

QITI ZUANJING JICHU LILUN JIQI YINGYONG

气体钻井基础理论及其应用

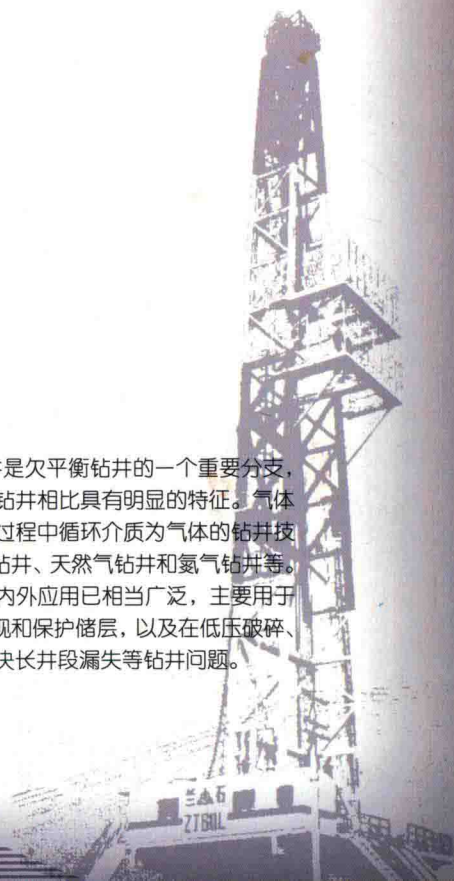


练章华 林铁军 孟英峰 著



气体钻井是欠平衡钻井的一个重要分支，与传统钻井液钻井相比具有明显的特征。气体钻井是指钻井过程中循环介质为气体的钻井技术，包括空气钻井、天然气钻井和氮气钻井等。气体钻井在国内外应用已相当广泛，主要用于提高钻速、发现和保护储层，以及在低压破碎、裂缝性地层解决长井段漏失等钻井问题。

石油工业出版社



气体钻井基础理论及其应用

练章华 林铁军 孟英峰 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了气体钻井技术所涉及的部分基础理论及其研究成果,论述了气体钻井井斜机理、破岩机理、钻柱动力学及钻柱失效机理等方面理论,为实现安全、高效的气体钻井技术提供理论依据。与油田现场实际相结合,采用计算机仿真模拟技术,重点进行了气体钻井动态钻进过程研究、全井段钻柱动力学研究、高速气体携岩冲蚀钻柱研究、钻柱多轴疲劳寿命研究和气体钻井井眼轨迹控制技术研究等,是作者近年来在气体钻井技术研究方面的最新成果总结。

本书适合于油气田开发工程和油气井工程技术人员参考,也可作为石油高等院校相关专业高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气体钻井基础理论及其应用/练章华,林铁军,孟英峰著.
北京:石油工业出版社,2012.2
ISBN 978-7-5021-8931-0

I. 气…

II. ①练…②林…③孟…

III. 气体钻井

IV. TE.242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 013888 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

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.25

字数:440 千字 印数:1—2000 册

定价:90.00 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

本书主要针对气体钻井的基础理论和应用技术进行讨论,重点进行了气体钻井动态钻进破岩过程理论研究和仿真模拟技术、气体钻井井斜机理及高速气体携岩冲蚀钻柱理论研究,结合气体钻井现场案例进行全井段钻柱运动和振动研究、气体钻井钻柱在剧烈振动作用下的多轴疲劳寿命研究和气体钻井井眼轨迹控制技术研究等,通过大量现场实例应用分析形成了气体钻井防斜打直、打快技术,全井段钻柱动力学研究技术和气体钻井井眼轨迹控制技术,是作者 10 年来在气体钻井技术研究方面的最新成果总结。

本书主要分 8 个部分对气体钻井基础理论及其应用技术进行介绍。

第 1 章绪论,概述了气体钻井技术的国内外发展状况;第 2 章气体钻井井斜机理研究,主要从地层岩性和塔式钻具组合防斜能力等方面进行计算机仿真研究;第 3 章气体钻井动态钻进过程研究,建立了各向同性岩石地层和各向异性岩石地层的有限元数值模型,用计算机仿真对气体钻井钻头动态破岩过程进行理论研究;第 4 章气体钻井钻柱动力学分析,从理论上系统地研究了气体钻井钻柱纵向振动、横向振动、扭转振动及其涡动反转的动力响应;第 5 章全井段钻柱动力学研究,首先利用现代计算机仿真软件,建立了全井段钻柱动力学模型,定量对比研究了气体钻井和钻井液钻井钻柱的运动规律和振动状态;第 6 章高速气体携岩冲蚀钻柱机理研究,对气体钻井高速气体携岩冲蚀钻柱进行了理论研究,建立了气—固高速气流冲蚀钻柱的计算流体动力学仿真模型,对气体钻井钻柱冲蚀机理进行了计算机仿真模拟研究;第 7 章钻柱多轴疲劳寿命研究,对气体钻井钻具多轴疲劳寿命进行了理论研究,建立了基于 XFEM(近年来最新发展的有限元裂纹扩展理论)的钻杆裂纹扩展有限元仿真的力学模型,对钻杆裂纹扩展过程进行动态的计算机仿真模拟研究;第 8 章气体钻井井眼轨迹控制技术,建立了气体钻井直井防斜、定向井和水平井井眼的各种钻井组合的有限元模型,其仿真模拟结果得到现场应用。

全书由“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”(西南石油大学)练章华教授、林铁军博士和孟英峰教授编著,参加本书的主研人员有练章华、林铁军、孟英峰、肖洲、魏臣兴、蒋祖军、肖国益、朱化蜀、王波等,本书研究成果有每一位主研人员的贡献。另外,本书的研究成果、油田现场资料等方面,得到了中国石化西南油气分公司工程技术研究院的大力支持和帮助,编者借此机会表示衷心地感谢!

