



普通高等教育“十二五”规划教材

石油工程管柱力学

吕苗荣 编著

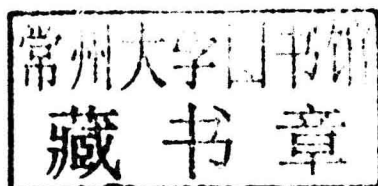
中国石化出版社

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

普通高等教育“十二五”规划教材

石油工程管柱力学

吕苗荣 编著



中国石化出版社

内 容 提 要

本书以油气井管柱为讨论对象,以力学分析为主线,较为系统地介绍了石油工程管柱力学的主要内容和发展概况。全书共分为9章,主要包括油气井管柱力学发展概述、管柱的服役条件和失效分析、管柱运动与受力分析、管柱静力学中的纵横弯曲梁法和能量法、摩阻/扭矩模型、管柱振动分析、海洋隔水管力学以及管柱强度设计与校核等。

本书可作为普通高等院校石油工程专业本科生教学用书或参考书,也可供相关专业研究生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程管柱力学 / 吕苗荣编著.
—北京:中国石化出版社,2012.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-1226-3

I. ①石… II. ①吕… III. ①油气钻井-井下管柱-
动力学-高等学校-教材 IV. ①TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 243631 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12 印张 290 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前 言

石油工程是一项沿着几千米细长的井眼展开的工程,在这项工程中各种形式的管柱起着不可替代的重要作用。石油管柱力学是石油工程面临的一个基本问题之一,随着石油工业的不断发展,从上世纪20年代以来一直是人们研究的热点。石油管柱力学主要包括钻井管柱、完井管柱和采油管柱三个大的方面,在《钻井与完井工程》、《采油工程》等专业核心课程中,一般只介绍石油管柱力学最基本的静力学问题,很少涉及管柱动力学方面的知识。尽管在一些选修课中包含了石油工程管柱力学方面的内容,如井眼轨迹控制、水平井钻井技术、完井测试、采油与采气工程等,但它们几乎都是围绕着自身学术专题的需要,主要从机械和工艺两个大的方面来展开讨论的,缺乏系统性,不利于学生全面、系统地掌握石油工程管柱力学知识,制约了石油工程本科教学的发展。

作者出版本书的宗旨在于较为全面地回顾石油管柱力学的发展历程,介绍石油管柱的基本概念与力学模型,力图较为系统地阐述解决石油管柱力学问题的一般思路和常用方法,以及管柱力学知识在钻井、完井和采油中的应用实践等,为石油工程专业本科生,相关专业的研究生提供一本较为系统地介绍石油管柱力学知识的教材与参考用书,也给广大石油科技工作者和工程技术人员提供有益的参考。

全书共九章,第一章介绍了石油工程管柱的概念、分类和用途,管柱力学的基本问题、研究方法与目前面临的挑战,并对石油管柱力学研究中的底部钻具组合力学、管柱屈曲、振动测试、动力学及仿真等研究专题做了较为全面的综述。第二章主要介绍了钻柱、油(套)管柱和采油管柱的服役条件和失效模式,从力学的角度分析了这些管柱失效的原因。第三章围绕石油管柱的运动、受力与变形展开较为细致的论述。较为详细地介绍了管柱的自转、公转、涡动和旋转黏滑运动,分析了管柱单元可能受到的各种力。比较分析了软管柱模型和绳索模型之间的异同,给出了软管模型的力学计算方法。详细论述了石油管柱浮力的计算,以及管柱稳定性判据和处理方法。第四章扼要介绍了纵横弯曲连续梁法在石油工程管柱力学中的应用。第五章阐述了管柱力学分析中的能量法,包括一般力学分析、最小势能原理和最小余能原理,以及能量法在钻柱和套管柱力学分析中的具体应用。第六章概述了管柱的整体受力模型,以何华山的整体受力模型为例,介绍了这一模型在定向井、大位移井和水平井中的应用,并且简要介绍了管柱屈曲后附加力的计算问题。第七章较为系统地介绍了振动问

题的一般性描述,石油管柱的纵向、横向和扭转振动,重点介绍了振动方程的推导、管柱固有频率的计算,以及振动方程的求解。第八章简要阐述了海洋隔水管动力学分析,包括隔水管问题的基本描述,波流联合作用下的隔水管动力学响应分析等。第九章扼要地介绍了石油管柱的强度设计与校核。

随着石油工业的快速发展,计算机和数值计算技术的飞速进步,新思想、新方法、新技术不断涌现,石油管柱力学也得到了前所未有的发展。中国的广大石油科技工作者在努力学习和掌握国际先进技术的同时,也正以崭新的风貌面对石油管柱力学中的各种问题,善于探索,勇于实践,正在逐步建立和形成具有中国特色的自主创新技术体系。本书的出版希望能够起到抛砖引玉的作用,凝聚各方的智慧,为石油工程高等教育、石油管柱力学的发展,以及石油勘探开发技术的进步做出新的贡献。

本书在撰写过程中,参阅了大量的国内外资料文献,作者在此谨向文献作者表示深深的谢意。

感谢中国工程院古德生院士在本书编撰、出版过程中所提供的关心和帮助。中国石油大学高德利教授在百忙之中亲自审阅书稿,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

