

# 万米科学特深井防斜纠斜技术方案及研究建议

张恒春<sup>1,2</sup>, 曹龙龙<sup>1,2\*</sup>, 王文<sup>1,2</sup>, 闫家<sup>1,2</sup>, 施山山<sup>1,2</sup>, 王跃伟<sup>1,2</sup>, 薛倩冰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究, 河北廊坊 065000;  
2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 根据科学钻探特点和我国特深井井身结构情况, 论文首先设定了我国万米科学特深井基本井身结构和取心井段, 结合前苏联 SG-3 井、德国 KTB 主井和我国大陆科钻一井、松科 2 井等大陆科学钻探工程项目, 阐述了特深井井斜预测方法、测量方法、全面钻进和取心钻进的防斜纠斜技术方法。给出我国万米科学特深井上部井段井斜控制方法和控制指标以及连续取心井段防斜纠斜工艺、器具等总体方案, 并提出了进一步研究的建议。

**关键词:** 万米钻井; 科学特深井; 自动垂钻系统; 防斜纠斜

**中图分类号:** P634.7; TE28<sup>3</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0031-07

## Technical scheme and research suggestion of deviation prevention and correction for myriametric extra-deep scientific well

ZHANG Hengchun<sup>1,2</sup>, CAO Longlong<sup>1,2\*</sup>, WANG Wen<sup>1,2</sup>, YAN Jia<sup>1,2</sup>,

SHI Shanshan<sup>1,2</sup>, WANG Yuewei<sup>1,2</sup>, XUE Qianbing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of scientific drilling and the situation of the hole configuration of extra-deep wells in China, this paper sets the basic hole configuration and coring sections of China's myriametric extra-deep scientific well. Combining the SG-3 borehole of the Soviet Union, the main borehole of KTB in Germany and the scientific drilling projects of China, such as the Continental Scientific Drilling Project No.1 and Songke-2 Well, the methods of deviation prediction, measurement as well as the deviation prevention and correction during full-depth drilling and coring for extra-deep well are elaborated. Finally, the overall scheme of the myriametric scientific extra-deep well, including the deviation control method and control index of upper well section and the drilling deviation correction and prevention technology and equipment of coring section are put forward, and the further research suggestions are posed.

**Key words:** myriametric drilling; scientific extra-deep well; automatic vertical drilling system; drilling deviation correction and prevention

## 0 引言

前苏联的 SG-3 井、德国的 KTB 主井和我国松科 2 井等大陆科学钻探工程, 都表明钻井轨迹偏斜

是科学深井钻进的普遍问题, 直接关系到钻井的成败。在 SG-3 钻进中, 8700 m 以深进行了 6 次纠斜钻进, 耗费了大量的人力、物力和时间, 这也是 SG-

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-07-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.005

基金项目: 自然资源部定向钻井工程技术创新中心开放课题“绳索取心钻杆造斜强度适应性研究”(编号: PY202304); 中国地质调查局地质调查项目“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号: DD20242850)

第一作者: 张恒春, 男, 汉族, 1987 年生, 高级工程师, 钻井工程专业, 硕士, 主要从事取心钻探和深部钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, zzhcc2002@163.com。

通信作者: 曹龙龙, 男, 汉族, 1989 年生, 工程师, 资源与环境专业, 主要从事科学钻探、取心工艺与器具方面研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, 13833686142@163.com。

引用格式: 张恒春, 曹龙龙, 王文, 等. 万米科学特深井防斜纠斜技术方案及研究建议[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 31-37.

ZHANG Hengchun, CAO Longlong, WANG Wen, et al. Technical scheme and research suggestion of deviation prevention and correction for myriametric extra-deep scientific well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 31-37.

3井中止数年的原因之一<sup>[1]</sup>。德国KTB主井7500 m以浅使用自动垂钻系统来保证钻井的垂直度,取得了7000 m以浅顶角 $<1^\circ$ 的骄人成绩;由于井底温度的限制,7500 m以深开始使用传统的被动防斜系统,到8880 m顶角迅速增长至 $21^\circ$ ,致使钻柱阻力增加,这也是其不得不在9101 m提前完井的原因之一<sup>[2]</sup>。松科2井上部井段井斜保持较好,6067 m井深时井斜仅 $3.7^\circ$ ,随后迅速增大,至7018 m井深井斜增至 $25.3^\circ$ ,托压现象十分明显。因此,如何做好钻井防斜纠斜,将是我国科学特深井工程中的重中之重。

