

井下作业 井控技术

张桂林 张之悦 颜廷杰 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

井下作业井控技术

张桂林 张之悦 颜廷杰 编著

中国石化出版社

前 言

在石油与天然气勘探开发中，井下作业是石油工程技术系列的重要组成部分，主要从事油气井的中途及完井测试、新井投产、酸化压裂、冲砂防砂、修井、检泵换泵等作业施工。井下作业井控技术，是作业施工中最重要的工程与安全技术工作之一。对于每一种不同的作业内容、每一个施工环节，都需要高度重视井控工作。作业施工中一旦发生井喷和井喷失控事故，既威胁作业人员和设备的安全，又破坏地下油气资源，而且还对环境造成严重的破坏。

随着国内石油石化行业改革重组工作的不断深入，各油田企业井下作业施工队伍逐步从上市公司分离出来，走上了规范化、专业化发展的新路子。井下作业技术进步与施工安全，也越来越受到人们的重视。但由于多方面的原因，长期以来井下作业井控技术一直没有受到应有的重视，也没有井下作业井控培训教材。为了增强井下作业人员的井控意识，提高井控理论和现场技术操作水平，有效地防止井下作业中井喷或井喷失控等重大事故的发生，中国石化集团公司胜利石油管理局钻井职工培训中心编写了《井下作业井控技术》一书。《井下作业井控技术》，是根据石油与天然气井下作业技术特点和井控技术要求，在进行大量调研、查阅大量相关技术资料基础上编写完成的，是一部专业技术教材。该教材力求井控理论与井下作业实际相结合，各内容之间层次分明、逻辑严谨，既相互融合又保持相对的独立性，图文并茂，易学易懂。本教材的编印，解决了无井下作业专业井控教材的问题。

本教材由张桂林、张之悦、颜廷杰编著，负责制定审定编写大纲、统编和审核定稿。同时范连锐参加了统编和审核。王慧珍编写井控技术部分的第一章、第二章，马晓明、张之悦编写第三章、第六章、第七章，王瑞娥编写第四章、第五章，胡雨高编写第八章、第九章，严德熙编写第十章，张桂林、颜廷杰编写第十一章、第十二章、第十三章、第十四章、第十五章。李敬奇、杜汉松、綦耀升、郭新泉、马济抚等人员参加了编写大纲的审定工作，胜利油田物资供应处方圆公司提供了部分资料并给予了大力支持，在此表示感谢！

本教材可作为对井下作业技术管理人员和现场施工人员进行技术培训、提高技术水平并取得井控操作合格证的专用培训教材，也可作为油田勘探开发相关人员、科研院所和石油院校的专业参考书及自学用书。

由于编写水平有限，本书不足之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

第一篇 井控技术

第一章 井控的基本概念	(1)
一、井控及其相关概念	(1)
二、井喷失控的原因及危害	(2)
三、不同类型油气藏的压力特点	(3)
四、油气的流动特点	(4)
五、完井方法	(9)
第二章 井下各种压力的概念及其相互关系	(12)
一、静液压力 P_m	(12)
二、地层压力 P_p	(12)
三、上覆岩层压力 σ_o	(13)
四、地层破裂压力 P_f	(14)
五、井底压力 P_b	(14)
六、井底压差 ΔP	(15)
七、循环压力损失	(15)
八、激动压力和抽吸压力	(15)
九、压力的表示方法	(15)
第三章 井内流体的运移	(17)
一、溢流的主要原因	(17)
二、各种作业工况下溢流的预兆	(18)
三、溢流的预防与监测	(18)
四、井内气体的膨胀和运移	(19)
五、天然气侵入后对井内压力的影响	(20)
六、关井后天然气滑脱上升的处理	(22)
第四章 常规关井及压井技术	(25)
一、关井方法	(25)
二、不同作业工况下的关井程序	(25)
三、关井油(立)管压力的确定和关井最大允许套管压力	(28)
四、溢流控制原理	(31)
五、常压法压井的特点	(33)
六、常压法压井的操作程序	(33)

七、地层不同流体流入井内的影响·····	(39)
第五章 非常规井控技术 ·····	(41)
一、体积控制法·····	(41)
二、挤压法(硬顶法)压井·····	(43)
三、油管离开井底压井·····	(44)
四、井漏或层间串流·····	(45)
五、强行起下管柱操作·····	(46)
第六章 几种常见作业压力控制 ·····	(50)
一、射孔作业·····	(50)
二、测试作业·····	(53)
三、酸化压裂作业·····	(54)
四、冲砂、防砂作业·····	(56)
五、检泵作业·····	(57)
第七章 井控演习及日常检查 ·····	(58)
一、井控演习·····	(58)
二、井控日常检查·····	(59)
三、井控工作的认识与对策·····	(61)

第二篇 井控设备

第八章 井控设备概述 ·····	(63)
一、井控设备的功用·····	(63)
二、井控设备的组成·····	(63)
三、手动防喷器的特点·····	(64)
四、液压防喷器的特点·····	(65)
五、防喷器的额定工作压力与公称通径·····	(65)
六、防喷器的型号及表示方法·····	(65)
七、井口防喷器的组合·····	(66)
第九章 环形防喷器 ·····	(69)
一、环形防喷器的功用·····	(69)
二、环形防喷器的类型·····	(69)
三、环形防喷器的结构和工作原理·····	(69)
四、环形防喷器技术规范·····	(74)
五、环形防喷器的合理使用·····	(76)
六、故障判断与排除方法·····	(77)
第十章 闸板防喷器 ·····	(78)
一、闸板防喷器的功用·····	(78)

