

钻井工程进展

第一册

[美] A. 鲁宾斯基 著

黎孔昭 严世才 等译

朱千里 李邦达 等校

石油工业出版社

大学(北京)

2

18-1

登录号	126744
分类号	TE2
种次号	018-1

钻井工程进展

第一册

〔美〕A.鲁宾斯基 著
黎孔昭 严世才 等译
朱千里 李邦达 等校



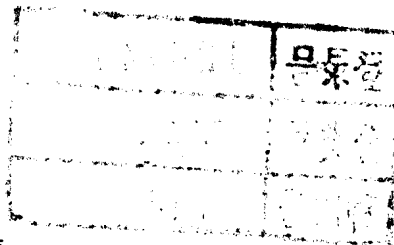
5072/04



石油0122103

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号



内 容 提 要

本书详细地讨论了旋转钻柱的纵向弯曲、张力和压力对油井中管材平直和纵弯曲的影响、抽油井油管弯曲及其影响和控制方法、旋转钻井井眼中影响井斜角和产生狗腿的诸因素、如何使用扶正器来控制井斜和底部钻具性能预测。

本书可供钻井专业的科研人员和大专院校的本科生及研究生参考,也可供机械与民用工程师参考。

钻 井 工 程 进 展

第一册

〔美〕A.鲁宾斯基 著

黎孔昭 严世才 等译

朱千里 李邦达 等校

*

石油工业出版社出版发行

(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 16开本印张 19¹/₄ 475千字 印 1—2,000

1994年5月北京第1版 1994年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-1148-4/TE·1058

定价: 16.80元

译 者 的 话

本书所述是目前世界上最权威的钻具经典理论，对科研、教学与现场来说都不失为良师益友。其中的某些章节可以作为大学高年级学生及研究生的教材。由于本书的内容范围广泛，题目繁多，所以对于钻井机械及有关行业来说，某些篇章也具有宝贵的参考价值。

本书是在大庆石油管理局严世才副局长的关怀和大庆石油管理局钻井工艺研究所何新民所长的支持下完成的，在此表示感谢。另外，参加此书翻译的还有马琳、徐淑珍、彭煜和李忠伟等四位同志。由于译者水平有限，翻译中难免有错误之处，请读者批评指正。

序 言

虽然鲁宾斯基先生及其合作者以前所著许多论文举世闻名，而这些文章的实践和理论的实用性已有充分的记录，但这些材料从来都未汇集成一套完整的著作。这是首次专门收集鲁宾斯基著作的两卷本。其著作的某些编纂物曾以俄文和中文出版，然而那些出版物都远非完整的版本。

本卷分为两篇，再依次分成四章和六章。第一篇涉及油井管材和稳定性，而第二篇则与井斜的控制有关。各章的标题恰好与文章中心内容相同。各章的顺序未按论文发表的时间来安排；而是将相似的理论概念及其实际应用编汇在一起。

尽管读者能从本书中迅速找到他所需要资料的方法有多种，然而我的劝告是在开始任一章之前，先仔细阅读第一篇的第一章。从第一章所获得的知识在学习第二篇时也很有用。在第一章中所介绍的术语和单位，除几个例外均运用于全书。

通常每章包含一个简短的编注，引言，对问题定性和定量的描述，获得的结果，参考目录和附录。强调内容明了和准确。这些附录包括对有关问题的数学分析。这样实际问题的连续性未遭间断，同时数学工具也容易奏效。

在几个实例中编入了最新发展的成果。第四、第五和第六章包括计算机程序，以助读者完成实际计算。

本书要求读者具有静力学、材料强度、计算和常微分方程的基础知识。这就要求懂得附录中的某些推导。总之良好的普通教育和足够的现场经验应当足以理解对这些问题的定性说明。最终的结论常常以易于应用的形式呈现。

我确信本书对读者了解鲁宾斯基先生的论文原著及其同事们过去对那些问题的研究均有所助。

Stefan Miska

目 录

第一篇 管材的稳定性	(1)
第一章 旋转钻柱纵向弯曲的研究	(1)
第一节 摘要.....	(1)
第二节 引言.....	(1)
第三节 临界条件.....	(2)
第四节 靠在井架指梁内立根的临界长度.....	(5)
第五节 纵弯曲钻柱的形状.....	(5)
第六节 弯曲的钻柱对井壁作用的力.....	(9)
第七节 弯矩和应力.....	(11)
第八节 钻头的倾斜和钻头上的力.....	(14)
第九节 纵弯曲曲线的长度.....	(16)
第十节 离心力.....	(17)
第十一节 静液压力对纵弯曲的影响.....	(18)
第十二节 结论.....	(18)
附录.....	(19)
第二章 张力和压力对油井中管材平直和纵弯曲的影响	(44)
第一节 摘要.....	(44)
第二节 引言.....	(44)
第三节 定性的探讨.....	(45)
第四节 两端固定的管子定量计算结果.....	(49)
第五节 精确的定量方法.....	(57)
第六节 结论.....	(63)
附录.....	(64)
第三章 抽油井油管弯曲及其影响和控制方法	(82)
第一节 摘要.....	(82)
第二节 引言.....	(82)
第三节 程序.....	(83)
第四节 讨论和结果.....	(83)
第五节 结论.....	(97)
附录.....	(97)
第四章 密封于封隔器中的油管底螺旋弯曲	(104)
第一节 摘要.....	(104)
第二节 引言.....	(104)
第三节 现场应用.....	(105)
第四节 螺旋弯曲.....	(105)

