

高等工程专科学校教材

采油工程

◆ 李文华 主编 李颖川 主审



中国石化出版社

高等工程专科学校教材

采油工程

李文华 主编
李颖川 主审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统讲述了原油生产的基本方法,包括完井与试油、采油生产方法(自喷与气举采油、有杆泵采油和无杆泵采油)、稠油开采方法、油田注水、增产措施(压裂、酸化)、特殊井生产和管理及修井作用等内容。

本书是高等工程专科学校石油与天然气开采专业《采油工程》课程的指定教材,也可作为该专业的夜大、函大教材,还可作为该专业现场工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

采油工程/李文华主编
—北京:中国石化出版社,2004
高等工程专科学校教材 -
ISBN 7-80164-467-0

I. 采… II. 李… III. 石油开采-高等学校-教材
IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 066971 号

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.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 21 印张 534 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

前 言

《采油工程》是根据教育部命名的全国“高等工程专科示范专业”——石油与天然气开采专业的教学培养计划及其主干课程《采油工程》教学大纲的要求编写的。在教学内容选择上，遵循了“科学性”、“先进性”、“针对性”和“实用性”的原则，并力求紧密结合生产实际，反映采油工程的应用技术，注重可读性。

全书共分十章，即第一章：完井与试油；第二章：自喷与气举采油；第三章：有杆泵采油；第四章：无杆泵采油；第五章：稠油开采；第六章：注水；第七章：水力压裂；第八章：酸化；第九章：特殊井管理；第十章：修井作业。

本书由重庆科技学院的李文华老师组织编写。其中参加本书编写的有：易俊(第一章和第五章)，徐春碧(第二章、第六章和附录)，李文华(第三章、第四章和第七章一、三、四、五、六节)，吴国云(第八章一、三、四节和第十章)，刘玉娟(第九章)，贾顺莲(第七章第二节和第八章第二节)。全书由李文华统稿，西南石油学院李颖川教授主审，石永新老师承担了大部分图件扫描与修改工作以及文字录入和编辑排版工作。

在编写过程中，李颖川教授对本书进行了三次审定，提出了非常好的意见和建议，同时在编写中还得到了本院石油工程系采油教研室老师的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编写人员水平有限，书中难免会有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2004年6月于重庆科技学院

目 录

第一章 完井与试油	(1)	应用	(153)
第一节 完井	(1)	第六章 油田注水	(157)
第二节 试油	(10)	第一节 水源选择及水质要求	(157)
第二章 自喷与气举采油	(19)	第二节 注水系统流程与设备	(162)
第一节 自喷井井口装置	(19)	第三节 注水系统分析	(166)
第二节 油井自喷原理	(21)	第四节 分层注水技术	(172)
第三节 自喷井生产系统分析	(35)	第五节 注水指示曲线的分析和应用	(184)
第四节 自喷井的分层开采	(44)	第七章 油层水力压裂	(190)
第五节 自喷井的管理与分析	(48)	第一节 压裂机理	(190)
第六节 气举采油	(53)	第二节 压裂液	(197)
第三章 有杆泵采油	(63)	第三节 支撑剂	(207)
第一节 游梁式抽油机 - 深井泵采油系统	(63)	第四节 压裂设计	(214)
第二节 抽油机悬点的运动及载荷	(70)	第五节 压裂工艺与压裂技术	(224)
第三节 泵效分析	(77)	第六节 压裂施工与压后管理	(231)
第四节 抽油井生产分析	(84)	第八章 酸化	(237)
第五节 抽油设备的选择与相关计算	(97)	第一节 酸化增产机理	(237)
第六节 有杆抽油系统设计方法——API RP II L	(110)	第二节 酸液及添加剂	(244)
第七节 链条抽油机采油方法简介	(117)	第三节 酸化工艺设计	(250)
第四章 无杆泵采油技术	(120)	第四节 酸化工艺技术	(258)
第一节 电动潜油离心泵采油	(120)	第九章 油井砂、蜡、水	(266)
第二节 水力活塞泵	(126)	第一节 防砂与清砂	(266)
第三节 水力喷射泵采油简介	(131)	第二节 防蜡与清蜡	(275)
第四节 螺杆泵采油简介	(133)	第三节 油井找水与堵水	(279)
第五章 稠油开采方法	(141)	第十章 修井作业工艺技术	(286)
第一节 稠油的性质	(141)	第一节 修井作业的基本过程	(286)
第二节 稠油油层处理技术	(144)	第二节 油水井小修工艺技术	(291)
第三节 井筒降粘技术	(149)	第三节 油水井大修工艺技术	(295)
第四节 螺杆泵在稠油开采中的		附录 I 计算气液两相垂直管流的	
		奥尔基捷维斯基(Orkiszewski)	
		方法	(314)
		附录 II 气举阀下井参数设计——	
		图排法	(321)

第一章 完井与试油

完井是指裸眼井钻达设计井深后,使井底和油层以一定结构连通起来的工艺。它是钻井工程最后的一个重要环节,又是采油工程的开端,与以后采油、注水及整个油气田的开发是紧密联系的。而油井完成质量的好坏直接影响到油井的生产能力与经济寿命,甚至关系到整个油田能否得到合理的开发。

第一节 完 井

完井是指从打开油层开始,直到将油井投入生产为止的全部过程。它包括钻开油气层、确定完井方式、安装井口和井口装置等。本节从完井、完井评价等内容作以下概述。

一、完井方式

1. 井身结构

井身结构是指油井钻完后,所下入套管的层次、直径、下入深度及相应的钻头直径和各层套管外和水泥的上返高度等。

1.1 导管

导管使钻井一开始就建立起泥浆循环,保护井口附近的地层,引导钻头正常钻进。下入深度取决于第一层较坚硬岩层所在的位置,通常为2~40m。导管下部要用混凝土稳固地固定于坚硬的岩层上。所用导管的直径尺寸一般为450mm(17½ in)和375mm(14½ in)等。

