

PETROLEUM

石油工业出版社

裂缝性碳酸盐岩油藏的测试及分析

中国石油天然气总公司情报研究所 编译



PETROLEUM INDUSTRY PRESS PETROLEUM INDUSTRY PRESS

录号	- 087034
分类	TE 344
种次	006

裂缝性碳酸盐岩油藏的 测试及分析

中国石油天然气总公司情报研究所 编译



200419378



00792738

石油工业出版社

内 容 提 要

针对裂缝性碳酸盐岩油藏的特点以及测试这类油藏存在的问题,从浩如烟海的论文中,精选了8篇文章馈赠给读者。这些文章包括压力恢复试井、脉冲试井等方法,本文集不仅论述了这些方法的具体使用情况,而且结合具体实例对其精确程度也给予了评价。并且给读者提供了可借鉴的信息,这将有助于裂缝性油藏测试技术的应用和发展。

本文集可供从事油藏工程、采油工程的技术人员参考。

(本书由朱恩灵统校)

裂缝性碳酸盐岩油藏的 测试及分析

中国石油天然气总公司情报研究所 编译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

地质出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 $9\frac{1}{4}$ 印张 229千字 印 1—2,000

1991年9月北京第1版 1991年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0631-6/TE·600

定价: 2.55元

前 言

我国的石油勘探和开发工作，在“稳定东部、发展西部”的战略方针指导下，“七五”期间，在新疆塔里木盆地以及其他地区，取得了重大进展。

塔里木盆地中已发现的油气田，具有其独特的条件，如油气藏多储于海相的古生界地层中，地处沙漠腹地，埋藏深，气油比高，有的储层为与古岩溶有关的碳酸盐岩层等。油气藏的条件与我们所熟悉的东部地区各油田有较大的差异。

为了贯彻“经济建设必须依靠科学技术，科学技术工作必须面向经济建设”的基本方针，使科技情报工作更好地为石油勘探和生产服务，根据国外有较多的深层海相油气田勘探开发经验的情况，作好“洋为中用”的信息服务，就可以使我们少走弯路，得到好处。

为了对我国石油勘探的重点地区塔里木盆地作好信息服务，我们组织了所内外的有关科技人员，作了专题文献检索、专题译文、专题报告等方面的服务工作。考虑到这些译文和报告，对我国其他地区也有参考价值，特将译文精选，重新审校，按专题汇编成册，由石油工业出版社出版、发行，供有关同志参考。

这套文集包括：《古岩溶》、《碳酸盐岩油藏的地震勘探》、《裂缝性碳酸盐岩油藏的测试及分析》、《深井钻井技术》、《深井采油工艺》等。

随着塔里木盆地油气勘探开发工作的进展，我们将继续编译出版有参考价值的文献，并希望广大读者给我们提出批评和建议，以便我们能把工作做得更好。

中国石油天然气总公司情报研究所

总工程师 胡文海

1991.1

目 录

一个北极裂缝性碳酸盐岩油藏的测试及评价: 普鲁德霍湾的 Lisburne 层	(1)
裂缝性碳酸盐岩油藏干扰试井: Lisburne 油藏实例研究	(9)
普鲁德霍湾油井早期压力恢复分析.	(30)
干扰试井预测天然裂缝性油藏中的早期水窜	(47)
碳酸盐岩油藏中的分层和压力恢复分析实例	(64)
带表皮效应和续流效应的非均质油藏的试井解释 ——几种新的理论解和一般现场经验	(80)
西得克萨斯—碳酸盐岩油藏压力降落试井的常规分析和典型曲线分析的对比	(106)
用于天然裂缝性油藏分析的典型曲线	(119)

一个北极裂缝性碳酸盐岩油藏的测试及评价： 普鲁德霍湾的 Lisburne 层

Fisher D.W. (Sohio Alaska Petroleum Co.)
Clutterbuck P.R. (Reservoir Development Assoc.)

朱恩灵 译

摘 要

Lisburne 组为位于普鲁德霍湾二叠—三叠系主要产层以下的宾夕法尼亚—密西西比期的碳酸盐岩层序。在过去三年中，由于努力进行探边和评价工作，加快了对油田开发的财政投资，计划于 1986 年 12 月投产。

为了评价这一复杂的裂缝性低渗灰岩及白云岩油藏，本文对井的设计和实施细节进行了讨论。在阿拉斯加极地采用了一些以往未曾使用和罕见的操作和测试技术，例如低比重泥浆和水泥浆，低伤害的压力取心，应用裸眼溶剂，充氮酸化进行裸眼井测试，下套管井的氮气举升测试及压裂处理等。在难以进行测试地层中应用这些方法有助于获得确定性的测试结果，并且可以建立起进行工业性完井的方法。为了能使井的资料用于整个评价过程，对于油井结果分析的方法进行了详细地讨论。

引 言

Lisburne 初始开发区的面积约为 30000 英亩 ($1.21 \times 10^8 \text{ 米}^2$)，它位于普鲁德霍湾下，周围与陆上区域相连。根据计划，它与二叠—三叠系油藏剖面的东北角相重合，如图 1 所示。

