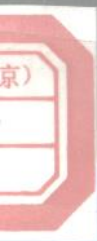
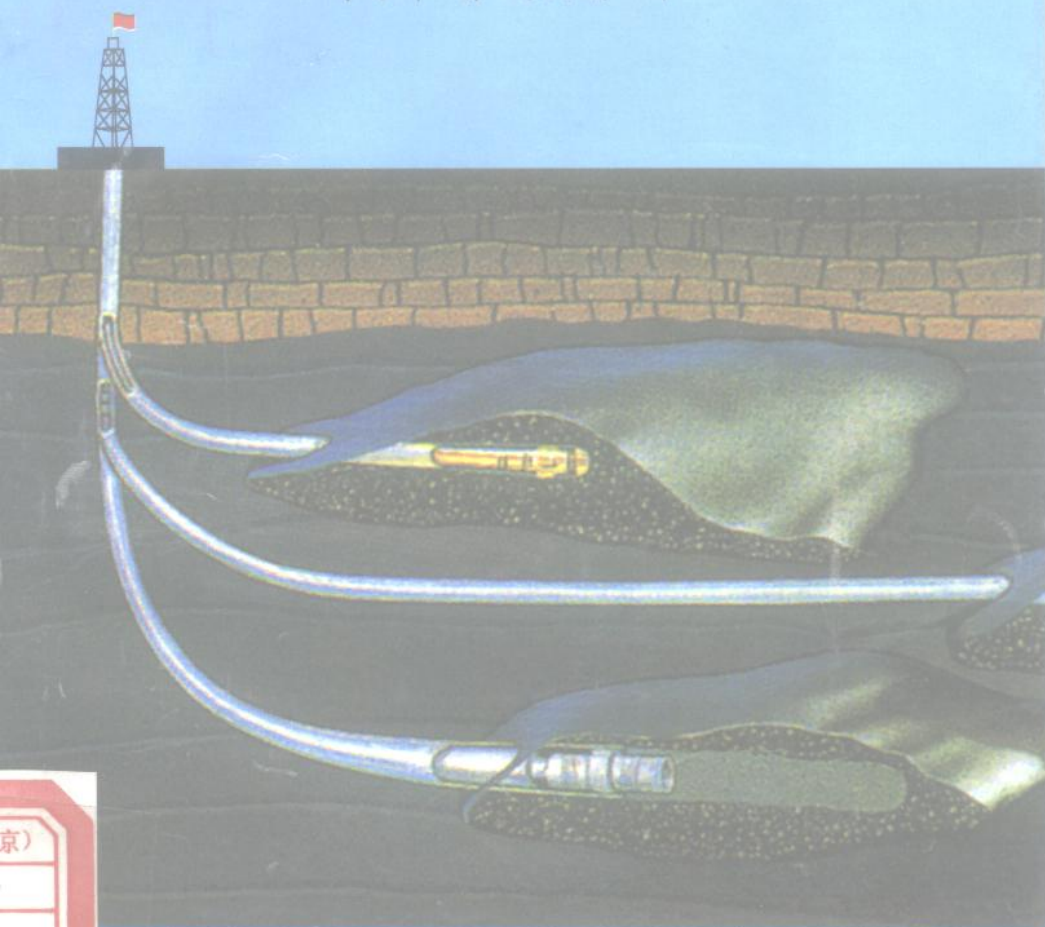


# 油气井杆管柱力学

李子丰 著 马兴瑞 审



石油工业出版社

|     |        |
|-----|--------|
| 登录号 | 088783 |
| 分类号 | TE 931 |
| 种次号 | 001    |



200458691

# 油气井杆管柱力学



00862318

石油工业出版社

|              |  |
|--------------|--|
| 石油大学         |  |
| 图书馆          |  |
| 赠书           |  |
| 赠书者: 李子丰     |  |
| 日期: 96.10.22 |  |

## 内 容 提 要

本书建立了油气井杆管柱动力学基本方程,并在此基础上系统地建立了油气井杆管柱的稳态拉力—扭矩模型、钻柱纵向振动的数学模型、钻柱扭转振动的数学模型、钻柱纵向与扭转耦合振动的数学模型、导向钻具三维小挠度静力学分析的数学模型、导向钻具三维大挠度静力学分析的数学模型、导向钻具三维小挠度动力学分析的数学模型、定向井有杆泵抽油系统动态参数诊断技术的数学模型、定向井有杆泵抽油系统动态参数预测的数学模型,详细研究了油气井杆管柱的静力稳定性,建立了热采井管柱力学分析方法。

