

汶川地震断裂带科学钻探

项目概况和钻探技术

汶川地震科学钻探工程中心

张伟、贾军

中国地质科学院探矿工艺研究所

胡时友

项目立项背景

2008年5月12日14时28分，在我国四川省发生了震惊世界的汶川特大地震，震级8.0，最大烈度11，地震影响范围涉及10个省（区、市）的417个县（市、区），造成8万多人死亡、37万多人受伤、4500多万人失去家园，导致近万亿元的财产损失。

地震对人类危害巨大，必须以各种方法来研究和预报地震。

科学钻探是研究和预报地震的最好方法之一。

项目概况

项目名称：汶川地震断裂带科学
钻探（WFSD）

项目性质：科技部专项，按科技支撑
计划项目管理

负责单位：国土资源部

实施单位：国土资源部、中国地震局

实施时间：2008-2011年

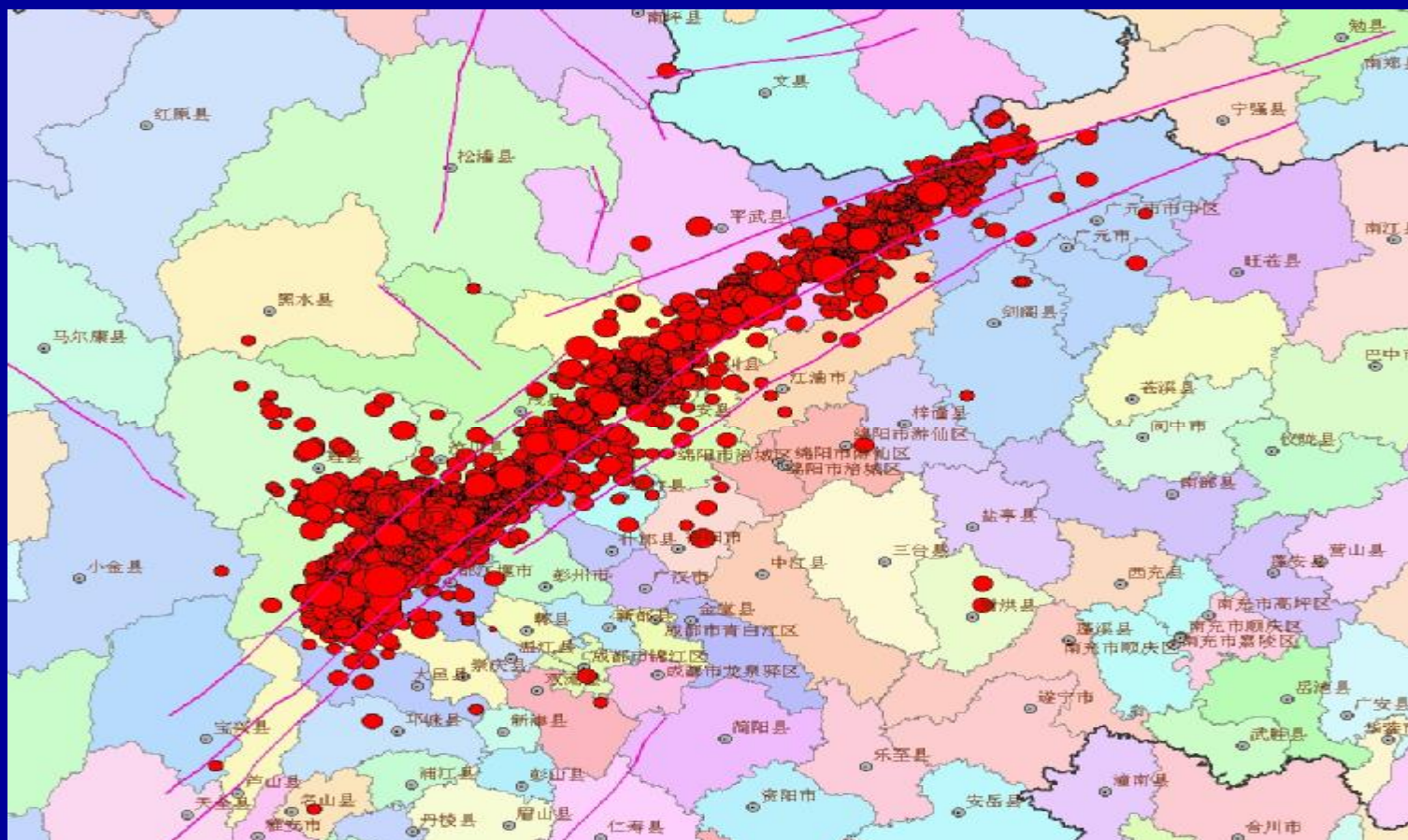
项目目标任务

在汶川大地震和复发微地震的源区--龙门山“北川-映秀”断裂及龙门山前缘安县-灌县断裂傍侧先后实施5口科学群钻（400-3000m）。通过对岩心、岩屑和流体样品进行多学科观测、测试和研究，揭示汶川地震断裂带的深部物质组成、结构、产出、构造属性；恢复地震过程中的岩石物理和化学行为、能量状态与破裂过程，检验和深化地震断裂发震机理。完钻后，将在钻孔内安放地震探测仪器，建立中国第二个深孔长期地震观测站。为未来地震的监测、预报或预警提供基本数据。

龙门山断裂带的四大活动断裂



- ① 安县-灌县断裂 (AGF.) — 350 km (47°) ☀
- ② 北川-映秀断裂 (BYF.) — 450 km (47°) ☀
- ③ 茂县-汶川断裂 (MWF.) — 180 km (40-60°) ☀
- ④ 平武-青川断裂 (PQF.) — > 350 km (60°) ☀



截至2008年10月10日，主震区累计发生余震33125次，其中5.0~5.9级32次，6级以上8次，余震范围长300 km，宽80 km

四川北川与平武交界今晨发生4.9级地震

2009年10月20日05:52 [四川新闻网-成都商报](#)



项目组织管理

具体组织实施工作由汶川地震科学钻探工程中心承担。工程中心设在中国地质调查局，主任王学龙、副主任兼首席科学家许志琴、副主任胡时友、总工程师张伟、总地质师李海兵。

工程中心下设：地学实验研究部（负责选址和地学研究）、钻井工程部（负责钻探、测井、录井等钻井工程）和行政办公室（负责行政事务和综合服务）。

项目的科研课题管理

项目按照“国家科技支撑计划专项经费管理办法”进行管理。

项目共设17个课题，主要由中国地质调查局和中国地震局下属的研究单位承担。课题经费和进度的管理由课题承担单位负责，地学部和钻井工程部根据实现项目总目标的要求开展课题之间的协调。

