

文章编号: 1001-1986(2016)03-0132-04

不需起拔套管的孔内扩径钻具设计

燕建龙¹, 周云², 张绍和^{2,3}, 孙平贺^{2,3}

(1. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院,
湖南 长沙 410083; 3. 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对下套管护壁后, 下部地层出现新的缩颈、垮塌问题, 设计了一种不需起拔套管的孔内扩径钻具。描述了该扩径钻具的结构和工作机理, 其扩孔尺寸可通过调节滑心滑块的尺寸来改变; 导出了冲洗液量与金刚石切削块上的钻压之间的理论公式, 为选择合理的扩孔钻进规程提供了一种参考依据。野外应用表明, 该扩径钻具能够满足现场扩孔要求, 减轻工人劳动强度, 提高钻进时效。

关 键 词: 复杂地层; 套管护壁; 扩径钻具; 水力学计算

中图分类号: P634.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.03.026

A borehole reamer without lifting casing

YAN Jianlong¹, ZHOU Yun², ZHANG Shaohe^{2,3}, SUN Pinghe^{2,3}

(1. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Changsha 410083, China)

Abstract: Casing drilling technology is essential to borehole which can reduce shrinkage, collapse and save the cost. It is very essential in the soft and heterogeneous layers. A new borehole reamer without lifting casing is introduced in this paper. The drilling tool is composed of drilling pipe joint, sliding block, diamond cutting block and guiding rod. The authors discuss structure and working mechanism of the new reamer. Diameter of the reamer can be changed by sliding core and sliding block. This characteristic is different from conventional reamer. The matching calculating between drilling fluid volume and the weight of diamond cutting block has been done through hydraulics method. This formula can provide mathematics basis for the reamer design. The results of the field application show that this borehole reamer can meet the reaming requirements, release the labor intensity and improve drilling efficiency.

Key words: heterogeneous layers; borehole stability; reamer; hydraulics calculation

采用常规钻探方法在遇水膨胀的软土、黏土泥页岩地层, 或在破碎、松散易坍塌地层中施工时, 常常会出现钻孔缩颈、垮塌等现象^[1], 会严重影响钻孔质量, 还会带来卡夹钻具、水路堵塞等引起的烧钻、降低钻进效率等后果^[2]。

在钻探施工过程时, 有些方法和措施也可以防止或减少钻孔缩颈、垮塌等钻探问题^[3-6], 但是由于地层的复杂性和不均匀性以及钻具磨损的必然性等, 钻孔缩颈、垮塌等现象在钻探过程中仍常常遇到, 而解决这类问题的最好方案是采用套管护壁来改善钻孔质量^[7]。

若在下完套管后, 下部孔段出现新的缩颈、垮

塌等现象, 需要加长套管时, 常规的做法是全部拔出上部套管, 然后扩孔钻进, 之后再次下套管作业。这种施工方法效率低, 劳动强度大, 甚至会影响孔壁稳定。针对此问题, 研制出一种不需起拔套管的孔内扩径钻具, 仅需要加长套管并延伸至复杂地层就可以达到保护孔壁的作用。与传统的施工方法相比, 可有效节省时间、节约成本、降低劳动强度, 从而提高钻进效率。

1 扩径钻具的结构和工作机理

1.1 扩径钻具的结构及其特点

扩径钻具的结构如图 1a 所示^[8]。

收稿日期: 2014-12-31

基金项目: 湖南省自然科学基金(07JJ6089)

Foundation item : Natural Science Foundation Project of Hunan Province of China(07JJ6089)

作者简介: 燕建龙(1965—), 男, 陕西潼关人, 教授级高级工程师, 从事地质工程勘察设计与施工技术和管理工作。E-mail: yanjianlong6511@sina.com

引用格式: 燕建龙, 周云, 张绍和, 等. 不需起拔套管的孔内扩径钻具设计[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 132-135.

YAN Jianlong, ZHOU Yun, ZHANG Shaohe, et al. A borehole reamer without lifting casing[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 132-135.

