

相山地区河元背深部钻探工程钻柱扭矩分析

孔二伟¹, 高 超², 李生海^{2,3}, 刘晓阳⁴, 郭培国⁵, 段隆臣²

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南郑州 450001;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074;

3. 核工业二七〇研究所, 江西南昌 330200; 4. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;

5. 湖北省地质局第五地质大队, 湖北黄石 435002)

[摘 要] 钻探过程中钻柱向孔底传递荷载, 承受着拉、压、弯、扭、振等复杂的应力, 其中钻柱所承受的工作扭矩是决定其安全的重要参数之一, 需要定量分析, 但在实际工作中, 钻柱扭矩的直接测量十分困难。本文通过建立适当的扭矩计算模型, 结合相山地区河元背深部钻探工程 CUSD2 井测量的相关钻进参数进行扭矩计算, 并与实际间接测量的扭矩进行拟合对比分析, 在验证模型可靠性的基础上, 进一步分析了孔径变化对钻柱扭矩的影响以及钻进过程中扭矩消耗的分布规律, 并提出了钻柱扭矩控制的建议。

[关键词] CUSD2 钻进参数 扭矩 拟合分析 相山

[中图分类号] P634.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2018)04-07

Kong Er-wei, Gao Chao, Li Sheng-hai, Liu Xiao-yang, Guo Pei-guo, Duan Long-chen. The drilling string torque analysis of the Heiyuanbei deep drilling hole CUSD2 in the Xiangshan area[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 0810-0816.

0 引言

在钻探工程中, 钻柱扭矩是一项重要的参数, 钻柱扭矩直接反映井内阻力的大小, 对钻柱扭矩的监控能有效降低井内恶性事故发生的几率, 同时能够辅助判断井内情况。随着地质勘探工作的发展, 钻探孔深不断增加, 钻柱在孔内的运动受力更复杂, 能量消耗问题也成为深部钻探的一个难点(刘宝林等, 1999; 高鹏举, 2013)。钻柱的安全使用是生产中重要的问题, 钻柱扭矩的大小及其分布特征决定了钻柱的安全性, 因此了解钻进过程中钻柱的安全扭矩非常重要, 但是目前钻柱扭矩的直接测量很困难, 缺乏便捷有效的手段。

国内外在钻柱扭矩的产生机理、影响钻柱扭矩的因素及钻柱扭矩理论计算方面已有很多研究。目前计算钻柱摩阻的方法都是在软杆模型(Johansick, 1983)和刚杆模型(Whiten, 1987)的基础上建立的, 这些方法多是对理论模型的改进扩展和计算机模拟分析(彭于等, 2006; 祝效华等, 2007; 闫铁等,

2011), 结合大量实测工程数据进行分析验证的研究较少。在实际工作中, 影响钻柱扭矩的因素较多, 加强结合大量实际工程数据的分析, 对提高钻柱扭矩的认识很有必要。

本文结合 CUSD2 工程中测量的相关数据, 建立适用于类似钻探工程实践中钻柱扭矩计算的模型, 分析各因素对钻柱扭矩的影响, 为未来类似的钻探工作提供安全钻柱扭矩范围, 以减少钻探事故的发生。

1 CUSD2 工程概况

CUSD2 工程全称相山铀矿田龙灿工程河元背深部钻探工程, 项目来源于中核“龙腾 2020 科技创新示范工程”——龙灿工程。相山河元背区内广泛发育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, 岩性主要为砂岩、砾岩、碎斑熔岩和流纹英安岩, 部分地层断裂构造和裂隙构造发育(戴清峰等, 2015; 窦小平等, 2015; 王健等, 2016)。CUSD2 井设

[收稿日期] 2017-05-25; **[改回日期]** 2018-04-24; **[责任编辑]** 陈伟军。

[基金项目] 中核集团龙灿项目“相山基础地质研究”(编号: LCD116)资助。

[第一作者] 孔二伟(1987年-), 男, 工学硕士, 现主要从事钻探工程生产与研究。E-mail: kew19870916@163.com。

[通讯作者] 高 超(1992年-), 男, 在读硕士研究生, 现主要从事钻探工程研究。E-mail: 405607947@qq.com。

计孔深 1800m,采用三开井身结构,即开孔采用 $\varphi 153$,二开 $\varphi 122$,三开 $\varphi 96$,并预留一级技术套管;在实际施工过程中,由于地层比较稳定,在井深 50m 下入孔口管后,采用 $\varphi 122$ mm 钻头进行裸眼钻进直到终孔,技术套管没有下入。

