

汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术

王稳石¹, 朱永宜¹, 贾军², 李前贵³

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611743)

摘要:汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目钻孔的主要目的之一是通过有效的技术手段,在极其破碎的地层中获取满足地学要求的原状岩心。通过在WFSD-2、WFSD-3两个钻孔采取隔液取心钻进、尖齿PDC小钻压取心钻进、孔底动力取心钻进、半合管无损出心等关键技术,高质量地达到了工程的取心要求,并有效地提高了难钻进、易堵心地层机械钻速和回次进尺。

关键词:汶川地震;地震断裂带;科学钻探;复杂地层;破碎地层;取心钻进

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)09-0028-04

Coring Drilling Technology in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/WANG Wen-shi¹, ZHU Yong-yi¹, JIA Jun², LI Qian-gui³ (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 3. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Wenchuan earthquake's Fracture Scientific Drilling (WFSD) was carrying out in the serious broken formation, one of the purposes is obtaining original cores to meet the geosciences requirements. Technologies of isolated fluid coring drilling, polycrystalline diamond compact (PDC) with sharp teeth and low drilling weight coring drilling, bottom hole power coring drilling and split barrel undamaged coring were applied in WFSD-2 and WFSD-3. The results indicated that the rate of drilling speed and roundtrip footage were improved in the serious broken formation. What's even more important was that the high-quality original cores had been obtained by these improved drilling technologies.

Key words: Wenchuan earthquake; earthquake fault; scientific drilling; complex formation; broken formation; coring drilling

1 概述

汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD)的主要实施目的之一是连续获取岩心,供地学研究地震断裂带机理。龙门山断裂带历史上经历了多次地震,地层主要是极其破碎,并含有部分极松散无胶结地层和强水敏性断层泥岩地层。因此,如何在极破碎、松散地层中高效、优质地取心钻进是WFSD钻探施工的关键技术。WFSD-2、WFSD-3孔设计孔深分别为2000、1200 m,均要求岩心直径 ≥ 85 mm、全孔岩心采取率 $\geq 85\%$ 。另外,为达到地震科学钻探对岩心的原状性要求,需全孔采用半合管取心方式。

因孔内事故和补取岩心,WFSD-2孔取心过程中经历了一次定向绕障侧钻、一次套管开窗侧钻补取心;WFSD-3孔也经历了2次侧钻。2个钻孔实际终孔孔深分别为2283.56 m和1502.30 m,虽都

设计以 $\varnothing 150$ mm口径终孔,但因套管程序所限,或因孔深增加所带来的设备能力限制,在下部孔段更改了取心口径。WFSD-2孔五开1859.78 m以深和侧钻补心都采用了 $\varnothing 122$ mm口径;WFSD-3孔第二次侧钻1180.88~1202.57 m孔段取心口径为 $\varnothing 122$ mm,1202.57~1404.53 m为 $\varnothing 100$ mm,1404.53 m以深为 $\varnothing 77$ mm。

针对WFSD工程复杂地层条件,采用了隔液、半隔液取心钻具结构,半合管无损出心,转盘+螺杆钻复合回转钻进,转盘+螺杆钻+液动锤复合回转冲击钻进等有效的技术手段。WFSD-2孔取心进尺1905.53 m,获取原状岩心1735.96 m,全孔采取率91.1%;WFSD-3孔取心进尺1545.82 m,获取原状岩心1430.22 m,全孔采取率92.5%。

收稿日期:2012-08-08

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: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,从事钻探工程研究工作,河北省廊坊市金光道77号,wangwenshi05@163.com;朱永宜(1954-),男(汉族),安徽安庆人,中国地质科学院勘探技术研究所教授级高级工程师,钻探工程专业,从事钻探工程研究工作,河北省廊坊市金光道77号,zyy@ccsd.cn。