### 1 井身结构与取心井段

为便于表述轨迹控制,初步设定了万米科学特深井井身结构。前苏联的SG-3井完井井深12262 m,采用超前孔裸眼钻进的方法, $\varnothing 920$  mm钻头开钻,四开完井<sup>[3]</sup>。德国的KTB主井完井井深9101 m, $\varnothing 711.2$  mm钻头开钻,六开完井<sup>[4]</sup>。松科2井完井井深7018 m, $\varnothing 660.4$  mm钻头开钻,五开完井<sup>[5]</sup>。我国四川盆地地层较为复杂,其深井、特深井基本采用五开或六开井身结构,如正在实施的深地川科1井设计为六开井身结构;塔里木盆地正在实施的深地塔科1井地层必封点相对较少,设计为四开(备用1~2开)的井身结构<sup>[6-10]</sup>。综合国内外科学特深井和我国目前主要特深井的井身结构情况,初步设定万米科学特深井井身结构为六开, $\varnothing 216$  mm完井,储备 $\varnothing 152$  mm和 $\varnothing 122$  mm两级开次(图1)。

德国的KTB采用“先导井+主井”的组织模式,先导井全井取心,主井进行了少量取心<sup>[4]</sup>。我国大陆科钻一井(CCSD-1)采用“小径取心,大径扩眼”

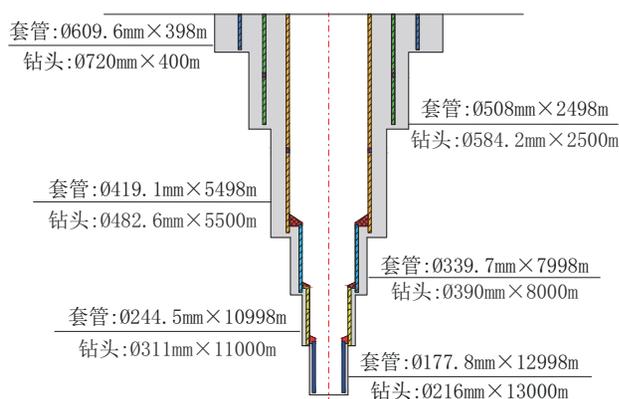


图1 万米科学特深井井身结构

Fig.1 Well configuration of myriametric extra-deep scientific well

的方式,几乎完成了全井取心<sup>[11]</sup>;因上部地层已由松科1井完成了取心工作,松科2井从2863 m开始连续取心。设计我国万米科学特深井同样采用“先导井+主井”的模式,先导井设计5500 m,全井取心;主井(参见图1)前3开次全面钻进至5500 m,从四开开始取心钻进。

### 2 井斜测量方法

目前国外 $200^\circ\text{C}$ 温度以内的随钻测量仪器已成熟应用,如对于 $175^\circ\text{C}$ 的高温环境,斯伦贝谢公司和哈里伯顿公司分别有SlimPluse和Solar175型号的高温随钻产品,对于 $200^\circ\text{C}$ 的高温环境,二者分别有Tele-Scope ICE和Quasar Pulse两款高温产品,更高耐温性能的产品还处于研制当中<sup>[12-16]</sup>。随着原材料、焊接、绝缘、封装等技术的发展,国内高温电子技术也取得了长足的进步,单类元器件的耐温性能最高接近 $300^\circ\text{C}$ <sup>[17-21]</sup>。国内电子式随钻测量工具耐温 $175^\circ\text{C}$ ,耐压140 MPa,正在研制耐温 $200^\circ\text{C}$ 的随钻仪器<sup>[10,15]</sup>。在应用降温、保温等措施后,部分电子式测量仪器可以在超过 $200^\circ\text{C}$ 的环境下短时间工作,可以进行单点或多点测量,更高温度的井段可使用机械式的测斜仪<sup>[22]</sup>。如近年来探矿工艺所等单位研制了多款耐温 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 间的高温轨迹测量仪,但耐压性能还不足以满足超万米井深的需求<sup>[23-27]</sup>。因此,对于万米科学特深井,在浅井段温度 $200^\circ\text{C}$ 以内时,使用电子式测量仪,随着井段加深,超过 $200^\circ\text{C}$ 后使用性能进一步提升的电子式测量仪或机械式测量仪获取井斜数据,监测井身轨迹发展趋势。前苏联的SG-3井即使用机械式测斜仪来测量钻井顶角,仪器还具有顶角增大报警功能<sup>[22]</sup>。