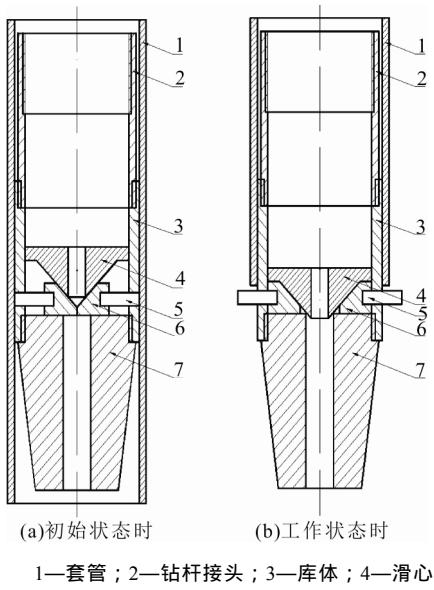


图 1 扩径钻具的结构示意图

Fig.1 Structure of reamer

钻杆接头与库体之间通过丝扣连接，滑心和沿圆周均匀分布的 8~10 个紧密接触的滑块组成滑心滑块结构，滑心和滑块之间采用圆弧面配合接触；滑心的外侧始终与库体的内壁接触，可沿库体的内壁上下滑动；库体的周围侧面均匀分布有 8~10 个圆形孔；滑块的下端轴向位置限位于导向杆的上表面处，只能沿钻具径向移动。

导向杆的结构为大、小头端外壁圆锥形面，上端外壁为圆柱面，与库体的内表面通过丝扣连接。变径处的阶梯顶住库体的下端，且和钻杆接头变径处的阶梯配合使库体轴向固定。

金刚石切削块嵌入滑块中，通过穿过库体上的圆形孔均匀分布在钻具圆周上。滑块上设有均匀分布的由内向外的水口。

1.2 扩径钻具的工作机理

由于地层的复杂性及未知性，当下部井段出现复杂情况需要进行扩孔作业时，不需要起拔套管，只需先提出钻具，然后在钻具的最下端接上该孔内扩径钻具，即可进行扩孔钻进，扩孔完成后再进行下套管作业。

图 1a 是该扩径钻具初始状态示意图。在扩径钻具下入到预定位置之前不开泵，此时滑心处于最高位置，金刚石切削块缩入套管内壁，滑块间处于密封封闭状态，扩径钻具恰能通过套管到达预定地层。当该扩径钻具到达预定位置时，开动地表钻机和水泵，此时该扩径钻具处于工作状态(图 1b)^[8]。

钻井液通过钻杆内径通道流至滑心和滑块处，在钻井液的压力作用下，推动滑心向下运动，从而将滑块推出超过套管外径，在钻机回转和钻压作用

下，开始破碎孔壁岩石实现扩孔钻进。

金刚石切削块对井壁的钻压可以通过地面水泵提供的冲洗液量和压力大小来控制。同时通过调节滑心滑块等组成部分尺寸和位置，可以改变钻孔直径扩大的最大范围。在扩孔钻进过程中，由于导向杆的下半部分外表面设计为锥形均匀变径，可起到导向的作用，保证扩大后的钻孔沿着原钻孔轨迹加深而不改变空间位置。

2 扩径钻具的优点

a. 在不起拔上部套管的前提下，可实现在孔内扩孔钻进。

b. 可通过控制钻井液排量的大小来控制金刚石切削块对井壁的钻压，从而选择合理的扩孔规程。

c. 金刚石切削块沿圆周均匀分布，能够使需扩孔孔壁的各向均匀受到切削，从而防止扩孔后钻孔轴线偏离原钻孔轴线，有效防止孔斜等。

d. 导向杆的设计，不但可以起固定库体作用，还能使扩大后的钻孔沿着钻孔轨迹加深而不改变空间位置。根据需要可在导向杆的下端镶嵌若干块金刚石或硬质合金切削块，利于切削破碎孔内岩层。

