

油气直井防斜打快技术

——理论与实践

苏义脑 著

石油工业出版社

Petroleum Industry Press

油气直井防斜打快技术

——理论与实践

苏义脑 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以解决高陡构造的防斜打快为目的,从反思常规防斜技术存在的问题出发,如钟摆组合是以牺牲速度换取质量等,系统介绍了这一领域的技术发展,其中的一些技术,如偏轴组合、柔性组合在生产中起到了明显成效。

本书可供从事油气钻井工程的研究人员、现场技术人员以及有关院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气直井防斜打快技术:理论与实践/苏义脑著.

北京:石油工业出版社,2003.2

ISBN 7-5021-4156-1

I. 油…

II. 苏…

III. 油气钻井-技术

IV. TE242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 003684 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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开本 3 印张 66 千字 印 1—1200

2003 年 2 月北京第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4156-1/TE·2935

定价: 9.00 元

前 言

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。直井存在防斜问题，定向井、大斜度井、水平井、大位移井及丛式井的直井段同样存在防斜问题，而且对井斜有更为严格的限制。大地层倾角尤其是高陡构造，地层造斜性强的直井段，特别是深井，井斜造成的危害十分突出，因此研究防斜技术一直是钻井工程中重要的课题。常规的防斜技术是用满眼钻具加压快钻，但往往效果并不理想，然后再用钟摆钻具吊打纠斜，以牺牲效益换取井身质量。而新防斜技术的发展方向是防斜与打快的统一，是实现好的井身质量与高的经济效益的结合。

本书是作者及其同事们在井斜问题研究与防斜技术开发方面多年来理论与实践的总结。全书共分4章17节。第一章为“绪论”，在对国内外长期以来防斜技术发展历史的回顾并进行再认识的基础上，提出新的防斜技术的研究路线并阐明其发展趋势和方向；第二章“直井防斜与纠斜原理及其定量评价方法”，重点介绍影响井斜的因素和井斜控制原理，提出一种直观评价方法即PF图法，并给出钻头侧向力、钻头倾角和地层力的定量计算方法；第三章“常规防斜纠斜技术及其分析”，重点介绍满眼组合防斜技术和钟摆钻具组合降斜技术的机理、设计计算、组合举例和应用注意事项，并简述了其他几种常规防斜、纠斜技术；第四

章“正在发展中的防斜打快技术”，重点介绍作者及其同事们在探索防斜打快研究方面的技术成果及其应用简况，包括偏轴组合、柔性组合、反钟摆组合、导向钻具组合防斜打快技术，并进一步介绍了国外垂直钻井系统的结构、原理及应用简况，以及作者及同事们在这一方面的研究成果。书末附录给出了计算 BHA 受力变形分析的纵横弯曲法。

本书是在给中国石油天然气股份有限公司钻井监督培训班讲课初稿的基础上经整理而成的。读者对象除现场钻井监督外，还可供从事油气钻井工程的研究人员、现场技术人员，以及有关院校的本科生、研究生阅读和参考。

由于本人水平有限，特别是用于写作此书的时间有限，书中难免会有遗漏甚至错误之处，诚望读者批评指正。

作 者

2002 年 7 月于北京

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 钻直井的突出问题——井斜问题	(1)
一、井斜问题是钻井中普遍存在的、至今尚未解决的问题	(1)
二、井斜的主要危害	(2)
三、对井身质量的要求	(2)
第二节 防斜研究的历史回顾	(3)
一、20 世纪 20 年代	(3)
二、20 世纪 30~40 年代	(3)
三、20 世纪 50 年代	(4)
四、20 世纪 60~80 年代	(6)
第三节 对国内外常规防斜技术的认识与反思	(7)
一、直井防斜纠斜的常规工艺	(7)
二、常规工艺的弊病	(8)
三、原因分析	(8)
第四节 直井防斜技术的发展趋势	(9)
第二章 直井防斜与纠斜原理及其定量评价方法	(10)
第一节 影响井斜的因素分析和力—位移模型	(10)
一、影响井眼轨道的四类主要因素	(10)
二、力—位移模型	(11)
第二节 井斜控制原理分析	(13)
第三节 钻头侧向力和钻头倾角的求法	(14)