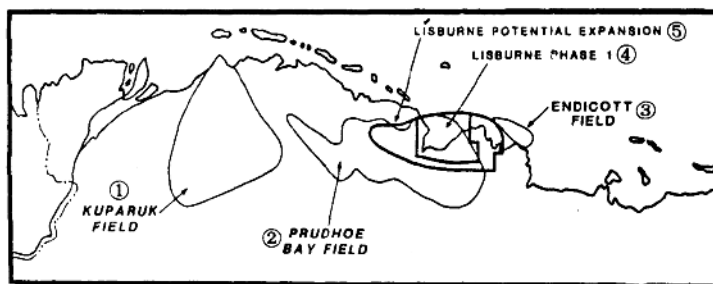


图 1 北斜坡位置图

- (1) 库拉鲁克油田；(2) 普鲁德霍湾油田；(3) 安第考特油田；(4) Lisburne 开发第一阶段；
(5) Lisburne 可能扩大的区域

Lisburne 单斜储层的北部为尼阿库克 (Niakuk) 断层所封闭，而且为下白垩系所侵蚀，在东北部分为不整合接触 (图 2)。Lisburne 本身被“格林页岩”标准层划分为上、下两个层段。上 Lisburne 层段为含有燧石和砂岩夹层的灰岩和白云质灰岩的层状层段，而原油

产自最早投入的开发区。下 Lisburne 层段由含有致密石灰岩夹层的孔隙性白云岩薄层和具有好到极好结晶孔隙度和基岩渗透率比较均匀的白云岩层构成。在最早投入的开发区对这些层段进行了油、水测试。Lisburne 的标准地层剖面如图 3 所示。

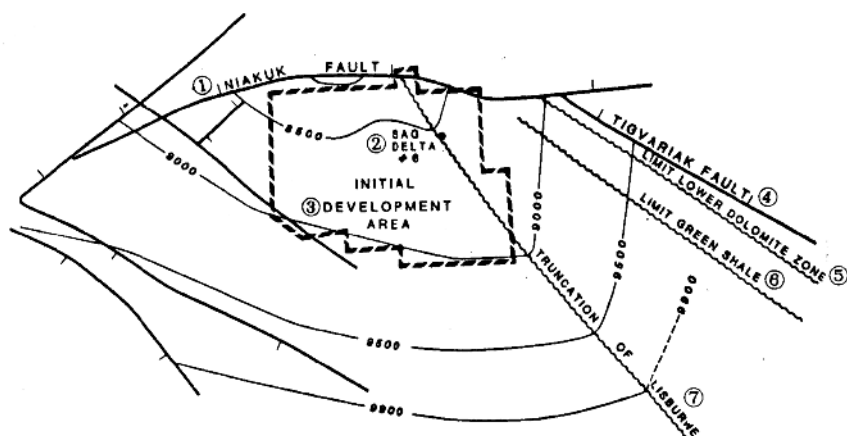


图 2 最早开发边界的 Lisburne 的顶部构造图

- (1) 尼阿库克断层；(2) 下陷三角洲 6 号井；(3) 最早投入的开发区；(4) 泰格瓦瑞阿克断层；(5) 下部白云岩层段的边界；(6) 格林页岩的边界；(7) Lisburne 组的截顶

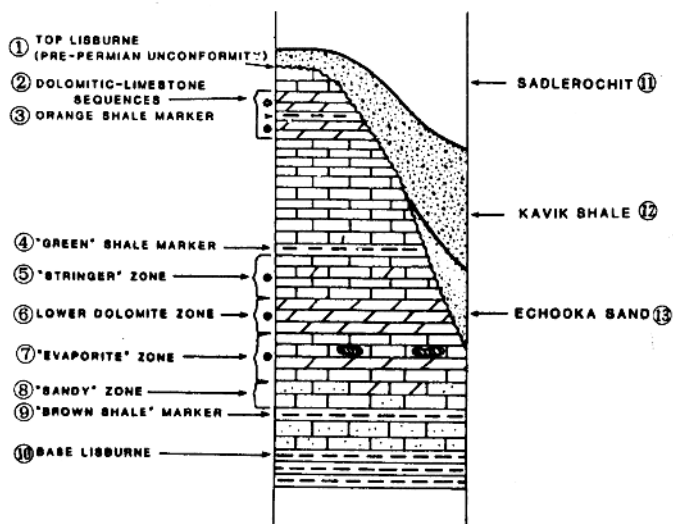


图 3 Lisburne 的地层剖面

- (1) Lisburne 的顶部 (前二叠系不整合)；(2) 白云质灰岩序列；(3) 橙色页岩标准层；(4) 格林页岩标准层；(5) 薄层；(6) 下部白云岩层段；(7) 蒸发岩层段；(8) 砂质灰岩层段；(9) 棕色页岩标准层；(10) Lisburne 层的底部；(11) Sadlerochit 产层；(12) 卡维克泥岩；(13) Echooka 砂岩

Lisburne 油藏数据的研究要追溯到阿科石油公司在普鲁德霍湾所钻的第一口探井。1967—1968 年的试油已经证实 Lisburne 层段存在可开采的烃类。1969 至 1978 年在此地区为了进一步探明油藏的边界和证实 Lisburne 气顶的存在又钻了一些补充井。

