

汶川地震断裂带科学钻探取心钻进岩心堵塞机理分析

庄生明, 罗光强, 张 伟

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:对汶川地震断裂带科学钻探 4 号孔(WFSD-4)钻探现场半合管取心钻进岩心堵塞的机理进行了分析, 总结出了 4 类岩心堵塞的形式, 对每一类岩心堵塞形式给出了减轻岩心堵塞的技术措施建议。

关键词:地震科学钻探; 取心钻进; 破碎地层; 岩心堵塞; 机理; 汶川地震断裂带科学钻探

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2013)07-0065-04

Analysis on Core Blockage Mechanism in the Core Drilling Operation of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/ZHUANG Sheng-ming, LUO Guang-qiang, ZHANG Wei (Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: By the analysis on core blockage mechanism with split core barrel for the coring operation of the borehole No. 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project, the paper summarized 4 core blockage forms. Some technical measures to reduce core blockage are suggested for each type of the core blockage form.

Key words: earthquake scientific drilling; coring drilling; broken formation; core blockage; mechanism; Wenchuan earthquake fault scientific drilling

1 概述

破碎地层取心钻进技术, 一直是钻探领域的技术难题。汶川地震断裂带科学钻探工程在汶川地震断裂带上采取原状岩心, 其难度更是不言而喻。汶川地震断裂带科学钻探 4 号孔(WFSD-4)采用螺杆马达+液动锤+半合管取心钻进工艺, 利用半合管取心最大限度地保证了岩心的原状性, 但是由于在破碎地层取心, 堵心问题成为最突出的问题。堵心导致回次进尺短, 深孔取心钻进, 辅助作业时间较长, 短的回次进尺极大的降低了钻进效率, 同时堵心还可能带来憋泵和半合管胀管等问题, 严重的形成双管双动, 导致岩心的磨蚀。

2 岩心进入半合管受力分析

进入岩心管的岩心要受到各种力的作用, 岩心的不同部位受力状况不一样, 岩心的受力对岩心的继续进入具有影响作用, 可能造成岩心堵塞, 因此有必要对岩心进入内管的受力及其影响因素进行分析。

如图 1 所示: 沿岩心轴向为 x 轴, 径向为 y 轴建立坐标系。取岩心柱长度为 l , 在岩心柱任意位置取一小段 $dx(0 < x < l)$ 为研究对象, 进行受力分析。

图中 F_{uc} 为上部岩心重力沿岩心轴线的分力, F_{dh} 为下部岩心沿轴线的支撑力, 岩心很短, 则近似有关系 $F_{uc} = F_{dh}$; 岩心自重 $W = \rho g V = \rho g s x = (\pi/4) \rho g d^2 x$; 摩擦力 $f = \mu F_N$ 。其中 ρ 为岩石的密度, d 为岩心直径, α 为岩心倾角(即钻孔倾角), μ 为岩心与岩心管之间的摩擦系数。

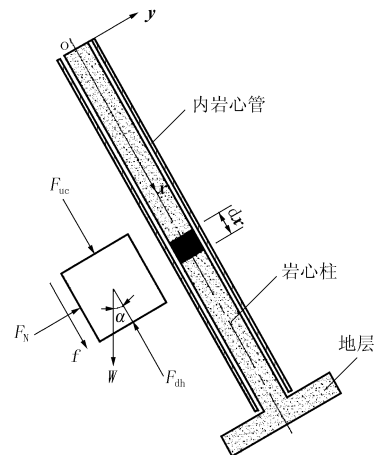


图 1 岩心受力分析

x 轴方向:

$$F_x = W \cos \alpha + f \quad (1)$$

y 轴方向:

$$F_y = F_N - W \sin \alpha \quad (2)$$

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(WFSD)”项目之“科学钻探与科学测井”课题

作者简介: 庄生明(1984-), 男(汉族), 陕西榆林人, 中国地质科学院探矿工艺研究所, 岩土工程专业, 从事地质钻探方面的工作, 四川省成都市郫县现代工业港(北区)港华路 139 号, 370488748@qq.com。

