

地层温度对科学超深井井壁稳定的影响

张培丰

(北京探矿工程研究所,北京 100083)

摘要:井壁稳定问题包括井壁坍塌和地层破裂 2 种基本类型,科学超深井钻探的目的层是处于高地应力、高地温和高地层压力的深部岩层,井壁稳定问题更加突出。以 12000 m 科学超深井为例,从地层温度入手,分析钻井液循环温度变化所引起的当量静态钻井液密度和环空压力当量密度的变化,以及温梯应力、温差应力对井壁稳定的影响。

关键词:科学超深井;井壁稳定;温梯应力;温差应力;当量静态钻井液密度;环空压力;当量密度

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)10-0001-05

Effect of the Formation Temperature on the Hole-wall Stability in Ultra-deep Scientific Drilling/ZHANG Pei-feng
(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: The problem of hole-wall stability includes the well collapsing and the well fracture. The formation of ultra-deep scientific drilling (UDSD) is provided with high stress, high temperature and high formation pressure. The hole-wall stability of UDSD is one of the focuses. Take the example of 12000m UDSD, starting from the formation temperature, analysis was made on the changes of equivalent static density of drilling fluid and annular pressure equivalent density caused by drilling fluid circulating temperature, and on the influence to hole-wall stability by formation temperature-gradient stress and formation temperature-difference stress.

Key words: ultra-deep scientific drilling; hole-wall stability; formation temperature-gradient stress; formation temperature-difference stress; equivalent static density of drilling fluid; annular pressure; equivalent density

科学超深井与其它钻井的区别在于深部岩石所处于高地应力、高地温、高地层压力的“三高”环境,使深部岩体的组织结构、基本行为特征和工程响应均发生根本性变化,是导致超深井事故出现多发性和突发性的根本原因所在。

井壁稳定问题包括钻井过程中的井壁坍塌或缩径、地层破裂或压裂 2 种基本类型,是所有钻井工程所遇到的普遍性问题,其实质就是井壁岩石所受的应力超过它在井眼状态下的强度。当井内钻井液柱压力过低时,作用在井壁上的最大主应力与最小主应力差超过该处岩石的剪切强度,井壁岩石发生破坏,对于脆性岩石井壁发生崩落现象,对于塑性岩石井壁发生缩径;当井内钻井液密度过大,使岩石所受的周向应力超过岩石的拉伸强度而造成地层破裂。

对科学超深井来说,钻井液循环温度高,取心钻具的环空间隙较小,起下钻对井壁产生的波动压力(粘滞波压力和惯性波压力)大,井壁稳定问题更为突出。

1 国内外高温钻井施工概述

目前,钻井深度超过万米的超深井是原苏联在科拉半岛钻成的 SG-3 井,完井深度为 12261 m,1991 年第二次侧钻至井深 12869 m。目前世界上深度超过 9000 m 的超深井有 7 口,美国 4 口(罗杰斯 1 井 9583 m、巴登 1 井 9159 m、瑟复兰奇 1-9 井 9043 m、Emma Lou 2 井 9029 m),原苏联 2 口(SG-3 井 12869 m,SG-1 井已超过 9000 m),德国 1 口(KTB 井 9101 m)。

科学超深井钻探最突出的技术问题是地温和压力,高温地层不仅带来钻井工具、材料的使用温度问题,更主要的是井壁稳定问题。德国 KTB 科学钻探主孔设计深度 14000 m,因井底温度高达 280 ℃,岩层过陡,地层应力过大,实际完钻深度仅为 9101 m。

表 1 列出全球地温超过 300 ℃ 的钻孔。温度最高的是日本葛根田 WD-1A 勘探井,井底温度达到 500 ℃^[1]。WD-1A 井设计井深 4000 m,实钻至 2550 m,地温达到 350 ℃;在钻进至 3451 m 以后,由于地温急剧升高,钻井液凝胶化;钻至 3729 m 时地

收稿日期:2011-03-13

基金项目:科技部深部探测技术与实验研究专项资助“科学超深井钻探技术方案预研究”(SinoProbe-05-06)

作者简介:张培丰(1965-),男(汉族),安徽太和人,北京探矿工程研究所教授级高级工程师,地质工程专业,博士,从事科学钻探、环境钻探与取样技术研究工作,北京市海淀区学院路 29 号探工楼 404,zhangpf@ccsd.cn。

