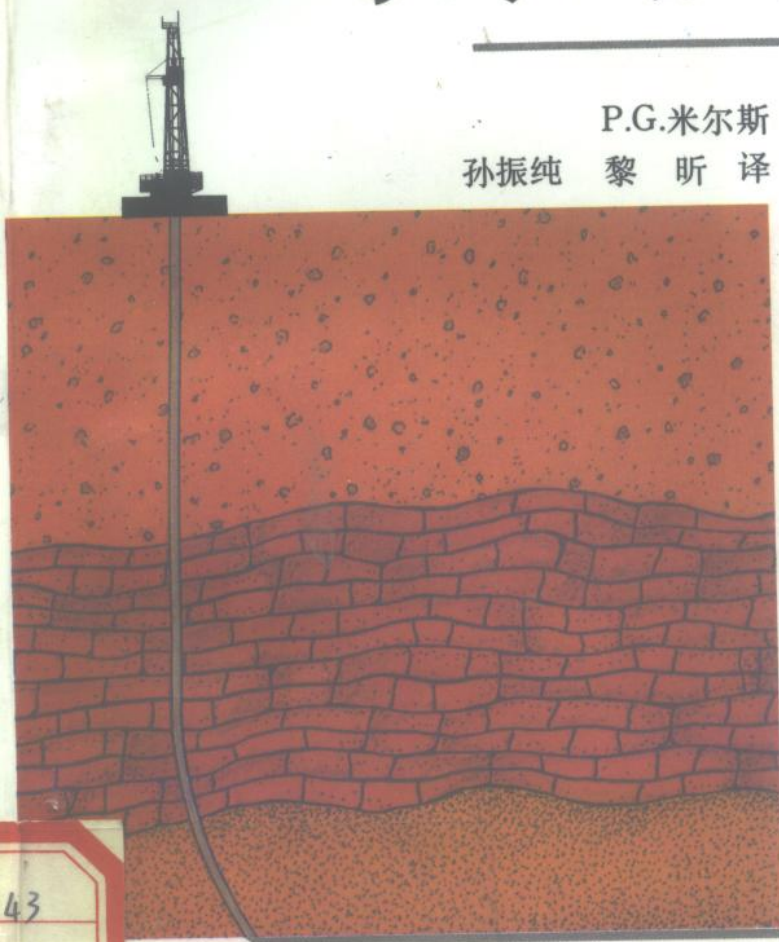


斜井钻井

P.G.米尔斯

孙振纯 黎 昕 译



43

5

石油工业出版社

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

随着石油工业的发展,越来越多的油气藏开始采用斜井来进行开采。本书全面而详细地论述了有关斜井钻井的关键性理论和工艺技术,其主要内容包括直井防斜、斜井设计、造斜工具及其应用、井眼轨迹控制、随钻测量技术及其应用以及斜井中复杂问题的处理和井控技术。

本书适用于石油院校有关专业师生及广大钻井现场工作人员。

DEVIATED DRILLING

Peter G. Mills

International Human Resources
Development Corporation

1 9 8 6

*

斜 井 钻 井

P.G.米尔斯

孙振纯 黎 昕 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京昌平第一排版厂排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 5 5/8印张 145千字 印 1—1,500

1992年1月北京第1版 1992年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0806-8/TE·752

定价: 4.05元

序

石油钻井是一种富有神奇性的工作，人们能把形状细长的油井钻至地表的岩层内，一般深达3英里（5千米），有时更深。油井的形状看起来好象是地球的毛细管。现在还可以使油井定向地钻至水平距离1英里以外的某一目的层并进行开采，这就显得更为神奇。

事实上也许可以这么说，现代的油气藏开采主要是通过钻斜井来实现的，对于勘探开发活动频繁的海洋地区，这一点就更是如此。在土地少的国家以及迫切需要集中钻井和采油的国家，从某一个中心点钻斜井的方法是较为合理的一种方案。