“科学钻探与科学测井”课题任务目标

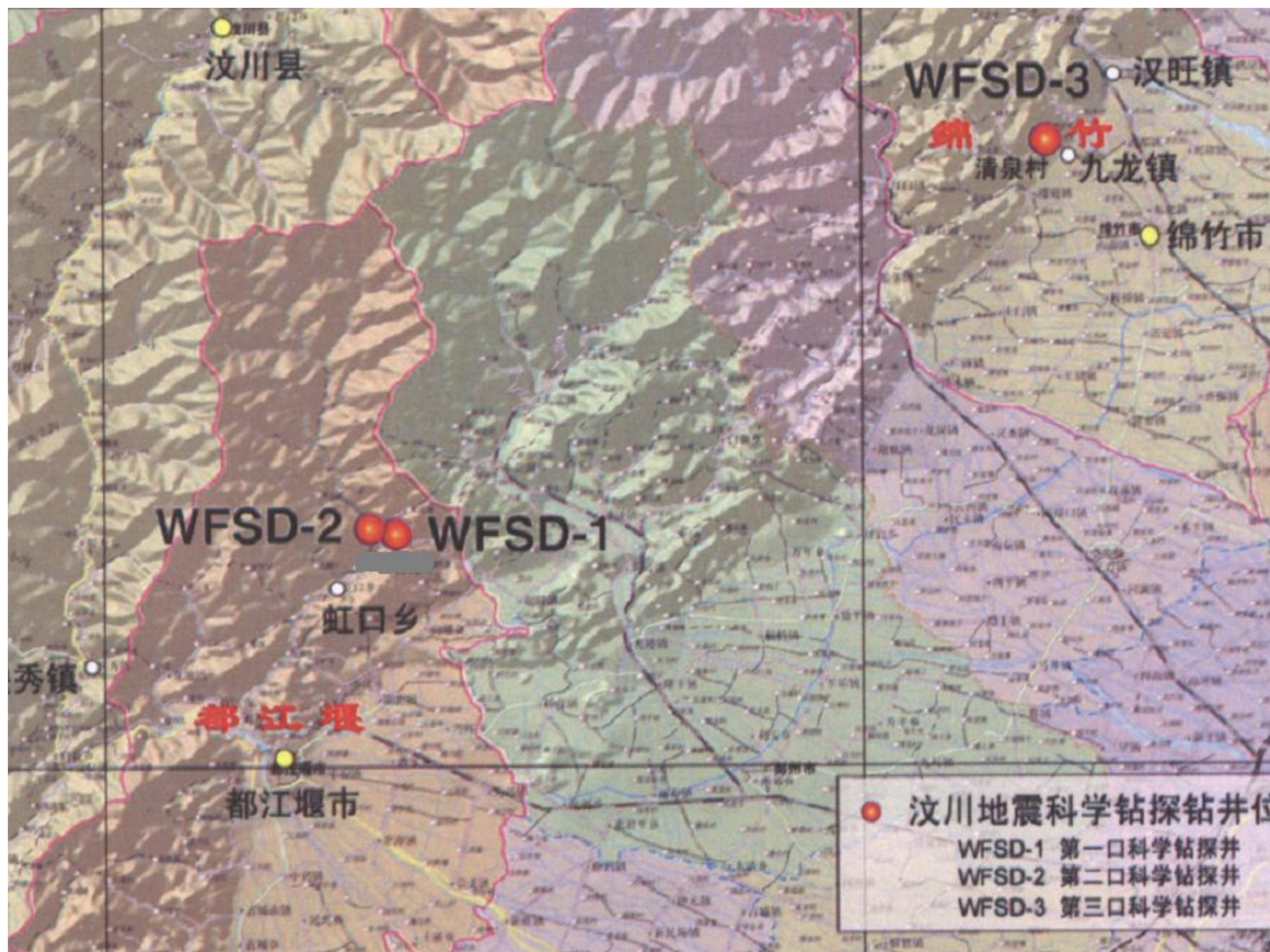
开展汶川地震断裂带科学钻探工程的道路、井场、实验室、办公室和岩心库的建设以及5口科学群钻的取心钻探、测井和录井施工，为地震研究提供岩心和测井资料，为在地层深部进行科学实验和长期监测提供通道条件。



汶川地震科学钻探工程中心郫县基地—探矿工艺研究所

汶川地震科学钻探的钻孔设计

钻孔名称	设计孔深 (m)	终孔直径 (mm)	钻孔地点	备注
WFSD-1	1200	76	都江堰虹口	2009年7月以1201.1m深度完钻，四川403队施工
WFSD-2	2000	150	都江堰虹口	2009年7月开钻，10月24日孔深438m，北京101队施工
WFSD-3-P	400	150	绵竹九龙镇	2009年9月开钻，10月24日孔深343m，四川403队施工
WFSD-3	1200	150	绵竹九龙镇	计划2009年11月开钻，安徽313队承担施工
WFSD-4	3000	150	待定	正在选址



WFSD-1施工基本条件和要求

钻孔深度：1200m

钻孔倾角：80°

终孔直径：76mm

取心要求：全孔连续取心钻进，岩心采取率不低于85%。

孔斜要求：钻孔顶角变化 $\leq 15^\circ$

地层条件：上部为中酸性火山岩和花岗闪长岩，下部是三叠系岩石。由于受特大地震影响，岩层破较严重。

[illegible]

A photograph showing severe structural damage to a building. A large section of the white facade and roof has collapsed, exposing the internal wooden frame and debris. The ground in the foreground is covered with broken tiles and rubble.

(李海兵提供)



汶川地震科学钻探一号孔于2008年11月6日开钻

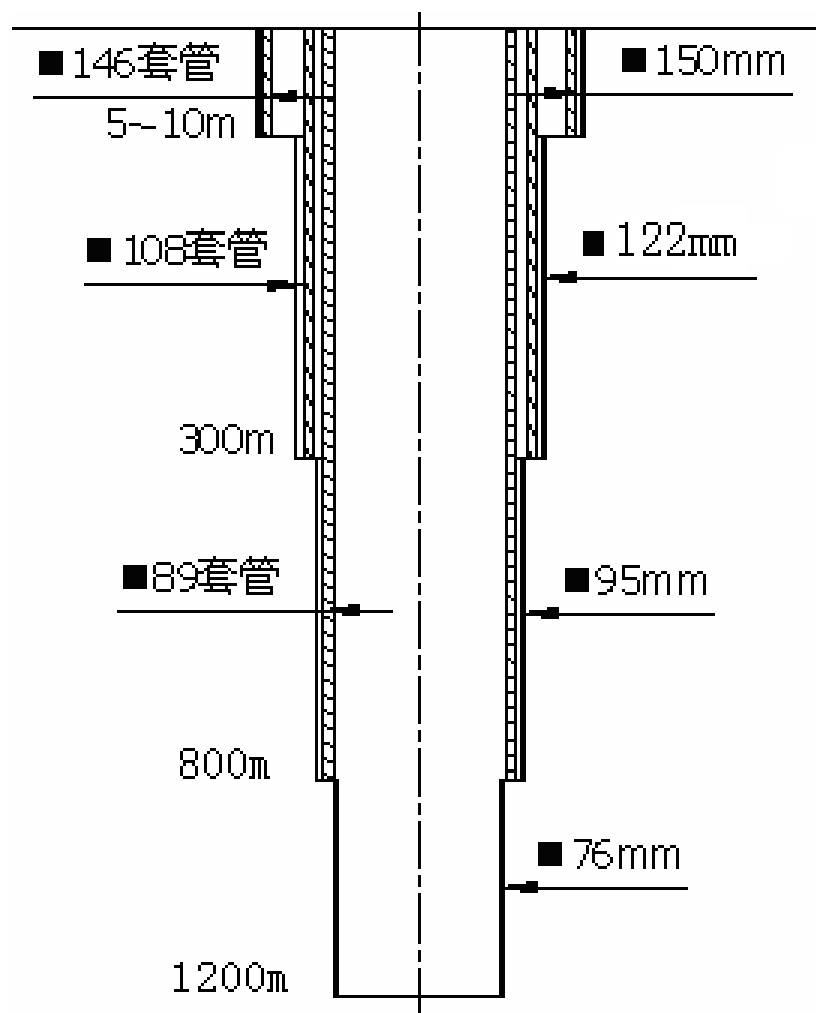


四川地矿局**403地质队**
承担一号孔钻探施工

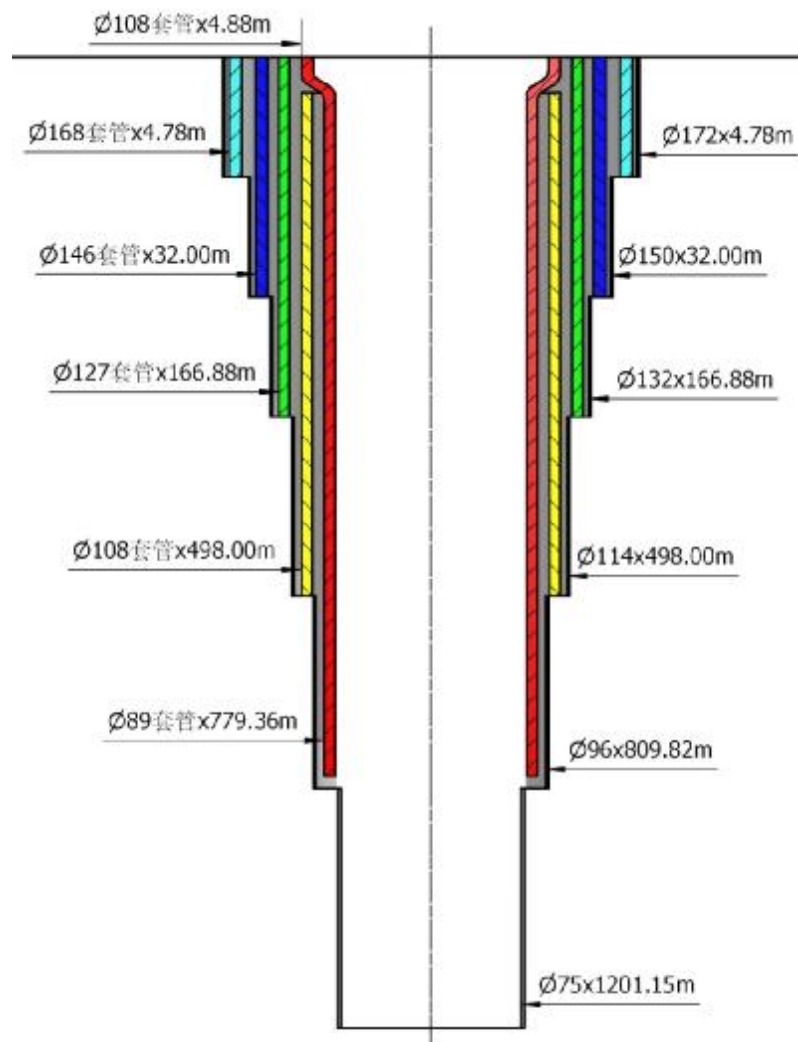


WFSD-1孔
的钻塔和钻机

WFSD-1孔预计的钻进施工时间为3-4个月，实际钻进施工时间为8个月。主要原因是地震断裂带地层条件特别复杂，导致了很多钻进问题，解决问题耗费了较多时间。



(原设计)