硕士生陈志强、李梅、沈诗刚对书中的文字及插图校对付出了辛勤的汗水,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,难免有错误和不足之处,敬请批评指正。

符 号 注 释

- A ——振幅, m;
 A_s ——钻柱正弦弯曲波幅值, m;
 B ——管柱所受的浮力, kN;
 B_f ——管柱的浮力系数;
 C ——井斜系数;
 c_w ——海浪波速, m/s;
 C_m ——附加质量系数, 无量纲;
 C_s ——与应变速度相关的阻尼, Pa · s;
 c_d ——无因次系数;
 d_i 、 d_o ——管柱的内、外直径, m;
 D ——隔水管直径, m;
 D_w ——井眼直径, m;
 E ——钻柱材料的弹性模量, N/cm²;
 EI ——管柱的抗弯刚度, N · m²;
 F 、 F_1 、 F_2 ——管柱某截面、管柱下端和上端所受的轴向力, N;
 F_B ——钻头横向力, N;
 F_{crs} ——管柱正弦屈曲临界力, N;
 F_{crh} ——管柱螺旋屈曲临界力, N;
 F_e ——管柱有效轴向力, N;
 $F(x)$ ——在 x 处的管柱轴向力, N;
 G ——管柱材料的剪切刚度, Pa;
 $\vec{g}$ ——重力场方向单位矢量;
 h_w ——浪高, m;
 H_x ——水深, m;
 H ——海底深度, m;
 I ——钻柱截面惯矩, N/m⁴;
 k ——系数, $k = 2.04$;
 k_w ——海浪波数;
 K_n 、 K_b ——井眼挠率和曲率;
 $\vec{k}$ ——直角笛卡尔大地坐标系 ONED 的单位矢量, 垂直向下;
 l ——从井口开始的井眼轴线的弧长, m;
 L ——管柱长度, m;
 L_s ——管柱正弦弯曲半波长度, m;
 M ——管柱轴向扭矩, N · m;
 M_1 、 M_2 ——管柱下端和上端所受的轴向扭矩, N · m;
 M_y 、 M_z ——在 y 方向和 z 方向上的弯矩, N · m;
 M_b ——管柱弯矩, N · m;
 m ——管柱无因次单位长度, m;
 m_d ——每米管柱内流体的质量, kg/m;
 N ——管柱与井壁间的接触正压力, N;
 N_n 、 N_b ——主法线方向和副法线方向管柱与井壁的接触分布正压力, N/m;
 N_y 、 N_z ——管柱与井壁之间在 y 方向和 z 方向的接触力, N/m;
 n ——衰减系数, 1/s;
 P ——管柱轴向压缩力, N;
 P_B ——钻压, kN;
 p_i 、 p_o ——管柱横截面处的内、外液压力, Pa;
 Q_d ——管柱运动引起的最大动载, kN;
 Q_f ——管柱摩擦引起的最大动载荷, kN;
 Q ——管柱在空气中的重量, kN;
 q ——管柱的线重量, N/m;
 q_m ——管柱在钻井液中的线重量, N/m;
 r ——井眼与管柱之间的间隙, m;
 R_o ——为钻柱单元半径, m;
 R_e ——管柱有效半径, m;
 R_w ——井眼半径, m;
 S ——钻柱曲线坐标;

