

破碎松软地层取心钻头孔底流场数值模拟及应用

吴金生^{1,2}, 陈礼仪¹, 张伟²

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:复杂地层取心和孔壁稳定一直是困扰地质钻探界的 2 大技术难题。以汶川地震科钻为例, 5 个钻孔都在断裂带上, 地层极破碎、松软。针对部分孔段取心率低问题, 设计一种新型阶梯式隔水底喷取心钻头, 利用 CFD 技术对钻头孔底流场进行数值分析, 优化钻头排水槽结构、泥浆性能和水力参数, 寻找一种最佳组合, 为提高岩心采取率、预防堵心, 提高孔壁的稳定性奠定基础。

关键词:破碎松软地层; 防冲蚀取心钻头; 金刚石钻头; 流场; 数值模拟; 结构优化

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2013)07-0107-04

Numerical Stimulation of Bottom Flow Field of Core Bit in Broken Soft Formation and the Application/WU Jinsheng^{1,2}, CHEN Liyi¹, ZHANG Wei² (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Coring and keeping the stability hole wall in complex formation are technical difficulties in geological drilling circles. In Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFS), 5 boreholes were in the fault zone and the formation was extremely broken and soft. A new type of stepped bottom jetting anti-erosion core bit was designed, numerical analysis was made on bottom flow field by CFD technology to optimize drainage groove structure, mud properties and hydraulic parameters in order to find the best combination to lay foundations for core recovery rate improvement, core blockage prevention and higher hole wall stability.

Key words: broken and soft formation; anti-erosion core bit; diamond bit; flow field numerical simulation; structure optimization

1 选题依据与研究意义

钻探取心技术是当今地质找矿被公认的最终获取地下准确地质信息的必备技术手段。破碎松软地层取心和孔壁稳定一直是困扰地质钻探界的两大技术难题, 一是取心率低, 满足不了地学需求; 二是堵心, 取心回次短, 台月效率低; 三是孔内事故多, 孔壁坍塌掉块, 取心钻进无法进行。

汶川地震断裂带科学钻探项目(WFS)实施目的之一是连续获取岩心, 研究地震活动规律与发震机理。5 个钻孔都位于地震断裂带上, 历史上经历多次地震, 地层十分松软破碎, 膨胀缩径, 坍塌、掉块、漏失时有发生, 事故频发。在某些孔段, 因地层不详, 岩性变化大, 取心钻头难以选择, 取心率低, 回次进尺短, 堵心严重, 孔壁垮塌, 效率低下。如 WFS-2 孔在孔深 1370~1460 m 处取心率低, 约为 50%, 后采取侧钻补心。

针对破碎松软地层取心率低问题, 设计一种新型阶梯式隔水底喷取心钻头, 利用计算流体力学

CFD 技术对钻头孔底流场数值分析, 根据流场大小及分布, 优化钻头结构设计和水力参数, 调整泥浆性能, 对于提高岩心采取率、预防堵心, 提高孔壁的稳定性十分必要。

2 孔底流场模拟的国内外研究现状

随着计算流体力学的发展, 国外及国内石油钻井利用 CFD 技术对全面钻进钻头, 特别是 PDC 钻头孔底流场进行数值模拟, 通过改变流量, 喷嘴尺寸、位置、角度及结构形式, 主要用来提高排粉效果和钻进效率等。博坤^[9]对空气反循环钻头孔底流场进行数值模拟, 分析钻头结构对反循环效果的影响。胡郁乐^[10]、孟庆鸿^[11]通过 CFD 技术对保真取心钻具进行流场分析等。

钻头的水力学研究已逐渐从单纯实验研究方式进入实验模拟和孔底流场模拟相结合的研究阶段, 但仍存在以下问题: (1) 对钻头水力学研究及流场分析时, 仍以水为介质, 忽略了泥浆粘度、岩屑颗粒和孔底

收稿日期: 2013-06-15

基金项目: 科技部科技支撑计划专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFS)”项目之“科学钻探与科学测井”课题; 中国地质调查局地质大调查项目“破碎和强缩径地层大直径深孔取心钻进技术研究”(1212011120258)