这使我想起两件事情，通过这两件事，可以表明当代斜井的应用程度以及目前定向钻井技术的发展水平。第一件事是，Shell Offshore公司于1988年计划将Bullwinkle平台安放在墨西哥湾水深1350英尺（411米）的Green Canyon 65区⁽¹⁾。这座大型平台可以钻60口井，其中大多数为定向井。第二件事是，R. D. Grace详细地介绍了用一口定向救援井在垂直井深15941英尺（4859米）处成功钻遇一口5英寸的井的情况⁽²⁾。这口斜井是用来控制“得克萨斯”历史上最大的井喷的（Eastern Wheeler郡，1—11Key井）。上述的两个例子都可以反映出目前钻井工业中斜井钻井的水平。

我于50年代后期开始从事斜井钻井工作。当时，我所在的公司Shell Group公司认为有必要把我——一个年轻的司钻调离钻台以便负责一些井的定向钻井工作，这个工作包括设计钻井方案并监督执行，一直到钻达目的层（大部分井都较成功）。这一段时间是我在担任钻井技师之前所做的很有价值的工作，并且也为我后来从事的工作奠定了良好的基础。

近30年来，定向井钻井技术有了很大的进展。最近15年，油价的上涨以及钻井时间的升值促进了钻井理论的广泛研究和开发，加快了现有技术的利用，特别是在测量仪器、钻柱遥测、井底马达和长寿命钻头领域更是如此。另外，在井眼定向的准确性方面也有了很大的进展，因此，虽然定向钻井成本在逐步升高，但通过准确控制井眼轨迹，定向钻井仍有较好的经济效益。这些都是通过提高效率和采用新技术以较低的成本钻达一邻近的层面来实现的。

我一直致力于编写一本著作，全面论述定向斜井钻井中各种关键的基础知识，这些知识都是直井钻井所涉及不到的。据笔者所知，目前没有其他这种专著。现在，对于大型海洋钻井平台，除非操作人员具有丰富的知识和经验才能作出各种正确决策，否则，风险性将会大大增加。因此，操作人员必须掌握良好的操作技能。许多精密的硬件，从仪器、计算机到钻井液马达常常要求专业人员来操作，但是由于简单工具和仪器仍在广泛而有效地使用，所以大部分定向斜井作业成本仍然较低。我想通过我的介绍来帮助正在寻找机会丰富自己知识的年青一代的钻井人员。也许这本书可以有更多的读者，如石油工程师、平台监督、管理人员，他们会从中了解到定向斜井钻井所包括的内容以及定向钻井的用途。

P. G. 米尔斯

目 录

第1章 绪言	(1)
1.1 本书的范围	(1)
1.2 斜井钻井的发展历史	(2)
第2章 井斜的原因	(5)
2.1 钻具组合的机械特性	(6)
2.2 钻铤弯曲	(7)
2.3 重力的钟摆效应对钻具组合的影响	(9)
第3章 地层和井眼轨迹	(11)
3.1 钻铤弯矩理论	(11)
3.2 地层可钻性理论	(12)
3.3 微型造斜器理论	(12)
3.4 Knapp理论	(13)
3.5 地层与钻头的相互作用或岩石失效的各向异性理论	(13)
3.6 钻柱振动引起的井斜	(14)
3.7 临界转盘转速	(15)
第4章 直井的井斜控制	(18)
第5章 井眼轨迹、狗腿角和狗腿严重度	(26)
5.1 井眼轨迹	(26)
5.2 狗腿角	(29)
5.3 狗腿严重度	(33)
5.4 狗腿严重度和井眼问题	(33)
第6章 斜井钻井的应用	(41)
第7章 斜井设计	(46)
7.1 俯视图	(47)
7.2 垂直平面图	(48)
7.3 利用计算机进行井眼设计	(56)
第8章 斜井钻井工具	(59)
8.1 牙轮钻头	(59)

