

当代石油工业

科学技术

丛书

著

吉杨会
长永
罗李赵

井技术

石油工业出版社



当代石油工业科学技术丛书

固井技术

罗长吉 李杨 赵永会 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是《当代石油工业科学技术丛书》之一,书中简要介绍了固井的目的、方法及固井工艺的主要过程;较详尽地阐述了固井的主要材质、油井水泥的标准、性能及主要的外加剂;还介绍了固井质量的检测方法及提高固井质量的基本途径。

读者对象为有关工程技术人员及相关管理人员。

图书在版编目(CIP)数据

固井技术/罗长吉等著.

北京:石油工业出版社,1999.8

(当代石油工业科学技术丛书)

ISBN 7-5021-2717-8

I. 固…

II. 罗…

III. 固井—技术

IV. TE256

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 34953 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 2 $\frac{3}{4}$ 印张 66 千字 印 1—5000

1999 年 8 月北京第 1 版 1999 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2717-8/TE·2139

定价:10.00 元

普及石油科技知识
不断提高职工素质

王涛



主 任：石宝珩

副主任：蒋其垵 傅诚德

委 员：张家茂 程希荣 林长海 齐敬思

常务秘书：齐敬思

秘 书：张卫国 杨静芬 何 莉 谭忠心

序

21 世纪是一个知识经济的时代。科学技术特别是高新技术,在这个时代中将起着积极促进社会发展的作用,并改变和建立一些新的机制和观念。一些国际动向表明,一个国家,一个民族,如果没有强大的经济基础和综合国力,在国际事务中就要处于极为不利的被动局面。因此,实施科教兴国,加速科技进步,促进经济发展是我国的基本国策。

中共中央总书记江泽民同志多次指出，发展社会生产力的决定性因素是人的因素，特别是各级领导干部的科学文化素质。因此，普及高新技术知识及先进的科学管理方法，反对伪科学、假科学是一项带有战略意义的任务。为此，石油集团公司有关部门经过两年多策划组织，邀请多位专家撰写的一套含多学科高新科技知识及管理方法的大型科普丛书《当代石油工业科学技术丛书》和广大读者见面了，这是我国石油发展史上的一件大好事，对提高广大石油职工素质和加快科技进步必将起到巨大促进作用。我作为一名石油科技工作者，投身祖国石油工业 50 多年的老兵，感到由衷地高兴！并衷心表示热烈的祝贺！

科技普及中有提高，提高科技中有普及。从建国初期开始，石油工业历任老部长、老领导都有重视科技普及工作的良好传统，不同历史时期出版的不同层次的各类科普读物培养和教育了几代人，起到了良好的社会效果。当今世界科技突飞猛进，石油工业发展所涉及的专业领域越来越多。在这种新形势下，这套丛书尤显珍贵。特值此，向这套大型丛书的策划者、组织者、撰写者以及出版发行单位的同志们致以崇高的敬意，他们的眼光和魄力值得钦佩，这套丛书将一定能够起到桥梁作用，促进科技成果转化成为现实生产力。长江后浪推前浪，科技飞涛吼新韵。我热诚

前 言

第一 石油被称为“工业的血液”，而勘探石油和开采石油都要通过钻井来实现，因此，钻井是油田开发的先期工程。一口井钻达预定深度后，就要进行“固井”。“固井”是钻井的最后一道重要工序，固井质量的好坏不仅关系到钻井作业的成败，而且是关系到油田合理开发和长期生产的百年大计。(11)

第二 随着石油工业和钻井技术的不断发展，固井技术和所涉及的学科内容也越来越广泛，固井已成为石油工程、力学、化学、硅酸盐科学、水力学、流变学等多学科相互渗透的综合学科。(23)

第三 作为科普读物，本书力求阐明固井的基础知识，讲清基本理论、基本概念和基本方法，同时还兼顾全面，较全面地介绍固井过程、工具、设备、仪器和材料。特别着重于固井技术的科研动态和发展趋势，如“油井水泥外加剂”，“提高固井质量”等章节，其内容和数据很大部分来自最新的科研成果，反映了固井技术的科研动态和发展。这不仅可供广大工人和干部阅读，同时也可供固井科技人员参考使用。(34)

为适应广大读者的需求，本书在文字上力求通俗易懂、深入浅出，并附有相关的图表进行说明。但由于编者的水平所限，缺乏经验，错误和疏漏之处在所难免，望广大读者批评指正。(58)

第五章 提高固井质量的措施 (61)

一、提高对钻井液的顶替效率 (61)