第五节	允许油管自由移动的封隔器	(107)
第六节	全部实例中使用的数据	(108)
第七节	例 4-1: 允许自由移动的封隔器	(109)
第八节	允许有限移动的封隔器	(111)
第九节	例 4-2: 允许有限移动的封隔器	(111)
第十节	并不允许油管移动的封隔器	(112)
第十一节	例 4-3: 不允许油管移动的封隔器	(114)
第十二节	环空压力超过油管内压力的情况	(116)
第十三节	永久“螺旋变形”	(116)
第十四节	例 4-4: 永久螺旋变形	(117)
第十五节	初始压力 $p_i \neq p_0$ 的情况	(118)
第十六节	中和点在管柱上方的情况	(118)
第十七节	复合管柱	(119)
第十八节	若干假设	(120)
第十九节	符号说明	(121)
附录 A		(122)
附录 B	斜井中的弯曲	(134)
附录 C	确定封隔器对油管作用力的分析技术	(135)
附录 D	计算机程序	(136)
第二篇	井斜控制	(140)
第五章	旋转钻井井眼中影响井斜角和产生狗腿的诸因素	(140)
第一节	摘要	(140)
第二节	引言	(140)
第三节	钻头上力的方向	(141)
第四节	各向同性地层的井斜	(142)
第五节	钻进各向异性指数	(144)
第六节	各向异性水平地层的井斜	(145)
第七节	各向异性倾斜地层中的井斜	(145)
第八节	狗腿	(150)
第九节	螺旋弯曲	(153)
第十节	有关未来研究的建议	(153)
第十一节	结论	(153)
附录 A		(154)
附录 B	大井斜用的幂级数法概述	(170)
附录 C		(171)
附录 D	大井斜 (图 5-28) 迭代法的概述	(173)
第六章	为解答井斜问题的实用图表	(175)
第一节	摘要	(175)
第二节	引言	(176)
第三节	曲线的讨论	(176)

第四节	最经济的钻铤和井眼尺寸	(182)
第五节	未来的探索	(185)
第六节	结论	(186)
第七节	附录	(186)
第八节	讨论	(188)
第七章	使用扶正器以控制井斜	(193)
第一节	摘要	(193)
第二节	引言	(193)
第三节	结论	(205)
附录 A		(206)
附录 B	Stefan Miska 来稿	(213)
第八章	在弯曲地层钻井中倾角资料的用途	(221)
第一节	摘要	(221)
第二节	引言	(221)
第三节	具有大倾角弯曲度的假说	(225)
第四节	总评论	(227)
第五节	结论	(227)
第九章	旋转钻井中最大允许狗腿	(229)
第一节	摘要	(229)
第二节	引言	(229)
第三节	钻杆的疲劳破坏	(230)
第四节	作用在钻杆接头上的力	(238)
第五节	钻铤接头的疲劳破坏	(240)
第六节	角的最大允许变化值	(244)
第七节	狗腿引起的游梁式抽油泵事故	(246)
第八节	测量距离	(246)
第九节	方法的缺点	(247)
第十节	结论和建议	(247)
附录 A		(248)
附录 B		(260)
附录 C		(264)
第十章	底部钻具组合性能预测	(265)
第一节	摘要	(265)
第二节	引言	(265)
第三节	钻头—地层间的相互作用	(265)
第四节	参量	(266)
第五节	参量研究	(266)
附录 A		(278)
附录 B		(289)

第一篇 管材的稳定性

第一章 旋转钻柱纵向弯曲的研究

本文在美国石油学会钻井和采油实践年刊 1950 年卷上曾发表过，它是首次用两维方法在垂直井眼内严格分析钻铤的稳定性问题。由于是第一次，很有说服力并逻辑地证明了浮力不能使钻铤或钻杆弯曲。尽管如此，在当前的文献中对此问题仍有争论。浮力是一种表面力或是一种体积力？浮力是一种表面力，但从纵向弯曲、弯曲度或对确定所需钻铤长度的观点看，一切发生在好像无液体存在，而且好像钻铤的重量乘以浮力系数。普遍已公认此工作开创了个别钻井和采油问题的正确分析处理。本文虽然置于第一部分的第一章，也能认为是对第二部分的引言。同样的术语，无因次单位和分析的方法也用于第二部分。

第一节 摘 要

将弹性稳定的理论用于钻柱，并研究发生纵向弯曲的临界条件。在发生纵向弯曲点的位置管子于井壁相切，并确定管子接触井壁的力。同时计算各最大应力点的位置和这些应力的数值。研究钻头的倾斜和钻头上的力，给出预防纵向弯曲并将其影响限制到最小的办法。实质上，这些办法含有适当的钻压和（或者）特殊钻井方法的使用。

第二节 引 言

钻柱的疲劳和损坏已成为众多研究的主题，但是，作者尽最大努力已着手用不很精确的方法探讨此问题。为了使研究的结论对那些用数学推导不感兴趣的读者易懂，将有关方程的推导列入了附录。

