

分水钻具的设计及其数值模拟分析

张鹏宇^{1,2}, 郭威^{1,2}, 贾瑞^{1,2}, 赵帅^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:岩(矿)心采取率低是单管取心钻进的主要问题。在钻进时由于冲洗液对岩心的冲刷作用,使岩(矿)心中的矿物颗粒不断被冲洗液带走,造成岩心缺失、岩心采取率过低。从钻具内部流速分布、冲洗液冲刷作用、岩心采取率、冲洗液携粉等角度出发,分析了单管钻进时造成岩心采取率过低的原因,采取分流、降速等方法,设计了一套可以在一定程度上提高岩心采取率的分水单管钻具,通过数值模拟,证明了该钻具在满足及时清除孔底岩粉的条件,能使单管钻具中岩心周围冲洗液流速降低25%左右,进而解决常规单管钻进岩心采取率不足等问题。

关键词:单管钻进;岩心采取率;冲洗液分流;分水单管钻具;数值模拟

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0053-05

Design of Split-flow Drilling Tool and Its Flow Field Numerical Simulation/ZHANG Peng-yu^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, JIA Rui^{1,2}, ZHAO Shuai^{1,2} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Land and Resources, Changchun, Jilin 130026, China)

Abstract: The low core recovery is the main problem in single tube drilling. That tiny mineral particle of the core being taken away by drilling fluids continually causes the deficiency of core. The reasons for low core recovery is studied from the points of velocity profile, erosion action, core recovery and cuttings removal, and a set of single tube split-flow drilling tool has been designed with flow-distributing and area increasing to improve core recovery. The 3d-fem numerical simulation shows that this modified drilling tool can reduce the velocity of drilling fluids around core by about 25% under the condition of timely cuttings removal and solve the low core recovery.

Key words: single tube drilling; core recovery; flushing fluid distribution; split-flow single tube drilling tool; numerical simulation

0 引言

岩心钻探的主要目的是通过采取岩矿心来了解矿体的埋藏深度、产状、厚度、分布规律、矿物组成、岩性、构造及成矿条件等,岩矿心采取的数量多少和品质好坏,对判断地质构造、评价矿产资源和油气开发的准确性和可靠性有重要影响。因此,岩矿心的采取和整理是衡量钻孔质量的重要指标。岩矿心应达到采取率、完整度、纯洁度和代表性等要求^[1-2]。

取心方法与钻进方法密切相关,应与钻进方法配套适应于不同岩矿层岩心,取心方法的选择应根据岩矿层的组成及结构特性所形成的物理力学性质以及相应的取心难易程度选择钻进和取心方法。单管取心钻具结构简单,在地质岩心钻探中,多用于上部第四系、新近系、古近系岩矿层钻进取心。在粘性大、塑性强、遇水膨胀的高岭土以及松散易冲刷的地

层中进行地质岩心钻探时,所使用的膨润土冲洗液粘度大,只能选用单层岩心管钻具的取心方法^[3]。三江盆地前进拗陷富地1井地层主要为砂岩、泥岩,采用的造浆材料主要为膨润土,冲洗液粘度较大,选用单管钻进方法施工,在钻遇松散的泥岩、砂岩地层时,岩心受冲刷严重,采取率偏低。

在岩心钻探中,经常会遇到极破碎、软弱易冲蚀等复杂地层,这类地层岩石破碎、松软,在进入岩心管前往往易被冲洗液冲蚀,进入内管也常因卡簧卡不牢在打捞时掉落造成空管^[4]。

针对单管钻进施工过程中岩心采取率偏低的问题,对常规钻进工艺方法和单管钻具孔内流场进行分析。

在冲洗液的排量选择上,冲洗液应及时对孔底的岩粉进行清除,并且能顺利携带岩粉上返。结合

收稿日期:2016-07-11; 修回日期:2017-04-04

基金项目:中国地质调查项目“三江盆地东部地区地质调查井工程”(编号:12120115001601-05)

作者简介:张鹏宇,男,汉族,1992年生,吉林大学在读硕士研究生,地质工程专业,研究方向为地下资源钻采技术及天然气水合物取样技术,吉林省长春市西民主大街938号,1187463850@qq.com。

图1(冲洗液流速分布示意图),由于钻杆与孔壁的空隙较岩心管与孔壁空隙和岩心管与岩心的间隙大,使得冲洗液流速 V_3 小于 V_2 和 V_1 ,较大的 V_1 和 V_2 会造成岩心受到强烈的冲刷作用,也会对