式(1)、式(2)联立求解得到:

$$\begin{cases} F_N = (\pi/4)\rho g d^2 x \sin\alpha \\ F_x = (\pi/4)\rho g d^2 x (\cos\alpha + \mu \sin\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

F_N 即为仅考虑自重作用的岩心受到的径向力, F_x 为岩心受到的轴向力,即必须要克服岩心的轴向力,才能使岩心顺利进入岩心管。随着岩心长度 x 的增加, F_x 逐渐增加,这意味着岩心下部的阻力大于上部的阻力,同时也说明岩心轴向力最大受力点为岩心柱底端,即发生堵心的位置。

当 $\rho = 2.35$ 、 $d = 94 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\mu = 0.5$ 时, x 与 F 的关系,即是岩心不同位置的受力大小。岩心受力与岩心长度关系如图 2 所示。

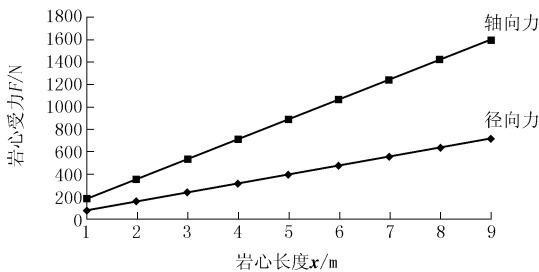


图 2 岩心受力与岩心长度的关系

从图 2 可以看出,岩心进入岩心管所受的径向力和轴向力都随岩心的长度的增加线性增大,此为仅考虑自重作用下的径向力 F_N 和轴向力 F_x 。当岩心长度 $x = 9 \text{ m}$ 时, $F_x = 1604.449 \text{ N}$, $F_N = 718.84 \text{ N}$ 。

事实上,当岩心有应力释放,遇水膨胀等因素发生的时候,对 F_N 应该有相应的放大倍数 N , N 的大小与岩石本身的变形和胀缩性密切相关,并且径向力 F_N 的增大,导致管壁摩擦力的增大,直接影响到轴向力 F_x 。在软弱破碎地层, NF_N 值表征了岩石对岩心管的实际胀破力。

另外,当 $x = 9 \text{ m}$ 时, μ 与 F 的关系,即不同摩擦系数时岩心的受力大小。岩心受力与摩擦系数如图 3 所示。不考虑岩石变形和胀缩的情况下,岩心与半合管之间的摩擦系数 μ 仅对轴向力 F_x 有影响,对径向力 F_N 不直接相关,但是 F_N 的变化会影响 F_x 。

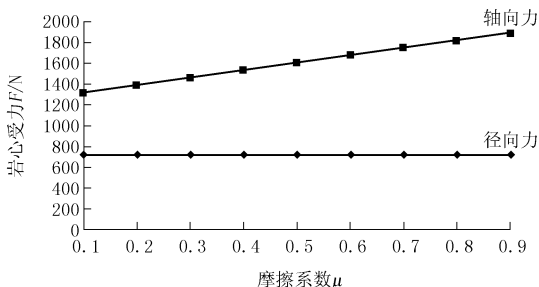


图 3 岩心受力与摩擦系数的关系

的大小。这说明岩心进入岩心管,可以通过调整半合管内壁的摩擦系数以降低轴向的摩擦阻力, F_N 仅与岩心自重和钻孔倾角相关。

3 岩心堵塞机理分析

岩心进入岩心管,首先需要克服本身自重以及岩心管内壁对岩心的摩擦阻力,才能顺利通过卡簧座。WFSD-4 孔现场取心钻进个别回次进尺短、岩心采取率低多伴随堵心、半合管胀管现象,堵心极易引起取心内外管双管双动,甚至压弯内管。图 4 显示了半合管胀管的情景。岩心堵塞导致半合管胀管,内管与外管的环状间隙被压缩,钻进时泵压异常升高,内管弯曲变形,严重时导致半合管报废。根据现场取心钻进情况,堵心原因主要有以下几种情况。