二、防止固井后水气外窜 (66)

三、提高水泥环界面胶结与密封质量 (71)

参考文献 (78)

著 者

1999年5月

第一章 固井工艺

第一章 固井工艺	(1)
一、井身结构与完井方法	(1)
二、套管及附件	(4)
三、常规固井作业	(8)
四、特种固井作业	(11)
第二章 油井水泥	(17)
一、油井水泥的水化	(17)
二、油井水泥性能及检测方法	(23)
三、影响油井水泥性能的因素及油井水泥分类	(31)
第三章 固井前置液及外加剂	(38)
一、前置液	(38)
二、油井水泥外加剂	(42)
三、特种固井水泥	(46)
第四章 固井质量检测	(54)
一、井温测井	(54)
二、声幅测井 (CBL)	(55)
三、声波变密度测井 (VDL)	(57)
四、水泥胶结评价测井 (CET)	(58)
第五章 提高固井质量的措施	(61)
一、提高对钻井液的顶替效率	(61)
二、防止固井后水气外窜	(66)
三、提高水泥环界面胶结与密封质量	(71)
参考文献	(78)

下数十米到几百米的表层套管进行封固。表层套管还用于封固地表水层，防止地表水在钻井中受到污染。此外，如果深部地层有

固井技术全书共分五章，第一章固井工艺，第二章固井材料，第三章固井设备，第四章固井施工，第五章固井质量评价。本书可作为石油工程专业的教材，也可供从事固井工作的工程技术人员参考。

第一章 固井工艺

我们知道，一口水井打成后，要用砖石砌成井壁或者下入水泥管来加固井身。同样，一口油井钻成后，也要进行“固井”。固井是将一层钢管（套管）下入到井内预定深度，再在套管和井壁之间注入水泥浆封固。由于油气井浅则数百米，深则数千米，乃至万米，套管和水泥浆要经受高温高压的恶劣环境，还要承受地下油气水及其它介质的腐蚀窜扰，以及采油作业中酸化、压裂等增产措施的种种考验，因此，固井对材质、设备和工艺有着特殊的要求，可以说固井是一门复杂的涉及面很广的综合技术，固井质量的好坏关系到油田的开发和建设，是油田长期稳产“百年大计”的基础工程。

第一节 井身结构与完井方法

固井，不仅在钻达油气目的层后进行，在钻进中途有时也要固井，因为一口油井深达数千米，在钻井过程中常常遇到井喷、井塌、井漏等异常复杂情况，影响正常的钻进，甚至导致无法继续钻进。遇到这种情况就应采取固井措施，封隔好复杂地层后，再行钻井。有的井甚至要进行几次固井，这就属于井身结构设计问题。也有的井在钻达油气层后，在油气层部位不进行固井，而是采用其他方法，这是属于完井方法问题。

1. 井身结构

根据不同的目的，固井可分为表层套管固井、中间套管（也叫技术套管）固井和油层套管固井。图 1-1 是套管层次示意图。

1) 表层套管固井

由于地表土非常松软，极易坍塌和漏失，于是在钻井时往往下数十米到几百米的表层套管进行封固。表层套管还用于封固地表水层，防止地表水在钻井中受到污染。此外，如果深部地层有

高压油气层，可在表层套管上安装防喷器，以便安全地打开高压层。



图 1-1 套管层次示意图

表层套管底脚应封固在致密坚硬的岩石上，套管外的水泥浆通常返到地面。

2) 中间套管固井

在钻进中，如果遇到高压层、疏松易塌的砾石层、钻井液大量漏失的裂缝地层，当采用调节钻井液密度等措施仍然无法克服时，往往是在这些地层强行钻过后，立即下套管封固，以保证继续钻进，这层套管叫中间套管，也叫技术套管。

另外，在钻井过程中，如果钻进上部地层和下部地层需要采用密度不同的钻井液时也要下技术套管。如上部为高压层，下部

为易漏层，则当上部用高密度钻井液钻过后，即下中间套管封固，再用低密度钻井液打开下部地层。

3) 油层套管固井

一口井钻达油气目的层后，下油层套管固井，为今后采油气建立了一个牢靠的通道，并在其上安装采油装置。同时，一口油井往往有许多油气层，各油气层的性质是不同的，为防止各油气层相互串通，实现分层开采，分层注水，分层管理和分层改造，也必须下油层套管固井，用水泥将各油气层封固和隔离开来。

表层套管尺寸最大，油层套管尺寸最小，各套管层次之间应有足够的间隙，以保证套管能顺利下入和有足够厚度的水泥环。井身结构的设计主要是确定各层次套管尺寸、下入深度和水泥封固高度，以及所需钻头的尺寸。另外，井身结构的制订应尽量系