2 取心钻具

2.1 单动结构

WFSD-2、WFSD-3孔提钻取心钻具使用了2种单动结构:其一是采用双级密封单动的SDB型钻具结构,该结构已在四川地区复杂地层小口径取心中成功运用多年;其二是KZ型钻具结构,是专为中国大陆科学钻探工程科钻一井而设计的。该钻具在科钻一井(CCSD-1)中进尺4638 m,后又在松科一

井(主井)层积岩中进尺1630 m,经受了坚硬地层中螺杆钻+液动锤孔底回转冲击恶劣工况的考验。KZ型钻具的结构特点是:高强度的轴承设计;全泵量开式强制润滑;轴承腔内部微循环清垢与可靠的内管防松扣措施。

2.2 钻具技术规格

WFSD-2孔和WFSD-3孔取心钻具技术规格见表1。

表1 WFSD-2、WFSD-3孔取心钻具技术规格

孔号	开次(孔段)	钻头/mm		外管/mm		内管/mm	
		外径	内径	外径	壁厚	外径	壁厚
WFSD-2	开始取心~1859.78 m	150	95	139.7	7.72	108	5.0/4.5
	1859.78~2283.56 m、补心段	122	75	114.3	7.37	89	5.0
WFSD-3	主孔、侧1	150	95	139.7	7.72	108	5.0/4.5
	侧2:1180.88~1202.57 m	122	75	114.3	7.37	89	5.0
	侧2:1202.57~1404.53 m	100	68	95	5	77	3.5
	侧2:1404.53~1502.30 m	77	49	73	5	56	2.5

3 工艺措施与技术效果

3.1 主要问题与难点

2个孔都几乎全孔破碎。破碎岩心被扰动后,在内、外总成结合部易卡心,在半合管内易堵心。

部分孔段为连续毫无胶结的松散层,另外全孔有大量承载地震信息的松散夹层,虽然对研究地震机理都有重要意义,而松散地层取心一直是取心钻进的难点。

因破碎地层上部裸眼段失稳形成不规则井径,大直径取心钻具离心力大,钻头回转时自转和公转并存,易磨细岩心。传统的小行程卡簧设计,岩心直径极易超出卡簧的卡心范围。2个钻孔都存在大量的炭质泥页岩,因塑性岩心受力后变形大,卡簧卡紧力不足以抵抗提钻时强大的抽吸作用,岩心会被整体或部分拉出。

WFSD-2孔三开和五开钻遇大量坚硬、致密的炭质泥页岩、粉砂岩,在孔深1000 m时,虽顶驱转速已开到150 r/min,钻压加到40~45 kN,机械钻速仅0.5 m/h。

WFSD-2孔三开 $\varnothing 168.3$ mm套管因孔内复杂情况未下至预定孔深,底部留下了50 m破碎的 $\varnothing 200$ mm裸眼孔段,而四开开钻即钻遇105 m极松散地层。大直径裸眼段的存在限制了小泵量的使用,其结果是,在1368.92~1468.47 m孔段仅获得松散岩心47.01 m,采取率仅47.2%。

3.2 主要工艺技术措施及应用效果

3.2.1 隔液取心钻进结构

3.2.1.1 结构特点

常规取心钻具在WFSD工程极破碎、松散地层中取心钻进,钻井液通过内、外总成结合部时会直接冲刷钻头内腔的心样,岩层中承载地震信息的松散夹层会因冲刷而损失。为适应WFSD工程极破碎、松散地层,研制了一种腰形水槽底泄式隔液取心钻进结构(如图1所示),其特点是钻头唇面上均布沿圆周方向延展、且上槽口高于钻头隔水环底面的腰形大断面外开放水槽,使钻井液改变排泄流向时产生的冲量大大减小,形成指向钻头内腔径向流的动力被有效削弱;钻头隔水环与卡簧座隔水环的配合,及钻头内岩心与隔水环的小环隙配合,形成有效的径向流屏蔽;调节钻头与卡簧座的轴向间隙,可以控制渗入钻头内腔的钻井液量,以适应不同地层钻进时润滑钻头的需要。