随着原油价格的上涨和二叠—三叠系油藏产量的下降。80 年代初增加了对 Lisburne 油藏的兴趣。为了阐明 Lisburne 油藏能够经济地开采而扩大了试油工作, 所获得的油藏动态资料为 1984 年油田投入开发提供了进一步的论据。

在钻探边井和测试工作中, 适用于北斜坡碎屑岩地层的标准工艺显然不适用于裂缝性碳酸盐岩环境下的作业。作业中的问题包括循环漏失、固井时地层的破裂、有效增产措施设计和在有限季节中测试几个层段的有关后勤保证。

评价问题是比较复杂的, 在许多情况下, 测井评价结果与岩心描述及流动试验结果之间存在着明显的的不一致性, 即矿场测井解释和岩心测定均指出该层段产油, 但测试结果表明该层段大量产水 (或者极少的油、气)。在有效完井和增产方法设计之前, 不能断定这些情况是由完井问题造成的还是油藏问题造成的。因此, 评价工作的主要目的是确定与测井和岩心资料相关的确定性的测试结果。这就需要进行详细的检查, 不仅仅是测试方法, 而且也包括目前用于油藏分析的评价理论。

下陷三角洲 6 号井 (Sag Delta 6 井) — 钻井研究实例

1984 年由 Sohio 公司所钻的 Sag Delta 6 井, 位于 Lisburne 油藏所规划的最早投入开发区的东北部 (参看图 2), 这口井的目的是进一步确定此区的产能, 由于它是预定开发区中储量的探明井, 准许建筑一条通向井场的砾石路, 保证在有限工作季节以外时间, 可通过结冰的道路通向井场, 并进行勘探和探边钻井工作。

Sag Delta 6 井为一定向井, 水平位移为 1200 英尺 (365.76 米)。为了防止受到 Lisburne 油藏以上二叠—三叠系 Sadlerochit 层低压层段的影响, 避免使砂岩地层产量下降, 套管设计时将 133/8 英寸 (33.97 厘米) 的表层套管下至 600 英尺 (182.9 米), 超过普鲁德霍湾普通井的下入深度。在钻到 Sadlerochit 层之前下入中间技术套管。随后以 121/4 英寸 (31.11 厘米) 的井眼穿过 Sadlerochit 层。将 95/8 英寸 (24.44 厘米) 的套管下在 Lisburne 层上部, 随后钻 81/2 英寸 (21.59 厘米) 的井眼, 并将 7 英寸 (17.78 厘米) 的衬管下至井底深度。图 4 给出 Sag Delta 6 井的套管设计程序。

根据评价需要和机械设备的限制对泥浆体系提出一定要求。根据井的取心计划, 规定取 1100 英尺 (335.3 米) 的低伤害岩心 (bland core)。为了保持岩心的原有润湿性, 改善相对渗透率、水驱敏感性和油-水毛管压力的测试, 选择低伤害泥浆 (bland mud)。

除了低伤害取心要求外, 为了防止发生循环漏失问题, 需要维持最小的正压。为了避免对地层的冲击和维持最大的泥浆比重 (9.6 磅/加仑, 即 1150 公斤/米³), 应当特别注意缓慢地下入钻柱。为了监测岩样的侵入情况, 在泥浆中加进氡示踪剂, 它也可以用来证实流动测试中泥浆滤液的产出。

固井设计方案也会受到钻井过程中循环漏失的影响。为了使钻杆能上下运动, 对于长达 2100 英尺 (640 米) 的衬管采用单级注水泥措施, 为此所设计的水泥浆比重为 13.2 磅/加仑 (1581.7 公斤/米³), 它比通常用于北斜坡地区的 16—17 磅/加仑 (1917.1 公斤/米³)—

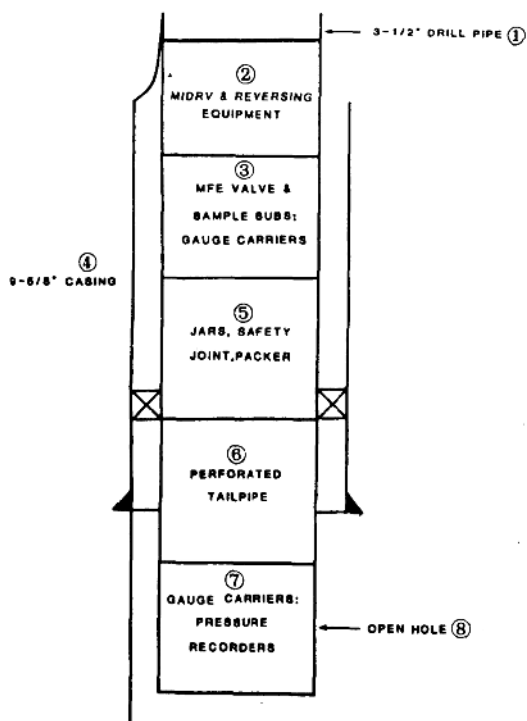


图4 Sag Delta 6 井的套管程序

- (1) 3 1/2 英寸钻杆; (2) 中间泄压阀及换向装置; (3) 多流地层测试器阀及取样特形接头; 仪表承载器; (4) 9 5/8 英寸套管; (5) 震击器, 安全接头, 封隔器; (6) 带孔尾管; (7) 仪表承载器; 压力计; (8) 裸眼井筒

