

科学超深井硬岩取心关键技术

王稳石, 张恒春, 闫 家

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:科学超深井是人类观测深部地球的“望远镜”。获取典型区块的原状岩心,建立高分辨率的地层剖面及其物、化性剖面,是科学钻探的最主要的目的之一。在深部钻探中,钻头驱动方式和岩心提取方法,是影响工程能源消耗、施工周期和工程经费的关键因素,从多方面阐述了科学超深井取心钻进多项关键技术和难点,并提出了针对性的解决方案和研究方向。

关键词:大陆科学钻探;超深井;深部探测技术;硬岩;取心技术

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)01-0009-04

Key Technology of Coring in Hard Rocks for Scientific Ultra-deep Drilling/WANG Wen-shi, ZHANG Heng-chun, YAN Jia (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Scientific ultra-deep well is the “telescope” for human observation on the deep earth. Obtaining undisturbed core in typical block to establish high resolution stratigraphic profile and physical & chemical profile is one of the most important purposes of the scientific drilling. In deep drilling, the drill bit driving mode and coring method are the key factors to affect energy consumption, construction period and project funds. The paper discusses some key technologies and difficulties in scientific ultra-deep core drilling and puts forward the specific solutions and research direction in several aspects.

Key words: continental scientific drilling; ultra-deep well; deep exploration technology; hard rock; coring technology

万米科学超深井钻探工程是一项庞大的系统工程,是人类解决所面临的资源、灾害、环境等重大问题不可或缺的重要手段,体现着一个国家地学研究的综合实力。对地球奥秘最直接的探索和对地球物理及实验室取得的数据进行验证,必须通过钻探手段深入到地球内部,获取真实样品及各种信息。自20世纪70年代,世界少数发达国家先后实施了自己的科学深井、超深井钻探工程,获得了令人瞩目的科学成果,推动了钻探科学技术的长久发展。近年来,我国也实施了中国大陆科学钻探工程科钻一井(CCSD-1)、中国白垩纪科学钻探松科一井(SK-1)、汶川地震断裂带科学钻探工程(WFSD)等科学钻探工程,取得了一系列的地学、工程技术成果。

我国正在进行预研究的超万米科钻工程,将所钻地层定位于坚硬的结晶岩。岩心提取方式、驱动方式的选择,及机械钻速和回次进尺的提高,是提高深部坚硬地层取心钻进效率的关键技术,采取率和岩心原状性是最重要的技术指标。我国硬岩科学钻探的最大井深为CCSD-1井的5158 m,更深部的取心钻进缺乏理论和经验基础,因此,应分析科学超深井深部硬岩地层取心技术难题,并展开针对性的研

究,为将来我国实施万米科学超深井做技术准备。

1 岩心提取方式

岩心打捞方式主要是绳索取心和提钻取心两种。提钻取心每打捞一次岩心都需提大钻,绳索取心只有当钻头磨损需要更换时或打捞失败时才提大钻。相比而言,绳索取心可节省大量的起下钻时间,且钻孔越深,优势越大。但对于深部取心钻进,提钻取心方法可以使用井底动力近钻头驱动,而绳索取心钻进方法目前仍未实现井底动力的回转驱动。经验表明,在深部坚硬地层进行大口径取心钻进,地表驱动的机械钻速极低。

我国地质岩心钻探领域已成功研制出了绳索取心液动锤钻具,并得到迅速推广,但绳索取心回转驱动的井底动力仍未获得可应用推广的成果,且大直径绳索取心液动锤钻具仍有待工程验证。我国在煤田地质钻探施工中,在 $\varnothing 215.9$ mm井眼内使用 $\varnothing 127$ mm内平API钻杆进行大口径绳索取心钻进,采取 $\varnothing 70$ mm的岩心,获得了成功,但因钻深较浅(一般为1500 m以内),仅适应可钻性较好的地层,且回次进尺短和机械钻速低,该成果暂未推广。

收稿日期:2013-08-08

基金项目:深部探测技术与实验研究专项“大陆科学钻探选址与科学钻探实验”之“科学超深井钻探技术方案预研究”(SinoProbe-05-06)

作者简介:王稳石(1982-),男(汉族),湖南益阳人,中国地质科学院勘探技术研究所工程师,勘查技术与工程专业,从事钻探工艺研究工作,河北省廊坊市金光道77号,wangwenshi05@163.com。

即将实施的松辽盆地资源与环境深部钻探工程(SK-2井),我所将探索试验获取 $\varnothing 95$ mm岩心的深井绳索取心液动锤技术的可行性,同时,还将与相关单位合作开展井底动力钻具的创新性研究,以解决大口径绳索取心钻进回转驱动的难题,若都能获得成功,可将绳索取心钻进方法作为科学超深井岩心打捞方式之一。提钻取心方法虽在起下钻时间的消耗上处于劣势,但仍是最成熟、可靠的技术,且随着回次长度的不断突破,该方法仍将是岩心打捞的主要方式。