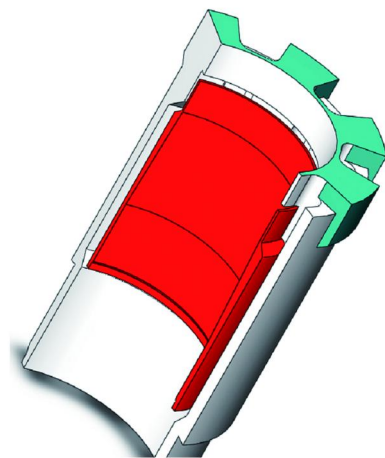


图1 腰形水槽底泄式隔液取心钻进结构

3.2.1.2 应用效果

WFSD-3孔浅部从194.52 m起,遇到了大段穿插出现的破碎、酥松、胶结微弱的砂、页岩,使用普通钻具与钻头钻进50个回次(117~166回次),至263.67 m共进尺69.15 m,平均岩心采取率77.3%,其中194.52~209.17 m孔段采取率仅48.7%。第167回次起换用腰形水槽底泄式隔液取心钻进结构钻进,至孔深278.54 m(180回次)总计钻进11回次,岩心采取率升至88.5%。

为保持破碎岩心原状性,除采用半合管无损出心外,隔液取心钻进结构的运用,最大程度地减小了钻进过程中对破碎岩心的冲刷、扰动(图2),同时也降低了内、外总成结合部及半合管内部堵心的概率。WFSD-2孔自三开起全部采用了隔液、半隔液取心钻进结构,回次长度从1.94 m提高至3.2 m。

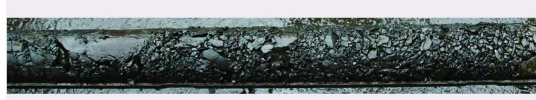


图2 采用隔液取心钻进结构所获得的极破碎、松散岩心

3.2.2 卡簧与钻头的大公差配合设计

大壁厚、长行程、大缺口的卡簧与钻头构成大公差配合,提高了硬岩的采心直径范围和易变形岩层的采心可靠性。卡簧座与卡簧外径不变时加大卡簧自由内径与钻头内径的负公差;减小卡簧座最小限位直径;卡簧壁厚增加的同时,保证有足够大的卡簧行程,使其在上死点能张开到允许岩心顺利通过;保证卡簧完全收缩不被拉出卡簧座;尽可能大的缺口允许卡簧产生更大的径向收缩,使之更紧地抱住岩心;大锥角保持卡簧高度不变来增加卡簧壁厚,同时有利于卡簧径向的快速收缩等。

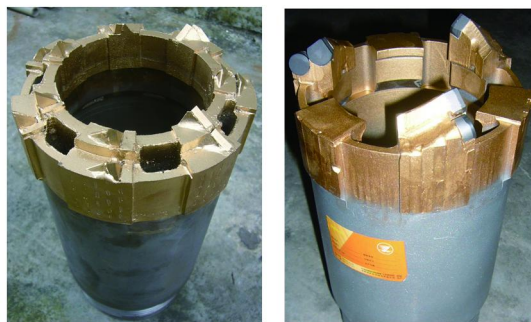
WFSD-2孔自孔深770.01 m遇连续松软的炭质页岩与泥岩,使用普通的圆水眼底喷PDC钻头和一般设计的卡簧,多次出现前一回次丢心,后一回次部分捞心。自三开起全部采用了卡簧与钻头的大公差配合设计,配合隔液取心钻进结构,丢心情况大为改善。

3.2.3 尖齿PDC钻头在致密泥页岩中的运用

WFSD-2孔三开开钻即钻遇坚硬、致密的炭质泥页岩、粉砂岩,圆片PDC钻头在现场有限的钻压条件下难以实现剪切破碎,金刚石钻头靠高速回转磨削碎岩,泥页岩的较强塑性使其无法取得较好的机械钻速,而尖齿PDC钻头能在较小的钻压及较低转速的参数条件下实现快速钻进。

