

石油高职高专规划教材

采油工程

于云琦 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油高职高专规划教材

采 油 工 程

于云琦 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要讲述了油井完井与试油, 自喷与气举采油, 有杆泵采油, 无杆泵采油, 水力压裂, 酸化, 注水, 复杂条件下的开采技术, 油水井维修等方面的基本知识、基础理论和基本技能。

本书内容比较切合生产实际, 概念清楚, 可作为高职高专采油专业的教学用书, 也可作为采油工程技术人员及高级技工培训的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

采油工程/于云琦主编.

北京: 石油工业出版社, 2006. 8

石油高职高专规划教材

ISBN 7-5021-5642-9

I. 采…

II. 于…

III. 石油开采 - 高等学校: 技术学校 - 教材

IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 087237 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 19.5

字数: 498 千字 印数: 1—2500 册

定价: 27.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

2005年8月,中国石油教育学会和石油工业出版社在山东胜利职业学院组织召开石油高职高专教学教材规划研讨会,确定编写适用于石油高职高专层次的系列教材。在此次会议中讨论并通过了石油高职高专教材的编写原则和编写大纲。其编写原则是:

(1) 高职高专教育属于高等教育,教材应突出高层次性而区别于中等职业教育;

(2) 根据高职高专教育培养目标是高等技术应用型人才的原则,教材应突出应用性,从高等应用性职业的实际需要出发,理论教学要以应用为目的,加强操作训练,提高学生的动手能力;

(3) 为了学生以后的继续深造,高职高专教材与本科教材应具有可衔接性。

本书就是根据该编写原则撰写的,力求科学性与实用性相结合,着重提高现场工作能力的培养,真正掌握本职业的理论知识和操作技能。

本书共分九章,由山东胜利职业学院负责组织编写。重庆科技学院吴国云编写第一章和第六章;渤海石油职业学院杨娟芳和范昆仑编写第二章;山东胜利职业学院于云琦编写第三章;辽河石油职业技术学院王丽梅编写第四章;天津石油职业技术学院谢洪顺和鲁改欣、刘红兵、吕凤滨编写第五章;承德石油高等专科学校高书香编写第七章;天津工程职业学院孟士杰编写第八章;大庆职业学院王佼科编写第九章。

本书由于云琦任主编,吴国云、孟士杰、杨娟芳任副主编。全书由山东胜利职业学院孙树强担任主审,提出了宝贵的修改意见。

由于编者水平有限,时间短促,书中难免存在缺点、错误和不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2006年5月

目 录

第一章 油井完井与试油	(1)
第一节 油井完井	(1)
第二节 试油	(11)
第二章 自喷与气举采油	(21)
第一节 自喷井的结构和工艺流程	(21)
第二节 自喷井流动过程及能量分析	(29)
第三节 自喷井的生产管理与分析	(40)
第四节 气举采油	(48)
第三章 有杆泵采油	(54)
第一节 有杆泵抽油装置	(54)
第二节 抽油机悬点运动规律	(65)
第三节 抽油机悬点载荷计算与分析	(69)
第四节 抽油机的平衡、扭矩与功率计算	(74)
第五节 泵效计算与分析	(83)
第六节 有杆抽油系统工况分析	(89)
第七节 有杆抽油系统的选择和设计计算	(98)
第四章 无杆泵采油	(108)
第一节 电动潜油离心泵采油	(108)
第二节 水力活塞泵采油	(120)
第三节 其他无杆泵采油	(129)
第五章 水力压裂技术	(137)
第一节 造缝机理	(137)
第二节 压裂液	(142)
第三节 支撑剂	(148)
第四节 压裂设计	(153)
第五节 压裂设备及施工工艺	(160)
第六章 酸化	(170)
第一节 酸化增产原理	(170)
第二节 碳酸盐岩地层的盐酸处理	(171)
第三节 砂岩油气层的土酸处理	(177)
第四节 酸液及添加剂	(179)
第五节 酸化工艺设计	(186)
第六节 酸化工艺技术	(194)
第七章 注水	(202)
第一节 水源、水质及注水系统	(202)

第二节	注水井吸水能力分析	(210)
第三节	分层注水技术	(213)
第四节	注水井分析	(220)
第五节	注水井调剖与检测	(225)
第八章	复杂条件下的开采技术	(229)
第一节	防砂与清砂	(229)
第二节	油井防蜡与清蜡	(241)
第三节	油井堵水	(245)
第四节	稠油及高凝油开采技术	(255)
第五节	提高采收率的油层热处理及微生物采油新技术简介	(262)
第九章	油水井维修	(271)
第一节	修井设备	(271)
第二节	修井工具	(277)
第三节	油井小修	(282)
第四节	油井大修	(294)
	参考文献	(305)