### 3 井斜预测技术

井斜发展趋势的预测是防斜技术的重要组成部分,它是钻井选址、井身轨迹设计等工作的参考因素之一,相对准确的钻井轨迹预测还可以为配置井底钻具组合提供数据支撑。一直以来,大量研究者采用微分方程法、有限元法、纵横弯曲法、能量法等方法分析计算井底钻具的受力变形情况,以期建立井底井斜角和方位角变化的数学模型。Ho<sup>[28]</sup>早在1987年就提出了一种钻头和地层相互作用的数学模型,可以预测定向井和垂直井的井眼轨迹。国内苏义脑院士<sup>[29-32]</sup>首先提出“井眼轨道制导控制理

论与技术”研究领域,并于1991年给出预测和控制井眼轨道的力-位移模型,推算井斜角和方位角的基本预测公式,并在IBM-PC开发了定向井轨道预测控制软件包,随后提出并建立了井下控制工程学。高德利院士<sup>[33-39]</sup>从管柱力学入手,推导了井底钻具组合的变形控制方程,建立了井眼轨迹预测和控制的理论体系。陈作<sup>[40]</sup>在大量钻井数据的基础上,从地层因素和钻具力学特性入手,推导出井斜变化率计算公式,在成熟地层进行了应用。范成洲等<sup>[41]</sup>应用自适应神经网络模糊推理技术,以钻压和转速两个钻进参数为变量,建立了直井井斜预测模型,在大量钻井参数数据的基础上,对本地区井斜进行预测。上述预测大多基于全面钻进工艺,勘探技术研究所和中国地质大学(武汉)以苏义脑院士首先提出的井眼轨道预测和控制“力-位移”模型为基础,综合考虑地层产状、岩性、钻井液润滑系数、钻头偏斜力、钻具组合等影响因素,建立了一套岩心钻探井眼轨迹预测模型,并编制相应井身轨迹预测软件<sup>[42]</sup>。该软件用中国大陆科钻CCSD-1井、汶川科钻WFSD-4井测井数据进行学习,预测数据可信,并在湖北省郧县米黄玉矿绳索取心钻探工程中成功应用,软件预测数据与钻井工程结束后的测井数据能较好吻合。以该工程一号井为例,方位预测误差在 $\pm 10^\circ$ 范围内,井斜角预测误差在 $\pm 1^\circ$ 范围内,170 m井底最大预测误差仅0.7 m,如图2所示。

#### 4 全面钻进防斜技术

保持上部全面钻进井段的垂直性有助于顺利进行更深井段的取心钻进。根据德国KTB项目的概念,全面钻进防斜系统可以分为主动防斜系统和被动防斜系统。主动防斜系统即是以起源于KTB的自动垂钻系统为代表的井底自动防斜纠斜系统;被动防斜系统是指以传统的各种井底钻具组合,钟摆钻具、偏重钻具、满眼钻具等为代表的防斜纠斜系统<sup>[29,43-45]</sup>。综合考虑钻进成本和钻井质量,我国科学特深井应采用被动防斜纠斜与主动防斜系统相结合的方式确保井身轨迹符合设计要求。

结合科学钻探特点,梳理钟摆钻具、满眼钻具、柔性钻具等钻具组合的力学特性、适用范围、钻井参数对其应用效果的影响,重点分析3种钻具组合在科学特深井工程中的应用可能性,具体见表1。

