

# 钻井技术手册 (三)

## 固井



石油工业出版社

070402

TE2-62/003-3

# 钻井技术手册



200430863

(三)

固井

徐惠峰 主编

5967/25



00677240

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书较系统地介绍了固井工艺技术,包括套管柱强度设计和下套管作业。全书共分为六章,重点在注水泥工艺技术部分。本书是在对近年来国内外油井注水泥技术发展状况进行调研的基础上,把有关资料编入相应章节中的,以保证为现场进行工程设计和施工提供实用的参考资料。本书可供油田钻井及固井技术人员使用,也可供石油院校师生参考。

### 钻井技术手册

#### (三)

#### 固 井

徐惠峰 主编

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 32 开本 17<sup>3</sup>/<sub>8</sub>印张 2插页 384千字 印1—5,000

1990年7月北京第1版 1990年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0313-9/TE·306

定价: 6.00元

## 出 版 前 言

60年代我社先后出版了玉门石油管理局编写的《钻井技术手册》中的钻头分册、泥浆分册、钻井设备分册、安装分册、固井分册和钻井打捞技术工艺分册等。随着石油工业的发展，钻井技术的不断提高，原书已不适应当前的生产需要。

根据广大读者的要求，我社准备组织有关人员重新编写一套《钻井技术手册》，其中包括钻头、泥浆、固井、打捞、安装、设备、钻具、定向井等分册，将陆续出版，供现场钻井工程技术人员、石油院校师生阅读参考。

---

## 编 者 的 话

《固井》一书主要是为现场固井工程技术人员及钻井设计工程师进行油气井套管设计及注水泥作业提供全面的工艺方法。

由于钻井工艺技术发展较快，注水泥工艺技术水平有了较大的提高。本书主要侧重于工艺基础和设计计算，既反映固井工艺的基本概念，又尽量编入更多新的工艺技术，以适应油田现场的实际需要。

在本书的编写过程中，广泛地收集了国内外有关资料，并进行了现场调研工作。初稿完成以后，石油工业部钻井司赵凯民、倪荣富、杨永年等同志对有关章节作了修改，李章亚同志对全稿进行了审阅和修改。李克向同志对第二稿进行了全面审查，并提出了许多宝贵意见。

参加本书编写工作的主要有华北油田徐惠峰、石油工业部施工技术研究所黄柏宗、大港油田吴克信。全书由徐惠峰主编。书中有关油井水泥外加剂部分由黄柏宗执笔，第三章部分内容的初稿是由吴克信完成的。

由于编写人员技术水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬希读者批评指正。

1983 年 5 月

# 目 录

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>第一章 概 述 .....</b>        | <b>( 1 )</b>   |
| <b>第一节 固井工程 .....</b>       | <b>( 1 )</b>   |
| 一、固井工程的概念 .....             | ( 1 )          |
| 二、固井工艺范围 .....              | ( 1 )          |
| 三、固井工程的特殊性 .....            | ( 3 )          |
| 四、固井工程质量 .....              | ( 4 )          |
| <b>第二节 固井设计 .....</b>       | <b>( 5 )</b>   |
| 一、设计遵循的原则 .....             | ( 5 )          |
| 二、固井设计所涉及的有关问题 .....        | ( 5 )          |
| <b>第二章 套管及套管柱强度设计 .....</b> | <b>( 21 )</b>  |
| <b>第一节 油井用套管 .....</b>      | <b>( 21 )</b>  |
| 一、套管概述 .....                | ( 21 )         |
| 二、套管的标志及公差 .....            | ( 56 )         |
| <b>第二节 套管强度设计 .....</b>     | <b>( 67 )</b>  |
| 一、设计 .....                  | ( 67 )         |
| 二、有关套管应力的基本计算 .....         | ( 69 )         |
| 三、套管柱受力分析 .....             | ( 79 )         |
| 四、有关的名词术语 .....             | ( 79 )         |
| <b>第三节 套管柱强度设计方法 .....</b>  | <b>( 86 )</b>  |
| 一、表层套管设计程序 .....            | ( 91 )         |
| 二、技术套管设计程序 .....            | ( 105 )        |
| 三、生产套管设计程序 .....            | ( 117 )        |
| <b>第四节 套管柱设计实例 .....</b>    | <b>( 124 )</b> |

