

旋转导向钻井液力推力的计算与分析*

李琪^{1,2} 张铁军³ 于继良³

(1. 西安石油大学石油工程学院 2. 西北工业大学博士后流动站 3. 胜利油田黄河钻井公司)

李琪等. 旋转导向钻井液力推力的计算与分析. 天然气工业, 2004; 24(9): 68~71

摘 要 文章介绍了正在研制的调制式旋转导向钻井工具 MRST 的组成及其工作原理; 它由测控短节、偏置导向执行机构两大部分组成, 是在钻柱全旋转且相对于井壁没有静止支撑点的条件下进行导向钻井的。工具偏置导向执行机构的执行是以钻井液为制导动力源, 即作用在执行机构伸缩块上的内外压差而产生的液力推力, 液力推力的大小与制导效果密切相关; 为此, 采用常规钻井水力学计算程序, 对 MRST 在正常钻井工作条件下液力推力的大小及其影响因素进行了计算分析。结果表明, 就目前国内陆上钻井设备所具有的条件, 所研制的 MRST 是可以适应 7000 m 井深以内的井对导向力控制要求的; 但作用在 MRST 伸缩块上的液力推力是随井深、排量、钻井液密度及流变性等的变化而变化的, 实际应用 MRST 时应考虑上述因素变化对 MRST 工作性能产生的影响; 此外, 也可考虑通过微调排量的办法来调整 MRST 导向力的大小。

主题词 旋转导向钻井 导向工具 液力推力 计算分析

旋转导向钻井是在钻柱全旋转的条件下进行导向钻井的。它是在钻头上方装有一个可控偏心稳定器或可控钻头侧向力(导向力)的旋转导向工具, 并配有完整的旋转导向钻井控制系统, 在钻柱旋转钻进时能调控井身轨迹的技术。利用旋转导向钻井技术进行钻井作业时, 不需要频繁起下钻就可以实现三维井眼轨迹控制, 且具有井眼轨迹更光滑, 延伸距离更大的优点; 对保证井眼轨迹质量, 提高钻井速度和效率, 满足钻复杂结构井的需求都有重要意义。由于导向作用原理的不同, 旋转导向钻井系统已有多种类型; 调制式旋转导向钻井工具(Modulate Rotary Steering Tool, 以下简称 MRST)是旋转导向钻井系统的类型之一, 其主要特征是导向机构随钻柱一起旋转, 相对于井壁没有静止支撑点。

一、工具的结构及其工作原理简介

MRST 的结构见图 1, 其主要由测控短节、偏置导向执行机构两大部分组成。测控短节内部安装稳定平台。稳定平台是一不随钻柱旋转而旋转的相对于井眼静止的测控机构, 主要包括: 空间姿态测量系统、井下微处理器、控制电路及供电机构(上下涡轮发电机)。从稳定平台的下部伸出一控制轴, 用于控

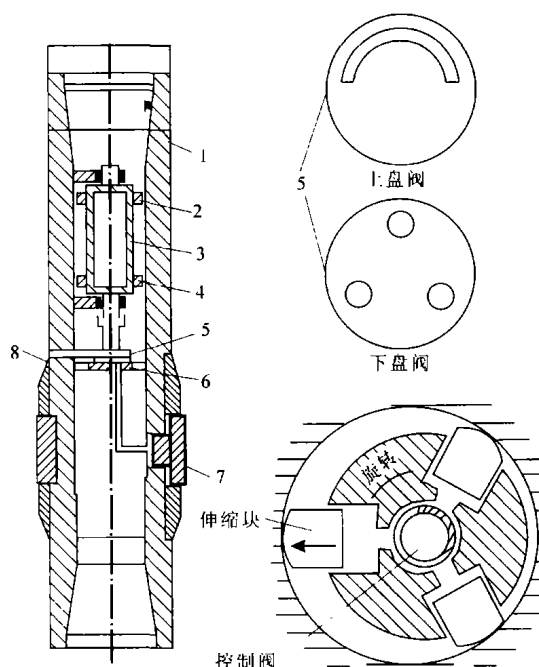


图 1 调制式旋转导向钻井工具结构示意图

1. 钻铤; 2、4. 上下涡轮发电机; 3. 稳定平台; 5. 上下盘阀; 6. 盘阀座; 7. 伸缩块; 8. 卸压孔

制偏置导向执行机构。偏置导向执行短节主要包括: 液压分配机构、3 个周向均布的导向伸缩块及对应的高/低压钻井液通道。伸缩块的伸缩由钻柱内外的钻井液压差提供动力, 并由控制阀分配。液压