8.2	井底钻井液马达	(62)
8.3	滑动叶板变向器	(72)
8.4	楔形造斜器	(73)
8.5	肘节	(75)
8.6	扩眼器	(76)
8.7	弯接头	(77)
8.8	可调弯接头	(77)
8.9	无磁钻铤	(78)
8.10	稳定器和扩眼器	(80)
8.11	加重钻杆	(82)
8.12	铝合金钻杆	(84)
第9章	造斜工具的定向	(87)
9.1	仅有井斜角变化时工具的定向	(88)
9.2	井斜角和方位角都变化时工具的定向	(89)
9.3	仅有方位角变化时工具的定向	(90)
9.4	方位角变化达到最大值时的工具装置角	(91)
9.5	方位角的可能变化	(92)
9.6	工具装置角的计算	(93)
9.7	综合矢量图或Ragland图	(94)
第10章	造斜工具的定向方法	(98)
10.1	地面定向法	(98)
10.2	间接定向法和直接定向法	(98)
第11章	井眼测量	(102)
11.1	磁力测量仪器	(103)
11.2	影响磁力测量数据的因素	(107)
11.3	磁方位的校正	(112)
11.4	仪器误差	(116)
11.5	陀螺测量仪器	(116)
11.6	惯性导航测量仪器	(120)
第12章	井眼轨迹计算方法	(123)
12.1	历史	(123)
12.2	平均角法	(125)
12.3	最小曲率法	(129)

第13章 随钻测量技术	(132)
13.1 有线电缆测量仪器	(133)
13.2 钻井液脉冲系统	(135)
第14章 井眼轨迹控制	(138)
第15章 斜井钻井成本分析	(144)
第16章 斜井的钻井问题	(146)
16.1 摩擦效应	(146)
16.2 键槽卡钻	(149)
16.3 压差卡钻	(150)
第17章 斜井井控	(156)
17.1 压力条件	(156)
17.2 过平衡的要求	(160)
17.3 关井	(161)
17.4 地层强度	(163)
17.5 压井	(165)
参考文献	(170)

第1章 绪 言

在石油天然气工业中，绝对的直井是少有的。但是，如果一口井的井身轨迹偏离垂线太远，甚至超出了最大许可偏斜值，则该井就属于弯曲井眼。这样，机械设备出现故障（如卡钻、键槽）的风险性就会增加，从而导致高成本的打捞作业，另外，这时也会发生套管和接头的过度磨损。在设计好的深井钻井过程中，如果在井深较浅的部位井眼方向突然发生变化，旋转着的钻杆就会承受过大的交变应力，而这正是钻杆早期疲劳破坏的主要原因。

尽管存在这些潜在的问题，但是只要井斜控制得当，斜井相对直井来说仍具有许多优点。对于开发某一特定油藏来说，斜井甚至有可能是唯一可行而又经济的方法。

因此，斜井或定向井钻井有两个方面的用途：（1）在常规的直井中防斜或纠斜；（2）有目的地按照设计的斜井轨迹钻达离井场有一定水平距离的地下目的层。无论是用于哪种用途，都得运用理论、技术以及设备来实现。

1.1 本书的范围

近20年来，斜井钻井一直是人们全力研究并为之大量投资的一项研究和开发课题。斜井钻井技术的发展与海洋开发钻井活动的大幅度增加密切相关，因为海底油田的开发要求将井口集中于数量有限的几个平台，所以几乎所有的井都是斜井。人们越来越感觉到有必要准确地了解所有井的井身轨迹。

目前，斜井钻井技术的范围很广，以致于难以在一本书中全面地进行介绍。这不仅是因为其内容丰富，而且还因为在一本书编写出版之前可能就已经过时。本书的目的是想从实际经验解释钻具组合的特性以及地层对其特性的影响。与许多其他研究课题一样，随着研究工作的进行，斜井钻井的资料和数据也越来越复