由于笔者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 气体钻井技术概述	(1)
1.2 气体钻井国内外研究现状	(2)
第2章 气体钻井井斜机理研究	(5)
2.1 井斜研究的历程	(5)
2.2 垂直井眼围岩应力场分析	(10)
2.3 岩性对井斜的影响	(12)
2.4 塔式钻具组合对井斜的影响	(24)
2.5 小结	(27)
第3章 气体钻井动态钻进过程研究	(29)
3.1 岩石破坏强度准则	(29)
3.2 各向异性岩石的屈服条件	(32)
3.3 岩石弹塑性本构关系	(39)
3.4 钻头动态破岩模拟研究	(44)
3.5 钻铤—钻头—地层互作用动态破岩分析	(59)
3.6 小结	(67)
第4章 气体钻井钻柱动力学分析	(68)
4.1 气体钻井钻柱受力特点	(68)
4.2 钻柱的弯曲形式及运动状态	(71)
4.3 气体钻井中钻柱纵向振动分析	(71)
4.4 气体钻井中钻柱扭转振动分析	(81)
4.5 气体钻井中钻柱横向振动分析	(86)
4.6 涡动反转模型分析	(93)
4.7 钻柱纵振谐响应分析	(95)
4.8 小结	(97)
第5章 全井段钻柱动力学研究	(98)
5.1 钻柱动力学研究现状	(98)
5.2 全井段钻柱动力学模型	(104)
5.3 大钻压井眼轨迹良好全井段钻柱动力学模拟研究	(115)
5.4 小钻压井眼轨迹较差全井段钻柱动力学模拟研究	(130)
5.5 小结	(142)
第6章 高速气体携岩冲蚀钻柱机理研究	(144)
6.1 气体携岩冲蚀钻杆简介	(145)
6.2 气体钻井钻杆冲蚀机理	(147)
6.3 气体钻井冲蚀钻杆的影响因素	(148)

6.4	干气体携岩规律研究	(152)
6.5	气体携岩冲蚀钻杆 CFD 模拟研究	(155)
6.6	小结	(172)
第7章	钻柱多轴疲劳寿命研究	(173)
7.1	钻柱多轴疲劳理论	(173)
7.2	钻铤螺纹多轴疲劳寿命分析	(184)
7.3	基于有限元的含初始裂纹钻杆多轴疲劳寿命分析	(192)
7.4	钻杆裂纹扩展过程研究	(201)
7.5	小结	(207)
第8章	气体钻井井眼轨迹控制技术	(209)
8.1	气体钻井直井防斜控制技术研究	(209)
8.2	气体钻定向井钻具组合力学特性研究	(221)
8.3	气体钻井井眼轨迹控制技术现场应用研究	(240)
8.4	小结	(259)
参考文献		(260)

第1章 绪 论

1.1 气体钻井技术概述

气体钻井技术,开始于20世纪50年代,是欠平衡钻井技术的一种,主要采用空气作为循环工作液的钻井技术^[1]。1953年,美国的EI Paso天然气公司首次利用空气作为钻井流体在犹他州成功地钻成了第一口油井^[2-5]。自此,利用气体来进行油气井钻探在全球蓬勃发展起来,发展到现在,国内采用气体钻井技术已能钻达超6000m深度。这项技术常用在美国东部的阿巴拉契亚山脉地区、阿肯色州油气田、新墨西哥州的山间盆地,以及一些西得克萨斯油气田^[3]。气体钻井技术可以解决常规钻井方式无法解决的复杂地层钻井难题,例如四川地区须家河组以上地层压力系数低,钻遇长段低压或破碎性地层时,钻井液“有进无出”,严重漏失,造成巨大的经济损失。气体钻井技术解决了类似的潜在恶性漏失,并大大地提高了机械钻速。据美国1986年钻井统计,有16.4%的美国陆地钻井作业,以及相近比例的国际钻井作业运用空气和天然气钻井技术来完成主要井段的钻进。据美国能源部统计,美国陆地约30%的油气井均可采用气体钻井技术来完成。近年来气体钻井技术已被应用于某些浅海大陆架的钻井作业,用于那些潜在的漏失层(例如礁相地层)。

在国内,20世纪60年代,在四川盆地的8口井中首次使用了天然气钻井,取得一定的效果,但由于井控设备落后、工艺技术差、装备不配套而没有进行下去。80年代末,我国引进了美国全套气体钻井设备,并在新疆地区对10余口井进行气体钻井试验,为开展气体钻井积累了现场经验。90年代,为解决川渝地区出现的严重井漏问题,开展了采用充气钻井液欠平衡钻井技术,并进行气体钻井试验^[6]。2001年四川空气钻井队在伊朗南部TABNAK气田进行了空气泡沫钻井^[7],在面对伊朗地区碳酸盐岩地层地质条件异常复杂、井漏严重的情况下,仍然以较快的速度完钻,其中最快一口井仅用64天就宣告完成。

2005年以来,随着气体钻井设备的升级和换代,中国石油和中国石化在川渝油气田应用气体钻井技术取得了较大成果,应用范围和开发力度不断增大。2005年四川七北101井气体钻井的实施预示着气体钻井重新回到国内并开始广泛应用,在长达3000m的大井眼段提高了10倍机械钻速。从开钻至3426m结束气体钻井,七北101井在短短59天钻井周期里,一口气创下了5项全国纪录、两项川渝地区纪录。值得一提的是,在研磨性最强、钻速最慢的须家河组,七北101井采用氮气钻井仅用了一只钻头、两天时间、一趟钻就顺利完成,速度比七里北1井提高了14.38倍,充分发挥了气体钻井的优势^[8]。2006年川内第二超深井“1号井”仅用145天完钻,气体钻井井段达到3304m;同年8月,在塔里木满东2井,克服了气候环境恶劣、井控安全、井深、返速低造成的携砂困难等诸多难题,确保了氮气钻井顺利钻达6200m,打破了业界认为气体钻井不适用于超深井段的认识局限,创造了国内气体钻井最深纪录。