第四节 地层力的求法	(18)
一、地层力的定义	(19)
二、地层自然造斜力的求法	(19)
三、临界地层倾角与初始造斜时的钻头趋向问题	(22)
四、地层力 F_f 的计算	(24)
第五节 PF 图——一种直观的评价方法	(25)
一、PF 图的构成	(26)
二、PF 图的功能	(26)
第三章 常规防斜纠斜技术及其分析	(29)
第一节 满眼组合防斜技术	(29)
一、满眼组合防斜机理	(29)
二、满眼组合的设计计算	(30)
三、常用的稳斜钻具组合 (满眼组合)	(32)
四、满眼组合应用注意事项	(32)
第二节 钟摆钻具组合降斜技术	(34)
一、钟摆钻具组合降斜机理	(34)
二、钟摆钻具组合的设计计算	(36)
三、常用的钟摆钻具组合举例	(41)
四、钟摆钻具组合应用注意事项	(42)
第三节 其他防斜纠斜技术	(43)
第四章 正在发展中的防斜打快技术	(44)
第一节 偏轴组合防斜打快技术	(44)
一、系统结构与工作原理	(44)
二、偏轴组合的结构与参数的优化设计	(48)
三、现场应用实例、效果和效益	(50)
第二节 柔性组合防斜打快技术	(62)

一、组合结构	(62)
二、力学性能	(63)
三、实验应用情况	(63)
第三节 导向钻具防斜打快技术	(64)
第四节 反钟摆防斜打快技术	(65)
第五节 自动垂直钻井系统	(67)
一、国外的 VDS、SDD 和 VertiTrak	(67)
二、国内在自动垂直钻井系统方面开展的工作	(67)
附录: BHA 静态小挠度分析的纵横弯曲法简介	(76)
参考文献	(87)

第一章 绪 论

井斜问题是油气钻井生产中一个非常重要的实际问题。特别是高陡构造条件下的突出的井斜问题，不仅造成很低的机械钻速，导致钻井周期长，钻井成本高，而且往往造成井身质量很差，严重时导致中途填井重钻或报废，贻误建井周期，甚至达不到预定的勘探开发的目的。这一点，已为广大的钻井监督及钻井技术人员所共识。所以，重新研究直井的井斜控制问题，不仅在生产实践上，而且在理论上都具有重要意义。

本书在概述井斜控制技术发展过程基础上，从理论和实践方面总结和认识井斜控制的思路和方法，强调防斜和打快的统一性，探讨几种正在发展中的防斜打快钻井技术，以期对解决生产实际问题有所裨益。

第一节 钻直井的突出问题——井斜问题

一、井斜问题是钻井中普遍存在的、至今尚未解决的问题

“井斜”（Deviation）是与井（Well）、钻井工程（Drilling Engineering）与生俱来的技术问题，因此是钻井工程中最古老的“经典问题”。根据现在查到的文献资料，最早是发表于1924年《华盛顿邮报》的“井为什么会斜？”的文章，说明井斜问题已引起当时钻井界的关注。

井斜问题的存在有其普遍性。众所周知，随着直井井深的不断增加，井斜问题愈加突出，危害愈加严重。而且，除直井外，特殊工艺井（定向井、大斜度井、大位移井、水平井和丛式井等）的直井段也都存在井斜与防斜问题，并且对井斜角的限制更为严格和苛刻；特别是在高陡构造、复杂地层中的井斜问题，尤为突出，已形成一个技术“瓶颈”，严重地制约着钻井的质量和效益，必须引起足够的重视来研究和解决。

二、井斜的主要危害

简而言之，井斜会产生如下危害：

(1) 开发井井斜严重会使井眼偏离设计井位，打乱开发井方案；

(2) 探井井斜大会使地质资料失真，甚至错失油气层（对断块小油田尤为突出）；

(3) 引发钻井工程事故（钻柱、套管磨损、破裂折断、卡钻、填井、报废）；

(4) 引发下套管困难，影响固井质量（套管不居中导致窜槽、管外冒油气等）；

(5) 影响采油工作（下封隔器困难、封隔密封不好、抽油杆磨损折断等）。

由于井斜危害的严重性，所以为了克服和限制井斜，人们在长期的生产实践中总结提出了对井身质量的要求并形成相应的技术标准。

三、对井身质量的要求

包括如下三个方面：

(1) 井斜角不能超过许用值；

(2) 井斜变化率（即狗腿严重度）不能超过许用值；

(3) 井底水平位移不能超过许用值。

由于各地区情况不同,对直井井身质量的规定有不同的要求。表1是某油田对生产井井身的质量标准。

此外,对定向井尤其是丛式井组的直井段,对井斜角则有严格的限制(一般要求直井段终点处井斜角在 0.5° 以内)。

表1 某油田对直井(生产井)的质量标准规定

分 类	设计井深 (m)	最大井斜角 ($^{\circ}$)	最大水平位移 (m)	最大井斜角变化率 ($^{\circ}/100\text{m}$)
优质井	2400	3	30	2
合格井	2400	4	50	3
优质井	2800	4	50	3
合格井	2800	5	60	3