本书可供石油工程界和力学界的工程技术和研究人员阅读,也可作为石油院校的研究生教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

油气井杆管柱力学/李子丰 著 马兴瑞 审

北京:石油工业出版社,1996.5

ISBN 7-5021-1726-1

I. 油…

II. 李…

III. ①井(石油、天然气)—杆柱—动力学

②井(石油、天然气)—井下管柱—动力学

IV. TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 06042 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)

安达市友谊印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850×1168 毫米 32 开本 5 印张 120 千字 印 1—600

1996 年 5 月北京第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1726-1/TE·1469

定价:7.00 元

## 前 言

80年代中期以来,根据石油工业发展的需要,作者一直从事油气井杆管柱力学的研究工作,与大庆石油学院、石油大学、大庆石油管理局、辽河石油勘探局、大港石油管理局和地质矿产部石油钻井研究所等单位的科技工作者合作,完成了国家“八五”重点科技攻关项目“石油水平井钻井成套技术”、中国石油天然气总公司资助项目“井眼—钻具—地层相互作用的理论研究”和“油气井杆管柱动静态受力分析的综合数学模型”、大庆石油管理局重大科技项目“斜直井采油技术”、辽河石油勘探局重大科技项目“水平井开采技术”和地质矿产部海洋地质与石油地质局科技项目“定向井钻井技术”等课题的研究工作,取得了可喜的研究成果、良好的社会效益和巨大的经济利益。目前,作者正在从事国家“九五”重点科技攻关项目“侧钻水平井钻井采油配套技术”和大庆石油学院基金项目“油气井杆管柱的稳定性”等课题的研究工作。

本书对上述研究成果的理论部分进行了提炼和整理,具有如下几个特点:

(1)内容新颖。收入本书的仅为作者及合作者近几年的研究成果;其它教材和专著中已有的内容,基本不再收入。

(2)理论和系统性强。本书紧紧围绕油气井杆管柱的力学问题这一中心,开始介绍了油气井井眼轨道和杆管柱,接着从油气井杆管柱动力学基本方程出发,对油气井杆管柱的诸类力学问题进行了系统、详细的论述,最后论述了套管柱的热弹性力学问题。

(3)起点高。本书的内容自国家重大科技项目等最新研究成果提炼而来,无论从数学理论、力学理论和专业水平上,都具有较高的起点,对一些基础理论未做详细叙述,而是直接应用。

(4)实用性强。本书收录的理论成果,基本都在实践中得到了成功的应用。

在进行科研工作和本书编写过程中,得到了大庆石油学院、石

油大学、大庆石油管理局、辽河石油勘探局、大港石油管理局和地质矿产部石油钻井研究所等单位的领导、专家和工程技术人员热情指导和帮助,本书的成果也包含着他们的辛劳和汗水,在此向他们特别是哈尔滨工业大学黄文虎院士、邹振祝博士导师、邹径湘博士导师,中国石油天然气总公司赵国珍博士导师、李克向教授级高级工程师,石油大学刘希圣博士导师、胡湘炯教授、黄荣樽教授,大庆石油管理局胡博仲教授级高级工程师、柴连善高级工程师,辽河石油勘探局廖润康高级工程师、吴德华高级工程师,大庆石油学院陶景明教授、杨敏嘉教授、张少南教授、张建群教授,地质矿产部石油钻井研究所李国华高级工程师表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,错误和不足之处在所难免,诚请专家和读者批评指正。