$\vec{t}$ 、 $\vec{n}$ 、 $\vec{b}$ ——井眼切线方向、主法线方向和副法线方向的单位矢量；

$u(x, t)$ ——管柱纵向、横向振动位移，m；

v ——钻柱起出速度，m/s；

v_c ——海流速度，m/s；

v_m ——暗流速度，m/s；

v_l ——海面处的海流速度，m/s；

V_z 、 V_y —— z 和 y 方向的剪力，N；

x ——井眼方向线，m；

y ——管柱弯曲挠度，m；

W ——钻柱单元的浮重， $W = q\Delta L$ ；

W_n ——管柱抗扭系数， m^3 ；

α ——井斜角，rad；

φ ——井眼方位角，rad；

θ ——管柱偏转角，rad；

ω ——钻柱的角速度，rad/s；

ω_n ——无阻尼振动系统圆频率，rad/s；

τ ——薄壁管柱横截面上的剪应

力，Pa；

τ_0 ——钻井液的动切力， $Pa \cdot s$ ；

ρ_m ——钻井液密度， g/cm^3 ；

ρ_s ——钢材密度， g/cm^3 ；

ρ_w ——海水密度， g/cm^3 ；

Ψ ——经验系数，一般取 0.36 ~ 0.6；

σ_r 、 σ_θ ——管柱径向、周向应力，Pa；

ε_x ——管柱轴向应变；

μ ——摩擦系数；

μ_a ——起下钻摩擦系数；

μ_r ——旋转摩擦系数；

ΔF 、 ΔM ——钻柱单元的拉力与扭矩增量；

$\Delta\alpha$ 、 $\Delta\phi$ ——钻柱单元两端井斜角之差与方位角之差；

$\zeta = \frac{n}{\omega_n}$ ——阻尼比；

ξ ——振动系统振幅减缩率或减幅系数。

目 录

第一章 油气井管柱概述	(1)
§ 1.1 油气井管柱的功能与组成	(1)
§ 1.2 油气井管柱力学的发展简述	(2)
§ 1.3 石油管柱力学的研究方法	(12)
§ 1.4 石油管柱力学参数动态测试技术	(13)
§ 1.5 石油管柱力学面临的问题与挑战	(16)
§ 1.6 油气井管柱力学的应用	(17)
作业与思考题	(18)
第二章 油气井管柱的服役条件和失效模式	(19)
§ 2.1 管柱的服役条件	(19)
§ 2.2 管柱的主要失效模式	(21)
作业与思考题	(28)
第三章 油气井管柱单元运动与受力分析	(29)
§ 3.1 管柱的运动分析	(29)
§ 3.2 管柱受力分析	(38)
§ 3.3 管柱稳定性分析	(50)
作业及思考题	(57)
第四章 底部钻具组合纵横弯曲分析	(59)
§ 4.1 井斜控制理论概述	(59)
§ 4.2 底部钻具组合纵横弯曲力学模型	(60)
§ 4.3 纵横弯曲简支梁的弹性稳定问题	(61)
§ 4.4 纵横弯曲连续梁三弯矩方程的建立	(66)
§ 4.5 纵横弯曲连续梁法特殊问题的处理	(66)
§ 4.6 底部钻具组合纵横弯曲连续梁法的求解	(68)
作业及思考题	(71)
第五章 管柱力学能量法分析	(72)
§ 5.1 引言	(72)
§ 5.2 能量法在一般静力分析中的应用	(72)
§ 5.3 能量法分析	(78)
作业及思考题	(88)
第六章 钻柱摩阻和扭矩计算模型	(89)
§ 6.1 概述	(89)
§ 6.2 钻柱整体受力模型的求解	(94)

§ 6.3 油井管柱稳定性判别及屈曲后附加力的计算	(101)
作业及思考题	(105)
第七章 油气井管柱振动分析	(106)
§ 7.1 单自由度系统管柱的振动	(106)
§ 7.2 管柱的纵向振动	(117)
§ 7.3 管柱的扭转振动	(130)
§ 7.4 管柱的横向振动	(134)
作业及思考题	(144)
第八章 海洋隔水管动力学分析	(145)
§ 8.1 概述	(145)
§ 8.2 波流联合作用下隔水管动力学方程	(149)
§ 8.3 海洋钻井隔水管动力响应分析	(160)
作业及思考题	(167)
第九章 油气井管柱强度设计与校核	(168)
§ 9.1 概述	(168)
§ 9.2 管柱强度的设计与校核	(169)
作业及思考题	(172)
参考文献	(173)

第一章 油气井管柱概述

§ 1.1 油气井管柱的功能与组成

油气井管柱是用于完成各种油气井功能需要的、通过螺纹连接而成的细长管柱，主要包括钻柱、套管柱、油管柱和采油管(杆)柱。这些管柱的共同特征是由8~13m长的圆环截面管柱(钻杆、钻铤、套管、油管等)，根据功能和目的的不同，在这些管柱上加接各种附件(例如接头、震击器、稳定器等)，通过螺纹连接而成，总长可达数千甚至上万里。因此，如果将管柱中的钻杆、套管或油管单根看成是一个基本组成单元，整个管柱就可以看成是由这些单元组成的串联管柱系统。组成油气井管柱的每一根管子、每一个构件、部件及其连接，在油气井的建井和开发过程中都起到举足轻重的作用。任何一个连接环节出现问题，都有可能造成极其严重的后果。油气井管柱是石油勘探开发过程中必不可少的重要物资和器材，平均占整个建井成本的20%~30%^[1]。

油气井管柱从功能上可以分成三大类：

(1) 套管柱，主要包括套管、油管以及附件。石油套管是一种大口径管材，主要用于钻井过程和完井后对井壁的支撑，以保证钻井作业的顺利进行和完井后整个油井的正常运行。石油套管是维持油井运行的生命线。按照功能的不同，石油套管可以分为表层套管、技术套管、油层套管、衬管和尾管。由于地质条件不同，井下受力状态复杂，拉、压、弯、扭应力综合作用施加于管体，所以对套管本身的质量要求较高。一旦套管由于某种原因而损坏，就可能导致整口井的减产，甚至报废。

套管可按管材的强度分为不同的钢级，例如J55、K55、N80、L80、C90、T95、P110、Q125、V150等。井况、井深不同，采用的钢级也不同。在腐蚀环境下要求套管本身具有抗腐蚀能力，在地质条件复杂的地方还要求套管具有抗挤毁性能。

随着套管钻井技术的发展，套管替代钻柱进行钻井作业，除承受拉、压、外挤和内压力以外，还将承受复杂的弯曲、扭转和动态交变应力的作用。

(2) 钻柱，主要包括钻杆、钻铤、方钻杆及其构件。钻柱构件包括钻杆接头、转换接头和各种短节等。钻柱是快速优质钻井的重要工具，是连通地面与地下的枢纽。在转盘钻井时是靠它来传递破碎岩石所需的能量，给井底施加钻压，以及向井内输送钻井液等。用井下动力钻具钻井时，依靠钻柱输送驱动井下动力钻具转动的能量，并承受钻头和动力钻具的反扭矩。合理的钻井技术参数及其他技术措施，只有在正确使用钻柱的前提下才能实现^[2]。