温达到 500 ℃,出于安全考虑停钻。在井深 3500 m 处,泵入 40 ℃ 的钻井液,井底钻井液温度达到 170 ℃;6.5 h 后,井底钻井液温度 280 ℃;83 h 后,井底钻井液温度 420 ℃。

表 1 地温超过 300 ℃ 的钻孔

国别	地点	井深/m	温度/℃
中国	西藏羊八井	2006	329
美国	Fenden Hill	4660	320
	Saltonlake	3200	353
日本	鹿儿岛	2505	373
	葛根田	3729	500
意大利	秋田县	2486	311
	Naples	3046	419
意大利	拉德瑞罗	4092	380
	Namafrall	2048	310
冰岛	Krafla	1724	386
	Krafla (IDDP-1)	5000 (项目进行中)	预计 550

2005 年,冰岛 IDDP-1 井获得国际大陆科学钻探组织立项,拟钻一口深度 5000 m、井底温度约 550 ℃ 的地热井,原计划于 2009 年 7 月完钻。IDDP-1 井位于 Krafla 地热田,1975~1984 年间,该地区施工了多口地热井,事故频繁,其中距 IDDP-1 井 300 m 的 KJ-39 井深度 1724 m,井底温度达到 386 ℃。原计划 2008 年 8 月, IDDP-1 井钻至 2400 m,下入 Ø339.7 mm 套管。但钻至 2103 m 深度,多次发生井内事故,并 3 次侧钻,不得已将 Ø339.7 mm 套管下到 1958 m。目前,该项目进展缓慢。

1993 年,我国羊八井施工的 ZK4002 孔,完井深度 2006.8 m,测得井底温度 329 ℃,因施工工艺和技术手段等原因,仍未获得热流体。

2 地层温度对钻井液密度的影响

2.1 钻井液循环温度

当钻井液从井口进入钻杆后,其温度低于钻杆温度,钻井液吸收钻杆的热量而温度升高;钻井液从钻头处进入环空,其温度低于地温,钻井液会不断地从井壁地层吸收热量,温度升高,而井壁地温降低;当钻井液上返至某一井深,其温度与井壁地温基本一致,钻井液温度不再上升,该井深称为等温深度;当钻井液上返至等温深度以上,钻井液的温度高于地温,井壁地层又会从钻井液中吸收热量,钻井液的温度降低,而井壁地层的温度升高(见图 1)。钻井液与井壁地层的温度分布受井深、钻井液及围岩的热导率、钻井液流量、入口温度以及围岩温度梯度等多种因素的影响。

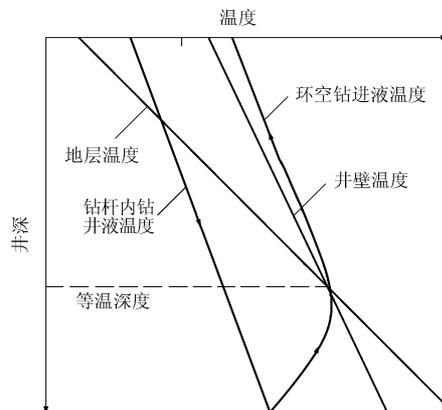


图 1 钻井液循环过程中的温度变化示意图

科学超深井钻探的风险大多与地层压力过高有关,原则上要求采用的钻井液应维持在地层不坍塌(最低密度)、不压裂(最高密度)的密度范围,建立钻井安全的钻井液当量密度窗口。由于钻井液随温度的升高而膨胀,随压力的升高而收缩,从井底到井口,钻井液的温度和压力处于不断的变化之中,且往往地层坍塌压力当量密度和地层破裂压力当量密度之间的范围很小,有时小于循环压耗,使钻井过程中井漏与井涌经常同时发生;另外,科学钻探起下钻作业频繁,钻井液密度变化所导致井底压力的降低往往与起钻时所引发的抽吸压力共同作用,使井底压力在起钻过程中进一步降低,易于诱发井涌、井喷等事故的发生。