在钻进方法上采用的是金刚石绳索取心工艺,在钻进到 127 m 左右时采用液动冲击器+绳索取心钻具+高效长寿命金刚石钻头的组合方案,以提高钻探施工效率,提高岩矿心的采取率,降低钻探生产成本。

在钻井液方面,根据不同地层对于钻井液润滑、冷却、护壁、排屑能力的不同要求,在钻进坚硬完整地层时采用无固相冲洗液;在钻遇破碎地层时,井壁相对容易坍塌,采用的是低固相冲洗液。

在设备方面,选用的是 XY-8DB 型交流变频电驱动立轴岩心钻机,该钻机在 XY-8 机械立轴式岩心钻机基础上集成了模块化的交流变频电驱动单元和数据采集单元,能够实现无级调速、钻进参数的实时监控和自动记录,利用记录的电机输出功率和转速,转换计算出钻柱扭矩。

2 扭矩理论计算模型的建立

目前钻柱力学理论计算主要有以下几种方法:经典微分方程法(Mitchell,1982;何小宝,2010;闫铁等,2010)、纵横弯曲梁理论法(刘巨保等,1996)、有限差分法(高德利等,2000)、有限元法(于永南等,1997)和能量法(Lubinski *et al.*,1962)等。本文采取软杆模型,在能量法的基础上建立钻柱扭矩计算模型,对钻进过程中井内钻柱工作扭矩进行计算。在该模型下钻柱井内扭矩主要由三部分组成:钻柱屈曲引起的扭矩、克服钻井液动切力扭矩及钻头处碎岩扭矩,计算模型如图 1 所示。

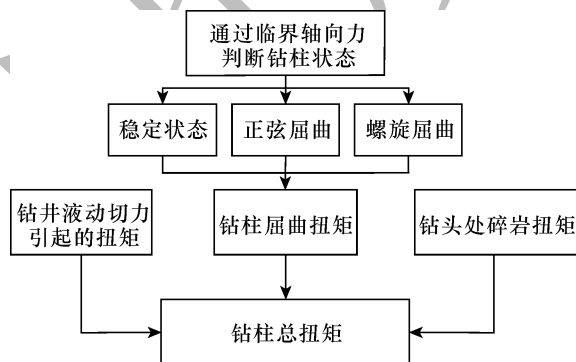


图 1 模型计算流程图

Fig. 1 The calculation flow chart of the model

2.1 屈曲扭矩计算

目前国内外研究学者公认钻柱在井内主要有以

下三种状态:稳定状态、正弦屈曲状态和螺旋屈曲状态(吴晔,2014),计算钻柱屈曲扭矩时,须先准确判断井内钻柱的状态。

(1) 通过轴向临界力判断钻柱孔内状态

钻柱孔内状态主要通过临界轴向力判断,目前对于钻柱发生屈曲的临界轴向力的计算式很多,主要区别是系数不同。

在能量法分析的基础上,确定钻柱正弦屈曲临界轴向力的表达式(陈敏,2005)为:

$$F_{cs} = 2.7(EI(q \cdot g)^2)^{1/3} \quad (1)$$

而确定的螺旋屈曲临界轴向力的表达式(高国华等,1996)为:

$$F_{cr} = 5.816(EI(q \cdot g)^2)^{1/3} \quad (2)$$

式中: EI 为钻杆刚度, $N \cdot m$;横截面惯性矩 $I = \pi(r^4 - r'^4)/64$; r 为钻杆外径, m ; r' 为钻杆内径, m ; q 为钻柱质量密度, kg/m 。

(2) 钻柱扭矩计算公式

钻柱发生正弦屈曲时,屈曲引起的离心力对钻柱扭矩的影响计算公式(陈敏,2005)为:

$$M_1 = \frac{2\mu_1 q L r^3 \omega^2}{\pi \Delta R} \quad (3)$$

钻柱发生螺旋屈曲时钻柱扭矩的当量公式(高宝奎等,1998):

$$M_1 = \frac{\delta \cdot R}{\Delta R} \times \left[\frac{q \cdot r^2 \cdot \omega^2}{\Delta R} + F_N \right] \quad (4)$$

式中: μ_1 为孔壁与钻柱间摩擦系数,无量纲,参考陈敏(2005)取 0.2; L 为钻柱长度, m ; R 为井眼半径, m ; ΔR 为井眼半径与钻柱外径之差,即钻柱公转半径, m ; δ 为滚动摩擦系数, m ,参考高宝奎等(1998)取 0.001; ω 为钻柱自转角速度, rad/s ; F_N 为钻柱与井眼的平均接触力, N 。