没有钻压，如果井眼垂直，则钻柱也是垂直的，当所用钻压足够小，则钻柱仍保持垂直。当钻压增加达到所谓临界钻压值时，钻柱的垂直形态不再稳定，此时钻柱产生纵向弯曲并与井壁在预定的切点相接触。如果钻压继续增大，达到一个新的临界值，此时钻柱第二次纵向弯曲，这称为第二次纵向弯曲。随着更高的钻压产生第三次纵向弯曲乃至多次纵向弯曲。

如果在切点钻柱与井壁摩擦，则足以引起地层的坍塌。当压弯的钻杆与井壁之间的力增加时，摩擦作用变得更厉害。当压弯的钻柱转动时，发生了某些交变应力。这些应力随着井眼直径的增加而增加，并导致钻柱的疲劳损坏。

一旦钻柱在垂直的井眼内纵向弯曲，则钻头不再垂直，而一个理想的垂直井眼就不能钻

成。

本论文研究试图寻找回答下述问题的答案:

- ①在钻柱发生纵向弯曲时钻压的临界值是多少?
- ②纵向弯曲钻柱的形状是什么样的?
- ③切点及最大疲劳应力发生的位置在何处?
- ④压弯的钻杆和井壁之间力的大小是多少?
- ⑤在什么情况下应力在一个弯曲钻柱内过大?
- ⑥钻头的倾斜角和钻头上所受的力有多大?
- ⑦怎样才能避免纵向弯曲? 或最终当用压弯的钻柱钻进时, 怎样才能使有害的影响在钻进中降至最低?

第三节 临界条件

钻柱中某一特定的点, 通常称为“中和点”。在本研究中对中和点的定义如下: 中和点以下这部分钻柱在钻井液中的重量等于钻压^①。每个钻压的数值相当于钻头与中和点之间的一段距离的数值。此距离的临界值取决于钻杆或钻铤的类型以及钻井液的密度。不用英尺度量深度, 而用与钻杆、钻铤类型及钻井液无关的无因次单位去获得答案, 显然很方便。

研究发现第一次和第二次弯曲中和点各自发生在位于钻头上^②1.94 和 3.75 无因次单位的位置。对一个无因次单位以 ft 表示的长度, 可用以下表达式求出:

$$m = \sqrt[3]{\frac{EI}{P}} \quad (1-1)$$

式中 E ——钢的杨式模数, lb^③/ft^④;

$$E = 29 (10^6 \text{ lb} / \text{in}^2) = 4176 (10^6 \text{ lb} / \text{ft}^2);$$

I ——钻杆横断面的转动惯量, ft⁴;

m ——一个无因次单位的长度, ft, 各类钻杆和钻铤, m 的数值标绘在图 1-1 上;

P ——钻柱每单位长度在钻井液中的重量, lb/ft。

考虑到钻具接头的重量, 钻杆每 ft 的重量必须增加。钻具接头的重量是假定平均分布在 30ft 长单根钻杆, 相当于一个无因次单位钻柱长度的重量, 以 lb 为单位表示时等于:

$$mp = \sqrt[3]{ETP^2} \quad (1-2)$$

为求得对各类钻杆和钻铤第一次弯曲的临界钻压, 用 mp 的数值乘 1.94 即可得到, 并

①见附录, 该点与既不存在压缩也不存在拉伸的那一点不相同, 因为这一点受到静液压力和泵压。

②事实上, 仅第一次纵向弯曲是处于两维状态。另一方面, 更高次的纵向弯曲在本文中做为三维而不是两维来处理。尽管如此, 第二次纵向弯曲条件做为两维数学处理, 总体上是正确的。

③11b = 0.454kg。

④1ft = 30.48cm。

标绘于图 1-2。第二次弯曲的临界钻压可用图 1-2 的读值乘以 $3.75 / 1.94 = 1.934$ 即可得到。从这些图中可得出下述结论:

① 钻柱包括钻杆, 仅用很小钻压即压弯。 $4\frac{1}{2}$ in 钻杆能竖放不弯曲的重量不超过 1400lb, 在 3000lb 已弯曲二次。

② 唯有钻铤柱能承受比钻杆更大的钻压而不弯曲, 然而, 有时认为钻铤不会压弯是错误的。在正常钻井条件下, 一般钻铤至少弯曲 1 次, 有时 2 次或 3 次。对 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤, 第一次弯曲的临界钻压在 7700~8700lb 之间, 而第二次弯曲的临界钻压在 15000~17000lb 之间。更高次弯曲尚未计算, 但预料第三次弯曲会发生在临界钻压小于 26000lb 的情况下。