列化，以利于钻头、套管、井口装置的生产和供应。目前，我国各油田井身结构多采用 $13 \times 9 \times 7 \times 5$ 系列，即表层套管 $13\frac{3}{8}"$ ^①、中间套管 $9\frac{5}{8}"$ 或 $7"$ ，油层套管为 $5\frac{1}{2}"$ 或 $5"$ 。

2. 完井方法

钻井的目的是为了采油，从这一根本目的出发，对完井的要求主要有以下几点：

(1) 保护生产层，减少污染。

(2) 克服井壁坍塌和防止油层出砂，保持井眼长期维持正常生产。

(3) 建立油气采集通道，减少油气流动阻力。

(4) 将各个油气层封隔开来，防止各层互相窜扰。

(5) 便于实施增产措施（酸化压裂等），便于修井。

针对不同的油气层性质，完井的方法主要有裸眼完井法、衬管完井法和射孔完井法等。

1) 裸眼完井法

裸眼完井法是将油气层完全暴露于井眼中，在油气层部位不下套管，也不固井。其优点是油气层裸露面积最大，油气流动阻力最小，但对于防塌防砂极为不利，是一种较原始的完井方法，目前已经很少采用，仅适用于那些岩性坚固稳定无气水夹层的单一油气层，或者裂缝性稠油油藏。

2) 衬管完井法

衬管完井法是在油气层部位下入带眼或带有割缝的管子（衬管）。其与裸眼相比有一定的防塌作用，但仍不能防止油层出砂，也不能将各个油气层封隔开来，目前也应用不多。主要用于单一裂缝性油气层，或井壁较为破碎的石灰岩油气层。

有的井在油气层部位下入衬管后，再在井壁和衬管之间充填一层一定尺寸的砾石，此砾石有支撑井壁的作用，也能防止油层出砂，但仍不能封隔各个油气层，此法叫“砾石衬管完井法”。

① $1\text{in} = 25.4\text{mm}$ 。

3) 射孔完井法

在油气层部位下入一层无缝钢管（套管），再在套管和井壁之间注入水泥封固，待水泥凝固形成一定强度后，在套管内用电缆下入射孔弹，射孔弹对准油气层，引爆射孔，穿透套管、水泥环及油气层一定深度，为油气入井打开了通道，这即射孔完井法。图 1-2 是几种完井方法的示意图。

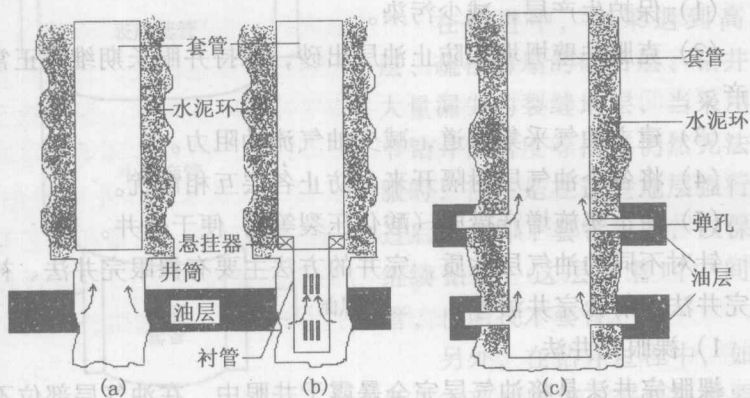


图 1-2 完井方法示意图

(a) 裸眼完井；(b) 衬管完井；(c) 射孔完井

射孔完井法能有效地防止井塌及油井出砂，同时又能有效地将各个油气层封隔出来，实现分层开采及选择性地地进行酸化压裂，因此，它是目前国内外采用最广泛的一种完井方法，而固井是射孔完井法的主要工序。

二、套管及配件

常规固井包括下套管和注水泥两道主要工序，先从套管讲起。

套管都是无缝钢管，每根长 10m 左右，两端为带有一定锥度的外螺纹，通过接箍（两端均为内螺纹）将一根根套管连接起来就组成了套管柱。

1. 套管规范

按 API (美国石油学会) 标准, 套管有 H—40, J—55, C—75, N—80, C—95, P—110 等不同钢级, 钢级代号中的数字表示该钢级的最小屈服强度, 单位为 $1000\text{lb}/\text{in}^2$ ^①。如 N—80, 表示套管钢级为 N, 钢材的最小屈服强度为 $80000\text{lb}/\text{in}^2$ 。