由(4)式可知,计算扭矩须获取钻柱屈曲时与井壁的平均接触力。根据前人对钻柱屈曲时接触压力的试验和研究(张永弘等,1998),提出更接近实际的钻柱屈曲的接触压力公式:

$$F_N = \frac{\Delta R \cdot F_t^2}{4EI} \quad (5)$$

式中: F_t 为钻柱轴向荷载, N 。

2.2 钻井液引起的扭矩

钻柱克服钻井液动切力所产生的扭矩为(陈敏,2005):

$$M_2 = \frac{4\pi\mu_2 \omega L r^2 R^2}{R^2 - r^2} \quad (6)$$

式中: μ_2 为泥浆动力粘度系数, $Pa \cdot s$,通过实

验确定 μ_2 为 $0.02\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.3 钻头碎岩扭矩

根据经验(梅冬等,2015),孕镶金刚石钻头扭矩消耗表达式为:

$$M_3 = \frac{1}{4} \mu_3 P_1 (D + d) \quad (7)$$

式中: μ_3 为钻头与岩石摩擦系数,无量纲,参考梅冬等(2015)取 0.15; P_1 为钻压, N; D 为钻头外径, m; d 为钻头内径, m。

2.4 计算结果

通过以上计算模型,可以得出扭矩的计算公式为:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (8)$$

2.5 现场扭矩测量原理

在扭矩测量方面,目前主要有采用扭矩传感器(李国林等,1988)和能量转换(杨惠民等,1989)等方法,现场采用间接测量的方式,依靠钻机回转轴附近的传感器测量立轴输出转速,同时在工作中电机的输出功率也被自动记录,最后通过转换公式计算

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = \frac{\delta R}{\Delta R} \left[\frac{qr^2 \omega^2}{\Delta R} + \frac{\Delta R \cdot F_t^2}{4EI} \right] + \frac{4\pi \mu_2 \omega L r^2 R^2}{R^2 - r^2} + \frac{1}{4} \mu_3 P_1 (D + d) \quad (9)$$

上式表明影响钻柱扭矩的主要参数为:转速、钻压和泥浆动力粘度系数,换言之,现场能利用这三个参数调控钻柱扭矩,因此钻进参数和钻井液性能的选择是控制扭矩的有效方式。

3.1 钻进参数拟合处理

在钻进过程中,转速和钻压是至关重要的钻进参数,对钻进效果及安全生产有重要影响,是需现场严格控制的参数。扭矩计算模型(9)式也表明转速和钻压是影响钻柱扭矩的重要因素。本小节通过对转速和钻压拟合处理分析在钻进过程中两者的变化趋势。

转速采用二次拟合得到拟合曲线方程为: $y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0121x + 39.768$, 其中判定系数 $R^2 = 0.8168$, 拟合结果如图 2 所示; 钻压通过二次拟合得到拟合曲线方程为: $y = 1 \times 10^{-5} x^2 + 0.0067x + 37.382$, 其中判定系数 $R^2 = 0.8108$, 拟合结果如图 3 所示。

拟合结果显示转速和钻压的拟合精度不是很高; 转速测量数据的标准差为 4.066, 钻压标准差为 6.993, 反映出现场选用的钻压和转速的变化波动较大, 但总体变化趋势是随着井深的增加转速和钻压减小。

出扭矩为:

$$M = \frac{9500 \cdot P_2}{n}$$

式中: P_2 为电机输出功率, kW; n 为钻机回转转速, r/min; M 为测量扭矩, N · m。

3 扭矩综合分析

在钻进过程中, XY-8DB 钻机自动记录每一回次的钻进参数, 数据全面详细, 且数据量大。在选择数据处理方式时, 采用统计学分析方法从整体上反映出各钻压、转速的变化规律, 结合钻柱扭矩计算模型分析钻压、转速对扭矩的影响, 最后通过计算扭矩和实测扭矩拟合结果的对比分析, 来验证模型的准确性。

通过(1)和(2)式对钻柱在孔内的运动状态进行判断, 在井深超过 200m 后钻柱都处于螺旋屈曲状态, 因此本文主要分析在螺旋屈曲状态下的钻柱扭矩。针对螺旋屈曲的情况, 可以得到计算螺旋屈曲钻柱扭矩的公式为:

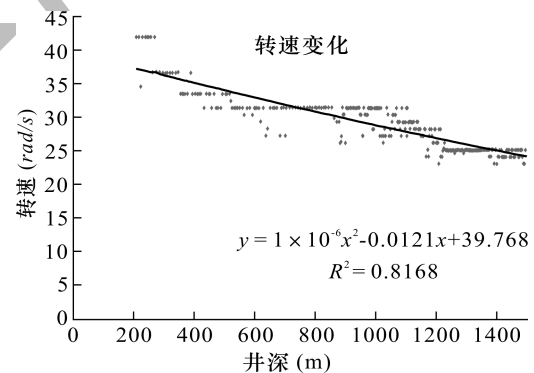


图 2 转速随井深分布图

Fig. 2 Distribution of rotational speed with well depth

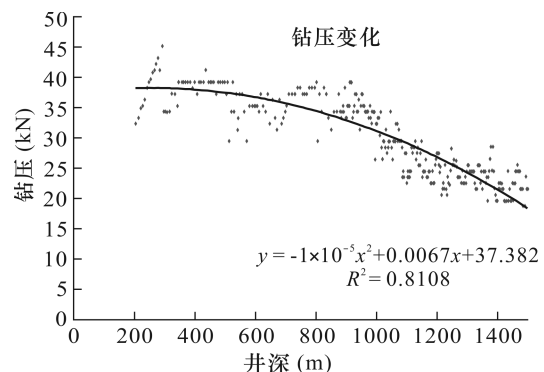


图 3 钻压随井深分布图

Fig. 3 Distribution of the weight on bit with well depth

3.2 扭矩拟合结果

结合计算模型公式(9)分析,在其它参数不变的条件下,钻柱扭矩与转速的关系可简化为: $M = a_1\omega^2 + a_1\omega + c_1$ (a_1, b_1, c_1 为常数),由此可见钻柱扭矩与转速呈二次多项式关系,同时,结合前一小节中转速与井深大致呈二次关系的分析结果,对计算扭矩散点数据拟合处理时采用四次多项式,最终得到模型计算的钻柱扭矩随井深变化的拟合曲线。

利用每一回次中记录的钻进参数,通过公式(9)计算出对应井深下的钻柱扭矩,得到钻柱扭矩随井深变化的散点图,对该扭矩散点数据拟合处理得到计算扭矩拟合方程为: $y = -1 \times 10^{-9}x^4 + 3 \times 10^{-6}x^3 - 0.0036x^2 + 1.6814x + 319.69$,判定系数为:

$R^2 = 0.8866$ 。同时施工中不同井深下测量的扭矩散点数据拟合方程为: $y = -1 \times 10^{-9}x^4 + 4 \times 10^{-6}x^3 - 0.0053x^2 + 3.056x - 69.026$,判定系数为: $R^2 = 0.8037$ 。