杂。如果主要原因比较清楚，现场司钻就不必详细的了解其原因了。本书介绍了主要的定向工具和方法以及采用这些工具和方法的原因。其中有些工具目前已很少使用，因此在介绍的时候所占的篇幅不多。但是通过介绍，对于全面了解目前设备的发展过程也许很有价值。定向钻井的需要促使人们研制出高技术的工具，并且当时使用特别有效。本书较详细地介绍了单点测量和记录井斜角、方位角的方法，以及这些资料在井底马达定向上的应用。同时也阐述了测量和造斜过程中所产生的误差，因为不论应用这些技术时多么细心，井底工具的精确位置仍然难以确定。另外，还有一些章节涉及到各种井眼复杂问题、井控理论在斜井中的应用以及定向钻井的成本计算等。

1.2 斜井钻井的发展历史

转盘钻井方法是由Bake家族的两兄弟于1895年在油田开始使用的。当时他们是得克萨斯州Cersicana的水井钻井承包商，他们连续成功地钻成了数百口井。然后 Lucas——一位由澳大利亚移民的采矿工程师采用了他们的技术并于1901年成功地钻达Spindletop盐丘。其他人在该地区钻井但未能钻穿松散的浅层。而Lucas采用了原始的水—粘土钻井液，最后钻这口井取得巨大的成功。也就是从这个时候开始，制造商开始设计和生产转盘钻机^[3]。然而，直到20年以后，转盘钻井方法才被人们普遍采用。同时，钻井深度也超过了“冲击钻井”或“顿钻”所能达到的深度。

在这段期间，所用的变径钻柱由各种尺寸的普通钢管组合而成。由于没有指重表或只有很原始的指重表，所以钻压无法控制。钻井进尺是唯一用于评价钻井性能的一个标准。按照我们现在的观点，在这样的条件下所钻的井眼发生弯曲也并不是为奇。但是那时人们认为井眼弯曲是转盘钻井方法的主要缺点。许多大的钻井公司反复试用新钻机钻井，但不得不再使用顿钻钻井方法，因为顿钻钻井的井眼直，并且事故相对较少。

早在1877年，就出现了设计用于测量矿井井斜角的仪器。同

年,德国Dortmund一位名叫Gustav Nolten的工程师获得了一项专利,他设计的一台装置由一带罗盘的玻璃烧瓶和一个机械时钟组成。玻璃烧瓶内灌有部分氢氟酸。测量井斜角时将仪器静置于规定的井深处,瓶内的酸就会腐蚀玻璃瓶的内壁并留下酸液面的位置而记录下来,同时井眼方位也可通过固定磁罗盘指针的时钟来确定。在1909年,又出现了用摆锤确定井斜角、用浮罗盘测量井眼方位的仪器,其优点是能够通过照相的办法记录下测量数据^[4]。

一直到1924年,石油工业界才系统地研究井眼弯曲问题。也就是在这一年,一位名叫A. Anderson的工程师开始使用他自己设计的一种仪器测量井眼。1929年,他发表了他在美国,特别是在加利福尼亚州255口井中所测得的数值^[5]。他发现测量井深为6000英尺(1829米)的井的平均水平位移是580英尺(177米),并且最大值是平均值的4~5倍。而所有这些数据大都是从直井中得到的,实际上某些井的井斜角已经超过了65°(与垂线夹角),达到了他所设计的仪器所能测得的最大值。

在20年代,石油工业界开始对俄克拉何马州Seminole所发生的问题引起了注意。由于是在城镇钻井,井距小,因此出现了井眼相交、油井钻入生产井、两台钻机钻同一口井以及井眼从某一构造中心开钻却完全错过产层等情况^[6]。

Anderson所获得的数据促使美国石油协会钻井实践委员会发起了广泛的研究。研究结果表明,要想尽可能使井眼钻直,最好使用低钻压。他们还得出结论,可以在靠近钻头处接一段大尺寸或刚性钻柱(即钻链)来提供钻压。这时,人们公认转盘转速和地层倾角对井身轨迹只有辅助性的影响。后面一个结论在当时的条件下是成立的,因为在所考虑的井中,转盘转速常常超出临界范围,地层构造的地层倾角相对较小。