* 本文系国家自然科学基金重点资助项目(编号: 50234030); 国家“863”重大专项项目(2003AA602013)。

作者简介: 李琪, 1963 年生, 1986 年西南石油学院硕士毕业, 2002 年获博士学位, 现为西安石油大学石油工程学院教授。
地址: (710065) 陕西省西安市。电话: (029) 88382680。

分配机构为一盘阀系统,它主要由上下盘阀组成。上盘阀由稳定平台的控制轴控制,不随钻柱转动,其上有弧形长孔形状的高压阀孔。下盘阀通过盘阀座与钻柱本体相连,并随钻柱一起旋转,上面有 3 个直径相同的低压液孔,液孔下的通道通向伸缩块的活塞室;3 个圆孔之间的相位相差 120° 。

需要导向时,高压钻井液由上盘阀的弧形高压钻井液分配孔进入液压盘阀分流系统,并经下盘阀的某个低压孔进入相连的伸缩块液压腔,该伸缩块将被高压钻井液推动伸出支撑于井壁,产生偏置力,推动钻头离开原方向,达到调整井斜或方位的目的,从而实现钻柱旋转状态下的导向钻井。在钻头每一转过程中,下盘孔眼都与上盘高压阀孔相通一次,与之相接的伸缩块伸缩一次。相通时,伸缩块伸出;不相通时,伸缩块活塞腔内的压力通过卸压孔卸压,伸缩块在复位弹簧的作用和井壁的推动下回收。按照 MRST 的工作原理,其工作方式主要是靠伸缩块的定点伸缩,使其与井壁接触,利用井壁的反作用力对钻头产生一侧向推力来实现导向的。伸缩块伸出的动力来源于钻井液循环时的液压作用,也即作用在液压系统中活塞上的内外压差,这个压差近似等于钻头压降。而控制伸缩块伸缩的力就等于压差(或钻头压降)乘以活塞承受液压的面积。在实际钻井条件下,钻头压降是随井深、钻井液性能以及泥浆泵的工作条件等因素而相应变化的,它直接影响着控制伸缩块伸缩力的大小,这就关系到在实际钻井条件下 MRST 导向工具能否正常工作,以及如何对其进行控制等问题。因此,有必要对控制伸缩块伸缩

的水力推力及其影响因素进行计算和分析。本文就是运用常规钻井水力参数设计理论与计算程序,用软件计算出不同条件下钻头压降的变化规律,从而对作用在 MRST 伸缩块上的力进行计算、分析和论证,以指导工具设计。

二、常规水力程序设计条件下 水力推力的计算分析

在一定机泵条件下,钻头压降随井深、排量及钻井液密度和流变性的变化而变化。有关钻头压降和钻井液循环压耗的计算已有成熟的模型,但按喷射钻井水力参数最优设计程序,要求通过优选排量和钻头喷嘴直径来获得最大钻头水马力或最大钻头冲击力,在考虑井眼实际状况以及实际钻柱结构的条件下,整个计算和分析是个复杂的过程,为此,利用了钻井水力参数设计与分析软件。首先要考虑的是,在不改变任何钻井工况的条件下,按喷射钻井常规水力程序进行水力参数设计和作业时,作用在伸缩块上的力能否保证 MRST 系统正常工作。考虑到 MRST 主要用于 $\varnothing 216$ mm 井眼,所以主要对一口井正常工况下 $\varnothing 216$ mm(以下同)井眼钻头压降的变化进行分析。设泥浆泵额定泵压为 20 MPa,泥浆泵功率为 1600 马力(1 马力=745.7 W),伸缩块活塞直径为 55 mm(MRST 工具设计值),并设钻井液密度随井深的增加而逐渐增大,同时参考斯伦贝谢研制的导向工具 PowerDrive 的文献^[1],取 MRST 导向工具的压耗为 0.7 MPa,按最大射流冲击力工作方式进行分析,所得结果如表 1 所示。