(实际情况)

WFSD-1孔钻孔结构和套管程序

WFSD-1施工遇到的困难和问题

开孔至585m是火山岩，岩层破碎严重，钻进中存在取心困难、孔壁坍塌、掉块、涌水等问题，在167m处发生了127mm套管断裂事故，导致侧钻。钻进到585m以后，遇到了泥岩和泥质页岩。岩层膨胀性强，再加上岩层在地应力作用下的塑性流动，钻孔缩径严重，导致连续三次钻具被卡死后断裂，不得不在580m处进行第二次侧钻。此后又发生测井探头在705处被卡。一系列的困难和复杂问题，导致施工效率低下。



WFSD-1孔上部孔段岩心破碎明显

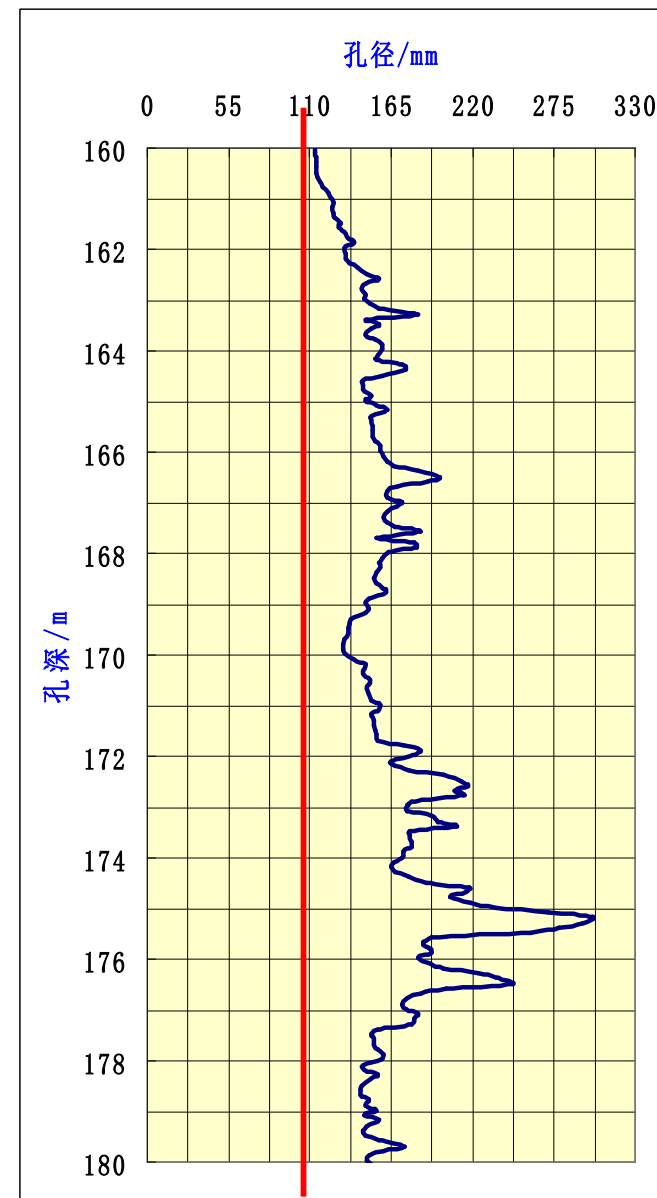
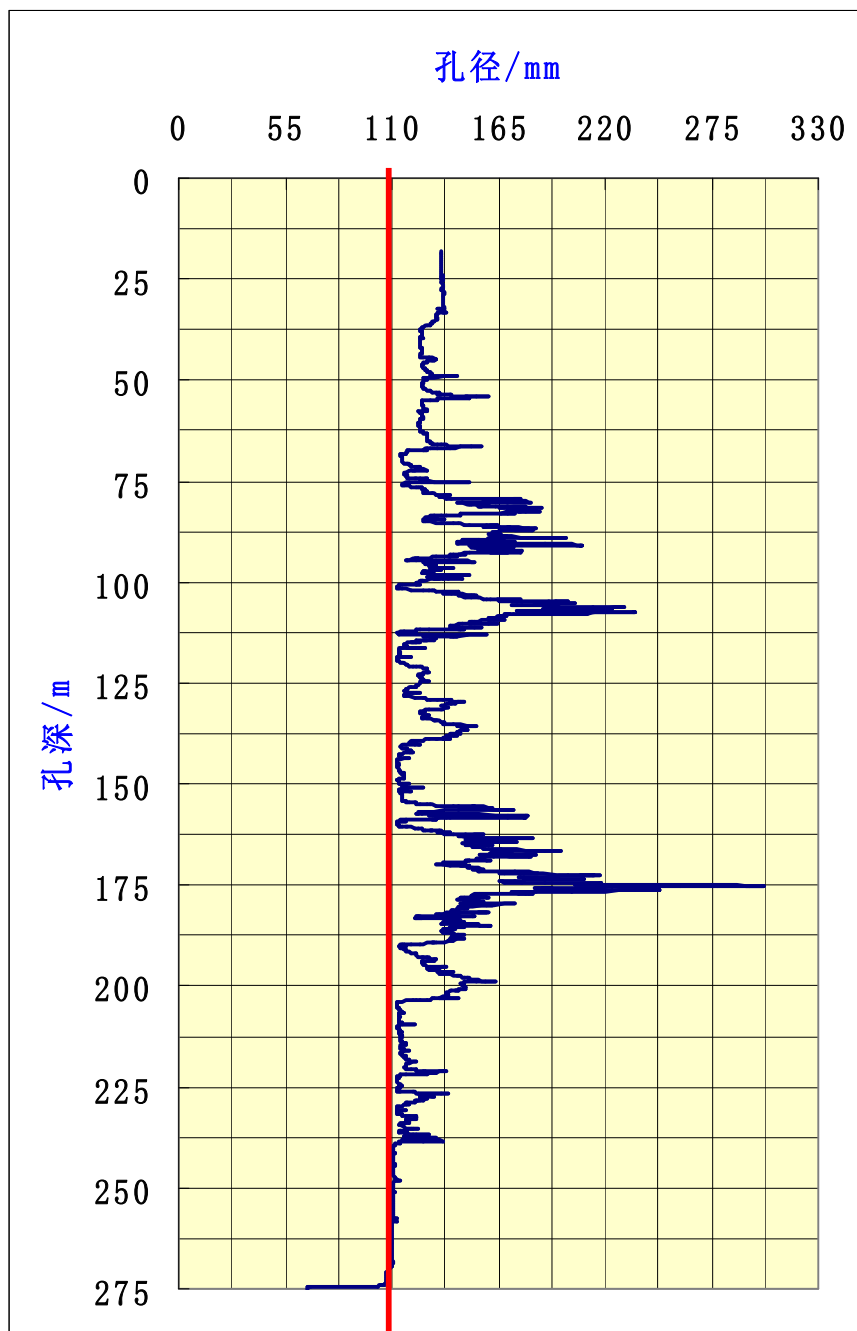