因此,人们提出,任何钻头都受到外力的作用,而这些外力又促使钻头的钻进方向偏离原来井眼的方向。于是人们采用了最为有效的控制钻头漂移的钻井措施,并且有些措施仍然沿用至今。

直到50年代初期，Lubinski发表了重要的著作。他详细研究了井眼偏斜的程度与作用在钻具组合上的机械力的关系以及各种地层对牙轮钻头切削效应的影响。而在此之前这方面的研究工作进展不大。

自从人们开始比较透彻地了解了影响斜井中钻具组合性能的因素以来，石油工业在开发新的和更有效的设备方面取得巨大的进展。其中包括引入稳定器、用加重钻杆替代一些钻铤以及在制造长寿命、高效率井底马达方面所取得的巨大成就。这些具有代表性的进展大大地扩展了斜井钻井的适用范围。在过去15年中，测量技术的水平、测量仪器的准确度以及记录和传输数据手段也有了惊人的改进。尽管钻井成本仍然较高，但在斜井钻井中从造斜点开始已经能够连续较好地控制井眼方向。

第2章 井斜的原因

人们很久以前就试图找出井斜的原因。他们发现，当所用的钻具组合柔性大、钻压高，或者初始井斜角较大时，井眼轨迹就很有可能发生改变。只要是稍微熟悉斜井钻井作业的人都可以证实这种观点。并且从原理上来说，这种结论也可应用于机加工车间的打眼以及日常生活中的电动手钻打眼。上述的现象是由于受几个基本的机械力的影响而引起的。如果钻柱相对柔性较大或受到过高的压缩载荷作用，就很难钻成一口直井。

但是，即使钻具组合和钻井条件不发生改变，人们仍然发现井眼有偏斜的趋势。这种井斜现象主要归咎于所钻地层的特性。当钻遇层状岩层（如页岩—砂岩层）时，这种现象比钻遇均质石灰岩或块状砂岩时更为明显。对于地层倾角高、硬度大、扭曲厉害的地层，这种自然造斜效应相当大（图2.1）。

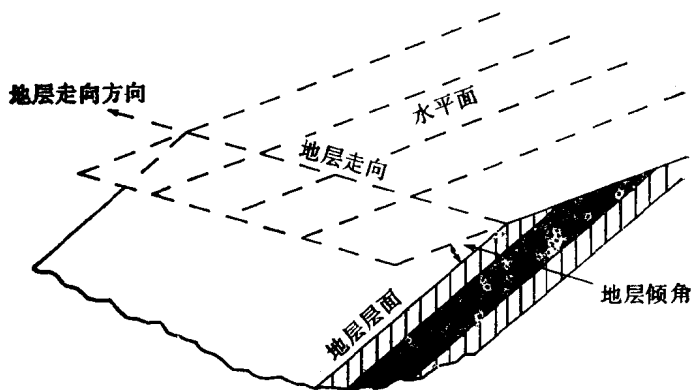


图 2.1 地层倾角和地层走向示意图

人们注意到，井眼偏斜可能会造成某种复杂问题，但也有可

能是人们所采取的增斜措施而引起的。无论是哪一种情况,影响钻具组合钻进方向的因素是一样的。这种潜在的造斜效应可以通过改变和抵消这些因素来消除,但有时也需要利用这种自然造斜效应来满足我们的需要。

显然,较为透彻地了解影响钻具组合工作性能的各种因素,对于有效地控制斜井钻井作业是非常重要的。可供选择的专用工具和钻具组合型式多种多样,能用于各种复杂条件下。因此,很难从理论上全面了解钻具所受的力,否则就可以准确地预计钻具组合的造斜特性。计算机在机械因素的性能分析上的应用使得在这个领域取得了相当大的进展,但是认真地积累当地的钻井经验仍然很有价值。