2037.0 公斤 / 米³) 的水泥浆要轻些。

总的来说, 钻井程序的结果是好的, 在钻井和固井过程中未发生大的液体漏失情况。与在某些粉砂岩一页岩层段所观测到的井眼扩大情况相比, 井眼的状况是好的。在岩样和流动测试所得到的早期液体样品中观察到较低浓度的氡。在电阻测井曲线上未发现明显深的液体侵入层段。这可能由于钻井泥浆和滤液将与井筒相交裂缝中的地层流体驱走所致。

根据水泥胶结测井结果可知, 固井质量是变化的, 整个管柱上的固井质量时好时坏, 但能将各层段封隔开。由于在上 Lisburne 层一次测试中产出一些水, 曾试图通过有怀疑的通道进行水泥浆循环试验, 但由于不能进行盐水循环, 则放弃了挤水泥工作。随后的垂向脉冲试井和放射性示踪剂测试并不能肯定水是否通过套管环空或裂缝造成窜通。

地 层 测 试

由于层段厚, 并且存在大量潜在生产层段, 对于 Lisburne 的探边井曾进行过广泛的测试, 总起来曾采用过三种测试方法: 裸眼井中途测试、套管井中途测试或短期生产测试(试油)和长期试油。

裸眼测试。在 Lisburne 层进行裸眼测试的主要目的是得出油藏中流动相确切的显示, 并评价裸眼井的产能, 为合理地设计套管内测试或生产测试提供充分的资料。

裸眼测试成为解决下 Lisburne 层岩心和测井数据与试油结果不相对应问题的一种主要手段。在这些情况下从所观测的岩心可看出, 污染的重质油和渗出的油来自裂缝; 根据测井资料所计算出的含油饱和度高达 50-60%, 而在套管内进行试油时得到的却是含有微量原油的水。由于怀疑这一结果, 甚至有一次又重新进行了钻井。在具有很好石油显示和可以使人接受的计算出的测井资料为含油饱和度高的层段进行了套管内测试工作。

由于下述原因, 裸眼测试方法被推荐为确定油藏中流动相的一种确切方法。

- (1) 减少地层与外来流体间的接触;
- (2) 为了建立液体接触的存在, 对小的层段进行测试是可能的;

(3) 可以消除液体沿水泥窜槽处流动问题;

(4) 由于没有外部流体的进入, 因此试油层段的排液时间很短, 产生的流体只能来自测试层段。

一旦裸眼测试在新钻成的井中或取心层段实施, 则裸眼测试的应用将更为普遍, 并且其测试结果通常用以验证以往套管内的测试结果。例如, 当有明显油气显示, 并且根据测井资料所确定的含油饱和度高的层段产水时, 要对油层岩心和测井解释进行重新评价, 这对油藏描述将是有帮助的。

裸眼测试结果可以为已批准的套管内测试提供证实和设计准则。更为重要的是单一层段测试不仅可以节省大量时间, 而且还能消除对测井结果和描述数据的错误解释。通过对测试结果与实验结果一致的毛管压力—相对渗透率数据之间相关关系的认识, 将会进一步改善油藏描述工作。

在 Lisburne 油藏进行裸眼测试使用的标准设备组成如图 5 所示。下入的工具一般包括三个电子晶体传感器压力计和一个机械式压力计。未坐封的封隔器上的取样孔关闭时采集了井下液样。进行测试时钻柱中加入水垫或氮气垫, 当用以判断流体为主要目的时最好应用氮

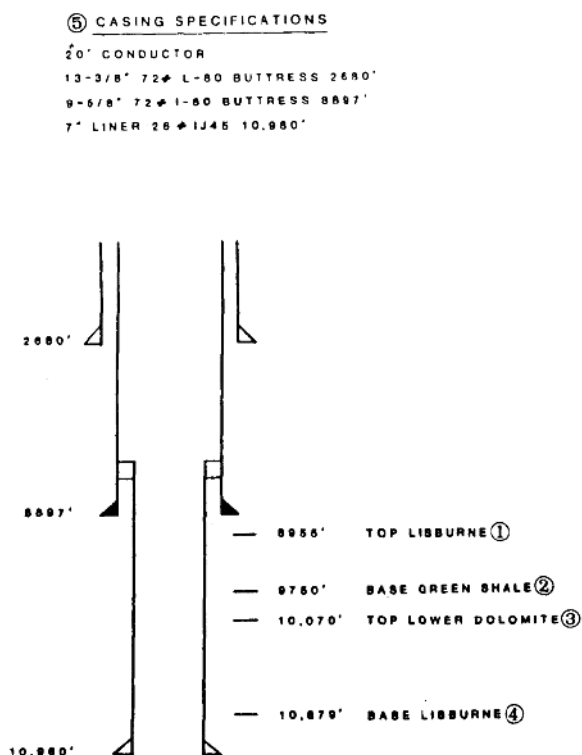


图 5 标准的裸眼测试工具

(1) Lisburne 油藏顶部; (2) 格林页岩的底部; (3) 下部白云岩层顶部; (4) Lisburne 油藏底部; (5) 套管规范: 导管为 20 英寸; 13³/₈ 英寸 72 磅的 I-80 型中间技术套管下至 2680 英尺; 9⁵/₈ 英寸, 72 磅的 L-80 型技术套管下到 8897 英尺; 7 英寸, 26 磅的 U45 型衬管下至 10980 英尺