采用半合管取心器解决破碎地层取心问题

钻孔涌水

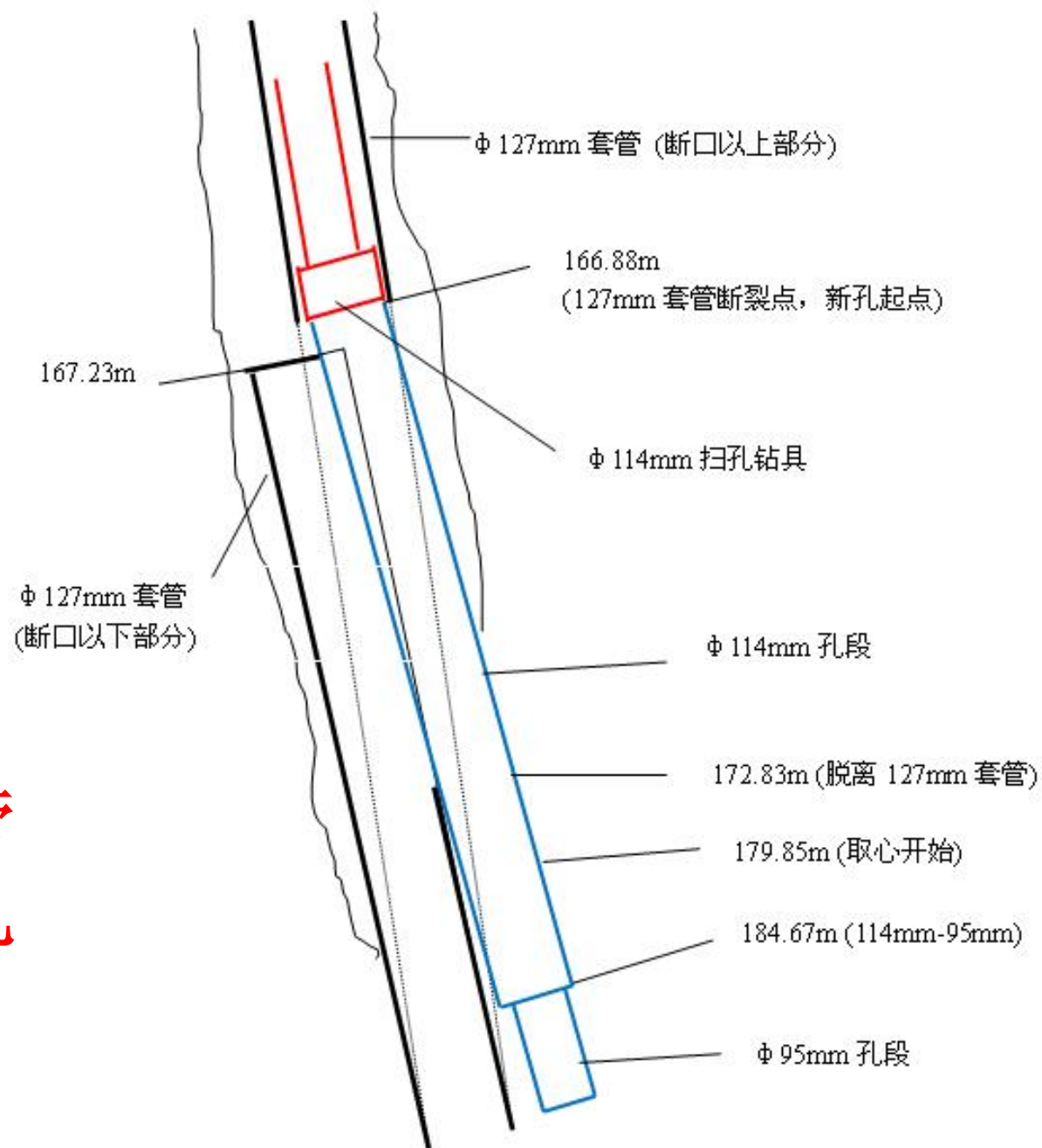
176米以上井段
一直涌水，日涌水量
约为200立方米，井
口水头高度约5米。
泥浆无法正常使用，
泥浆材料浪费严重。





钻孔严重扩径

127mm套管 断裂和新孔 产生示意图





吸水膨胀性很强的黑色物质造成钻孔缩径卡钻



**孔深614.38m时下钻遇阻，扫孔至609.12m起钻。
扫孔过程取得岩心，说明严重缩径导致钻孔封闭**

强缩径孔段的事故及处理情况

2009年3月2日，取心钻进至孔深590.76m处发生卡钻，抱死钻具，强力提拔导致钻具断裂。经采取各种措施处理，仍有5m多长的钻具留在孔内，无法取出。后采取切割的方式将钻具割破并取出。



处理事故取出的岩心管残条

强缩径孔段的事故及处理情况

2009年3月24日，取心钻进至孔深625.8m处发生卡钻，抱死钻具，处理过程中钻具断裂，事故头孔深622.41米，事故钻具总长3.39米。

3月25日，处理事故的钻具被卡死，处理过程中钻具断裂，事故头孔深616.16米，事故钻具2.14米。



连续造斜器 (张文英提供)