作者 1996 年 3 月

# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第一章 油气井井眼轨道和杆管柱的运动状态 .....          | 1  |
| § 1-1 井眼轨道的描述与计算 .....              | 1  |
| § 1-2 油气井杆管柱 .....                  | 5  |
| § 1-3 油气井杆管柱的运动状态 .....             | 9  |
| § 1-4 钻柱及钻头的涡动 .....                | 15 |
| 第二章 油气井杆管柱动力学基本方程 .....             | 17 |
| 第三章 钻柱自转和公转诱发牛顿流体层流流动的数学模型 ...      | 23 |
| 第四章 油气井杆管柱的稳态拉力—扭矩模型 .....          | 30 |
| 第五章 钻柱的振动 .....                     | 39 |
| § 5-1 钻柱纵向和扭转振动的微分方程 .....          | 41 |
| § 5-2 钻柱纵向振动的数学模型 .....             | 43 |
| § 5-3 钻柱扭转振动的数学模型 .....             | 45 |
| § 5-4 钻柱纵向与扭转耦合振动的数学模型 .....        | 47 |
| 第六章 下部钻具三维力学分析 .....                | 49 |
| § 6-1 导向钻具三维力学分析的微分方程 .....         | 53 |
| § 6-2 导向钻具三维小挠度静力学分析的数学模型 .....     | 57 |
| § 6-3 导向钻具三维大挠度静力学分析的数学模型 .....     | 63 |
| § 6-4 导向钻具三维小挠度动力学分析的数学模型 .....     | 66 |
| 第七章 油气井杆管柱的静力稳定性 .....              | 72 |
| § 7-1 斜直井中杆管柱屈曲的微分方程 .....          | 72 |
| § 7-2 水平井段杆管柱几何线性屈曲的数学模型 .....      | 76 |
| § 7-3 水平井段杆管柱几何非线性屈曲的数学模型 .....     | 77 |
| § 7-4 斜直井段杆管柱正弦屈曲和螺旋屈曲的临界载荷 .....   | 78 |
| § 7-5 无重杆管柱的几何线性螺旋屈曲 .....          | 81 |
| § 7-6 无重杆管柱的几何非线性螺旋屈曲 .....         | 83 |
| 第八章 定向井有杆泵抽油系统井下工况力学分析的数学模型 .....   | 87 |
| § 8-1 定向井有杆泵抽油系统井下工况力学分析的微分方程 ..... | 88 |
| § 8-2 定向井有杆泵抽油系统动态参数诊断技术数学模型 .....  | 92 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| § 8-3 定向井有杆泵抽油系统动态参数预测的数学模型 .....  | 94  |
| § 8-4 垂直井有杆泵抽油系统动态参数诊断技术数学模型 ..... | 96  |
| § 8-5 垂直井有杆泵抽油系统动态参数预测的数学模型 .....  | 102 |
| 第九章 热采井管柱力学分析 .....                | 108 |
| § 9-1 井筒—地层热学计算的理论数学模型 .....       | 110 |
| § 9-2 井筒—地层热学计算的简化数学模型 .....       | 116 |
| § 9-3 套管柱力学分析 .....                | 122 |
| § 9-4 注汽管柱力学分析 .....               | 128 |
| 基本数据 .....                         | 135 |
| 符号说明 .....                         | 138 |

# 第一章 油气井井眼轨道和杆管柱的运动状态

## § 1-1 井眼轨道的描述与计算

在石油工程中,井眼轨道可分为如下几类:

(1)按照井斜角的大小可分为直井、定向井和水平井。如图 1-1 所示。

(2)按照设计轨道上是否有方位角变化可分为二维轨道和三维轨道。

(3)对于水平井,通常按照造斜率大小分为四种类型。即长曲率半径( $>300\text{m}$ )水平井,中曲率半径( $90\sim 300\text{m}$ )水平井,短曲率半径( $6\sim 12\text{m}$ )水平井和径向( $<2\text{m}$ )水平井。

设计的井眼轨道一般都是解析几何中常见的标准数学曲线或它们的组合,因此,井眼轨道上任意一点的参数都可以精确求得。实际钻出的井眼轨道远比设计的井眼轨道复杂,即使设计为直井,其实际井眼轨道仍是一条空间曲线。井眼轨道描述是石油工程的基础工作。

### 一、井眼轨道的描述方法

因为实际井眼轨道是一条空间曲线,所以可以用空间直角坐标系来描述。一般选取直角笛卡尔坐标系  $ONED$ 。原点  $O$  选在井口处; $N$  轴指向正北,单位矢量为  $i$ ;  $E$  轴指向正东,单位矢量为  $j$ ;  $D$  轴垂直向下,单位矢量为  $k$ 。如图 1-1 所示。描述井眼轨道的参数有如下几种:

(1)基本参数 在石油工程中,井眼轨道参数是通过下入井眼

内的测斜仪器测出的,它测出的是一系列离散井深( $l$ )点所对应的井斜角( $\alpha$ )和方位角( $\varphi$ ),通过它们可以确定出其它参数,所以将它们称为基本参数。

井深——自井口沿井眼轴线到测点的长度;

井斜角——测点处井眼轴线切线与铅垂线的夹角;