|                                                 |         |
|-------------------------------------------------|---------|
| 一、18 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> 英寸表层套管的设计..... | ( 125 ) |
| 二、9 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> 英寸技术套管的设计 ..... | ( 126 ) |
| 三、7 英寸生产套管的设计.....                              | ( 135 ) |
| 四、以最大载荷法设计技术套管的实例.....                          | ( 146 ) |
| 五、实用气体方程式.....                                  | ( 156 ) |
| <b>第三章 下套管作业</b> .....                          | ( 162 ) |
| 第一节 下套管作业操作方法.....                              | ( 162 ) |
| 一、井眼的准备.....                                    | ( 162 ) |
| 二、钻机及工具设备的准备.....                               | ( 162 ) |
| 三、套管的准备.....                                    | ( 164 ) |
| 四、对扣和上扣.....                                    | ( 166 ) |
| 五、下套管.....                                      | ( 174 ) |
| 六、管串上的附件及扶正器.....                               | ( 176 ) |
| 七、套管上扣扭矩.....                                   | ( 178 ) |
| 第二节 套管的井口装定.....                                | ( 184 ) |
| 一、概述.....                                       | ( 184 ) |
| 二、套管井口装定(联顶)的设计和计算.....                         | ( 186 ) |
| 三、套管联顶计算公式的计算图.....                             | ( 197 ) |
| 四、套管头系列.....                                    | ( 211 ) |
| 五、TG 套管头安装步骤.....                               | ( 220 ) |
| <b>第四章 油井水泥及外加剂</b> .....                       | ( 226 ) |
| 第一节 概述.....                                     | ( 226 ) |
| 一、固井用基本材料及注水泥工艺.....                            | ( 226 ) |
| 二、水泥环的作用.....                                   | ( 229 ) |
| 三、油井水泥使用的特殊条件.....                              | ( 230 ) |
| 四、水泥的生产及水泥水化的概念.....                            | ( 230 ) |
| 五、油井水泥的分类及标准.....                               | ( 233 ) |
| 第二节 油井水泥性能对比及试验方法.....                          | ( 246 ) |
| 一、API 油井水泥与国产水泥对比.....                          | ( 246 ) |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 二、API 油井水泥物理性能的含义         | ( 247 ) |
| 三、油井水泥的标准试验方法             | ( 256 ) |
| 四、水泥性能有关补充资料              | ( 268 ) |
| 第三节 油井水泥外加剂               | ( 272 ) |
| 一、外加剂的应用及其概念              | ( 272 ) |
| 二、改善水泥浆流动性能的外加剂           | ( 277 ) |
| 三、稠化时间调节剂                 | ( 283 ) |
| 四、降低水泥浆失水的外加剂             | ( 287 ) |
| 五、水泥密度调节剂                 | ( 297 ) |
| 六、提高水泥石热稳定性的外加剂           | ( 307 ) |
| 七、其它材料                    | ( 319 ) |
| <b>第五章 注水泥工程设计及计算</b>     | ( 326 ) |
| 第一节 注水泥方案的选择              | ( 326 ) |
| 一、注水泥方案的确定原则              | ( 326 ) |
| 二、注水泥方案的各种影响因素            | ( 326 ) |
| 三、方案选择和注水泥设计项目            | ( 327 ) |
| 第二节 注水泥作业程序               | ( 329 ) |
