

无隔水管泥浆循环举升泵选型及性能参数计算方法

秦如雷^{1,3}, 于彦江^{2,3}, 陈浩文^{1,3}, 王飞虎⁴, 王林清¹, 许本冲^{1,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510000;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 573199;

4. 中国航天三江集团三江瓦力特种车辆有限公司, 湖北 孝感 432100)

摘要: 无隔水管泥浆循环钻井技术作为一种新兴的工艺及装备系统, 已经为国内外多口油气井提供了成功示范。通过无隔水管泥浆循环钻井技术, 介绍了支撑该技术的装备系统——无隔水管泥浆循环系统, 并重点说明了该系统中的核心装备——泥浆举升泵的选型范围、选型结果和性能参数计算方法。

关键词: 无隔水管钻井; 泥浆回收; 钻井技术; 电泵性能

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0381-05

Selection and calculation of parameters of the mud lifting pump for RMR

QIN Rulei^{1,3}, YU Yanjiang^{2,3}, CHEN Haowen^{1,3}, WANG Feihu⁴, WANG Linqing¹, XU Benchong^{1,3}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510000, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Guangzhou),

Guangzhou Guangdong 573199, China;

4. Sanjiang-Volat Special Vehicle Co., Ltd., CASIC, Xiaogan Hubei 432100, China)

Abstract: As a new technology and equipment system, the riserless mud recovery drilling technique has been successfully demonstrated in many oil and gas wells all over the world. In regard to the riserless mud recovery drilling technique, this paper introduces the equipment system—the riserless mud recovery system with focus on the range selection, selection results and parameter calculation of the core equipment of the whole system—the mud lifting pump.

Key words: riserless drilling; mud recovery; drilling techniques; parameters of pump

1 无隔水管钻井技术介绍及系统要点

1.1 无隔水管泥浆循环钻井技术介绍

为了克服开路钻井及隔水管钻井技术的不足, 2001年, 挪威 AGR 公司在其钻屑输送系统基础上成功研制无隔水管泥浆回收钻井技术(Riserless Mud Recovery, 简称 RMR)。RMR 最初仅仅用于浅水油气开采, 主要用来解决复杂海底条件和浅层风险等钻井难题, 保证表层井眼的顺利钻探(见图 1)

[1-4]。并且于 2003 年在里海首次进行了 RMR 商业应用。随着技术的发展, 无隔水管闭路循环钻进系统的应用也从浅海向深海发展。制约深海无隔水管泥浆循环钻进技术应用的难点主要在于泥浆举升泵举升能力以及泥浆返回管线强度的把控等。为此 AGR 公司与 Shell、BP America、DEMO2000 等组成工业项目组研究深水 RMR 系统, 并于 2008 年 9 月在中国南海水深 1419 m 海域进行现场试验并取

收稿日期: 2021-05-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.064

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“新型无隔水管闭路循环钻井技术研究”(编号: GML2019ZD0501); 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号: DD20190585)、“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20211421)

作者简介: 秦如雷, 男, 汉族, 1987 年生, 工程师, 硕士, 地质工程专业, 从事钻探设备研发工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, qinrulei@foxmail.com。

引用格式: 秦如雷, 于彦江, 陈浩文, 等. 无隔水管泥浆循环举升泵选型及性能参数计算方法[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 381-385.

QIN Rulei, YU Yanjiang, CHEN Haowen, et al. Selection and calculation of parameters of the mud lifting pump for RMR[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 381-385.

