

# 河元背地区绳索取心钻进泵压计算模型的建立与应用

康鑫<sup>1</sup>, 李生海<sup>2</sup>, 刘晓阳<sup>3</sup>, 王荣璟<sup>1</sup>, 段隆臣<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 核工业二七〇研究所, 江西 南昌 330200; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 泵压是反映金刚石绳索取心钻进时井内作业是否正常的重要参数。为了进一步研究泵压波动变化与实际钻进作业之间的关系, 指导钻进工作的快速、安全开展, 结合江西相山河元背地区 CUSD2 井实际泵压波动数据及相关钻进资料, 建立了适用于本井的循环系统压力损失计算模型。对比分析模型计算的理论泵压与实际泵压的波动变化趋势, 将模型应用于实际钻进, 在此基础上预测后续地层的泵压波动区域范围, 发现 7 MPa 的泵压安全值不再适用于后续地层钻进, 调整设置泵压安全值为 10 MPa, 并利用邻井泵压波动数据进一步验证其可靠性。适当调整修正理论模型, 使其可应用于河元背以及相山地区绳索取心钻进中, 指导该地区钻探工作。

**关键词:** 绳索取心钻进; 压力损失; 计算模型; 泵压安全值; 河元背地区

中图分类号: P634.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2016)02-0028-04

**Establishment of Pump Pressure Calculation Model for Wire-line Core Drilling in Heyuanbei Area and the Application/KANG Xin<sup>1</sup>, LI Sheng-hai<sup>2</sup>, LIU Xiao-yang<sup>3</sup>, WANG Rong-jing<sup>1</sup>, DUAN Long-chen<sup>1</sup>** (1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Research Institute No. 270 CNNC, Nanchang Jiangxi 330200, China; 3. Beijing Geological Institute of Nuclear Industry, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Pump pressure is one of the important parameters of diamond wire-line core drilling, which can reflect whether the operation is normal in the well. In order to further study the relationship between pump pressure fluctuation and the actual drilling operation for fast and safe drilling, on the basis of the actual pump pressure data of CUSD2 in Heyuanbei of Jiangxi and the related drilling data, a pressure loss calculation model for drilling circulation system is established. Comparing the fluctuation trend of theoretical pump pressure calculated by analysis model and actual pump pressure and using the model to the actual drilling, the pump pressure fluctuation in subsequent formation was predicted, it was found that 7MPa pump pressure safety value was no longer suitable for subsequent drilling, then the safety value was adjusted to 10MPa. The reliability was verified by the pump pressure fluctuation data of adjacent well. By the appropriate adjustment and correction, this theoretical model can be applied in wire-line core drilling in Heyuanbei and the whole Xiangshan area.

**Key words:** wire-line core drilling; pressure loss; computational model; pump pressure safety value; Heyuanbei area

## 0 引言

泵压是反映金刚石绳索取心钻进时井内作业是否正常的重要参数。金刚石绳索取心钻进易形成高泵压, 会对井壁造成一定的冲刷作用, 不利于井壁稳定<sup>[1]</sup>。且在窄环空间隙中, 钻杆柱转速、钻柱偏心、钻井液流变性、钻头磨损以及井内复杂情况等多种因素会造成实际泵压的波动变化<sup>[2-3]</sup>, 可能导致部分井段泵压异常升高。因此, 合理的泵压安全值设定显得尤为重要, 安全值设置较低, 钻进过程中会频繁出现报警状况, 工作人员需及时停泵并重新设定恢复保护, 影响钻进效率; 安全值如果设定过高, 当井内工作异常导致泵压异常升高, 没有出现报警, 不

能及时停泵发现处理问题, 将会引起更大的危险, 这对于井下安全作业和生产实效影响很大<sup>[4]</sup>。

为了更好地分析实际泵压波动变化趋势, 设置合理的泵压安全值, 本文将建立适用于相山河元背 CUSD2 井的循环系统压力损失计算模型, 在其基础上预测后续地层钻进泵压波动范围, 调整设置安全值, 指导钻进工作的快速安全开展。