1.2 表层套管

表层套管又叫地面套管、隔水层套管,它的作用是用来封隔地下水层,加固上部疏松岩层的井壁,保护井眼和安装封隔器。其下入深度取决于上部疏松岩层的位置,一般在30~1500m之间。它的直径尺寸为400mm(15¾ in)和324mm(12¾ in)等。表层套管外的水泥返至地面。

1.3 技术套管

技术套管又叫中间套管,用来保护和封隔油层上部、难以控制的复杂地层。下入深度根据复杂层位置而定。但是,下技术套管会使完井成本大幅度增加,因此,实践中很少采用。

1.4 油层套管

油层套管的作用是保护井壁,形成油气通道,隔绝油、气、水层,下入深度是根据目的层的位置和不同完井方法来决定的。常见的国产套管技术参数见表1-1。

表1-1 常见国产套管技术参数表

公称直径	in	5½					6¾			
	mm	140					168			
壁厚/mm		7	8	9	10	11	8	9	10	11
内径/mm		125.7	123.7	121.7	119.7	117.7	152.3	150.3	148.3	146.3

2. 钻开油气层

钻开油气层是完井的首要工序,是钻井工程的关键一步,这一工作的好坏直接影响到一

口井的生产能力，关系到是否能够正确迅速的取得油层的各项资料。

当油层被打开时，油层内的油气压力与井筒内泥浆柱的压力出现相互制约的关系。若泥浆柱的压力小于油层的压力，且井口又控制不当时，地层中的油气流就会流入井中，造成井喷等严重事故；若泥浆柱压力大于地层压力时，则泥浆中的水、粘土颗粒以及其他有害物质，会侵入油层造成损害，使井筒附近的渗透率降低影响油井产量，有时甚至不出油。因而钻开油层时应根据油层压力的高低和岩性性能，严格选择压井液，以保证安全生产和不损害或尽可能少损害油层为准。通常钻高压油层采用密度较大的压井液(性能指标依地层而异)，对于压力较低的油层，应当减小压井液的密度，以免损害油层。

3. 完井方式

完井方式是指油层与井底的连通方式、井底结构及完井工艺。对于不同地层性质、不同类型的井所采取的完井方式是不同的。不论采用哪种方式，都需要满足以下几个方面的要求：

- (1) 油层和井筒之间应保持最佳的连通条件，油层所受的损害小；
- (2) 油层和井筒之间应具有尽可能大的渗流面积，油气流入井筒阻力最小；
- (3) 应能有效地封隔油、气、水层，防止气窜或水窜，防止层间的相互干扰；
- (4) 能有效地防止油层出砂，防止井壁坍塌，确保油井长期生产；
- (5) 应具备便于人工举升和井下作业等条件；
- (6) 工艺简便、先进、安全可靠，成本低。

不同的完井方式主要区别于油气层与井底的连通方式的不同。连通方式不同，其井底结构和完井工艺也不同。而一口井完成之后，其井底结构就不易改变，所以应根据油气层的具体情况 & 各地实际经验来选定合理而有效的完井方法。下面就介绍几种常见的完井方法。

3.1 裸眼完井

裸眼完井是指在钻开生产层位不下入套管的完井方式，裸眼完井有两种：先期裸眼完井以及后期裸眼完井。先期裸眼完井是钻头钻至油层顶界附近后，下技术套管注水泥固井。水泥浆上返至设计高度后，再从技术套管中下入直径较小的钻头，钻穿水泥塞，钻开油层至设计井深完井。后期裸眼完井是不更换钻头，先钻开油层至设计井深，再将技术套管下至油层顶部，注水泥固井，固井时，为防止水泥浆损害套管鞋以下的油层，通常在油管段垫砂或者替入低失水、高粘度的钻井液，以防止水泥浆下沉。裸眼完井的最大特点是油气井与井底直接连通，整个油层完全裸露，油层与井底没有任何障碍，所以油气流入井内的阻力很小，其产能较高，如图 1-1，1-2 所示。

裸眼完井的适用范围很小，仅能适用于岩层非常坚固稳定，又无油气水夹层的单一油层或油层性质相同的多油层井。砂岩油、气层，中、低渗透层大多数需要压裂改造，裸眼完井无法进行；同时，砂岩中大都有泥页岩夹层，遇水多易坍塌而堵塞井筒，有油、气、水的井无法进行分层开采和分层改造。碳酸盐岩油气层，包括裂缝性油气层，如 20 世纪 70 年代中东的不少油田，我国的华北任丘油田古潜山油藏，四川气田等大多适用裸眼完井。后因裸眼完井无法进行增产措施、控制底水锥进和堵水，以及射孔技术的改进，现多转为套管射孔完井。

3.2 射孔完井

射孔完井是国内外最为广泛和最主要使用的一种完井方式，包括套管射孔完井和尾管射孔完井。

套管射孔完井是钻至油层直至设计井深，然后下油层套管直油层底部注水泥固井，最后射孔，射孔弹射穿油层套管、水泥环并穿至油层某一深度，建立起油流通道，如图 1-3 所示。