气垫。

测试前需要进行增产处理的层段，将少量增产用流体循环到测试工具中，然后用氮气将其挤入地层，对于位于套管管鞋以下的测试层段，为了进行测试工作，测试用的封隔器坐于套管内，进行增产处理时先用互溶剂进行预冲洗，然后挤入含有破乳剂浓度为 10-15% 的盐酸及缓冲剂柴油。注入的体积不大，大约比井底口袋体积大 50%，因为处理的目的是为了井筒与地层建立适当的连通，而不需要对地层进行增产处理。在裸眼井中使用封隔器进行测试时，为了防止对封隔器的坐封对油层带来可能的损害，省去挤酸阶段。

套管内的测试。在 Lisburne 油藏圈定边界的初期，几乎所有的测试均是在下有套管的井内进行的。这是由于自下而上依次射开产层、增产处理、测试及封堵作业比较容易和相对安全。这些早期探井通常存在几个可能需要测试的层段，这些下有套管的井由于季节的限制被迫停止测试时，可以将测试目标暂时封堵起来。应当指出早期的这些井的费用是相当高的，因此不能为以后的完井及开采工作提供指导。

在很多新井中，由于裸眼测试的不安全和不实用，采用了大规模增产处理配合气体举升技术的套管内测试。它将成为有希望的后继测试方法。

在 Lisburne 油藏任何套管内测试方案中，增产处理成为其中必要的组成部分。许多井在下套管和射孔后，一些测试层段不经过增产处理就不能获得稳定的产量，这表明表皮损害是严重的。

采用了包括酸压、稠化柴油压裂、溶剂处理、充氮酸化处理及标准酸处理在内的各种增产处理技术之后，它们具有不同程度的成功性。增产处理的成功性主要取决于进行增产处理层段的质量而不在乎增产处理的方法。一般来说对于质量较差的地层采用大型增产处理，这是由于大多数普通处理的成功性很低。岩石质量差是由于裂缝遭到封堵、基岩岩性致密和横向的非连续性而造成的。由于液体在裂缝体系中发生漏失，则滤失及处理的方法仍然是一个问题。

实验室的研究结果指出，Lisburne 油藏的原油与盐酸的混合有产生乳状液的趋势，因此在处理配方中采用了预冲洗互溶剂，它可以使泥浆产生分散，并成为地层油的缓冲剂，随后注入含有工业用破乳剂的盐酸。在许多增产处理中广泛应用充氮增产液体，它们可以缩短液体反排时间。这些液体通常应用氮气将其挤入地层，而且某些柴油可以降低所需井口压力。

在套管井内测试时曾采用过几种不同工具组合类型。应用充氮压裂液有助于井的卸载。图 6 (a) 中给出所使用的普通中途测试管柱。这种装置也可采用油管传送射孔枪，以便在进行射孔之前达到最佳负压条件。采用大型气举能在几天之内将返出的增产液体排出，采用了装有气举心轴的油管完井，并装有测试井口，这种装置的示意图如图 6 所示。

生产测试。为了进行长达数月的生产测试工作，在钻井设备拆除之前装好具有测试井口的标准油管完井系统。为了保持井口温度和降低结蜡和产生水化物的危险，标准测试完井系统中的绝热管柱至少等于冰冻层的深度。在进行压力恢复和压降试井中应用地面读数的石英晶体压力计来监测压力。采取井下取样进行地层流体的 PVT 性质分析。

这些测试将给出 lisburne 油藏井的长期产能，通过生产测试证实在开发初期上 Lisburne 层的井的稳定石油日产量可达几千桶。获得的油气比和压力动态为油藏描述提供了重要的信息。

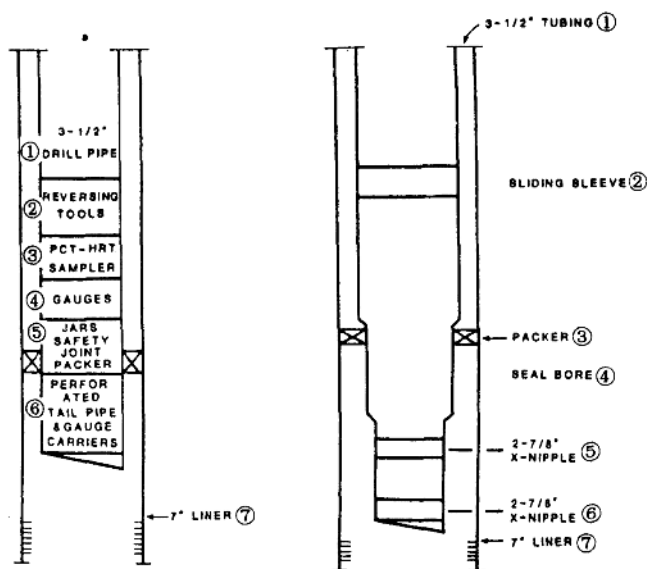


图6 (a) 套管内测试用的中途测试工具; (b) 生产测试完井

(a) (1) 3 $\frac{1}{2}$ 英寸钻杆; (2) 换向工具; (3) 压力控制地层测验器-高分辨井温仪及取样器; (4) 压力计; (5) 带有震击安全接头封隔器; (6) 带孔尾管及压力计承载器; (7) 7 英寸的衬管