二、闸板防喷器的类型·····	(78)
三、常用闸板防喷器的技术规范·····	(78)
四、闸板防喷器的结构与工作原理·····	(80)
五、液压闸板防喷器的侧门·····	(84)
六、液动闸板防喷器的锁紧装置·····	(85)
七、活塞杆的二次密封·····	(86)
八、闸板防喷器开关井操作·····	(87)
九、闸板防喷器的合理使用·····	(87)
第十一章 防喷器控制系统 ·····	(88)
一、液控箱·····	(88)
二、液控台·····	(90)
第十二章 节流与压井管汇 ·····	(103)
一、节流与压井管汇的功用·····	(103)
二、节流与压井管汇的典型组合形式与规范·····	(103)
三、节流与压井管汇的主要阀件·····	(104)
第十三章 完井井口装置 ·····	(107)
一、套管头·····	(107)
二、采油树·····	(113)
第十四章 管柱内防喷工具和液气分离器 ·····	(116)
一、旋塞阀·····	(116)
二、井下安全阀·····	(116)
三、管柱止回阀·····	(117)
四、背压阀·····	(118)
五、HK-3 型油气井抢喷装置·····	(118)
六、液气分离器·····	(124)
第十五章 井控设备试压 ·····	(126)
一、试压目的·····	(126)
二、试压介质·····	(126)
三、试压设备·····	(126)
四、试压要求·····	(128)
五、试压方法·····	(128)
六、试压注意事项·····	(129)

第一篇 井控技术

第一章 井控的基本概念

一、井控及其相关概念

井控(Well Control): 实施油气井压力控制的简称。

井侵(Influx): 当地层压力大于井底压力时, 地层孔隙中的流体(油、气、水)将侵入井内, 通常称为井侵。

溢流(Overflow): 当井底压力小于地层压力时, 井口返出液量大于泵入液量或停泵后井液自动外溢的现象称为溢流。

井涌(Well kick): 溢流进一步发展, 井液涌出井口的现象称为井涌。

井喷(Well Blowout): 当井底压力远小于地层压力时, 地层流体大量涌入井筒并喷出地面的现象称为井喷。

根据井喷流体喷出的位置不同, 井喷可分为地面井喷和地下井喷两种。

地面井喷: 指井喷流体经井筒喷出地面的现象。

地下井喷: 指井喷流体流入其他低压层, 未喷出地面。

井喷失控(Out of Control for Blowout): 井喷发生后, 无法用常规方法控制井口而出现井口敞喷的现象称为井喷失控。这是井下作业过程中最恶性的作业事故。

一级井控: 指以合理的井液密度平衡地层孔隙压力, 没有地层流体侵入井内、无溢流产生的井控技术(又称主井控)。

二级井控: 溢流或井喷后, 通过及时关井与压井重建井底压力平衡的井控技术。

三级井控: 井喷失控后, 重新恢复对井口控制的井控技术。

井控工作中“三早”的内容: 早发现、早关井和早处理。

① 早发现: 溢流被发现的越早, 越便于关井控制、越安全。国内现场一般将溢流量控制在 $1 \sim 2\text{m}^3$ 之前发现, 这是安全、顺利关井的前提。

② 早关井: 在发现溢流预兆或怀疑有溢流时, 应停止正常施工作业, 立即按关井程序关井。

③ 早处理: 在准确录取溢流数据和填写压井施工单后, 应尽快节流循环排出溢流、进行压井作业。

油气藏:

油气藏是指单一圈闭中具有同一压力系统的油气聚集, 是油藏和气藏的统称。

若圈闭内仅聚集了石油, 则称为油藏; 只聚集了天然气, 则称为气藏; 若同时聚集了石油和游离态天然气(气顶气), 则称为油气藏。

工业油气藏是指油气达到一定的富集程度, 具有工业或商业开采价值的油气藏。

油气藏主要包括三个部分：即圈闭遮挡条件、储层及储层中的流体。

二、井喷失控的原因及危害

1. 井喷失控的原因

井喷失控的直接原因大体可以归纳为以下方面：

(1) 由于井控措施不当引起的井喷

- ① 地质、工程设计不合理，导致施工的盲目性；
- ② 起管柱前未按规定进行压井；
- ③ 未及时准确地发现溢流；
- ④ 发现溢流后未及时关井；
- ⑤ 起管柱抽吸，造成诱喷；

如起打捞管柱时，封隔器将其以上环空的井液带出，造成抽吸。当管柱内液柱压力低于地层压力时将发生井喷。

- ⑥ 井口不安装防喷器；
- ⑦ 油层套管、技术套管破裂，引起井喷失控。

(2) 由于测试原因造成的井喷

- ① 试油诱喷不当；
- ② 井口防喷器(射孔大闸蟹)安装不合格；

比如在欢6-10井堵水、补层作业时，按要求打丢手封隔器。射孔作业时，井口防喷器本应用12条螺栓固定，实际只安装了4条。其中2条螺栓未上紧，另2条螺栓一端无帽。射孔至第二炮时，发现井口溢流，射孔队及时抢提电缆，提到中途时，射孔枪被井内气流顶出井外。现场人员立即抢关井口防喷器，被井内气流顶飞，井口失去控制，井内的FH-5丢手封隔器也随气流飞出井口，造成了恶性井喷失控事故。