表 1 常规水力程序设计和作业条件下的水力推力计算结果

序号	井段(m)	密度 (g/cm ³)	喷嘴当量直径 (mm)	泵压 (MPa)	排量 (L/s)	钻头压降 (MPa)	水力推力 (kN)
1	1500~1750	1.15	16.19	18.37	30.00	13.55	32.19
2	1750~2000	1.20	16.25	19.85	30.00	13.93	33.09
3	2000~2250	1.25	16.76	19.04	30.00	12.81	30.44
4	2250~2500	1.30	17.32	19.25	30.00	11.68	27.75
5	2500~2750	1.35	17.92	19.12	30.00	10.60	25.19
6	2750~3000	1.40	19.05	19.10	30.00	8.59	20.41
7	3000~3250	1.45	19.65	19.64	30.00	7.87	18.69
8	3250~3500	1.50	20.78	19.46	30.00	6.50	15.44
9	3500~3750	1.55	21.38	19.73	30.00	6.00	14.25
10	3750~4000	1.60	21.95	19.49	30.00	5.57	13.23
11	4000~4250	1.65	22.52	19.46	30.00	5.19	12.33
12	4250~4500	1.70	24.25	19.67	30.00	3.98	9.46
13	4500~4750	1.75	24.84	19.69	30.00	3.72	8.84
14	4750~5000	1.80	27.71	19.82	30.00	2.47	5.87

从表1可以看出,随着井深和密度的增大,钻头压降逐渐减小,相应地作用在MRST伸缩块上的水力推力也有减小的趋势,当井深为5000 m时,水力推力为5.87 kN,而4000 m井深的水力推力为13.23 kN。依据MRST工具设计要求,只要作用在伸缩块上的力大于13 kN,就能保证伸缩块正常工作。因此从计算结果知,在常规水力程序设计和作业条件下,4000 m以内的井深是能保证MRST正常功能的。当井深增加到一定程度时,我们可以通过调节钻井泵排量或通过换用不同承压面积的活塞两种方式,来保证使伸缩块正常伸出所需的最小水力推力。

三、影响液力推力的控制因素分析

前面的讨论已指出,井深、排量、钻井液密度和流变性的变化对水力推力的大小都有影响,为了更加直观地说明问题,需对影响水力推力的各种因素做一计算和分析。掌握了各因素对水力推力影响的变化规律,就有可能通过控制各种因素的变化,来控

制MRST工具的工作状态和导向能力,这是一个重要而实际的问题。

表2所示是假设钻井液密度和流变参数不变时,按喷射钻井最大冲击力工作方式进行水力程序设计,计算钻头压降和水力推力随井深变化的结果。计算时钻井液流变参数选自胜利油田某井3800 m井段时的参数,旋转粘度计自600 r/min到3 r/min的读值依次为55、34、24、16、9、6。由表中数据可以看出,随着井深的增加,钻头压降和水力推力逐渐减小。当井深达到一定程度(大于7000 m时),钻头压降变得非常小,将无法提供所需的导向力;因此,在现有的装备条件下,在7000 m以上的超深井实现旋转导向钻井是有一定难度的。根据XJ24—3—A18井用PowerDrive钻深井段的数据^[1],其之所以能在7000 m以上深井工作是由于其装备额定泵压高于常规设备,实际工作泵压达到26 MPa,此时钻头压降和水力推力的计算结果如表2中序号X1、X2,可见它是可以满足要求的。