方位角——测点处井眼轴线切线在水平面的投影与正北的夹角。

(2)坐标参数 用于描述井眼轨道的空间位置。主要有北坐标( $N$ ),东坐标( $E$ ),垂直深度( $D$ )。

(3)挠曲参数 描述井眼轨道的弯曲和扭转程度。主要有曲率( $K_b$ )和挠率( $K_s$ )。

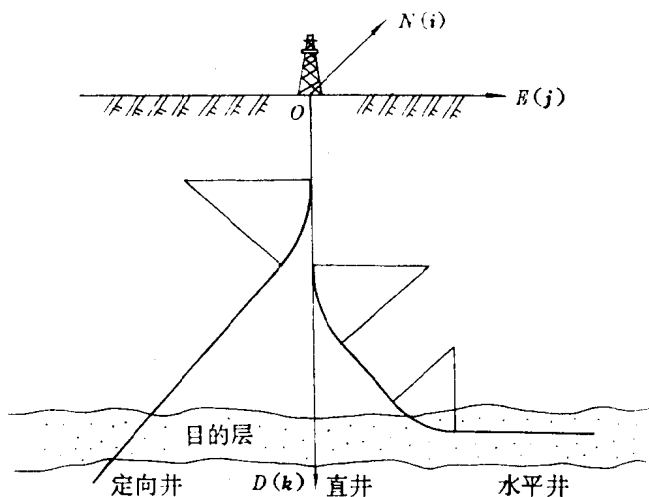


图 1-1 井眼轨道的类型和坐标系

## 二、井眼轨道各参数之间的关系

### 1. 用三次样条函数描述井斜角和方位角的变化规律

由于实际测得的井眼基本参数是一系列井深离散点所对应的井斜角和方位角, 不便于计算, 为此, 用三次样条把井斜角和方位角表达为井深的函数。

设从井深  $l_0$  开始至井深  $l_n$  为止, 共测得  $n+1$  个点的井深、井斜角和方位角:

$$\begin{array}{ccccccc} l_0, & l_1, & l_2, & \dots, & l_n \\ \alpha_0, & \alpha_1, & \alpha_2, & \dots, & \alpha_n \\ \varphi_0, & \varphi_1, & \varphi_2, & \dots, & \varphi_n \end{array}$$

分段函数  $\alpha(l)$  和  $\varphi(l)$  在区间  $[l_{i-1}, l_i]$  的表达式分别为:

$$\begin{aligned} \alpha(l) = & \alpha_{i-1} \frac{l_i - l}{h_{i-1}} + \alpha_i \frac{l - l_{i-1}}{h_{i-1}} \\ & + [A_i(l - l_{i-1}) + B_i(l - l_i)](l - l_{i-1})(l - l_i) \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \varphi(l) = & \varphi_{i-1} \frac{l_i - l}{h_{i-1}} + \varphi_i \frac{l - l_{i-1}}{h_{i-1}} \\ & + [a_i(l - l_{i-1}) + b_i(l - l_i)](l - l_{i-1})(l - l_i) \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中:

$$\begin{aligned} h_{i-1} &= l_i - l_{i-1} \\ A_i &= \frac{M_{i-1} + 2M_i}{6h_{i-1}} \\ B_i &= -\frac{2M_{i-1} + M_i}{6h_{i-1}} \\ \alpha_i &= \frac{m_{i-1} + 2m_i}{6h_{i-1}} \\ b_i &= -\frac{2m_{i-1} + m_i}{6h_{i-1}} \end{aligned}$$

系数  $M_i, m_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$  既与井斜角和方位角的测量值有

关,又与井口和井底的边界条件有关。设井口和井底的井斜角和方位角的一阶导数为常数,则有:

$$m_0 = m_n = M_0 = M_n = 0 \quad (1.3)$$

若令

$$\mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}$$

$$\lambda_i = 1 - \mu_i$$

则  $M_i (i=1, 2, 3, \dots, n-1)$  满足:

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = D_i \quad (1.4)$$

其中:

$$D_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{h_i} - \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

$m_i (i=1, 2, 3, \dots, n-1)$  满足:

$$\mu_i m_{i-1} + 2m_i + \lambda_i m_{i+1} = d_i \quad (1.5)$$

其中:

$$d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left( \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h_i} - \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

## 2. 坐标参数与基本参数之间的关系

$$\left. \begin{aligned} N(l) &= \int_0^l \sin \alpha \cos \varphi \, dl \\ E(l) &= \int_0^l \sin \alpha \sin \varphi \, dl \\ D(l) &= \int_0^l \cos \alpha \, dl \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