2.1 钻具组合的机械特性

引起钻头偏斜的主要机械力一般是指弯曲力和钟摆力。如图2.2和图2.3所示,这些力垂直作用于钻头和钻铤组合上。各项力

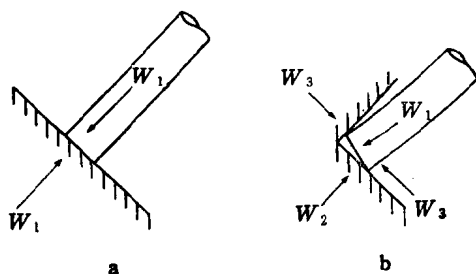


图 2.2 钻铤弯曲效应

a—未弯曲, 钻头没有受到侧向力的作用;
b—钻铤出现弯曲, 钻头有上翘或增斜趋势

的定义如下:

W_1 是总钻压, 它沿紧靠钻头上方的钻铤的轴线方向作用于钻头上。

W_2 是 W_1 的一个分量, 作用力的方向沿井筒轴线方向。

W_3 是 W_1 的另一个分量, 作用力的方向与 W_2 垂直, 与井筒轴

线垂直，此力侧向作用于钻头。

如果钻具组合弯曲造成钻铤中心线偏离井眼轴线，则钻头就会受到外力 W_1 、 W_2 、 W_3 的作用。

2.2 钻铤弯曲

钻铤一般为厚壁管柱，因此刚度大，但仍然有一定的柔性。如果细心观察水平排放在管架上的钻铤或竖直排放在钻台上的钻铤柱就可以证实这一点。当给钻头施加钻压的时候，在压缩载荷的作用下钻具组合的下半部分会发生某种程度的弯曲。这样施加钻压的方向，就不再严格地沿着井筒的中心线方向，新井的轨迹将会发生偏斜。在图2.4所示的条件下，井斜角将增加。

井筒轴线与钻具组合轴线之间的角度差很小。如果在12 $\frac{1}{4}$ 英寸的井筒中使用8英寸的钻铤，且接触点位于钻头上方20英尺（6米）处，则两者之间的角度差约为0.5°。然而造斜效应是连续的，因此在这种条件下，增斜率可达2.5°/100英尺（0.82°/10米）。钻压侧向分量 W_3 将使井眼造斜，造斜率的大小取决于钻头的侧向切削能力。

井斜角的变化值以及钻具组合与井壁接触点的高度取决于钻具组合的刚性（刚度是钻柱截面尺寸的函数）、井眼直径以及所施加的压缩载荷。如果钻铤直径小、柔性大，钻铤外壁和井壁之间的环空间隙大，并且钻压高，则弯曲程度就较为厉害，而相应的造斜力也大。钻压愈高，压缩弯曲就愈明显，钻头至钻铤与井壁的第一个接触点之间的钻柱长度也会缩短。这一段钻柱长度也称为“有效钻柱长度”。通常影响钻柱弯曲特性的有效钻柱长度不超过150英尺（45米）。如果是增斜钻具组合，并且所施加的钻压