e. 可有效利用泵送的冲洗液压力展开金刚石切削块，利用钻机传递的钻压和转速至金刚石切削块实现扩孔钻进，不需增加其他额外动力源和机械设备，节约成本。

3 结构设计与水力学计算

3.1 滑心滑块结构设计

滑心滑块组合是扩径钻具的核心部件，要使得滑块能够被滑心推出库体，则滑心与滑块配合锥面必须满足一定的角度。如图 2 所示， F_1 是滑心作用在滑块接触面上的推力， θ 是滑块锥面与水平面的夹角。滑块移动的条件是：

$$F_1 \sin \theta - \mu F_1 \cos \theta > 0 \quad (1)$$

式中 μ 为滑块与导向杆之间有冲洗液润滑时的摩擦系数，取 $\mu=0.12^{[9]}$ ，可知 $\theta>7^\circ$ 。

同时金刚石切削块的扩孔尺寸取决于静止时滑心下表面与滑块上表面的距离 h_1 和角 θ 。当扩径钻具处于如图 2 所示的工作状态时，扩径钻具的扩孔尺寸 d_1 为：

$$d_1 = d + \frac{h_1}{\tan \theta} \quad (2)$$

式中 d 为库体外径。通过改变 h_1 和 θ 即滑心滑块组的尺寸和位置就可以改变扩径钻具的扩孔尺寸。

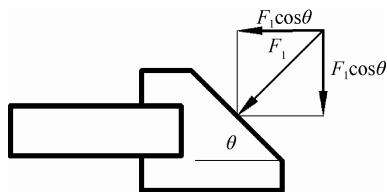


图 2 滑块受滑心作用力示意图

Fig.2 Chart of sliding core force applied to sliding block

3.2 金刚石切削块设计

该扩孔钻具的工作寿命取决于金刚石切削块的切削材料。合理设计金刚石切削块的切削材料和选择扩孔规程会极大的延长扩孔钻具的工作寿命和提高扩孔钻具工作效率^[10]。

a. 金刚石切削块切削材料设计。扩孔器的切削材料目前使用最多的是聚晶金刚石^[11]。综合考虑加工、组装、寿命等因素，选择的烧结体与 TL80#ZR₂磨耗比应大于 30 000，并且热稳定好，尺寸为 φ1.8 mm×4 mm 的圆柱体。根据胎体材料应该满足的粒度、形状、浸润性和密度要求等，选择 0.074~0.187 mm 的铸造碳化钨作为胎体材料。根据在无压浸渍工艺中粘结金属应满足渗透性和脱模性的要求，选择锌白铜作为粘结金属。同时在制作扩孔器的时候要注意在石墨模具上用 Al₂O₃ 汽油橡胶溶液涂上薄薄的一层，防止石墨对刚体可能产生的渗碳，延长其使用寿命^[12~14]。

b. 扩孔钻进规程与水力学计算。根据该扩径钻具的结构可知，当扩径钻具处于工作状态时，金刚石切削块对井壁的钻压 F_N 可用表示为：

$$F_N = F_1 (\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (3)$$

那么在滑心滑块结构一定(角 θ 一定)的情况下，要改变切削块对井壁的钻压，只能改变 F_1 。而 F_1 取决于冲洗液对滑心的冲击力 F_2 。取如图 3 所示的控制体 I_{1-2} 该控制体的空间区域是由断面 1、断面 2 及钻具内冲洗液通道组成，控制体 I_{1-2} 就是在其中流动的冲洗液。设滑心对控制体的作用力为 F_2' ，对控制体列动量方程：

$$\begin{aligned} p_1 A_1 - p_2 A_2 - p_1 (A_1 - A_3) + p_2 (A_2 - A_3) - F_2' \\ = \rho Q (\alpha_{02} v_2 - \alpha_{01} v_1) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 p_1 、 p_2 为断面 1、断面 2 处的流体压强； A_1 、 A_2 、 A_3 为断面 1、断面 2、断面 3 处的断面面积； ρ 为冲洗液密度； Q 为冲洗液的流量； α_{01} 、 α_{02} 为断面 1、断面 2 的动量修正系数，对于不可压缩流体及一般的工程计算有 $\alpha_{01}=\alpha_{02}=1$ ^[15]； v_1 、 v_2 为断面 1、断面 2 处的平均流速。

