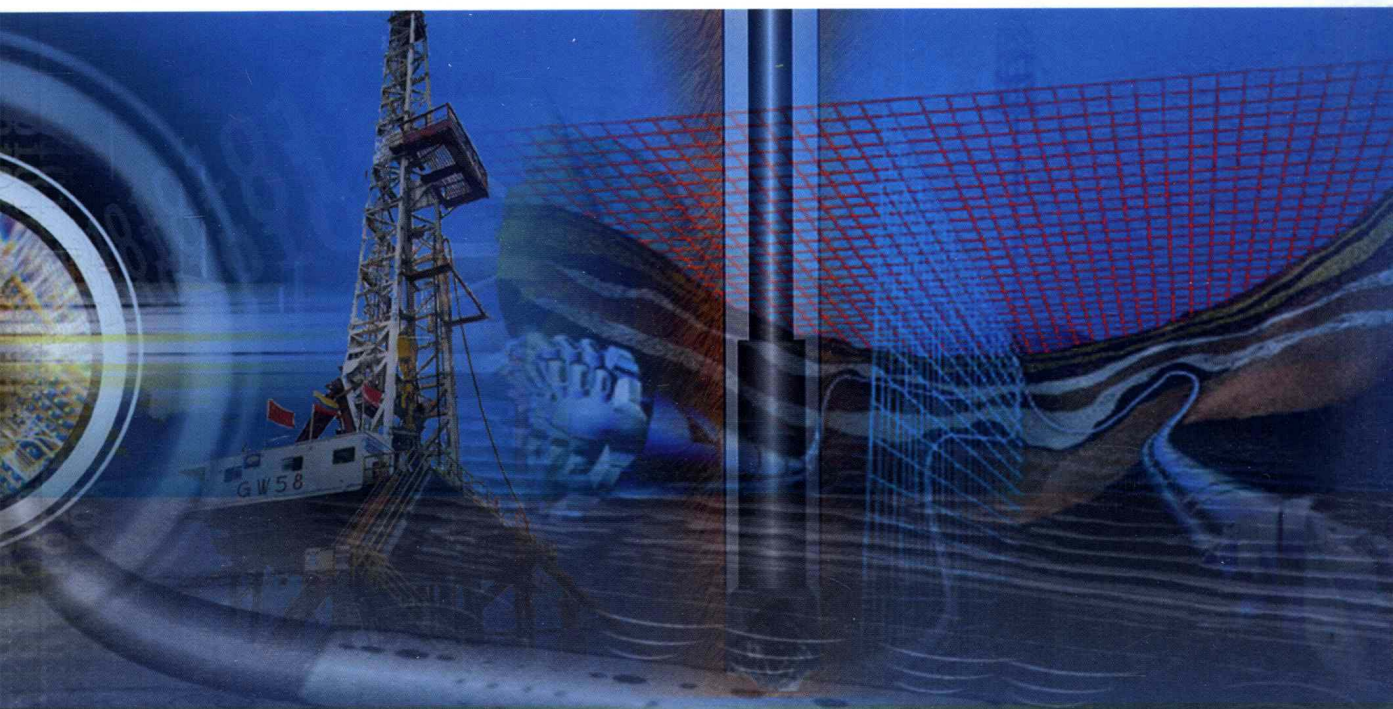




国家自然科学基金资助

油气井杆管柱力学及应用

● 李子丰 著



Tubular Mechanics in Oil-Gas Wells and Its Applications

石油工业出版社

油气井杆管柱力学及应用

李子丰 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了油气井杆管柱及其在井下的运动状态、油气井杆管柱的载荷和失效方式,然后建立了油气井杆管柱动力学基本方程,并在此基础上详细介绍了油气井杆管柱动力学基本方程在分析油气井杆管柱的稳定性、杆管柱的稳态拉力和扭矩、钻柱振动、下部钻具三维力学分析与井眼轨道预测、有杆泵抽油系统参数诊断与预测、热采井管柱力学分析和固井等方面的应用。

本书为石油高等院校研究生教材,也可供石油工程界和力学界的工程技术和研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气井杆管柱力学及应用/李子丰著.