(b) (1) 3 $\frac{1}{2}$ 英寸油管; (2) 滑动套筒; (3) 井下封隔器; (4) 密封井眼; (5) 2 $\frac{7}{8}$ 英寸 X 型短接; (6) 2 $\frac{7}{8}$ 英寸 X 型短接; (7) 7 英寸衬管

井 的 分 析

根据 Lisburne 油藏井的进度表获得三种基本类型的信息, 即地质信息、岩层物理学的和工程信息。Sohio 井的分析目的, 尽可能将现有的资料进行综合描述而构成油藏动态模型的基础, 并成为油藏管理和规划的工具。

油藏描述的要素包括常规岩心分析、岩心裂缝的描述、岩石学研究结果、流体和岩石物性以及不稳定试井结果。上述资料收集齐全以后, 只通过对井的操作和后续研究, 应用一个简化的地质和工程模型很难精确地表征油藏的动态, 因此应用双孔隙度方法才能比较成功地描述油藏动态。再者, 孤立地使用测试所给出的一组信息, 也不能得出有关井动态的可靠结论。

结 论

1. 在北极地区裂缝性碳酸盐岩中的钻井和完井操作与普通碎屑岩地层有着很大的差异。在操作中主要应避免对地层的伤害, 而得到成功的增产结果;
2. 为了能较肯定地确定产液层段, 对于这类地层最好选用裸眼测试方法;

3. 为了使井筒与 Lisburne 产层之间建立良好的连通性, 进行增产处理所用流体应慎重选择以保证与地层流体的配伍性;
4. 根据肯定性的测试结果和井的工业性产能来进行完井设计;
5. 为了对此类地层测试结果进行评价, 需将有关地质、岩石性质和工程数据进行整体考虑, 对油藏数据的不完整分析将会得出错误的结论。

参 考 文 献

(1) Fisher, D. W. and McCormick, D. J.: "Lisburne Reservoir Characterization and Evaluation," presented at Sohio Reservoir Engineering Technology Exchange Conference, October 1984.

(2) Fisher, D. W. and Plisga, G. J.: "Arctic Completion and Testing of a Low Permeability Fractured Reservoir," presented at Sohio Completion Conference, February, 1985.

裂缝性碳酸盐岩油藏干扰试井： Lisburne 油藏实例研究

L.E. Sampson 等

司艳娇 译

王国清 校

摘 要

本文给出了在 *Wahoo* 地层中进行的一个 160 英亩五点法井网的干扰试井实例。该地层是阿拉斯加北坡 *Lisburne* 油藏内的一个裂缝性碳酸盐岩地层。通过这次试井得出了如下几个结论：首先，*Lisburne* 油藏是一个非均质地层，它可能具有双孔隙度和多层特性；第二，利用改进的普通各向异性渗透率技术可以对从四口观察井中的两口井中取得的干扰压力资料进行分析；第三，尽管在测试前做出了大量的计划和设计，但是，由测试所获得的油藏特性仍然与预计的有着差别。

在油田投产之前，进行了 *Lisburne* 干扰试井，其目的是用最少量的邻井进行干扰试井，确定定向渗透率和评价油藏内的纵向和横向连通性。在中心井中进行周期性的降压和压力恢复，同时，在四口边角井中监测压力。在开始测试之前，将井底压力记录仪安装在井筒中。在干扰试井期间，在观察井中观察到的压力响应比预计的要快得多，而且其值也较大。地面读数设备的使用，使得人们有可能在试井的同时对测试资料进行不稳定压力分析，因而使试井时间缩短，花费减少。

用双孔隙度典型曲线拟合法和半对数分析法对干扰井的资料进行分析，得到了油藏有效渗透率值，用压力降落资料分析与用压力恢复资料分析得到的结果十分一致。观察井的压力资料分析是用双孔隙度非稳态孔隙间流动典型曲线和半对数分析法进行的，其结果与干扰井的分析结果一致。

由于存在油藏的非均质性，所以四口观察井中只有两口井的压力资料可以用普通各向异性渗透率分析法进行分析。一般来说，这种方法需要三口不同方位的观察井的压力资料，才能获得一种解。但是，只用两口井的资料时，各向异性渗透率模型可以控制可行解，并通过岩心资料消去四个未知数中的一个以后，即可得到 *LIT* (*Lisburne* 干扰试井) 分析的一套完整解。

引 言

Lisburne 油藏位于阿拉斯加北坡普鲁德霍湾区块 *Lisburne* 分割区内 (如图 1 所示)。它是在 1968 年钻普鲁德霍湾 *Statel* 号井时发现的。*Lisburne* 油藏的开发一直拖延至 1984 年初，1986 年末才开始投产。由于这个碳酸盐岩油藏十分复杂，所以计划在油田投产前完成一个为期五个月的 *Lisburne* 干扰试井 (*LIT*) 方案，进一步评价油藏的目的在于为将来作开发计划做准备。这次试井的目标包括定量确定井网区域内地层的横向渗透率和连续性，以及评价油藏的各向异性程度。