气体钻井技术的主要优点有以下几个方面:

- (1) 气体自身密度低,易形成欠平衡状态,适于低压、衰竭油气层的钻井;
- (2) 对储层伤害小,有利于发现和保护油气层,增加油气产量,特别适合钻水敏性地层;
- (3) 最大限度地提高钻速和单只钻头进尺,从而降低钻机作业时间;
- (4) 不污染岩屑,易于准确评价储层,而且能连续不断地对所钻地层进行评价;
- (5) 能有效地解决井漏问题,特别适合带有裂缝洞穴的石灰岩储层;
- (6) 消除发生在低压漏失层的钻井液漏失、卡钻现象;
- (7) 为井下空气锤的使用提供一个良好的环境,从而提高钻速、防止井斜;
- (8) 对于缺水、钻井液费用昂贵的情况下,可以减少钻井液和水的费用。

由于以上的优势,气体钻井不仅大幅度提高钻井速度,也可以极大地提高单井产量,已成为当前国际国内钻井界的热门技术之一。气体钻井在致密碎屑岩油气资源、煤层气、页岩气的勘探开发、深井钻井的提速增效和防漏治漏等方面具有不可替代的技术地位。同时,在提高勘探发现率、提高单井产能、提高钻速、降低成本方面有相当大的优势。而且,在未来的深层地热钻探中将被广泛采用,在甲烷水合物开采中,成为必需技术。因此,气体钻井技术将是我国油气钻井领域必不可少的主流技术之一。

1.2 气体钻井国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

气体钻井技术的发展与应用经历了两个明显的阶段性高峰:第一个高峰始于 20 世纪 50 年代初,终于 20 世纪 80 年代末;第二个高峰始于 20 世纪 90 年代初,至今仍在该高峰期的上升阶段。两个高峰期有着不同的技术发展动力和特点。

在第一个高峰期,自气体钻井技术诞生开始,人们便发现该项技术的某些优点:高钻速、低成本、克服某些钻井困难的卓越能力,比如克服严重井漏、高陡构造防斜、水敏性页岩坍塌、严重的压差黏附卡钻等,因此该项技术很快被广泛采用。美国的犹他州、得克萨斯州和新墨西哥州使用气体钻井成功完成 9 口井,获得了良好的收益,极大地提高了钻速,降低了钻井成本,平均每口井节约 100 万美元,并且迅速在美国、加拿大和欧洲得到了推广。20 世纪五六十年代,Angel 等对气体钻井中气体的需求量作了大量的研究,以使岩屑能够顺利地随气体带出,根据 Angel 井底最小动能假设得到标准状态下的气体携岩的临界速度为 $15.24\text{m/s}^{[9]}$ 。Roberts 等对气体钻井时出现地层大量出水的问题作了深入的研究,认为可以根据地层出水量选择使用雾化、泡沫钻井或者钻井液钻井技术代替气体钻井^[10]。

20 世纪 80 年代末,气体钻井的发展进入了第二个高峰期,该高峰时期的直接动力是勘探、开发技术进步的需要。气体钻井作为勘探开发的新技术,除了原有的提高效益、降低成本、克服钻井工程困难以外,人们更多地关注、发展了气体钻井钻穿油气储层时良好保护产层的能力和实时准确的油气显示特点,以及由此而派生出来的提高勘探、开发总体效益的技术系列。同时,在气体钻井井壁稳定性问题研究方面做了大量而细致的工作,尤其对泥页岩地层的井壁稳定性进行了大量的研究。在 20 世纪 90 年代初,美国能源部出资组织了全美的关于气体钻井的调查,考察气体钻井在美国应用的现状、存在的问题、发展的潜力以及今后要解决的重点

问题。此项调查完成之后,美国能源部结合“非常规油气资源的勘探开发”、“在 21 世纪钻得更深、钻得更快、钻得更经济、钻得更清洁”等大型攻关项目,与大公司、企业界、高等院校联合,开展了一系列的技术攻关,以提高和完善气体钻井与其配套技术,并组织重点示范工程予以应用、推广。美国、加拿大等国在气体钻井的井下配套工具发展上水平比较高,研发了专用的空气螺杆钻具、空气锤、气体钻井配套使用的钻头以及膜分离制氮、电磁 MWD 等一系列工具^[11]。

随着气体钻井的应用,气体钻井技术和存在的问题也得到了极大的关注并进行了大量的研究。20 世纪七八十年代,Cooper, Leonard W., Hook 和 Wilson G. E. 等对气体钻井中的井斜进行了研究^[12],根据当时钻井技术 Cooper 提出了气体钻井中对控制的两个基本原理,即钟摆效应和刚性满眼钻具。刚性满眼钻具尤其对气体钻井中井斜控制起到明显的作用,并且根据实际钻井过程经验得到“空气冲击锤在直井钻井中有防止出现严重井斜的作用”的结论。在气体钻井井壁稳定性问题研究方面做了大量的工作^[13-17],尤其对空气钻进泥页岩地层的井壁稳定性进行了大量的研究。

1.2.2 国内研究现状

尽管 20 世纪 60 年代在四川盆地试验过清水边喷边钻和不压井起下钻技术,但由于受当时设备和技术条件的限制,并未发展成可用技术。20 世纪 80 年代起我国开展气基流体欠平衡钻井,在新疆、长庆、辽河等油田开展先导性钻井试验,主要采用泡沫钻井、充气钻井用于漏层钻进,并自制了低压旋转控制头、发泡剂、泡沫剂等设备和化学剂。20 世纪 80 年代末期,新疆引进了中国第一套国家标准化的空气雾化钻井装备(空压机三台、增压机三台、雾化泵一台、空气锤两套)并在新疆地区对多口井进行空气钻井试验,为开展气体钻井积累了现场经验。1990 年在新疆克拉玛依开展了空气钻井试验,2000 年在长庆苏里格气田组织试验了以天然气为循环介质的气体钻井。实验中也暴露出井下燃爆、完井技术不配套等一系列的问题。