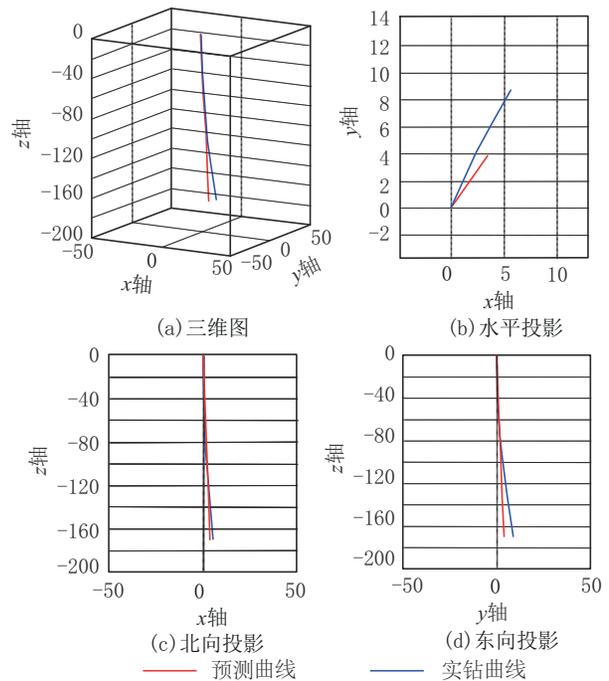


图2 预测与实钻轨迹对比

Fig.2 Comparison of the predictive and actual drilling trajectory

主动防斜系统主要是指垂直钻井系统(VDS),其防斜打直效果不受钻压影响,可广泛应用于高陡构造与大倾角等易斜地层和自然造斜能力强的深井、特深井和复杂结构井直井段。国外 Baker-Hughes 公司的 Verti-Trak、Schlumberger 公司的 Power-V 直井钻井系统、SmartDrilling 公司的 ZEB5000 自动垂直钻井系统、Halliburton 公司的 V-pilot 垂直钻井系统等都广泛应用于钻井服务市场。国内中石化胜利钻井院的 SL-AVDS 系统、中石油钻井院的 CG-VDS 系统、渤海钻探工程院的 BH-VDT5000 系统、西部钻探钻井院的 XZ-AVDS 系统、中国石油大学的 UPC-VDS 系统等垂钻系统也逐渐成熟,并在国内占有一定的市场份额<sup>[45-47]</sup>。

德国 KTB 项目因垂钻系统而闻名世界,2 种垂钻系统共下井工作 124 回次,平均每回次进尺 31.8 m,时效 0.83 m/h,具体使用效果如表 2 所示<sup>[2]</sup>。KTB 的成功经验客观上印证了垂钻系统对科学特深井的重要性。当前,国内垂钻系统日益成熟,在石油钻井工程中取得了瞩目的成果,完全可以保证我国万米科学特深井上部全面钻进井段的最大井斜保持在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

表1 被动防斜纠斜钻具

Table 1 Passive deviation prediction and correction drilling tool

组合特性	钟摆钻具	满眼钻具	柔性钻具
力学特性	(1)钟摆力恒降斜;(2)钻压减弱降斜;(3)纠斜优于防斜	(1)以满以刚保直;(2)稳定器直径决定降斜;(3)防斜优于纠斜	(1)井斜越大降斜越好;(2)第一稳定器决定性能;(3)纠斜降斜皆佳
适用范围	(1)适用于不易斜地层;(2)适用于纠斜作业;(3)不适用于长筒取心;(4)不适用于井底动力	(1)不易斜、较易斜地层;(2)适用于直井段保直;(3)适用于取心钻进;(4)强研磨性地层慎用	(1)使用易斜较易斜地层;(2)与井底动力钻具不是很匹配;(3)可以用于取心钻进
钻进参数的影响	(1)一定范围内,钻压大纠斜能力大;(2)转速越高纠斜能力强;(3)注意排量,防止泥包	(1)适用于大钻压钻进;(2)转速高纠斜能力强;(3)间隙小,注意憋泵	(1)钻压越大纠斜能力越好;(2)高转速会稍微降低降斜能力
特深井应用可行性	(1)适用于上部浅井段降斜钻进;(2)可与满眼钻具结合使用	(1)适用于取心钻进;(2)与螺杆钻、液动锤等动力钻进结合使用	(1)适用于上部浅井段的快速穿过;(2)中深井段低成本纠斜

表2 垂钻系统在KTB主井使用情况<sup>[2]</sup>

Table 2 Using condition of the vertical drilling system in KTB main hole

钻井直径/mm	井段/m	使用回次数			使用效果					
		合计	ZBE	VDS	钻进长度/m			平均回次长度/m		
					合计	ZBE	VDS	合计	ZBE	VDS
444.5	0~3003	39	24	15	1229.5	733.4	456.1	31.5	32.2	30.4
374.7	3000.5~6018	43		43	1679.0		1679.0	39.0		39.0
311.1	6013.5~7485.3	42		42	1069.7		1069.7	25.5		25.5
合计	0~7485.3	124	24	100	3978.2	733.4	3204.8	32.1	32.1	31.8

## 5 取心钻进防斜技术

取心钻进主动防斜纠斜技术虽有文献报道,但并未成熟应用<sup>[48-49]</sup>。取心钻进防斜主要以沿用地质岩心钻探预防钻孔弯曲的方法为主,再结合发展完善的井底动力工具,可以达到比较理想的防斜效果。根据前苏联SG-3井和德国KTB项目以及我国大陆科钻CCSD-1井及松科2井的经验,深部取心防斜措施主要是应用满眼钻具组合,同时使用螺杆、涡轮等井底动力结合液动锤实现小钻压井底动力回转钻进。

满眼钻具是指2个或2个以上稳定器直径等于或略大于钻头直径,确保粗径钻具组合总是充满井眼,同时保证取心筒的刚度和直度,图3为典型的满眼取心钻具组合。CCSD-1井已经证明满眼钻具组合结合冲击回转小钻压钻进技术和井底驱动技术可以获得很好的防斜效果,松科2井使用大直径满眼钻具+螺杆钻具的组合也取得了良好的防斜效果。