北京:石油工业出版社,2008.8

ISBN 978-7-5021-6641-0

I. 油…

II. 李…

III. 油气钻井-井下管柱-力学-研究

IV. TE 931

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 083862 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) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14.5

字数: 368 千字 印数: 1—2000 册

定价: 46.00 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

从 20 世纪 80 年代中期以来,根据石油工业发展的需要,我们一直从事油气井杆管柱力学的研究工作,主要承担过国家“八五”和“九五”重点科技攻关项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家自然科学基金项目和石油企业委托项目,取得了一系列的理论研究成果,并在实践中得到了良好的社会效益和巨大的经济利益。

在科学研究的过程中,创立了有特色的油气井杆管柱力学理论体系,主要包括油气井杆管柱动力学基本方程及其在计算油气井杆管柱的稳态拉力和扭矩、钻柱振动、下部钻具三维力学分析、杆管柱的稳定性、有杆泵抽油系统参数诊断与预测和热采井管柱力学分析等方面的应用。

基于对油气井杆管柱力学的贡献,作者获得了 1997 年中国科学技术发展基金会孙越崎科技教育博士后奖和 1998 年黑龙江省青年科技奖。

本书对上述研究成果进行了提炼和整理,具有如下几个特点:

(1) 内容新颖。收入本书的仅为我们近几年的研究成果;其他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,首先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) 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。

(4) 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。为此,阅读本书需要有比较深的数学、力学基础和宽广的专业知识。

所著《油气井杆管柱力学》获得 1999 年黑龙江省优秀著作一等奖,并被国内多所大学选作研究生教材。

由于本人水平所限,错误和不足之处在所难免,诚请专家和读者批评指正。

著作者
2008 年 7 月

目 录

第一章 油气井井眼轨道和杆管柱的运动状态	(1)
第一节 井眼轨道的描述与计算	(1)
第二节 油气井杆管柱	(3)
第三节 油气井杆管柱的运动状态	(7)
第四节 钻柱及钻头的涡动	(10)
第五节 钻柱运动状态的判别	(11)
参考文献	(12)
第二章 油气井杆管柱的载荷与失效	(13)
第一节 油气井杆管柱的载荷	(13)
第二节 油气井杆管柱的失效方式	(14)
参考文献	(16)
第三章 油气井杆管柱动力学基本方程及应用简况	(17)
第一节 油气井杆管柱动力学基本方程	(17)
第二节 动力学基本方程应用简况	(20)
参考文献	(21)
第四章 钻柱自转和公转诱发牛顿液体层流流动的数学模型	(23)
第一节 钻柱自转和公转诱发牛顿液体层流流动数学模型	(23)
第二节 钻柱与钻井液相互作用研究进展	(27)
参考文献	(27)
第五章 油气井杆管柱的静力稳定性	(28)
第一节 斜直井中杆管柱屈曲的微分方程	(28)
第二节 水平井段杆管柱几何线性屈曲的数学模型	(31)
第三节 水平井段杆管柱几何非线性屈曲的数学模型	(32)
第四节 斜直井段杆管柱正弦屈曲和螺旋屈曲的临界载荷	(32)
第五节 无重杆管柱的几何线性螺旋屈曲	(35)
第六节 无重杆管柱的几何非线性螺旋屈曲	(37)
第七节 油气井杆管柱的稳定性与纵横弯曲	(38)
第八节 近期国内钻柱静动力分岔研究及存在问题	(40)
第九节 “压不弯钻铤”缺乏理论基础	(43)
参考文献	(44)
第六章 油气井杆管柱的稳态拉力—扭矩模型及应用	(46)
第一节 油气井杆管柱的稳态拉力—扭矩模型	(47)
第二节 钻柱强度校核	(51)
第三节 钻柱减磨措施	(53)
第四节 井下工况监测	(55)