- ③ 射孔后进行调层作业，地层压力资料不准确；
- ④ 射孔后敞井口等待试油，造成井喷；
- ⑤ 负压射孔时负压差过大；
- ⑥ 电测解释地层压力资料不准确。

(3) 井控设备安装或试压不合格造成井喷

- ① 套管短节螺纹不匹配，密封未达到要求；
- ② 防喷器与井口连接螺栓不全、紧固不够、钢圈损伤等，造成关井刺漏；
- ③ 防喷器橡胶件老化，不能承受额定压力；
- ④ 防喷设备、工具不配套；
- ⑤ 作业前井口装置及测试管线没有按规定的标准试压，或试压未达到试压标准；
- ⑥ 放喷管线固定不牢或有急转弯，放喷出口接弯头或放喷鸭嘴；
- ⑦ 气举、汽化水作业施工时，进出口管线未用地锚固定。

2. 井喷失控的危害

井喷失控泛指井喷后井口装置和井控管汇失去了对油气井的有效控制，甚至着火。油井失控和气井失控各有其特点，气井或含气油井失控处理更为困难。由于天然气具有密度小、可压缩、易膨胀、易爆炸燃烧，以及在液体中易滑脱上升、难以封闭等特性，因而对井控安全的威胁更大。

在打开油气层的过程中，尤其是在天然气井井喷过程中如果处理方法和措施不当，就会失去控制，极易引起井喷失控着火、井场爆炸及井场下陷等灾难性事故的发生。一旦发生井喷将直接影响着作业施工人员和设备、周围居民的安全，对地下油气资源和周围环境造成巨大破坏。不仅给国家和企业造成巨大的经济损失，而且给社会带来严重的不良影响。

井喷失控的危害性可概括以下七个方面：

- ① 打乱全局性的正常工作程序，影响安全生产；
- ② 使井喷事故复杂化、恶性化；
- ③ 极易引起火灾(如井场、苇地及森林)；
- ④ 影响井场周围居民的正常生活和生产，甚至危及生命安全；
- ⑤ 污染环境，影响农田、水利和渔牧业生产以及交通、通讯的正常运行等；
- ⑥ 破坏地下油气资源；
- ⑦ 造成人力及物力上的巨大损失，严重时造成机毁人亡和油气井报废。

三、不同类型油气藏的压力特点

1. 稠油油藏的特点

稠油油藏多属砂岩油藏，在我国辽河、胜利、新疆、河南等油田蕴藏着比较丰富的资源，稠油产量所占总产量的比例也日益增多。

稠油油藏一般埋藏深度浅，一般 400 ~ 1500m。油藏物性特征是孔隙度大，渗透率高，连通性较好，而且高渗透层多位于油层组的中、下部，油层厚度较大。但胶结疏松、成岩性差，岩石强度弱且很不稳定。像辽河高升稠油藏，由于长期开采油层压力系数已降至 1.0 以下，最低到 0.5。

2. 低压低渗油藏的特点

低压低渗透油藏在我国占有相当大的比例，我国的中西部与东部有广泛的分布，二连、大庆外围、华北、冀东、中原、塔里木、吐哈、吉林、江苏、百色等。油藏的基本特点是压力系数低，在 0.92 ~ 0.98 之间。砂岩油藏泥岩夹层较多，油藏埋藏浅，而且有底(边)水。二连油田是比较典型的低压低渗透油藏，除此之外，像冀中和中原油田也有类似情况。这两个油田的砂岩油藏共同特点是：埋藏深，储层层系多、岩性变化复杂、储层物性差异大，而且随埋深变差。

3. 特低渗油气藏的特点

特低渗透油气藏在我国长庆、吐哈、大庆、辽河、塔里木、江苏油田等均有分布。长庆安塞油田三叠系延长组的主力油层(长 6、长 2)，属成岩型为主的低渗透致密砂岩油藏。油层岩石胶结好，而岩性变化比较大，油层渗透率很低，平均渗透率为 $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。有底水，油层压力也很低，压力系数为 0.7 ~ 0.8，基本无自然产能，需经压裂改造才能获得工业油流和开采价值。

4. 中、高渗油藏的特点

中渗透性砂岩油藏在我国油田中占有相当的比例，在大庆、塔里木、吐哈、辽河、胜利、中原、华北、冀东、渤海等许多油田都有。高渗透性砂岩油藏，像辽河油田(曙一区)、冀东油田(高尚堡部分层位)、塔里木(吉拉克)、江苏油田(富民庄部分层位)、渤海油田等均有分布。这类油藏的特点是孔隙度较大、孔喉大、渗透性好。压力分布也很不均衡，像胜利油田压力系数大多数在 1.0 ~ 1.82 之间，个别压力系数低于 1.0 以下，最低为 0.65。