钻柱是实现安全高速钻井的重要工具，使用工况十分恶劣，除承受拉、压、弯和扭转载荷外，还承受各种形式的强烈振动，是所有油气井管柱中受力最复杂的管柱。钻井过程中发生早期刺穿、断裂等失效事故，轻则打捞，损失钻时，重则导致全井报废，往往造成更大的

经济损失。据统计,国外发生不同程度钻柱失效事故的油气井占总井数的14%,而每起事故的直接经济损失高达106000美元^[3]。我国由于钻具质量问题和使用不当造成的事故在全部事故中约占70%。这些事故中10%与钻柱振动直接相关,钻柱振动是引起底部钻具失效的主要原因之一。我国各油田每年发生钻杆事故约五六百起,经济损失巨大;每年进口各种规格的钻杆就要耗用数亿元人民币的外汇^[4]。因此,了解钻柱的受力与运动,合理地组合与使用钻具,对避免各种井下钻具事故,实现高效优质钻井具有十分重要的现实意义。

(3) 采油管柱(杆)。在开采原油时,如果油井的自身能量不能将井筒中的原油举升到地面,就需要采用以机械采油为主的方式进行人工举升。采油管柱是机械采油系统的组成部分,位于井筒内,所起的作用是将地面的能量传递至井筒中的原油,并且将油气从井下举升到地面。采油管柱分为普通原油采油管柱与稠油采油管柱两大类。普通采油管柱种类繁多,已形成系列化,目前现场应用较多、技术比较成熟的有两类:有杆抽油泵采油管柱和无杆泵采油管柱。有杆抽油泵采油管柱又分为普通有杆抽油泵采油管柱和特殊有杆抽油泵采油管柱两大类。其中只有油管、抽油杆、标准抽油泵、筛管,以及丝堵组成的采油管柱被称为普通有杆抽油泵采油管柱;在特殊井况及产出液的油井中,需要在管柱上配套使用辅助工具或特殊抽油泵才能够完成原油开采,这种管柱被称为特殊有杆抽油泵采油管柱。

目前我国的稠油油藏蒸汽吞吐技术已基本配套,形成了深达1600m的蒸汽吞吐系列,成为我国稠油开采的主导技术。热采工艺主要有蒸气吞吐法、蒸气驱油法、气-汽驱油法和火烧油层法等。注蒸汽采油是开采稠油时应用最广泛、效益较高的方法之一。影响注蒸汽采油效益至关重要的因素是高温在油气井管柱内产生的热应力,此应力可能使套管产生屈服变形或断裂、注汽管柱发生屈曲。为此需要利用热弹性力学理论,来开展套管和隔热油管的力学分析,以防止热采油井套管的热破坏。

§ 1.2 油气井管柱力学的发展简述

1.2.1 石油管柱力学问题的复杂性

1) 油气井管柱动力学的非线性

油气井管柱在一个细长、狭窄的三维井眼内工作,受到定向井、水平井、高曲率狗腿井

眼的几何限制。例如,钻井中的钻柱在重力、钻压、扭矩、钻井液浮力和井壁约束等作用下,产生三维变形。一方面随井眼轴线的弯曲而弯曲,这一变形被称为管柱的初位移(参见图1-1);另一方面,管柱在运动过程中相对井眼轴线也有变形,这种变形被称为计算位移。管柱大变形主要表现在初位移部分,计算位移相对很小。大曲率井眼中管柱产生大挠度,但管柱很长且柔性较好,变形一般仍然保持在弹性范围内,是小变形,属于管柱的几何非线性问题。

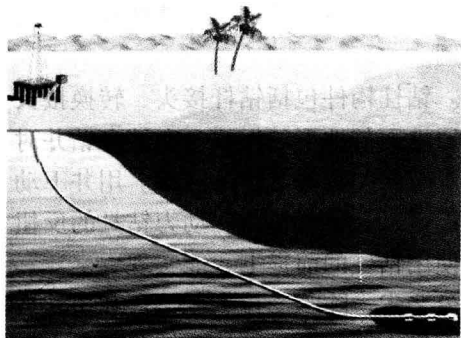


图1-1 钻柱随井眼轴线而发生的变形

旋转钻柱位移受到井筒限制,抽油杆在上下运动过程中也会发生与套管壁之间的摩擦,从而产生钻柱与井壁、运动杆(管)与套管之间的接触边界问题。这些接触的位置、形式未知,并且随时间变化,属于管柱的接触非线性问题。因此从严格的意义上讲,石油管柱力学问题是一个包含接触非线性和几何非线性的三维二重非线性动力学问题。所谓三维指的是井眼轴线在三维空间的变化。二重(或双重)指的是油气井管柱变形的几何非线性和接触非线性。

接触问题是由边界条件的非线性性质引起的,这主要表现在两方面:一是接触表面的改变,即自由表面边界的一部分转变为接触边界;或者反之,由接触边界放松接触,而蜕变成自由边界;二是接触面的变形、摩擦和滑移。随着载荷和位移的改变,接触表面可能在滑移状态与黏结状态之间相互转变,而滑动时有摩擦力。因此,在接触过程中,接触边界上作用的力和变形是非常复杂的,要求得精确的解析解十分困难,甚至是不可能的。随着载荷的增加或减小,在接触面上会出现弹塑性变形,使管柱屈曲变为大变形问题、接触问题和摩擦问题的耦合,使其求解过程变得更为困难和复杂。