在气体欠平衡技术发展方面,中国走的是与发达国家完全不同的道路。中国在进行设备工具改造和气体欠平衡工业化试验之前,先投入少量资金对该技术的可行性、必要性及关键要素进行了大量的超前研究。在这个基础上规划该项技术发展的模式、方向、重点指导现场试验。经过 1990—2000 年十余年的基础研究和现场实践,终于比较明确地回答了欠平衡钻井发展的战略性决策问题和重要的战术性实施问题,并初步形成了钻井决策、设计、施工和分析的实验评价体系 and 理论体系。这不但有效地推动、支持了中国欠平衡技术的发展,而且就目前的资料跟踪来看,该基础理论体系覆盖范围和深入程度都是目前国际上所未有的。

在设备方面,由于进口专用的气体欠平衡钻井设备成本高,使用费用也高。为了大面积推广该技术,中国石油进行了一系列的设备技术攻关:利用四川气田在高压气井装备方面的优势,重点支持了欠平衡钻井旋转控制头、不压井起下钻装置、专用节流管汇和阀件、气液分离系统等欠平衡钻井装备的国产化。中国石油勘探开发研究院机械所和北京石油机械厂攻关了气动螺杆钻具、井下空气锤、气体钻井用震击器、减震器、雾化泵等井下工具。西南石油大学与四川石油管理局、长庆油田联合,攻关了柴油机尾气、双燃料尾气装置,四川石油管理局生产了气体增压机。这些设备的研制使用为开展气体欠平衡钻井技术打下良好的基础。

在基础理论研究、装备工具配套、专业化队伍建设的不断发展过程中,随着条件的逐步成熟,石油公司不断地安排一系列的现场应用试验,内容由简到繁,试验目标由低到高,逐步推进



气体欠平衡技术的不断发展。2000 年 12 月,长城钻井公司在伊朗 TABNAK 油田对 24 口井进行了空气、泡沫钻井,把气体钻井从幕后推向了前台。2003 年,四川石油管理局带着伊朗作业的经验回国后,先后率队在川渝地区黑桃 1 井、大天 9 井、矿 2 井以及玉门、长庆和山西煤层气田进行治漏、防卡、提速试验,大幅度提高了钻井速度,缩短了建井周期,丰富了纯空气钻井、空气泡沫钻井、空气充气钻井和空气雾化钻井的实践经验,加深了对各种地层和井下情况应用不同形式气体钻井的认识。近年来,四川掀起了气体钻井的高潮,应用井数陡然增加:1998—2004 年,6 年时间仅 16 口井;2005 年一年就打了 20 口井;2006 年则达到 45 口井。2003 年在玉门试验了空气钻井,取得了明显的效果。长庆油田天然气钻井的实验成功、玉门青西油田深井超硬地层空气钻井的实验成功,再加上四川盆地须家河组氮气钻井的多口井实践,为国内大规模发展气体钻井提供了有利的保障。中国石化也紧随其后,在四川的大邑 1 井、川孝 488 井以及新场气田进行了大量的气体钻井试验,并取得了初步成效。2008 年,成功利用气体钻井钻成中国石化第一口水平井——马蓬 X1 井。

同时,国内的气体钻井中许多技术问题还有待于进一步深入的研究,比如气体钻井中页岩的稳定性评价,遇水后的技术对策和井壁稳定性分析,高产气层引起井壁冲蚀坍塌,井下燃爆、井斜等,其应用范围有待进一步扩大。有效地解决这些技术问题有利于发展气体钻井、完井的配套技术,使其成为我国油气勘探开发领域中的主力钻井技术。

第2章 气体钻井井斜机理研究

2.1 井斜研究的历程

2.1.1 钻柱对井斜的影响

油气井的防斜问题是油气钻井工程中普遍存在但一直未能很好解决的经典性难题之一。1924年《华盛顿邮报》发表了一篇“井为什么会斜”的文章,说明井斜问题已经引起当时钻井界的关注。钻井界一般认为,对井底钻具组合的力学分析是1950年由 A. Lubinski 开始的^[18],实际上,可以进一步追溯到20世纪20年代。在1929年到1950年间, H. H. Jones, M. Capelushnikov, L. V. W. Clark 和 F. A. Willers 分别开展了“如何利用重力钻直井”、“直井中钻柱为什么会弯曲”、“直井和方向井技术的理论研究”、“钻柱的纵向弯曲”等问题的研究^[19-22]。虽然这段时期的理论研究还不很准确,但为后来的 A. Lubinski 在理论上的突破性进展奠定了基础。

20世纪50年代期间,石油钻井以直井为主,所用钻具组合主要是光钻铤钻具和单稳定器钟摆钻具。这段时期以 A. Lubinski 和 H. B. Woods 为代表,详细研究了光钻铤钻具组合的特性,确定了影响井斜的重要因素;并提出地层各向异性指数、“狗腿度”和钟摆力的概念,使人们对井身质量评价、井身设计等方面的认识发生了较大的变革^[20]。建立模型时,做出以下假设:(1)下部钻具组合在上切点以上紧贴下井壁,研究时只需要对上切点以下的钻具组合段进行力学分析即可;(2)钻柱为上下两端铰支的压杆;(3)不考虑钻井时扭矩的影响;(4)钻柱呈平面弯曲状态。在这些理论分析中, A. Lubinski 建立了比较合理的力学模型,为后人的进一步研究奠定了基础。