断面 1，断面 2 之间的位置势能之差与断面 1，断面 2 之间的压力势能和动能之差相比可忽略，因

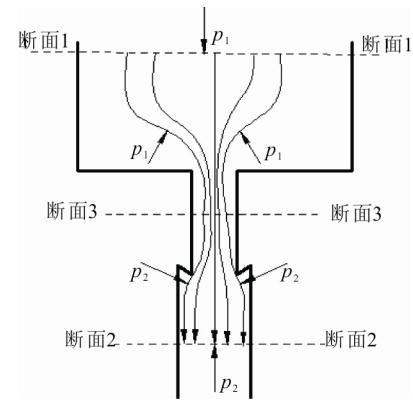


图 3 流经滑心的控制体示意图

Fig.3 Chart of fluid flowing through the sliding core

此由伯努利方程得：

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_\zeta \quad (5)$$

式中 α_1 、 α_2 为断面 1、断面 2 的动能修正系数， α_w 为流体处于紊流状态时的动能修正系数，对于紊流可取 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_w=1.01$ 对于一般工程计算取 $\alpha_w=1.01$ ^[16]； h_ζ 为断面 1、断面 2 之间的能量损失。

对于 h_ζ ，可只考虑局部水头损失，而局部水头损失因数只与断面的形状有关^[16]：

$$h_\zeta = \frac{1}{4g} \left(1 - \frac{A_3}{A_1} \right) \left(\frac{v_1 A_1}{A_3} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_3} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (6)$$

F_2 则与 F_2' 大小相等，方向相反。综合式(3)—式(6)得到：

$$\begin{aligned} F_2 = \rho Q^2 & \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{A_3} - \frac{1}{A_1} \right) + \frac{A_3}{2A_2^2} \left(\frac{A_2}{A_3} - 1 \right)^2 \right. \\ & \left. + \frac{\alpha_w A_3}{2} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) - \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)写成 $F_2 = \rho Q^2 \alpha_{1-2}$ ， α_{1-2} 是仅与库体内径、滑心内径、导向杆内径有关的系数。

综合式(3)和式(7)得钻压 F_N 的表达式：

$$F_N = \frac{\rho Q^2 \alpha_{1-2}}{n \cos \theta} (\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (8)$$

式中 n 为滑块个数。上述计算表明，在滑心滑块结构一定的情况下，可通过控制钻井液排量的大小来控制金刚石切削块对井壁的钻压，从而选择合理的扩孔钻进规程。

4 应用效果

4.1 地层岩性及施工概况

河南驻马店某矿区地层由上到下依次为：第四系黏土、粉质黏土和粉细砂局部夹砂砾岩，黏土矿物成分以蒙脱石为主，含少量伊利石、高岭土；新

近系(N)由砂岩、砂砾岩、砂质泥岩和砾石层组成，层厚30~60m；第三层由一套变质程度较高的结晶片岩、片麻岩组成，为勘查目的层。为防止第一层水敏性地层遇水膨胀而造成的缩颈卡钻事故，采用套管护壁。由于事先没有预料到新近系中的砾石层由黏土、砂砾充填，胶结松散，钻孔极易坍塌。在目的层中取心时，钻孔掉块严重，故需扩孔并延长套管至新近系底部，以保证后续施工的安全进行。

4.2 扩孔钻进效果

第四系(Q)及新近系(N)由于地层岩石的可钻性均小于5级，采用硬质合金钻进。勘查目的层岩石的可钻性在6~7级，采用金刚石绳索取心钻进。在新近系(N)中扩孔钻进时，根据式(8)选了扩孔时的泵量，使得施加在金刚石扩孔器上的钻压处在合适的范围，保证扩孔顺利进行。在矿区的ZK1105、ZK1309、ZK1511三个钻孔中分别使用该扩径钻具，快速、安全的完成了新近系的扩孔任务，扩孔时效达0.44m/h、0.38m/h、0.42m/h，扩孔完成后顺利下入套管。与起拔套管的作业方式相比，采用该孔内扩径钻具，大大减轻了劳动强度，提高了工作效率。