第一章 油井完井与试油

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。因此，了解有关完井的知识，对采油技术人员来说显得十分重要。

第一节 油井完井

完井是衔接钻井和采油工程而又相对独立的工程，是从钻开油层开始，到下套管注水泥固井、射孔、下生产管柱、排液，直至投产的一项系统工程。

一、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水泥浆的上返高度等。如图 1-1 所示。

(一) 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。

(二) 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。

(三) 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。

(四) 油层套管

油层套管也称为生产套管，其作用是保护井壁，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。

二、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生产能力，关系到是否能够正确迅速地取得油层的各项资料。

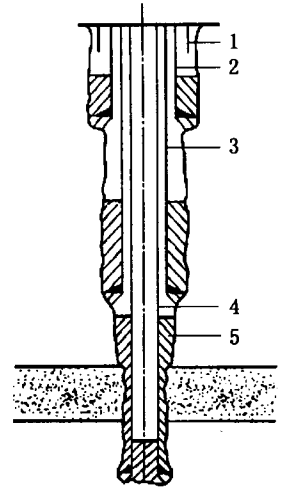


图 1-1 井身结构示意图

- 1—导管；2—表层套管；
- 3—技术套管；4—油层套管；5—水泥环

表 1-1 常见国产套管技术参数表

公称 直径	in	5½					6%			
	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	

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石性能严格选择压井液,以保证安全生产,不损害或尽可能少损害油层。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),对于压力较低油层,应当减小压井液的密度,以免损害油层。

三、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。不论采用那种方法,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及各地方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。

(一) 裸眼完井方式

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:先期裸眼完井和后期裸眼完井。先期裸眼完井是钻头钻至油层顶界附近后,下套管注水泥固井。水泥浆上返至设计高度后,再从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。

有的厚油层适合于裸眼完成,但上部有气顶或顶界附近又有水层时,也可以将套管下过油气界面,使其封隔油层的上部,然后裸眼完井,必要时再射开其中的含油段,此类完井可称为复合型完井方式。

后期裸眼完井是不更换钻头,先钻开油层至设计井深,再将套管下至油层顶部,注水泥固井,固井时,为防止水泥浆损害套管鞋以下的油层,通常在油层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 1-2,图 1-3,图 1-4 所示。

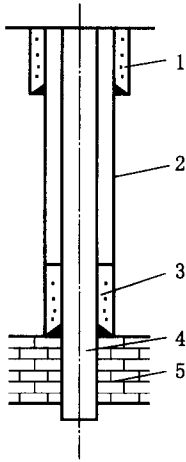


图 1-2 先期裸眼完井示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—水泥环；4—井眼；5—油层

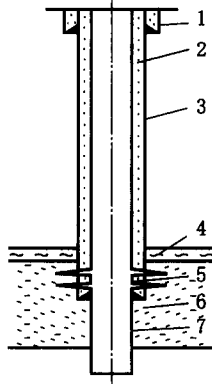


图 1-3 复合型完井方式

1—表层套管；2—水泥环；3—技术套管；4—气顶；5—射孔孔眼；6—油层；7—裸眼井壁

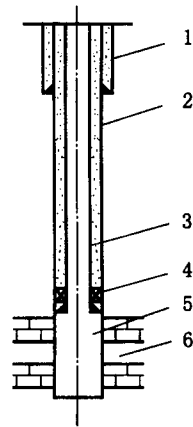


图 1-4 后期裸眼完井示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—水泥环；4—套管外封隔器；5—井眼；6—油层

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、气层的中、低渗透层大多数需要压裂改造，裸眼完井无法进行压裂施工；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。因此，中低渗透的砂岩油层、具有泥页岩夹层的砂岩油层和有油、气、水的井的油层都不适合裸眼完井。碳酸盐岩油气层，包括裂缝性油气层，如 20 世纪 70 年代中区的不少油田，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。因为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，所以多转变为套管射孔完井。

(二) 射孔完井方式

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，射孔完井包括套管射孔完井和尾管射孔完井。

套管射孔完井是钻钻穿油层直至设计井深；然后下套管到油层底部注水泥固井；最后射孔。射孔弹射穿套管、水泥环并穿至油层某一深度，建立起油流通道，如图 1-5 所示。

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，又可以避开夹层水、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层后，下套管注水泥固井，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套管上，再对尾管注水泥固井，然后射孔，如