图3(a)所示为全尖齿PDC钻头,在三开致密泥页岩中取心钻进29回次,累计进尺93.79 m,机械钻速0.82 m/h。尖齿PDC块易磨损,且遇破碎、地层变换等条件时常出现尖齿崩刃,因此,钻头寿命低,三开共使用11只(以钻头每重镶焊一次尖齿PDC块记1只),平均使用寿命8.53 m。

因全尖齿PDC钻头虽能在致密泥页岩中获得较高的机械钻速,但易崩刃(尤其是外刃),导致每个钻头寿命仅在3~5个回次,因此,研制出了图3(b)所示三尖齿PDC钻头,为尖齿与圆片齿复合PDC钻头。在较小的钻压及较低转速的参数条件下实现快速钻进的同时增加钻头寿命。该钻头三开使用43回次,累计进尺141.99 m,机械钻速0.71 m/h。因外保径采用圆片状PDC块,且内圈尖齿加强,该钻头共使用7只,平均使用寿命由全尖齿PDC钻头的8.53 m提高至20.28 m。



(a) 全尖齿PDC钻头

(b) 三尖齿PDC钻头

图3 尖齿PDC钻头实物

3.2.4 转盘+螺杆马达复合回转钻进技术

WFSD-2孔四开1465 m穿过极松散无胶结地层后,继续采用转盘(顶驱)单回转驱动钻进,存在以下问题:(1)随着孔口回转驱动效率的降低,机械钻速将随孔深增加逐步降低;(2)上部裸眼段含50 m的 $\varnothing 200$ mm大直径孔眼及100 m极松散不稳定地层,对维持孔壁稳定提出了更大的挑战。

为减小钻柱对孔壁的扰动,提高钻进效率,钻井工程部决定从406回次(孔深1500.99 m)起启用 $\varnothing 120$ mm螺杆马达,采用复合回转驱动金刚石钻头钻进。配备660 L/min泵量,螺杆马达转速可达180 r/min,同时转盘开到20 r/min以消除孔壁摩擦阻力。在更小钻压的条件下,机械钻速即从0.65 m/h提升至1.35 m/h,407回次更是达到1.85 m/h,从表2所示四开单回转和复合回转钻进技术指标对比看出,转盘+螺杆马达复合钻进技术机械钻速、岩心采取率和回次长度都高于转盘(顶驱)单回转钻进。

五开及侧钻补心都选用 Ø95 mm 螺杆马达继续采用孔底动力复合驱动,其中五开部分孔段还采用了螺杆马达+液动锤孔底联合驱动的回转冲击钻进方式。WFSD-2 孔共使用转盘+螺杆马达(Ø120、95、

89 mm 螺杆马达)复合回转取心钻进 243 个回次(不含螺杆马达+液动锤复合回转冲击钻进),累计进尺 734.22 m。

表2 WFSD-2 孔四开(1360.26~1859.78 m)单回转与复合回转技术指标对比

回转类型	回次数	进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	回次长度/m	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
转盘(顶驱)	61	173.80	114.44	65.8	2.85	277.92	0.63
转盘+螺杆	104	325.72	310.85	95.4	3.13	376.00	0.87
小计	165	499.52	425.29	85.1	3.03	653.92	0.76

3.2.5 螺杆马达+液动锤回转冲击钻进技术

WFSD-2 孔 2110 m 进入以炭质粉砂岩、泥页岩为主的沉积岩地层,该地层特点是坚硬、致密,纯回转的螺杆马达驱动金刚石钻头钻进,机械钻速呈逐渐下降趋势,加大钻压亦无明显的改善。解决此问题仅有 2 个途径:一是提高钻头转速(通过增加排量的方法),但泵压将大幅度增加;二是使用螺杆马达+液动锤的回转冲击孔底联合驱动。