Kutasov^[2]对处于环空任一点稳定后的循环钻井液温度(T_m)进行了研究,并采集了美国密西西比地区大量的随钻循环温度资料后,得出该地区钻井液循环温度的计算式:

$$T_m = 58.82 + 0.01683h + 0.00315H \quad (1)$$

式中: T_m ——任一点稳定后的循环钻井液温度,℃;
 h ——计算点井深,m; H ——井的总垂直深度,m。

德国 KTB 主孔的钻井液循环温度 7000 m 为 168 ℃、8000 m 为 197 ℃,略低于式(1)的计算结果,这是由于 KTB 主孔地温梯度 < 0.03 ℃/m。假如我国实施 12000 m 科学超深井,设地温梯度为 0.03 ℃/m,地面温度以 25 ℃ 计,井底地层温度为 385 ℃,以式(1)计算井底循环钻井液温度为 298 ℃,出口钻井液温度为 96.62 ℃。超深井取心钻进(钻井液静止)时间远大于取心钻进(钻井液循环)时间,井底静止钻井液温度大于井底循环钻井液温度,该钻井液从井底上返到井口时,其温度应大于 100 ℃,所以,井口必须加装密封式钻井液冷却装置,以防止钻井液汽化引起井喷事故。

2.2 当量静态钻井液密度

汪海阁^[3]等研究了地温梯度、地表温度、入口钻井液温度、循环钻井液温度梯度和钻井液类型等因素对当量静态钻井液密度的影响,建立了高温高压井中预测当量静态钻井液密度的积分模型[见式(2)]。结果表明:温度梯度对当量静态钻井液密度影响很大。随温度梯度增加,当量静态钻井液密度减小,且井口与井底当量静态钻井液密度差值增大。随地表温度或钻井液入口温度增加,当量静态钻井液密度减小,但不同初始温度条件下井口与井底当量静态钻井液密度差值基本相同。静止时,随井深增加,当量静态钻井液密度减小;钻井液充分循环后,随井深增加,当量静态钻井液密度增加。

$$E_m = \frac{1}{aKh} \cdot \frac{1}{1 - aK\rho_{m0}F(h)} \quad (2)$$

式中: E_m ——计算点当量静态钻井液密度, kg/m^3 ; $F(h)$ ——与入口钻井液温度、地温梯度、环空几何形状、泥浆泵排量、循环时间等因素有关的井深函数; a 、 K ——计算系数; h ——计算点深度, m 。

还有一个不可忽视的问题,就是超深井钻探到高温地层时钻井液的气侵问题。德国 KTB^[4]、日本 WD-1 井、我国 CCSD-1 井^[5]、羊八井 ZK4002 等均出现钻井液气侵问题,气体以氢气或硫化氢气体为主。Jin Qiang 等^[6]模拟了橄榄石的生氢实验,结果表明橄榄石在有机质成烃演化过程产生蚀变放出氢,且温度在 350 ~ 400 °C 时氢气产率最高。而 12000 m 科学超深井的井底温度处于最高氢气产出率的温度范围,深部地层中大量的氢气进入钻井液,进一步降低当量静态钻井液密度。

2.3 环空压力当量密度

根据式(2)和钻井过程环空压力状态^[7],综合钻井液的结构波压力当量密度、粘滞波压力当量密度和惯性波压力当量密度,环空压力最小值 E_{wmin} 发生在提钻加速期,环空压力最大值 E_{wmax} 发生在开泵循环或下钻加速期状态,其环空压力当量密度分别为:

$$E_{wmin} = E_m \left[1 - f \cdot \frac{2000 V_m^2}{0.981(D_h - D_p)} - 102a_p \cdot \frac{D_p^2 - D_0^2}{D_h^2 - D_p^2 + D_0^2} \right] \quad (3)$$

$$E_{wmax1} = E_m + 4.08 \cdot \frac{\tau_g}{D_h - D_p} \quad (4)$$

$$E_{wmin2} = E_m \left[1 + \frac{2000fV_a^2}{0.981(D_h - D_p)} + \frac{2000fV_m^2}{0.981(D_h - D_p)} + \right]$$

$$102a_p \cdot \frac{D_p^2 - D_0^2}{D_h^2 - D_p^2 + D_0^2} \quad (5)$$

式中: E_{wmax1} 、 E_{wmax2} 、 E_m ——分别为开泵循环或下钻加速期环空压力当量密度、井底当量静态钻井液密度, kg/m^3 ; f ——范宁摩擦因数,其大小取决于钻井液流变模式和流动状态; V_m ——提钻或下钻时钻井液流动速度, m/s ; V_a ——环空循环钻井液流动速度, m/s ; a_p ——提钻加速度, m/s^2 ; D_h 、 D_p 、 D_0 ——分别为井径、钻杆外径、钻杆内径, m 。