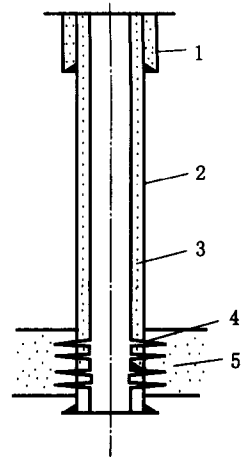


图 1-5 射孔完井方式示意图

1—表层套管；2—油层套管；3—水泥环；4—射孔孔眼；5—油层

图 1-6 所示。

尾管射孔完井由于在钻开油层以前上部地层已被套管封固，因此，可以采用与油层相配伍的钻井液以平衡压力、欠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质量和油井水泥的质量，从而降低完井成本。目前较深的油井大多采用此方法完井。

(三) 衬管完井方式

衬管完井方式是钻头钻至油层顶界后，先下套管注入水泥固井，再从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），将衬管挂在套管上，并密封衬管和套管之间的环形空间，使油气通过衬管的割缝流入井筒，如图 1-7 所示。

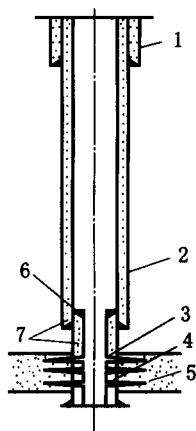


图 1-6 尾管射孔完井示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—尾管；4—射孔
孔眼；5—油层；6—悬挂器；7—水泥环

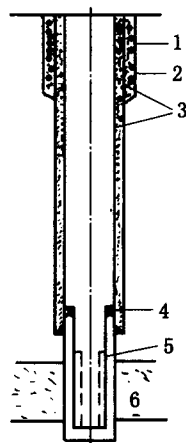


图 1-7 衬管完井示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—水泥环；
4—衬管悬挂器；5—割缝衬管；6—油层

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的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。

衬管完井方式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的砂流入井内，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。衬管完井法使用在胶结程度差的砂岩油层，具有防砂和防止井底坍塌的作用。衬管完井法防砂是依靠油层自然形成砂拱来实现的，这样不易人工控制，因此在衬管完井法的基础上发展了砾石充填方式完井。

(四) 砾石充填完井方式

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式。即先将绕丝筛管下入井内油层部位，然后用充填液把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

与套管之间的环形空间内，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管，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，使用裸眼完井而又需要防砂时，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，然后更换钻头，将油层部位的井径扩大到套管外径的 1.5~2 倍，以确保充填砾石时有较大的环形空间，增加防砂层的厚度，提高防砂效果，如图 1-8 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，下套管至油层底部，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 1-9 所示。

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形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。该防砂方法其油井产能低于井下砾石充填，防砂有效期不如砾石充填长，它不能像砾石充填那样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，对一些不具备砾石充填的防砂井，仍是一种有效的防砂完井方法。如图 1-10 所示。

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（如图 1-11 所示），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等。

四、水平井完井方式

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 20 世纪 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。

(一) 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有地质条件，只有在下述情况下，水平完井方法才能收到经济效益。

1. 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的产率比（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。