如图4所示,计算的扭矩拟合曲线和实测的扭矩拟合曲线整体趋势上较接近,通过统计学的 CORREL

$$\text{函数 } \text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}},$$

计算得出计算扭矩与实测扭矩两组数据的相关系数为 0.81,两者相关程度较高。

以上分析表明,本文所选取的计算模型具有一定准确性,在该地区未来深井地质钻探过程中,可用于钻柱扭矩的预测。

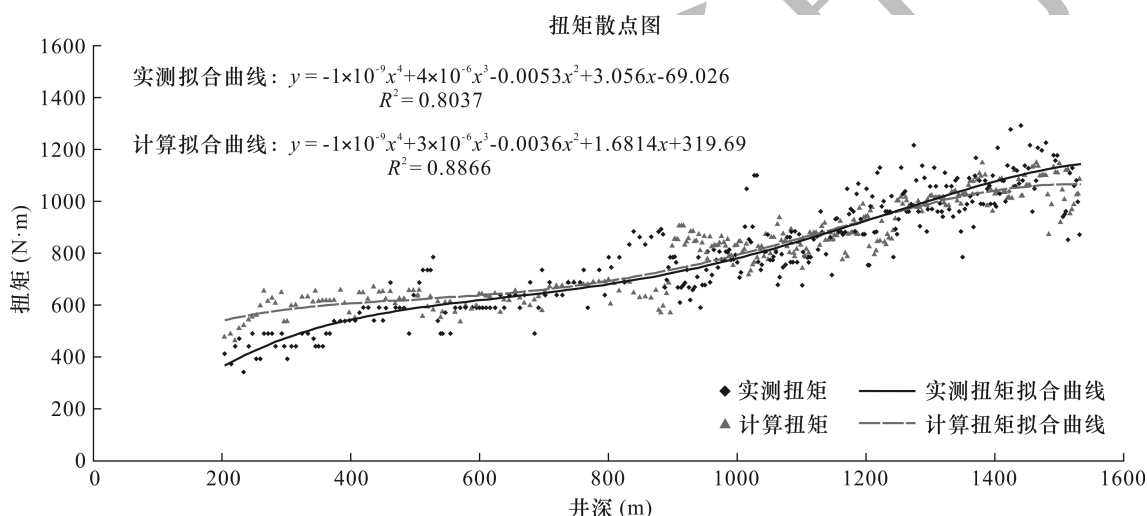


图4 扭矩拟合曲线

Fig.4 The fitting torque curves

3.3 扭矩消耗规律分析

针对螺旋屈曲的情况,分别计算公式(9)中钻柱扭矩的三个主要组成部分,并取占总扭矩的百分数,得到该井施工中扭矩消耗的情况如图5所示,从图5中分析主要有以下三点规律:

(1)由钻柱屈曲引起的扭矩随着井深的增加占总扭矩的比例不断减小;

(2)由动切力引起的扭矩消耗随着井深的增加占总扭矩的比例不断增大;

(3)作用在钻头上用于碎岩的扭矩随着井深的增加,占总扭矩的比例不断减小。

结合计算模型分析产生以上规律的原因:由钻柱螺旋屈曲扭矩计算公式(4)中可见,钻柱螺旋屈曲产生的扭矩与转速、钻压均呈二次关系,即 $M_1 \propto (\omega^2, F_t^2)$,而由公式(6)可知克服钻井液动切力产生

的扭矩与转速呈一次正比关系,也与井深呈一次正比关系,即 $M_2 \propto (\omega, H)$,由公式(7)知钻头碎岩扭矩与钻压呈一次关系,即 $M_3 \propto F_t$,而图2和图3中显示,现场选用的转速、钻压均随井深增加而降低,故随着井深的增加, M_1 的降幅相较 M_2, M_3 更大, M_1 占总扭矩比例将减小。

3.4 孔径对扭矩的影响

在钻进过程中,钻孔超径、缩颈的现象直接影响钻柱扭矩,而工程实践中超径、缩颈现象会极大的危害钻柱安全,本小节结合扭矩计算公式(9)进行定性分析。

当仅仅考虑孔径对于扭矩的影响时,公式(9)可以简化为: $M = \frac{a_2 R}{(R-r)^2} + b_2 R + c_2 \frac{R^2}{R^2 - r^2}$,式中 a_2, b_2, c_2 为常数,如果取钻杆外径 $r = 57\text{mm}$,得到扭

矩随孔径变化的关系。当孔径接近钻杆外径时相对扭矩的数量级较大,为直观反映扭矩随孔径变化变化规律,将上述关系分别绘制不同比例尺的图中,如图 6 所示;同时为描述扭矩随孔径变化趋势,图中所