因为 *Lisburne* 油藏可能表现为各向异性特征，所以试井是用扩散方程的指数积分分解的各向异性形式进行设计的。同样，还打算将各向异性干扰试井模型⁽³⁾与 *LIT* 分析结合起来。但是，当用双孔隙度模型只能分析四口观察井中两口井的资料时，由于油藏非均质性比

较严重, 所以 *Lisburne* 干扰试井之后接着进行的干扰分析被证明是很不直观的。在这种资料有限条件下, 为了得到完整的解析解, 研究出一种改进的普通干扰模型分析法。下面各节将介绍这种方法。

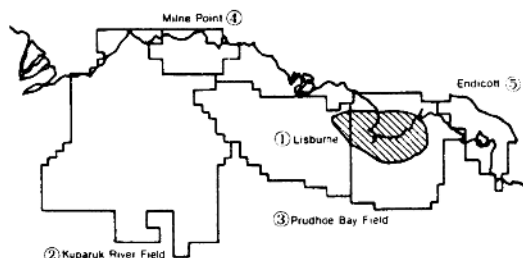


图 1 *Lisburne* 油藏位置图

(1) *Lisburne* 油藏; (2) *Kuparuk* 河油田; (3) 普鲁德霍湾油田; (4) 米尔恩角; (5) 恩迪科特

解 释 理 论

干扰分析是一种不稳定压力分析方法, 应用它可以得到包含干扰井和观察井在内的地层的资料。在 *LIT* 中, 由于测压是在非生产井中进行的, 所以减小了井可以忽略干扰井和观察井的表皮效应和井筒储存的影响。通过干扰拟合将得出传导系数 (kh/μ) 和扩散系数 ($k/\phi\mu C_p$) 的值, 用这两个系数可以计算出地层储存系数 ($\phi C_p h$)。根据井底流体样品分析估算出地层流体粘度 (μ) 和压缩系数 (C_p) 后, 就可能计算渗透率厚度之乘积 (kh)。在这个碳酸盐岩油藏内, 裂缝和多层的存在以及渗透率差异很大的石灰岩和白云岩相间层的特性, 这就有可能影响不稳定压力分析方法的使用。在这种情况下, 使用双孔隙度模型, 而不用单孔隙度系统, 因为前者更准确地描述了不稳定压力分析时裂缝或多层的影响。*Gringarten* ⁽⁴⁾ 和 *Aguilera* ⁽⁵⁾ 的研究证明, 双孔隙度系统的动态最终会类似于单孔隙度系统。在试井开始时, 流动动态完全决定于高渗透性系统, 在此期间获取的资料似乎是取自一个具有高渗透性或裂缝性系统特征的单孔隙度系统。随着试井的进行, 低渗透性或基岩系统的流体进入高渗透性系统所产生的影响越来越明显。在井筒中, 这个影响表现为高渗透性系统储存系数的增加, 因为高渗透性系统的产量越来越多地靠低渗透性系统的储存来维持。最后, 整个系统的动态表现为具有高渗透性系统的产能系数 (kh), 但却具有高、低渗透性系统的综合储存系数 ($\phi C_p h$)。在这个综合动态出现之后, 地层响应类似于一个单一均质系统的响应, 这时的试井资料可以用普通干扰分析技术进行评价, 即假设地层为流量保持不变的线源系统。正如 *Chen* 等人 ⁽⁶⁾ 所讨论的那样, 在裂缝性油藏中, 观察井的动态在初期和末期遵循指数积分分解, 第一个指数积分反映了裂缝系统的储存系数, 第二个指数积分反映了整个油藏的储存系数。

在 *LIT* 分析中, 很显然, 分层和裂缝不是影响试井资料及其分析的仅有因素。干扰试井资料表明, 油藏北部观察井的动态与南部井的动态有着很大差别, 前者的压降很大 (但并不相等), 而后的压降要小得多。南部井出现这种动态是由于下面几种原因, 其中包括中

心井与南部井之间渗透率或连通性较差的原因。在任何情况下,利用这里叙述的解析解方法,都不适合于将南部井的资料与北部井的资料进行直接对比。正象 Kamal⁽⁷⁾ 讨论过的那样,可以用数值解来分析南部非均质井的资料,本文未对此进行讨论。由于缺乏南部观察井的资料,所以解释过程中遇到一些障碍。南部井出现这种动态的原因本身是一个值得研究的重要问题,但本文不对其作进一步讨论。

各向异性模型

因为岩心分析已经表明,在 LIT 井网区域内,裂缝有一个主方向,这个主方向可能决定着最大渗透率方向,所以我们在干扰试井设计和计划时,选择各向异性渗透率模型作为基础。用于干扰试井分析的各向异性渗透率模型与均质模型⁽⁸⁾ 类似,二者有一个重要差别(如图 2 所示),即在各向异性模型中,最大渗透率(K_{max})的方向穿过整个油藏,渗透率随方向的改变而变化,最小渗透率的方向垂直于 K_{max} 方向。假设在整个油藏内,所有其它参数,如孔隙度、压缩系数、厚度和粘度等均为常数。Papadopoulos⁽⁹⁾、Elkins 和 Skov⁽²⁾ 和 Ramey⁽³⁾ 叙述过各向异性模型的分析方法。Papadopoulos⁽⁹⁾ 和 Ramey⁽³⁾ 介绍的解析解需要使用来自三口与干扰井呈不同方位的观察井的干扰资料。根据一个共压拟合点和三个不同时间拟合点,利用这三口井可以得到包含四个未知数(K_{max} 、 K_{min} 、 Q 和 $\phi\mu C_i$)的四个方程。对 Lisburne 油藏来说,情形与上述作者所述类似,但粘度已知,而产层厚度未知,因此, LIT 分析的未知数是 K_{max} 、 K_{min} 、 Q 和 $\phi C_i h$ 。