得理想的效果^[5],证明了其在深水钻井中的可行性以及在中国南海钻井的优点,例如:安全钻探浅层风险地层、克服泥浆录井限制、延伸表层套管设置深度等。

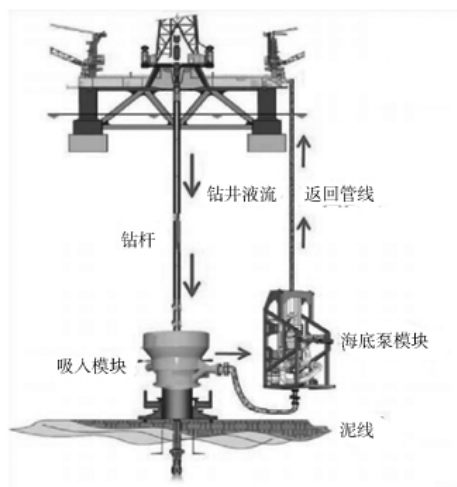


图1 浅水RMR系统

近些年随着环保要求的提高,钻井所用泥浆不得随意排海,加之海洋钻井中的地层破裂和孔隙压力窗口狭窄,可以很好地解决上述问题的RMR技术越来越受到欢迎,BP、Shell、Statoil、Rosneft等国外石油公司将RMR技术应用到多个钻探项目中。目前RMR技术已成功应用超过300口井,其工艺方法及相关设备已发展较为成熟(见表1)。

无隔水管泥浆回收钻井技术作为一种新兴深海钻井技术,由于国外公司对此进行技术封锁,国内目前尚无工程应用。国内研究目前处于跟踪研究阶段,中国石油大学(华东)、广州海洋地质调查局、中

国地质科学院勘探技术研究所等科研机构共同承担研究课题,对无隔水管泥浆循环钻井技术进行探索开发。

1.2 无隔水管泥浆循环系统组成

RMR系统按其功能区域可分解为如下5部分:吸入模块、泥浆举升泵、控制系统、脐带缆及绞车和泥浆上返管串。各部分主要实现的功能见表2。

2 泥浆举升泵介绍

2.1 输送介质介绍

深海钻井时,井口返回的泥浆是由固相地层岩石碎屑与液相钻井液组成的固液两相流体混合系统。其中的地层岩石碎屑是钻头旋转破碎的岩石碎屑颗粒,一般粒径范围 $<10\text{ mm}$,具有粒径组成跨度大且部分粒径较粗大等特点^[6-8]。

另外,根据地层实际情况液相的钻井液,需要添加聚合物、润滑剂、膨润土等添加剂,以改善其密度、粘度等性能。因此,钻井液的流变特性不同于清水或海水,其密度和粘度等特性会在很大程度上影响泵送效果。

目前常用于海洋钻井(开孔阶段)的泥浆为预水化膨润土浆。此种泥浆配方为:烧碱 $1\sim 2\text{ kg/m}^3$ +纯碱 $2\sim 3\text{ kg/m}^3$ +膨润土 $80\sim 100\text{ kg/m}^3$ 。

2.2 泵型选择

泥浆举升泵是RMR系统中最重要水下执行机构,由水下电机和泵头组成,是将非洁净的钻井液(含钻屑或气体)举升至船舶的核心设备。

工业常用的流体输送泵达19种之多,如离心泵、盘片泵、轴流泵、柱塞泵等,但不是所有泵都适宜

表1 RMR技术钻井记录

地区	井眼数量	水深/m	时间	技术优点
北海	35	85~430	2004~2009	
里海	34	152	2004	
澳大利亚	24	47~306	2006~2009	
俄罗斯及巴伦支海	7	76~350	2006~2009	实现海底“零排放”
埃及(地中海)	7	85~108	2007~2008	降低泥浆和录井成本
中国南海	1	1419	2008	降低浅层作业风险
美国墨西哥湾	1	620	2009	增加表层套管下入深度
挪威	53	65~925	2004~2013	
英国	9	85~600	2006~2013	
加拿大	16	120	2010~2013	