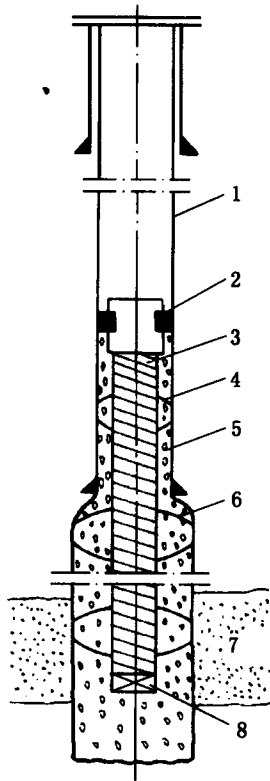


图 1-8 裸眼砾石充填完井示意图

1—技术套管；2—铅封；3—筛管；4, 6—扶正器；
5—砾石；7—油层；8—丝堵

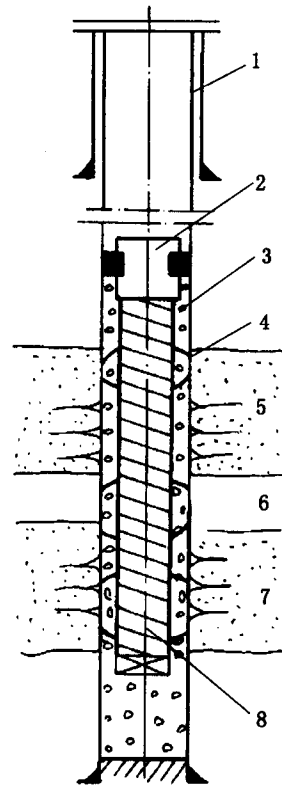


图 1-9 套管砾石充填完井示意图

1—油层套管；2—铅封；3—砾石；4—扶正器；
5, 7—油层；6—夹层；8—筛管

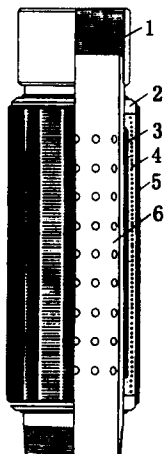


图 1-10 预充填绕丝筛管

1—接箍；2—压盖；3—内丝筛管；
4—砾石；5—外绕丝筛管；6—中心管

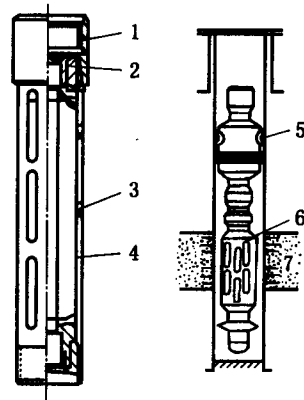


图 1-11 陶瓷防砂滤管结构示意图

1—接箍；2—密封圈；3—外管；4—陶瓷管；
5—悬挂封隔器；6—陶瓷滤管；7—油层

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。油层垂向渗透率越大，流体垂向渗流阻力越小，产量越大。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。

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。

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。

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，有利于延长水侵入井眼，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。可以认为水平完井是 20 世纪 80 年代石油工业技术最重要的发展之一。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。

(二) 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、中曲率半径水平井和小曲率半径水平井。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、割缝衬管完井和尾管射孔完井。

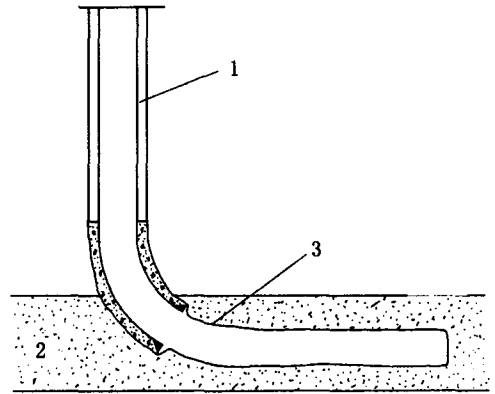


图 1-12 水平井裸眼完井示意图

1—技术套管；2—油层；3—裸眼

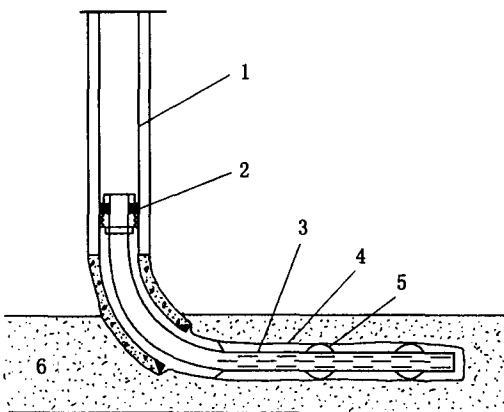


图 1-13 水平井割缝衬管完井

1—技术套管；2—封隔器悬挂短节；3—割缝衬管；
4—裸眼；5—扶正器

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 1-12 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。