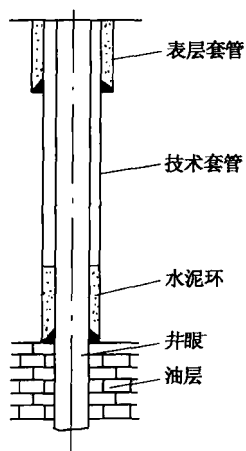


图 1-1 先期裸眼完井示意图

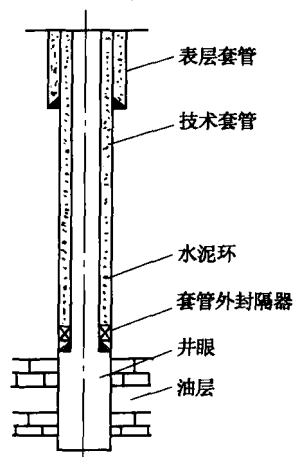


图 1-2 后期裸眼完井示意图

套管射孔完井既可以选择性地射开不同压力、不同物性的油层，以避免层间干扰，还可以避开夹层水、底水和气顶，避开夹层的坍塌，具备实施分层注、采和选择性压裂或酸化等分层作业的条件。其缺点是出油面积小、完善程度较差，对井深和射孔深度要求严格，固井质量要求高，水泥浆可能损害油气层。

尾管射孔完井是在钻头钻至油层顶界后，下技术套管注水泥固井，然后用小一级的钻头钻穿油层至设计井深，用钻具将尾管送下并悬挂在技术套管上，再对尾管注水泥固井，然后射孔，如图 1-4 所示。

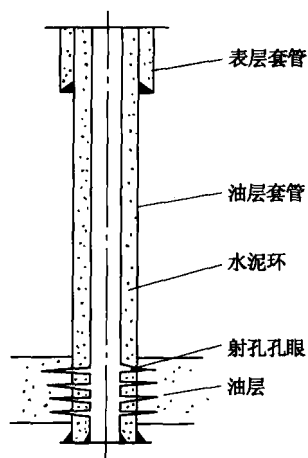


图 1-3 套管射孔完井示意图

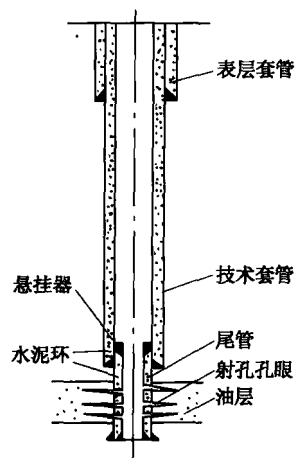


图 1-4 尾管射孔完井示意图

尾管射孔完井由于在钻开油层以前上部地层已被技术套管封固，因此，可以采用与油层相配伍的钻井液以平衡压力、低平衡压力的方法钻开油层，有利于保护油层。此外，这种完井方式可以减少套管重量和油井水泥的重量，从而降低完井成本，目前较深的油井大多采用

此方法完井。

射孔完井是通过射孔为油气层打开通道的，而射孔主要通过一种称之为聚能射孔弹完成射孔作业的。聚能射孔弹是一种无弹头的聚能射孔弹。二次世界大战以后，人们将聚能穿甲弹改进后，应用到了射孔完井作业中。这种聚能射孔弹是通过特定几何形状的药柱，将炸药爆炸瞬间产生的高温高压气流聚集到某一方向上而完成的射孔。实用的 82.29 型聚能射孔弹结构见图 1-5。

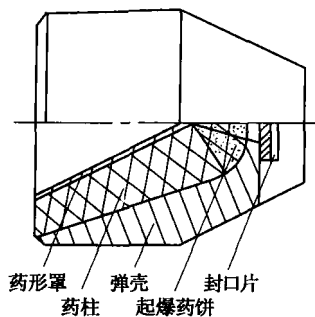


图 1-5 82.29 型聚能射孔弹结构

聚能射孔器经过现场应用证明其穿透能力强，但同时也存在些缺点，在射孔完成之后，孔道中将会充填有射孔弹药碎屑、岩屑、水泥碎块等残留物，在孔道周围会形成一个低渗透的挤压致密层，使其渗透率降低，影响流体流向井内，所以在工具及工艺等方面有待于进一步改进。除此之外，目前还广泛使用水力喷射射孔枪及机械割刀，水力喷射射孔枪是通过对着套管的一个锐孔喷射含砂液体而得到切割套管的作用。其穿透能力将随井内压力的增大而下降，若在液流中加入氮气能明显地增大穿透能力。机械割刀是应用刀片及磨铣工具在套管中磨铣窗口，使井筒与油层相连同的方法。由于这两种器材的射孔效率较低，目前较少使用。

3.3 衬管完井

衬管完井是钻头钻至油层顶界后，先下技术套管注入水泥固井，再从技术套管中下入直径小一级的钻头钻穿油层至设计井深。最后在油层部位下入预选割缝的衬管，依靠衬管顶部的衬管悬挂器(卡瓦封隔器)，将衬管挂在技术套管上，并密封衬管和套管之间的环行空间，使油气通过衬管的割缝流入井筒，如图 1-6 所示。

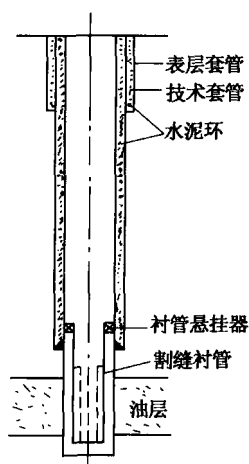


图 1-6 衬管完井示意图

这种完井工序油层不会遭受固井水泥浆的损害，可以采用与油层相配伍钻井液或其他保护油层的钻井技术钻开油层，当割缝衬管发生磨损或失效时也可以起出修理或更换。

衬管完井是当前主要的完井方式之一。它既起到裸眼完井的作用，又防止了裸眼井壁坍塌堵塞井筒，同时在一定程度上起到防砂的作用。由于这种完井方式的工艺简单，操作方便，成本低，故而在一些出砂不严重的中、粗砂油层中不乏使用，特别在水平井中使用较普遍。