示的相对扭矩是在简化关系式中 a_2 、 b_2 、 c_2 人为取定值得到的数值,不代表实际扭矩值,仅限于对比不同孔径下扭矩的相对大小。

图 6a 中,当孔径 R 接近钻杆直径 57mm 时,钻

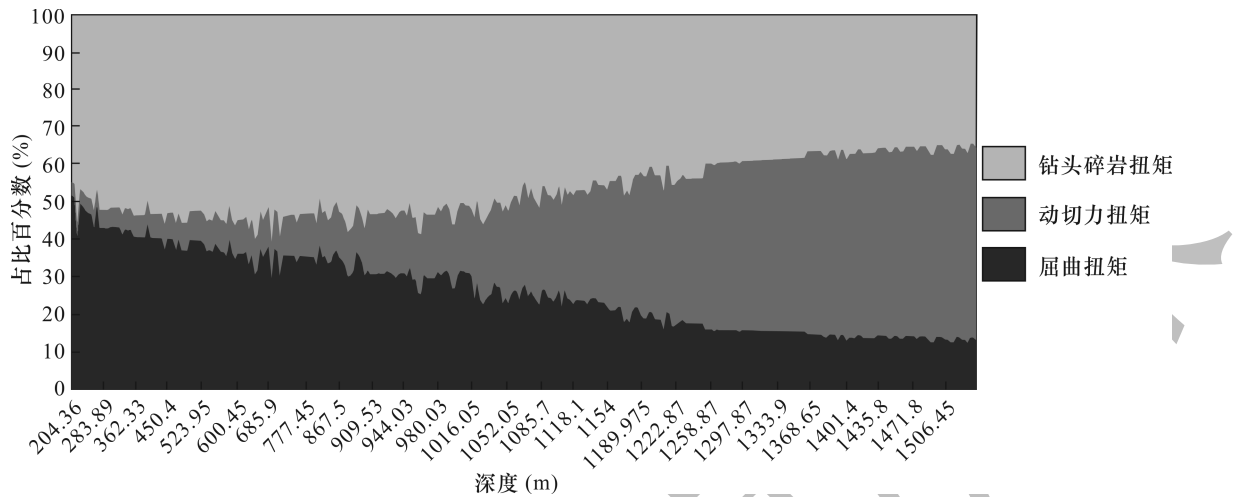


图 5 扭矩消耗构成

Fig. 5 Constitution of torque consumption with well depth

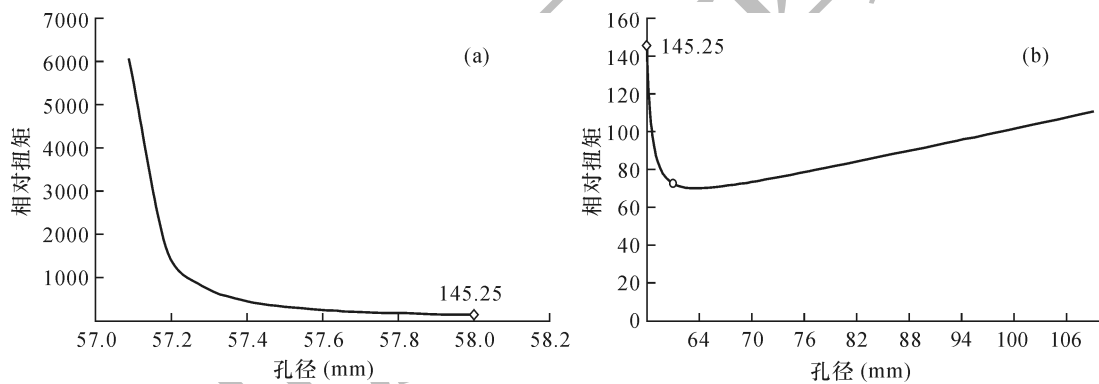


图 6 孔径变化对扭矩影响

Fig. 6 The influence of well diameter variation on torque

a - 当 $R < 58\text{mm}$ 时孔径变化对扭矩影响; b - 当 $R > 58\text{mm}$ 时孔径变化对扭矩影响

a - influence of well diameter variation on torque when $R < 58\text{mm}$; b - influence of well diameter variation on torque when $R > 58\text{mm}$

柱扭矩将急剧增加,在图 6b 中,随着孔径的增加,扭矩迅速减小,当孔径为 62mm 左右时扭矩相对最小,随后缓慢上上升。以上变化规律表明:钻孔在出现缩颈时,扭矩将急剧上升,此时对钻柱安全产生较大威胁;而钻孔出现超径时,扭矩也将呈上升趋势,但上升趋势较缩颈时缓慢。超径、缩颈现象均会导致钻柱扭矩增加,但缩颈对钻柱扭矩的影响更大。在该井施工中采用的钻头半径为 61mm,图 6b 中显示其对应扭矩在最小值附近,有利于保证钻柱安全。

4 结论

(1)在能量法的基础上,考虑钻柱自重条件下建立的扭矩计算模型和实际工程中测量的扭矩吻合较好,表明模型具有一定准确性,能为实际生产中钻柱扭矩安全校核和参数选取提供依据。

(2)结合计算模型分析钻进过程中扭矩的构成规律,发现在深井中用于碎岩的扭矩占比较小,克服钻井液动切力引起的扭矩则占比较大,而泥浆动力粘度和转速是影响钻井液动切力扭矩的主要因素,故在深井钻探中,泥浆动力粘度和转速的选取很

重要。

(3) 扭矩计算模型的分析结果表明缩颈会引起钻柱扭矩急剧增加,超径同样引起扭矩增加,但增幅较小,故在深井钻探中,应重视钻孔的护壁,避免钻孔的缩颈和超径。

[References]