鲁宾斯基防斜理论指出,小钻压钻进是防止井斜的有效方法,另外,特深井中使用的螺杆钻具、涡轮钻具等井底动力设备也限制了大钻压的施

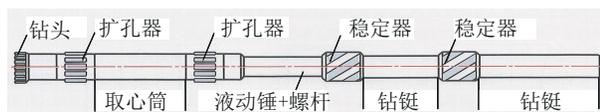


图3 典型的满眼取心钻具组合

Fig.3 Typical packed hole coring assembly

加<sup>[14,50]</sup>。CCSD-1井实践证明,小钻压条件下,采用合适的液动锤可以大幅提高钻进效率,可以获得小钻压钻进的防斜效果。CCSD-1井中,自井深218.44 m起,开始试验由螺杆马达驱动的液动冲击回转取心钻进技术,取得了良好的钻进效果,机械钻速由纯回转钻进时的0.71 m/h,提高到1.13 m/h,平均回次进尺由纯回转钻进时的不足2.28 m提高到6.34 m,从而有效地保证了小钻压条件下获取高钻进效率,实现小钻压防斜钻进<sup>[51]</sup>。

井底马达驱动方式钻进时,马达以上的钻柱没有回转运动(或低速回转),不但消除了钻柱公转对井眼的扩大作用,同时还使一定轴向压力下粗径钻具与井身轴线的夹角在一个回次中可以基本保持不变,再加上前文提到的对钻具采取严格的刚性和

满眼措施,这个夹角可以被控制在一个很小的范围内,从而达到很好的保直防斜效果。前苏联在SG-3井钻井中,使用2个或2个以上涡轮马达并列组成的满眼钻进系统,地表以11~15 r/min旋转,获得了在4000 m深度只偏斜1°的极好效果<sup>[52]</sup>。我国CC-SD-1井中应用“螺杆钻具+液动锤”二合一钻具组合同样取得了良好的钻进和防斜效果。松科2井五开因高温限制不能使用螺杆钻具,地面驱动取心钻进后,井斜才迅速增大。

## 6 万米科学特深井防斜纠斜总体方案

综合全面钻进、取心钻进防斜纠斜技术及万米科学特深井特点,设计我国万米科学特深井防斜纠斜总体方案。

(1)井斜预测:对井斜发展趋势做钻前定量预测。

(2)全面钻进:三开(5500 m)以浅采用被动防斜纠斜钻具和国产自动垂钻系统,确保该井段的井斜 $\leq 3^\circ$ 。

(3)取心井段:使用“满眼钻具+井底动力工具”钻具组合,井底驱动和小钻压钻进工艺防斜,井温 $< 175^\circ\text{C}$ 井段选用螺杆钻具, $> 175^\circ\text{C}$ 井段使用涡轮钻具。目前国内尚不具备边取心边纠斜技术,只能放弃部分取心段或者获取较小直径岩心,进行全面钻进纠斜,轨迹调整后再继续取心。结合起下钻连续循环和钻井液冷却技术,自动垂钻系统有望在 $200^\circ\text{C}$ 以内井温中使用,更高温度的井段,可采用机械式的自动垂钻系统,该系统完全采用机械机构进行测斜和纠斜,耐高温能力更高<sup>[22]</sup>。另外,可以对传统纠斜技术(偏心楔等)进行改进,不使用仪器,利用重力调整井斜角,控制井斜。

## 7 进一步研究建议

为了更好的确保我国万米科学特深井工程的井身质量,还应在以下几个方面做进一步研究:

(1)提高井斜预测能力。利用大数据和人工智能技术,基于一定的数学模型,提高模型学习能力和预测精度,为井身轨迹控制提供数据支撑。

(2)研发机械式井斜测量系统。国内机械式随钻测斜仪还不成熟,在测量范围、精度及传输距离上不能满足万米特深井需求,应突破“摆锤-阶梯环”测量原理限制,在测量范围、精度及传输距离上

进一步提升。

(3)研发耐温更高的电子器件和隔热降温技术。目前晶体管、电阻、电容、芯片、绝缘材料等的最高使用温度大多在 $175\sim 200^\circ\text{C}$ 之间,很难满足万米科学特深井高温需求,一方面应提高电子器件的耐温温度,另一方面应进一步研究井下测量仪器的隔热降温技术。若仪器的耐温提升至 $300^\circ\text{C}$ ,随钻测量及传输技术适用深度将大大提高。

(4)研发取心用自动垂钻系统。目前自动垂钻技术还不能应用于取心钻进,使用垂钻系统只能牺牲部分岩心。若能把取心和自动垂钻技术结合起来,发展取心钻进主动防斜技术,可以解决地质学家与钻探技术人员之间的岩心取舍的矛盾,同时可以缩短钻井周期、降低事故发生率。