2. 割缝衬管完井

图 1-13 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。

3. 尾管射孔完井

技术套管下过直井段注水泥固井后，在水平井段内下入完井尾管、注水泥固井。完井尾管和技术套管宜重合 100m 左右，最后在水平井段射孔，如图 1-14 所示。

这种完井方式将层段分隔开，可以进行分层增产及注水作业，可在稀油和稠油层中使用，是一种非常实用的方法。

4. 管外封隔器 (ECP) 完井方式

这种完井方式是，依靠管外封隔器实施层段的封隔，可以按层段进行作业和生产控制，这对于注水开发的油田尤为重要，如图 1-15 所示。

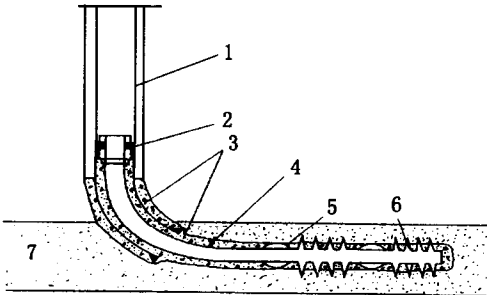


图 1-14 水平井尾管射孔完井示意图

1—技术套管；2—悬挂器；3—水泥环；4—尾管；
5—扶正器；6—射孔孔眼；7—油层

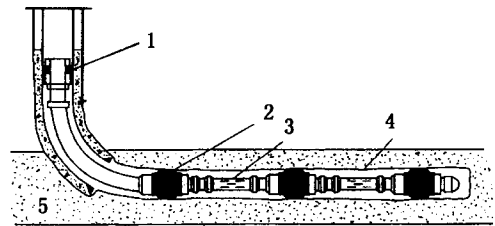


图 1-15 套管外封隔器的完井示意图

1—悬挂器；2—套管外封隔器；3—割缝衬管；
4—裸眼；5—油层

5. 砾石充填完井方式

国内外的实践表明，在水平井段内，不论是进行裸眼井下砾石充填或是套管内井下砾石充填，其工艺都很复杂，目前正处在矿场试验阶段。

裸眼井下砾石充填时，在砾石完全充填到位之前，井眼有可能已经坍塌；扶正器有可能被埋置在疏松地层中，因而很难保证长筛管居中。

裸眼水平井预充填砾石绕丝筛管完井，其筛管结构及性能同垂直井一样，但使用时应加扶正器，以便使筛管在水平段居中，如图 1-16 所示。

套管射孔水平井预充填砾石绕丝筛管完井，如图 1-17 所示。

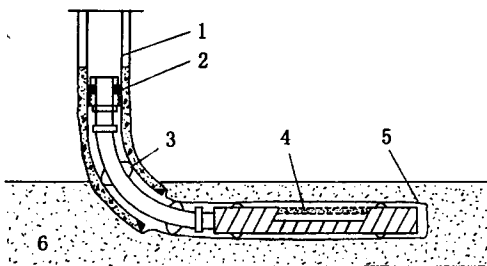


图 1-16 水平井裸眼预充填砾石筛管完井示意图

1—技术套管；2—悬挂器；3—扶正器；4—预充填砾石绕丝筛管；5—裸眼；6—油层

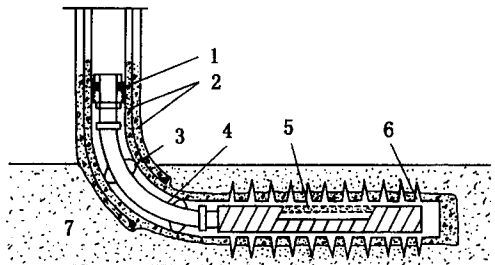


图 1-17 水平井套管内预充填砾石筛管完井示意图

1—悬挂器；2—水泥环；3—扶正器；4—尾管；
5—预充填砾石绕丝筛管；6—射孔孔眼；7—油层

水平井裸眼及套管完井井下砾石充填时，因井段太长，充填液的滤失量过大，充填过程中不仅易造成脱砂，造成砂堵而充填失败，而且会造成油层伤害。因而长井段水平井砾石充填一直处于试验阶段。近年来，国外在此方面有了技术改进，裸眼完成井，在钻井液中加入暂堵剂，将地层全部暂堵住。套管射孔完成井，在完井液中也加入暂堵剂，将射开的孔眼全部暂堵住。两者暂堵后渗透率均为零，做到无滤失，从而为砾石充填创造条件，充填液可采用盐水、 CaCl_2 水或低粘度充填液，砂比为 $240\sim 480\text{kg}/\text{m}^3$ ，充填长度已达 1000m 左右，充填砂量 13608kg 左右。在充填作业完成后，通过酸化或其他化学剂来解除暂堵堵塞。

虽然水平井砾石充填的技术问题可以解决，但工艺较复杂，成本高，因而，水平井的防砂完井目前仍多采用预充填砾石筛管，金属纤维筛管或割缝衬管等方法完成。

五、完井方式的选择

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。

（一）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. 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，注蒸汽热采。

2. 油气层特性

油气藏类型并不是选择完井方式的唯一依据，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。

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程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，是否采用注蒸汽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。