图 4 半合管胀管现象

3.1 碎岩块进入环状间隙导致堵心

钻进施工中,由于地层和岩心破碎,导致碎岩石块掉进岩心柱与内管之间的环状间隙(图 5),使岩心柱进入岩心管受到摩擦阻力作用。随着钻进的进行,岩心柱越来越长,掉入环状间隙内的碎岩块越来越多,对岩心进入岩心管的阻力越来越大,进尺越来越慢。到一定的时候,岩心被堵死,进尺停止。这是

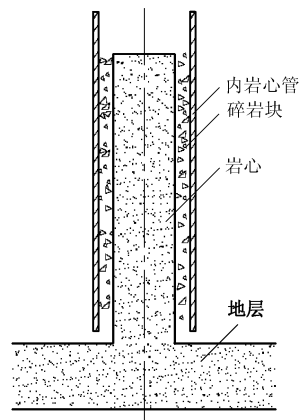


图 5 碎岩块进入环状间隙堵心机理

这种类型的岩心堵塞的基本过程。岩心堵塞后,内管与岩心通过环状间隙内的碎岩块实现耦合,钻头与外管下行时,内管会上行,导致内管与钻头内台阶的间隙加大,立管压力会相应降低。此时,即使加大钻压,立管压力也不会随之加大。此种岩心堵塞形式是岩心钻探中最为常见的一种形式。

3.2 岩心沿斜劈理面滑动导致堵心

进入岩心管的岩心柱会受到轴向力的作用。在轴向力作用下,斜劈理上下部位的岩心会沿着劈理面相对滑动,使岩心产生横向位移,造成岩心与岩心管接触,使岩心进入岩心管的摩擦阻力加大。图 6 和图 7 显示了此种岩心堵塞的现象和机理。一般来说,岩层的产状越陡,越容易发生岩心沿斜劈理面滑动导致的堵心。

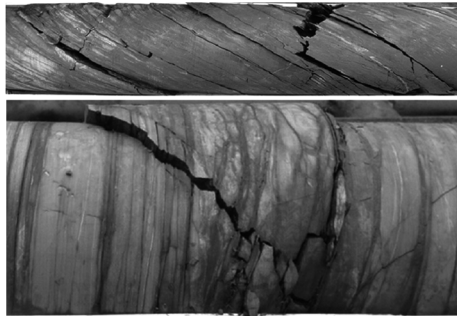


图 6 岩心沿劈理面滑移堵心

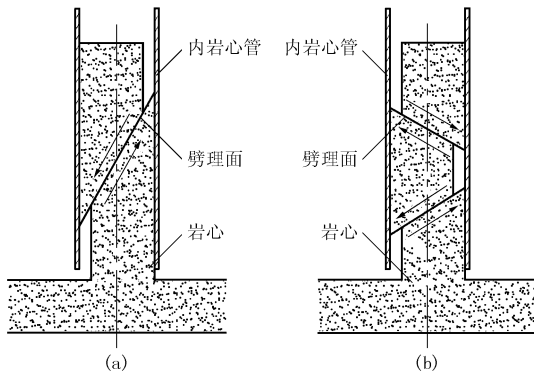


图 7 岩心沿劈理面滑移堵心机理

如图 7,岩心沿斜劈理面滑动导致堵心有 2 种情况:(1)岩心柱只有一个劈理面或者一组方向相同的劈理面。在轴向力作用下,岩心沿劈理面滑动的情况见图 7a。(2)在轴向力作用下,岩心沿着可相交的两组劈理面滑动,产生的结果见图 7b。这时,岩心已被堵死。