表2 RMR系统组成及主要功能

子系统	主要功能
吸入模块	水下泥浆液位识别
	井口监控及通讯
	水下通讯线缆回接
	水下泥浆管线回接
泥浆举升泵	泥浆举升
	泥浆流量控制
	固液两相流下稳定可靠运转
控制系统	采集各监测传感器数据
	自动分析控制泵量
	RMR系统各部件配供电
	水下泵供电保护
	动力电升压
泥浆上返管串	提供泥浆上返通道
	悬挂举升泵
	捆绑脐带缆
	甲板挠性接头悬挂
	海底锚张紧补偿
脐带缆及绞车	海底跨接软管连接吸入模块
	管线耐冲蚀,接头可多次使用
	举升泵供电
	水下控制系统供电
	水下井口检测系统通讯
	水下设备监测系统通讯

于工程施工。通过参照行业内经验,查阅大量文献资料,并根据输送介质含固相颗粒的特性和泵的结构特点,认为离心泵、盘片泵和容积泵3种结构形式的泵可用于输送固液两相流。

2.2.1 离心泵

离心泵的主要部件有叶轮、轮毂、蜗室等。离心泵在工作前泵内需要充满液体,电机带动轮毂及叶轮旋转,叶轮对位于叶片之间的液体作用产生离心力,液体由叶轮中心被抛向边缘,此时液体的流速较高。泵体汇集从不同叶轮流道流出的液体,这些液体在泵体内顺着蜗室断面面积逐渐增加的方向运动,蜗室的作用不仅在于汇集从叶轮区域流出的液体,同时将液体的动能转化为压力能。离心泵的结构示意图见图2。

2.2.2 盘片泵

由特殊的平板做叶轮,利用输送的介质自身粘性和盘片轮特殊的结构使介质形成层流把流体介质

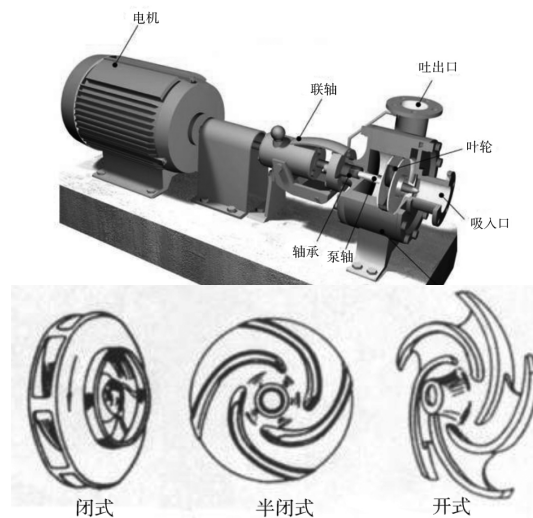


图2 离心泵

从进口拉入推出出口。盘片泵集中了离心泵结构简单和容积泵输送能力强的特点,靠介质内部的摩擦力和转盘旋转时产生的离心力来实现对介质的输送。盘片泵结构示意图见图3。

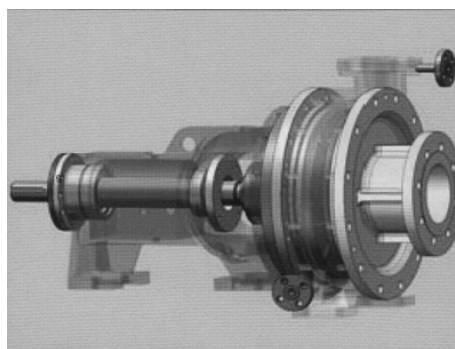


图3 圆盘泵

盘片泵可以在含有固体颗粒、粘性大、含有气体、具有很强的磨损性、腐蚀性等对泵具有强烈破坏性和使泵性能严重退化的介质中降低泵的磨损,做到介质对泵腔无冲击,同时介质不被破坏。

2.2.3 容积泵

容积式泵是指利用泵体内容积的变化来输送液体的泵,比较典型的容积泵有往复泵和转子泵。

往复泵是利用活塞的往复运动来输送液体的泵(见图4),靠活塞的往复运动将能量直接以静压能的形式传送液体。由于液体是不可压缩的,所以在活塞压送液体时,可以使液体承受很高的压强,从而获得很高的扬程。