表2 井深变化对MRST水力推力的影响

序号	井段(m)	密度 (g/cm ³)	喷嘴当量直径 (mm)	泵压 (MPa)	排量 (L/s)	钻头压降 (MPa)	水力推力 (kN)
1	3000~3500	1.20	18.49	19.13	33.00	10.04	23.86
2	3500~4000	1.20	18.49	19.34	32.86	9.96	23.66
3	4000~4500	1.20	17.92	19.67	30.68	9.85	23.40
4	4500~5000	1.20	17.97	19.90	30.00	9.30	22.09
5	5000~5500	1.20	18.49	19.79	30.00	8.30	19.72
6	5500~6000	1.20	19.05	19.75	30.00	7.37	17.51
7	6000~6500	1.20	19.65	19.80	30.00	6.51	15.47
8	6500~7000	1.20	20.22	19.98	30.00	5.80	13.78
9	7000~7500	1.20	21.38	19.72	30.00	4.65	11.05
10	7500~8000	1.20	22.52	19.74	30.00	3.78	8.98
X1	7000~7500	1.10	19.65	22.58	30.00	5.97	14.18
X2	7500~8000	1.10	19.65	26.20	31.00	6.38	15.16

表3所示是假设同一井深点(4000 m),排量固定(30 L/s)、钻井液流变参数不变时,按喷射钻井最大冲击力进行水力程序设计,钻头压降和水力推力随钻井液密度变化的计算结果。计算时钻井液流变参数与计算表2所用参数相同。结果表明,随着密度的增加,钻头压降和水力推力逐渐减小。

表4所示的是当井深(3000 m)、密度(1.20 g/cm³)不变时,钻头压降和水力推力随排量变化的计算结果。计算时,取额定排量为33 L/s,最低排量为额定排量的70%(现场施工一般不应低于这一数值,否则将达不到携带岩屑的要求)。额定泵压为22 MPa,并假设下部导向钻具(含MWD)的压耗为

表3 钻井液密度变化对MRST水力推力的影响

序号	密度 (g/cm ³)	喷嘴当量直径 (mm)	泵压 (MPa)	钻头压降 (MPa)	水力推力 (kN)
1	1.10	16.76	19.62	11.27	26.77
2	1.20	17.32	19.60	10.79	25.64
3	1.30	17.92	19.32	10.21	24.26
4	1.40	18.49	19.32	9.68	22.99
5	1.50	19.05	19.35	9.21	21.88
6	1.60	19.65	19.33	8.69	20.65
7	1.70	20.22	19.36	8.22	19.53
8	1.80	20.78	19.43	7.80	18.53
9	1.90	21.38	19.47	7.36	17.49
10	2.0	21.95	19.55	6.96	16.54

注:喷嘴当量直径采用优选计算结果。

表 4 排量变化对 MRST 水力推力的影响

序号	排量 (L/s)	泵压 (MPa)	钻头压降 (MPa)	水力推力 (kN)
1	34.98	21.47	8.86	21.05
2	33.66	20.08	8.20	19.48
3	32.34	18.74	7.57	17.99
4	31.02	17.44	6.97	16.56
5	29.70	16.19	6.39	15.18
6	28.38	14.99	5.83	13.85
7	27.06	13.84	5.30	12.59
8	25.74	12.74	4.80	11.40
9	24.42	11.68	4.32	10.26
10	23.10	10.67	3.86	9.17

1 MPa; 泥浆的塑性粘度为 21 mPa·s, 动切力为 10 Pa; 喷嘴当量直径为 19.65 mm。从表中计算结果可以看出排量的变化对钻头压降及水力推力的影响很大, 另由钻井水力学基本知识知: 钻头压降 p 与 Q^2 成正比, 即: $p \propto Q^2$, 这从理论上进一步证明上述结果。在实际施工过程中, 最容易控制的是泵的排量。因此, 在保证井下安全的前提下, 我们可以考虑, 采用微调排量的办法来调整 MRST 导向力的大小。