5. 古潜山油藏的特点

古潜山油藏主要受古地貌所控制, 元古界、太古界甚至出露前震旦系变质岩系为储集层。

油藏类型属于风化构造裂缝为主, 伴以破裂质孔隙及溶蚀孔隙的裂缝型储集类型。裂缝发育, 充填物主要是酸敏性矿物。有的区块岩石渗透性虽然较高, 但孔隙度为 2.9% ~ 12.9%, 其连通性稍差。岩石质硬, 有的区块夹有水层(或底水), 有的区块漏失严重。

地层压力系数差异大, 上部沙四段地层压力系数为 1.28, 易坍塌。下部潜山段地层压力系数低, 甚至小于 1.0, 易漏失。

6. 碳酸盐岩气藏的特点

四川盆地碳酸盐岩气藏有裂缝孔隙型和裂缝型。裂缝发育各不相同, 但裂缝起主要渗流作用。

碳酸盐岩岩块基质孔隙度和渗透率一般都很低, 储集层的非均质性复杂多变, 气层渗透率不一致, 同一气藏不同部位也不相同。气藏压力差异大, 像川东中石炭系气层压力系数为 1.2 ~ 1.44, 三叠系嘉陵江统压力系数为 1.8 ~ 2.0, 而且在其上部地层因裂缝溶洞易漏失, 漏失量可达数千立方米, 井喷、岩石塌落也同时存在。

综观四川盆地碳酸盐岩裂缝气藏特征和钻井中所遇到的问题, 概括起来有: 硬、陡、漏、塌、高压、高含硫、多产层、水层和多断层。

7. 含盐岩高压油气藏的特点

中原油田属复杂断块油田, 油气层埋藏深, 区块层间的地层压力差异大, 地层压力系数最高达 1.8, 尤其像文东地区断块。这类油藏的特点是: 多套盐膏层, 且覆盖面积大, 塑性复合盐岩层极不稳定, 岩性松软, 遇水溶解、膨胀、坍塌, 形成“大肚子”井眼, 受上覆压力的作用, 盐岩的塑性挤压力将套管挤扁而报废。地温梯度高, 平均为 $4.6 \sim 4.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。由于地层压力高往往造成井喷、卡钻等恶性事故。所有这些, 给钻井、完井与井下作业施工带来很大困难。

四、油气的流动特点

油藏的流动有两种, 一是在天然能量的驱动下流动, 二是在外力的驱动下流动。

1. 天然能量驱动

(1) 水压驱动

水压驱动的驱油动力是天然的水头压力。油藏的产量是通过天然供水区对油藏的水侵, 将地层原油替换出来。形成天然水压驱动的地质条件为: 油层有分布较广的含水区与良好的供水露头, 且供水充足, 露头与油层之间的高差大, 油层渗透性好且均匀, 油层与供水区之间无断层或岩性遮挡。

油藏开采时, 随着石油的不断被采出, 边水或底水逐渐向油藏内部推进, 到油藏开采后期, 油水比不断提高, 直到油井逐渐被水淹没而完全产水为止。如果供水区水源丰富, 能补偿采出之石油量, 则油井的压力和产量不随时间改变, 基本上保持稳定。具有水压驱动类型的油藏, 地层压力始终高于饱和压力。所以, 在采油过程中, 油、气比基本在较低的水平上。随着油水边界的不断推进, 含水率连续不断地升高。

水压驱动类型的开采特征是:

① 油层压力下降非常平缓, 甚至基本保持稳定。这是由于从油藏中开采出的油气体积

与侵入到含油区中水的体积在数量上基本相等所致；

② 在油藏开采期间，油气比通常变化很小。如果油藏不存在原始的自由气顶，即原生气顶，这一点就非常重要。因为边水或底水的侵入，油层压力将得到保持，所以溶解在油中的气体分离出来的数量相对来说是比较少的，而且是稳定的；

③ 油藏的产油量或含水率由于水以均匀的方式侵入到地层中故是平稳的，到开采后期因水的大量侵入产油量降低，而含水率则上升。

水压驱动类型的驱油效率主要取决于水压头的大小、油层渗透率的高低。

(2) 弹性水压驱动

弹性水压驱动类型的驱油动力主要是油藏含油部分以外的广大含水区的水和岩石的弹性膨胀力。这种驱动类型存在的地质条件为：地面没有供水露头，或者，虽有供水露头，但供水区水源不丰富，根本不能补偿采出原油而消耗的能量。此外，当含水区的面积远远大于含油区的面积。且地层压力远远高于原油的饱和压力时，弹性水压驱动类型才得以实现。

具弹性水压驱动类型的油藏开采特点为：随着石油不断被采出，压力和产量逐步下降，单位压降产量上升；在油层压力下降到饱和压力之前，油气比保持不变；随着石油不断地被采出，油水边界将逐渐向油藏方向推进。

(3) 弹性驱动

弹性驱动类型的驱油动力是油藏本身的弹性膨胀力。具有此驱动类型的油藏多半是断层封闭或岩性封闭的油藏，且缺乏丰富的含水区。

弹性驱动类型油藏的开采特征基本上与弹性水压驱动的相似，但压力和产量下降更快，单位压降产量低。

(4) 气压驱动

气压驱动油藏的驱油动力是气顶中压缩气体的弹性膨胀力。形成这种驱动类型的首要地质条件是：油藏应具有较大的原生或次生气顶；油藏渗透性较好且分布均匀；含油区与含气区之间无断层或岩性遮挡，这样才能使气顶压力有效地传递到油层内部。