作者简介: 吴金生(1970-), 男(汉族), 安徽人, 成都理工大学博士在读, 中国地质科学院探矿工艺研究所高级工程师, 汶川地震断裂带科学钻探工程现场负责人, 地质工程专业, 从事钻探技术及科学钻探研究工作, 四川省成都市郫县现代工业港(北区)港华路 139 号。

温度等工作环境对流场的影响;(2)在对钻头水力学进行研究时,往往只是假设钻头静止,没有考虑钻头旋转对流场的影响,孔底水平光滑,忽略钻头的切削齿等,在常温下来模拟流场的变化状态,实验结果并不准确;(3)取心钻头结构复杂多样,只要钻头结构稍有变化,其流场结构就相应地发生变化,对一种钻头的研究成果并不能用于其他钻头的流场分析,这就增加了钻头的设计难度,不利于新型钻头的开发。

综上所述,对取心钻头的流场分析和水力学实验时,应尽量做到分析的工况和钻头工作时的实际工况相同。只有对取心钻头的流场进行定量的分析,才能真正地实现钻头水力结构优化设计的目的。

3 取心钻头数学模型及控制方程

3.1 典型几何模型的建立

取心钻头孔底流场数值模拟与优化研究,是一个系统工程,通过 PRO/E 三维软件设计 2 种典型取心钻头结构几何模型(如图 1、2)。图 1 为普通的取心钻头,取心钻进大多采用此钻头,钻进效率高;图 2 为阶梯式底喷钻头,破碎松软地层取心率低时,可以采用此钻头减少泥浆对岩心的冲刷,提高岩心采取率。

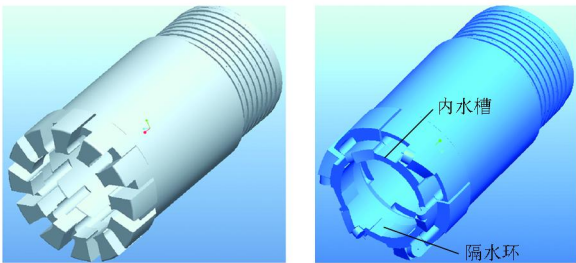


图 1 普通取心钻头 图 2 阶梯式隔水底喷取心钻头

3.2 边界条件及参数设置

3.2.1 边界条件

取心钻进过程中,钻头直径 150 mm,岩心管直径 139.7 mm,钻头与孔壁的环空间隙约 5 mm;钻头内径 94 mm,内管与外管间环状间隙 7.65 mm;采用底喷钻头,钻头内侧基本隔水,泥浆大多从钻头水槽流出,减少对岩心的冲刷,但有少量的泥浆从卡簧座与钻头内台阶间隙流出,润滑及冷却钻头内侧,一般该间隙为 5 mm 左右。

3.2.2 钻头材质

钢体采用 35CrMo,钻头采用金刚石或复合片(PDC)。

钻进参数:钻压 10 ~ 50 kN,转速 160、180 ~ 200 r/min,泵量 6 ~ 9 L/s,泵压 3 ~ 8 MPa,扭矩 3 ~ 7 kN·m。钻进方法采用回转钻进或冲击回转钻进。

3.2.3 泥浆性能参数

密度 1.15 ~ 1.35 g/cm³,漏斗粘度 30 ~ 40 s,静切力 5 ~ 10 Pa,动切力 8 ~ 13 Pa,塑性粘度 17 ~ 25 mPa·s,动塑比 0.35 ~ 0.60。

破碎松软地层取心时,钻进参数一定的情况下,通过改变取心钻头的结构尺寸,水槽的大小、高度及方向,泵量等方法提高岩心采取率,提高回次进尺,维护孔壁稳定。在保证足够的上返流速、冷却钻头的前提下,尽量减小泵量,减少对岩心的冲刷。