目前，衬管上的孔眼多采用圆形和梯形两种，圆形孔眼通过油气流的能力较强，但防砂能力较差；梯形割缝管只允许一定数量和大小砂流入井内，同时较大的砂粒形成砂拱，砂拱不仅对油气流的阻力小，而且可以起到防砂的目的。但这种衬管又容易被泥质颗粒堵塞而使油气流入井内的阻力变大。衬管完井使用于胶结程度差的砂岩油层，具有防砂和防止井底坍塌的作用。衬管完井防砂是靠油层自然形成砂拱来实现的，这样不易人工控制，因此在衬管完井的基础上发展了砾石充填完井。

3.4 砾石充填完井

对于胶结疏松出砂严重的地层，一般应采用砾石充填完井方法。它是先将绕丝筛管下入井内油层部位，然后用充填液将在地面上预先选好的砾石泵送至绕丝筛管与井眼或绕丝筛管

与套管之间的环行空间内，构成一个砾石填充层，以阻挡油层砂流入井筒，达到保护井壁、防砂的目的。

砾石填充完井一般都是使用不锈钢绕丝筛管而不使用割缝衬套。其原因是：①割缝衬管的缝口宽度由于受加工割刀强度的限制，最小为 0.5mm，因此割缝衬管只适用于中、粗砂油层，而绕丝筛管的缝隙宽度最小可以达 0.12mm，故其使用范围广；②绕丝筛管是由绕丝形成的一种连续缝隙，流体通过筛管时几乎没有压降，且绕丝筛管的断面为梯形，外窄内宽，且有一定的“自洁作用”，轻微的堵塞可被产出的流体疏通，其流通面积比割缝衬管大得多；③绕丝筛管以不锈钢为原料，其耐腐蚀性强，使用寿命长，综合经济效益高。

为了适应不同油层特性的需要，裸眼完井和射孔完井都可以充填砾石，分别称为裸眼砾石充填和套管砾石充填。

在地质条件允许使用裸眼而又需要防砂时，就应采用裸眼砾石充填完井方式。其工序是钻头钻达油层顶界以上约 3m 后，下技术套管注水泥固井，再用小一级的钻头钻穿水泥塞，钻开油层至设计井深，然后更换扩张式钻头将油层部位的井径扩大到技术套管外径的 1.5~2 倍，以确保充填砾石时有较大的环行空间，增加防砂层的厚度，提高防砂效果。如图 1-7 所示。

套管砾石充填的完井工序是：钻头钻穿油层至设计井深后，下油层套管于油层底部，注水泥固井，然后对油层部位射孔。要求采用高孔密、大孔径射孔，以增加充填流通面积，有时还把套管外的油层砂冲掉，以便向射孔外的周围油层填入砾石，避免砾石和油层砂混合增大渗流阻力。如图 1-8 所示。

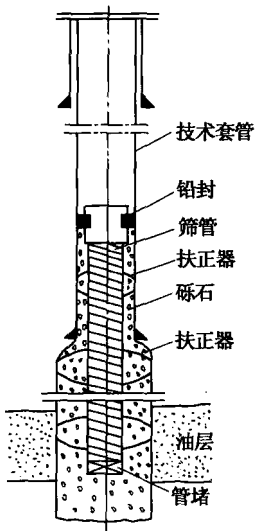


图 1-7 裸眼砾石充填完井示意图

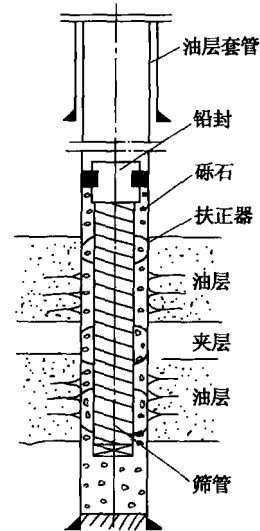


图 1-8 套管砾石充填完井示意图

预充填砾石绕丝筛管也是防砂完井的一种方法，该方法是在地面预先将符合油层特性要求的砾石填入具有内外双层绕丝筛管的环行空间而制成的防砂管，将此种筛管下入井内，对准出砂油层进行防砂。该防砂方法的油井产能低于井下砾石充填，防砂有效期不如砾石充填长，因其不能像砾石充填能防止油层砂进入井筒，只能防止油层砂进入井筒后不再进入油管，但其工艺简单、成本低，在一些不具备砾石充填的防砂井，仍是一种有效的方法。

为解决油层出砂问题，还可采用金属纤维防砂筛管、陶瓷防砂滤管、多孔冶金粉末防砂

滤管、多层充填井下滤砂器以及化学固砂等方法完井。

4. 井口装置

为了引导和控制油、气流的流动方向和流量的大小，在井口必须安装井口装置。它的作用是悬挂油管、密封油、套管环形空间，控制和调节油井产量，保证各种井下作业的施工，并且便于录取井口压力资料、测压和清蜡等日常生产管理和测试工作。

井口装置通常由套管头、油管头和采油(气)树三大部分组成。

4.1 套管头

套管头用来密封各层套管环形空间、承受部分套管柱重量以及安装套管四通、油管头(采油时)或井口防喷器(钻井时)。

套管头按与套管连接的方式可分为法兰式套管头和丝扣式套管头两大类。

4.2 油管头

油管头是井口装置的中间部分，其作用是悬挂井内油管柱、密封油、套管的环形空间。油管头位于套管头的上面，包括套管四通和油管悬挂器两部分，套管四通的下法兰坐在套管头的上法兰上，油管与油管挂之间用丝扣连接，油管挂下法兰坐于四通上法兰上。