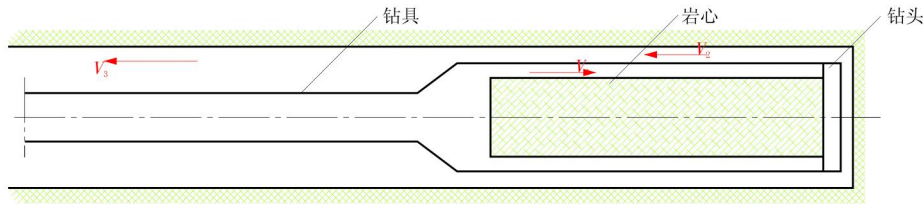


图1 冲洗液流速分布示意图

的影响,孔底冲洗液的压力会存在波动,会造成流经岩心管的冲洗液流速不稳定,可能加剧湍流的强度,加速对岩心的冲刷作用^[6]。

岩心管内冲洗液的流速是影响岩心采取率的主要因素,在满足及时清除孔底岩粉的同时,应尽可能降低流速 V_1 和 V_2 。本文所提出的提高岩心采取率措施的主要原理是适当降低岩心管中冲洗液的流速,据此设计了分水取心钻具,包括稳压分流装置、增径岩心管、分水装置以及与之配套的分级PDC钻头。

1 稳压分流装置

1.1 工作原理

稳压分流装置的工作原理类似于溢流阀,由弹簧控制阀芯开启压力和开启的程度。当岩心管上部的冲洗液压力大于阀芯开启压力时,冲洗液推动阀芯上行,部分流体经由阀门排出,使得流至孔底的冲洗液量适当减少,岩心管内部压力稍大于设定压力时,少量冲洗液通过阀门流至外钻具外部,岩心管内部压力大出设定值较多时,大量冲洗液通过阀门流出,通过这种调节方式维持岩心管内部压力稳定。

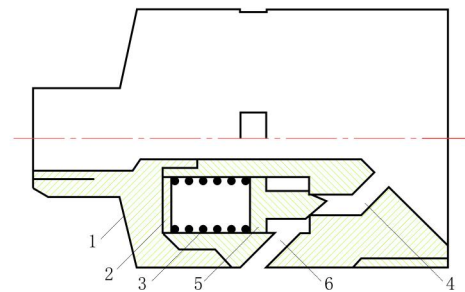
1.2 结构设计

常规钻具中异径接头结构简单,易于更换,把环状溢流阀整合到异径接头中,得到稳压分流装置的结构图和实体图(见图2、图3)。其具体稳压分流原理如下。

根据冲洗液携粉能力和钻进参数设定岩心管内压力 P ,该压力等同于阀芯开启压力,当系统内部冲洗液压力 P' 大于设定值 P 时,冲洗液压力作用在环状阀芯上,推动弹簧和环状阀芯上移,冲洗液入口和冲洗液出口之间的通路被打开,部分冲洗液沿此通路分流出去,泄去 P 和 P' 的压力差 ΔP ,维持岩心管内

孔壁的稳定性造成影响,此外,垂直向下流动的冲洗液会在岩心顶端造成很大的压力,易导致岩心堵塞,降低岩心采取率^[5]。

此外,考虑到因冲洗液泵工作特性及其它因素



1—壳体;2—调节垫圈;3—弹簧;4—冲洗液入口;5—环状阀芯;6—冲洗液出口

图2 稳压分流装置半剖视图

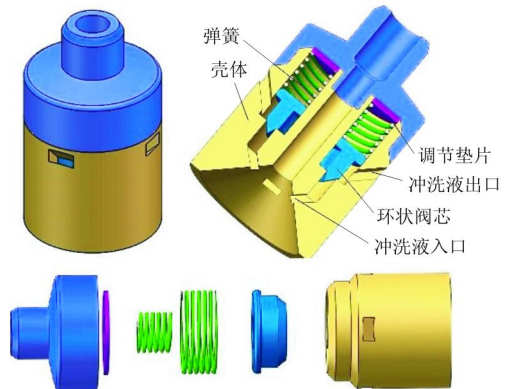


图3 稳压分流装置实体图

的压力和流速稳定。环状阀芯打开的门限压力 P_1 和阀门开启程度由垫圈和两组弹簧进行控制。

2 增径岩心管

2.1 工作原理

为了在钻进过程中保持岩心稳定性的同时,降低冲洗液对岩心的冲刷作用,提高岩心的采取率和完整性,可在岩心管上设置一定数量的沟槽,来增加岩心和岩心管间的过流面积,降低该区域的冲洗液流速,达到预期的效果。