- Chen Min. 2005. The theory research of drill string's unload power consuming and buckling in deep straight well[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing):1-46 (in Chinese with English abstract)
- Dai Qing-feng, Fang Gen-xian, Lin Wan-li. 2015. Comparison of geo-physical characteristics between the Zoujiashan and Niutoushan deposits in the Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province[J]. Geology and Exploration, 51(3): 555-562(in Chinese with English abstract)
- Dou Xiao-ping, Shi Yan-hua, Wu Zan-hua, Xiong Chao, Wan Shuang-shuang, SunChong-bo. 2015. Rules of structural ore-controlling of the Xiangshan uranium orefield in Jiangxi Province[J]. Geology and Exploration, 51(5): 879-887 (in Chinese with English abstract)
- Gao Bao-kui, Gao De-li. 1998. Rolling friction of whirling drillstring[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 22(2): 26-28 (in Chinese with English abstract)
- Gao De-li, Gao Bao-kui. 2000. Effects of tubular buckling on torque and drag in horizontal well[J]. Journal of the University of Petroleum(Edition of Natural Science), 24(2): 1-3 (in Chinese with English abstract)
- Gao Guo-hua, Li Qi, Zhang Jian-ren. 1996. Buckling analysis of pipe string in a vertical borehole[J]. Journal of Xi'an Petroleum University, 11(1): 33-35 (in Chinese with English abstract)
- Gao Peng-ju. 2013. Experimental research on frictional torque between drill string and wall in geological drilling[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing):1-70 (in Chinese with English abstract)
- He Xiao-bao. 2010. Nonlinear buckling of tubular by the DQE method considering torsion [J]. Science Technology and Engineering, 10(10): 2403-2405 (in Chinese with English abstract)
- Johansick C. A. 1983. Torque and drag in directional wells prediction and measurement[C]. SPE (SPE - No11380). New Orleans: IADC/SPE, 201-208
- Li Guo-lin, Ruan Li-min. 1988. Torque measuring technique and a new type(Mark TK) drill torsion meter[J]. Geology and Prospecting, (4): 57-61 (in Chinese with English abstract)
- Liu Bao-lin, Gui Nuan-yin. 1999. Optimizing drilling technology in computerized drilling[J]. Geology and Prospecting, 35(6): 88-90 (in Chinese with English abstract)
- Liu Ju-bao, Zhang Xue-hong, Sun Chao, Zhong Qi-gang. 1997. Bent bean unit analysis of drill stem deformation in horizontal well[J]. Natural Gas Industry, 21(6): 32-34 (in Chinese with English abstract)
- Lubinski A, Althouse W S. 1962. Helical buckling of tubing sealed in packers[J]. Journal of Petroleum Technology, 14(06): 655-670
- Mei Dong, Zeng Shi-you, Liang Li, Pang Feng. 2015. Research on impregnated diamond bit drilling speed based on micro drilling experiment[J]. Geological Science and Technology information, 34(2): 221-224 (in Chinese with English abstract)
- Mitchell R. F. 1982. Buckling behavior of well tubing: The packer effect [J]. Society of Petroleum Engineers, October, 616-624
- Wang Jian, Nie Jiang-tao, Guo Jian, Huang Zhi-zhang, Li Xiu-zhen. 2016. Characteristics of deep polymetallic mineralization in the Xiangshan uranium orefield of Jiangxi Province[J]. Geology and Exploration, 52(1): 47-59 (in Chinese with English abstract)
- Whiten R. G. 1987. Application of side-force analysis and MWD to reduce drilling costs[C]. SPE (SPE - No16113). New Orleans: SPE/IADC, 549-560
- Wu Ye. 2014. The research of drillstring's buckling behavior in the deep geological drilling [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing):1-63 (in Chinese with English abstract)
- Yan Tie, Li Qing-ming, Wang Yan, Li Jing-hui, Bi Xue-liang. 2011. Segmental calculation model for torque and drag of drill string in horizontal wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 35(5): 69-72 (in Chinese with English abstract)
- Yan Tie, Ma Hong-bin, Gu Yu-tang, Xing Guang-yu. 2010. The frictional force analysis of drill string in branch horizontal section[J]. Science Technology and Engineering, 10(22): 5378-5380 (in Chinese with English abstract)
- Yang Hui-min, Chen Ze-hua. 1989. A dynamic analysis on the torsional stress of a drilling rod[J]. Geology and Prospecting, (4): 57-61 (in Chinese with English abstract)
- Yu Yong-nan, Han Zhi-yong, Lu Yong-ming. 1997. Bucking of flex-stem in curved well[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 21(6): 32-34 (in Chinese with English abstract)
- Zhu Xiao-hua, Tong Hua, Liu Qing-you, Feng Lin-xian. 2007. New method on calculation of torque and drag based on drilling string system dynamics[J]. Journal of System Simulation, 19(21): 4853-4856 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Yong-hong, Liu En, He Fu-jun, Huang Zhao-zhi, Chen Lun-yuan. 1998. A study of contact forces on helical buckled tubing in wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 19(3): 131-134 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 陈敏. 2005. 深直井钻柱空转功率和屈曲的理论研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京):1-46
- 戴清峰, 方根显, 林万里. 2015. 江西相山火山岩型铀矿田邹家山与牛头岭矿区地球物理特征对比研究[J]. 地质与勘探, 51(3): 555-562
- 窦小平, 时燕华, 吴赞华, 熊超, 万双双, 孙崇波. 2015. 江西相山铀矿田构控矿规律研究[J]. 地质与勘探, 51(5): 879-887
- 高宝奎, 高德利. 1998. 滚动钻柱摩阻研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2(2): 26-28
- 高德利, 高宝奎. 2000. 水平井段管柱屈曲与摩阻分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 24(2): 1-3
- 高国华, 李琪, 张健仁. 1996. 管柱在垂直井眼中的屈曲分析[J].