目前对接触问题的求解只能采用数值计算的方法,其中非线性有限元法是求解这一问题最有效的途径。在接触过程中,物体的控制方程与一般有限元模型的控制方程是一致的,但在接触界面上,需要增加动力学和运动学条件,其中的关键是接触物体之间的不可侵入条件。

现考虑两个物体的接触问题,分别用 Ω^A 和 Ω^B 表示,如图 1-2 所示。物体边界分别用 Γ^A 和 Γ^B 表示。在接触问题中,物体 A 为主控体(如钻柱),物体 B 为从属体(譬如井壁),接触界面包含两物体的交界,用 Γ^C 表示。接触不可侵入条件指的是,在接触面上的任何一点 C 肯定满足:

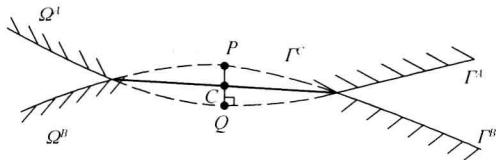


图 1-2 两物体接触问题示意图

$$C \in \Gamma^A \quad \text{且} \quad C \in \Gamma^B$$

并且如果 P 是 Ω^A 的内点,在发生接触变形后 P 点仍然属于物体 Ω^A ,而不会侵入到物体 Ω^B 的内部;反之,若 Q 是 Ω^B 的内点,在发生接触变形后 Q 点仍然属于物体 Ω^B ,也不会侵入到物体 Ω^A 的内部形成独立点。

当两物体发生接触时,两个物体在接触界面上满足:

- (1) 两接触物体不可侵入条件;
- (2) 面力必须满足动量守恒;
- (3) 横跨接触界面的法向面力不能为拉力。

接触界面状态可分为分离、黏结、滑移接触等多种形式。对于这些不同类型的接触,接触界面的位移和力的形式各不相同。

非线性一般有三种:材料非线性、几何非线性和状态非线性。材料非线性在管柱力学分析中还未见报道。管柱的几何非线性表现为管柱结构发生大位移、大挠度、大转动,其力学分析是建立在变形之后。目前,针对三维弯曲井眼管柱的几何与接触二重非线性力学问题,它的变形和受力,既没有实验结果,也没有可供比较的测量数据,更无法得到它的解析解。为了获得管柱在不同工况下的运动、受力和变形规律,一般都需要进行必要的简化。由于简化途径和方式的不同,就形成了各种油气井管柱力学的计算方法。

2) 油气井管柱的失稳与屈曲

受井眼约束的油气井管柱的屈曲对石油工程中的诸多方面(如钻井、完井、测井、试井、压裂、封堵、采油等)都有严重的影响。钻柱的屈曲会引起钻头偏斜,形成“狗腿”。带封隔器管柱的屈曲会引起封隔器的脱封,甚至破坏。油管的屈曲增加了套管和油管的磨损,增加了能耗。特别是近几年来,水平井、大位移井及挠性油管的广泛应用,管柱经常处于后屈曲状态工作,严重的屈曲会引起管柱的破坏和锁死,因而限制了连续管的工程应用,以及定向井或水平井的大位移延伸。

受井眼约束的管柱,由于其横向变形受井眼约束的限制,其屈曲行为与一般欧拉杆的屈曲行为有明显的不同,具体可参见图 1-3。当管柱所受的轴向压缩载荷较小,未达到失稳弯曲临界载荷时,管柱处于直线平衡状态。当轴向压缩载荷达到或超过失稳临界力时,管柱将发生弯曲,但这是一种平面弯曲,可以近似看成为一个正弦波状的弧形。对于非常细长的油气井管柱来说,如果没有安装扶正器,这种弯曲基本上都会发生。由于一般情况下管柱下部的轴向压缩作用力比失稳弯曲的临界压力大很多,而且径向间隙相对于细长的管柱来说是很小的,因此一旦受压,管柱很快、甚至在瞬间就会发生下部的正弦弯曲,参见图 1-3(c)。管柱发生正弦弯曲后,载荷的继续增加将使管柱正弦弯曲的构型发生改变,而形成所谓的屈曲,如图 1-3(d)所示;而且随着轴向载荷的增大,其横向变形增加。但当载荷达到另一临界值时,管柱的屈曲构型将会变成螺旋状,并与井壁保持连续接触,这时称管柱发生了螺旋屈曲。管柱发生螺旋屈曲后,若继续增加载荷将会使管柱与井壁之间的接触力激增。在严重的螺旋屈曲下,载荷的增加与管柱和井壁之间摩阻的增加相平衡,即不能将管柱一端的载荷传递到另一端,这时称管柱发生了“锁死”。