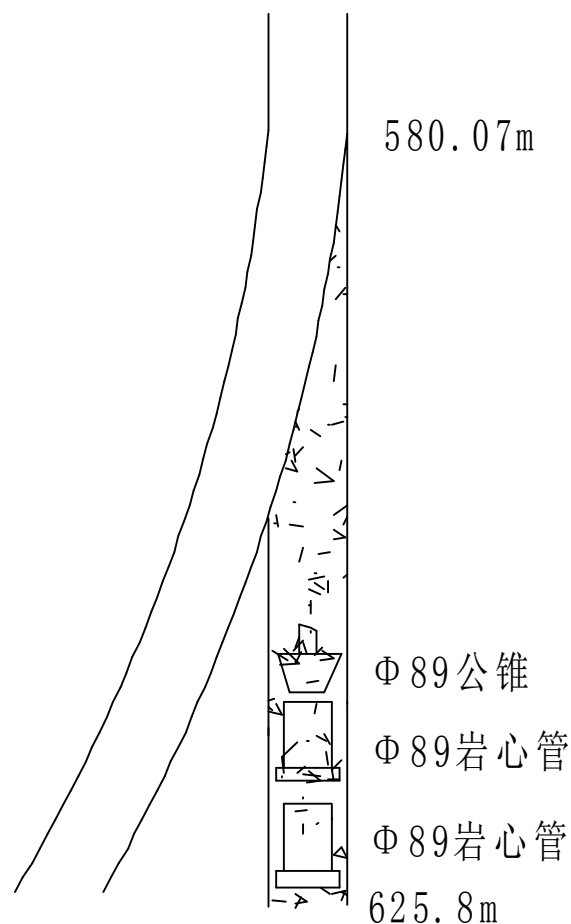
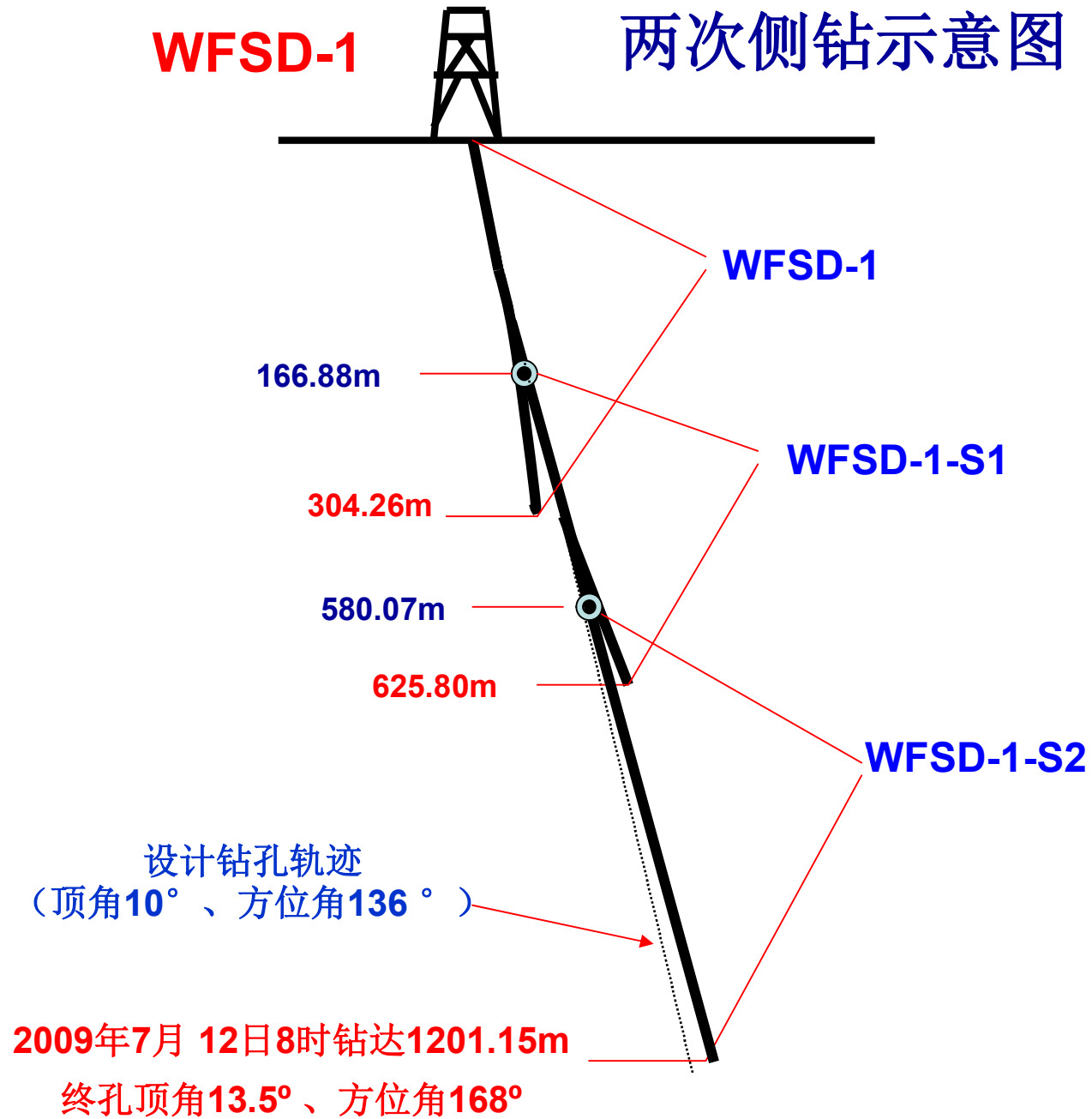
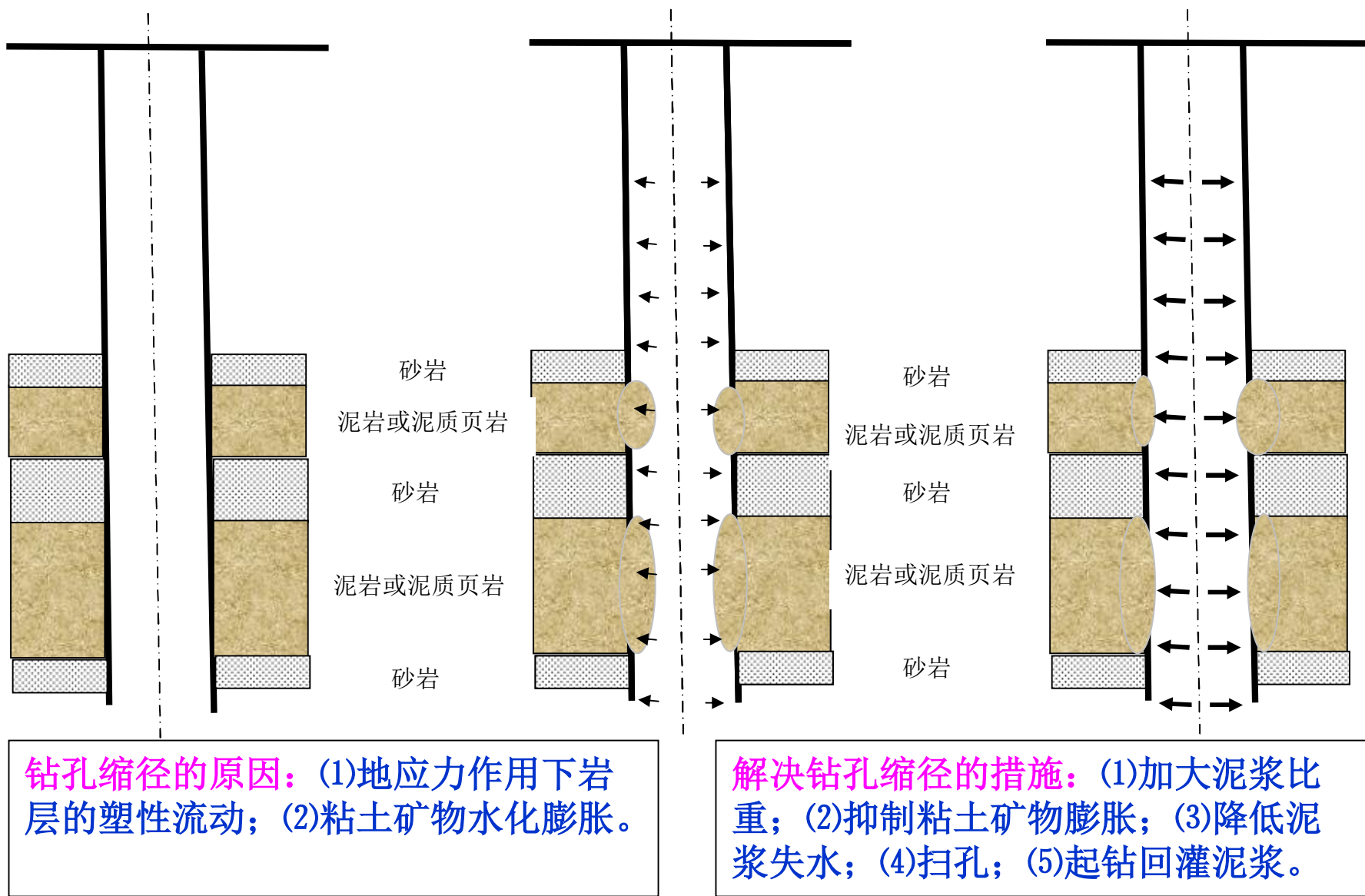


图15 WFSD-1侧钻示意图

探矿工艺所承担了第二次侧钻施工。2009年4月1日，用LZ-89型连续造斜器从580.75m开始在水泥孔底上侧钻，仅用3小时20分造斜进尺3m就偏出新孔转入正常钻进。

WFSD-1 两次侧钻示意图





钻孔缩径问题及其解决方案—机理图示

WFSD-1钻探施工技术指标

至2009年7月12日，WFSD-1孔钻达1201.15m，取心钻进总进尺1368.29m，平均岩心采取率94.3%，平均机械钻速1.07m/h，平均回次长度1.31m，终孔顶角13.5°，终孔方位角168°。