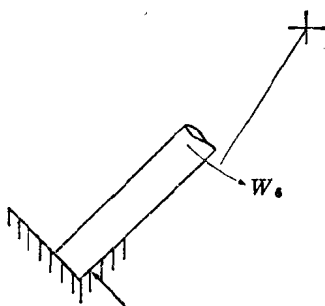


图 2.3 钟摆效应在钻头处产生一个下倾或降斜力， W_3 是钻压的一个分量（见正文）

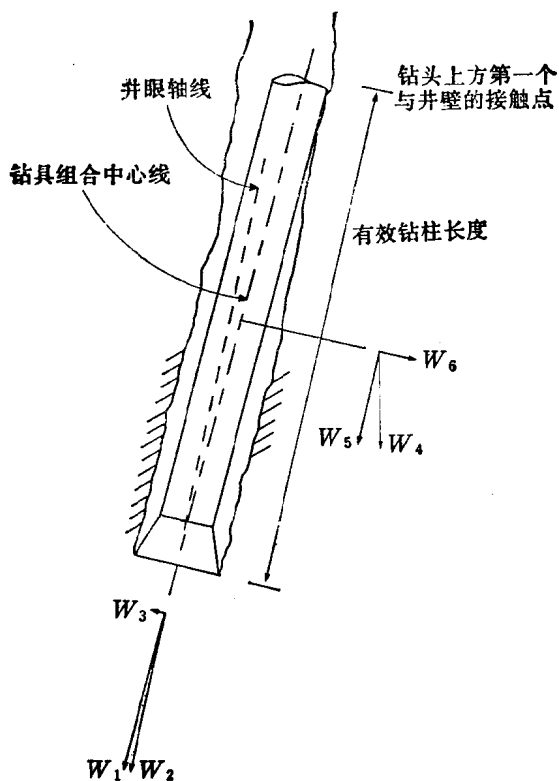


图 2.4 作用于钻具组合上的机械力， $W_1 \sim W_6$ 为钻压的分量或者可以认为是重力对钻具组合的影响

也大，那么有效钻柱长度可缩短到25英尺（7.5米）。偶尔，为了增大造斜效应，在钻头上接一单根钻杆，然后再与短钻铤相接。如果操作认真，可以在很短的距离内迅速改变井斜角。当然，这是相当特殊的一种情况，在这种情况下要尽可能地增加各种造斜因素的效应。

有效钻柱长度通常是根根据钻头以上第一个全尺寸部件（各种扩眼器或稳定器）的位置来确定的。如果钻头与第一个稳定器或扩眼器之间的距离较近〔5~12英尺（2~4米）〕，那么，在其上方

的第一根钻铤就会发生弯曲。这样全尺寸部件就成为一个支点。倘若有效钻柱长度缩短,则井眼轴线和钻具组合的轴线之间的角度差将增大,相当于在钻头处形成了一种杠杆效应。这就是传统的增斜钻具组合的工作原理。

2.3 重力的钟摆效应对钻具组合的影响

如图2.4所示,图中的力为: W_1 是垂直向下的重力对第一个接触点以下有效钻柱的影响; W_5 是钻具组合重量 W_4 的一个分量,此力的作用方向沿着钻具组合的轴线,可增加总的钻压值; W_6 是也是 W_4 的一个分量,方向与 W_5 垂直。此力作用的方向与钻具组合的轴线相垂直,有使钻具组合恢复到垂直位置的趋势。其中的一部分力在钻头处也具有侧向效应,与可能存在的侧向力 W_3 相反。

重力对钻头以上钻铤质量的作用力垂直向下,其中一部分力(W_5)沿钻具组合轴线作用于钻头上,其余的力(W_6)的方向与钻具组合轴线垂直,支承反力为井壁接触点和钻头处地层的反力。钻头处的这种侧向力总是起降斜作用。如果有必要,可以在钻头上方使用较重的钻铤或通过增加钻柱有效长度来加强这种效应。这种自然降斜作用常常用于直井防斜,或用于斜井中降斜。另外可看出,对于某一给定的钻具组合来说,随着井斜的降低,降斜力也会相应地减小。为了保持某一特定的降斜率,因此有必要稳定地增加有效钻柱长度,或在钻头上方换用较重的钻铤。

通过改变钻具组合和调整钻井参数,特别是钻压,常常可以控制钻头处侧向力的大小(W_3 和 W_6)。如果钻铤弯曲效应大于所存在的钟摆效应,井斜角可能会增加,反之,井斜角应降低。

从钻铤与井眼中心线的角度可以更好地了解增斜钻具的工作性能。如果钻柱受压缩弯曲时,钻铤斜角超过了井斜角,钻头就会朝正前方钻进。降斜钻具降斜主要是靠钻头的侧削效应。因为不存任何外力迫使钻具组合达到这样一种情况,即其轴线位于井眼轴线的上方,换句话说,使其降斜。

上述的机械外力一般认为是通过钻具组合作用于垂直平面上。对无特殊问题的地层，这些力在直井和斜井中可以用来控制井斜。