- 西安石油大学报,11(1):33-35
- 高鹏举. 2013. 地质钻探中钻柱与孔壁间摩擦扭矩实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京):1-70
- 何小宝. 2010. 钻柱在考虑扭矩时非线性屈曲的 DQE 法[J]. 科学技术与工程,10(10):2403-2405
- 李国林,阮利民. 1988. 扭矩测量技术与 TK 型钻探扭矩仪[J]. 地质与勘探,(04):57-61
- 刘宝林,桂暖银. 1999. 自控钻进中的优化钻进原理[J]. 地质与勘探,35(6):88-90
- 刘巨保,张学鸿,孙超,钟启刚. 1997. 水平井钻柱受力变形分析的曲梁单元[J]. 天然气工业,21(6):32-34
- 梅冬,曾石友,梁丽,庞丰. 2015. 基于微钻试验金刚石钻头钻进速度的研究[J]. 地质科技情报,34(2):221-224
- 王健,聂江涛,郭建,黄志章,李秀珍. 2016. 江西相山矿田深部多金属矿化特征[J]. 地质与勘探,51(1):47-59
- 吴晔. 2014. 深部地质钻探钻柱失稳行为研究[D]. 北京:中国地质大学(北京):1-63
- 闫铁,李庆明,王岩,李井辉,毕雪亮. 2011. 水平井钻柱摩阻扭矩分段计算模型[J]. 大庆石油学院学报,35(5):69-72
- 闫铁,马红滨,谷玉堂,邢广宇. 2010. 钻柱在水平分支井段中的摩阻力分析[J]. 科学技术与工程,10(22):5378-5380
- 杨惠民,陈泽华. 1989. 钻杆扭矩扭应力动态分析[J]. 地质与勘探,(05):58-63
- 于永南,韩志勇,路永明. 1997. 弯曲井眼中柔性钻柱的屈曲问题[J]. 石油大学学报(自然科学版),21(6):32-34
- 祝效华,童华,刘清友,冯林先. 2007. 基于钻柱系统动力学的摩阻扭矩计算新方法[J]. 系统仿真学报,19(21):4853-4856
- 张永弘,刘恩,何富君,黄兆芝,陈抡元. 1998. 管柱螺旋屈曲时接触压力的研究[J]. 石油学报,19(3):131-134

The Drilling String Torque Analysis of the Heiyuanbei Deep Drilling Hole CUSD2 in the Xiangshan Area

KONG Er-wei¹, GAO Chao², LI Sheng-hai^{2,3}, LIU Xiao-yang⁴, GUO Pei-guo⁵, DUAN Long-chen²

(1. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan, Zhengzhou, Henan 450001;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

3. Research Institute No. 270 CNNC, Nanchang, Jiangxi 330200;

4. Beijing Geological Institute of Nuclear Industry, Beijing 100029;

5. The Fifth Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Huangshi, Hubei 435002)

Abstract: Drilling string is a major way to transmit torque to drilling bits, and many factors restrict working conditions, such as tensile force, compression force, bending moment, torque and so on, and the torque in drilling string is one of the most important parameters that influences the drilling string's safety and needs quantitative analysis. It is difficult to measure the torque directly during drilling process. Combined with the measured data in Heiyuanbei deep drilling hole CUSD2, this paper establishes an appropriate model for calculating the torque, and makes a comparative regression analysis between the indirectly measured data and calculated data to verify the reliability of the model. And the influence of hole diameter on the torque and the distribution characteristic of torque consumption during drilling were analyzed based on this model, which provides some advice for torque control in this area. This model can provide a reference for checking the strength drilling string torque during the further drilling projects.

Key words: CUSD2, drilling parameters, torque, regression analysis, Xiangshan