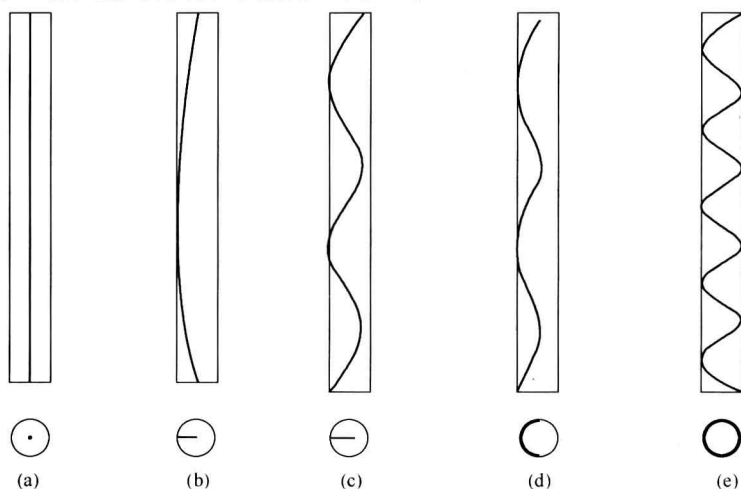


图 1-3 水平井管柱的三种稳定平衡状态

受井眼约束的管柱发生屈曲之后,屈曲构型随载荷的增加而变化。除了保持稳定的正弦屈曲构型、螺旋屈曲构型及它们之间的转化外,在每种屈曲构型中管柱的变形模态也会随载荷的增加而变化,因此可以说受约束管柱的屈曲为复杂的多次屈曲。另外,管柱屈曲涉及管柱的三维屈曲构型、弯扭耦合作用、屈曲微分方程的强非线性、管柱与约束管壁接触和脱离、屈曲构型的跳跃性变化、摩擦与屈曲进程的耦合及管柱自重、井壁形状、端部约束条件等因素的组合影响,使问题变得非常复杂。

1.2.2 油气井管柱力学研究回顾

1) 直井管柱稳定性及其屈曲分析

人们对钻柱力学的理论研究可以追溯到1929年。1929至1950年间,人们探索了“利用钻柱自重钻直井”、“直井的走向”、“钻柱的纵向弯曲”等问题。

在上世纪50年代,钻井力学的奠基人 A. Lubinski 较系统地研究了直井中钻柱的受力与变形,导出了钻柱在垂直平面内的弯曲方程^[5]:

$$\frac{d^3 y}{dx^3} + x \frac{dy}{dx} + c_d = 0 \quad (1-1)$$

式中 x ——井眼方向线, m;

y ——管柱的挠度, m;

c_d ——无因次系数

$$c_d = \frac{F_B}{q_m \times m}$$

F_B ——钻头横向偏斜力, N;

q_m ——单位长度管柱在钻井液中的重量, N/m;

m ——无因次单位长度, m

$$m = \sqrt[3]{\frac{EI}{q_m}}$$

EI ——管柱的抗弯刚度, $N \cdot m^2$ 。

针对式(1-1), A. Lubinski 还给出了该方程的级数解,利用边界条件推导得到钻柱在垂直平面内发生失稳弯曲的临界载荷计算公式:

$$F_{cr} = k \left(\frac{EI}{q} \right)^{\frac{1}{3}} q \quad (1-2)$$

式中 k ——系数, $k=2.04$;

q ——管柱的线重量, N/m。

另外,还给出了失稳弯曲钻柱与井壁接触点位置、钻头偏转角等的计算方法。

随后 A. Lubinski 建立了描述底部钻具组合纵向受力与变形的微分方程,并提出诸如“所有直井在钻进过程中都会出现倾斜”、“井眼中运动钻柱会发生多次弯曲”、“钻柱是柔性体,只绕自身轴线自转而不公转”、“钻柱弯曲主要源于钻柱重量产生的钻压,而井壁、钻井液等因素对钻柱的影响均可忽略不计”等学术观点。Lubinski、Woods 还对斜直井管柱进行了模型试验。通过试验观察到管柱在井眼内的螺旋屈曲现象,并注意到井斜角对管柱临界载荷有较大的影响。通过对试验数据的拟合,得到管柱在斜直井中发生螺旋屈曲的临界载荷计算公式:

$$F_{cr} = 2.85 (EI)^{0.504} q^{0.496} \left(\frac{\sin \alpha}{r} \right)^{0.511} \quad (1-3)$$

式中 α ——井斜角, rad;

r ——井眼与管柱之间的间隙, m。

1957年, Lubinski、Blenkarn 等对抽油井油管及抽油杆柱的螺旋弯曲进行了研究,首次

提出了抽油杆和油管在轴压及内外压作用下发生空间螺旋弯曲的概念, 以及内压引起管柱失稳的概念^[6]。

1962 年, Lubinski、Althose、Logan 等^[7]又研究了带封隔器管柱的螺旋屈曲行为, 讨论了鼓胀效应、活塞效应、温度效应, 以及螺旋屈曲效应等几种基本效应引起管柱轴向位移的计算问题。提出了“虚构力”的概念, 利用能量法导出了管柱发生螺旋屈曲后螺距与轴向压缩力、内外压力所产生的“虚构力”之间的关系, 以及因螺旋屈曲管柱轴向位移的计算公式。这些研究奠定了垂直井封隔器管柱力学研究的基础, 所给出的算法是带封隔器管柱设计和作业参数选择重要的理论依据, 被广泛应用于井下作业管柱的设计和施工中。