图4 容积泵(往复泵)

转子泵由静止的泵壳和旋转的转子组成,它没

有吸入阀和排出阀,靠泵体内的转子与液体接触的一侧将能量以静压力形式直接作用于液体,并借旋转转子的挤压作用排出液体,同时在另一侧留出空间,形成低压,使液体连续吸入。转子泵的压头较高,流量通常较小,排液均匀,适用于输送粘度高,具有润滑性,但不含固体颗粒的液体。齿轮泵和螺杆泵是最常见的转子泵。

3种类型泵的具体细分种类和工作特点见表3。

表3 3种泵特点对比

类型	离心泵	盘片泵	容积泵	
细分	蜗壳泵	圆盘泵	隔膜泵/活塞泵	螺杆泵
结构特征	单级离心泵	无叶轮,使用圆盘驱动液流	陆地输料泵/泥浆泵结构	单螺杆/双螺杆
水力效率	60~65%	约为40%	≥90%	60%
优点	单台泵造价低 通过性好,不易卡阻	无脉动,输送的介质不被破坏,盘片经久耐用	工作效率高,特性曲线易掌握,可达到较高水压	容积式泵,效率较高
缺点	泵与电机为一体,多泵串并联使用时需增加电机数量	水力效率低	原理结构决定了其体积和重量最大,不适合水下布放	短时间输送含砂介质,输送低粘流体效率低

综合分析泥浆中固相颗粒的通过性、泥浆性质与泵结构可靠性、尺寸质量、工作效率和成本等因素,在3种泵型中最终选择离心泵(蜗壳泵)作为泥浆举升泵。

2.3 泵的其他要求

作为泥浆举升泵使用可靠性的重要影响因素,泵叶轮的耐磨性、整体的耐腐蚀性也应着重加以考量。

叶轮的耐磨性。泥浆举升泵作为将非洁净的钻井液举升至船舶的关键设备,离心泵叶轮是最终的执行部件,叶轮表面的耐磨层质量决定其使用寿命。由于长期受到钻井液中固相颗粒和气体的高速冲刷,叶轮耐磨层会因摩擦或气蚀而产生破坏,最终导致泵效率降低。因此,需重点研究影响叶轮耐磨性的材料和涂层2个重要因素。关键的易损部件,包括衬里、耐磨板、叶轮和机械密封件,可以从泵吸入侧卸下并更换。

泥浆举升泵整体的耐腐蚀性。泥浆举升泵工作于深海中,其所在的环境存在着海水电腐蚀、海洋生物腐蚀、酸性气体腐蚀等腐蚀类型。为了提高泥浆举升泵在此环境中的工作可靠性,需对电机与离心泵头等关键部件的制作材料、密封工艺和涂装工艺

等进行深入研究,以保证泥浆举升泵的使用寿命符合要求。

3 举升泵水力参数的计算方法

泵型选择确定后,需要进行泵参数的计算工作,这是下一步设计泵头工作的重要基础。与泵工作性能直接相关的技术参数主要有流量、扬程、进出口尺寸等^[9-12]。

3.1 流量与扬程计算

泵的流量应满足其“驱动泥浆上升的速度>颗粒群沉降速度”的条件。同时需综合考虑现有钻井泵的排量范围,选择与之范围重合的举升泵,以满足RMR系统变排量举升功能的实现。颗粒群沉降速度可参考关醒凡的《现代泵理论与设计》一书中公式计算:

$$W_t = \xi S_f^{0.815} \left(g d \frac{\rho_s - \rho_{df}}{\rho_{df}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$W_{gt} = W_t e^{-(2.65C_v - 3.32C_v^2)}$$

式中: W_t ——颗粒临界沉降速度, m/s; W_{gt} ——颗粒群临界沉降速度, m/s; ξ ——修正系数,一般取值1.529; S_f ——结合颗粒形状系数,一般取值0.9; ρ_s ——颗粒密度, kg/m³; ρ_{df} ——钻井液密度, kg/m³; d