## 1 CUSD2 井概况

相山河元背 CUSD2 井的地层为盆地基底中元古代变质岩系、盆地盖层下白垩统打鼓顶组和鹅湖岭组中酸性—酸性火山岩系。地层较为完整, 部分

收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2015-12-03

基金项目: 中核集团龙灿项目“相山基础地质研究”(编号: LCD116)

作者简介: 康鑫, 男, 汉族, 1993年生, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 1677916173@qq.com。

通讯作者: 段隆臣, 男, 1967年生, 教授, 博导, 从事地质工程教学和科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 2473894639@qq.com。

地层存在断裂构造和裂隙构造,为区内铀成矿提供了构造条件。

CUSD2 井设计井深为 1800 m,采用金刚石绳索取心钻进工艺。

一开用  $\varnothing 153$  mm 钻头钻进下入孔口管,钻具组合为: $\varnothing 153$  mm 单动双管 +  $\varnothing 60$  mm 普通钻杆 + 变丝接头 + 主动钻杆。钻进参数为:转速 80 ~ 150 r/min,泵量 68 ~ 114 L/min,钻压 5 ~ 10 kN。

二开 S114 绳索取心钻具钻进,钻具组合为: $\varnothing 122$  mm 钻头 + S114 绳索取心钻具 + S114 绳索钻杆 + 变丝接头 + 主动钻杆。钻进参数为:转速 200 ~ 400 r/min,泵量 114 ~ 173 L/min,钻压 5 ~ 15 kN。

实际钻进深度为 1535 m,只下入 50 m 左右孔口管,后续地层全部为裸眼钻进。钻进过程中易出现钻井液漏失、缩径、坍塌掉块等现象,且在高泵压的冲刷下井壁稳定性差,易出现井内事故,导致泵压异常升高。泵压随井深波动增长的过程中,1535 m 井深之前 7 MPa 的安全值设置相对合理,但当遇到憋泵等井内复杂情况时,泵压出现接近甚至超过 7 MPa 情况。

现场应用钻井泥浆泵型号为 BW300/16A 型,该泵具有 4 挡流量,最大泵量为 300 L/min,使用最小泵量 52 L/min 时泵压可达 16 MPa,使用最大泵量时泵压为 4.5 MPa,流量和压力变化范围大。钻进过程中坚硬完整地层要求钻井液具有较好的润滑性,对钻井液的悬排能力和护壁性要求不高,采用无固相钻井液;钻遇破碎地层时,井壁很容易坍塌,采用低固相钻井液。

## 2 循环系统压力损失模型建立

### 2.1 理论计算模型建立

岩心钻探泥浆泵泵压一般是指泵排出口的表压力,是钻井液流经钻井循环系统受到各种阻力产生的,泵压等于钻井液流经循环系统各处损失的压强之和<sup>[5]</sup>。绳索取心钻进环空间隙小,循环系统压力损失问题比较复杂,需要考虑钻井液流变性、流态变化,钻柱旋转以及钻杆偏心等很多因素的影响,建立一套精确的水力计算模型比较困难<sup>[6-9]</sup>。但是在工程计算上,一般会在精度允许的对井内复杂流动状态进行适当简化。

结合 CUSD2 井的钻井资料,采用达尔西 - 费斯巴哈公式<sup>[10]</sup>计算理想状态下循环系统各部分压力

损失。计算过程中发现:钻杆内部、环空以及钻杆接头处压力损失与井深变化关系明显,而岩心管、钻头以及液动冲击器处压力损失与井深变化无较明显关系。为了更加明确、简洁地确定井深与循环系统压力损失之间的关系,整合化简与井深有关的压力损失部分公式,初步整理为:

$$P = 0.8\rho LQ^2 [\lambda_1 (D-d)^3 (D+d)^2 l^2 d_2^4 (D-d_3)^4 + \lambda_2 d_1^5 l^2 d_2^4 (D-d_3)^4 + \zeta_1 d_1^5 (D-d)^3 (D+d)^2 l (D-d_3)^4 + \zeta_2 d_1^5 (D-d)^2 (D+d)^2 l d_2^4 / [d_1^5 (D-d)^3 (D+d)^2 l^2 d_2^4 (D-d_3)^4]] \quad (1)$$