3.3 控制方程与湍流 $k - \varepsilon$ 两方程模型

根据计算流体动力学建立取心钻头孔底流场的 $N - S$ 控制方程,对控制方程求解时,考虑湍流效应,对应的质量守恒和动量守恒方程如下。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0$$

(2) 动量守恒方程:

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

式中: u_{eff} ——考虑了湍流效应得到的有效粘度; p' ——考虑湍流影响后的修正压力; μ ——湍流粘度,其表达式如下:

$$\begin{aligned} u_{\text{eff}} &= \mu + \mu_t \\ p' &= p + (2/3) u_{\text{eff}} (\partial U_k / \partial x_k) \\ \mu_t &= C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \end{aligned}$$

(3) 能量守恒方程:由于仿真计算不考虑流场内温度的变化,因此,计算中能量方程是未纳入求解对象的。

(4) 湍流 RNG $k - \varepsilon$ 模型方程

$k - \varepsilon$ 湍流模型为基于涡粘性假设的双方程湍流模型, k 是湍流动能, ε 为湍流耗散率,湍流考虑了平均流动中的旋转及旋流效应。RNG $k - \varepsilon$ 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,因此本次采用改进的动能 k 方程、湍流耗散率 ε 的方程。

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon_1} p_k - C_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon_1} p_{kb})$$

式中: C_{ε_1} 、 C_{ε_2} 、 ∂k 、 $\partial \varepsilon$ ——湍流模型常数。

4 孔底流场数值模拟及对比

应用 ANSYS Workbench 下标准的 CFX 仿真软件,对破碎松软地层取心钻头孔底流场进行定量数

值分析,得出阶梯式隔水底喷与常规取心钻头孔底流场速度流线图(如图 3、4)和局部压力云图(如图 5、6),根据孔底流体速度场、压力场的分布及大小,优化钻头结构和水力参数,反复模拟及优化,最终达到提高岩心采取率、增加回次进尺,保持孔壁稳定,提高钻进效率的目标。

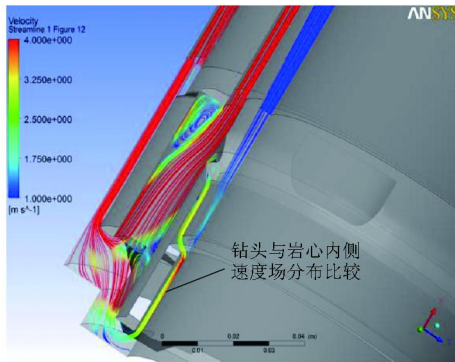


图 3 阶梯式隔水底喷钻头速度流场图

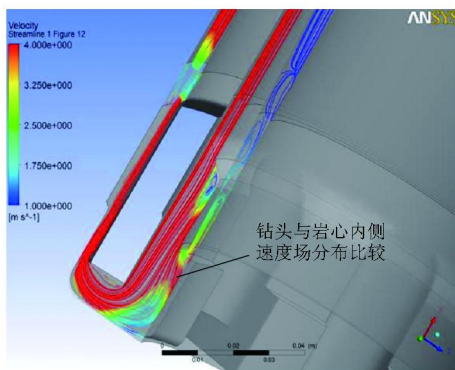


图 4 常规钻头速度流场图

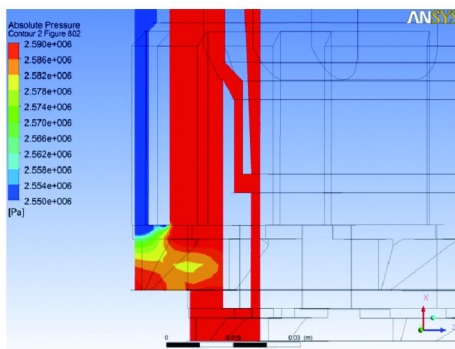


图 5 阶梯式隔水底喷钻头局部压力云图

从图 3、4 可以看出,常规钻头内侧与岩心接触面泥浆流速高, $v=4\text{ m/s}$,冲刷面积大,涡流大,不利于提高岩心采取率;阶梯式隔水底喷钻头内侧与岩心接触面泥浆流速低, $v=2.6\text{ m/s}$,冲刷面积小,涡流小,有利于提高岩心采取率,同时钻头内侧与岩心交界面有一定的液流,起到冷却钻头、携带岩粉、