70 年代末到 80 年代初, Hammerlindl 在 Lubinski 螺旋屈曲理论的基础上, 进一步讨论了带封隔器多级组合管柱的受力、应力和位移的计算问题; 讨论了液体压力对管柱屈曲性能的影响和“中性点”的计算, 研究了多封隔器管柱及其中间封隔器的受力计算问题^[9~11]。这些研究进一步扩大了理论的适用条件和应用范围。

与垂直井封隔器管柱力学的研究结果不同, A. Lubinski 在随后的研究中纠正了钻柱会发生多次弯曲的结论, 并形成了一些经典假设。例如, “底部钻具组合在上切点以上紧贴下井壁, 研究时只需对上切点以下的钻柱段进行受力与变形分析”、“钻柱下端为铰支”等, 这些研究成果也对钻柱力学的发展起到了极大的推动作用。

1964 年, Paslay 等利用能量法对管柱在斜直井中的稳定性进行了理论分析, 导出了管柱发生正弦弯曲时临界载荷的计算公式^[12]:

$$F_{cr} = \frac{(1-\nu)^2 EI}{(1-\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left[n^2 + \frac{1}{n^2} \frac{q \sin \alpha}{E I r} \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \right] \quad (1-4)$$

式中 L ——管柱的长度, m;

n ——正弦弯曲的半波数;

ν ——材料泊松比。

1984 年, Dawson、Paslay 等给出了无限长管柱失稳弯曲的临界载荷计算公式^[13]:

$$F_{cr} = 2 \left(\frac{E I q \sin \alpha}{r} \right)^{0.5} \quad (1-5)$$

他们把该式作为斜直井钻柱失稳临界载荷的计算公式。

80 年代初, 曾宪平^[14]、张宁生^[15]、江汉采油工艺所^[16]等结合 Lubinski、Hammerlindl 等人的文献, 对封隔器管柱的受力、应力及变形作了系统的分析。1986 年, 窦益华^[17]采用加权残值法对管柱的受力变形进行了分析求解。1988 年, 龚伟安^[18]用弹性力学方法分析了液压作用下管柱的弯曲问题, 论证了液压作用下管柱弯曲的“虚构力”是真实存在的力, 并对液压作用下管柱的失稳条件、“虚构力”、中和点及零轴向力点进行了阐述。

2) 底部钻具组合力学的发展

在 20 世纪 60 年代, 定向井工艺技术的研究得到了大的发展。在此期间, 学者们研究了井眼曲率对底部钻具组合 (Bottom Hole Assembly, 简称 BHA) 受力、变形的影响, 以及多稳定器底部钻具组合受力问题, 在理论上认识到了多稳定器满眼钻具和近钻头稳定器的作用, 并且逐步认识到井斜力和方位力对井眼轨迹变化的重要影响。

1977 年, Walker 首先应用最小势能原理对常规底部钻具组合进行了二维分析, 继而与 Friedman 合作建立了钻柱静力三维小挠度力学分析的数学模型, 并用微分方程理论和伽辽金

法对数学模型进行了近似求解^[19]。

1978年,美国 Amoco 公司的 Millheim 等用有限元法对底部钻具组合进行静力分析,率先研究了 BHA 的动态特性及其对井眼轨迹的影响^[20]。他们以钻头机械侧向力为依据,设计了适用于钻不同软硬地层的各种底部钻具组合,并对它们的造斜特性进行了评估。

1986年,何华山首次建立了钻柱静力大挠度控制方程,并使用有限差分法求其数值解^[21]。他还建立了一个钻头与地层相互作用的矢量模型,确立了钻进方向与钻头的合力、钻头指向及地层法向之间的一种数学关系^[22]。

20世纪70年代至80年代中期,随着计算机和数值计算技术的快速发展,钻柱力学的研究进展迅速,并取得了丰硕的成果。具体体现在以下几个方面:

(1) 探索、发展了多种管柱力学求解方法,如微分方程法、能量法、差分法和有限单元法;

(2) 引入了井斜力和方位力的概念,实现了底部钻具组合的建模和力学分析;

(3) 随着计算机技术的发展,对底部钻具组合的力学性能由一般的静力计算发展到管柱的动力学分析;

(4) 在建立钻柱力学模型时适当考虑了钻柱的转动和摩擦,提出了软管柱模型。

在20世纪80年代至90年代,钻柱力学研究的一个突出特点就是进行了底部钻具组合的纵横弯扭三维受力分析,除分析井斜力外还着重分析了方位力。1982年以来,白家祉和苏义脑应用三弯矩方程分析底部钻具组合的受力和变形^[23~31],应用该理论可以完成井下动力钻具、带弯角、变截面组合的钻柱三维力学分析,计算简便,对现场钻井设计、施工起到了很大的推动作用。有关纵横弯曲连续梁法可参见第四章的介绍。

1988年以来,高德利应用加权余量法完成了底部钻具组合的三维小挠度力学分析,并对二、三维大挠度问题进行了探讨^[32~35]。该方法是国内学者独立提出的第二种 BHA 分析方法,他还提出了一个钻头与地层相互作用的三维钻速方程^[36~38]。1992年以来,李子丰分别建立了底部钻具三维小挠度、大挠度静力分析模型,选用加权余量法、加权目标函数和最优化方法确定了钻柱与井壁的切点位置,解决了多元非线性微分方程组的求解问题^[39~41];建立了三维钻速方程与反演模型,并且开展了井眼轨迹预测研究^[42~46]。