| 一、程序设计                    | ( 329 ) |
| 二、一次注水泥的基本步骤              | ( 330 ) |
| 第三节 水泥浆设计                 | ( 332 ) |
| 一、影响水泥浆设计的因素              | ( 332 ) |
| 二、井深的影响                   | ( 334 ) |
| 三、水泥浆的设计                  | ( 344 ) |
| 四、水泥石抗压强度及热稳定性和腐蚀环境对设计的影响 | ( 346 ) |
| 五、有关计算的基本公式               | ( 347 ) |
| 第四节 注水泥设计和计算              | ( 355 ) |
| 一、一次注水泥程序设计项目             | ( 355 ) |
| 二、一次注水泥常规设计及计算            | ( 355 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 三、注水泥流变参数的计算.....              | ( 377 ) |
| 第五节 注水泥工艺技术.....               | ( 398 ) |
| 一、水泥浆流变性能的测定和计算.....           | ( 398 ) |
| 二、水泥浆密度、温度及混拌对临界流速的影响.....     | ( 401 ) |
| 三、注水泥前置液.....                  | ( 404 ) |
| 四、注水泥事故及复杂情况分析.....            | ( 415 ) |
| 五、替泥浆用各型泥浆泵的冲次和排量.....         | ( 416 ) |
| 第六节 注水泥套管串的配接.....             | ( 426 ) |
| 一、常规套管串配接.....                 | ( 426 ) |
| 二、常用套管串附件.....                 | ( 426 ) |
| 第七节 固井质量的检查.....               | ( 432 ) |
| 一、质量标准.....                    | ( 432 ) |
| 二、水泥环质量的鉴定.....                | ( 433 ) |
| <b>第六章 特殊固井技术</b> .....        | ( 439 ) |
| 第一节 内管注水泥方法.....               | ( 439 ) |
| 一、应用条件及范围.....                 | ( 439 ) |
| 二、工艺方法.....                    | ( 440 ) |
| 第二节 尾管固井工艺.....                | ( 442 ) |
| 一、概述.....                      | ( 442 ) |
| 二、尾管固井的套管程序.....               | ( 442 ) |
| 三、尾管悬挂装置.....                  | ( 444 ) |
| 四、尾管固井的设计和计算.....              | ( 459 ) |
| 第三节 分级注水泥技术.....               | ( 464 ) |
| 一、分级箍作用原理.....                 | ( 464 ) |
| 二、双级注水泥工艺的正规式及连续式程序和三级注水泥..... | ( 466 ) |
| 三、分级注水泥设计及操作要点.....            | ( 470 ) |
| 第四节 定向井固井技术.....               | ( 479 ) |
| 一、定向井固井存在的问题.....              | ( 479 ) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 二、摩擦阻力.....              | ( 480 ) |
| 三、套管弯曲附加轴向载荷的计算.....     | ( 483 ) |
| 四、定向井、斜井注水泥措施.....       | ( 483 ) |
| 第五节 可溶性地层注水泥.....        | ( 486 ) |
| 一、概述.....                | ( 486 ) |
| 二、盐岩层固井的工艺措施.....        | ( 486 ) |
| 第六节 高压气层影响下的固井技术.....    | ( 491 ) |
| 一、气体侵入水泥浆柱和水泥浆失重的机理..... | ( 491 ) |
| 二、气井固井技术.....            | ( 493 ) |
| 第七节 高温井固井工艺.....         | ( 502 ) |
| 一、高温给固井带来的问题.....        | ( 502 ) |
| 二、允许温升值与套管材质的关系.....     | ( 503 ) |
| 三、允许温升与套管弯曲和热应力公式.....   | ( 503 ) |
| 四、套管受热的“井温”变化计算.....     | ( 506 ) |
| 五、高温井固井.....             | ( 507 ) |
| <b>附录 固井工程用表</b> .....   | ( 510 ) |
| 一、常用单位换算表.....           | ( 510 ) |
| 二、常用容积表.....             | ( 513 ) |
| 三、常用水泥浆混合容积表.....        | ( 517 ) |
| 四、API 套管性能数据表.....       | ( 518 ) |
| 五、API 套管紧扣扭矩表.....       | ( 519 ) |
| 六、VAM 套管紧扣扭矩表.....       | ( 535 ) |
| 七、密度、压力梯度、浮力系数表.....     | ( 542 ) |