第 610 回次(孔深 2136.67 m)下入 YZX98 型液动锤,在同等钻进参数条件下,当即将钻速从约

0.60 m/h 提高至 1 m/h。不仅在更坚硬、致密地层的地质条件下取得了更高的机械钻速和回次进尺,而且少见钻井工程部担心的提钻受阻现象,故得出液动锤适应 WFSD-2 孔复杂地层的结论。WFSD-2 孔五开仅 1 套液动锤下井,钻进 28 个回次,共计进尺 119.50 m,机械钻速 0.77 m/h,平均回次长度高达 4.27 m。从表 3 可以看出,使用螺杆马达+液动锤回转冲击钻进技术,不仅提高了机械钻速和岩心采取率,还大幅度提高了回次长度。

表3 WFSD-2 孔五开(1859.78~2283.56 m)三种驱动方式效果对比

驱动方式	回次数	进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	回次长度/m
转盘单回转	1	1.29	0.67	51.9	5.33	0.24	1.29
转盘+螺杆马达	92	302.99	274.32	90.5	526.42	0.58	3.29
转盘+螺杆马达+液动锤	28	119.50	116.09	97.1	154.92	0.77	4.27
合计	121	423.78	391.08	92.3	686.67	0.62	3.50

3.2.6 半合管无损出心技术

传统出心方式无法做到破碎岩心的无损出管,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。在机械钻速一定的情况下,回次进尺长度决定钻进效率,WFSD-2、WFSD-3 孔施工初期半合管长度为 3 m,WFSD-2 孔于 241 回次孔深 973.91 m 处,首次使用 4 m 长半合管钻进获得成功,自此回次进尺常规性地提高到 4 m 以上;WFSD-3 孔于 517 回次孔深 927.98 m 处,首次运用 4 m 长半合管钻进,回次进尺当即提高到 3.6 m 以上。WFSD-2 孔于 268 回次孔深 1068.73 m 试用 2 根 3 m 半合管对接组合成 6.2 m 管,实现回次进尺 6.11 m,之后又成功加工出 6 m 长半合管,在 WFSD-2 孔四开后期试用,虽因地层和工艺因素仅有 2 个回次实现满管,但多次回次进尺超过 4.5 m。

表 4 是 2 个钻孔在使用 3 m 半合管及启用 4 m 和更长半合管后回次长度对比。

表4 不同长度半合管使用效果对比

孔号	半合管长度/m	回次数	孔深/m	进尺/m	回次长度/m
WFSD-2	3	240	365.11~973.91	480.84	2.00
	>3	404	973.91~2283.56	1319.19	3.27
WFSD-3	3	516	0~927.98	927.98	1.80
	>3	107	927.98~1186.77	258.79	2.42

4 钻头的应用

因 WFSD 工程地层以硬、脆、碎为主,兼有松散、软地层,钻进以金刚石钻头为主,部分使用 PDC 钻头和合金钻头,钻头的结构以隔液、半隔液结构为主。

表 5 为 2 个钻孔各类型取心钻头技术指标统计。

5 结论

(1) 隔液取心钻进结构解决了破碎、松散地层岩心采取率低的难题;

(下转第 38 页)

串:Ø60 mm 外丝钻杆 + 接头 + Ø50 mm 外丝钻杆 + 倒扣接头 + 尾管头 × 0.14 m + Ø73 mm 套管 3 根 × 14.88 m + Ø73 mm 筛管 18 根 × 89.25 m + 尾管引鞋 × 0.08 m);

(3) 上提至中和点,立轴正转,倒扣未成功;等待 5 h 后,立轴正转,成功倒开扣,提钻;

(4) 用 Ø60 mm 外丝钻杆 + 接头 + Ø50 mm 外丝钻杆 + Ø50 mm 外平钻杆的钻具组合下钻至 1142.00、1187.73 和 1502.30 m 处,分别用 pH 值 11 的清水替换孔内泥浆,替换完毕提钻。