式中: $P$ ——与井深有关的钻杆内、环空、钻杆内外接头处压力损失,MPa; $\rho$ ——钻井液密度,kg/m<sup>3</sup>; $L$ ——井深,m; $Q$ ——循环系统泵量,L/min; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ——钻井液流经钻杆及环空内的阻力系数; $D$ 、 $d$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ——分别为钻头外径、钻杆外径、钻杆内径、接箍外径、接箍内径,mm; $l$ ——单根钻杆长度,m; $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ ——钻井液经钻杆内外接头处的局部阻力系数。

可以看出,当不考虑其它因素对泵压的波动影响时,此部分与井深的关系基本成线性,同时与压力损失相关的变化量还有泵量和钻井液密度,为了体现重要参数对泵压的影响,充分反映泵压与井深的关系,对公式(1)进一步简化,括号内的公式用系数  $A$  代替,与井深关系不明显的其他部分压力损失用系数  $B$  代替,建立循环系统压力损失模型:

$$P = A\rho Q^2 L + B \quad (2)$$

式中: $A$ ——与井深有关的压力损失系数,m<sup>-5</sup>; $B$ ——与井深关系不明显的岩心管、钻头以及液动冲击器等部分的压力损失,MPa。

作图并对实际泵压数据进行线性回归分析,分析理论数据变化趋势,适当调整优化实际计算的  $A$ 、 $B$  系数取值,使理论曲线更加贴近实际泵压波动数据,最终确定 CUSD2 井循环系统压力损失计算模型公式:

$$P = 0.66\rho Q^2 L + 1.12 \quad (3)$$

### 2.2 数据对比分析

为了有针对性地研究部分因素与循环系统压力损失的关系,排除其它因素干扰,从液动冲击器使用的深度开始对数据进行分析,即从 245 m 处开始取点到 1470 m 处结束,理论泵压每隔 40 m 进行取值,根据公式(3)计算得出各深度对应的理论压力损失,与实际泵压数据对比分析见图 1。

由图 1 可以看出,不考虑其他因素对泵压的影响时,钻井液密度、流量及钻进深度对泵压的理论

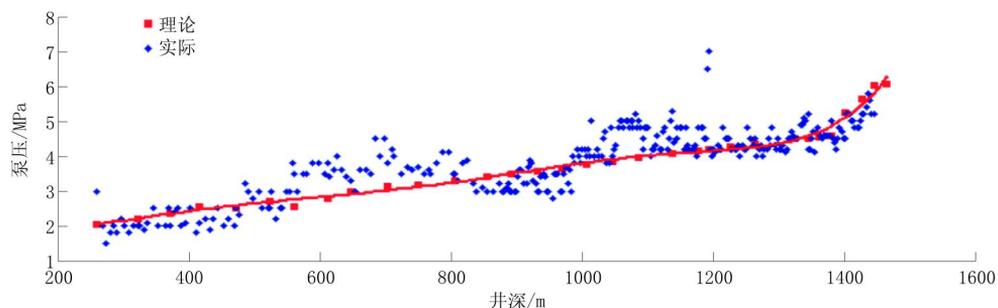


图1 理论泵压与实际泵压数据对比

影响曲线以微小的波动变化上升,1400 m 之前钻进过程中泵量大致保持在110 L/min,曲线基本呈线性上升,1400 m 之后地层钻进,泵量保持在130 L/min,泵压出现明显上升趋势,理论泵压变化曲线总体上与实际泵压上升趋势接近。但是明显可以看出

实际泵压数值围绕理论曲线上下波动,且部分井段波动幅度较大。以40 m 为单位深度,取实际泵压变化平均值,更加准确地分析对比理论泵压与实际泵压波动变化趋势(见图2)。