# 第一章 概 述

## 第一节 固井工程

### 一、固井工程的概念

固井是一口油气井建井过程中的关键环节，是多工种联合施工的作业，它是一项应用工程。

为了加固井壁，保证继续安全钻进，封隔油、气和水层，保证勘探期间的分层试油及在整个开采过程中合理的油气生产，为此下入优质钢管，并在井筒与钢管环空充填好水泥的作业，称为固井工程。

### 二、固井工艺范围

#### 1. 固井与井身结构的关系

井身结构设计包括井眼尺寸、套管层次、下入深度、完井方法、水泥返深等项目。

套管层次和下入深度的设计原则是：要求能有效地保护油气层，封隔不同压力层系，尽可能地减小钻井液及水泥浆对产层的污染，控制井的喷、漏、塌、垮卡等复杂情况的发生，从而实现安全钻进，获得最短的建井周期和使全井成本最低。井身结构设计主要考虑以下因素：

(1) 近平衡压力钻井时使用密度最低的钻井液。

(2) 钻下部井段使用的钻井液，不允许压裂上层套管鞋处的裸眼地层。

(3) 保证下套管不发生压差卡钻事故。

(4) 控制井喷。压井时在套管鞋处采用的压力梯度应小于地层破裂压力梯度。

(5) 两个合理的标准间隙，即套管与井眼的间隙及钻头与套管的间隙。

固井设计应掌握上述条件及设计因素，尤其是地层破裂压力和间隙值，它们将影响水泥浆、注水泥流变设计和套管类型及套管尺寸的选择。

## 2. 套管柱类型及强度设计

通过井身结构设计，确定因不同目的而下入的各层套管。依据其功能可分以下类型：

(1) 导管（美国标准中的打入管亦属此种类型）；

(2) 表层套管；

(3) 技术套管（一层或几层，包括钻进尾管，或称为中间套管）；

(4) 生产层套管（包括生产尾管及衬管，也称为油层套管）。

固井设计应当完成不同类型套管的强度设计（国外主要由钻井设计工程师完成，固井工程师依据注水泥设计来完成管串的附件设计）。

## 3. 注水泥工艺设计及计算

主要有如下内容：

(1) 注水泥方案的选择。

(2) 水泥浆设计，油井水泥类型的选择，依据注水泥条件（温度、压力）的计算结果而定。水泥试验程序，隔离液或冲洗液设计及相容性试验，流变学计算，外加剂选择和油井水泥的处理。注水泥的基本计算，包括水泥量、水量、

外加剂用量计算, 以及顶替量和压力计算等。

(3) 保证水泥环质量的措施, 包括套管扶正器位置计算, 活动套管方式。措施的核心部分是平衡压力固井设计, 其设计原则是要求注替水泥浆的动液柱压力 (包括环空流动阻力) 小于地层破裂压力, 环空的静液柱压力 (考虑水泥浆的失重条件) 大于地层孔隙压力。在上述原则基础上, 确定水泥上返临界流速及冲洗液、隔离液性能和数量, 以及要求的井眼标准和注水泥时的钻井液性能标准。

(4) 候凝的规定, 套管的井口装定 (联顶), 水泥环质量检查, 套管试压标准。

#### 4. 特殊注水泥工艺涉及的固井工艺新内容

(1) 油井水泥的准备。油井水泥外加剂以干混配方式为主, 便于质量控制。

(2) 套管的准备和下入。除圆螺纹套管以外, 对特殊螺纹的检查方法, 下入程序及密封脂的特殊规定应有补充说明。

(3) 管串特种工具附件的使用, 包括用分接箍分级注水泥工艺, 使用各种类型尾管悬挂器的尾管注水泥工艺, 以及管外封隔器、尾管地锚等一系列工艺技术的设计。

另外, 还有工程质量的补救、挤水泥等工艺技术。

### 三、固井工程的特殊性

(1) 是一次性工程, 如果质量不好, 一般情况下难以补救。

(2) 是隐蔽性工程, 主要流程在井下, 施工时不能直接观察, 质量控制往往决定于设计的准确性和准备工作的好坏, 受多种因素的综合影响。

(3) 影响后续工程的进行。

(4) 是一项花钱多的工程。

(5) 施工时间短, 工序内容多, 作业量大, 是技术性强的工程。

#### 四、固井工程质量

工程质量反映固井技术水平。不断地完善工艺技术, 目的是为了提 高固井工程质量。当前主要从固井用的材质、技术方法及其检测手段三个方面入手, 不断提高固井质量。

当前, 固井质量有如下几个方面的问题。

##### 1. 套管柱强度设计

出现的质量问题是套管的强度破坏。主要是未完全考虑井的各种外载条件或数值差异, 尤其是开发及注水形成套管外压超载及地层剪切应力所造成的破坏, 另外是未认真考虑套管受力的腐蚀条件, 以及塑性地层引起的套管破坏。

