪些是引起地层的岩石状态变化的因素，并能确定出这些因素对降低岩石天然特性的影响程度。这就是打开油层时，在这段地层中钻进的过程，成为国内外在许多实验室内和油田上的研究对象的原因。

还是在普及旋转钻井方法的初期，就已发现冲洗液——泥浆对产层出油及完钻后的试油有不良影响。井壁形成泥饼导致产层孔隙通道堵塞，被认为是造成这种现象的主要原因。

后经研究查明，在钻井过程中钻井液对井底区段岩石的影响相当复杂，而且伴随有使岩石的天然状态产生质变的物理-化学作用过程。

侵入地层孔隙的钻井滤液和固体颗粒会降低井底地带整个侵入深度内岩石的天然渗透率^[19]。现已查明，由于滤液渗入含有泥质物的地层中会使泥质颗粒膨胀，从而导致井底地带孔隙通道变小。滤液对产层的不良影响还在于可能形成稳定的油水乳化物，在很多情况下会导致井底地带的渗透率明显下降，或者由毛细管力保持在产层中的残余水带的渗透率的明显下降；这些地带都会阻碍地层液体向井内流动。在滤液与地层液体接触时，由于化学反应的结果，还可能形成非溶性的盐类沉淀，这会使产层的孔隙通道部分或全部堵塞。

许多作者的室内和矿场研究曾确定，钻井液及其内所含的固体颗粒对产层的影响程度并不一样，这与钻井滤液和地层液体的物理-化学性质以及地层的岩性特征有关。

水基钻井液的滤液对降低产层的渗透率影响最大。对在巴什基利亚、鞑靼和斯塔夫洛波尔油田钻开产层的成果分析表明，采用水基钻井液会大大增加试井时间^[38,20,21]。例如，在巴什基利亚钻开产层时，用低质量的钻井液或清水洗井，使试井时间平均增加30~35%，并且导致初产量降低15~20%^[26]。在鞑靼石油联合企业的阿布德拉赫曼诺夫区进行的矿场研究表明，清水侵入井底地带导致地层的渗透率显著下降。在所分析的例子中，地层经清水

处理后,从井壁到供给区边界的地层平均渗透率从0.58降到0.25达西,即下降一半以上^[24]。而且还知道,在地层的剖面有膨润土存在也能降低井底地带岩石的渗透率。例如试验室内试验发现,岩心中的泥质含量2~3%左右就会使渗透率降低30~40%。钠型泥岩最容易在水中膨胀,钾型泥岩膨胀较小^[63,81,102]。因此含钠型泥岩的岩石渗透率下降最多,而且在淡水和碱性水介质中,这些泥岩产生的膨胀要比在矿化水中更强烈。

然而,不仅仅是泥岩的膨胀会导致井底地带渗透率下降。在没有泥岩的地层中,由于油水乳化物的形成,岩石的渗透率也会降低^[7,82]。

实验表明,苏联各个地区生产的原油,都能与淡水形成稳定的乳化物,而且有些乳化物能存在数月之久^[3,25]。

国外研究人员的成果也证实了上述情况^[16,74]。

需要特别强调的是,产层的岩石渗透率的改变同钻井滤液与井底地带相互作用的时间及其侵入产层的深度有重要关系。应当指出,在钻进或下钻过程中,在过剩的压力的作用下,不仅是钻井液的滤液而且其内所含的固体颗粒都可侵入地层。但其侵入的深度和数量的变化范围很大。例如实验发现,当把含有固体颗粒的水基钻井液,经人工胶结的砂层渗滤时,其表面上会形成厚达2~2.5 mm的致密泥饼,而固体颗粒却没有侵入到砂样的孔隙中,但是过滤水可侵入15~20 cm之深。用渗透率较大的砂岩岩心试验时,固体颗粒侵入深度为15~20 mm,而当经过大粒砂渗滤时泥质颗粒侵入的深度可达45 mm。在鞅鞅和秋明的生产井中也对滤液和固体颗粒向产层的侵入进行了测量,那里的油井经过长期开采,仍有钻井滤液和固体颗粒与地层液体一起被采出地面^[66,67],而且发现,钻井液的固相物质向产层的侵入能使其渗透率降低10倍以上^[63]。钻井液的固体颗粒在裂缝性储集层,以及打开泄油较强的产层时侵入得最深^[4]。

这些成果也被国外的研究所证明。当钻井液经人工岩心渗滤时,滤液侵入的深度为300 mm以上,而固体颗粒则在其外部形成一个薄层^[15]。在裂缝性岩石中,溶液的固相物质可以侵入到30 cm以上的深度,而且在远离井壁的产层深处,固体颗粒侵入的数量也减少,因而其对井底地带岩石的影响也随之变小^[54]。但是即使溶液侵入很短的距离,井的产能也可明显降低,因为井筒附近的岩层渗透率的下降对井的产能的影响比什么部大。

滤液侵入井底地带地层岩石的能力,在很大程度上取决于钻井液的物理-化学性质,首先是失水量。通过对滤液侵入地层过程的研究,确定出了钻井过程中发生的三种渗滤形式:
a)钻井液向钻头以下岩层的侵入,即井底加深过程的超前渗滤; b)钻井液循环时,经过井壁发生的动渗滤; c)钻井液在井内停止循环时的静渗滤。

在其它条件相同的情况下,在这三种形式的渗滤中以动渗滤的值最大。

室内及矿场研究发现,液流的循环速度,静水柱压力,溶液的粘度及井底温度对动渗滤都能产生影响^[43,46]。随着流速的加大,溶液的失水量也增大,而且在高温条件下流速的影响更明显。例如流速增加的值相同,在低温下(+18℃)溶液的失水量增加25%,而在高温下(+100℃)则达350%^[45,55]。

在钻开产层的其它条件相同的情况下,进入地层的滤液和固体颗粒的数量在很大程度上取决于井和地层之间的压差。钻开地层过程中的复杂情况,往往是由于剩余压力引起的,它会导致产层出现水力裂缝,随之而来的是钻井液强烈漏失。

经验表明^[11],钻开产层时井底过大的静压力可能达到很大数值(达5~6 MPa以上)。应