2.2 结构设计

岩心管中岩心和管壁之间的间隙非常小,常见的N、H系列的单管取心钻具管材匹配见表1,其间隙大小分别为1.5、2 mm,岩心和管壁环空间隙太小,会使冲洗液流速过大,对岩心的冲刷作用增强^[7],此外,过小的环空间隙会增加循环阻力,增加冲洗液泵的荷载。针对以上问题,所设计的增径岩心管(内壁带沟槽)见图4。

表1 取心钻具管材匹配规格尺寸(外径/内径)

钻具类别	部件	规格口径/mm	
		N	H
单管	钻头	76/60	96/76
	岩心管	73/63	92/80

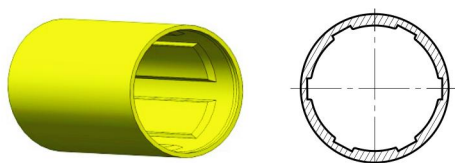


图4 增径岩心管

在保证岩心管有可靠强度安全系数的同时,在其内壁增加适当大小和数量的沟槽,能有效增加岩心和岩心管之间的间隙,使得冲洗液流速 V_1 降低,在一定程度上降低冲洗液对岩心的冲刷。之所以没有单独增大岩心管的内径,而采用增加沟槽的形式,一方面是为了保持岩心管的刚度,另一方面是保证岩心在岩心管中的稳定性。另外,对岩心管内壁沟槽的边棱做圆角处理,减轻沟槽边棱对岩心的刮磨作用。

3 分水装置

3.1 工作原理

为了避免冲洗液对岩心的直接垂直角度的冲刷,单层岩心管钻进时有时会采用分水帽来降低冲刷作用,而常规的分水帽使得冲洗液过流断面进一步缩小,增大了循环阻力,在分水帽区域的速度梯度也较大,易产生湍流,增加对岩心冲刷程度,不易于保证岩心的完整性^[8],针对这种情况,设计了一种与增径岩心管相配套的新型分水装置,避免因冲洗液岩心的垂直冲刷使岩心劈裂造成堵塞,同时避免在分水装置处产生过大的流速梯度。

3.2 结构设计

所设计分水装置如图5所示,该分水装置与增径岩心管相配合,锥形的面板部分用来抵抗冲洗液的垂直角度冲刷作用,而侧面的六个翼板嵌入岩心

管的沟槽中,用来稳定分水装置在岩心管的位置,使分水装置随岩心一同相对于岩心管上升。该分水装置在降低冲洗液直接冲刷作用的同时,保证了环空间隙不至过小,使冲洗液流速以小的速度梯度通过分水装置。

在分水装置的材料选择上,应尽量选择强度高、硬度大、耐冲蚀的材料,在满足强度要求的同时,尽量降低分水装置的壁厚。

4 分级钻头

4.1 工作原理

PDC钻头在钻进泥岩地层时,易产生泥包,影响钻速和取心,PDC钻头的钻头类型,冠部形状,水力结构,切削齿形状、数量、角度等均会对泥包产生重要影响^[9]。实践证明,在钻进泥岩、砂岩时,带有棱边(三角形或四边形)的复合片钻头比采用圆形复合片钻头进尺效果好。针对松散易冲刷地层,采用复合片分级布置的方式,上下两层分别为四边形、三角形复合片,中间设置较大的水口,这种上下布置的方式有利于冲洗液携带岩粉、保持孔底清洁。

4.2 结构设计

分级钻头结构见图6。该钻头由钻头刚体、四边形复合片和三角形复合片组成,四边形复合片和三角形复合片上下布置,所采取的分级排布的PDC复合片类似于超前钻头,下层复合片超前破碎钻头下方地层,上层复合片破碎外圈岩体,这种布置方式可以保证孔底清洁、降低冲洗液对岩心的冲刷作用,在钻头底部设置6组水口;由于所采取的取心方式为卡簧卡取岩心,在钻头刚体内部还设置有卡簧座^[10-13]。