以我国已施工的 CCSD-1 井取心钻具^[8]为例,利用式(3)计算提钻时环空压力当量密度,其结果仅为常温状态下钻井液密度的 81%,加之钻井液气侵的作用,环空压力当量密度更低,提钻时必然会造成井涌或者井壁坍塌。

3 地层温度附加应力

地层温度对地应力的影响主要表现在 2 个方面:地温梯度和地层局部受温度变化的影响。

3.1 地层温梯应力

由于各种因素造成地层温度升高,与上覆岩层产生温差,岩石随温度的增加而产生膨胀,受围岩的限制,岩石的膨胀应变转化为应力。地温梯度产生的地应力与上覆岩层自重产生的地应力、岩体的地质构造等地壳动力学方面的原因产生的地应力(分别简称为温梯应力、上覆应力和构造应力)一样,属于地层的原地应力。与上覆应力和构造应力相比,温梯应力较小,一般在计算地层应力时忽略不计,但对于超深井来说,温梯应力是必须考虑的因素。超深井科学钻探设计时,温梯应力可以用式(6)进行计算:

$$\sigma_T = \alpha \alpha_m E H \quad (6)$$

式中: σ_T ——温梯应力, MPa ; α ——地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; α_m ——岩石的体积膨胀系数; E ——岩石的弹性模量, MPa ; H ——计算点深度, m 。

由式(6)可知,温梯应力随深度线性增加。若取 $\alpha = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$, $\alpha_m = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$, $E = 4.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 12000 m 井底的温梯应力为 144 MPa,其热应力系数为 0.4 MPa/ $^\circ\text{C}$ 。表 2 列出几种常见岩石的热学特性参数^[9]。

由表 2 可知,地层温度每升高 1 °C,岩石的温梯应力升高 0.4 ~ 0.6 MPa。温梯应力为岩石压缩应力,与井周岩石的上覆应力(压缩应力)叠加,提高了地层的坍塌压力,增加了井壁压缩剪切破坏导致缩径或坍塌的不利因素,提高了井壁稳定所需的钻

表2 常见岩石的热学特性参数

岩石	比热容 /[J·(kg· ℃) ⁻¹]	导热系数 /[W·(m· ℃) ⁻¹]	线膨胀系数 /(×10 ⁻³ · ℃ ⁻¹)	弹性模量 /(×10 ⁴ MPa)	热应力系 数/(MPa· ℃ ⁻¹)
辉长岩	720.1	2.01	0.5~1	9~6	0.4~0.5
辉绿岩	699.2	3.35	1~2	4~3	0.4~0.5
花岗岩	782.9	2.68	0.6~6	1~8	0.4~0.6
片麻岩	879.2	2.55	0.8~3	3~6	0.4~0.9
石英石	799.7	5.53	1~2	2~4	0.4
页岩	774.6	1.72	0.9~1.5	4	0.4~0.6
石灰岩	908.5	2.09	0.3~3	4	0.2~1.0
白云岩	749.4	3.55	1~2	4~2	0.4

井液密度。

另外,地层温度升高,往往伴随着岩石的热力学性质的改变,导致岩石强度的降低,岩石从粘弹性变形向粘弹性-塑性变形转变。郜保平等^[10]对20~600℃三轴应力状态下花岗岩中钻孔围岩升温阶段热弹性变形的试验研究表明:高温高压下钻孔围岩的弹性模量随温度的升高呈负指数规律减小(从常温的70.25 MPa下降到400℃时的40.35 MPa)、泊松比随温度的升高呈明显增大的趋势(从常温的0.25上升到450℃时的0.42)、100~400℃的热膨胀系数随温度的升高逐渐增大。

3.2 井壁岩石附加的温差应力

超深井钻进过程中,由于钻井液循环温度的变化,使得井壁岩石的温度也发生变化。这种由于井壁岩石温度的变化所产生的热应力称为温差应力。温差应力是岩石局部受温度的影响而产生的应力,其大小与岩石的热力学特性有关,与岩石温度变化差值成正比,其表达式为:

$$\sigma_{\Delta t} = \alpha_m E (T - T_0) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\Delta t}$ ——温差应力,MPa; T_0 、 T ——分别为计算点钻井液循环前后井壁岩石的温度,℃。

若将12000 m超深井井底稳定循环后的钻井液温度298℃作为井底井壁岩石表面温度,而该深度的地层温度为385℃,两者温差即井壁岩石在钻井液循环前后的温度变化值为87℃。由式(7)求得,12000 m井底因钻井液循环所产生的温差应力达到34.8 MPa。

