

doi: 10.12029/gc20190519

胡郁乐, 刘乃鹏, 汪伟, 张恒春. 2019. 松科二井高温高压随钻测温技术的应用研究[J]. 中国地质, 46(5): 1193–1199.

Hu Yule, Liu Naipeng, Wang Wei, Zhang Hengchun. 2019. Research and application of high temperature and high pressure while drilling temperature measurement technology in Well Songke-2[J]. Geology in China, 46(5): 1193–1199(in Chinese with English abstract).

松科二井高温高压随钻测温技术的应用研究

胡郁乐^{1,2,3}, 刘乃鹏³, 汪伟^{1,2}, 张恒春⁴

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;
3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 松科二井是亚洲国家组织实施的最深大陆科学钻井。松科二井完钻后 38 h 测井温度为 241℃, 创造了我国钻井工程最高井温应用记录。松科二井井内参数测试主要采用两种方法, 一是综合物探测井, 在下套管前进行综合测井; 另一种是不影响正常钻进工作, 随钻进行井下参数测试。及时掌握井下随钻温度等信息, 对高温泥浆性能的调整和动力机具应用起着关键性的支撑作用。本文针对松科二井科学钻探高温难点问题展开系列研究, 研制了一种存储式井下高温测试仪器。该仪器经过多轮攻关改进设计, 成功应用于松科二井现场, 在现场应用的最高随钻测井温度为 222℃。

关键词: 随钻测温; 松科二井; 高温高压; 深地勘查工程; 松辽盆地

中图分类号: P634.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019)05-1193-06

Research and application of while drilling temperature measurement technology under high temperature and high pressure in Well Songke-2

HU Yule^{1,2,3}, LIU Naipeng³, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Hengchun⁴

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100190, China; 2. SiniProbe Center—China Deep Exploration Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100190, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Exploration Technology Institute, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: Well Songke-2 is the deepest continental scientific drilling carried out by Asian countries. The logging temperature of Well Songke-2 was 241 °C after drilling for 38 hours, which created the highest well temperature application record of drilling engineering in China. The parameters of Well Songke-2 are mainly tested in two ways: one is integrated logging before casing, whereas the other is downhole parameter measurement while drilling which does not affect normal drilling work. Timely grasping the information such as the temperature while drilling plays a key supporting role in the adjustment of high temperature mud performance and the application of power tools. The authors carried out a series of researches on the problem of high temperature in Well Songke-2, and developed a storage type measurement while drilling instrument. The instrument was improved

收稿日期: 2019-04-05; 改回日期: 2019-09-12

基金项目: 中国地质调查局中国地质科学院基本科研业务费(2017—2020年)(JYYWF20180501)和国家自然科学基金重点项目(61733016)联合资助。

作者简介: 胡郁乐, 男, 1970 年生, 教授, 博士后, 主要研究方向为钻探工艺技术和钻井仪表; E-mail: ylhu@cug.edu.cn。

and designed through multiple rounds of research and finally it has been successfully applied to Well Songke-2.

Key words: temperature measurement while drilling; Well Songke-2; high temperature and high pressure; deep exploration engineering; Songliao Basin

About the first author: HU Yule, male, born in 1970, professor, postdoctoral researcher, engages in study and teaching of drilling technology and drilling instrument; E-mail: ylu@cug.edu.cn.

Fund support: Supported by Basic Research Business Fee of China Geological Survey and China Academy of Geological Sciences (2017-2020)(No. JYYWF20180501) and National Natural Science Foundation of China (No. 6173301).

1 引 言

松科二井布置在松辽盆地东南断陷区徐家围子断陷带宋站鼻状构造上,是由中国地质调查局立项并出资,国际大陆科学钻探计划(ICDP)给予一定支持的全球第一口钻穿白垩纪陆相沉积地层的大陆科学钻探井,是亚洲国家组织实施的最深大陆科学钻井(侯贺晟等,2018)。设计井深 6400 m,完井深度 7018 m。此地区的地层温度高,根据邻井地层资料测算,平均地温梯度为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,预测钻达井底时候,温度可能高达 250°C 以上(单文军等,2014)。松科二井的实施,为中国今后的高温钻井工程的实施提供技术支撑,松科二井完钻后 38 h 测井温度为 241°C ,创造了我国钻井工程最高温水基泥浆最高的应用记录。松科二井井内参数测试主要采用两种方法,一是综合物探测井,根据项目进程在下套管前进行通井和综合测井;另一种是不影响正常钻进工作,随钻进行井下参数测试。由于受仪器井下工作时间以及供电方式的限制,井下随钻测试技术存在着更大的挑战性。