采用半合管取心技术保证了岩样的原状性

WFSD-1孔钻孔通过验收

2009年7月29日，探矿工艺所、汶川地震科学钻探工程中心钻井工程部和地学部对WFSD-1孔现场施工进行了验收，得出结论：

WFSD-1孔钻探工程施工完成了合同任务、符合《岩心钻探规程》六大质量指标要求，达到了地学和工程目的，经现场验收评为优质孔。



2009年7月29日WFSD-1孔通过现场验收

3000m 取心钻孔 钻探施工技术方案

**3000m大直径取
心钻进，采用什么样
的钻进方法、什么样
的钻探设备？**

深孔取心钻进 技术现状

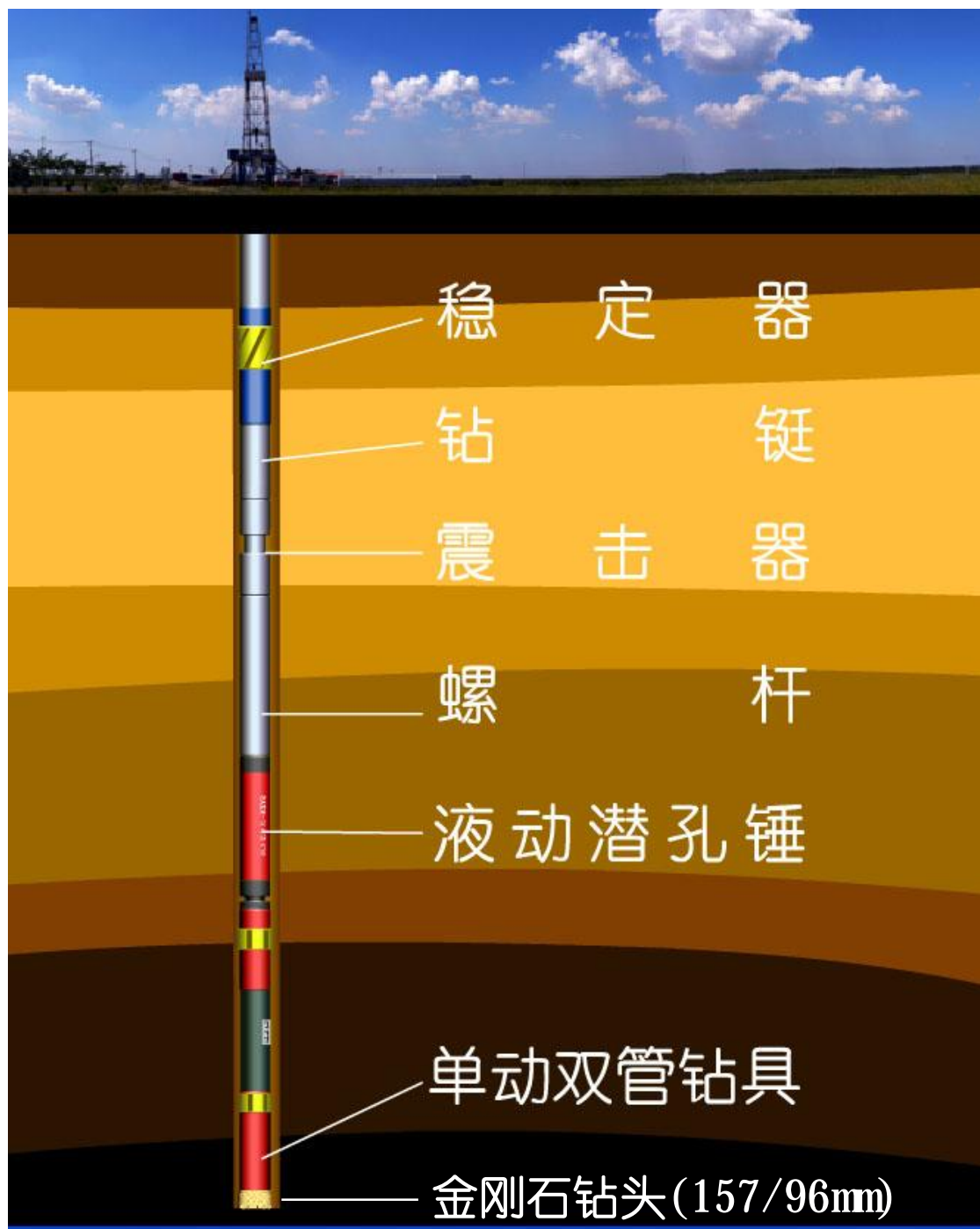
我国地质岩心深钻纪录

钻孔名称	钻孔深度 (m)	终孔直径 (mm)	备 注
山东钾盐 深孔	2505	80	日本进口钻机 (TXL-1E) 和金刚石绳索取心钻具, 山东钾盐勘探
ZK303	2109	76	国产钻机XY-6 B和金刚石绳索取心钻具, 辽宁本溪铁矿勘探
ZK401	2104	76	国产钻机 (HXY-8) 和金刚石绳索取心钻具, 山东济宁铁矿勘探
ZK005	2046.02	76	国产钻机 (HXY-6) 和金刚石绳索取心钻具, 辽宁本溪铁矿勘探

国外金刚石绳索取心深钻实例

深钻项目	南非 金矿勘探	Parker 公司 金矿勘探	德国 KTB 先导孔	夏威夷 科学钻孔
钻探目的	金矿勘探	金矿勘探	科学钻探	科学钻探
钻孔深度 (m)	5423	5071	3893 (4000)	3520
终孔直径 (mm)	80	122	152	98
岩 层	石英岩	灰岩、砾岩、 石英岩	片麻岩、 角闪岩	玄武岩
取心钻进方法	金刚石绳索取心钻进			
钻探设备	HS-150	石油转盘钻机加装顶驱系统		

中国大陆科学钻探工程(CCSDE)
科钻一号井，钻孔深度5158m，
终孔直径157mm，全孔取心钻
进，采用螺杆马达-液动锤-金刚
石取心钻进方法施工。



CCSD-1
取心钻进
钻具组合



螺杆马达



液动锤

孕镶金刚石钻头

中国大陆科学钻探工程科钻一井

不同取心钻进方法的使用效果

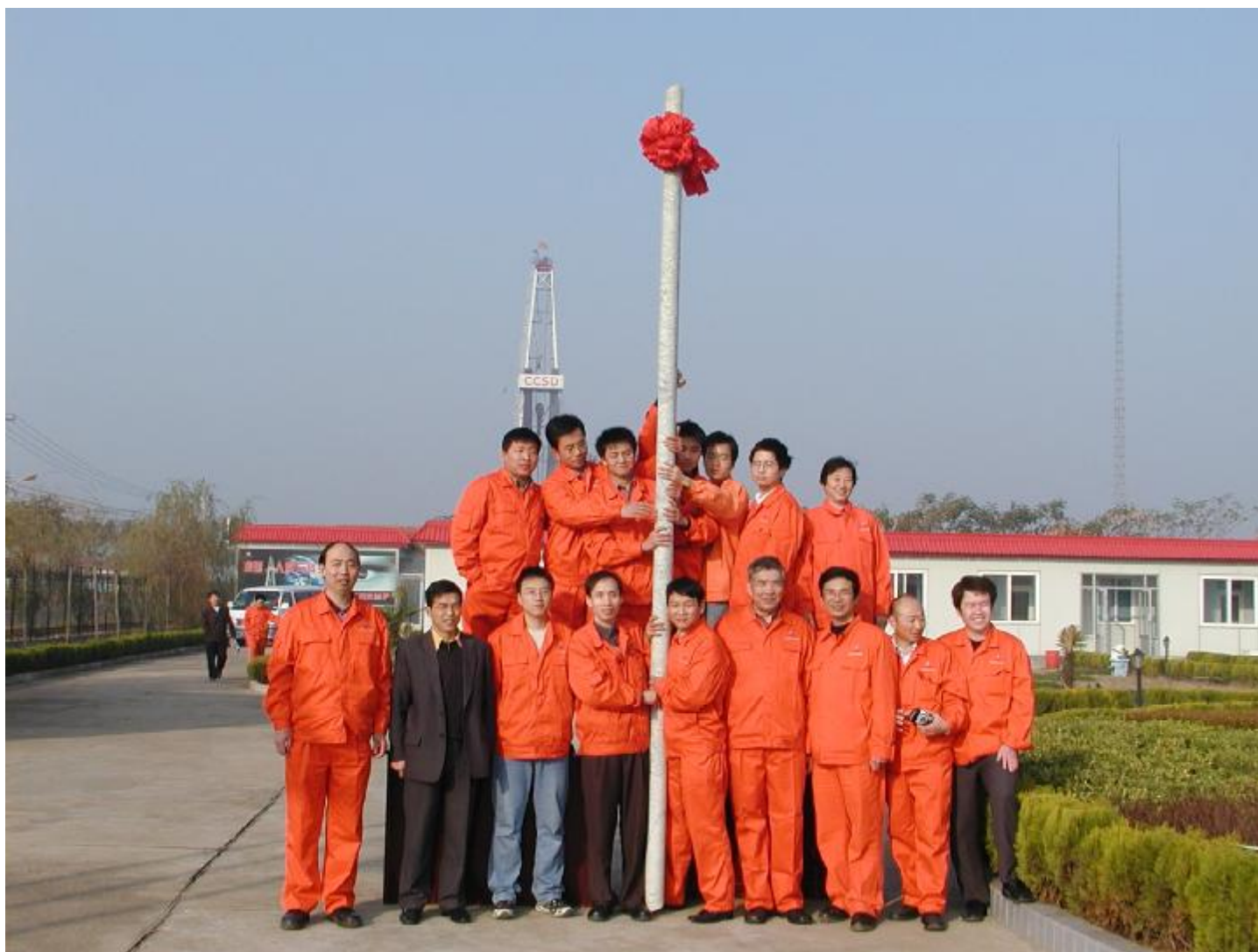
取心钻进方法	钻进 回次	进尺 (m)	回次长 (m)	钻速 (m/h)	岩心采取率 (%)
转盘取心钻进	12	19.55	1.63	0.47	58.2
顶驱取心钻进	8	5.87	0.73	0.36	5.1
顶驱+绳索取心钻进	5	7.62	1.52	0.63	13.8
顶驱+液动锤+绳索取心钻进	3	8.27	2.76	0.89	99.5
螺杆马达+绳索取心钻进	8	6.72	0.84	0.33	71.9
螺杆马达取心钻进	398	908.36	2.28	0.74	88.2
螺杆马达+液动锤取心钻进	640	4038.88	6.31	1.13	85.8
总 计	1074	4995.27	4.65	1.02	86.0