气压驱动类型油藏的开采特征是：油藏产量随压力下降而逐渐减少，油气比却逐渐上升，在气顶突入到生产井以后，油气比就急剧上升。

(5) 溶解气驱动

溶解气驱动的驱油动力是从石油中分逸出来的溶解气气体的膨胀力。溶解气驱动能量的大小主要取决于油层中原油溶解气体的数量。溶解气驱动类型多出现在岩性封闭油藏、断层遮挡的断块油藏，以及油水接触带有一个氧化封隔圈的油藏，且油层压力低于饱和压力。

溶解气驱油藏是以消耗地层压力和溶解气能量的方式进行开采，故其特征为：

① 压力急剧下降。这是由于没有外部流体或较大的自由气顶来占据被采出原油所空出的空间的结果。

② 无论在油藏哪个部位的井，油气比都急剧增加。当油藏压力降到饱和压力以下时，气体将从整个地层原油中分离出来，严重时会展集成流。气流因粘度比油小而超越油流，出现只产气不产油的断流现象。随着大量溶解气的采出，油气比又开始急剧的下降，油藏能量逐渐趋于枯竭。

③ 生产无水原油。因无边水或底水作用，故油藏整个开采期间，产出的水极少或不产水。

(6) 重力驱动

重力驱动类型的驱油动力是油层内石油本身的重力。重力驱动类型一般出现在其他驱油能量已经消耗尽的油藏中,或者出现在那些已被破坏了的低能量的油藏中。根据油层倾角的陡缓,可将重力驱油分为承压式重力驱油和自由面式重力驱油。

重力驱动油藏的开采特征主要有:

① 构造低部位油井的油气比较低。这是由于流体的重力分异作用使析出的气体向构造上方运移的结果,在原始未饱和油藏中,这些气体将形成次生气顶。在构造高部位的油井,其油气比增高;

② 产水很少或不产水;

③ 油藏压力递减的速度是变化的,这主要取决于保存气体的数量。因为重力驱油藏的压力将迅速下降,从原油中释放出来的气体必然向构造上方运移。如果这部分气体被位于高部位的井采出,这就导致地层压力更快地下降。相反地,若油藏中的这部分气体被保存下来,那么,油藏就能保存部分能量,油藏将在气顶驱及重力驱的联合方式下开采,因此,油藏压力降低的速度就会减少。

从以上分析不难理解,为了最大限度地利用重力驱动的生产机理,油井应部署在尽可能低的构造部位,因为,这将最大限度地沿构造上倾方向运移来的气体保存住。

石油自油层流向井底,就是油层中各种驱油动力不断克服各种阻力的结果,这个过程是一个不断消耗油层内部能量的过程,一旦油层的驱油动力不足以克服流动阻力,油藏能量已到枯竭阶段,石油向井底的流动便终止了。这时便要靠外力来驱动了。

2. 外力驱动

在长期的油田开采生产实践中,人们找到了一种方法,就是用人工向油层内注水、注气或注其他溶剂,向油层输入外来能量,保持油层的压力。

(1) 人工注水

人工注水,是在油田开发工程中通过高压注水泵将合格水注入油层中去,以保持或提高油层压力。注水开发油田是国内外普遍采用的油田开发方式。通过注水对油层补充能量,是保持油层压力、延长自喷采油期、提高采油速率和采收率的一项重要措施。用人工注水开发油田,由于油水井之间互相影响很大,因此注水开发油田必须有一套合理的注采系统,使油田在此系统的控制下长期生产。目前现场上应用的注水方式或注采系统,主要有边缘注水、切割注水、面积注水、点状注水四种。

① 边缘注水

边缘注水就是在油田边部钻一批注水井,进行注水,保持油层压力。边缘注水一般在面积不大,构造比较完整,边部与内部连通性好,压力能够有效地传播时采用。边缘注水根据油水过渡带的地质情况,又分为三种:缘外注水——注水井按一定方式分布在外油水边界处,向含油区内注水。缘上注水——注水井按一定方式分布在油水过渡带上,向含油区内注水。边内注水——注水井按一定方式分布在含油边界以内,向含油区内注水。

② 切割注水

对于含油面积很大、储量丰富、油层性质稳定的油田,除了在油田外缘钻注水井外,还需在油田内部钻注水井,将油田分割成若干区块分别注水,每一个切割区可以看成是一个独立的开发单元,保证油田中部的采油井也能收到注水井的注水能量,确保一定的采油速度。

③ 面积注水

面积注水方式是将注水井与生产井按一定几何形状和一定的比例均匀地部署在整个开发区上。面积注水可以分为四点法、五点法、七点法、九点法、歪七点法等。如通常运用较多的正七点井网是由1口注水井周围加上6口采油井构成的。每口注水井影响6口油井，而每口油井则受3口注水井影响，这种井网的注水井与采油井数比为1:2。

④ 点状注水

在切割注水的基础上，生产井投产一段时间后，选择个别井点转为注水叫做点状注水。当中间井排被断层遮挡或受第一排生产井的节流作用，注水效果不好时，采用点状注水可改善开发效果。点状注水的特点是注水见效快，井网形状不固定，水淹区分散。

有一些油田的石油是属于高黏度重质原油，在常温常压条件下是不能流动的。这样的油田如果采用和一般油田一样的常规开采方式，是很难将地下石油开采出来的。为此，针对稠油黏度高的特点，采用了热力开采方法和化学开采方法。目前世界上通常用蒸汽吞吐和蒸汽驱的方法进行稠油工业性开采。