——管道直径,mm; C_v ——流量系数。

泵的扬程应根据工程需要来确定,也即需满足“沿程压降+净举升高度 \leq 最小扬程”这一最低要求。其中沿程压降是泥浆沿着管路输送时由于摩擦产生的压力损失,单位压力损失即为水力坡度 J_m ;净举升高度为船舶甲板与海面间的净空高度(气隙)。

水力坡度 J_m 的计算公式为:

$$J_m = C_v \frac{\rho_s - \rho_{df}}{\rho_{sw}} + 1.192 \left\{ 0.11 \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} + 0.2578 \left(\frac{\sqrt{gD}}{V_m - W_{gt}} \right)^{2.9514} C_v^{1.1108} \left(\frac{\rho_s - \rho_{sw}}{\rho_o} \right) \right\} \frac{V_m^2}{2gD} \quad (2)$$

式中: ρ_s 、 ρ_{df} 、 ρ_{sw} ——颗粒、钻井液和海水的密度,kg/m³; D ——管道内径,mm; Δ ——管道粗糙度,取值0.30; V_m ——实际提升速度,m/s。

计算出水力坡度后 J_m 后,即可计算泵的最小扬程

$$H = J_m \times L + H_{ag} \quad (3)$$

式中: L ——管道长度,m; H_{ag} ——船舶的气隙,m。

3.2 泵进出口尺寸计算

泵的流量与扬程确定后,即可计算出进出口尺寸。根据泵流量、最小流速的关系,推导泵出口尺寸的计算公式为

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_m}} \quad (4)$$

式中: D_s ——出口尺寸,mm; Q ——泵流量,m³/h; V_m ——实际提升速度,m/s。

4 总结

(1)RMR系统泥浆举升泵有多种泵型可以选择,本文选择离心泵主要是考虑其造价低、不易卡阻等优点。但是理论与实践之间还有较长的距离,最终需要通过实践来做出最终的选择。

(2)举升泵的理论计算是泵设计的重要基础,随着现代计算机仿真技术的发展,未来可应用Fluent、Abaqus等大型有限元计算软件,可在泵型分析与流动分析等方面进行辅助泵性能预测,提升泵的优化设计。

(3)本文选择的计算理论与公式都较为理想。实际设计中,还应考虑泵的最佳功率配置、发热、密封等决定其可靠性和经济性的多方面因素。

参考文献:

- [1] 王德,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.
- [2] Arnold J F. Riserless mud return system: US, US4149603A [P].1979.
- [3] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.
- [4] Smith D, Tarr B, Winters W J, et al. Deepwater riserless mud return system for dual gradient tophole drilling [C]// Spe/iadc Managed Pressure Drilling & Underbalanced Operations Conference & Exhibition, 2010.
- [5] 王志伟,陈国明,张云腾.水合物无隔水管泥浆闭式循环钻井系统设计与研究[C]//西安石油大学.2018IPPTC国际石油石化技术会议论文集.西安华线网络信息服务有限公司,2018.
- [6] 邹伟生,卢勇,李哲免.深海采矿提升泵的数值模拟分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(6):59-63.
- [7] 邹伟生,刘瑞仙,刘少军.粗颗粒海底矿浆体提升电泵研究[J].中国机械工程,2019,30(24):45-50.
- [8] 刘瑞仙.海洋采矿提升电泵的分析与研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [9] 蔡超.深海采矿扬矿泵参数设计及模拟研究[D].北京:中央民族大学,2015.
- [10] 董星亮,曹式敬,唐海雄.海洋钻井手册[M].北京:石油工业出版社,2011.
- [11] 张叶.海底泥浆举升圆盘泵设计应用技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
- [12] 刘杰.无隔水管泥浆返回钻井系统水力学计算及吸入模块设计[D].北京:中国石油大学,2010.