20世纪60年代期间,定向井有较大的发展,研究的重点是与定向井密切相关的井眼曲率影响问题和多稳定器钻具组合的受力变形特性分析。其中代表性的有 R. S. Hoch^[23] 首先提出了井眼曲率对下部钻具组合力学特性的影响,分析了弯曲井眼中多稳定器满眼钻具组合的力学特性, C. Wiley 在 Hoch 满眼钻具的基础上又采用了近钻头稳定器,并运用 Hoch 的理论进行了理论分析^[24]。由于 Hoch 公式的理论分析不恰当地运用了线性力学体系的叠加原理以及是以钻柱失稳作为稳定器的最大安装高度的,所以其计算出的结果误差较大,国内学者对其理论进行了一系列的分析和修正,形成修正的霍奇公式^[25-27]。C. E. Murphey 和 J. B. Cheatham 发表论文《井斜和钻柱特性》,研究光钻铤钻具在不同井眼曲率情况下的受力变形,并得到钻头和上切点之间钻柱的弹性线微分方程^[28]。总的来说,该时期认识到井眼曲率对钻具组合的影响,钻具组合受力分析由一维推广到二维,并从理论上认识多稳定器满眼钻具和近稳定器的作用。

20世纪七八十年代是钻具组合力学分析发展最快的时期,除了 A. Lubinski 的微分方程求解方法外,还出现了多种分析求解下部钻具组合的方法。B. H. Walker 应用弹性力学的势能原理求解钻具组合的受力和变形问题^[29]; W. B. Bradley, F. J. Fischer 分别用有限差分法求解弯曲

井眼中钻具组合的受力与变形^[30-31]。K. K. Millheim 提出有限元法进行下部钻具组合的力学分析,建立了下部钻具组合的有限元模型,并取间隙单位来描述钻柱与井壁的接触状况^[32-33]。但由于没有精确考虑钻具组合变形的非线性以致计算结果与实际情况存着较大差异。1977年,白家祉提出了纵横弯曲连续梁理论求解井下钻具组合的受力与变形。该理论将下部钻具组合的弯曲看成是在纵横载荷联合作用下的弯曲连续梁,利用稳定器和上切点处连续性条件导出三弯矩方程,以求解稳定器处的内弯矩,从而求出钻具组合在钻头处产生的侧向力。此后该方法不断被完善,从一维分析发展到三维分析^[34-39]。苏义脑院士将纵横弯曲连续梁理论发展至可求解井下动力钻具、带弯角、变截面组合的一、二、三维分析,拓宽并完善了纵横弯曲法理论^[40-45]。高德利教授认为在稳定器处轴向力的方向应是钻柱的切线方向,其大小应考虑井壁支撑反力的影响。基于这种认识,他应用加权余量法完成下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,提出钻头与地层相互作用的三维钻速方程^[46-48]。1992年以来,李子丰教授分别建立了下部钻具组合三维小挠度、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,同时也建立了三维钻速方程^[49-51]。

20世纪80年代以来,井下钻具组合的研究偏向于动力学分析。钻柱动力学分析主要研究钻柱在各种动载作用下的运动、受力和变形规律,从而更好地了解 and 掌握钻柱的工作状态,准确预测井眼轨迹,减少钻具断裂事故和有效延长钻柱寿命。S. F. Wolf 使用有线遥控系统对直井钻进时的井底压力、加速度、岩层特性等进行测量,发现系统的共振频率明显低于钻柱的固有频率,观测到井底存在但井口却测不到的高弯矩,为钻柱涡动的存在提供了直接证据。V. A. Dunayevsky 通过对牙轮钻头的钻柱动力学分析,首次从理论上给出了 BHA 横向振动的原因,并提出了钻柱不仅绕其本身轴线转动,而且同时存在着涡动理论^[52-53]。章扬烈建立了国内第一个 BHA 运动状态模拟装置,取得十分重要的实验研究成果,提出了反转运动为主要特征的旋转钻柱运动原理,并给出了反转涡动的频率与自转频率之间的关系式^[54]。管志川利用 BHA 模拟试验装置研究了直井底部钻柱的动力学特性,认为下部钻柱随着转速的增加,其运动状态由有规则摆动阶段向无规则摆动阶段和规则反向涡动阶段转换,而增加钻压会使运动状态发生转变的临界钻速提高,阻碍底部钻柱无规则摆动和规则涡动的形成,因此在防斜问题上存在着一个最优钻压—钻速配合问题。其后来研究中发现下部钻柱向前涡动源于钻柱重量、质量偏心等因素,向后涡动源于钻柱与井壁之间的碰摩作用,并且下部钻柱与井壁之间是否发生碰摩,通常以下部钻柱的一阶临界转速为界^[55-57]。高宝奎、高德利建立了钻柱涡动方程,并对涡动的原因和涡动对井斜的影响进行了分析阐述。当钻柱向后涡动角速度为极值时钻柱沿井壁纯滚动,钻柱受交变弯曲应力作用,易于疲劳破坏;当向前涡动角速度为极值时,其值等于钻柱本身自转角速度,钻柱相当于刚体绕井轴线转动,从而会造成钻柱严重偏磨,最终钻柱失效,此时钻柱界面不存在交变弯曲应力,也就是不会疲劳破坏。实际上钻柱涡动发生在两个极值之间,绝大多数可能是带滑动的涡动。由此其在动力学防斜理论分析中,提出了钻柱发生涡动时存在一个周期性附加瞬时轴向力,且其附加瞬时轴向力起到辅助破岩和纠斜的作用,当然其同时引起底部钻柱的纵向激振等危害^[58-61]。国内其他学者和专家对井下钻具组合也进行了许多动力学研究分析,譬如刘清友、马德坤、李子丰等都建立了纵振、扭振和横振的数学模型并对模型进行了求解,说明纵振、横振和扭振对钻柱的危害,提出了许多预防钻柱破坏

的措施和预测钻柱使用寿命的方法^[62-71]。随着计算机软硬件的发展,国内部分学者开始使用有限元软件对全井段钻柱进行动力学分析,根据全井段钻柱的三种模态的振动及其耦合振动的仿真结果,提出合理配置减振器和稳定器来减小振动的危害^[72-75]。