5 结论

a. 研制的金刚石扩孔钻具，可在下套管护壁后，下部孔段出现新的缩径坍塌现象，钻具可以在不起拔套管的前提下实现扩孔钻进。

b. 研制的扩径钻具的金刚石切削块能够在冲洗液的作用下自动伸出，通过改变滑心滑块的尺寸来控制该扩径钻具的扩孔尺寸。

c. 对该扩径钻具处于工作状态时进行水力学计算，得出施加在每个金刚石切削块上的钻压与冲洗液的流量之间的理论公式。这说明可以通过改变冲洗液量的大小来控制金刚石切削块对井壁的钻压，为选择合理的扩孔钻进规程提供了依据。

d. 现场试验表明，在复杂地层钻进过程中，使用该扩径钻具能满足现场扩孔要求，并可以优选扩孔规程，大大减轻工人劳动强度，提高钻进时效。

参考文献

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京：地质出版社，1992：250~260.
- [2] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉：中国地质大学出版社2001：90~100.
- [3] 时志兴，翟东旭，张东兴. 小口径岩心钻探钻孔缩径的预防与处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，2012，39(6)：91~95.

SHI Zhixing, ZHAI Dongxu, ZHANG Dongxing. Prevention of borehole diameter shrinkage in small diameter core drilling and treatment[J]. Exploration Engineering(Geotechnical Excavation Engineering), 2012, 39(6) : 91~95.

- [4] 吴晶晶，张绍和，施莉. 小口径水力双循环双壁钻具设计与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014，45(1)：186~192.
- WU Jingjing, ZHANG Shaohe, SHI Li. Design and application of small diameter of drill tools with dual hydraulic circulation in double tube[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(1) : 186~192.
- [5] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营：中国石油大学出版社，2001：89~105.
- [6] 汤凤林，加里宁 A Г, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 武汉：中国地质大学出版社，2009：300~310.
- [7] 胡郁乐，张绍和. 钻探事故预防与处理知识问答[M]. 长沙：中南大学出版社，2010：50~100.
- [8] 燕建龙，张绍和，钱书伟，等. 一种便于下套管的孔内扩径钻具：中国，201420229520.5[P]. 2014-10-22.
- [9] 唐金松. 简明机械设计手册[M]. 上海：上海科学技术出版社，2009：5~15.
- [10] 张绍和，鲁凡. 金刚石钻头参数设计规律[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2004，35(2)：195~200.
- ZHANG Shaohe, LU Fan. Design method about parameters of impregnated diamond bit[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2004, 35(2) : 195~200.
- [11] 王迪，孙鑫，赵大印，等. 长寿命金刚石扩孔器的研制[J]. 吉林地质，2014，33(3)：134~136.
- WANG Di, SUN Xin, ZHAO Dayin, et al. The development of the long-life diamond reamer[J]. Jilin Geology, 2014, 33(3) : 134~136.
- [12] 张绍和. 金刚石与金刚石工具[M]. 长沙：中南大学出版社，2005：50~58.
- [13] 张绍和，谢晓红，方海江，等. PDC钻头出露量和线速度对复合片磨损规律的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2010，41(6)：2173~2177.
- ZHANG Shaohe, XIE Xiaohong, FANG Haijiang, et al. PDC abrasion rule affected by height of protrusion and linear velocity[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41(6) : 2173~2177.
- [14] 张绍和. 金刚石与金刚石知识问答 1 000 例[M]. 长沙：中南大学出版社，2008：141~155.
- [15] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京：石油工业出版社，2000：54~60.
- [16] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，2004：273~282.

(责任编辑 聂爱兰)