套管有不同的尺寸和壁厚, 套管尺寸系指套管本体的外径。API 套管尺寸系列有 $4\frac{1}{2}"$, $5"$, $5\frac{1}{2}"$, $6\frac{5}{8}"$, $7"$, $7\frac{5}{8}"$, $8\frac{5}{8}"$, $9\frac{5}{8}"$, $10\frac{3}{4}"$, $11\frac{3}{4}"$, $13\frac{3}{4}"$, $16"$, $18\frac{5}{8}"$, $20"$ 共 14 种, 每种尺寸套管又有 5.21~16.13mm 不同的壁厚。

套管螺纹分为圆形螺纹和梯形螺纹两种, 圆形螺纹又有长螺纹和短螺纹之分。从连接强度看, 长螺纹比短螺纹大, 梯形螺纹又比圆形螺纹强度大。

2. 套管设计概述

套管设计主要是根据油井的情况确定套管的尺寸和下入深度, 再根据套管柱入井后的受力情况, 经强度计算, 确定套管的钢级、壁厚和螺纹类型。

套管柱入井后所受的外力是比较复杂的, 而且不同时期受力也不同。如下套管过程中和注水泥过程中受力是不同的。油井在酸化压裂时和正常采油时套管受力也不同。因此在受力分析时应按最危险的情况来考虑。

控制套管柱设计最基本的外力是轴向拉力、外挤压力和内压力。

轴向拉力主要来自套管自重, 且在井口处轴向拉力最大, 越往下拉力越小。

套管柱所受的外挤压力应考虑管柱内外液体的压力、地层中油气水的压力以及套管外岩层的侧压力。一般最危险的情况是套管内全部掏空而套管外全充满钻井液时, 此时, 最大外挤压力发生在井底, 且越往上越小。

① $1\text{lb}/\text{in}^2 = 7.03\text{kPa}$ 。

套管所承受的最大内压力往往发生在井喷关井时，最大内压力等于地层油气压力。由于在井下套管所受的外挤压力会抵消一部分内压力，因而最大内压力将发生在井口附近。

由于轴向载荷、外挤压力和内压力沿套管柱的分布是不均匀的，从安全和经济两方面考虑，整个套管柱应由不同的钢级和壁厚组成。

套管设计程序一般是由下而上，先在下部进行抗外挤设计，再由上部进行抗拉设计，最后由抗内压来进行校核。

3. 套管柱附件

套管柱附件主要有引鞋、浮箍、扶正器、联顶节、水泥头、胶塞等，见图 1-3。

(1) 引鞋一般是圆锥型，安装在套管的最下端，其作用是引导套管柱入井，防止套管在下入时遇阻遇卡。

在二次开钻或三次开钻中表层套管和中间套管的引鞋将被钻头钻掉，因此其引鞋需用“易钻”材料制成。常用生铁引鞋、木质引鞋、铝质引鞋、水泥质引鞋等。

(2) 浮箍一般由单向阀和阻流环组成，一般连接在引鞋上面一根套管的接箍上。单向阀的作用是让水泥浆经套管流入环空，而不让环空的水泥浆倒流回套管，阻流环的作用是注水泥后阻挡胶塞通过。

(3) 扶正器固定在套管外壁上，靠它的弹性钢片扶正套管柱，使套管在井眼里居中，从而注水泥时套管柱四周的水泥环厚度均匀。

(4) 联顶节是用来联接套管头和地面固井设备水泥头的。联顶节有一定的长度。调节联顶节下入钻台转盘面以下的深度（联入），来控制套管头露出地面的距离。一般对于低洼井，套管头的露出高度应高一些，以便于安装采油装置。