螺杆马达-液动锤金刚石取心钻进方法的使用效果

井段	钻进 回次	进尺 (m)	回次长 (m)	钻时 (h)	钻速 (m/h)	心长 (m)	岩心采取率 (%)
CCSD-PH	269	1100.76	4.09	991.70	1.11	959.40	87.2
CCSD-MH	107	830.22	7.76	632.45	1.31	669.81	80.7
CCSD-MH-1C	79	634.85	8.04	506.16	1.25	533.25	84.0
CCSD-MH-2C	185	1473.05	7.96	1429.30	1.03	1304.25	88.6
总 计	640	4038.88	6.31	3559.61	1.13	3466.71	85.8

正常取心回次的岩心 (总长约 9m)





取自于4638.38-4642.63m的4.25m长岩心

不同方法施工 5000m 取心钻井的经济性比较

	转 盘 提钻取心	螺杆马达 提钻取心	顶 驱 绳索取心	螺杆马达-液动锤 提钻取心
机械钻速 (m/h)	0.5	0.7	0.7	1.1
回次长度 (m)	2	3	3	7
提钻间隔 (m)	2	3	20	7
钻进时间 (天)	1719	1167	639	563
钻进成本 (万元)	9409	7083	5122	4130

注：硬岩，孕镶金刚石钻头取心钻进

不同取心钻进方法施工的技术和经济指标

取心钻进方法	螺杆马达/ 提钻取心	螺杆马达/ 液动锤/提 钻取心	螺杆马达/ 绳索取心	螺杆马达/ 液动锤/绳 索取心	顶驱/液动 锤/绳索取 心	顶驱/绳索 取心
钻机日费 (¥ /d)	50000	50000	50000	50000	58000	58000
起下钻速度 (m / h)	400	400	350	350	350	350
起钻间隔 (m)	3	7	20	20	20	20
孔机械钻速 (m / h)	0.7	1.2	0.6	0.9	0.9	0.7
打捞岩心间隔			3	4	4	3
单次绳索取心时间 (h)			$1 + (7/10000) * D_{\text{ep}}$		$0.5 + (7/10000) * D_{\text{ep}}$	
钻头单价 (¥ /只)	15000	15000	18000	18000	16000	16000
钻头寿命 (m)	35	30	30	30	30	30
孔底马达单价 (¥ /根)	70000	70000	70000	70000		
孔底马达寿命 (h)	80	80	70	70		
盲心管单价 (¥ /根)	25000	30000	40000	40000	30000	25000
盲心管寿命 (h)	100	100	100	100	100	100
扩孔器单价 (¥ /只)	10000	10000	10000	10000	10000	10000
扩孔器寿命 (h)	100	100	100	100	100	100
每米液动锤费 (¥ /m)		700		500	500	
每米泥浆费 (¥ /m)	300	300	300	300	300	300
每米钻杆费用 (¥ /m)	400	400	1200	1200	1800	1800