3.3 岩心膨胀导致堵心

某些岩石水敏性强,粘土矿物含量高,遇水易膨胀。此外,在塑性较强的岩层中钻进,岩心容易由于各向应力作用的解除而发生膨胀。岩心膨胀使岩心与内管间的间隙减小并因此导致岩心堵塞,图 8 为岩心膨胀堵心机理示意图,虚线表示钻头切削岩石的原始面,粗实线表示岩心膨胀后的自然面。表 1 是 WFSD-4 孔取心钻进某回次岩心膨胀的测量数据。该回次取心钻头内径 92.0 mm。在不同位置测量岩心直径,最大直径达 99.40 mm。岩心直径变化

率最大达到 8.0%,半合管整体胀管严重。

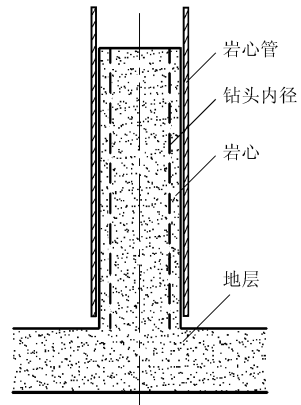


图 8 岩心膨胀堵心机理

表 1 不同测点岩心直径变化

测点序号	岩心直径 /mm	直径变化率 /%	测点序号	岩心直径 /mm	直径变化率 /%
1	92.00	-	5	96.82	5.2
2	95.44	3.7	6	98.66	7.2
3	94.88	3.1	7	97.30	5.8
4	96.42	4.8	8	99.40	8.0

3.4 地层松散、破碎或软弱导致堵心

属于此种堵心形式的地层有 2 类:(1)松散、破碎地层;(2)很软、塑性很强的地层。这 2 类地层的共同特点是,岩心的成柱性差(见图 9),在轴向力作用下,极易产生横向变形,最终导致岩心与内管之间无间隙,岩心紧紧贴在内管壁上,很快就造成岩心堵死。

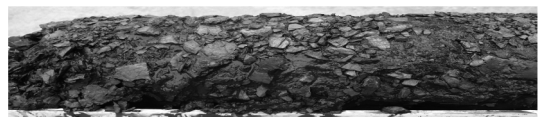


图 9 松散破碎和软弱岩心

4 减轻岩心堵塞的技术措施

针对破碎地层取心岩心堵塞问题,在 WFSD-4 孔,根据现场实际情况在钻具和钻进工艺 2 个方面着手来解决。

4.1 钻进工艺方面

采用螺杆马达+液动锤+半合管的取心钻进工艺。螺杆马达提高钻头回转速度,液动锤的使用不但可以提高机械钻速,更重要的是可以通过振击取心钻具,有利于减轻岩心堵塞,增加回次进尺长度。液动锤的冲击作用,对由于碎岩块进入环状间隙导致的堵心和岩心沿斜劈理面滑动导致的堵心在解堵功能上有一定的积极作用,尤其对碎岩块进入环状间隙导致堵心的解堵效果最为显著。

4.2 钻具方面

(1) 岩心管与岩心柱的摩擦阻力是岩心进入岩心管最主要因素,克服摩擦阻力即降低轴向力 F_x 也是行之有效的方法。有资料显示采用内平式无台阶低摩阻取心筒,在岩心管内壁做环氧树脂涂层以改善岩心柱进入取心筒的摩擦特性,从根本上解决岩心柱进入岩心管的高摩阻问题。现场 WFS-4 现场采用涂刷润滑脂的方式,以降低岩心与岩心管的摩擦阻力,此种办法对碎岩块进入环状间隙导致堵心和岩心沿斜劈理面滑动导致堵心 2 种情况具有良好的效果。对有一组以上互成角度的劈理面的岩心柱,降低轴向的摩擦阻力,只会减轻岩心堵塞情况,这种情况的堵心主要与岩心柱的长度即岩心自重有关。