目前常使用由特殊四通和锥管挂组成的油管头。

4.3 采油(气)树

采油(气)树是由各类闸阀、油嘴套、三通、四通等组成。它装在油管头的上面，用于控制油、气流，进行安全、有计划的生产，以及完成测试、注液、压井、清蜡等工作。

目前油井广泛采用 CYb-250 型采油树，气井广泛采用 CQ-250 型采气树。

二、完井方法评价

油气从地层向井底渗流过程中需要克服各种渗流阻力，这必然消耗地层能量。地层能量的消耗体现在地层压力的降落上，根据渗流力学计算，不可压缩液体在平面径向稳定渗流过程中，地层压力下降面像一个漏斗状的曲面，人们习惯称为“压降漏斗”，而且，大部分能量损失集中在井底附近。井底地区油层与井眼的连通情况的好坏，对油井的生产有重大的影响，因而，在完井过程中，如何减少井底附近地层蒙受的损害是完井工程师必须关注和重视的工作之一。

1. 选择完井方式的原则

选择完井方式是完井工程的核心，目前虽然有多种类型的完井方式，但它们都有其各自的适用条件和局限性。只有根据油气层的地质条件选择最适宜的完井方式，才能有效地开发油气田。达到使油气井寿命长、经济效益高的目的。优选完井方式时，应考虑油气藏类型、油气层特性和工程技术及措施要求三方面的因素。

1.1 油气藏类型

选择完井方式时，应区分块状、层状、断块和透镜体等不同的油藏几何类型。层状油藏和断块油藏通常都存在层间差异，一般都采用分层注水开发，因而多数选择射孔完井方式。块状油藏不存在层间差异的问题，主要考虑是否钻遇气顶及底，边水，从而选择不同的完井方式。

选择完井方式时，还应区分孔隙型油气藏、裂缝型油气藏等不同的渗流特性，易于发生气、水窜的裂缝型油气藏不宜采用裸眼完井方式。

选择完井方式时，也应区分稀油油藏、稠油油藏等不同的原油性质。稠油油藏通常胶结疏松，大多采用砾石充填完井、注蒸气热采。

1.2 油气层特性

油气藏类型并不是选择完井方式的惟一依据，还必须综合考虑油气层的特性，包括油气层的坚固程度、油气层的稳定性、油气层渗透率及层间渗透率的差异、油气层压力及层间压力的差异、原油性质及层间原油性质的差异等。这些都是选择完井方式的重要依据。

1.3 工程技术及措施要求

选择完井方式时，除了需要考虑油气藏类型和油气层特性以外，还应根据开采方式和油气田开发全过程的工艺技术及措施要求综合确定。包括：是否采用分层注水开发、是否采用压裂等改造油气层措施、是否采用注蒸气吞吐热力开采方式等。

由此可见，选择完井方式需要考虑地质、开发和工程多方面的因素。综合这些因素才能选择出既能适应油气层地质条件，又能满足在长期生产过程中对油气井的各种工程措施要求的完井方式。

2. 完井方式的选择

油气井是连通油气藏的惟一通道，每口井的完井设计必须以获得最大的综合利润为前提。选择完井方式时，必须综合考虑油气藏类型、油气层特性和工程技术及措施要求。找出其中的主要因素加以考虑。如委内瑞拉马开波湖油田的开发，所采用的完井方法不同，其采油指数彼此相差很大，如表 1-2 所示，在 II-5 油层最大差异达 12 倍，II-3 油层最大差异达到 4 倍。

表 1-2 马开波湖油田不同完井方法的采油指数

完井方法	采油指数/[m ³ /(MPa·d)]	
	II-5 油层	II-3 油层
裸眼砾石充填	113(14 口井)	15(13 口井)
套管射孔	85(20 口井)	12.1(14 口井)
套管内砾石充填(先挤砂)	30(19 口井)	7.4(12 口井)
套管内砾石充填(不挤砂)	9.3(14 口井)	4.0(3 口井)

目前国外使用的完井方法较多，但应用最广泛的是套管射孔完井，大约占完井总数的 90% 以上。我国采用的完井方法亦以套管射孔为主，大约占完井总数的 85% 以上。个别灰岩产层油田用裸眼完井，少数稠油或出砂油田用砾石充填完井。套管射孔完井之所以应用最多，其主要原因是它能选择、调整产油层位，适应分层开采工艺的需要。

3. 射孔完井对油井产能的影响

3.1 射孔条件

射孔条件是指射孔压差、射孔方式和射孔工作液。

3.1.1 射孔压差

正压差射孔，是指射孔时井底液柱压力高于地层压力的射孔；相反负压差射孔是指射孔时井底液柱压力低于地层压力的射孔，通常正压差射孔的清洁度一般较差，造成井眼及岩石的损害较大。而负压差射孔既可以减少射孔作业中滤液的侵入、固相物质的堵塞以及滤液可能对地层发生的化学反应，又可及时清洗射孔孔眼。在负压射孔中，只要负压值控制合理，油井产能将得到较大发挥，对提高产能、降低成本和保护油层有相当重要的作用。

3.1.2 射孔方式

实现负压差射孔的射孔方式最先采用的是电缆传送过油管负压差射孔技术。在射孔之前

下好油管，安装好井口装置，连接好地面管线。射孔时通过井口密封装置(防喷盒)用电缆将射孔枪经过油管下到油管鞋以下的油层位置，然后密封井口，接通电源引爆射孔。射孔前，将井内陶空一定高度液柱，使井底液柱对油层的回压低于地层压力，建立所需的负压差值。