在等温深度以上,井壁温度升高,温差应力为岩石压缩应力,与井周岩石的上覆应力叠加,增加了井壁压缩剪切破坏导致缩径或坍塌的不利因素,提高了地层的坍塌压力和安全钻井液密度。德国KTB主孔、原苏联SG-3井、日本WD-1井、我国CCSD-1井以及正在施工的冰岛IDDP-1井均发生因井壁地层应力过大而造成井壁变形、缩径或坍塌等井

内事故。在等温深度以下,井壁温度降低,温差应力为岩石膨胀应力,可以抵消部分井壁岩石的压缩应力,降低地层坍塌压力,有利于井壁稳定^[11]。

但是,对于科学超深井来说,由于取心的要求,需要经常开泵循环取心钻进、数小时后停止循环提钻取心,井壁岩石反复受到加热和冷却作用,温差应力反复升高和降低,易于引发井壁岩石的疲劳破坏。葛修润^[12]等进行周期载荷作用下砂岩、大理岩和花岗岩疲劳变性特性的研究结果表明:岩石的疲劳破坏受到静态应力-应变全过程曲线的控制,影响岩石疲劳寿命的主要因素是周期载荷的上限应力和幅值。提高周期载荷的上限应力,则初始变形和循环变形的比率提高,而达到破坏所需的累积位移总量降低,岩石易于疲劳破坏。

邓金根等^[13]从井壁围岩中的应力角度对井壁坍塌和破裂的力学分析后,建立了沉积岩地层井壁坍塌压力和地层破裂压力的计算模型以及保持井壁稳定所需钻井液最低密度(不坍塌)和最高密度(不压裂)范围[见式(8)和式(9)]。依据井壁坍塌压力和地层破裂压力的计算模型,结合钻井液循环温度变化所引起的当量静态钻井液密度和环空压力当量密度的变化,温梯应力和温差应力对井壁稳定的影响,以及井壁岩石的疲劳破坏,可以建立钻井安全钻井液当量密度窗口,为科学超深井井身结构设计和钻井液设计提供依据。

$$\rho_{\min} = \rho_c = \frac{\eta(3\sigma_h - \sigma_H) - 2cK + \alpha p_p (K^2 - 1)}{(K^2 + \eta)H} \times 100 \quad (8)$$

$$\rho_{\max} = p_f = 3\sigma_{h1} - \sigma_{H1} - \alpha p_p + \frac{S_t}{100} \quad (9)$$

式中: ρ_c ——地层的坍塌压力当量密度,kg/m³; ρ_{\min} ——地层不坍塌的最小钻井液密度,kg/m³; H ——井深,m; c ——岩石的粘聚力,MPa; η ——应力非线性修正系数; α ——有效应力系数; σ_h ——最小水平应力,MPa; σ_{h1} ——最小水平应力梯度,MPa/100 m; σ_H ——最大水平应力,MPa; σ_{H1} ——最大水平应力梯度,MPa/100 m; K ——与岩石性质有关的系数, $K = \cot[45^\circ - (\theta/2)]$; θ ——岩石的内摩擦角,(°); ρ_{\max} ——地层不压裂的最大钻井液密度,kg/m³; p_f ——地层的破裂压力当量密度,kg/m³; p_p ——地层孔隙压力梯度,kg/m³; S_t ——岩石抗拉强度,MPa。

4 结语

针对沉积地层,中国石油天然气集团公司将

“复杂地层条件下深井超深井钻井技术研究”列为“九五”、“十五”重大科技工程项目之一,并根据不同区域深井超深井的钻井技术难点设置了包括“钻前地层压力与井壁稳定预测”在内的5个研究课题。这一项目成果对我国山前构造等复杂地层条件下5000~6000 m深井优快钻井及加快深部油气勘探开发步伐具有十分重要的作用。然而,我国已实施的科学钻探最深的钻孔为CCSD-1井,完井深度5158 m;油气井最深的是塔深1井,完井深度8408 m,超过7000 m的深井仅有10余口,与国外均有很大的差距。科学超深井所钻地层已超出沉积岩的深度范畴,大多属于结晶岩。对于结晶岩地层原地应力状态和地层力学参数的研究滞后于沉积岩,因此,结晶岩地层井壁稳定性钻前预测以及当前钻头处地层的井壁稳定性实时评价研究,是我国实施科学超深井钻探急需解决的理论和工程难题之一。