③ 钻井液密度较大, 临界钻压较小。然而钻井液密度对纵向弯曲的影响无重要意义。

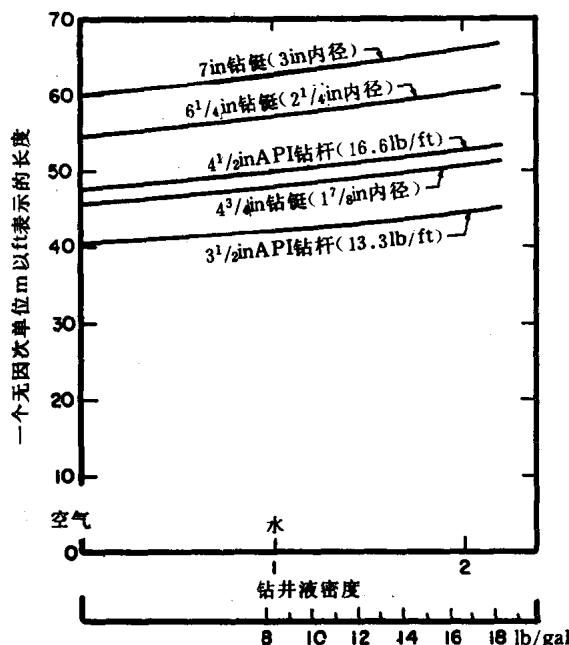


图 1-1 一个无因次单位以 ft 表示的长度

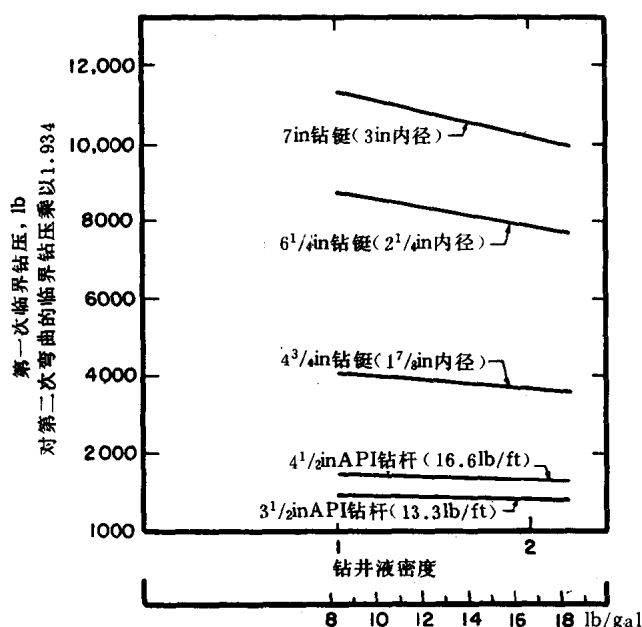


图 1-2 第一次临界钻压

图 1-4 和图 1-5 分别为 $4\frac{1}{2}$ in 16.6lb / ft API 钻杆用 7in 钻铤, 以及 $3\frac{1}{2}$ in 13.3lb / ft API 钻杆用 $4\frac{3}{4}$ in 钻铤。

图 1-3 说明 $4\frac{1}{2}$ in, 16.6lb / ft API 钻杆和 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤组成的钻柱弯曲的一般情况。标绘的钻压对应 30ft 钻铤。线 1、线 2 和线 3 各自对应于第 1 次、第 2 次和第 3 次临界钻压。位于线 1 下的点附合下列任一条件, 例如设有钻铤及 1000lb 钻压或 3 根钻铤及 6000lb 钻压, 钻柱是垂直的。位于线 1 和线 2 之间的点附合下列任一条件, 例如 3 根钻铤及 8000lb 钻压或 9 根钻铤及 14000lb 钻压, 钻柱弯曲 1 次。位于线 2 和线 3 之间的点附合下列任一条件, 例如 3 根钻铤及 9000lb 钻压或 12 根钻铤及 22000lb 钻压, 钻柱弯曲 2 次。尚未用数学方法计算第 3 次弯曲。线 3 附合于第 3 次弯曲, 仅是近似的, 因而不完全正确。

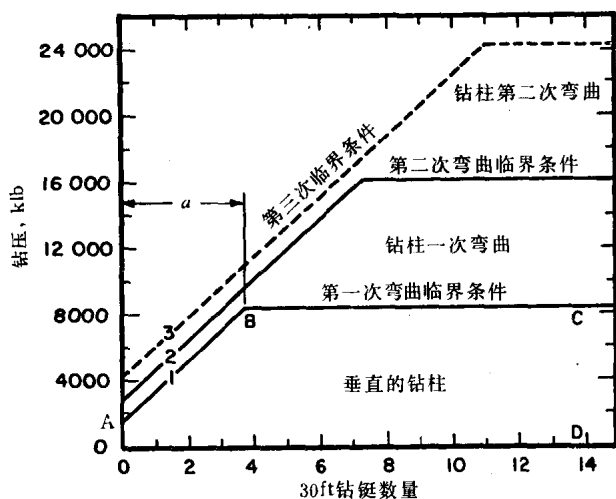


图 1-3 适合于 $4\frac{1}{2}$ in 16.6 lb / ft API 钻杆和 $6\frac{1}{4}$ in (内径 $2\frac{1}{4}$ in) 钻铤, 在 12 lb / gal ① 钻井液中的弯曲条件

钻一个垂直的井眼或为了避免地层塌陷而需特别谨慎时。

②分析方程 (1-2) 可以看出, 借助增大 E , I 或 p 的办法, 可增大临界钻压值。显然, 不用钢而另选其它材料的办法来改变杨式模数 E 是不可能的。然而选用较大钻铤, 转动惯量 I 和每 ft 重量 p 二者都增大。临界钻压与对应的钻铤外径可用方程 (1-2) 计算, 并且标绘在图 1-6 中, 该图表明钻铤尺寸增加少许, 临界钻压就可增大很多。结果所用钻头尺寸不变, 依靠使用较大钻铤的办法, 能得到得重大改善。换句话说, 它是依靠了减少钻铤和井眼之间间隙的办法。使用较大钻铤并保持惯用的间隙, 就需要钻一个更大的井眼, 并可用更大的钻压。在以后的事例中可以获得对这种改善的估价。每平方英寸井眼临界钻压的曲线也已标绘在