图5 分水装置

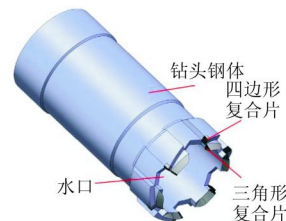


图6 分级钻头

5 数值模拟

5.1 流体区域模型的抽取及网格划分

为了分析改进后分水钻具内部冲洗液流速分布,将所设计的整套钻具进行装配(见图7),调整环状阀心的上移距离为5 cm,另外,绘制含岩心的钻

孔模型,将改进后的钻具与钻孔模型合理装配,见图8。为了形成对比,同时在相同条件下对普通单管钻

具进行数值模拟,运用 FLUENT 对分水钻具和常规钻具进行仿真模拟。



图7 改进钻具



图8 改进钻具和钻孔模型

将图8模型导入到 ANSYS 的 DesignModeler 模块中,以 by caps 方式抽取出流体区域模型,并在

WorkBench 中划分网格,对模型进行四面体网格划分,对结构复杂的区域做加密处理,如图9所示。

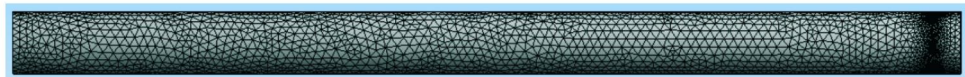


图9 分水钻具流体区域网格划分及边界条件

5.2 边界条件定义及定义求解

将划分完成后的网格导入至 FLUENT,定义入口、出口及壁面,如图10所示。设置冲洗液入口为 inlet,入口处流速设定为为 3.5 m/s(对应冲洗液泵量为 200 L/min),压力为 1.8×10^7 Pa,上返环空顶部为 outflow。冲洗液密度 1.08 g/cm^3 ,粘度为 $0.008 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。采用 $k-e$ 湍流模型。

(2)动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot u_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + S_M$$

(3)湍流 RNGk - ε 模型方程:

$k-\epsilon$ 湍流模型是基于涡粘性假设的双方程湍流模型, k 是湍流动能, ϵ 是湍流耗散率,湍流考虑了平均流动中的旋转及旋流效应,RNGk - ε 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,因此,采用该模型,其方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \epsilon + p_{kb}$$
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{e1} p_k - C_{e2} \rho \epsilon + C_{e1} p_{kb})$$

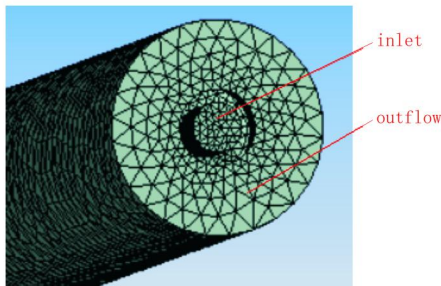


图10 定义边界条件

根据流体动力学建立钻具内流场的 $N-S$ 控制方程,由于模型内部不考虑温度变化,因此,不加入能量方程^[14-16],对应的质量守恒和动量守恒方程如下。

(1)质量守恒方程:

$$(\partial \rho / \partial t) + \partial(\rho U_j) / \partial = 0$$

设定监视器,计算求解。

5.3 后处理

将运算结果导入至 Tecplot 中进行后处理,取中心切面,查看钻具内部流速分布,分水钻具和常规钻具流速分布见图11,岩心周围冲洗液自孔底至岩心上部速度分布见图12。

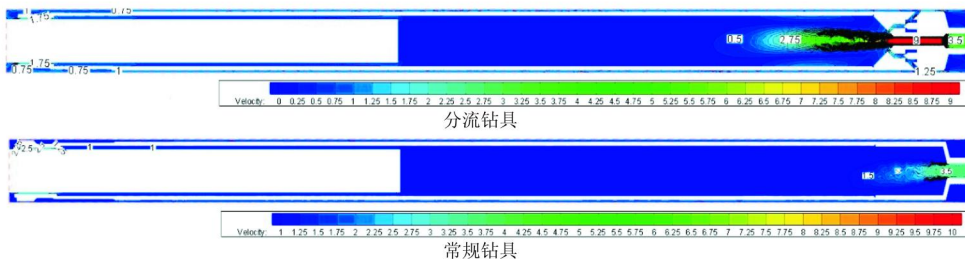


图11 速度分布云图

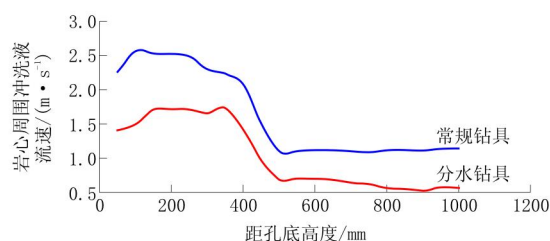


图12 岩心周围冲洗液流速分布

5.4 结果分析

在冲洗液泵量为 200 L/min、环状阀芯上移 5 cm 条件下,由图 11、图 12 可知,孔底环空冲洗液上返的流速可达 0.75 ~ 1.75 m/s,可以达到及时清除孔底岩粉、冷却钻头的需求;常规钻具中的冲洗液全部由岩心管流经孔底,再经环空上返至地表,经计算,在上述泵量下,常规岩心周围冲洗液平均流速可达 0.9 ~ 2.3 m/s,而通过对改进后的钻具进行数值模拟,结果显示,岩心周围的冲洗液流速为 0.5 ~ 1.75 m/s。改进后的钻具可以在满足清除岩粉的同时,可以显著降低岩心周围的冲洗液流速,从而降低冲洗液对岩心的冲刷作用,提高岩心采取率。