##### 2. 下套管操作程序

主要是缺乏严格而科学的下入程序、检查标准、最佳上扣扭矩、合格的套管螺纹密封脂, 以及由清洁螺纹、对扣、引扣等一系列错误操作, 造成套管联接处破坏或失效。

##### 3. 注水泥设计失当使水泥环质量产生问题

(1) 在水泥浆顶替钻井液过程中发生窜槽。

(2) 不能平衡孔隙压力, 致使油、气、水对水泥环造成窜槽。

(3) 由于高温而使水泥石强度破坏。

(4) 水泥浆质量不好及其在渗透段地层脱水等因素; 环空造成憋泵, 形成管内长段水泥塞; 管外返深不够。

(5) 不符合平衡固井设计要求, 动液柱压力将地层压

裂而使水泥浆漏失，水泥未返至设计深度。

(6) 测量井径不准或计算失误，注入水泥量不够，环空水泥环长度不够。

(7) 施工失误，替空套管鞋。

(8) 选择水泥类型不当，造成水泥石腐蚀破坏或强度不够，影响胶结强度。

(9) 配浆质量，包括外加剂加入不当，造成环空水泥环质量低劣。

## 第二节 固井设计

### 一、设计遵循的原则

固井工艺设计的原则是，能满足地质的目的，并符合质量标准且经济效益最好。

固井设计是要从全井出发，考虑地层条件，搞好产层保护；使地质、钻井及有关要求均在固井设计中得到体现。固井质量将表现在完井后的长期生产过程中，它的优劣会长期影响生产，因此，固井质量非常重要。固井设计还应遵守政府颁布的有关规定和条例，包括井下和地面的环境保护。