由图2可看出实际泵压随井深的增加呈波动上升

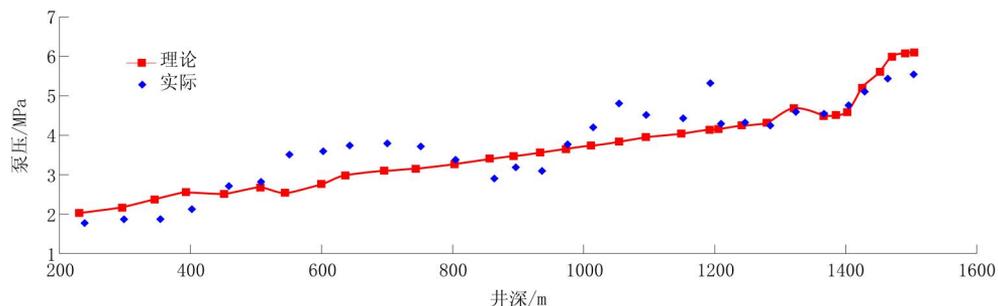


图2 理论泵压与平均井深泵压数据对比

趋势,其大致围绕理论曲线波动,且其平均变化范围 $\geq 1$  MPa。绳索取心钻进时孔内情况复杂,多种因素会造成泵压的升高或降低,导致实际数据与理论模型计算数值之间存在差距。模型计算出的理论泵压变化趋势与实际基本符合,说明假设基本成立,可对后续地层钻进循环系统中的压力损失做出大致预测。

### 3 泵压安全值分析调整

#### 3.1 后续地层泵压预测

为了设置合理的泵压安全值,根据公式(3)计算1470 m 至设计井深的理论泵压数据,在模型的基础上预测后续地层泵压波动情况(见图3)。

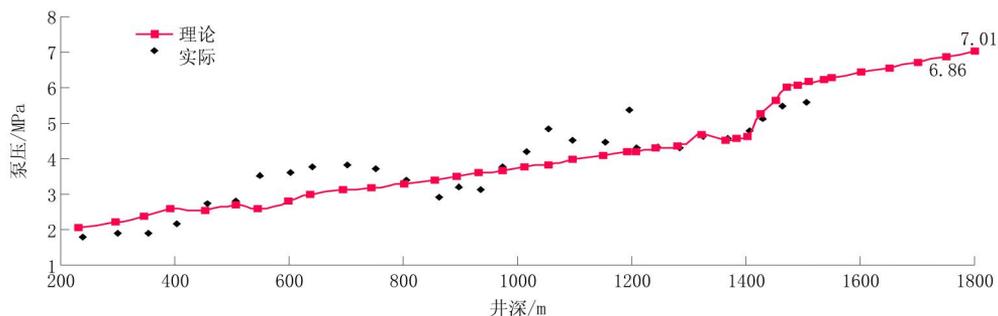


图3 后续地层理论泵压预测

从图3中可看出,1470~1535 m 处理论泵压变化曲线与实际曲线依然吻合,1535 m 之后一直取值到设计井深1800 m,泵压缓慢上升,增长幅度与前段接近。在1760~1800 m 井深,理论计算的泵压从

6.86 MPa 上升至7.01 MPa,前段井深钻进时设置的7 MPa 泵压安全值不再合理,如果考虑泵压的波动变化,则实际钻进中大致1600 m 左右井深泵压安全值已不再合理。

结合前段井深理论泵压与实际泵压的波动变化趋势,在理论泵压曲线之下以平均波动值 0.5 MPa 为基准、理论泵压曲线之上以 1 MPa 为基准,预测 1600~1800 m 井深实际泵压大致波动范围(见图 4 虚线所夹区域)。分析可知该段井深钻进实际泵压大致波动变化范围在 6~8 MPa 之间。

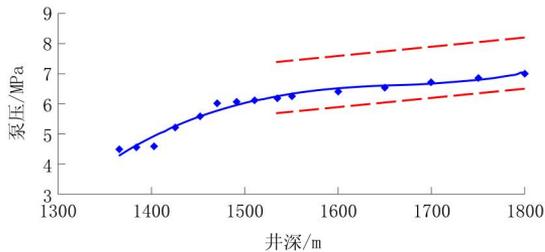


图4 实际泵压波动区域预测

### 3.2 安全值调整

钻进过程中,过高的泥浆泵工作压力将会对人身安全、设备维护及井下作业造成极大的危害,合理的泵压安全值设定可以指导钻进工作快速、安全开展。分析可知,后续地层钻进时,7 MPa 的泵压安全值已经不再合理,如果不调整,则钻进过程中可能出现频繁报警情况,过多的停泵检修不利于安全、高效钻进,且安全阀的频繁泄压以及恢复保护对其工作的安全性、可靠性有一定影响,操作不当可能会导致安全阀启闭件卡死,留下安全隐患<sup>[11-12]</sup>。