然而，过油管负压差射孔技术在实际使用过程中无法适应现代高密度射孔的需要，进而发展为油管传输射孔(TCP)。这种射孔技术既有过油管射孔实现负压差的优点，又有深穿透、高孔密的大直径射孔枪的性能。在国内得到广泛采用。但是，油管传输射孔存在作业费用高，射孔枪在井内暴露时间长等缺点。

3.1.3 射孔工作液

优质的射孔液应该是清洁无固相，且与地层流体相配伍的射孔液，如现在用得较多的清洁无固相 CaCl_2 盐水。

3.2 射孔参数

射孔参数主要包括射孔深度、孔径、孔密等。

3.2.1 射孔穿透深度

在钻井、固井作业中，都可能对油气层造成不同程度的损害，在近井壁油气层中形成一损害带，使其渗透率低于油气层的原始渗透率。在射孔时，要求射孔不仅要穿透油层套管外水泥环，而且射入油层的深度要足以穿过近井污染带，才能有效地减少污染对油井产能的影响。因此，随着射孔深度的增加，油井产能会不断提高。

3.2.2 射孔孔径

射孔孔径大，渗流阻力小，但孔径大对保护水泥环不利。目前国外孔径一般为 8 ~ 12mm，国内各类射孔弹也能达到此水平。但在特殊情况下，如稠油高凝原油射孔时，应选用较大孔径的射孔弹。

3.2.3 射孔密度

射孔密度(每米射孔数)对油井产能影响较大，提高孔密，能有效地提高油井的产能。目前我国一般孔密为 10 孔/m，国外部分油田射孔孔密可以达到 16 ~ 20 孔/m，因而，在我国通过提高孔密来提高油井的产能还有较大的潜力。

3.2.4 射孔相位

射孔相位是指弹架上的射孔弹射孔方向的个数，有几个方向就称为有几个相位。射孔相位对油井产能发挥有相当大的影响。两个相位(即相邻射孔弹射孔方向之间夹角为 180°)比一个相好；三个相位(120°)排列射孔比两个相位排列射孔油井产能发挥好。

在井下射孔时，若射孔器扶正得好，枪管会居于套管中心，不同相位的炸高(指射孔弹距套管间的距离)相等，各相位的射深也会相等。若不进行扶正，各相位炸高不同，就会使各相位的射深不等，渗流阻力增大。套管直径越大，扶正器的影响会增加。

除上述因素外，孔眼壁压实带厚度及压实程度对油井产能也有相当大的影响，实验研究发现，聚能射孔弹在钢靶上穿孔后，钢靶的质量并未减少，而是在孔眼周围产生了密度更大的压实带，这在油层中表现更为明显。孔眼周围油层在射孔中产生的压实带的厚度和压实程度对渗流阻力有直接影响。同时，压实程度同所射油层的致密情况及射孔弹的质量相关。

三、水平井完井方式简介

水平井被认为是 20 世纪 80 年代石油工业勘探开发技术重要的发展之一，国内大部分油田 90 年代开始采用水平井完井技术，从而大幅度提高油气勘探、开发的社会效益和经济

效益。

1. 水平完井方法适用的地质条件

30 多年的实践表明，钻水平井在技术上是可行的。但水平完井方法并不适用于所地质条件，只有在下述情况下，水平完井方法才能收到经济效益。

1.1 薄层油藏

如果油层厚度薄，同时油层渗透率又低。通过横贯油层的水平井增加了井眼和油藏的渗流接触面积，补偿油层薄的缺陷。可以大大提高薄层油藏产率比(产率比定义为当水平井和垂直井具有相同的泄油面积时，水平井的产能与同层垂直井的产能之比)。一般认为油层厚度应不超过 20m，从经济方面考虑才适宜采用水平完井。

1.2 高垂向渗透性油藏

多数油层的垂向渗透率低于水平向渗透率。对于水平井来说，油井产能的大小部分地取决于垂向渗透率的高低。油层垂向渗透率愈大，流体垂向渗流阻力愈小，产量愈大。一般认为垂向渗透率接近水平渗透率时，从经济方面考虑才适宜采用水平完井。

1.3 纵向裂缝油藏

水平井提供了连通天然垂直裂缝的手段。即使油层的裂缝发育连通性较差，只要水平井眼与这些裂缝相交也能显著提高油井的产能。

1.4 非均质油藏

当油层在水平方向上存在非均质性时，横贯非均质油层的水平井为钻遇孤立的富油区提供了手段。

1.5 有气顶或底水接触面问题的油藏

和垂直井相比，水平井与油层的接触面积大得多。水平井眼附近的压降梯度比垂直井小得多，其压力降落近似为一条直线。由于水平井眼附近油层的压力降落缓慢，有利于延迟水侵入井眼，可望提高油井采收率。

横贯油层的水平井可以为评价油层提供更多的资料，对认识油藏有极大的价值。水平井可以钻达城市下的遥远部分，能减少开发海上油田所需的平台数。但由于水平完井的成本比直井高 2~3 倍，因此在厚油层、低垂向渗透率油层或被某些不渗透页岩分割的油层中，水平完井是不宜采用的。