第五节	定向井钻柱力学分析与井下工况监测软件	(58)
第六节	大修井技术参数设计软件	(66)
	参考文献	(68)
第七章	井下作业油管柱力学分析	(69)
第一节	油管温度分布的数学模型	(69)
第二节	油管内及环空水力计算	(69)
第三节	封隔器的活塞效应产生的轴向阻力	(71)
第四节	油管下入过程的受力与变形分析	(72)
第五节	油管起出过程的受力与变形分析	(75)
第六节	施工作业过程中油管的受力与变形分析	(77)
第七节	油管柱优化设计	(79)
第八节	井下作业油管柱力学分析软件	(80)
	参考文献	(82)
第八章	钻柱的振动	(83)
第一节	钻柱纵向和扭转振动的微分方程	(83)
第二节	钻柱纵向振动的数学模型	(85)
第三节	钻柱扭转振动的数学模型	(93)
第四节	钻柱纵向与扭转耦合振动的数学模型	(94)
第五节	钻柱纵向与扭转振动分析软件	(95)
	参考文献	(107)
第九章	定向井有杆泵抽油系统井下工况力学分析	(109)
第一节	有杆泵抽油系统井下工况力学分析的微分方程	(109)
第二节	定向井有杆泵抽油系统动态参数诊断技术	(112)
第三节	定向井有杆泵抽油系统动态参数预测	(114)
第四节	垂直井有杆泵抽油系统动态参数诊断技术	(116)
第五节	垂直井有杆泵抽油系统动态参数预测技术	(119)
第六节	有杆泵抽油系统井下工况诊断技术软件	(122)
第七节	直井有杆泵抽油系统动态参数预测技术软件	(123)
	参考文献	(125)
第十章	下部钻具力学分析与井眼轨道控制	(127)
第一节	井眼轨道控制的研究目标和研究概况	(127)
第二节	下部钻具三维力学分析的微分方程	(130)
第三节	下部钻具三维小挠度静力学分析	(133)
第四节	下部钻具三维大挠度静力学分析	(143)
第五节	下部钻具三维小挠度动力分析	(148)
第六节	钻头与地层相互作用模型	(152)
第七节	井眼轨道预测与控制方程	(158)
第八节	下部钻具三维小挠度静力学分析软件	(160)
第九节	井眼轨道预测软件	(161)
	参考文献	(163)

第十一章 热采井管柱力学分析	(166)
第一节 井筒—地层热学计算的理论数学模型.....	(166)
第二节 井筒—地层热学计算的简化数学模型.....	(171)
第三节 套管柱力学分析.....	(175)
第四节 注汽管柱力学分析.....	(181)
参考文献.....	(187)
第十二章 防止套管热破坏的预膨胀固井技术	(189)
第一节 理论模型.....	(189)
第二节 计算示例.....	(194)
第三节 施工程序.....	(196)
参考文献.....	(198)
第十三章 膨胀筛管力学分析	(200)
第一节 膨胀筛管及变形描述.....	(200)
第二节 变形过程力学分析.....	(201)
第三节 膨胀筛管力学分析程序.....	(205)
参考文献.....	(206)
附录 A 符号说明	(207)
附录 B 两端铰支中心压杆的平面屈曲	(215)
附录 C 非线性最小二乘最优化方法	(218)
附录 D 热力学基本数据	(222)
附录 E 国际单位制的基本单位	(224)

第一章 油气井井眼轨道和杆管柱的运动状态

第一节 井眼轨道的描述与计算

油气井是以勘探开发石油和天然气为目的，在地层中钻出的具有一定深度的圆柱形孔眼。

井眼轨道是表示井眼轴线形状的图形。

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（大于 300m）水平井，中曲率半径（90~300m）水平井，短曲率半径（6~12m）水平井和径向（小于 2m）水平井。