(2) 对由于岩心膨胀导致堵心(情况三),根据岩心膨胀变形程度,合理选择钻头和岩心管内径,增大岩心柱与岩心管之间的间隙配合以适应岩心的膨胀变形。增大岩心管内径会影响到取心钻具内外管级配以及内管刚度等问题,而且取心钻具对地层的适应性也随之降低。最直接的办法就是减小取心钻头内径。WFS-4 孔现场取心钻头内径从 94 mm 减小至 92 mm,甚至 90 mm,对水敏性膨胀地层获得了良好的取心效果。

(3) 对地层松散、破碎或软弱引起的堵心,目前还没有比较简单、有效的方法解堵。国外 JamBuster 防卡取心钻具采用销钉连接多层衬筒结构,当岩心在衬筒里遇卡堵或者衬筒满管时,增加钻压会剪断销钉,释放衬筒,使第一层衬筒随岩心一起上行。新岩心可以进入第二层衬筒,第二次衬筒再次遇到卡心又会剪断销钉,使第二层衬筒叠式继续上行。第

(上接第 64 页)

直到最后的螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进。其间,每个阶段采用的技术都与当时的地层条件和可采用的技术条件密切相关的,每一个阶段都是大直径深孔破碎地层取心钻进技术发展不可或缺的一环。

(2) 汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术发展和演变的最终结果表明:螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法是适合于大直径、深孔、破碎地层取心钻进施工的最佳方法,该方法在钻进施工的效率、成本和安全以及取心质量、钻杆柱和钻头寿命等方面表现出优于其它方法的综合效益。

3 次卡心或满管时,立管压力会变化,司钻人员依据进尺情况决定停止取心作业。JamBuster 防卡取心钻具巧妙的避开岩心堵塞内管实质,采用联动的取心内管结构可解决三次堵(卡)心而不用起钻。JamBuster 防卡取心钻具消除了岩心的磨损,与常规的取心工具相比,岩心采取率提高约 2 倍,对松散、破碎或软弱地层取心无疑是十分有效的。在国内目前对松散、破碎或软弱取心还没有切实可行办法。

(4) 选择合适的钻头类型,钻头的隔水效果取决于地层因素,钻头与卡簧座合适的间隙配合可以分流部分泥浆润滑岩心表面,使岩心顺利通过卡簧座进入岩心管。

5 结语

对复杂地层取心钻进岩心堵塞问题,首先要根据实际地层做出相应的判断,从岩心堵塞机理着手分析,采取对应的措施手段,在保证岩心采取率的基础上,提高机械钻速,增加回次长度确保取心效果。

参考文献:

- [1] 张祖培. 硬岩深孔的取心与方法[A]. 中国大陆科学钻探工程技术论文选集[C]. 北京:地质出版社,2007. 156-159.
- [2] 张伟,贾军. 汶川地震科学钻探二号孔取心钻进方法的选择[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):5-7.
- [3] 尤建武,曹其友,杨明奇,等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)不同取心方法的应用效果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):9-12.
- [4] 王稳石. 勘探所 9 m 超长半合管钻具首次应用成功. <http://www.cgs.gov.cn/cgjz/kxjs/ywdongtai/19816.htm>[EB/OL].
- [5] 戴金岭,李开荣,薄万顺,等. 低摩阻取心筒的研究与应用[J]. 石油钻采工艺,1995,17(2):39-42.
- [6] 许俊良,宋淑玲,成伟. 国外钻井取心新技术(二)[J]. 石油机械,2000,28(10):53-57.

参考文献:

- [1] B. Engeser and L. Wohlgenuth. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland—KTB Bohrtechnische Dokumentation KTB REPORT 95-4[R]. Niedersaechsischen Landeamt fuer Bodenforschung, 1996.
- [2] 张伟. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况[J]. 探矿工程,1999,(4):52-53.
- [3] 樊腊生,贾军,吴金生,等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)钻探施工概况[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):5-7.
- [4] 王达,张伟,张晓西,等. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [5] 张伟,贾军. 汶川地震科学钻探项目二号孔取心钻进方法的选择[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):5-7.
- [6] 贾军,樊腊生,李旭东,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目二号孔(WFS-2)完井报告[R]. 2011.