(5) 水泥头用于联接联顶节和注水泥管汇，并装有胶塞，注水泥时，胶塞用锁销锁住，注水泥后释放入井。水泥头上还装有压力表，观察注水泥及试压时的压力。

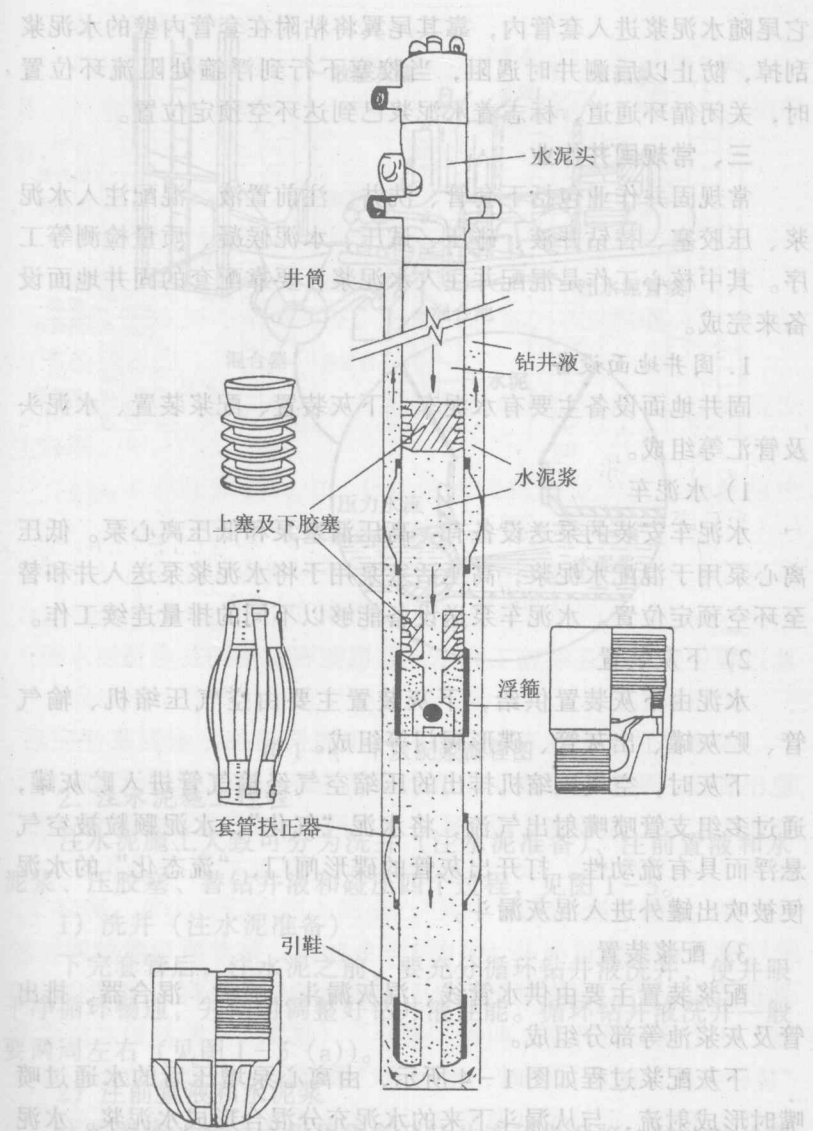


图1-3 套管柱附件

(6) 胶塞是由内嵌钢板的橡胶制成，带有尾翼。注水泥后，

它尾随水泥浆进入套管内，靠其尾翼将粘附在套管内壁的水泥浆刮掉，防止以后测井时遇阻，当胶塞下行到浮箍处阻流环位置时，关闭循环通道，标志着水泥浆已到达环空预定位置。

三、常规固井作业

常规固井作业包括下套管、洗井、注前置液、混配注入水泥浆、压胶塞、替钻井液、碰压、试压、水泥候凝、质量检测等工序。其中核心工作是混配并注入水泥浆，要靠配套的固井地面设备来完成。

1. 固井地面设备

固井地面设备主要有水泥车、下灰装置、配浆装置、水泥头及管汇等组成。

1) 水泥车

水泥车安装的泵送设备有：高压活塞泵和低压离心泵。低压离心泵用于混配水泥浆，高压活塞泵用于将水泥浆泵送入井和替至环空预定位置。水泥车泵送设备能够以不同的排量连续工作。

2) 下灰装置

水泥由下灰装置供给，下灰装置主要由空气压缩机、输气管、贮灰罐、出灰管、碟形阀门等组成。

下灰时，空气压缩机排出的压缩空气经输气管进入贮灰罐，通过多组支管喷嘴射出气流，将水泥“气化”，水泥颗粒被空气悬浮而具有流动性。打开出灰管的碟形闸门，“流态化”的水泥便被吹出罐外进入混灰漏斗。

3) 配浆装置

配浆装置主要由供水管线、混灰漏斗、喷嘴、混合器、排出管及灰浆池等部分组成。

下灰配浆过程如图 1-4 所示，由离心泵增压后的水通过喷嘴时形成射流，与从漏斗下来的水泥充分混合形成水泥浆。水泥浆经排出管到达灰浆池，由高压活塞泵吸入，再经管线和水泥头泵入井中套管内，经套管底部上返到井壁和井眼间的环空。

配浆速度由喷嘴喷出的水量和漏斗的下灰量决定。