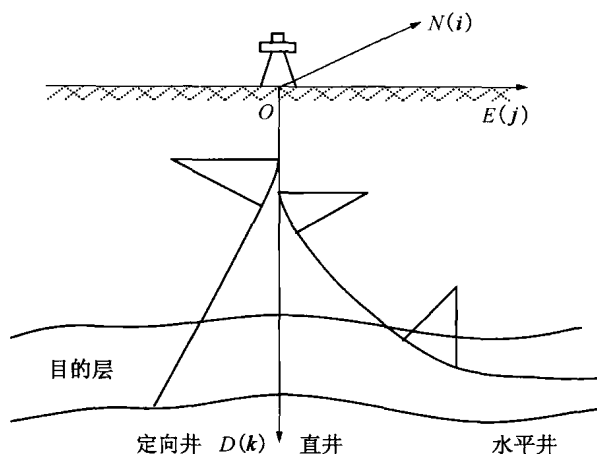


图 1-1 井眼轨道的类型和坐标系

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^[1-2]

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。一般选取直角笛卡儿坐标系 $ONED$ 。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 (α) 和方位角 (ϕ), 通过它们可以确定出其他参数, 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

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

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_n)。

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测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测深的函数。

设从测深 l_0 开始至测深 l_n 为止, 共测得 $n+1$ 个点的测深、井斜角和方位角为

$$l_0, l_1, l_2, \dots, l_n$$

$$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$$

$$\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$$

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

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

$$\phi(l) = \phi_{i-1} \frac{l_i - l}{h_{i-1}} + \phi_i \frac{l - l_{i-1}}{h_{i-1}} + [a_i(l - l_{i-1}) + b_i(l - l_i)](l - l_{i-1})(l - l_i) \quad (1.2)$$

其中, $h_{i-1} = l_i - l_{i-1}$, $A_i = \frac{M_{i-1} + 2M_i}{6h_{i-1}}$, $B_i = -\frac{2M_{i-1} + M_i}{6h_{i-1}}$, $a_i = \frac{m_{i-1} + 2m_i}{6h_{i-1}}$, $b_i = -\frac{2m_{i-1} + m_i}{6h_{i-1}}$ 。

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 ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 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 ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 满足

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

其中, $d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left(\frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{h_i} - \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$ 。

2. 坐标参数与基本参数之间的关系

坐标参数与基本参数之间的关系表示如下:

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

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

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

则弗雷内公式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{t} &= \frac{d \mathbf{r}_o}{dl} \\ \frac{d \mathbf{t}}{dl} &= K_b \mathbf{n} \\ \frac{d \mathbf{n}}{dl} &= K_n \mathbf{b} - K_b \mathbf{t} \\ \frac{d \mathbf{b}}{dl} &= -K_n \mathbf{n} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

式中 $\mathbf{t}$ ——切线方向的单位向量;

$\mathbf{n}$ ——主法线方向的单位向量;

$\mathbf{b}$ ——副法线方向的单位向量;

K_b, K_n —— $\mathbf{r}_o$ 点的曲率和挠率。

$$\left. \begin{aligned} K_b^2 &= \frac{d^2 \mathbf{r}_o}{dl^2} \cdot \frac{d^2 \mathbf{r}_o}{dl^2} \\ K_n &= \frac{\left(\frac{d \mathbf{r}_o}{dl}, \frac{d^2 \mathbf{r}_o}{dl^2}, \frac{d^3 \mathbf{r}_o}{dl^3} \right)}{K_b^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

第二节 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 8~13m 的圆截面杆或圆环截面管通过螺纹连接而成, 总长可达 10000m 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 95~660mm 的范围内，如图 1-2 所示。