## 3. 挠曲参数与基本参数之间的关系

若将井眼轨道用矢量表示

$$\mathbf{r}_o = N\mathbf{i} + E\mathbf{j} + D\mathbf{k} \quad (1.7)$$

则伏雷内公式为:

$$\left. \begin{aligned} t &= \frac{dr_o}{dl} \\ \frac{dt}{dl} &= K_b n \\ \frac{dn}{dl} &= K_s b - K_b t \\ \frac{db}{dl} &= -K_s n \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

式中,  $K_b$  和  $K_s$  分别为  $r_o$  点的曲率和挠率:

$$\left. \begin{aligned} K_b^2 &= \frac{d^2 r_o}{dl^2} \cdot \frac{d^2 r_o}{dl^2} \\ K_s &= \frac{\left( \frac{dr_o}{dl}, \frac{d^2 r_o}{dl^2}, \frac{d^3 r_o}{dl^3} \right)}{K_b^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

## §1-2 油气井杆管柱

油气井杆管柱主要包括钻柱、套管柱、油管柱和抽油杆柱四类。它们均由长约8m~13m的圆截面杆或圆环截面管通过螺纹连接而成,总长可达一万米以上。

### 一、钻柱

钻柱由钻头、钻铤、钻杆和稳定器、减振器、震击器、井下马达等组成。

#### 1. 钻头

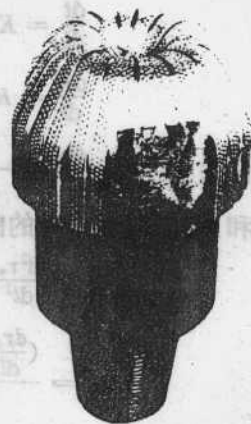
钻头是破碎岩石的工具。目前主要有金刚石钻头、刮刀钻头、牙轮钻头和 PDC 钻头四大类。其直径一般在95mm~660mm的范围内。如图1-2所示。

#### 2. 钻铤

钻铤由厚壁钢管制成。一端为公扣,一端为母扣。通体外径相等,内径相等;其外径在79mm~355mm的范围内;内径为31mm~



刮刀钻头



金刚石钻头



牙轮钻头



PDC 钻头

图1-2 钻头

76mm。如图 1—3 所示。主要用于：

- (1)靠钻铤自身的重量为钻头提供钻压；
- (2)输送高压钻井液；
- (3)传递扭矩；
- (4)控制井眼轨道。

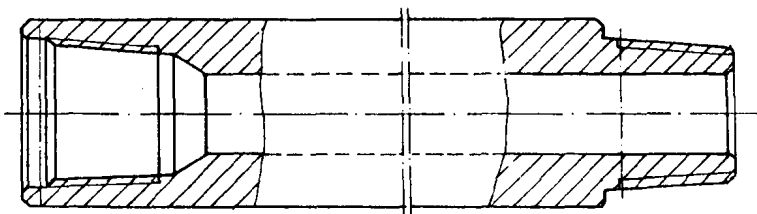


图1-3 钻 铤

### 3. 钻杆

钻杆由厚壁钢管制成。两端的接头比本体粗。一端为公扣，一端为母扣。其管体外径为73mm~168mm，壁厚8.38mm~11.40mm，内径为33mm~126mm。如图1-4所示。其作用为：

- (1)将钻头送入井底，起下井内钻具；
- (2)输送高压钻井液；
- (3)传递扭矩；
- (4)控制钻压。

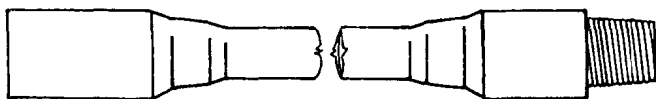


图1-4 钻 杆

#### 4. 稳定器

稳定器是钻柱的一个短节。它的外径接近于钻头直径。有直棱和螺旋两种类型。稳定片长304mm~1219mm, 稳定器总长1371mm~3000mm。如图1—5所示。其作用是使钻柱中心趋于井眼中心, 进而控制井眼轨道。



图1—5 稳定器

#### 5. 减振器

减振器是一段轴向弹性较好的钻铤。它的作用为减缓钻柱内的振动, 降低钻柱内的应力, 减少钻柱破坏。

#### 6. 震击器

震击器是钻柱的一个短节。当轴向拉力或压力达到一定的数值时, 产生一个剧烈的轴向振动, 以解除卡钻。

#### 7. 井下马达

某些钻井系统在钻柱下部装有液驱动或电驱动的马达, 用于提供钻头破岩所需能量。井下马达的外部形状与钻铤的外部形状相似, 置于钻头与钻铤之间。定向井用井下马达常与稳定器连为一体, 外壳带有一到二个弯角, 称为单弯或双弯马达。