图 1-3、1-4 和 1-5 中的线 1、线 2 和线 3 附合于临界条件在密度为 12 lb / gal 的钻井液中。除在重钻井液用重型钻铤的情况外, 钻井液密度的影响可忽略。可用图 1-2 进行校正。例如对 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤在 16 lb / gal 钻井液中, 图 1-2 显示图 1-3 中曲线 1 的水平部分应当向下移位从 8400 lb 至 8000 lb 的位置。

让我们分析为避免钻柱弯曲可能考虑的所有方法, 即使其中某些方法目前尚不能应用于实践。

①最简单的办法是使所用钻压小于第一次弯曲的临界钻压。例如用 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤钻进而钻压仅保持在 8000 lb。不幸的是该钻压太小以致不能经济地钻大多数地层。然而, 在某些情况下应当用此办法, 尤其是为了

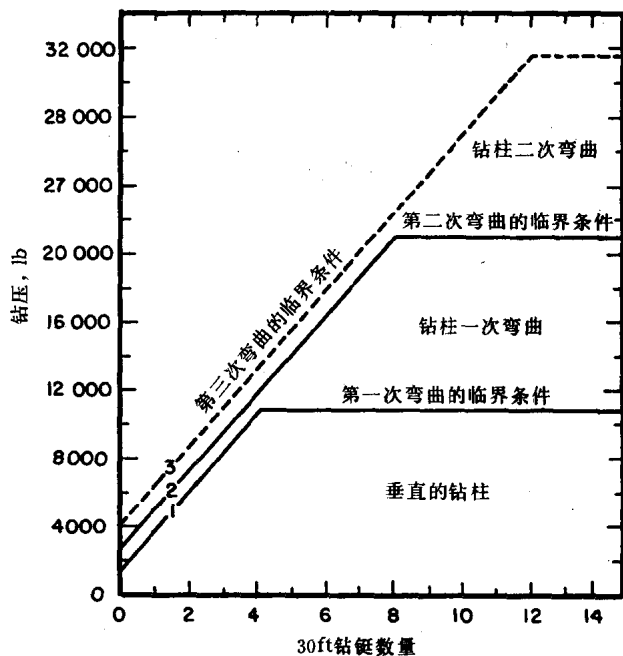


图 1-4 适合 $4\frac{1}{2}$ in、16.6 lb / ft API 钻杆和 7 in (内径 3 in) 钻铤组合的钻柱, 在 12 lb / gal 钻井液中的弯曲条件

① 1 gal (英) = 4.546 L.

图 1-6 中, 检查这两条曲线可以看到, 为了得到 100% 的改善, 如果钻头尺寸不变, 则 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤必须改用 $8\frac{1}{8}$ in 钻铤, 如果间隙不变则需用 $11\frac{3}{8}$ in 钻铤及 $14\frac{1}{8}$ in 的井眼。显然最后一种解决办法遇到了实际困难。在图 1-6 中, $6\frac{1}{4}$ in 钻铤内径计算为 $2\frac{1}{4}$ in。对较大钻铤, 其内径也假定与外径成比例变化。

③ 旋转钻井中某些新方法比常规方法要求较小的钻压。钻进中所用钻压可以小于第 1 次弯曲的临界钻压。这已为冲击旋转钻井方法所实现, 在新近的文章中有报导。冲旋钻井方法的发展原本是为用于很坚硬的地层, 但作者也建议将它使用于一般易发生井眼弯曲的地方。用此方法所钻井眼的直线性以及也需用金刚石钻头钻进, 无疑归因于钻柱不弯曲这个事实。

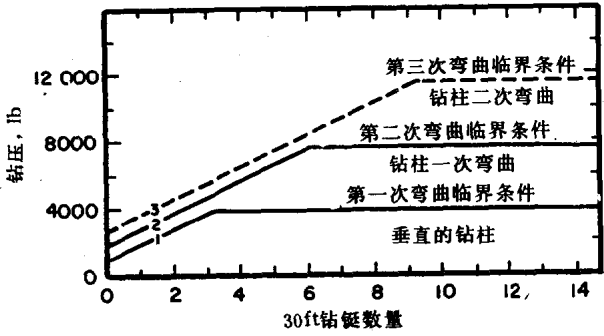


图 1-5 适合于 $3\frac{1}{2}$ in、13.3lb/ft API 钻杆和 $4\frac{3}{4}$ in (内径 $1\frac{7}{8}$ in) 钻铤的组合
钻柱在 12lb/gal 钻井液中的弯曲条件

第四节 靠在井架指梁内立根的临界长度

垂直堆立在井架指梁内, 并在靠近其顶部地方支撑着的钻杆或钻铤立根的临界长度等于 2.65 无因次单位 (见图 1-1)。即等于:

- 107ft 用于 $3\frac{1}{2}$ in 13.3lb/ft API 钻杆
- 127ft 用于 $4\frac{1}{2}$ in 16.6lb/ft API 钻杆
- 122ft 用于 $4\frac{3}{4}$ in ($1\frac{7}{8}$ in 内径) 钻铤
- 144ft 用于 $6\frac{1}{4}$ in ($2\frac{1}{4}$ in 内径) 钻铤
- 150ft 用于 7in (3in 内径) 钻铤