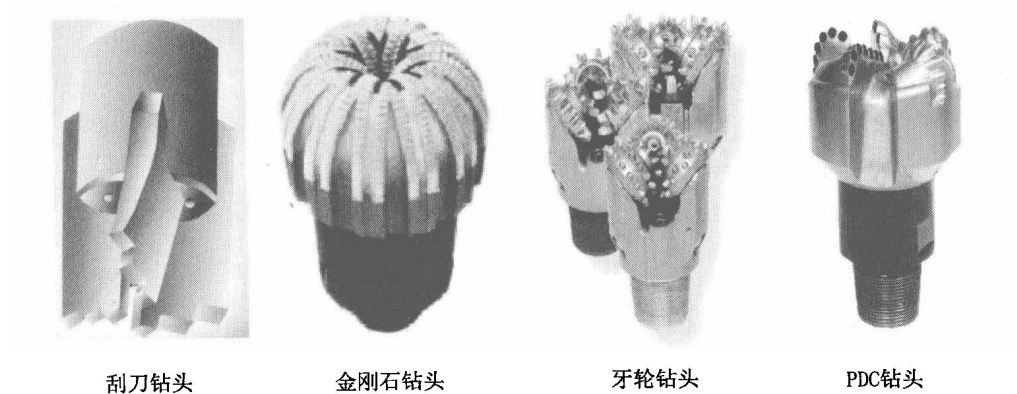


图 1-2 钻头

2. 钻铤

钻铤由厚壁钢管制成。一端为外螺纹，一端为内螺纹。通体外径相等，内径相等；其外径在 79~355mm 的范围内，内径为 31~76mm，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。一端为外螺纹，一端为内螺纹。其管体外径为 73~168mm，壁厚 8.38~11.40mm，内径为 33~126mm，如图 1-4 所示。其主要作用为：

- (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。

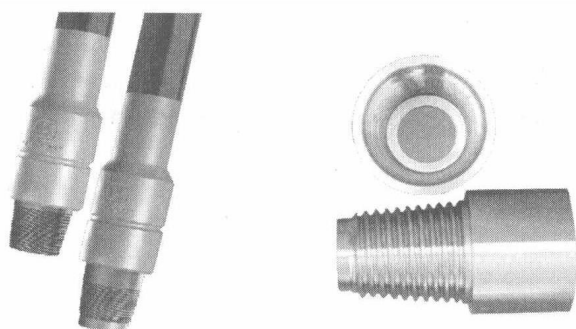


图 1-4 钻杆

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 304~1219mm，稳定器总长 1371~3000mm，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。

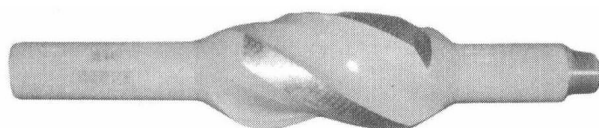


图 1-5 稳定器

5. 减振器^[3]

减振器是一段轴向弹性较好的钻铤（见图 1-6）。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。减振器的名词本义是该工具能减少钻具的振动，但弹簧减振器只能改变钻柱的振动特性；液力减振器可以减少或吸收振动。

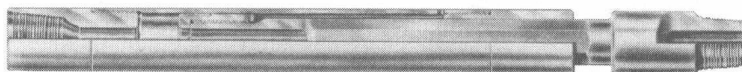


图 1-6 减振器

6. 震击器^[3]

震击器是钻柱的一个短节（见图 1-7）。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。



图 1-7 震击器

7. 井下马达^[3]

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。定向井用的井下马达（见图 1-8）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。



图 1-8 单弯马达

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

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

二、套管柱

套管柱由套管（见图 1-9）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 114~508mm，壁厚 5.21~17.78mm，内径 97~486mm。

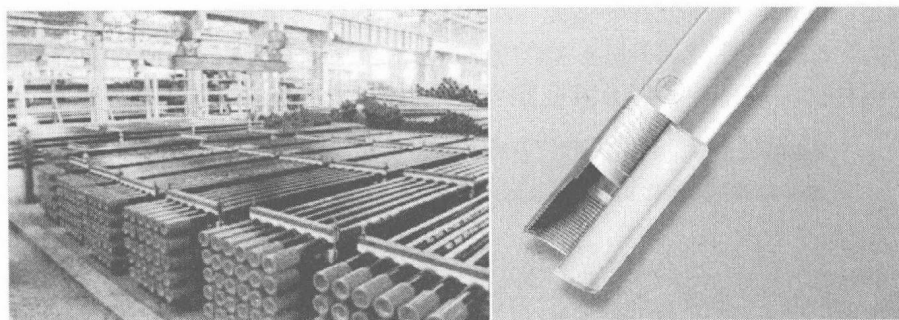


图 1-9 套管

三、油管柱

油管柱由油管连接而成。油管与套管相似，但比套管直径小。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 26.7~114.3mm，壁厚 2.87~7.82mm。