#### 8. 钻柱实例

(1) 普通转盘钻具组合  $\Phi 311\text{mm}$ XHP2 钻头(0.3m) +  $\Phi 310\text{mm}$  稳定器(1.985m) +  $\Phi 178\text{mm}$  钻铤(17.67m) + 521/631接头(0.375m) +  $\Phi 203\text{mm}$  钻铤(9.11m) +  $\Phi 310\text{mm}$  稳定器(1.9m) +  $\Phi 203\text{mm}$  钻铤(8.77m) +  $\Phi 310\text{mm}$  稳定器(1.9m) +  $\Phi 203\text{mm}$  钻铤

(80.6m)+ $\Phi$ 197mm 震击器(5.1m)+ $\Phi$ 203mm 螺旋钻铤(17.87m)+631/520接头(0.36m)+521/410接头(0.38m)+ $\Phi$ 127mm 厚壁钻杆(110m)+ $\Phi$ 127mm 钻杆

(2)导向钻具组合  $\Phi$ 215mm SST 钻头(0.25m)+ $\Phi$ 165mm 1.25度单弯马达(6.5m)+431/4A10接头(0.4m)+ $\Phi$ 211mm 稳定器(1.8m)+ $\Phi$ 165mm 无磁钻铤(9.1m)+ $\Phi$ 165mm MWD 短节(2m)+411/410接头(0.65m)+ $\Phi$ 165mm 无磁钻铤(9m)+ $\Phi$ 127mm 厚壁钻杆(46m)+411/4A10接头(0.4m)+ $\Phi$ 159mm 钻铤(117m)+4A11/410接头(0.4m)+ $\Phi$ 159mm 震击器(11m)+411/4A10接头(0.4m)+ $\Phi$ 159mm 钻铤(18m)+4A11/410接头(0.4m)+ $\Phi$ 127mm 厚壁钻杆(64m)+ $\Phi$ 127mm 钻杆

## 二、套管柱

套管柱由套管连接而成,其主要作用为固定井壁,形成油层至地面的通道,外径114mm~508mm,壁厚5.21mm~17.78mm,内径97mm~486mm。

## 三、油管柱

油管柱由油管连接而成。油管与钻杆相似,但比钻杆壁薄。它的主要作用为提供开采油气或注入水、蒸汽等的通道,外径26.7mm~114.3mm,壁厚2.87mm~7.82mm。

## 四、抽油杆柱

抽油杆柱由抽油杆连接而成。它的主要作用为向井下抽油泵提供动力,直径16mm~25mm。

# § 1—3 油气井杆管柱的运动状态

## 一、油气井钻采过程

### 1. 钻进

油气井设计完成后,就按设计要求进行施工。首先用钻具按要求钻出井眼,并将岩屑用钻井液携带至地面并清除掉,如图1—6所

示。

### 2. 下套管注水泥

当井眼按要求钻达预定深度后,从井内提出钻柱。为了固定井壁以免井壁岩石破坏而堵塞井眼,就下入套管,并在套管与井壁之间注满水泥浆。如图1—7所示。

### 3. 下油管

在下列三种情况下,需要下入油管:

- (1)油气井产量不高,下入油管减小流道面积,增大气举作用;
- (2)油井压力低,无法自喷时,提供抽油的油流通道;
- (3)向油层注入水、蒸汽和聚合物等。

为了定量分层注入等工艺需要,用封隔器将油管下部密封固定在套管内。

### 4. 抽油

当地层内流体的压力较小,自喷油井产量太低或不自喷时,就要采取人工举升措施。常用的措施为气举、电潜泵、射流泵、水力活塞泵和杆式抽油泵,其中以抽油用的最广泛。在抽油时,地面设备将电能转化为机械能,使抽油杆柱做上下往复运动,驱动下端的柱塞抽油泵工作,把井内流体抽出。如图1—8所示。

## 二、油气井杆管柱的运动状态

各种杆管柱,因其用途不同,其运动状态不同。钻柱的运动状态很复杂,有自转、公转(涡动)(图1—9所示)、纵向振动、扭转振动、横向振动等。套管在下入时以轴向运动为主,下入后有旋转运动。油管在下入时以轴向运动为主,正常工作时有较弱的纵向振动。抽油杆则作周期纵向振动。下面主要描述钻柱的运动状态。

### 1. 自转

钻柱的自转是指钻柱绕自身轴线的转动。在一般旋转钻井中,