2. 水平完井的特点

目前，水平井有三种基本类型，即大曲率半径水平井、中曲率半径水平井、小曲率半径水平井。水平段位移分别超过 3000m、1500m 和 300m。

水平井的完井方法包括：裸眼完井、割缝衬管完井和套管射孔井。

2.1 裸眼完井

裸眼完井是最基本、最简单的水平井完井方法。如图 1-9 所示。

技术套管下至产层顶部，注水泥固井，将产层和产层以上邻近的其他地层封隔。将油管下过直井段并进入产层井段，用洗井液借助油管洗井诱喷，依靠产层自身的能量自喷采油。

这种裸眼完井方法，不需要用套管封堵产层，也不准备采取强化增产措施。因此，适用于岩性致密井壁不会坍塌而且渗透性较好的硬质砂岩或裂缝性砂岩和石灰岩的地质条件。

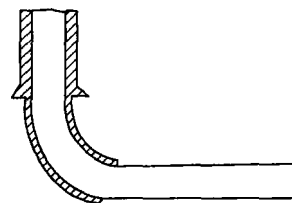


图 1-9 水平井裸眼完井示意图

2.2 割缝衬管完井

图1-10为带扶正器的割缝衬管完井示意图。完井套管下部连接带扶正器的割缝衬管，在衬管以上装设套管封隔器，封堵环空。以便完井套管注水泥时，水泥浆不会进入衬管外的环形空间。固井后将油管下过直井段并进入产层部位。

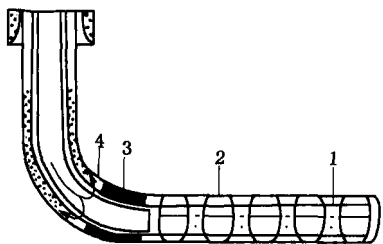


图1-10 水平井割缝衬管完井

- 1—割缝衬管；2—扶正器；
3—环空密封；4—注水泥孔眼

割缝衬管也可以固定在注水泥的短尾管里面。如图1-11所示。短尾管与前层套管重合几米，依靠短尾管内的封隔器封堵割缝衬管的管外环形空间，上述割缝衬管可以阻挡产层出砂，防止裸眼井壁的坍塌。

2.3 套管射孔完井

在有气顶或边水锥进的水平井中，应采用套管射孔完井方法，以便封隔气顶段或边水段，防止气水窜入井眼。此外，准备采取强化增产措施的水平井也应采用套管射孔完井，以免串通气顶、边水或其他不宜强化的井段。套管射孔完井方法如图1-12所示，技术套管下过直井段注水泥固井，然后在水平段内下入完井套管注水泥固井。完井套管和技术套管重合几米或者返至井口。完井后用TCP射孔枪进行有选择性地射孔。如果射孔段很长，可使用膨胀式封隔器将其他井段分隔开，分段顺次射孔。

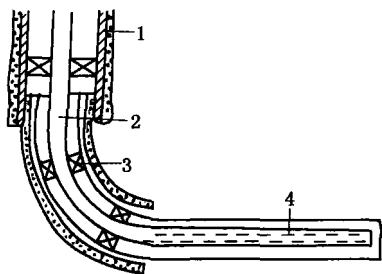


图1-11 在生产套管和技术套管中间

下一层尾管的割缝衬管完井

- 1—技术套管；2—生产套管；
3—尾管；4—割缝衬管

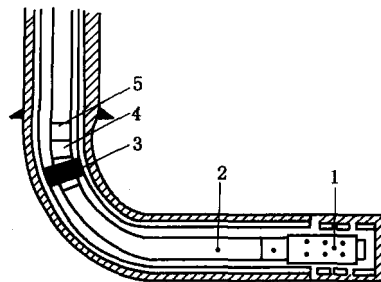


图1-12 用TCP的套管射孔完井

- 1—油管射孔枪TCP；2—油管；3—压缩式封隔器；
4—安全接头；5—压力操纵的循环凡尔

第二节 试 油

试油是指利用一套专用的设备和工具，对井下油、气进行直接测试，以取得有关目的层的油气产能、压力、温度和油、气、水样物性资料的工艺过程。是油气勘探开发的重要组成部分，也是检查油气田开发效果的重要手段之一。因此，试油在油气田勘探与开发中占有重要地位。

随着科学技术的进步，试油工艺也逐步得到改进和发展，到20世纪70年代末80年代初，试油工艺在常规工艺技术的基础上，发展运用了中途测试试油，封隔器分层试油等试油工艺，其工艺方面主要包括压井、射孔、诱喷排液、求产、测压等方面，本章围绕诱喷排液

和试油工艺展开讨论。

一、诱喷排液

试油工作的目的是：

- (1) 探明新区、新构造是否有工业性油气流；
- (2) 查明油气田的含油面积及油水或气水边界以及油气藏的产油气能力、驱动类型；
- (3) 验证对储集层产油、气能力的认识和利用测井资料解释的可靠程度；
- (4) 通过分层试油、试气取得各分层的测试资料及流体的性质，确定单井(层)的合理工作制度，为制定油田开发方案提供重要依据；
- (5) 评价油气藏，对油、气、水层做出正确结论。

为实现上述目的，在对一口井进行试油时，首先要求得到油井在不同工作方式下的产量和压力，同时还要测得油井在不同工作方式下产气量、产水量以及出砂量，并对油气水砂等性质进行必要的分析化验。但是油气井在完井之后，通常井内充满泥浆(或其他液体)，并且泥浆柱造成的压力一般超过事先所估算的油藏压力。因此，在油井完成后进入试油阶段的第一步就是要设法降低井底压力，使井底压力低于油藏压力，让油气流入井内，这一工作称诱喷排液(诱导油流)，是试油工作的第一道工序。该工作也是为了清除井底沙砾和泥浆等污物，降低井底及其周围地层对油流的阻力。

要降低井底压力，可通过降低井内液柱高度或井内液体相对密度来实现。诱喷的方法很多，选择时应视油层性质、完井方法及油层压力等情况而定。但无论选择哪一种方法，都应遵循下述基本原则：