四、结 论

(1) 计算分析表明, 作用在 MRST 伸缩块上的液力推力不是固定值, 它是随井深、排量、钻井液密度及流变性的变化而变化的, 实际应用 MRST 时

应考虑上述因素变化对 MRST 工作性能产生的影响, 并希望通过调整排量等参数来对 MRST 的导向性能进行调控。

(2) 根据计算, 结合国内外使用旋转导向工具的钻井实践, 在国内陆地油田, 试验和应用 MRST 时宜选用电动钻机和大机泵, 使用 MRST 可以满足密度为 1.80 g/cm³ 的油气井 4000 m 井深的导向钻井需要(导向推力大于 13 kN)。

(3) 当密度为 1.20 g/cm³ 时, MRST 可以钻至 7000 m 的井深, 这种情况在钻地层压力系数不高的大位移井中比较普遍, 因此, MRST 有广泛适用的前景。

参 考 文 献

- 1 张武华. 自动导向旋转钻井钻进南海 8600 m 大位移井. 石油钻采工艺, 2001; 23(1): 7~10
- 2 杨剑锋, 张绍槐. 旋转导向闭环钻井系统. 石油钻采工艺, 2003; 25(1): 1~5
- 3 John A Johnstone *et al.* Using rotary closed-loop drilling to increase operational efficiency and reduce operational risk. SPE 71840, 2001
- 4 Thomas Wong, Tom Gaynor, David C-K Chen *et al.* Advanced steerable drilling system raises performance to new levels. IADC/SPE 77218, 2002
- 5 刘崇建等. 提高小井眼水泥浆顶替效率的研究. 天然气工业, 2003; 23(2)

(收稿日期 2004-06-28 编辑 钟水清)

一种评价钻井液造成地层潜在损害的新方法

正确设计钻井液对于控制钻井液侵入是十分重要的。日前, 由 Csiro 石油公司开发出一种可以评价钻井液造成地层潜在损害的新方法。

主要试验装备包括: 冲蚀流体搅拌器, 带有圆形扩眼的木质桥塞, 冲蚀腔, 试验用千斤顶等。钻井液要使用常规添加剂, 而且化学剂的用量要尽量低。为减小 pH 值对滤饼性能的影响, 把钻井液的 pH 值调整到 9.8~10。冲蚀液要与滤饼的基液兼容, 以避免二者相互影响。除去滤饼表面的疏松物, 用滤纸把滤饼放置在腐蚀槽中央, 然后倒入冲蚀液。首先搅拌 2 min 除去滤饼表面残留的胶状物。接着取出滤饼, 除去疏松物质后, 把滤饼吊挂 2 min 以除去上面的冲蚀液。然后把滤饼放置在薄棉吸纸上 5 min, 再测量滤饼质量。重复上面的做法, 每 5 min 搅拌一次, 测量滤饼的重量。整个试验过程中维持轴速恒定。最后, 对滤饼质量和累计冲蚀时间作图。

试验结果: 淡水基膨润土滤饼的冲蚀系数较低, 其抗冲蚀性能远远高于盐水基滤饼。膨润土滤饼的充填密度大, 基质胶结强, 渗透率低, 滤饼完整性好, 故对地层的潜在损害较低。由于重晶石密度大, 加入淡水基膨润土钻井液后引起分层, 会降低滤饼的抗冲蚀能力。由于电解液的存在或盐水对膨润土钻井液的污染, 致使盐水基滤饼不到 10 min 就完全被冲蚀掉, 故盐水基钻井液对地层的潜在损害较大。在盐水基钻井液中加入降失水剂可大幅度提高滤饼的抗冲蚀性。

通过上述试验得出结论: 由于钻井液在造壁前连续失水而且失水量很高, 所以钻井液水动力作用造成的滤饼冲蚀能对地层构成损害; 钻井液体系中存在重晶石和盐类时会降低膨润土滤饼的抗冲蚀能力; 滤饼的性能、其物理性质及其对地层的潜在损害程度取决于钻井液添加剂的物理、化学和电学性质。

(陈 敏 摘)