2.1.2 地层因素对井斜的影响

国内外专家和学者除了研究井底钻具组合的受力与变形外,也致力于探索地质因素如何影响钻头轨迹的作用原理,因研究方法和试验手段的不尽相同,形成的观点也存在较大差别。国外在这方面的研究成果可分为定性理论(包括小型造斜器理论、地层可钻性理论、钻铤力矩理论、扩眼与钻头偏移理论和优先碎屑理论等)和定量理论(包括各向异性地层理论、偏斜力理论和各向异性塑性理论等)^[44]。

H. M. Rollins 提出了小型造斜器理论,当钻头在倾斜的层状地层中钻进时,每钻至层面交界,因层面不能长时间支持所加的钻压而沿层面法向发生破碎,结果在上倾、下倾两侧造成小斜台。上倾的斜台很容易被钻掉,而下倾的小斜台则被保留,它就像小型造斜器一样对钻头施加一横向作用力,导致钻头向上倾偏斜,如图 2.1 所示。但这个理论不能解释大地层倾角情况下钻头向下倾进的现象。

Sultanov 和 Shandalov 提出了地层可钻性理论,他们用两种软硬不同的相邻岩层的可钻性差异来解释井斜成因,如图 2.2 所示。当钻头穿越界面时,同时与软硬两种岩石接触。因在软岩层中的钻速大于硬岩石中的钻速,故当钻头从软地层钻入硬地层时,钻头将向上倾偏斜;反之,当钻头从硬地层钻入软地层时,将向下倾偏斜。但该理论隐含了钻压在井底均匀分布的假设,而事实上当钻头与软硬地层同时接触时,硬岩石对钻头的反作用力要大于软地层对钻头的反作用力,钻压的分布是不均匀的。并且地层可钻性理论与实验现象相矛盾,实验发现,钻头从软地层向硬地层钻进穿透界面时,先下倾,然后再上倾。

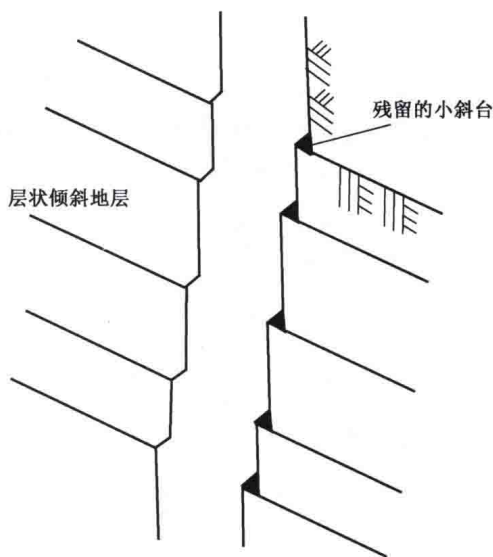


图 2.1 小型造斜器理论

钻铤力矩理论认为,当钻头穿越过软硬岩石的交界面时,非均布的钻压使硬岩石对钻头的反作用力要大于软地层对钻头的反作用力,结果使钻头处受到力矩作用。该力矩使钻柱组合的钻铤上切点位置和钻头侧向力发生变化,因而产生井斜,如图 2.3 所示。