(2) 蒸汽吞吐

① 蒸汽吞吐法是在一口井中注入一定量的高温、高压湿饱和蒸汽，随后关井使蒸汽与油藏岩石进行热交换(即所谓的“焖井”)，然后再开井采油的方法。蒸汽吞吐采油的生产过程为注汽(吞)、焖井(焖)和回采(吐)。当井口产量降低到经济极限时，再重复以上三个过程。这样的循环可以重复多次，因此蒸汽吞吐也称为循环注蒸汽。国外有些油田的井曾进行过6~8次循环，每一次循环称为一个周期(或称为一个轮次)。通常原油峰值产量和周期累积产量都随吞吐周期的增加而递减。

② 蒸汽吞吐增产机理

- a. 高温、高压蒸汽与油藏岩石进行热交换，使近井地带成为一个热源，此热源的热量被稠油吸收，使稠油的黏度大幅度降低，流动阻力大大减少；
- b. 油层加热后，其弹性能量充分释放，增加了驱油动力；
- c. 热流体具有对油层解堵的功能，从而使得井筒附近地层渗透率得到改善。

(3) 蒸汽驱

① 蒸汽驱油法

蒸汽驱油法是一种驱替式采油方法。除了由蒸汽吞吐转为蒸汽驱外，也可以一开始就直接采用蒸汽驱。

蒸汽驱油过程与注水开采相类似，即以井组为基础，向注入井内连续注入蒸汽，蒸汽加热原油并将其驱向生产井中。蒸汽驱的采收率一般为50%~60%，有的可达75%。

② 蒸汽驱油机理

- a. 蒸汽具有对油层原油加热降粘的作用，从而大大改善了水油流度比，提高了驱油效率；
- b. 蒸汽具有使油层原油受热膨胀的作用，从而产生一定的驱油作用；
- c. 蒸汽具有从油层原油中蒸馏出石油气的作用，从而增加了驱油动力。

(4) 聚合物驱

聚合物驱是聚合物溶液驱油的简称。它是一种化学驱油法，即通过在注入水中加入化学剂(高聚物)来改善水的驱油和波及性能，进而提高原油采收率的方法。矿场应用表明，聚合物驱比水驱可提高采收率5%~15%。

聚合物驱的驱油机理就是利用聚合物增加注入水的粘度,降低水油流度比,来提高注入水波及系数的。另外,对于常见的亲水地层,聚合物容易吸附在岩石表面。当注入水从吸附层通过时,吸附层薄膜发生膨胀,从而降低了水相通过岩石的有效渗透率。当油与吸附层接触时,则不会发生膨胀现象。因此,在含油饱和度很低的油层中改注聚合物溶液驱油,可显著地降低水的流动度,减弱其舌进、指进的趋势,最终达到提高原油采收率的目的。

(5) 碱驱

碱驱也是一种改型水驱,是以碱的水溶液作为驱油剂的驱油方法。它是一种提出最早、试验最早、药剂最便宜,操作最简单,但驱油机理较复杂、限制也较多的驱油法。

碱驱机理复杂,至今已提出多种碱驱提高原油采收率的机理,其中主要的有以下五种:

① 降低界面张力机理:在低碱浓度和最佳盐浓度下,碱与原油中的酸性成分(石油酸)反应生成的表面活性物质,可以使油水界面张力降低。

② 乳化-携带机理:在低碱浓度和合适的盐浓度下,由碱与石油酸反应生成的活性剂可使地层中的残余油乳化,并被碱水相携带着通过地层。

③ 乳化-捕集机理:在低碱浓度和低盐浓度下,油易于乳化在碱水相中,但油珠直径较大,易被喉道捕集,增加了水的流动阻力和波及系数,提高了原油采收率。

④ 由油润湿反转为水润湿机理:在高碱浓度和低盐浓度下,碱可通过改变吸附在岩石表面的油性表面活性物质在水中的溶解度而使其解吸,恢复岩石表面原来的亲水性,使岩石表面由油润湿反转为水润湿,使油水相对渗透率发生变化,形成更有利的浓度比,提高驱油波及系数并降低残余油饱和度。

⑤ 由水润湿反转为油润湿机理:在高碱浓度和高盐浓度时,碱与石油中的酸性成分反应生成的表面活性及主要分布在油相并被吸附到岩石表面上,使岩石表面从水润湿反转为油润湿。这样,非连续的残余油可在其上形成连续的油相,为原油的流动提供了通道。

(6) 表面活性剂驱

用表面活性剂体系作为驱油介质的驱油法叫表面活性剂驱。

表面活性剂驱提高原油采收率的机理与碱驱大体相同,前者是通过外加表面活性剂起作用;后者则是通过碱与原油中的酸性成分反应产生表面活性剂而起作用的。

表面活性剂驱提高原油采收率,除了降低界面张力机理外,尚有增溶与乳化机理、润湿反转机理、提高电荷密度机理、聚并形成油带机理。

(7) 复合驱

复合驱是指两种或两种以上驱油成分组合起来的驱动。这里的驱油成分是指化学驱中的主剂(聚合物、碱、表面活性剂),它们可按不同的方式组成各种复合驱。

一般来说,二元复合驱比单一驱动以及三元复合驱比二元复合驱有更好的驱油效果,这主要是由于复合驱的聚合物、表面活性剂和碱之间有协同效应,它们在协同效应中起到各自的作用。