第二节 防斜研究的历史回顾

一、20世纪20年代

人们已开始认识到“井斜”问题并探索井斜产生的原因,并研究利用“重力效应”来降低井斜。例如:1924年,《华盛顿邮报》发表了题为“井为什么会斜?”的文章;1928年,在国际钻井界首例使用稳定器;1929年,H.H.Jone发表文章“如何钻直油井或利用重力钻直油井?”(OGJ.May, 1929),首先提出利用钻铤重量来减小井斜角。

二、20世纪30~40年代

人们开始深入的从钻具组合的受力变形上去分析产生

井斜的原因，并探讨控制井斜的方法。例如：1930年，M. Capelushnikov在论文“在钻进中井眼为什么会弯曲？”中，用梁的弹性弯曲研究井斜问题。1936年，L. V. W. Clark在论文“直井和定向井技术的理论研究”中，把钻柱分为四种状态（静态、螺旋失稳态、压弯态和常态），指出只有使用稳定器才能收到可靠的稳定效果。1941年，F. A. Willers发表论文“重力杆件的纵力弯曲”，其基本思想接近 A. Lubinski 在 1950 年提出的在国际钻井界造成重大影响的直井钻柱模型。

以上表明人们已开始尝试从钻具结构上去分析影响井斜的因素并加以控制。

三、20 世纪 50 年代

这是井斜控制与 BHA 受力变形研究最活跃的时期，以 A. Lubinski 为代表，仅美国发表的有关文章至少有 54 篇之多，研究结果被制成图表在生产中应用。

1950 年，A. Lubinski 发表“A Study of the Buckling of Rotary Drilling String”（DPP, 1950）即“旋转钻柱的弯曲研究”一文，比较全面、系统地研究了直井中钻柱的受力变形和多次弯曲问题（图 1-1），得出一个三阶微分方程和七方面应用，指出钻头偏转角（Tilt angle of Bit）是影响井斜的主要原因，指出钻压不应加在 1~2 次弯曲临界值之间的结论。A. Lubinski 的这一理论模型和重要结论如图 1-2 所示，即把钻柱视为一个位于铅直轴线上、两端铰支（钻头和井口）的细长压杆受自重和钻压纵向作用会产生失稳；钻压 P_B 、钻头倾角 A_t 与一次临界钻压 $(P_B)_I$ 、二次临界钻压 $(P_B)_{II}$ 的关系为：

(1) $P_B < (P_B)_I$ ，直线稳定状态， $A_t = 0$ ；

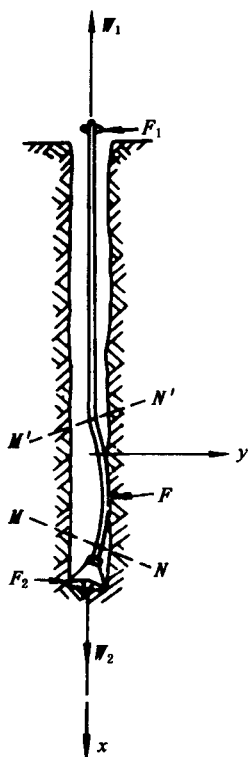
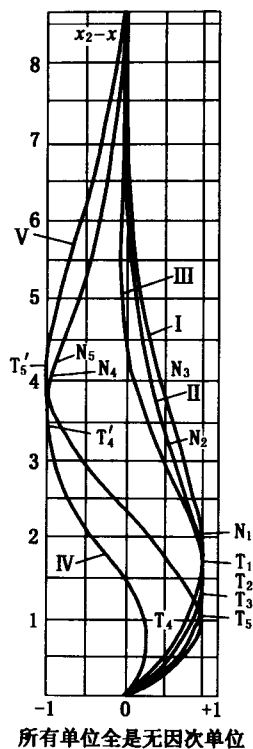


图 1-1 钻柱上作用的外力



所有单位全是无因次单位

图 1-2 钻柱弯曲的曲线形状

- (2) $P_B = (P_B)_I$, 发生一次弯曲, $A_t \uparrow$;
- (3) $P_B > (P_B)_I$, 一次弯曲加大, $A_t \uparrow \rightarrow (A_t)_{\max}$;
- (4) $P_B = (P_B)_{II}$, 发生二次弯曲, $A_t \downarrow$ 。

其实上述结论并不正确。问题在于任何直井都会有井斜, 钻柱会因重力的横向分力作用躺在下井壁上。力学模

型不应是两端铰支直杆的纵向弯曲，而是受压梁柱的纵横弯曲问题。因此，A.Lubinski 于 1955 年修正了他的研究结果，提出了新的受力方程。但是，这些结论对我国钻井界造成了长期的影响。