## 参考文献(References):

- [1] 王达,张伟,汤松然.俄罗斯科学深钻技术概况和特点——技术考察系列报道之一[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1995(1):53-55,57. WANG Da, ZHANG Wei, TANG Songran. General situation and characteristics of Russian scientific deep drilling: One of a series of technical investigation reports[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 1995, (1): 53-57.
- [2] Engeser B, Wohlgemuth L. Das kontinentale tiefbohrprogramm der bundesrepublik deutschland: KTB bohrtechnische dokumentation KTB report 95-3[R]. Niedersaechsischen Landeamt fuer Bodenforschung, 1996
- [3] 梁健.科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺[D].北京:中国地质大学(北京),2021. LIANG Jian. Optimum design and corrosion protection of aluminum alloy drill pipe in scientific ultra-deep drilling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [4] 张金昌.科学超深井钻探技术方案预研究专题成果报告[M].北京:地质出版社,2016. ZHANG Jinchang. Preresearch Report of Scientific Super Deep Well Drilling Project[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [5] 朱永宜,王稳石,张恒春,等.我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J].地质学报,2018,92(10):1971-1984. ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and technical systems of core boring[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(10): 1971-1984.
- [6] 谭宾,张斌,陶怀志.深地勘探钻井技术现状及发展思考[J].钻采工艺,2024,47(2):70-82. TAN Bin, ZHANG Bin, TAO Huaizhi. Current situation and development of deep exploration key drilling technology [J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 70-82.
- [7] 何晓.四川盆地超深井钻井关键技术及发展方向[J].钻采工艺,2024,47(2):19-27. HE Xiao. Key technologies and development directions of ultra-deep well drilling in Western Sichuan[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 19-27
- [8] 许期聪,付强,周井红,等.四川盆地双鱼石区块特深井井身结