2 钻头驱动方式

钻头驱动方式分地表驱动和井底动力驱动。地表面回转是转盘或顶驱回转通过钻柱将转速和扭矩至上而下传至取心钻头,传递过程钻柱自身的回转及其与井壁的摩擦不仅能耗高,也增加了井壁失稳和断钻杆等井底复杂情况的风险。井底动力回转驱动是指通过井底动力钻具将液能转化为动能驱动取心钻具及钻头回转,转盘不回转或仅低速回转以消除井壁磨阻,目前井底回转动力钻具主要有螺杆马达和涡轮马达,在回转动力钻具与取心钻具之间增加液动锤即可实现井底冲击回转复合钻进。前苏联12262 m深的科拉3井(CI-3)进行了9000余米取心钻进,主要采用了涡轮马达驱动中空牙轮钻头取心,我国CCSD-1井首创了硬岩地层螺杆马达+液动锤冲击回转取心技术,该技术在WFSD工程极破碎地层中得到沿用,大幅提高了WFSD工程机械钻速、岩心采取率和回次进尺。

井底动力驱动无论是取心钻进,还是全面钻进,都可以大幅度提高机械钻速,已成为石油钻井和科学钻探最主要的钻进工艺方法。以WFSD-2孔为例,如表1和表2所示,在同等井深、地层条件下,顶驱+螺杆复合回转钻进的机械钻速较地表面回转钻进提高2倍,螺杆+液动锤复合冲击回转钻进的机械钻速较螺杆纯回转提高1倍。

我国液动锤处于世界领先水平,螺杆马达也取得了飞速发展,产品不仅迅速占领国内市场,还远销

表1 WFSD-2孔地表面回转与螺杆回转驱动效果对比

回转方式	回次编号	井深/m	进尺/m	心长/m	采取率/%	纯钻时/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
螺杆+顶驱	422	1561.96~1565.38	3.42	3.40	99.42	1.83	1.87
顶驱	423	1565.38~1568.27	2.89	3.00	103.81	7.17	0.40
顶驱	424	1568.27~1570.46	2.19	2.30	105.02	4.50	0.49
螺杆+顶驱	425	1570.46~1574.39	3.93	3.93	100.00	2.17	1.81
螺杆+顶驱	426	1574.39~1577.94	3.55	3.50	98.59	2.33	1.52

表2 WFSD-2孔螺杆纯回转与螺杆+液动锤冲击回转驱动效果对比

回转方式	回次编号	井深/m	进尺/m	心长/m	采取率/%	纯钻时/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
螺杆+液动锤	627	2206.76~2210.95	4.19	4.19	100.0	4.67	0.90
螺杆	628	2210.95~2214.13	3.18	3.10	97.5	7.83	0.41
螺杆+液动锤	629	2214.13~2218.74	4.61	4.61	100.0	5.17	0.89

国外多个国家和地区;我国涡轮钻尚处于研究试用阶段,已研发出4种规格的产品,目前,我所等多家研究机构都在进行相关研究。

高温是万米超深井深部地层需要解决的技术难题,而螺杆马达目前尚未找到耐高温材料替代橡胶定子,因此,全金属的涡轮马达将是深部地层唯一可选的井底回转动力钻具,而液动锤也尚未研究密封件的耐高温问题。因此,科学超深井驱动方式可采用如下组合:

- (1) 浅、中、深井段(<6000 m):转盘+螺杆(或涡轮)马达+液动锤+取心钻具;
- (2) 超深部井段(≥ 6000 m):转盘+涡轮马达+取心钻具。

3 长钻程取心钻具

取心钻具经过多年的发展,在各领域都形成了成熟的系列产品,我所研制的KZ型取心钻具,采用了轴承置钻具外总成、全泵量开式强制润滑与局部微循环清污的设计方式,具有结构简单、单动可靠、拆卸组装方便、回次进尺长、整机连续工作寿命长等优点。与石油钻井相比,同一口径可取更大岩心、钻进效率更高。该钻具在CCSD-1井取心钻进4633.77 m,经受了螺杆马达与液动锤高频复合冲击回转的恶劣工况,后又经过了SK-1井沉积岩地层和WFSD工程极破碎地层的考验,可作为科学超深井的取心钻具结构。