(二) 完井方式的选择

油气井是连通油气藏的唯一通道，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，所采用的不同完井方法，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 油层最大差异也达到 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, $m^3 / (MPa \cdot d)$	
	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)

完井方式的选择主要是针对单井而言，虽单井属于同一油藏类型，但其所处构造位置不同，所选定完井方式也不尽相同，如油藏有气顶、底水，若采用裸眼完成，技术套管则应将气顶封隔住，再钻开油层，而不钻开底水层。若采用套管射孔完成，则应避射气顶和底水。又如油藏有边水，套管射孔完成时，油田开发要充分利用边水驱动作用，避免射开油水过渡带。完井方式选择需要考虑的主要因素见图 1-18。

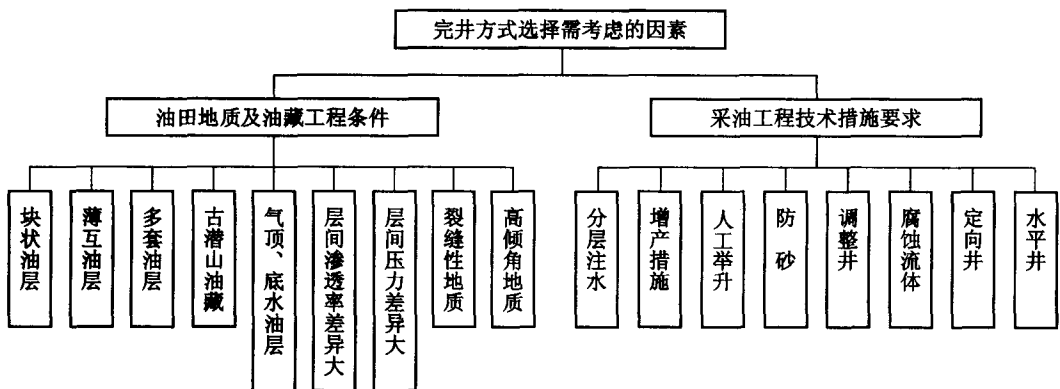


图 1-18 完井方式选择需要考虑的因素示意图

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。

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。

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。

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,其工艺主要包括通井、洗井、射孔、诱喷排液、放喷、求产、测压等,本节围绕射孔、诱喷排液和试油工艺展开讨论。

一、射孔

油气田的射孔工作是完井工程的重要组成部分,是采用将套管下过生产层的完井方法的一道基本工序。射孔是在油气井固井后,根据油田开发方案的设计要求,重新打开目的层,沟通油气层与套管内腔的一项工程技术。因此射孔是油田开发的重要步骤,为了能使油气井获得高产能和稳产,就得选择最有效的射孔器,采用合适的射孔工艺来实现。

(一) 射孔器的类型

目前世界各国的射孔技术按输送方式可以分为两类:一是电缆输送射孔;二是油管(钻杆、连续油管)输送射孔。按其穿孔作用原理可分为子弹射孔技术、聚能式射孔技术、水力喷射式射孔技术、机械割缝(钻孔)式射孔技术、复合射孔技术等。

目前常用的射孔工具是聚能喷流射孔器。

聚能喷流射孔器是一种无子弹式射孔器,目前已基本上代替了使用多年的子弹式射孔器,而得到广泛应用。它的特点是制造简单,操作可靠,功率大,射入深度大,能适应各种完井工作的需要。

聚能喷流射孔器是根据炸药在爆炸时具有方向性的特点,聚能作用就是利用炸药爆炸方向性,而将烈性炸药做成一定的几何形状,在它射出的方向有一个圆锥形的金属锥斗称为聚能穴。在穴面上镶有金属片,如图1-19所示。

聚能喷流射孔过程是由电发火雷管起爆,引燃起爆索和炸药包中的高速助爆剂,最后主炸药起爆。由炸药产生的高压使金属穴熔化,形成一股类似针状的高密度的细小金属粒子的高速喷流,其压力可达30000MPa,温度高达3000~5000℃,喷流速度达9000~12000m/s。所以,它在穿透套管和水泥环后还能深深地射入地层。

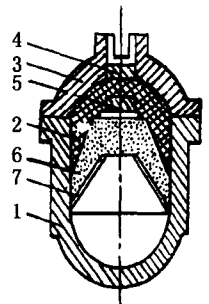


图1-19 聚能喷流射孔器

1—弹壳盖;2—炸药柱内座;3—弹壳底座;4—铅药饼;5—起炸药饼;6—炸药柱;7—金属锥斗