- 构设计与适用性评价研究[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 83-92.  
XU Qicong, FU Qiang, ZHOU Jinghong, et al. Research on casing program design and applicability evaluation of extra-deep wells in Shuangyushi Block, Sichuan Basin[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 83-92.
- [9] 王春生, 王哲, 张权, 等. 塔里木油田超深层钻井技术进展及难题探讨[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 59-69.  
WANG Chunsheng, WANG Zhe, ZHANG Quan, et al. Progress and obstacles of ultra-deep drilling technology in Tarim Oilfield[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 59-69.
- [10] 孙金声, 刘伟, 王庆, 等. 万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 1-9.  
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 1-9.
- [11] 王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文选集[M]. 北京: 地质出版社, 2007.  
WANG Da. Selected Works on Drilling Techniques of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [12] 王蓉, 王定亚, 郝和伢, 等. 海洋超高温高压油气钻井关键设备技术研究[J]. 石油机械, 2024, 52(1): 76-81, 87.  
WANG Rong, WANG Dingya, HAO Heya, et al. Technical research on key equipment for offshore ultra-high temperature and high-pressure oil and gas well drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(1): 76-81, 87.
- [13] 罗鸣, 冯永存, 桂云, 等. 高温高压钻井关键技术发展现状及展望[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 228-244  
LUO Ming, FENG Yongcun, GUI Yun, et al. Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 228-244.
- [14] 胡郁乐, 刘乃鹏, 汪伟, 等. 松科二井高温高压随钻测温技术的应用研究[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1193-1199.  
HU Yule, LIU Naipeng, WANG Wei, et al. Research and application of high temperature and high pressure while drilling temperature measurement technology in Well Songke-2 [J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1193-1199.
- [15] 吴东华. 随钻测量随钻测井技术现状及研究[J]. 化工管理, 2023(4): 79-82, 88.  
WU Donghua. Present situation and research of MWD/LWD [J]. Chemical Enterprise Management, 2023(4): 79-82, 88.
- [16] 薛晓卫. 随钻测量技术的发展现状和前景研究[J]. 化工管理, 2022(18): 161-164.  
XUE Xiaowei. Research on the development status and prospect of MWD technology [J]. Chemical Enterprise Management, 2022(18): 161-164.
- [17] 贺永宁, 赵小龙, 崔万照. 高温SiC器件及其集成电路在空间电子领域应用展望[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2): 1-7.  
HE Yongning, ZHAO Xiaolong, CUI Wanzhao. Application prospect of high-temperature silicon carbide devices and integrated circuits in space electronics[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2): 1-7.
- [18] 马勇冲, 甘贵生, 罗杰, 等. 电子封装高温焊料研究新进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(2): 357-387.  
MA Yongchong, GAN Guisheng, LUO Jie, et al. New progress of high temperature solder in electronic packaging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(2): 357-387.
- [19] 罗宁胜, 曹建武. 高温SOI技术的发展现状和前景[J]. 电子与封装, 2022, 22(12): 120402.  
LUO Ningsheng, CAO Jianwu. Development status and prospects of high-temperature SOI technology [J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(12): 120402.
- [20] 罗宁胜. 高温电子技术的发展与挑战[J]. 化合物半导体, 2022(4/5): 30-35.  
LUO Ningsheng. The development and challenges of high temperature electronic technology [J]. Compound Semiconductor, 2022(4/5): 30-35.
- [21] 谭雯, 沈三民, 杨峰. 高温旋转环境下的电子设备热设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(4): 19-22.  
TAN Wen, SHEN Sanmin, YANG Feng. Thermal design of electronic equipment under high temperature rotating environment [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(4): 19-22.
- [22] 王达, 张伟, 贾军. 特深科学钻探的关键问题[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2698-2706.  
WANG Da, ZHANG Wei, JIA Jun. The key problems of ultra-deep drilling engineering [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2698-2706.
- [23] 彭新明, 季伟峰, 李忠, 等. KXT-CG-1型超高温钻孔轨迹测量仪的应用研究[J]. 地质装备, 2024, 25(2): 27-33.  
PENG Xinmin, JI Weifeng, LI Zhong, et al. Application research of KXT-CG-1 drilling trajectory measuring instrument for ultra high temperature [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024, 25(2): 27-33.
- [24] 李忠, 赵燕来, 罗光强. 存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 35-41.  
LI Zhong, ZHAO Yanlai, LUO Guangqiang. Development and application of storage high temperature and high pressure borehole thermometer [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 35-41.
- [25] 屈召贵, 龚名茂, 周策, 等. 高温钻孔测斜仪研制[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 201-207.  
QU Zhaogui, GONG Mingmao, ZHOU Ce, et al. Development of high temperature borehole inclinometer [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 201-207.
- [26] 周策, 罗光强, 李元灵, 等. GRY-1型超高温干热岩地层钻孔测斜仪研制及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4): 44-48.  
ZHOU Ce, LUO Guangqiang, LI Yuanling, et al. Development and application of GRY-1 borehole inclinometer for ultra-high temperature hot dry rock drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 44-48.
- [27] 周策, 罗光强, 李忠, 等. 深海钻探大深度超高温测斜仪的研制[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(8): 87-90, 94.  
ZHOU Ce, LUO Guangqiang, LI Zhong, et al. Development of ultra-high temperature inclinometer for deep-seadrilling at large depth [J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(8): 87-90, 94.
- [28] Ho H.S. Prediction of drilling trajectory in directional wells via a new rock-bit interaction model [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 1987.
- [29] 苏义脑. 井斜控制理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.  
SU Yinao. Theory and Practice of Well Deviation Control [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [30] 苏义脑. 井下控制工程学的建立发展及创新启示[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(5): 1-7.  
SU Yinao. Inspiration from establishment, development and in-