由于只有北部两口观察井的压力资料可以利用,所以 LIT 各向异性分析受到限制。这是因为有四个未知数,但只有三个方程。然而,可以给出可能解的范围。Elkins 和 Skov 给出了笛卡尔坐标中各向异性渗透率的矢量方程,它是针对两口观察井以径向坐标的形式给出的。在估算出或假设出 K_{max} 的方位角(Q)之后,对总方程进行代数处理,以计算出其它未知数。在 K_{max}/K_{min} 比大于或等于 1 的情况下,可以找出 K_{max} 方位角以及所有其它未知数的可能的范围。附录 A 给出了两口井各向异性模型的推导和交会图技术细节。

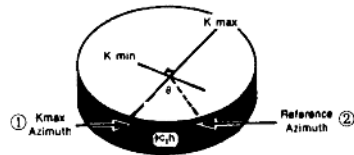


图 2 各向异性模型示意图

① K_{max} 的方位; ② 参照方位

油藏地质学

Lisburne 组是一个很厚的密西西比系和宾夕法尼亚系碳酸盐岩层系,它包含 Wahoo 和 Alapah 两套地层。比较浅的 Wahoo 地层的上部四层 Wahoo 7.6.5 和 4 是 LIT 的测试层(如图 3),因为这几层是目前 Lisburne 开发的主要目的层。

LIT 区内的 Wahoo 地层主要由带白云岩和燧石夹层的石灰岩组成,构造顶部位于水下 8700 英尺处。在主要层边界处发现了页岩层。几乎所有的 Wahoo 地层孔隙度均是由于成岩流体通过油藏的流动而二次生成的。Wahoo 地层的孔隙度范围为 3-12%,基岩渗透率为 0.001-100 毫达西。天然裂缝的存在使系统的渗透率超出了此范围。裂缝有时是完全张开

的，有时完全被矿物所充填，有时被部分充填。根据 *LIT* 井的岩心资料，确定出张开裂缝的主方向是呈西北-东南向。大多数裂缝对整个油藏渗透率没有大的影响，因为裂缝连通性很差。对渗透率有贡献的是那些位于 *Wahoo7* 层顶部附近的张开裂缝。

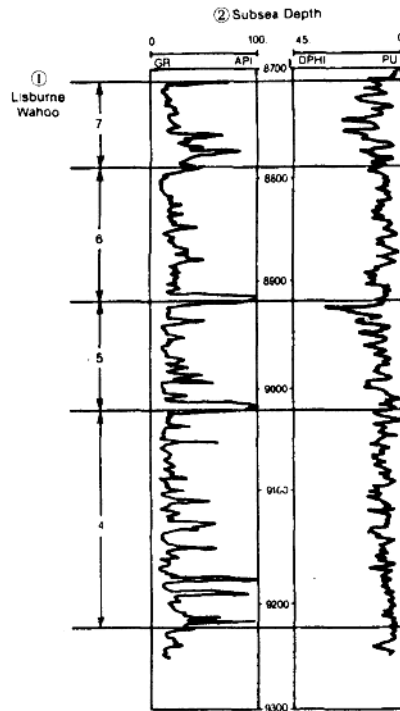


图3 *Lisburne* 油藏典型测井曲线

(1) *Lisburne Wahoo* 地层；(2) 水下深度

测试背景

进行测试的 160 英亩五点法井网位于 *L2* 井场的东北边，*L2* 井场在 *Lisburne* 开发区的西南角（如图 4 所示）。这一井网的选择是以地质和工程考虑为依据的。从地质角度看，*LIT* 区似乎是最好的，因为在此区内所有四个 *Wahoo* 层（*Wahoo7-4*）的分布很普遍，而且据估计，该区的孔隙地层厚度发育十分完善。另外，根据邻井资料，该区的天然裂缝密度可能较高，在该井网区域内，似乎没有主断层穿过。因存在 *LIT* 开始前的时机选择问题。主要从工程的角度考虑是要把试井井网选在与普鲁德霍湾现有生产设备最靠近的区域内。

试井方案设计不断成熟，从最初几乎花费一年的时间，到后来只需 5 个月时间，而且减少了花费。在计划的五个月试井期内，头一个月用来获得所有井的静态基准压力，以确定出井场 *L1* 和 *L2* 上的并行钻井作业以及井场 *L2* 和 *L3* 上两口邻近的长期生产测试井的干扰程度。接着对 *Wahoo7* 和 *Wahoo6* 层以及（或）*Wahoo7-4* 层进行为期两个月的生产测试，然