提下钻速度、机械钻速及回次长度三大因素决定科学超深井取心钻进总效率。提下钻速度在选定施工设备时即已确定;地层的可钻性级别很大程度上制约着机械钻速的提高;而提高回次进尺是可以成倍增加超深井取心钻进效率的技术手段。我国已实施的科学钻探取心钻具长度一般为9 m,为进一步提高科学超深井深部取心钻进效率,可对钻具内、外管进行优化设计,2~3根岩心管对接并研究中间扶正技术,同时开展相适应的大扭矩井底动力钻具,成倍提高回次长度。

4 取心钻头

科学超深井深部地层将以坚硬的结晶岩地层为主,取心钻头可选用中空牙轮钻头和金刚石钻头,这取决于岩石硬度、钻进深度、钻孔直径、钻进方法和岩心采取要求等。牙轮钻头在大口径取心中机械钻速和钻头寿命表现较好,但采取率和岩心质量较差,前苏联 CF-3 井和德国 KTB 项目采用牙轮取心岩心采取率都不超过 50%。薄壁孕镶金刚石钻头可由井底动力钻具高速回转驱动,在深部地层和小直径取心($\varnothing 152$ 、 216 mm 口径)中可以获得较好的技术经济指标。此外,如采取率和岩心质量要求高,牙轮钻头则不能满足高指标要求,金刚石钻头具有明显优势。图 1 为德国 KTB 主孔采用的牙轮取心钻头。

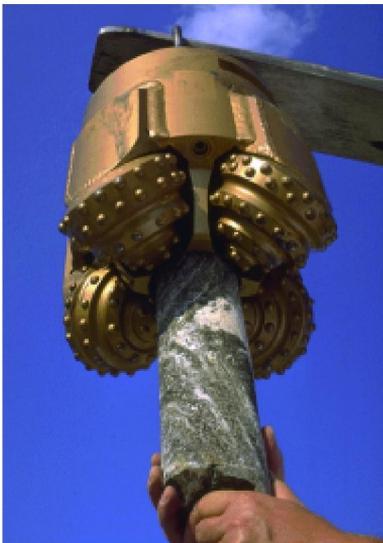


图 1 德国 KTB 主孔采用的牙轮取心钻头

随着高速涡轮钻具及孕镶金刚石钻头技术的发展,发达国家新的研究和实践表明,在深部极其坚硬地层中采用不带减速器的高速涡轮马达(转速 $1000 \sim 2000$ r/min)驱动孕镶金刚石钻头钻进,可大幅度提高机械钻速,此外,薄壁孕镶金刚石钻头相比牙轮钻头岩石的破碎体积小很多,在同一口径中可获得更大直径的岩心供科学研究。孕镶金刚石钻头技术已被列为石油钻井重点发展方向,预计 5~10 年内水平将得到显著的提升,进而促进深部难钻地层钻进效率的明显进步。因此,孕镶金刚石钻头将是未来实施万米科学超深井取心钻进主要的钻头形式。

在大口径井段(尤其指直径 ≥ 311 mm)取心,通常的做法是采用小直径超前孔取心钻进,再扩孔至设计井眼直径,该方法增加了大量高风险扩孔钻进工作量。如采用金刚石钻头同径取心钻进,则面临

大口径取心钻具及配套钻头的研制难度大、机械钻速低、岩心拔断力大、出心困难等一系列难题。可采用孕镶金刚石和牙轮组合钻头同径取心(见图 2),其实现方法如下:中空牙轮钻头由上部大直径低速、大扭矩井底动力钻具驱动,在大直径动力钻具与取心钻具之间内置一小直径高速动力钻具,并采用分流技术实现钻井液流量的匹配,超前孕镶金刚石钻头则由内置小直径井底动力钻具驱动,可同时发挥孕镶金刚石钻头对岩心的保护作用 and 牙轮钻头的高效特征,实现大口径井段一次成孔。

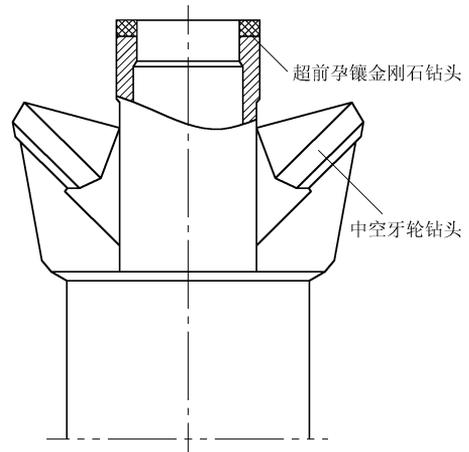


图 2 金刚石牙轮组合钻头

5 深部破碎地层取心技术

CF-3 井和我国塔深 1 井等超深井实施经验表明,在地应力强烈释放的条件下,地层不仅坚硬,且破碎、片化严重,这给取心钻进带来极大困难,岩心在进入内管后,应力逐渐释放而破碎,之后破碎岩心相互挤压造成堵心,取心回次将被迫终止而提钻,严重时钻头与卡簧座结合部即已破碎。对于提钻取心方法,回次进尺是决定取心钻进效率的决定性技术指标,即使采用绳索取心方法,超深井段岩心打捞时间也较长,另外,堵心后将给地表无损出心带来很大难度。