上述研究工作的开展为定向井、水平井钻井,以及导向钻井实践提供了理论依据。

3) 三维空间管柱屈曲问题的研究

1988年, Mitchel 运用梁柱在三维空间的静力平衡方程、变形几何方程和物理方程,首次导出了考虑自重作用下管柱在斜直井眼中发生失稳弯曲时,变形计算及正压力计算的微分屈曲方程^[47]:

$$EI \left[\frac{d^4 \theta}{dx^4} - 6 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \frac{d^2 \theta}{dx^2} \right] - \frac{d}{dx} \left[F(x) \frac{d\theta}{dx} \right] + \frac{q}{r} \sin \alpha \sin \theta = 0 \quad (1-6a)$$

$$\frac{N}{r} = EI \left[4 \frac{d\theta d^3 \theta}{dx dx^3} + 3 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right] + F(x) \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^4 - \frac{q}{r} \sin \alpha \cos \theta \quad (1-6b)$$

式中 θ ——管柱偏转角, rad;

α ——井斜角, rad;

$F(x)$ ——管柱轴向力, N;

N ——正压力, N。

并给出了该方程在 $\alpha = 0$ 条件下垂直井中的数值解。1995 年, Mitchell^[48] 又根据方程 (1-6) 研究了井斜对管柱螺旋屈曲的影响, 给出了方程 (1-6) 在 $\alpha \neq 0$ 时的数值解。他还确定了管柱从直线状态到平面正弦弯曲状态, 以及从平面正弦弯曲到螺旋屈曲状态过渡的临界点。1996 年, Mitchell 提出了一种分析斜直井管柱屈曲行为非线性方程数值求解的实用方法, 简化了计算公式^[49]。

1990 年, Yu Che Chen 等利用能量法导出了管柱在水平井中发生正弦及螺旋弯曲时, 临界载荷的计算公式^[50]:

$$F_{\text{crs}} = 2 \left(\frac{EIq}{r} \right)^{0.5} \quad (1-7a)$$

$$F_{\text{crh}} = 2\sqrt{2} \left(\frac{EIq}{r} \right)^{0.5} \quad (1-7b)$$

并通过试验证明了所导出临界载荷计算公式的合理性。由于不能连续加载, 其试验结果没有给出临界载荷的准确测试结果。当 $\alpha = \pi$ 时, 给出的试验拟合公式与上式很接近。

1993 年, Wu Jiang 等利用能量法分析了管柱在大位移井、水平井中的螺旋屈曲和摩擦阻力的计算问题, 给出了螺旋屈曲临界载荷计算公式^[51-52]:

$$F_{\text{crh}} = 2(2\sqrt{2} - 1) \left(\frac{EIq \sin \alpha}{r} \right)^{0.5} \quad (1-8)$$

由于管柱在弯曲井眼中的变形和载荷描述比直井要复杂得多, 因此弯曲井眼中管柱稳定性和螺旋屈曲的分析也很复杂。1993 年, He XiaoJun、Kyllingstad^[53] 通过类比分析认为屈曲前井壁对管柱的法向支反力与管柱临界载荷之间存在一定的关系。在水平井眼中, 井壁作用于管柱的法向支反力 $f_n = q$, 而在弯曲井眼中其法向支反力为

$$f_n = \left[\left(q \sin \alpha + F \frac{d\alpha}{dx} \right)^2 + \left(F \sin \alpha \frac{d\phi}{dx} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1-9)$$

式中 ϕ ——井眼方位角, rad;

x ——井眼方向线。

分别将方程 (1-7a) 与 (1-7b) 中的 q 用公式 (1-9) 中的 f_n 代替, 可得弯曲井眼中临界载荷的计算公式

$$F_{\text{cr}}^4 = \left(\beta \frac{EI}{r} \right)^2 \left[\left(q \sin \alpha + F_{\text{cr}} \frac{d\alpha}{dx} \right)^2 + \left(F_{\text{cr}} \sin \alpha \frac{d\phi}{dx} \right)^2 \right] \quad (1-10)$$

当 $\beta = 4$ 时为正弦弯曲, 当 $\beta = 8$ 时为螺旋屈曲。同时利用小尺寸模拟试验, 证明了他们所提出的弯曲井眼中管柱发生螺旋屈曲临界载荷计算公式的合理性。

1993 年, Yu Che Chen、Sarmad Adan 等^[54] 考虑重力及井眼弯曲的影响, 用能量法得出了水平井眼、弯曲井眼的临界正弦和螺旋屈曲载荷。1995 年, Kyllingstad^[55] 利用力和力矩平衡关系式导出了公式 (1-10), 用最小能量原理推出了方程 (1-7a) 和 (1-7b), 并通过数值方法得出的临界螺旋屈曲载荷为:

$$F_{\text{crh}} = 1.45 \sqrt{\frac{4EI f_n}{r}} \quad (1-11)$$

在该公式中 1.45 比 $\sqrt{2}$ 大 2.5%, 相当于 $\beta = 8.41$ 。

考虑摩擦时, 由确定的位移和力边界条件, 不能完全确定摩擦力的大小和方向。管柱的内力、应力和变形状态不仅与最终的受力状态有关, 而且与载荷的加载、卸载历程, 即载荷