能堆立在井架梁内钻杆立根的最大长度实际符合于原来的三倍。更长的立根必须在靠近中间的地方支撑。

第五节 纵弯曲

钻柱的形状

在这一节, 我们将考虑当钻压从零增大到某一较高数值时, 钻柱的形状变化如何。

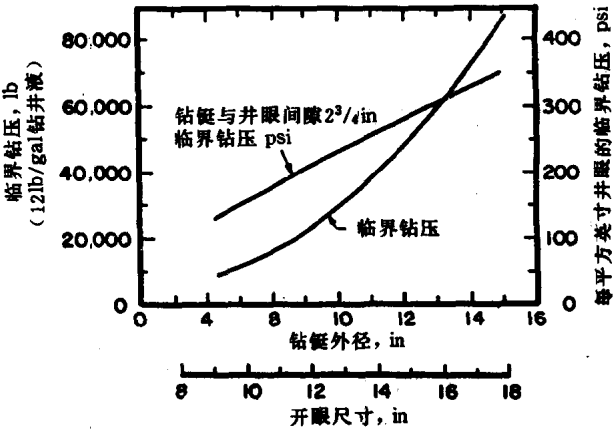


图 1-6 钻铤尺寸对弯曲的影响

当钻压小于临界值时钻柱保持垂直。在临界数值弯曲钻柱的形状表示于图 1-7 和图 1-8 中。曲线 (1) 两边的数字代表钻柱

的轴线。O 点是底端或钻头。垂直距离以无因次单位量度。一个无因次单位的长度已在图 1-1 中给出。从一类钻柱到另外一类钻柱，该长度变化不很明显，通常在 40 至 65ft 之间。因此对任一次弯曲，不管底部是钻杆柱或钻铤柱，其弯曲的形状非常相似。然而，就钻杆来说这种形状与钻铤在这种情况下比，相当于承受很小的钻压（图 1-2）。

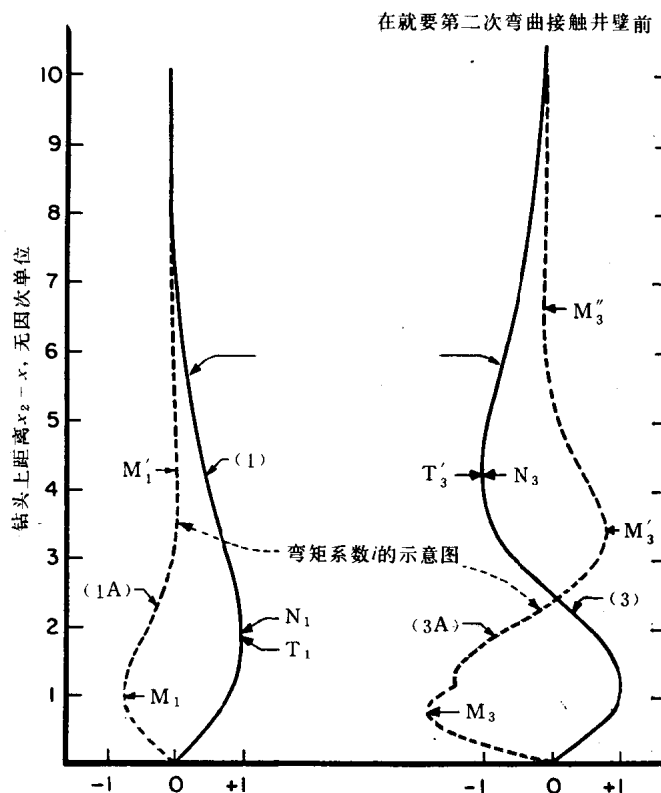


图 1-7 纵弯曲曲线的形状和弯矩系数 i

再参考图 1-8， N_1 表示中和点的位置（钻头上 1.94 无因次单位）。 T_1 表示切点。

当钻压在一次临界值和二次临界值之间增加时，弯曲钻柱的形状在图 1-8 中曲线 (1) 和曲线 (2) 之间逐渐变化。后一条曲线（中和点 N_2 及切点 T_2 ）相当于二次弯曲的临界条件。比较图 1-8 中的曲线 (1) 和曲线 (2) 可看出：位于靠近钻头的管柱部分弯曲的越来越多，而位于切点之上的部分逐渐变直。

当钻压增加超过第二次临界值时出现钻柱的第二次弯曲，而且钻压增加一点，弯曲迅速增大。图 1-7 和图 1-8 中的曲线 (3) 表示当二次弯曲在 T_3 接触井壁时，在这瞬间钻柱的形状。

弯曲曲线形状的变化也可在图 1-9 中见到，在该图中横坐标代表钻头与中和点之间的距离，为无因次单位，它与钻压成正比。为了帮助想象，在顶部绘出另一个比例的横坐标，它表示钻压在用 $6\frac{1}{4}$ in 外径， $2\frac{1}{4}$ in 内径钻铤，密度为 12lb/gal 的钻井液中的特定情况。实践表示钻头和最低切点之间的距离，两个纵坐标与此特性曲线一致，一个为无因次单位，而另一个以 ft 为单位适合 $6\frac{1}{4}$ in 钻铤的特定情况。也可能希望确定切点与有关中和点