连续油管是盘绕在卷筒上的长达数千米的优质无缝钢管，没有接头，如图 1-10 所示。

四、抽油杆柱

抽油杆柱由抽油杆（见图 1-11）连接而成。它的主要作用是向井下抽油泵提供动力，直径 16~25mm。抽油杆有实心的，也有空心的；一般为钢质的，也有玻璃钢质的。

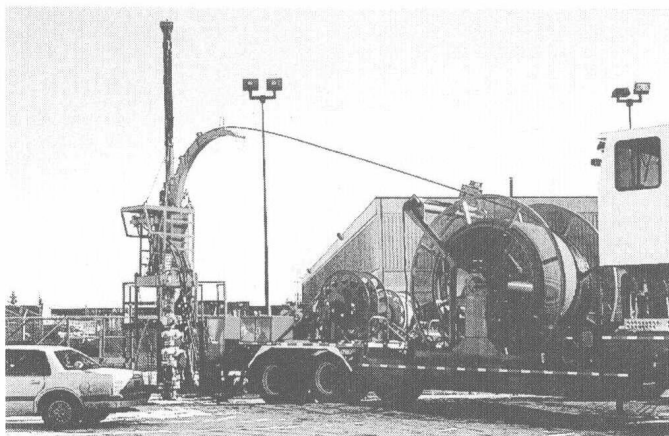


图 1-10 连续油管

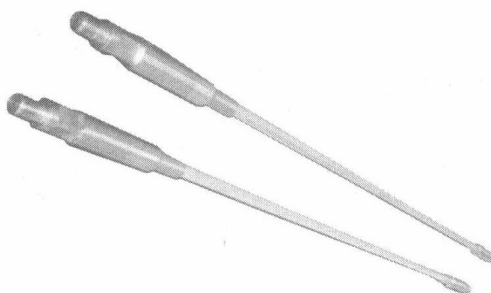


图 1-11 抽油杆

第三节 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 1-12 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 1-13 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，其中以抽油泵用得最广泛。