根据上述分析,结合泥浆泵的额定泵压并参考现场以往施工经验,1600 m 井深钻进至设计深度时,泵压安全值设定为 10 MPa。从 CUSD2 井地层预测信息可知,1600~1800 m 井深段地层岩石主要为云母石英片岩,胶结致密,可钻级别为 6 级。该地层破碎构造带易发生烧钻、卡钻、钻具折断等事故。事故发生之前泵压异常升高,可通过地面泵压变化发现,当泵压异常升高到达 10 MPa 时,安全阀开启泄压,报警系统提示并及时停泵检查发现问题,可有效防止事故进一步恶化。为了验证钻进至设计井深时 10 MPa 的安全值是否合理,求证钻井现场技术人员,其根据该地区钻进经验给出的泵压安全值也是 10 MPa,对照附近 2800 m 邻井泵压波动变化趋势,1600~1800 m 泵压大致在 6~8.5 MPa 之间波动,进一步确认 10 MPa 的泵压安全值是比较合理的。分析 10 MPa 的泵压安全值所能适应的最大钻井深度,在模型基础上计算出 2450 m 井深理论泵压为 8.9 MPa,考虑泵压波动变化,当钻进至设计井深后

如果继续钻进,预测大致 2450 m 井深处 10 MPa 的泵压安全值将不再合理,需及时作出调整。

## 4 结论

本文建立了适用于河元背 CUSD2 井的理论泵压计算模型(公式 3)。在模型基础上计算出后续地层钻进时的理论泵压数据,根据前段井深实际泵压数据围绕理论曲线上、下波动变化趋势,合理地选取浮动的上下限,在工程误差允许的范围内,可较好地预测后续地层泵压波动范围,为泵压安全值的调整设置提供依据,指导后续钻进工作安全、高效进行。

理论模型的建立忽略了很多因素,同时简化的计算模型需要相同矿区、相同钻孔结构、相同钻柱组合的浅部钻进泵压实际数据做支撑,具有一定的局限性。因此,后续将对模型进行适当修改完善,使模型可根据不同钻井的井身结构、钻具组合、泥浆类型等方面的变化对模型的统计参数  $A$ 、 $B$  进行适当调整,以利于在河元背以及相山地区更加准确地预测后续地层钻进泵压的波动范围,为合理的泵压安全值设定提供指导。

## 参考文献:

- [1] 段鸿海,胡春跃. 承德 M24 矿区深孔钻探钻进参数的选择分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):17-20.
- [2] 严维锋,郑何光,等. 钻柱偏心和旋转对环空压耗的影响[J]. 内蒙古石油化工,2010,(8):51-53.
- [3] 贾铮. 绳索取芯钻进环空压力损失试验台设计[D]. 北京:中国地质大学,2011,18-19.
- [4] 梁茂典. 基于 SWP-C40 的电动泥浆泵过泵压保护系统设计[J]. 商情,2013,(14):193.
- [5] 汤凤林,段隆臣,等. 岩心钻探学[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [6] 刘文红,张宁生. 小井眼钻井环空压耗计算与分析[J]. 西安石油学院学报,2000,15(1):6-9.
- [7] 段鸿海,宋金亭,赵洪. 小口径深孔钻探冲洗液循环阻力测算[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):4-7.
- [8] Delwiehe R A. Slimhole Drilling Hydraulics [J]. SPE 24596, 1992,528-535.
- [9] Cartalos U. Field Validated Hydraulics Model Predictions Give Guidelines for Optimal Annular Flow in Slimhole Drilling [J]. SPE 35131,1996.
- [10] 屠厚泽. 钻探工程学[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [11] 廖文青,陈建,等. 钻井泥浆泵压力保护装置的研发与应用[J]. 科技资讯,2013,(1):80.
- [12] 曹震,范玉金. 泥浆泵泵压监测报警机构研究[J]. 知识经济,2010,(20):109.