(8) 混相驱

混相驱是指以混相注入剂作为驱动介质的采油方法。按使用的混相注入剂不同,混相驱可分为烃类混相驱和非烃类混相驱两大类。前者可再分为液化石油气驱、富气驱和高压干气驱三类,后者可再分为 CO_2 驱及 N_2 驱等。

混相驱是通过使驱动介质与被驱动介质(即混相注入剂与油)之间的界面消失而产生混相来提高原油采收率的。

五、完井方法

1. 射孔完井法

射孔完井法包括套管射孔完井和尾管射孔完井，见图 1-1 和图 1-2。这种完井法是钻完油层后下入套管或尾管，注水泥后通过射孔，使井筒和产层连通，投入开采，这是应用最多的一种完井方法。

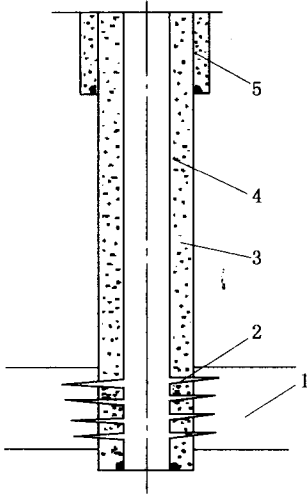


图 1-1 套管射孔完井示意图

1—产层；2—射孔孔眼；3—水泥环；
4—油层套管；5—上层套管

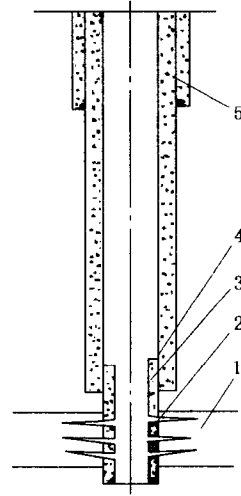


图 1-2 尾管射孔完井示意图

1—产层；2—射孔孔眼；3—水泥环；
4—油层套管；5—上层套管

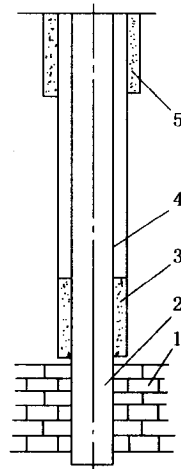
这种完井可有选择性地射开油气层，实行分层开采，可进行各种井下压裂酸化等作业，可实行多层完井，适合多种类型油气藏完井。这种完井方法对井底压差要求掌握准确。

2. 裸眼完井法

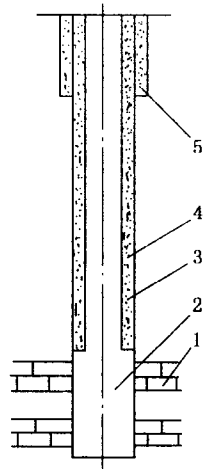
裸眼完井就是在油气层段不下套管，不注入水泥，使井眼裸露的完井方法，见图 1-3。

裸眼完井法又分先期裸眼完井法和后期裸眼完井法。先期裸眼完井法是将套管下到油气层顶部再钻开油气层。后期裸眼完井法是钻完油气层后，如油气层有开采价值，再将套管下到油气层顶部注水泥完井，后期裸眼完井一般应用较少。

裸眼完井的优点是油气层完全裸露，因而具有最大的渗滤面积，油气流入井内的阻力最小。裸眼完井法不适用于出砂井和井壁坍塌、不能分层开采和分层作业。它只适用于地层坚硬，井眼稳定的单一油气层或性质相近的多油气层的井，因而使



(a) 先期裸眼完井



(b) 后期裸眼完井

1—产层；2—井筒；3—水泥环；4—技术套管；5—上层套管

图 1-3 裸眼完井示意图

用范围小。中低渗透砂岩油田需压裂改造，裸眼完井不宜采用。

3. 割缝衬管完井法

割缝衬管完井法有两种：一种是在钻完油气层后，将割缝衬管下入下入油层部位，上部连接套管串至井口，使用套管外封隔器注水泥封固油层以上井段的环形空间。这种方法完井，如果衬管损坏，修复困难。另一种方法是用钻头钻到油层顶部，下入套管注水泥固井，然后下入钻头从套管鞋继续向下钻穿油层至完井井深，再以尾管方式下入割缝衬管的管柱，用封隔器密封衬管和套管的环形空间。这种完井方法当衬管损坏时可以起出更换。两种割缝衬管完井法见图 1-4。

使用割缝衬管还允许一些细砂随着原油进入井中，较大的砂粒被阻在衬管外面形成“砂桥”或“砂拱”，随后较小的砂粒被挡住，以后更小的砂粒被阻挡住。这样，在井壁形成由粗到细的滤砂层，阻止油层大量出砂，起到防砂效果，见图 1-5 所示。