的相对位置。为此目的，在图 1-9 上与纵坐标轴成 45° 倾斜绘出一虚直线。在该线上任何一点的纵坐标均表示从钻头至中和点的距离，而在实线和虚线之间的垂直距离，代表切点和中和点之间的距离。

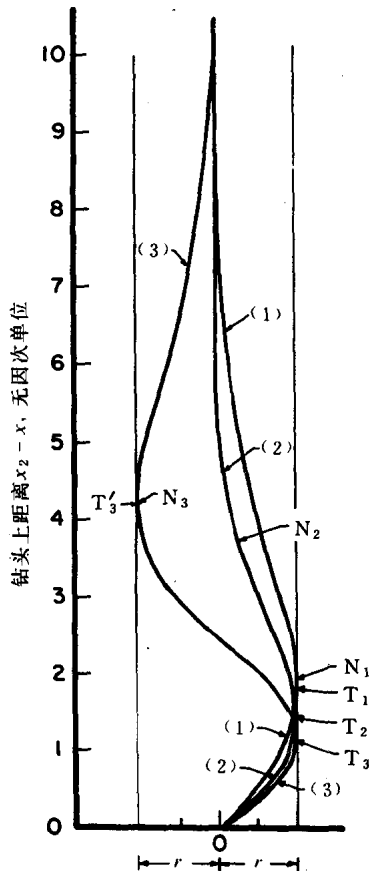


图 1-8 弯曲曲线的形状

- (1) 第一次临界；(2) 第二次临界；
(3) 第三次弯曲即将接触井壁前；
 r 是井眼的半径，即最大可能的变位

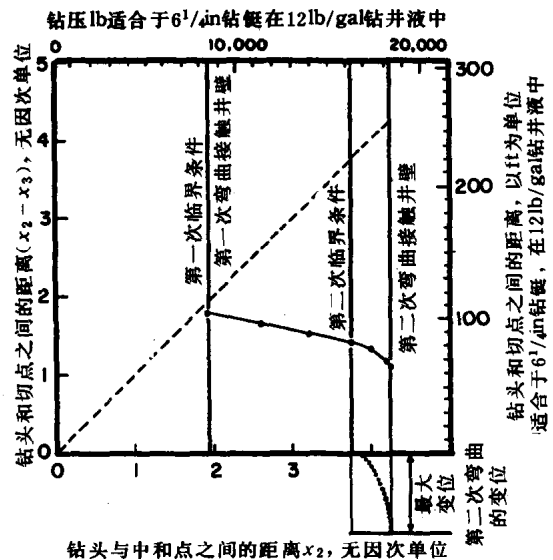


图 1-9 第一次切点的位置及
第二次弯曲的变位

观察这两条线可得出下述结论：

① 钻压等于第一次临界值 (1.94 无因次单位, 8400)● 时，切点 T_1 位于 1.8 无因次单位或钻头上 104ft，即稍微低些但接近于中和点 N_1 ，中和点位于 1.94 无因次单位或钻头上 113ft。

② 在第一次和第二次临界值之间钻压增加时，切点位置稍微下移，而此时中和点位置大幅度上移。切点位置从钻头上 1.8 无因次单位 (104ft) 逐渐下降到钻头上 1.41 无因次单位

● 在此情况及以下文章中，无因次单位值通用；而那些以 lb 或 ft 为单位是属于用 $6\frac{1}{4}$ in 外径， $2\frac{1}{4}$ in 内径钻铤，在密度 12lb/gal 钻井液中的特例。

(82ft)。而同时，中和点位置从钻头上 1.94 无因次单位 (113ft) 上升到钻头上 3.75 无因次单位 (219ft)。切点与中和点之间的距离从 0.14 无因次单位 (8ft) 增加到 2.34 无因次单位 (137ft)。

③当钻压在第二次临界值和第二次弯曲接触到井壁之间增加时，切点向下移动变得更快。即当钻压从 3.75 无因次单位 (16200lb) 增加至 4.22 无因次单位 (18300lb) 时。对于这样小的钻压增加，切点从钻头 T_2 位置 (1.41 无因次单位, 82ft)，降至 T_3 (1.12 无因次单位, 65ft)。

该虚曲线 (图 1-9 右下角) 表示当钻压增加到第二次临界值以上时，第二次弯曲的挠度。如前所述，第二次弯曲增长很快。

图 1-7 和图 1-8 中的曲线 (3) 显示二次弯曲在位于钻头上 4.2 无因次单位 (245ft) 的点 T_3 处与井壁接触，即往下非常接近位于钻头上 4.22 无因次单位 (246ft) 的中和点 N_3 。

图 1-7 和图 1-8 中的曲线 (3) 相当于本研究中试验的最高钻压值。对更高次的纵向弯曲，最强的弯曲变形很可能在中和点与井壁接触，而且当钻压增加时，在中和点迅速上移的同时，切点轻微向下移动。也就是说，似乎逻辑上假定：钻压增加，改变与井壁接触处最强的弯曲变形，反之弯曲的形状在切点以下变化不很大。