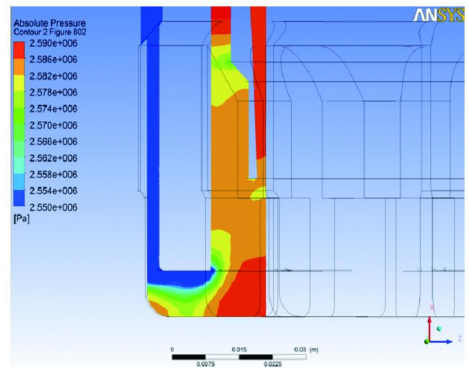


图 6 常规钻头局部压力云图

减少堵心、磨心作用。

从图 5、图 6 可以看出,阶梯式隔水底喷钻头内侧与岩心接触面压力高,最大为 2.59 MPa ,减少泥浆对岩心的冲刷,且在较小的压差下促使液流在孔底流动,润滑钻头,携带岩粉,不影响钻进速度;常规钻头内侧与岩心接触面压力较低,且压差大(为 0.1 MPa),对岩心冲击力较大,采取率会降低。

5 取心钻头在汶川科钻中的应用效果

汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-2 孔在孔深 $1375.19\sim 1438.30\text{ m}$ 处,采用常规不隔水电镀钻头,取心率低,为 44.45% 左右。为改善取心效果,将钻头设计成多种结构形式,如电镀半隔水、热压底喷等,取心效果虽有改善,但还不能满足地学研究要求。最后采用阶梯式隔水底喷钻头,实时优化阶梯高度、水力参数和泥浆性能,阶梯高度在 $10\sim 15\text{ mm}$,泵量 $6\sim 8\text{ L/s}$,在孔段 $1453.81\sim 1469.11\text{ m}$ 取心效果明显,采取率达 95.1% 。

原因分析,该地层为松软破碎的闪长岩、花岗岩、断层角砾岩,夹有断层泥等,软硬不均。半隔水及不隔水底喷钻头,孔底流量大,流场高,易冲刷岩心,取心率低;阶梯式隔水底喷钻头,阶梯高度适中,隔水环内侧留有水槽,既能减少岩心冲刷,又能适当润滑钻头,携带岩粉,采取率和回次长度明显提高。

WFSD-4 孔在孔深 $2290\sim 2319\text{ m}$ 处,地层为碳质板岩、断层角砾岩等,节理发育,破碎松软,稍有扰动,无法形成柱状岩心。采用常规 $\text{Ø}150\text{ mm}$ 电镀金刚石不隔水钻头,取心率低,泥浆将松散无胶结的岩心全部冲走,满足不了地学研究,后根据 2 号孔施工经验,立即采用 PDC 阶梯式隔水底喷钻头,取心内管为半合管,取心率达 92.4% ,节理裂隙保持原状(见图 7),岩心未被泥浆冲刷破坏。

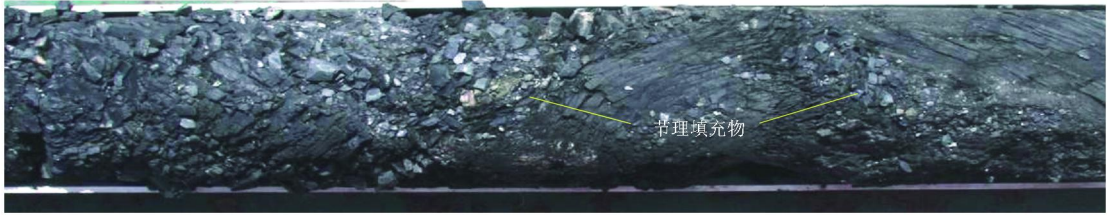


图7 采用阶梯隔水底喷钻头取的岩心(清洗后)