S. R. Knapp 提出扩眼作用与钻头偏移理论,他认为,在钻进过程中,钻头不是一次钻成全井眼,而是先钻成较小井眼,接着进行扩眼。在软硬岩层的交界面处,钻头不能扩大硬岩石而能迅速扩开软岩石,致使钻头向软岩层方向偏斜,如图 2.4 所示。

Mclamore 提出了优先碎屑地层理论。该理论建

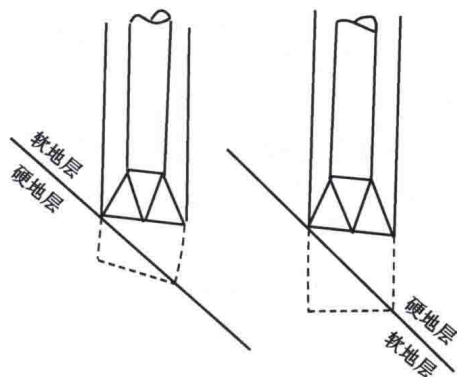


图 2.2 地层可钻性理论

Mclamore 提出了优先碎屑地层理论。该理论建

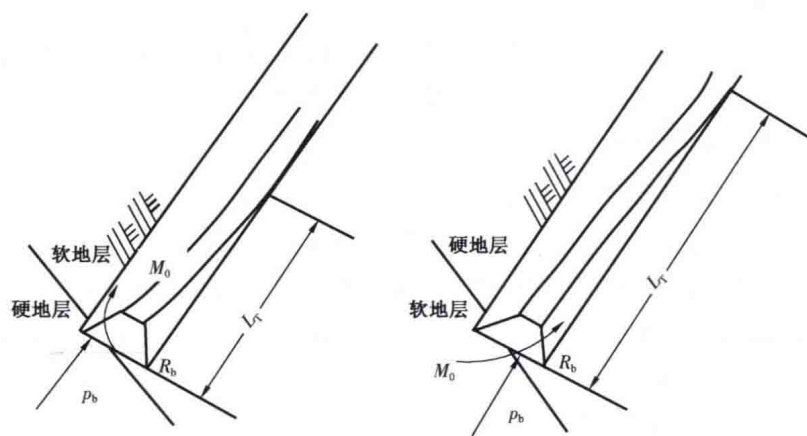


图 2.3 钻铤力矩理论

立在单齿切削岩石实验基础上,单齿楔入层状的各向异性地层时两侧形成的碎片将是不对称的,一侧被切削的岩石多于另一侧,因而形成井斜,如图 2.5 所示。

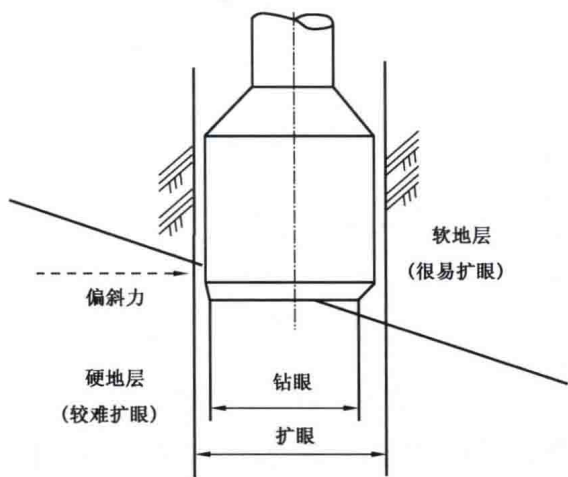


图 2.4 扩眼作用与钻头偏移理论

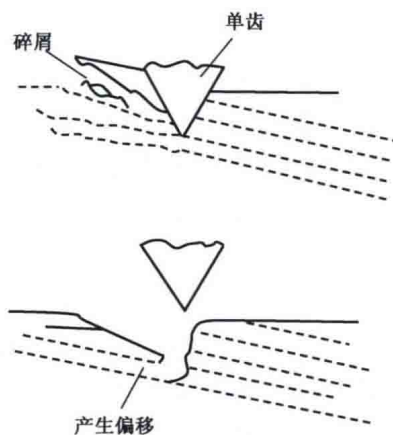


图 2.5 优先碎屑地层理论

在优先碎屑地层理论基础上,Mclamore 和 Bradley 提出了偏斜力理论,分别导出产生优先碎屑的钻压值和产生碎屑时的不平衡横向力值。但实际削斜过程要比单齿模拟实验更为复杂,所以由偏斜力理论得出的计算结果与实际情况差别较大。

Pariseau,Smith 和 Cheatham 分别对塑性变形的岩石进行静力单齿钻进实验,以研究各向异性对偏斜力的影响,但是他们建立的各向异性塑性理论预报任何情况下井斜总是沿着下倾方向的,这与旋转钻井的实际情况是矛盾的。

Lubinski 和 Woods 最早提出了地层各向异性指数 h 的概念来作为衡量岩石各向异性作用的一个指标,并导出位移角、合力角、井斜角、地层倾角和地层各向异性指数之间的关系。美国 NL 公司的何华山发展了 Lubinski 的工作,提出了钻头异性指数的概念^[76]。Murphey 和 Cheatham 在 Lubinski 的地层异性指数的基础上,进一步进行力学分析,推导出了地层自然造

斜力的公式^[28]：

$$F_f = \frac{-h \cdot \tan(\beta - \alpha)}{1 - h + \tan^2(\beta - \alpha)} \cdot p_b \quad (2.1)$$

式中 F_f ——地层自然造斜力；

p_b ——钻压；

h ——地层各向异性指数；

α ——井斜角；

β ——地层倾角。

这一理论公式的建立是一种巨大进步,定量描述了地层自然造斜力与钻压、井斜角、地层倾角和地层各向异性指数之间的关系,但对实际情况来说,该理论尚有一定的局限性,需要进一步的完善和发展。

国内对地层力研究主要在 20 世纪 70 年代以后,白家祉于 1978 年提出了造斜力的计算经验公式：

$$F_f = A \cdot p_b \cdot \tan(\beta - \alpha) \quad (2.2)$$

其中 A 为常数,数值与夹层以及交界层软硬之差有关,一般通过由探井井史资料确定。在研究江汉油田易斜区的地层造斜性时发现, A 并不是一个常数,而是随着地层各向异性、井斜角和地层倾角而发生变化^[77]。

上述各种定性理论和定量模式在一定程度上解释了井斜的原因,但也都存在着一些无法解释的现象。并且上述理论都隐含“表面破碎”这一前提和没有考虑钻头存在的各向切削异性^[44]。苏义脑院士在前人研究的基础上,分别推出“表面破碎”和“体积破碎”阶段的地层自然造斜力计算公式^[78],其不但考虑了地层的各向异性,而且还包含了钻头各向切削异性。

2.1.3 防斜措施

总的来说,无论是钻井液钻井还是气体钻井,造成井斜的主要原因除了水力参数外有以下 4 个方面^[79-81]:(1)下部钻具组合结构;(2)钻井工艺参数;(3)井身几何形状;(4)地层特征。其中后两种是不可控因素,是进行轨迹预测和控制的前提条件;前两种是可以人为控制的因素,可以设计合理的井下钻具组合和确定合理的钻井工艺参数,使产生的效应克服后两种不可控因素带来的不利影响或者恰当合理地运用后两种的有利影响,从而达到控制井眼轨迹的目的。在现场实践中,防斜措施一般采用以下几种方式:(1)钟摆钻具组合,采用轻压吊打的方式,以牺牲机械钻速来提高井身质量,一般分为光钻铤钟摆钻具、塔式钟摆钻具、带稳定器的钟摆钻具。(2)满眼钻具组合,“以满保直”,这种钻具一般安装三个稳定器,下稳定器有抵抗地层造斜力的能力,并且钻压对钻具组合的钻头侧向力影响较小,在自然造斜力很小的地层,可以加大钻压,快速钻进,但对地层自然造斜力很大的地层,改变钻压会改变地层的造斜力,一般这种地层不能加大的钻压钻进。有时为了防止泵压过高和卡钻,还可以用方接头、方钻铤等防斜工具。满眼钻具组合一般只能防斜不能纠斜。(3)空气锤配合小钻压低转速(20~30r/min)防斜打直,该方式不牺牲钻速,可以起到一定的防斜效果。(4)光钻铤大钻压防斜技术,在大钻压和高转速的作用下,光钻铤钻具组合产生规则的涡动,从而降斜^[60]。(5)偏轴或带有偏