- novation of downhole control engineering[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2019,38(5):1-7.
- [31] 苏义脑. 井下控制工程学概述及其研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(4):705-712.  
SU Yinao. Introduction to the theory and technology on downhole control engineering and its research progress[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):705-712.
- [32] 苏义脑, 周煜辉. 定向井井眼轨道预测方法研究及其应用[J]. 石油学报, 1991(3):139-150.  
SU Yinao, ZHOU Yuhui. Methods of predicting bit trajectory and applications in directional drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991,(3):139-150.
- [33] 高德利, 黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展. 力学进展, 2021,51(3):620-647  
GAO Deli, HUANG Wenjun. Some research advances in downhole tubular mechanics and control methods[J]. Advances in Mechanics, 2021,51(3):620-647.
- [34] 高德利, 徐秉业. 石油钻井底部钻具组合平面纵横弯曲大挠度分析[J]. 工程力学, 1992(4):42-49.  
GAO Deli, XU Bingye. Planar analysis of the static behavior of a bottomhole assembly under large deflection[J]. Chinese Engineering Mechanics, 1992(4):42-49.
- [35] 高德利. 地层各向异性的评估方法[J]. 石油学报, 1993(2):96-101.  
GAO Deli. A method for the evaluation of formation anisotropy [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993(2):96-101.
- [36] 高德利, 刘希圣. 井眼轨迹控制的多功能微机程序[J]. 石油钻采工艺, 1989(6):1-11.  
GAO Deli, LIU Xisheng. A multifunctional microcomputer program for wellbore trajectory control[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1989(6):1-11.
- [37] 高德利. 井眼轨迹控制力学模型[J]. 力学学报, 1995(4):501-505.  
GAO Deli. Mechanics models for prediction and control of the wellbore trajectory[J]. Acta Mechanica Sinica, 1995(4):501-505.
- [38] 高德利. 井眼轨迹控制问题的力学分析方法[J]. 石油学报, 1996(1):115-121.  
GAO Deli. A mechanical model for prediction and control of the wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996(1):115-121.
- [39] 高德利, 徐秉业. 石油钻井底部钻具组合大挠度三维分析[J]. 应用力学学报, 1995(1):53-62, 141.  
GAO Deli, XU Bingye. Three-dimension analysis of the static behavior of BHA under large deflection[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1995(1):53-62, 141.
- [40] 陈作. 待钻井眼井斜变化率的预测及应用[J]. 钻采工艺, 1997(5):23-25.  
CHEN Zuo. Prediction and application of the rate of inclination change in the wellbore to be drilled[J]. Drilling & Production Technology, 1995(1):53-62, 141.
- [41] 范成洲, 曹钧, 尹晓利. 基于自适应神经网络模糊推理系统的竖井井斜预测[J]. 矿山机械, 2011,39(4):23-26.  
FAN Chengzhou, CAO Jun, YIN Xiaoli. Prediction of shaft obliquity based on adaptive neural-network-based fuzzy inference system[J]. Mining & Processing Equipment, 2011,39(4):23-26.
- [42] 田恒星, 乌效鸣, 贺仁均, 等. 岩心钻探斜构造地层井斜轨迹预测模型与软件[J]. 地质科技情报, 2012,31(3):139-142.  
TIAN Hengxing, WU Xiaoming, HE Renjun. Inclination trajectory prediction model and software for monoclinic structure formation of core drilling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2012,31(3):139-142.
- [43] 孙晓波. 防斜纠斜技术在邑深1井的应用[J]. 石油地质与工程, 2020,34(5):102-105.  
SUN Xiaobo. Application of deviation prevention and correction technology in Yishen-1 well[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020,34(5):102-105.
- [44] 汤凤林, Нескоро Мных В.В., 赵荣欣, 等. 深井钻进时井底钻头造斜导向系统的分析与建议[J]. 钻探工程, 2022,49(6):54-61.  
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V.V., ZHAO Rongxin, et al. Analysis and suggestion about the downhole bit steering system for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):54-61.
- [45] 王廷, 王英杰, 马能量, 等. 准噶尔盆地玛湖地区防斜钻具组合优化设计[J]. 新疆石油天然气, 2022,18(3):44-53.  
WANG Ting, WANG Yingjie, MA Nengliang, et al. Optimal design of anti-inclination bottom hole assembly in Mahu Area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022,18(3):44-53.
- [46] 李志彬. 国内外典型自动垂直钻井系统技术与比较[J]. 石油工业技术监督, 2022,38(8):11-16, 21.  
LI Zhibin. Technical analysis and comparison of typical automatic vertical drilling systems at home and abroad[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2022,38(8):11-16, 21.
- [47] 柴麟, 张凯, 刘宝林, 等. 自动垂直钻井工具分类及发展现状[J]. 石油机械, 2020,48(1):1-11.  
CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools[J]. China Petroleum Machinery, 2020,48(1):1-11.
- [48] 张凯, 柴麟, 刘宝林, 等. 一种小直径取心式垂直钻井工具推力执行机构: 201910644494.X[P]. 2019-09-10.  
ZHANG Kai, CHAI Lin, LIU Baolin, et al. A small diameter vertical drilling tool actuator: 201910644494.X[P]. 2019-09-10.
- [49] 张耀澎. 垂直钻进系统推靠机构设计及模拟试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
ZHANG Yaopeng. Design and simulation test of a pushing unit of push-the-bit vertical drilling system[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [50] 梁武东, 陈鑫, 王迪, 等. 直井防斜技术及防斜钻具综述[J]. 内蒙古石油化工, 2009,35(18):88-90.  
LIANG Wudong, CHEN Xin, WANG Di, et al. Overview of vertical well anti-skew technology and anti-skew drilling tools[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009,35(18):88-90.
- [51] 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.  
WANG Da, ZHANG Wei, ZHANG Xiaoxi, et al. Drilling Engineering and Technologies of Chinese Continental Scientific Drilling Project[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [52] E.A.科兹洛夫斯基. 科拉超深钻井(下)[M]. 北京: 地质出版社, 1989.  
Kozłowski E. A. Supper Deep Well of Kola Peninsula (volume 2)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.

(编辑 荐华)