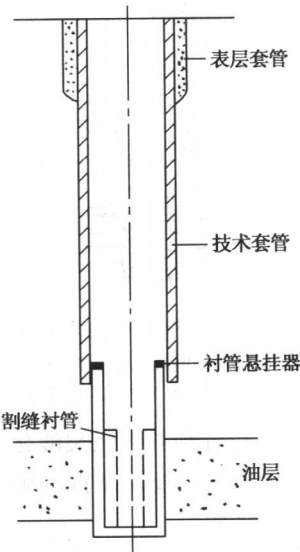


图 1-4 割缝衬管完井示意图

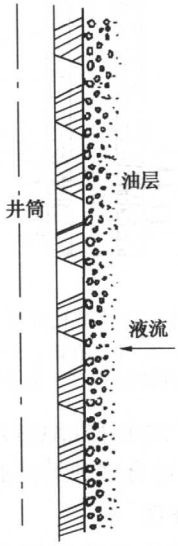


图 1-5 衬管外形成的砂桥示意图

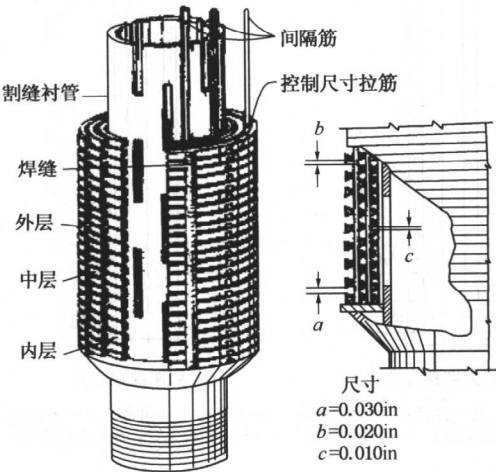


图 1-6 多层绕丝筛管

4. 砾石充填完井法

砾石充填完井适用于胶结疏松严重出砂的地层。这种完井法，是先将绕丝筛管下至油层段，用充填液循环将地面选好的砾石携带至绕丝筛管与井眼的环形空间或绕丝筛管与套管的环形空间，形成一个砾石充填层，阻挡砂粒流入井筒，起到保护井壁，防止油层砂粒进入井内的作用。

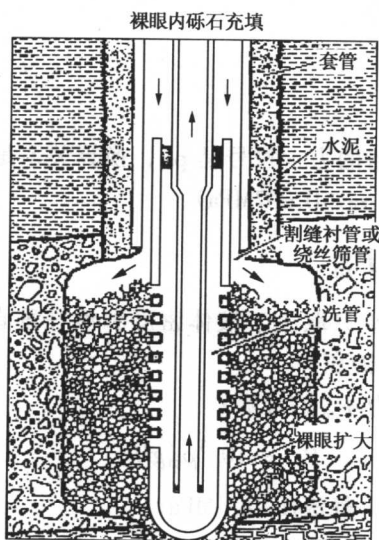
砾石充填完井使用不锈钢绕丝筛管，见图 1-6 所示。

砾石充填法又分为裸眼砾石充填完井法和套管砾石充填完井法。

(1) 裸眼砾石充填完井法

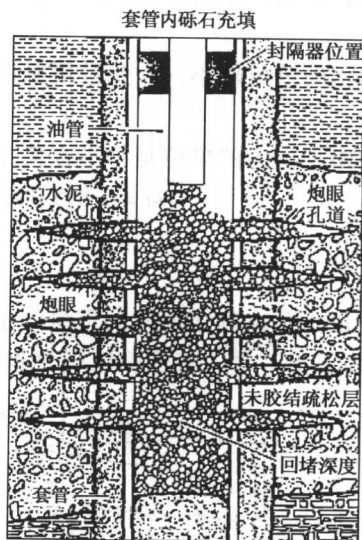
裸眼砾石充填完井法又称管外砾石充填完井法，见图 1-7 所示。

这种完井法是在油层顶部下套管注水泥封固，然后用扩孔钻头将裸眼段扩大，扩大后的井眼直径要达到原井径的 1.5~2 倍，以保证充填有足够的厚度，一般砾石层厚 50mm 以上，以提高防砂效果，然后再下入筛管管柱(外管柱)及冲洗管(内管柱)，进行填砂作业，填砂全部作业完成后，起出送入管柱，再将油管下入筛管内替入原油或柴油交井。



在较短裸眼井段常用反循环砾石充填法

图 1-7 裸眼砾石充填完井示意图



在下入筛管前可用开口油管砾石填炮眼

图 1-8 套管内砾石充填法示意图

(2) 套管内砾石充填完井法

这种完井方法是当钻头钻穿油层至完井深度后，下入油层套管注水泥固井，再对准油层射孔。一般使用大孔径(28mm)，孔密度每米 30 孔。使用高粘度的充填液进行高密度充填防砂。套管内砾石充填法见图 1-8。

裸眼砾石充填与套管内砾石充填的防砂作用是相同的，就是任何地层砂粒均被挡住，只有地层流体能通过。关键是要做到：筛管与油层砂粒相匹配，砾石尺寸与油层砂粒相匹配，使砾石充填层既能阻挡住砂粒，又具有较高的渗透性。

思 考 题

- (1) 什么是溢流？
- (2) 什么是井喷失控？
- (3) 什么是一级井控？
- (4) 什么是二级井控？
- (5) 什么是三级井控？
- (6) 简述井喷失控的危害。
- (7) 完井方式有几种？
- (8) 由于措施不当引起井喷失控的原因有哪些？