- (1) 把井底和井底周围地层的脏物排出，使油层孔隙畅通，以利于油气流入井筒；
- (2) 能建立起足够大的井底压差；
- (3) 应缓慢而均匀的降低井底压力，不致导致破坏油层结构。

诱导油流以后若油井能够自喷可自喷求产，不能自喷的井则应诱导油流与求产结合进行。

1. 替喷法

替喷法是用密度较轻的液体将井内密度较大的液体替出，从而降低井中液柱压力，达到使井内液柱压力小于油藏压力的目的。具体实施是先用低密度液体替出井中的压井液。替喷法有三种：

一般替喷法：就是把油管下至油层中、上部，用泵把替喷用的液体连续替入井中，直至把井中的全部压井液替出为止。该方法简便，但油管鞋至井底的这段压井液替不出来。

一次替喷法：就是把油管下到人工井底，用替喷液把压井液替出，然后上提油管到油层中部或上部完井。它只限于用在自喷能力不强、替完替喷液到油井喷油之间有一段间歇，来得及上提油管的油井，如图 1-13 所示。

二次替喷法：就是把油管下到人工井底，替入一段替喷液，再用压井液把替喷液替到油层部位以下，之后上提油管至油层中部，最后用替喷液替出油层顶部以上的全部压井液，这样既替出井内的全部压井液又把油管提到了预定的位置，如图 1-14 所示。

替喷法排液诱导油流的优点在于生产压差的形成均匀缓慢，不致引起由于井壁的坍塌而使油层出砂。

2. 抽汲法

经过替喷诱导仍不能自喷时，这可能是：

- (1) 油层压力低，替喷后井内液柱压力仍大于油层压力；
- (2) 钻井、固井或射孔过程中的泥浆污染造成油层孔隙堵塞。在这种情况下可采用抽汲方法使其达到自喷的目的。

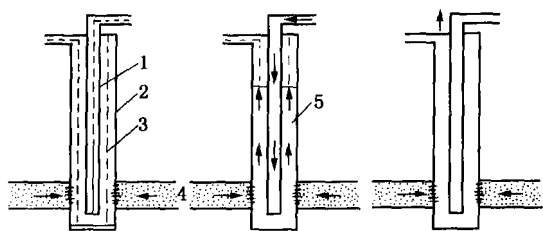


图 1-13 一次替喷示意图

1—油管；2—套管；3—压井液；4—油层；5—替喷液

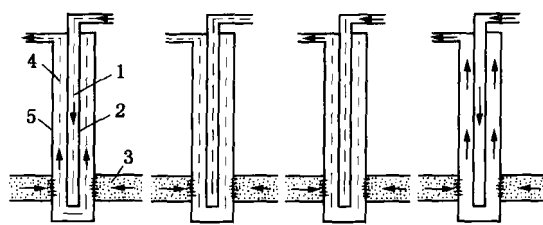


图 1-14 二次替喷示意图

1—替喷液；2—油管；3—油层；4—压井液；5—套管

抽汲就是利用一种专用工具把井内液体抽到地面，以达到降低液面即减少液柱对油层所造成的回压的一种排液措施。

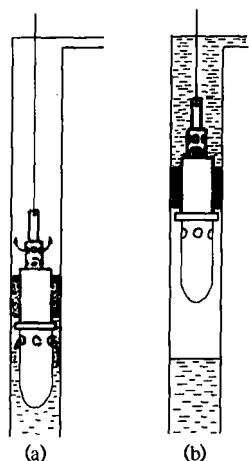


图 1-15 抽汲法原理图
a—上提抽子；b—下提抽子

抽汲的主要工具是油管抽子。常用的抽子有阀抽子(如图 1-15 所示)和无阀抽子，又称两瓣抽子。它们结构虽不同，但总的要求是抽子在油管中既要下放自由，上提时又密封良好。抽子接在钢丝绳上用修井机、钻机或电动绞车作动力，通过地滑车、井架天车在下入井中的油管中上下活动。上提时把抽子以上的液体提出井口，在抽子下面产生低压，油层中的液体就不断地抽出地面。

抽汲不但有降压诱喷的作用，还有解除油层某种堵塞的作用，因此适用于喷势不大的井或有自喷能力，但在钻井过程中，由于泥浆漏失，钻井液滤液使油层受到损害的油井。对于疏松、易出砂的油层，应避免猛烈抽汲，以避免造成油层大量出砂。

对低渗、低产的浅井常用提捞法排液诱流。此排液方法的主要工具是提捞筒，用绳索把它下入井中液面以下，一筒一筒地将井内液体捞出地面，以降低液柱对油层的回压。该排液法的缺点是费时费工，效率低。

3. 气举法

气举法是利用压缩机向油管或套管内注入压缩气体，使井中液体从套管或油管中排出的方法。该方法的优点是比抽汲法效率高，可以大大提高试油速度。但是由于井内液体回压能疾速下降，因此它只能适合于油层岩石坚实的砂岩或碳酸盐岩的油井的排液，对于一些胶结疏松的砂岩，要控制好气举深度、排液速度，以免破坏油层结构而出砂。

气举排液有以下几种方式：

常规气举排液：它又有正、反举之分。正举是把气体从油管中注入，气液混合物从油套环形空间中排除；反举是把气体从油套环形空间压入，气液混合物从油管中排出，如图 1-16 所示。

多级气举阀气举排液：它是根据排液的需要设计多个气举阀管柱进行气举。该方法的特点是油井液柱回压的下降是逐级降低的，在油井与油层之间逐步建立压差不致破坏油层岩石