四、20 世纪 60~80 年代

人们开始较多地从地层因素方面寻找井斜产生的原因，国内外提出了地层造斜的定性理论和定量理论，如：

(1) 小型造斜器理论 (H.M.Rollins, 图 1-3)；

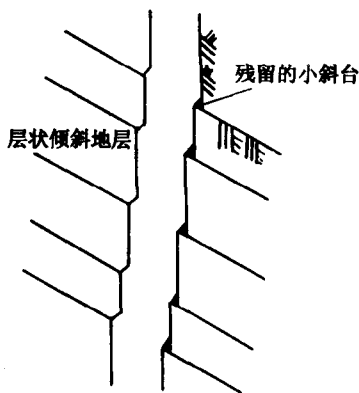


图 1-3 小型造斜器理论示意图

- (2) 地层可钻性理论 (Sultanov, Shandalov, 图 1-4)；
- (3) 钻柱力矩理论；
- (4) 扩眼作用与钻头偏移理论；
- (5) 优先碎屑地层理论；
- (6) McIlmore - Bradley 偏斜力理论；
- (7) 各向异性塑性理论；

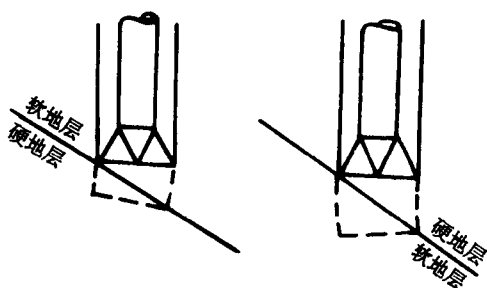


图 1-4 地层可钻性理论示意图

(8) Lubinski, Woods 各向异性地层理论;

以上罗列了国外在 BHA 和地层方面对井斜影响的研究情况。国内自 1977—1988 年间也开展了大量的研究工作。可进一步参考《井斜控制理论与实践》一书（白家祉，苏义脑著，1990）。

第三节 对国内外常规防斜技术的认识与反思

虽然对直井的防斜问题研究了几十年，取得了不少的技术成果，而且国外从 20 世纪 60 年代开始已把研究对象转变为如何造斜（定向井、水平井、大位移井），但直井的防斜问题并没有根本解决。特别是 90 年代初期我国开始开发塔里木油气田，高陡构造深井的井斜问题非常突出，再度引起了人们关注这一“经典”问题。

一、直井防斜纠斜的常规工艺

1. 防斜——满眼组合

用满眼组合“重压快钻”，以满保直。

2. 纠斜——钟摆组合

用钟摆组合“轻压吊打”，以慢纠斜。

二、常规工艺的弊病

常规工艺在一定范围内有效，但在高陡构造下，以及造斜性强的地层中效果很差，进尺很慢。其弊病是：

- (1) 钻压 + 高成本 → 小井斜（指标）；
- (2) 用牺牲钻速来换取井身质量；
- (3) 把井身质量和经济效益对立起来。

三、原因分析

造成常规工艺不能很好地控制井斜的根本原因有如下两条：

- (1) 钻具组合内在的力学性质；
- (2) 高陡构造引发的地层造斜力。

具体而言就是：满眼组合对稳定器特别是近钻头稳定器的位置和外径尺寸限制极严，如果在钻井过程中近钻头稳定器因磨损导致外径缩小超标，则会引力学性质变化而产生增斜力，而且满眼钻具的工作钻压大（有利于打快），但大钻压会引发大的地层造斜力导致井斜。作为纠斜工具的钟摆钻具，工作钻压范围很小，只能轻压吊打；若增大钻压，钟摆钻具的降斜力会减小甚至变成造斜力，同时大钻压又引发地层造斜力。另外，高陡构造条件下很大的地层造斜力也足以抵消其降斜力而保持增斜。对满眼钻具、钟摆钻具和地层造斜力的定量分析与说明将在本书第二章作进一步讨论。

第四节 直井防斜技术的发展趋势

如上所述,常规的防斜纠斜工艺已不能满足生产特别是高陡构造防斜打快的需要。由此可形成如下几条认识:①探讨新的防斜技术已是当务之急;②新防斜技术的目标就是优质与高效的统一;③新防斜技术的特征是——防斜打快;④发展防斜技术的技术路线——改变工艺方法,用手段解决问题。

以下重点讨论新的防斜技术的技术路线,即如何改变工艺方法和用手段解决问题。即:

(1) 地层(工作对象)是不可变更的,只能用新工艺和新工具去适应地层。

(2) 打快的途径可有3个:①加大钻压;②提高转速;③把纠斜时间用于正常钻进(即 a 不超标)。

(3) 防斜(纠斜)的途径有2个:①提高工具的稳斜、抗斜能力—开发新工具;②改变工艺方法—用适时的纠斜控制井斜。

上述的这些技术途径,只要在其中的任一方面作出改进和突破,都能形成新的技术方法。本书中介绍的有关防斜打快的新技术,都是这些改进和突破的一个方面或几个方面的具体体现或综合反映。