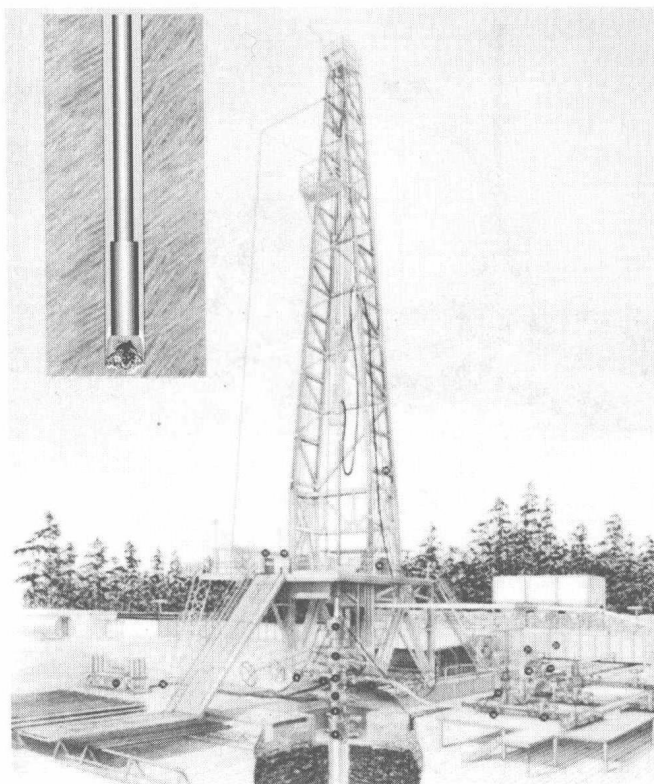


图 1-12 钻进

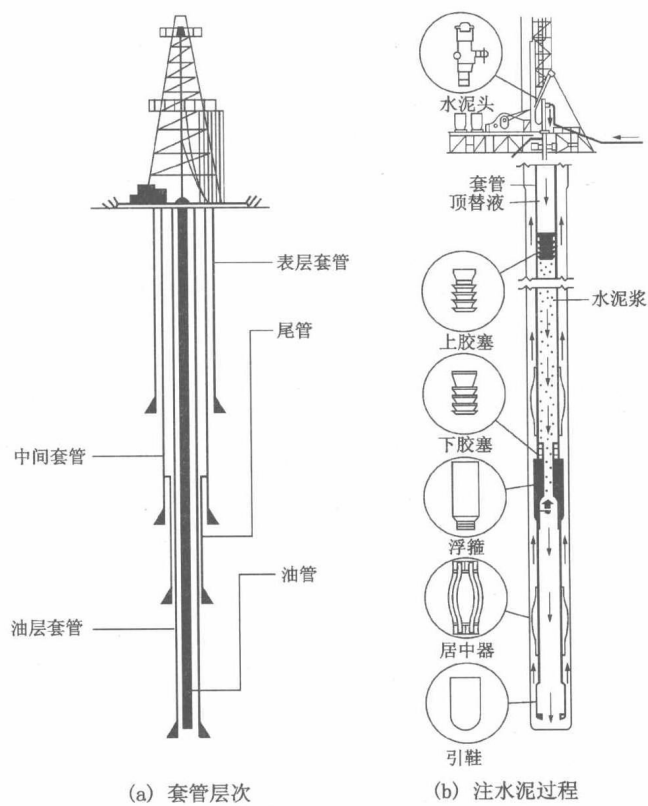


图 1-13 套管层次与注水泥过程

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 1-14 所示。

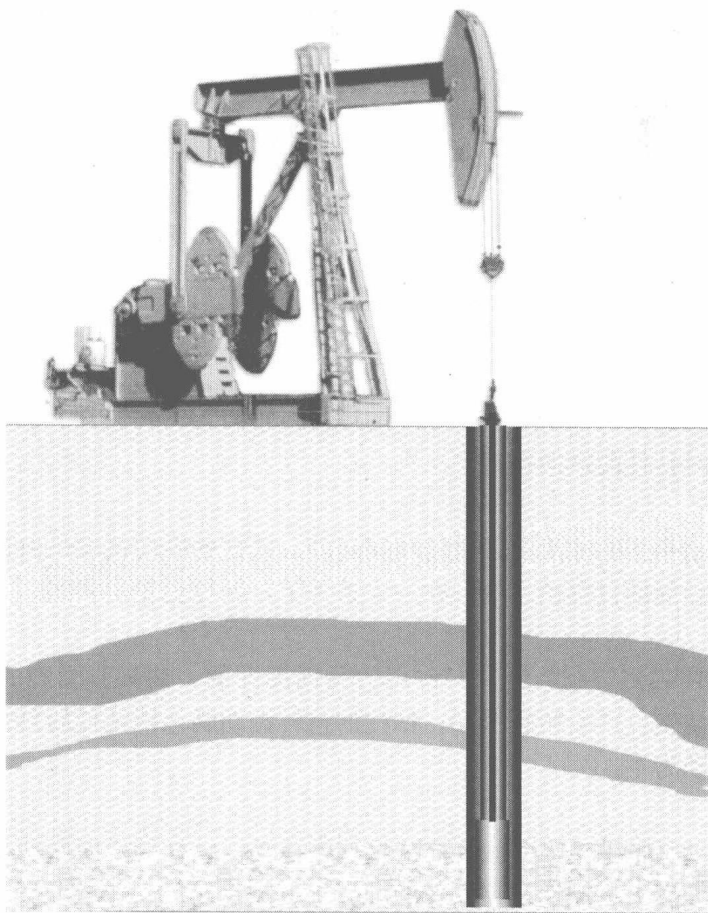


图 1-14 抽油

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）（见图 1-15）、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，图 1-15 中绕 O_2 的 ω 。在一般旋转钻井中，通过钻柱的转动把能量从地面传递给钻头。钻柱的转动方式以自转为主。