6 结论

(1)在松散易冲刷的砂岩、泥岩中钻进时,常出现岩心不完整、岩心采取率较低的现象。主要原因是单管钻具中冲洗液对岩心直接冲刷作用,由于在岩心管中环空间隙较小,冲洗液流速往往过大,冲洗液对岩心的冲刷作用就会加剧,单管钻进过程中降低冲刷作用、提高岩心采取率的途径,除了采用合理的钻进规程参数外,还可通过钻具结构的改进降低岩心周围冲洗液的流动速度。

(2)所设计的稳压分流装置可以分流出部分冲洗液,降低由钻杆中心通入孔底的冲洗液流量,同时能稳定岩心管内冲洗液压力和流速;增径岩心管主要是通过增加岩心与岩心管的环空面积来降低该处的冲洗液流速;分水装置与岩心管配合,防止冲洗液对岩心的垂直冲刷作用;分级钻头采用三角形复合片与四面性复合片相组合,同时与改进后的较大水口配合,使排粉顺畅。理论上由上述装置组成的钻具可以降低冲洗液对岩心的冲刷作用,提高岩心采取率。

(3)由数值模拟结果可知,改进后的分水钻具与常规单管钻具相比,岩心管内部岩心周围的冲洗液流速有一定程度的降低,环空间隙和孔底的冲洗

液流速均可达到清除孔底岩粉的要求。由于流速是影响冲刷作用的主要因素,可知该钻具可显著降低岩心周围的冲洗液流速,提高岩心采取率。

(4)现场施工应根据实际需求,通过更换调节垫、更换弹簧和调节钻进规程参数等途径,控制分水装置的分水流量,避免因孔底流量过小导致卡钻、孔底流量过大造成岩心采取率降低等情况。

(5)本文在理论和数值模拟层面对分水钻具做了研究分析,尚未应用于生产实践,为了验证其可行性,下步研究将结合实际应用,完善钻具模型、加工成品,并在实际钻探工程中检验其取心效果,并针对应用中的不足做进一步改进。

参考文献:

- [1] 刘晓阳. 地浸砂岩型铀矿松散岩层取心钻进技术研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学(武汉),2006.
- [2] 张绍和,钱书伟,都志斌,等. 一种适用于极破碎、软弱地层的取心钻具:中国,CN201220098821. X[P]. 2012-10-24.
- [3] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992:119-120.
- [4] 钱书伟,张绍和,李锋,等. 软弱易冲蚀地层钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):29-31.
- [5] 柯玉军. 严重漏失破碎地层钻孔综合施工方法及效果[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(10):25-27.
- [6] 汪涛. 云南某矿区复杂地层深孔岩心钻探关键技术应用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.
- [7] 滕秀静. 浅析影响岩心采取率质量的因素[J]. 林业科技情报,2011,43(3):98-111.
- [8] 宋国栋. 研究金刚石单管钻进工艺中岩心堵塞的解决方法[J]. 矿产与地质,1992,(4):335-336.
- [9] 陈修平,邹德永. PDC 钻头泥页岩地层钻进泥包机理及对策研究进展[J]. 天然气工业,2014,34(2):87-91.
- [10] 赵佩华, Hariharan P R. PDC 钻头的水力设计和轮廓是减少泥包的关键[J]. 国外石油机械,1997,7(5):8-14.
- [11] Hemphill T, Clark K. Effects of PDC-bit selection and mud chemistry on drilling rates in shale [J]. SPE Drilling & Completion, 1994,9(3):176-184.
- [12] 赵远刚,邓伟,石少云. 用于煤系软硬互层新型 PDC 取心钻头的设计与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):97-98.
- [13] 朱海燕,王锡洲,刘时英,等. PDC 钻头水力学研究最新进展[J]. 石油钻采工艺,2009,(5):23-28.
- [14] 吴金生,陈礼仪,张伟. 破碎松软地层取心钻头孔底流场数值模拟及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):107-110.
- [15] 于小龙,祝效华,贾彦杰,等. 中心分区式 PDC 钻头流场数值模拟[J]. 石油钻探技术,2011,39(4):107-110.
- [16] 黄红梅,翟应虎,王辉,等. 实体 PDC 钻头流场数值模拟与实验验证[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,(3):49-52.