心结构的钻具组合,是近年来发展起来的防斜打快技术,使用大钻压和高转速,使下部钻具由自转变为稳定的公转回旋运动,钻头均匀削斜地层,克服地层的造斜,现场试验效果明显好于常规防斜技术。江汉油田曾在马王庙地区试验了三种偏心防斜钻具组合,马36-5-7井电测最大井斜 1.5° ,相当于邻井井斜的20%,且机械钻速提高了20%左右,取得了较好经济效益;马7-12井用偏心钻具以后井斜降至 0° ;在地层倾角大于 30° 的钟市地区,钟5-23井用偏心钻具使井斜比同地区平均水平降低了 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。但对于地层各向异性指数不同的地层,应设计不同的偏轴钻具组合来达到防斜效果,且该偏轴钻具常引起井眼严重扩大和钻具偏磨^[82-84]。

(6)柔性钻具组合,该项技术正处于发展过程中的一种防斜打快新技术,这种组合可以比常规的钟摆钻具产生2倍以上的降斜力,能有效地控制井斜,提高机械钻速,缩短建井周期,降低钻井成本,保证井身质量。目前该钻具组合在地层倾角在 25° 以下的试验中取得较好的效果,在高陡构造中的钻进效果尚需进一步的试验^[85-86]。

(7)反钟摆钻具组合,其基本原理是通过合理设计钻具组合的刚度,使钻具组合的第一稳定器和上井壁接触,突破钟摆钻具“钻压帮助增斜”的传统思想,使钻具组合的钻头降斜力随着钻压的增大而增大,将防斜与打快统一起来,其主要特点是第一稳定器抵上井壁,第一跨挠度向上,钻压产生降斜力,钻头倾角向下,有利于降斜。

(8)导向钻具组合,是有带单弯或双弯壳体及稳定器的井下动力钻具组合而成,当开动转盘时,钻头的实际钻速为螺杆钻具输出转速与转盘转速之和,可以钻出稳斜段;当发生井斜进行纠斜时,可以定向方式纠斜^[87-89]。目前国外采用这种技术的比较普遍,国内也有所使用,并得到预期的效果。但其随钻测量技术和螺杆钻具的购置费用大制约着在国内的普及程度,随钻测量的井下信息传输一般分为有线随钻测量、井下储存式测量和电磁随钻测量。目前电磁随钻测量技术只有美国和俄罗斯掌握,但电磁波随钻测量信息传递深度低于2000m,且受高阻地层严重影响。国外运用自动控制闭环技术成功研制了旋转导向钻井系统,主要以VDS (Vertical Drilling System)、VertiTrak等系统为典型代表。根据苏义脑院士运用纵横弯曲梁理论分析的结果可知^[90],自动垂直钻井工具的钻头造斜力由两部分组成:第一部分来源于钻具自重的钟摆效应对钻头降斜力的贡献;第二部分来源于导向集中力效应对钻头降斜力的贡献。其中来源于第一部分的钻头降斜力随着井斜角的增加而增加,来源于第二部分的钻头降斜力与井斜角的变化无关,但该工具的降斜能力几乎不受钻压变化的影响,因此可以利用较大的钻压钻井,而不影响工具的降斜能力。由此可见,该自动垂直钻井工具将能够在地层造斜力较大的高陡构造中高效快速地完成垂直钻井的工作。目前,国内学者在跟踪国外最新技术的前提下,立足于自主创新,正积极地开发研究此项新技术,同时也开发了其他降斜工具,如重力机液遥控式工具^[91-92]。

2.2 垂直井眼围岩应力场分析

假设地层岩石为均质、各向同性线弹性多孔介质,地层岩石受到原地应力场、地层孔隙压力和井内流体压力的共同作用,忽略构造应力场和温度场的影响,且井壁围岩处于平面应变状态(即井眼沿纵向不变形)。根据以上假设建立了图2.6所示的垂直井眼围岩受力及计算简图。

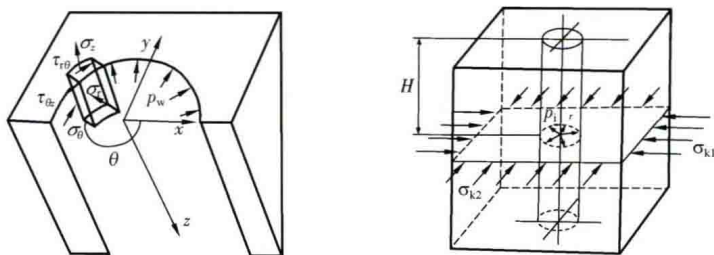


图 2.6 垂直井眼周围岩石受力分析图

根据弹性力学理论,可求得井眼围岩应力场分布为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \frac{a^2}{r^2} p_w \quad (2.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \frac{a^2}{r^2} p_w \quad (2.2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (2.3)$$

式中 p_w ——井眼液柱压力,MPa;
 r ——距井眼中心的径向距离,mm;
 a ——井眼半径,mm;
 σ_x —— x 方向的应力,MPa;
 σ_y —— y 方向的应力,MPa;
 $\tau_{r\theta}$ ——井眼岩石的剪切应力,MPa;
 σ_r ——井眼岩石的径向应力,MPa;
 σ_θ ——井眼岩石的切向应力,MPa。

根据有效应力定律,在直角坐标系中,垂直井眼周围地层应力场为:

$$\sigma_x = \sigma_H - p_p \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = \sigma_h - p_p \quad (2.5)$$

$$\sigma'_z = \sigma_v - p_p \quad (2.6)$$

式中 σ_H ——最大水平地应力,MPa;
 σ_h ——最小水平地应力,MPa;
 σ_v ——上覆岩层压力(垂向地应力),MPa;
 p_p ——地层孔隙压力(地层压力),MPa。

井壁围岩轴向应力可按广义平面应变条件求得,即:

$$\sigma_z = \sigma'_z - 2\mu(\sigma_x - \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \quad (2.7)$$