科学超深井是一项高技术系统工程,从某种意义上说反映了一个国家最前沿的科技发展水平,也体现了一个国家的综合国力,其研究与实施必将为地球科学做出巨大贡献。同时,科学超深井也是一项巨大的复杂体系,地层温度对井壁稳定的影响仅是这项复杂体系中的一个问题。实施科学超深井,必须集中我国的科研技术力量,正确认识和有效评价深部地层复杂的围岩环境,探索在复杂条件下的钻井技术,实现优质、安全、高效地钻井施工,以带动我国的地质钻探和油气钻井工业在设备、技术和施工工艺等方面产生重大突破。

参考文献:

- [1] K. Ikeuchi, N. Doi, Y. Sakagawa, et al. High-temperature measurements in well WD-1a and the thermal structure of the Kakkonda geothermal system[J]. *Geothermics (Japan)*, 1998, 27(5): 591-607.
- [2] Kutasov I. M. Method corrects API bottomhole circulating-temperature correlation [J]. *Oil & Gas Journal*, 2002, (7): 47-50.
- [3] 汪海阁,刘岩生,杨立平. 高温高压井中温度和压力对钻井液密度的影响[J]. *钻采工艺*, 2000, 23(1): 56-60.
- [4] Faber E. Origin of hydrocarbon gases in the pump-test of the KTB pilot well [J]. *Scientific Drilling*, 1995, (5): 123-128.
- [5] 詹秀春,罗立强,李迎春,等. 关于CCSD主孔4820~4930 m井段气体异常的初步解释[J]. *中国地质*, 2005, 32(2): 320-329.
- [6] Jin Qiang, Xiong Shou-sheng, Lu Pei-de. Catalysis and hydrogenation: Volcanic activity and hydrocarbon generation in rift basins, Eastern China [J]. *Applied Geochemistry*, 1999, (14): 547-558.
- [7] 张培丰. 科学钻探绳索取心钻进泥浆膨润土分散机理研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学, 2008. 40-44.
- [8] 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. 234-241.
- [9] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社, 1999. 37-41.
- [10] 邵保平,赵阳升. 高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热物理及力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(6): 1245-1253.
- [11] Meng-jiao Yu. Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations[D]. Austin, USA: The University of Texas, 2002. 140-156.
- [12] 葛修润,蒋宇,卢允德,等. 周期载荷作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1581-1585.
- [13] 邓金根,程远方,陈勉,等. 井壁稳定预测技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2008. 31-46.

我国地球深部探测计划全面展开

中国网络电视台消息(2011-10-24) 天宫上天,蛟龙入海,在我国对太空和海洋的探索大步迈进的同时,名为“地球深部探测”的“入地”探测也已全面展开,这是我国有史以来最大的地质勘探计划。

在海拔4400 m的喜马拉雅山罗布莎地区,国家深部探测专项,罗布莎科学钻探实验正在紧张进行。

地球内部由外到里是由地壳、地幔和地核组成。青藏高原的地壳平均70 km厚,是全球最厚的地壳。在青藏高原距地表这么浅的地方发现地幔物质,有着重要的研究价值。

科学钻探被称为“通向地球深处的望远镜”。除罗布莎之外,山东莱阳、云南腾冲等地的6个钻探项目也进行中,国家将从这7个钻探点中选择一处进行超越1万 m的科学钻探。

与此同时,深部探测计划的另一个实验项目——深地震反射剖面探测也在西藏阿里进行。这种探测是用地下爆破

的方法,通过追踪反射信号,探明数十千米地下的结构,用科学家的话说就是给地球深层做一个CT。

技术人员在爆炸点沿线设置了1千多个这样的采集站收集反射信息。采集站大约每隔50 m一个,用数据线连接起来,在高原上绵延50多千米。

为减少环境噪声干扰,爆破安排在晚上进行。

爆炸发生时,只有一下轻微的震动。

据了解,科学钻探和深地震剖面探测只是中国地球深部探测计划的两个组成部分,这一计划集合了上千名科研人员,共实施大地电磁探测、地壳全元素探测等9个实验项目,将在2012年底前完成。在深部探测计划的基础上,我国科学家正在筹划详细揭示我国地壳结构的“地壳探测工程”,为保障资源供应、防灾减灾和发展地球科学提供全面的深部数据和信息。