5.1 解决或缓解堵心的方法

5.1.1 内管镀层

普通钢内管内表面是凹凸不平的,与岩心之间的摩擦力将随岩心长度及应力释放的程度增加而增长,最终导致堵心。因此,提高内管内表面光洁度,降低其摩擦系数是缓解内管堵心的有效方法之一,而最简单的方式便是在内表面镀层。镀层可选择化学稳定性较好的镍和铬,镀层不仅可成倍的降低内表明摩擦系数,且均具有高的硬度和耐磨性。

5.1.2 玻璃钢复合材料内管(或衬管)

玻璃钢学名玻璃纤维增强塑料,俗称 FRP(Fiber Reinforced Plastics),即纤维增强复合塑料。FRP 具有很好的表面光洁度,强度相当于钢材,相对密度在 1.5~2.0 之间,只有碳钢的 1/4~1/5,拉伸强度接近,甚至超过碳素钢。一般的 FRP 不能在高温下长期使用,但可以选择耐高温树脂,使其长期工作温度在 200~300℃ 是可能的,且其高温稳定技术正逐步提高。因此,FRP 管可以作为解决超深井堵心的一种解决方案,将厚壁 FRP 管直接代替钢内管,或采用在钢内管内加一层薄 FRP 管作为衬管组成单动三管钻具。

5.1.3 叠式组合内管结构

在常规取心内管中使用一层或两层衬管结构,衬管可采用铝合金等其他材料,衬管用销钉固定在钢内管下边,销钉的强度根据地层性质确定。当岩心在衬管里遇堵心或衬管填满时,增加钻压剪断销钉,释放衬管,使堵着的岩心和衬管一起上行;当新岩心形成后进入第二层衬管,遇到第二次堵心又会剪断销钉,使第二层叠式衬管继续上行;第三次堵心或填满内管后再提钻。该技术可以解决 3 次堵心,但存在销钉的强度设计困难,需根据不同地层硬度、衬管的摩擦系数计算及现场实验,还需钻进时准确判断是否堵心,这需要工程技术人员有丰富的经验。该技术可作为后备方案,当其他方法无法解决堵心时可尝试采用。

5.2 半合管无损出心

岩心承载着重要地层信息,采取率和岩心的原状性是科学钻探的重要技术指标,但堵心后的破碎岩心往往在出管过程中被人为损坏,因此,岩心的无损出管对于科学钻探极其重要。半合管出心技术是将薄壁岩心管做成半合管形式,出心时卸开卡簧座、内管接头及卡箍,破碎岩心即可被原状取出,该技术在 WFSO 工程项目获得了极大的成功,半合管长度已达 9 m(图 3),并已配合螺杆马达+液动锤进行井底复合冲击回转钻进。



图 3 3.9 m 超长半合管

因素。超深部结晶岩地层取心钻进,现有的金刚石钻头取心技术已能满足采取率要求,重点研究方向是提高取心钻进效率和保持岩心原状性的各项关键技术,包括:

- (1) 利用 API 钻杆的大直径绳索取心钻进技术及配套器具的研究;
- (2) 长钻程取心钻具及大扭矩井底动力钻具的研制;
- (3) 大口径取心钻具及高效取心钻头的研制;
- (4) 国产耐高温系列涡轮钻具的研制;
- (5) 地应力强烈释放的破碎地层防堵取心钻具及无损出心技术的研究。

参考文献:

- [1] 王忠勤. MDS- \varnothing 215 取心工具研制报告[J]. 中国煤田地质, 2001, (12).
- [2] 杨甘生,王达. 科钻一井取心钻进技术研究[J]. 石油钻探技术, 2006, (5).
- [3] 王稳石,朱永宜,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] 朱永宜. KZ 型单动双管取心钻具的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2006, (5).
- [5] 王稳石,朱永宜. 科学钻探复杂地层取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(S1).
- [6] 王建华,苏长寿,左新明. 深孔液动潜孔锤钻进技术研究与應用[J]. 勘察科学技术, 2011, (6).
- [7] 苏长寿,谢文卫,杨泽英,等. 系列高效液动锤的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(3).

6 结论与建议

我国已实施的科学钻探项目都具有取心比例高的特点,实施 13000 m 科学超深井系统工程,6000 m 以深的岩心更为珍贵,超深部地层高比例取心钻进的可能性较大,因此,取心技术不仅决定所获取的岩心的质量,还是影响钻井周期和实施成本的最主要