注: D_{ep} —钻孔深度。

WFSD-2孔钻进，是采用科钻一井的取心钻进方法——螺杆马达-液动锤-金刚石取心钻进方法？还是采用金刚石绳索取心方法？

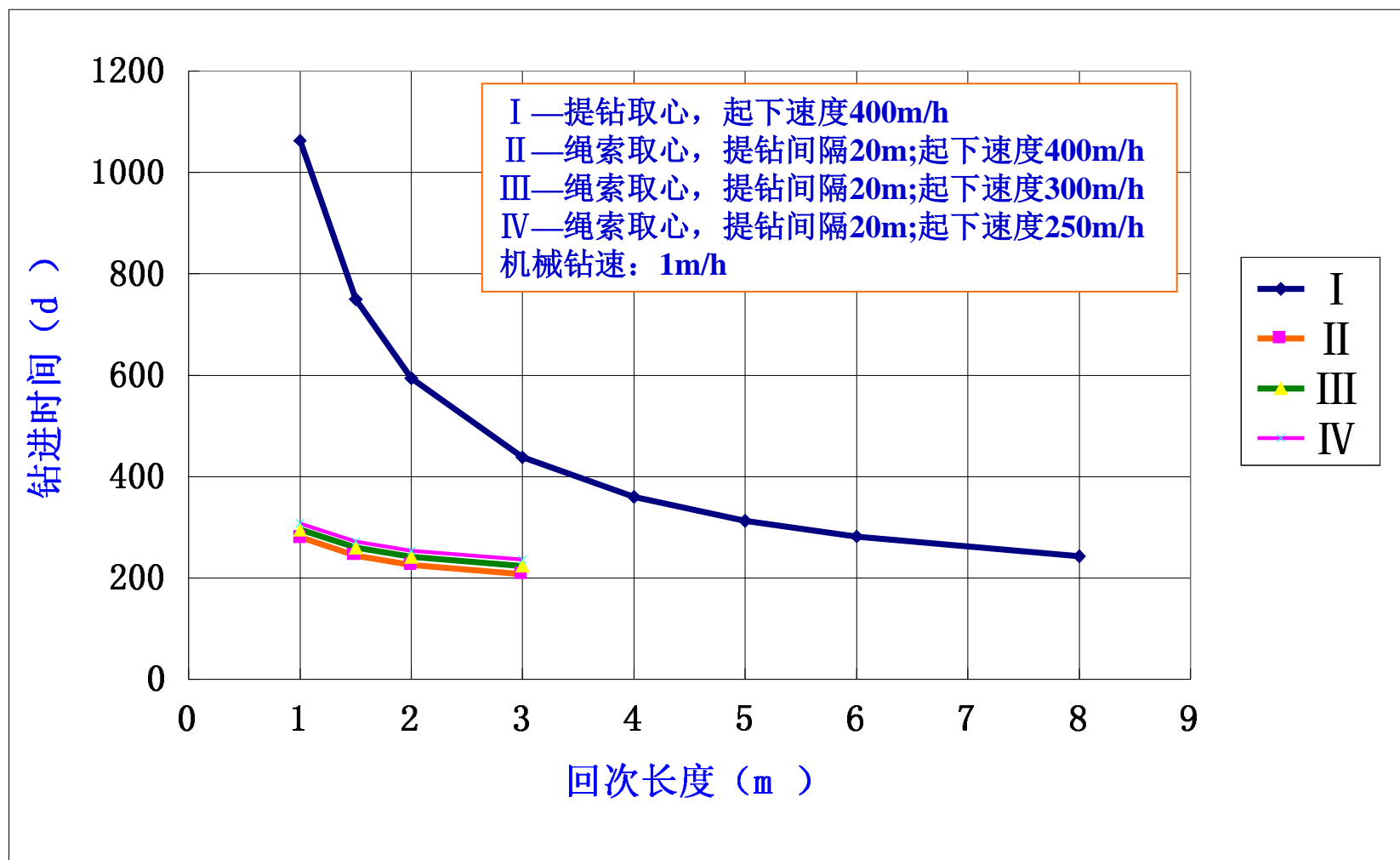


半合管取心应是地震断裂带钻探的主要取心方法

CCSD取心钻进方法应用的限制

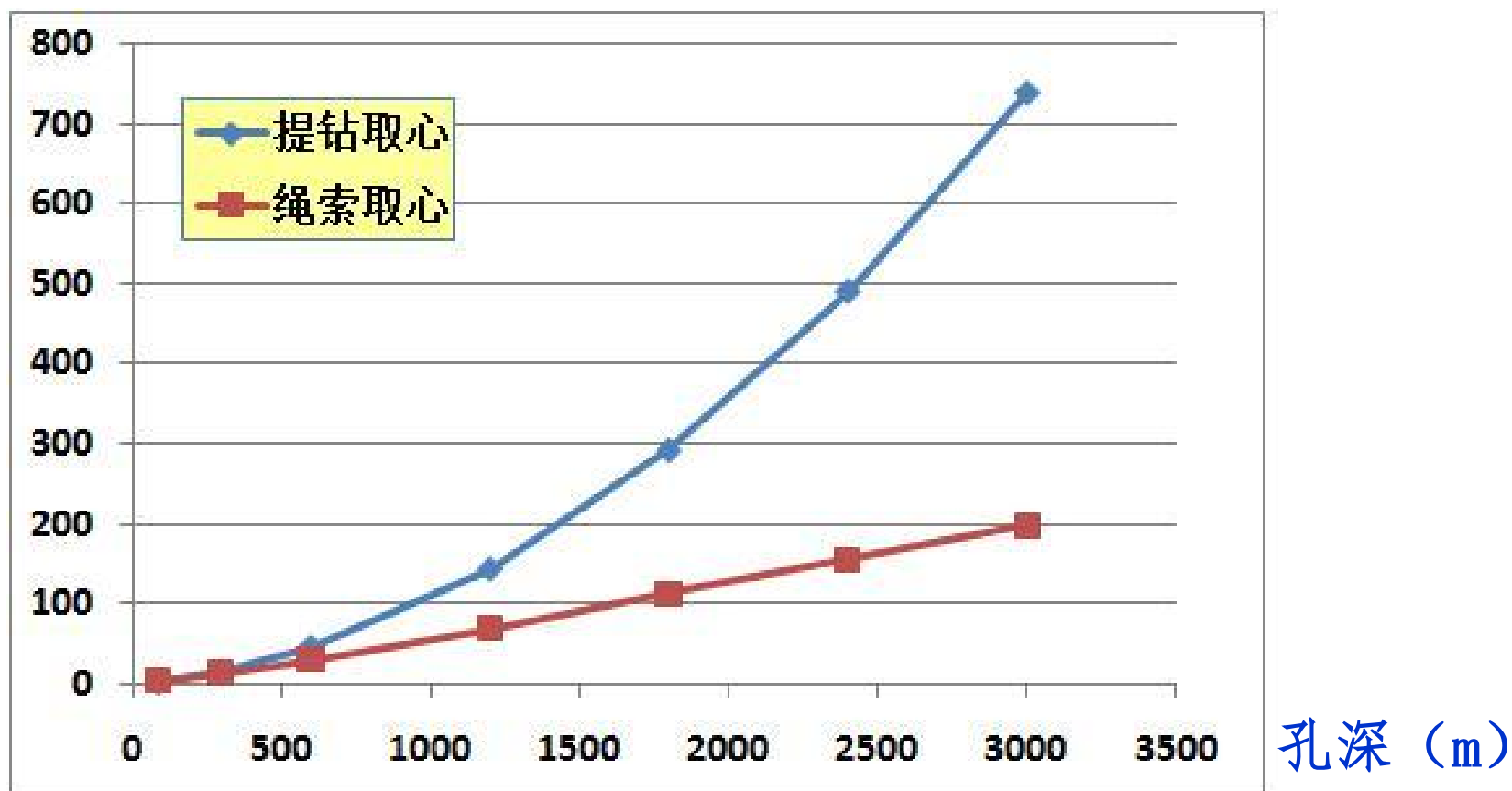
1.受到多次地震作用后岩层中充满了裂纹，在这种地层中钻进，不能用液动锤，取心回次进尺很短。

2.半合管取心，实现 $>3\text{m}$ 的长回次难度很大。



回次长度和起下钻速度对3000m孔取心钻进时间的影响

取心钻进时间 (d)



不同取心钻进方法钻进效率对比 (回次长度1.5m)

根据技术经济分析的结果，**WFSD-2孔和WFSD-4孔**施工应该采用**金刚石绳索取心钻进方法**。为了满足测井的要求，终孔直径设计为**150mm**。

3000m孔取心钻进基本思路

- 采用金刚石绳索取心钻进方法，采用大直径绳索取心钻具(钻孔直径150mm、岩心直径85-92mm)，半合管取心为主。
- 采用顶驱/转盘组合式钻机，高速顶驱装置用于金刚石绳索取心钻进；转盘用于扩孔和下套管施工。

存在的技术问题

- 没有合适的钻机，国内最大的岩心钻机HXY-8B型钻机以150mm口径钻深能力不超过1500m。
- 没有合适的绳索取心钻杆，国产71mm绳索取心钻杆的钻深记录是2100m，没有127mm绳索取心钻杆，没有配套的取心钻具。
- 没有大直径深孔绳索取心钻进施工经验。

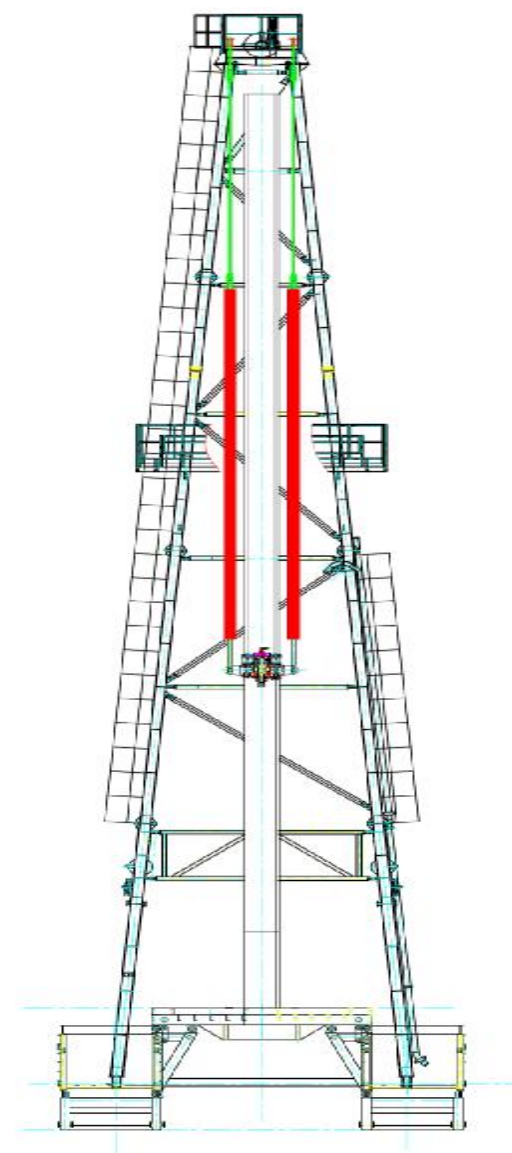
研发任务

- 研制一套顶驱/转盘组合式钻机，钻机具有高转速，满足孕镶金刚石钻头钻进要求，150mm口径钻深能力3000m；
- 研制一套钻深能力3000m的127mm绳索取心钻杆；
- 研制150mm绳索取心钻进所需的取心钻具和钻头等；
- 研制扩孔钻进器具。

1500-3000m孔段钻机主要参数

项目	规格	参数	备注
顶驱取心钻进能力	Φ127绳索取心钻杆	3000m	
转盘扩孔能力	Φ89石油钻杆	3000m	
转盘主要参数	转 速	30-120 rpm	
	最大扭矩	40 kNm	
顶驱主要参数	转 速	0-480rpm	
	最大扭矩	15 kNm	
卷扬机参数	单绳绳速	1.44/s	
	单绳最大拉力	125 kN	
K31型钻塔	钻塔高度	31 m	
	最大负荷	1350 kN	
大钩提升能力		1000kN	
主机功率		160 kW×2	电动机

(刘跃进提供)



WFSD-2孔深部取心钻探设备 (刘跃进提供)

K31型钻塔



张家口探矿厂的
K31型钻塔，高
度**31m**，承载
135t，配高度
4m的底座。

无锡127绳索取心钻杆参数

- API钢级: P110(屈服强度850MPa)
 - 钻杆体外径: 127mm
 - 钻杆体壁厚: 6.35mm
 - 接头外径: 140mm
 - 接头内径: 112mm
 - 接头壁厚: 14mm
 - 岩心直径: 85-93mm
 - 带接头重量: 20.8kg/m
 - 抗拉屈服强度: 205t
- (高申友提供)

预期的技术成果

研制出一套多功能、低成本的深孔
钻探设备、配套器具以及复杂地层钻进
施工工艺，可用于：

- 3000m左右的科学钻探
- 3000-5000m的岩心钻探
- 3000m左右的地热钻探
- 煤层气和浅层石油钻探

**向关心和支持汶川地震
科学钻探的专家和单位表
示衷心感谢！**

**欢迎各位专家到汶川地
震科学钻探现场考察指
导！**

谢谢