当在硬地层下有软而易坍塌的页岩层中钻进时，有关切点位置的知识可能有用。假定那样，在易坍塌的页岩中，为了避免坍塌，所用钻压小于第一次弯曲的临界值。已经钻到硬地层后 (这需用较大钻压)，如果仍需避免坍塌，钻压不能立刻增加。因为如果这样做，钻柱的弯曲部位将接触到坍塌页岩的上部。钻压增加前应当钻入硬地层 1.5 无因次单位或 87ft。在那时为了使切点落在硬地层内，应当立刻而不是逐渐增加钻压。图 1-9 显示：只要钻压比第一次临界值大很少一点，切点将落在钻头上 1.8 无因次单位 (104ft)，即在坍塌的页岩层内。

另一方面，如果钻压近似等于第二次临界值 (3.75 无因次单位或 16200lb)，则切点将落在 1.41 无因次单位 (82ft)，或在硬的非坍塌地层内。因此，为了保持第二次弯曲接触脱离易坍塌页岩上部，钻进中使用的钻压应当在钻头与中和点之间大约 3.75 无因次单位 (16200lb)，但不大于 4.22 无因次单位 (245ft) 使用更高的钻压钻进，因为由图 1-7 和图 1-8 中曲线 (3) 可见，第二次切点 T_3 位于钻头上 4.2 无因次单位。

在某一地区，例如在 Oklahoma 州的 Lindsey 油田，某些地层有坍塌的趋势并使得大块砾石落入井内，从而引起很多麻烦。开始认为用特殊的钻井液可以解决该地区的钻井难题，为此美国石油学会成立了一个地区性的研究小组。经过较长时间的调查研究后，得出的结论是：没有一种钻井液能悬浮运送这些砾石穿过坍塌区，这就需要探索新的解决办法，也必然考虑到了特殊钻井方法的可能性。以前曾提出过的有关钻压的应用也被提了出来。为了避免弯曲的另一可能的方法，是使用上述分析过的冲击旋转钻井方法。测井得出的实际证据是：坍塌不是钻头造成而是由于钻柱对井壁摩擦所致。

图 1-10 代表在 Lindsey 油田东北部一口井中两次电测曲线的比较。在页岩中，顶部位置在 9964ft，即第一次下井井底向上 48ft，标准电阻率曲线显示：第二次测井曲线比第一次测井曲线视电阻率小。由于钻井液电阻率保持几乎相同，而且未浸入页岩，曲线改变的唯一原因是两次下入电缆之间井壁坍塌所引起。坍塌的尺寸可以用离差曲线估算。此坍塌显然是由钻铤对井壁摩擦造成，然而通过使用较好的钻井方法，也许能得以避免。

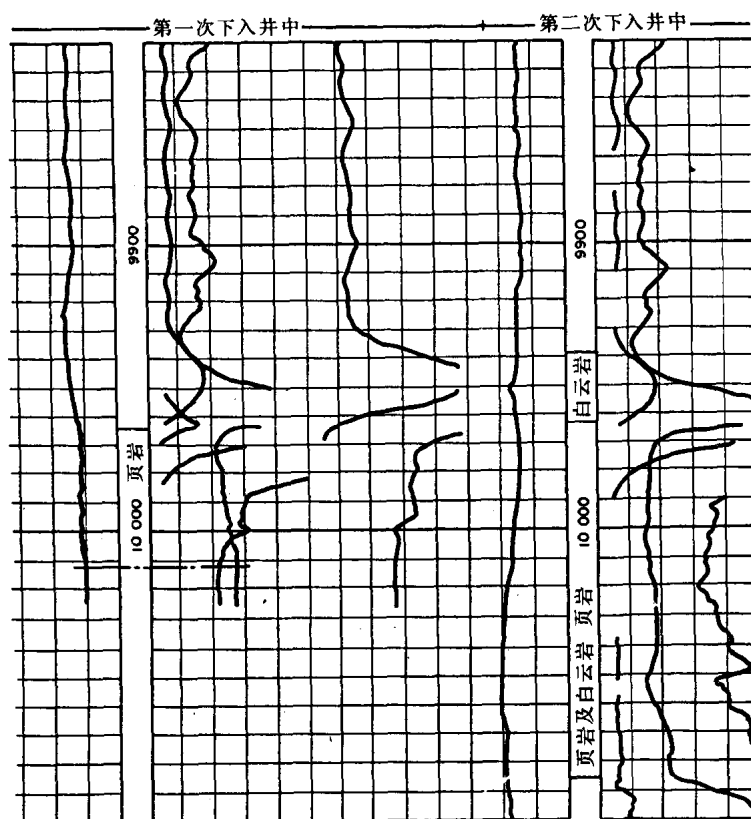


图 1-10 在 Oklahoma 州, Lindsey 油田
东北一口井上两次电测的比较

第六节 弯曲的钻柱对井壁作用的力

井眼愈大, 由弯曲的钻柱对井壁作用的力也就愈大。然而在公式中, 更多实际使用的不是井眼尺寸, 而将是“井眼的表现半径”这个术语, 它代表在一定尺寸井眼中钻柱最大可能的偏离。

井眼的表现半径 r , 可用以下适合于钻铤和钻杆的方程分别计算:

$$r = 1/2 (D - D_c) \quad (1-3)$$

$$r = 1/2 (D - D_t) \quad (1-4)$$

式中 D ——井眼直径;
 D_c ——钻铤外径;
 D_t ——工具接头外径。