2. 公转（涡动）

钻柱的公转或涡动是指钻柱绕井眼轴线的转动，图 1-15 中绕 O_1 的 Ω 。图 1-16 是钻头涡动图。

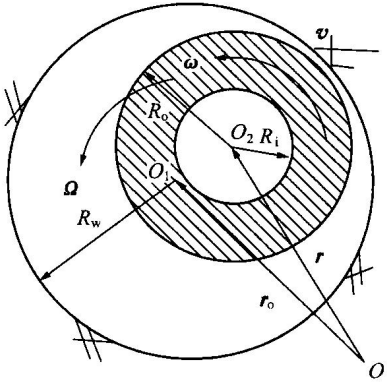


图 1-15 自转和公转

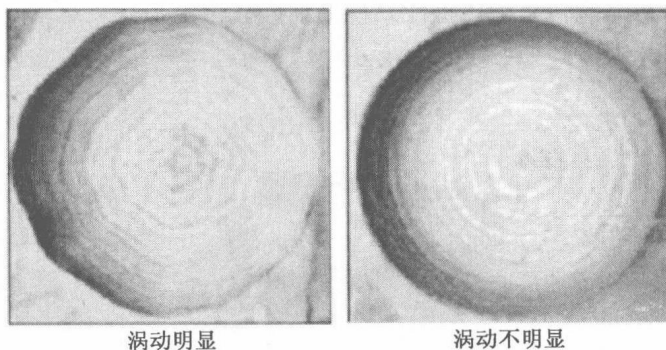


图 1-16 钻头涡动图

3. 轴向运动

钻柱的轴向运动是指钻柱沿其自身轴线的运动。轴向运动既包含了起下钻柱时钻柱的运动，又包括了钻进时钻柱的纵向振动。

4. 纵向振动

钻柱的纵向振动是指钻柱沿其轴线的周期运动。钻柱的纵向振动是由钻头破碎岩石时所产生的周期作用力和周期位移诱发的。在一定条件下，钻柱会发生共振。

5. 扭转振动

钻头破碎岩石时钻头与地层的轴向作用力是周期性的，钻头所受到的扭矩也是周期性的。周期性的扭矩使钻柱产生扭转振动。钻柱的扭转振动既包括钻柱的自转振动，又包括公转振动，以自转振动为主。

6. 横向振动

钻柱的横向振动是指钻柱沿井眼径向的周期性运动。钻柱的横向振动也是由钻头破碎岩石时所产生的周期作用力和周期位移诱发的。

第四节 钻柱及钻头的涡动

钻柱在绕自身轴线旋转的同时，在钻柱与井壁的摩擦力等因素的作用下，有时会产生绕井眼轴线的公转（涡动）。钻柱的涡动易导致强烈的横向振动，加速钻柱的磨损和疲劳破坏。钻头的涡动，特别是 PDC 钻头的涡动，易使钻头牙齿损坏。

一、基本假设

为了研究方便，作如下基本假设：

- (1) 钻柱和钻头的横截面为圆形；
- (2) 井眼横截面为圆形；
- (3) 钻柱或钻头与井壁一直处于接触状态。

二、涡动角速度

若钻柱或钻头的半径用 R_o 表示，井眼半径用 R_w 表示，钻柱或钻头的自转角速度为 ω ，公转（涡动）角速度为 Ω ，则钻柱或钻头与井壁接触点处的相对滑动速度（见图 1-15）为

$$v = (R_w - R_o)\Omega + R_o\omega \quad (1.10)$$