6 取心钻头结构优化与结论

6.1 钻头阶梯高度及排水槽大小的优化

阶梯式隔水底喷钻头排水槽尽量大,可以减小钻头与孔壁间的速度场,避免产生涡旋与对孔壁的冲刷,保护孔壁稳定。根据上述钻头孔底的速度场(图3)与压力场(图5)图,如何确定取心钻头最佳阶梯高度(即水槽高度),保证孔底流场适中,既不冲刷岩心,又不产生涡旋,顺利排出岩粉,还需要对孔底流场做进一步的分析。

WFSD-2孔针对取心率低,先后采取多种取心钻头结构设计,特别对阶梯式隔水底喷PDC取心钻头的阶梯的高度、排水槽的大小进行了优选,钻头的阶梯高度10~15mm时,排水槽面积约 2160mm^2 ,取心效果显著提高,其他高度时,取心率均有所降低。

6.2 钻头内侧润滑能力的优化

钻头隔水环不要太长,内侧留有水槽,调节钻头与卡簧座的径向间隙3~5mm,以适当的泥浆量流入钻头内侧,保证钻头润滑和携带岩粉,提高回次长度。

WFSD-2孔1452.91~1453.81m采用热压隔水底喷,1446.46~1450.42m采用合金隔水底喷取心时,钻头隔水环内侧没有水槽,阶梯高度高,钻头底部没有足够润滑,导致堵心、磨心,岩心采取率也降低。在1388.88~1390.40m补心时采用全隔液保真电镀取心钻头,结果无岩心且钻头胎体破坏,主要是钻头底部没有泥浆润滑而破坏。

6.3 泥浆性能与水力参数的优化

取心钻头结构确定后,优化泥浆性能,起到护心作用,避免岩心分散;优化水力参数,在满足上返流速携带岩粉的基础上,尽量减少泵量,减小对岩心的冲刷。

汶川科钻2号孔施工,泥浆保持一种良好的流变模式,同时采用变频器对泥浆泵进行调速,改变泵量,找到一种合适的水力参数。孔径150mm的钻孔实践中,泵量5~9L/s为最佳。

6.4 结论与建议

(1)对于破碎松软地层,应采用阶梯式隔水底

喷防冲蚀取心钻头,减少泥浆对岩心的冲刷,提高岩心采取率。

(2)钻头的排水槽尽量大,降低速度流场,减少对孔壁的冲刷,保持孔壁稳定;钻头隔水环不要太长,适当留有内水槽,调节钻头与卡簧座的径向间隙,以适当的泥浆量流入钻头内侧与岩心交界面,保证钻头润滑和携带岩粉,减少堵心、磨心。

(3)利用计算流体力学CFD技术对不同取心钻头模型、不同工况下进行数值模拟,定量化的计算孔底流场,大大缩短钻头的研发周期,节约成本。

(4)取心钻头数值模拟以泥浆为流动介质,粘度采用的非牛顿粘度率为Ostwald de Waele模型流场;考虑钻头旋转对流场的影响;考虑流场内的流动具有一定的旋流效应,计算采用RNG $k-\varepsilon$ 模型;未考虑温度的影响。分析的工况和钻头工作时的实际工况相同。

参考文献:

- [1] 吴金生,贾军,段玉刚,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻探事故预防与处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9).
- [2] 张伟,贾军,胡时友,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻探施工进度综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9).
- [3] 王稳石,朱永宜,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9).
- [4] 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,(10).
- [5] 李万平.计算流体力学[M].湖北武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [6] 王福军.计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [7] 李天太,孙正义,李琪.实用钻孔水力学计算与应用[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [8] 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,(6).
- [9] 博坤,殷琨,张春阳.反循环钻头结构仿真分析及试验研究[J].矿山机械,2008,36(23).
- [10] 胡郁乐,张晓西,张恒春,等.CFD在保真取心钻具结构设计中的应用[J].地质与勘探,2009,(9).
- [11] 孟庆鸿.松科一孔复杂地层取心钻具及泥浆优化设计 and 应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [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).