5 结语

(1) 尾管固井可减少固井作业的套管和水泥等材料的用量,可明显节省固井施工时间和成本。

(2) 针对 WFS D - 2 孔四开孔段 (1349.50 ~ 1859.78 m) 钻探施工的复杂地层条件,研发了适合于破碎地层和小套管间隙的 Ø139.7 mm 无接箍尾管管柱和施工工艺。采用自行设计、加工的倒扣接头、尾管头、无接箍套管、浮箍、浮鞋等工具,运用通井(扫孔)一下尾管—开泵循环(分段)—注前置液—注水泥浆—注后置液—替浆—倒扣丢手—循环—提钻的下尾管固井工艺,一次圆满完成了小间隙(5.15 mm)无接箍 Ø139.7 mm 尾管固井作业,保证了后续 Ø122 mm 口径的取心钻进,满足了地学研

究对岩心直径的要求。

(3) 自制 Ø139.7 mm 无接箍套管及尾管附件的研制成功、小间隙下套管及固井的成功实施为 WFS D 项目下 Ø89 mm 尾管、Ø73 mm 筛管、Ø108 mm 筛管提供了宝贵的经验,为类似项目提供了可供参考的经验。

(4) WFS D 项目 4 次下尾管作业(2 次固井、2 次不需要固井)、1 次下飞管作业均获得了成功,但自制小直径尾管倒扣接头的反扣螺纹有待进一步优化,特别是尾管柱质量轻、需要固井时须慎重设计反扣螺纹,保证成功倒扣丢手。

参考文献:

- [1] 王照明. 自制尾管固井工具解决边远地区固井[J]. 钻采工艺, 1994, 17(3).
- [2] 张晓延, 赵让乾, 等. 简易尾管固井技术在地热井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(12).
- [3] 贾军, 樊腊生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS D - 1)小间隙固井工艺的研究与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12).
- [4] 王达, 张伟, 等. 中国大陆科学钻探工程科钻—井钻探工程技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 林强, 郑力会, 等. 高温高压小井眼尾管固井技术应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(11).
- [6] 史交齐, 高连新, 等. 论无接箍式套管的性能、评价及应用[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(5).

(上接第 31 页)

表 5 WFS D - 2、WFS D - 3 孔取心钻头技术指标

孔号	钻头类型	回次数	进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	回次进尺/m
WFS D - 2	金刚石	452	1371.93	1253.69	91.38	2105.00	0.65	3.04
	PDC	141	260.42	226.88	87.12	396.17	0.66	1.85
	尖齿 PDC	71	234.49	220.70	94.12	315.83	0.74	3.30
	硬质合金	26	38.89	34.65	89.10	63.58	0.61	1.50
	小计	690	1905.73	1735.92	91.09	2880.58	0.66	2.76
WFS D - 3	金刚石	598	1214.59	1125.92	92.70	1582.93	0.77	2.03
	PDC	180	316.24	292.50	92.49	475.93	0.66	1.76
	硬质合金	9	14.99	11.80	78.75	23.00	0.65	1.67
	小计	787	1545.82	1430.22	92.52	2081.87	0.74	1.96
总计		1477	3451.55	3166.14	91.73	4962.45	0.70	2.34

(2) 尖齿 PDC 小钻压取心钻进技术在大口径坚硬、致密泥页岩、粉砂岩地层中,能较大的提高机械钻速;

(3) WFS D - 2 孔转盘 + 螺杆马达复合回转钻进、螺杆马达 + 液动锤复合回转冲击钻进的成功运用,不仅在深孔大口径取心钻进中获得了比转盘单回转钻进高的钻进效率,还能维护破碎地层的孔壁稳定;

(4) 半合管无损出心技术是在松散、破碎地层

中保持岩心原状性的有效技术手段。

参考文献:

- [1] 张伟, 贾军, 等. 汶川地震科学钻探项目的概况和钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1).
- [2] 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).
- [3] 朱永宜, 王稳石. 松科—井(主井)取心钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(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, 34(3).