### 二、固井设计所涉及的有关问题

为了达到上述目的，现介绍典型的深井固井设计应涉及的内容。首先介绍基本参数和设计条件的选择。

#### 1. 井身结构

包括井眼尺寸、套管尺寸及下入深度。

##### (1) 井眼尺寸与套管尺寸的关系

套管是否能成功地下入预计深度及所要求的最小水泥环

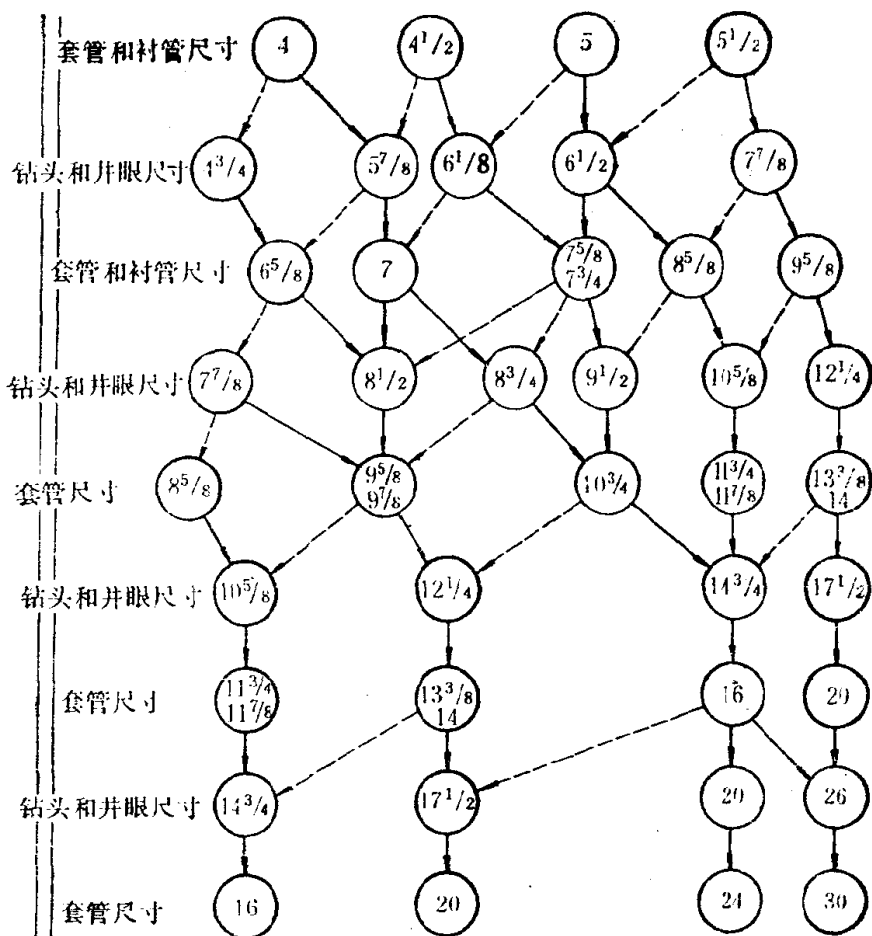


图 1-1 套管选择图

图中的尺寸单位均为英寸，这张图可用于选择完成钻井计划所需的套管和钻头。应用这张图，可确定最后要下入的套管或尾管的大小。在图上找到所需套管尺寸，箭头所指处即指出该尺寸管子所需井眼大小。实线指出通常该尺寸管子所用钻头，并可考虑具有足够间隙，以下入套管或尾管，以及注入水泥。虚线指示出不常采用的井眼尺寸，选择这些虚线所指结果时，需对接头、泥浆、比重、注水泥，以及拐弯井段等给予特别的注意。

厚度均影响工程质量。井眼与套管的合理间隙值有其基本标准和经验数值，间隙过大影响水泥浆的顶替效率，过小则不能满足水泥石的最低强度要求。原则上是大尺寸套管应有较大间隙值，最小间隙应保证水泥环厚度不低于 19.05mm。按照经验，7" 以下套管，间隙值不小于 20mm；7"~9 $\frac{5}{8}$ " 套管，间隙值为 25~35mm；10 $\frac{3}{4}$ " 以上套管，间隙值为 35~50mm。

现推荐国外常规采用的间隙系列，即全井套管尺寸选择图，见图 1—1 及图 1—2。

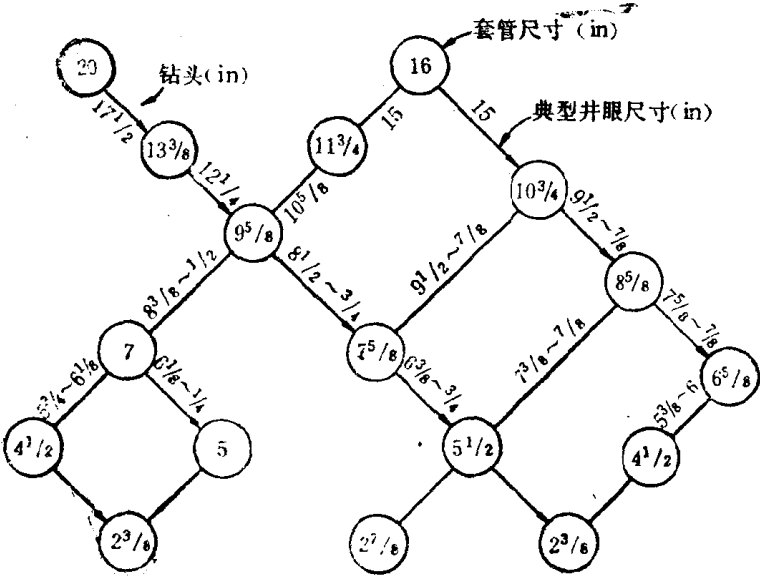


图 1-2 典型套管/井眼尺寸

通用的套管和井眼尺寸见表 1-1，API 标准钻头尺寸见表 1-2。