2 难点问题 and 国内外现状

对松科二井而言,随钻井下参数测试非常重要,因为井内高温会引起多组份泥浆性能的高温蜕变和钻具工作性能的衰退等,对钻进效率和钻井安全至关重要。及时掌握井下随钻温度等信息,对高温泥浆性能的现场调整和动力机具应用起着关键性的支撑作用。因此设计一套随钻测温仪器对井底的温度进行检测显得十分必要。

深部钻探高温地层一直是钻井和随钻测井行业的能力极限(刘跃进,2007;冉恒谦等,2011)。在过去几年中,全球范围内越来越多的高温高压地层被勘探开发。随着深井和超深井数量的增多,对高

温高压随钻测井工具的需求也呈逐渐上升的趋势(胡郁乐等,2013)。根据石油工程协会(SPE)的划分,温度低于 150°C ,压力低于 69 MPa 的地层为常规地层;温度 $150^{\circ}\text{C}\sim 175^{\circ}\text{C}$,压力 69~103 MPa 的地层为高温高压地层;温度 $175^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$,压力 103~138 MPa 的地层为超高温高压地层;温度大于 200°C ,压力大于 138 MPa 的地层划分为极高温高压地层(Parker and Cooper, 2016)。按该分类方法,松科二井 7018 m 温度属于极高温地层,随钻测温仪器工作指标必须满足极高温测试要求。

中国目前的随钻测量技术的作业地层主要处于常规地层,普通的随钻测井仪器工作温度极限(钻井循环温度)是 150°C (闫冰,2019)。国内科研机构在研究高温高压部分的随钻温度检测,极限也不过是 175°C 。如赛恩思电子仪器设备有限公司的 SEI 系列存储式温度测试仪($0\sim 150^{\circ}\text{C}$)、西安石油大学研制的高温大容量井下储存式温度测试仪($0\sim 125^{\circ}\text{C}$)、大庆油田自行研制了 $\phi 214$ 的螺扶型井底温度测量仪($0\sim 150^{\circ}\text{C}$)都是常规作业 150°C 以下的产品,西安斯坦仪器股份有限公司研制的 YL 系列温度测试仪能够做到 175°C ,但是也不能在 175°C 下长时间稳定工作(孔凡军和刘永贵,2005; Wang et al., 2017)。

国外在 200°C 超高温随钻测井仪器俱乐部中,比较突出的是 2016 年获得“世界石油最佳钻井技术奖”的哈里伯顿的 Quasar Trio 系列和斯伦贝谢的 TeleScope ICE 相关仪器,能够达到耐温 200°C ,美国的东南部和北海等地是其市场。在 2000 年 6 月的高温电子会议中,预计对高温电子类工具的市场需求每年在 1 亿到 3 亿美元。为了应对市场的需求,2003 年由美国能源部国家能源技术实验室投资赞助了 Deep Trek 项目,先后投资 24 亿多美元用以推进该项技术的发展,该项目由霍尼韦尔公司来主导,由 Joint Industrial Participation (JIP) 的商业伙伴

如:BP、Baker Hughes, Goodrich Aerospace, Halliburton(through 2005), Honeywell, Server IntelliServ, Quartzdyne and Schlumberger 等来共同开发,旨在开发研制能在高温环境中(>250℃)使用的各种集成电路(IC)的制造方法、材料、设计工具等,以期实现能合适井底冲击和振动环境的电子器件的封装。Analog Devices, Inc.、VORAGO 和 PETROMAR 三家公司联合研制的 EV-HT-200CDAQ1 高温数据采集和处理平台,所有芯片和电路材料至少为 200℃。德州仪器研制了承受高达 210℃ 的极端工作温度的高温评估模块 HEATEVM。虽然霍尼韦尔的存储芯片、运算放大器、模数转换芯片等可以耐温 225℃,但目前高温单片机芯片最高耐温 210℃,所以从芯片能力上,单是检测温度这一个参数最高只能达到 210℃(刘永贵和邵天波,2004;赵志学等,2010;胡郁乐等,2018)。而适用于随钻的检测顶角等其它参数的传感器远没有达到 200℃ 的高温要求。因此解决高温检测技术问题,研发出高温芯片和传感器,还有很长的路要走。

国外产品价格十分昂贵,国内石油勘探和地质岩心钻探根本无法承受其经济压力,而国内产品又满足不了深部钻探超高温高压的性能需求。松科二井的实施首先为极高温随钻温度测试提出了目标要求,也为我国深部高温地层钻探提供了技术尝试和应用支撑。

3 任务目标和总体设计

依托松科二井,项目研制了一套地质勘查高温井内温度检测、采集、存储,地面回放分析井内温度的探测装置。最终目标是完成 250℃ 井底温度的随

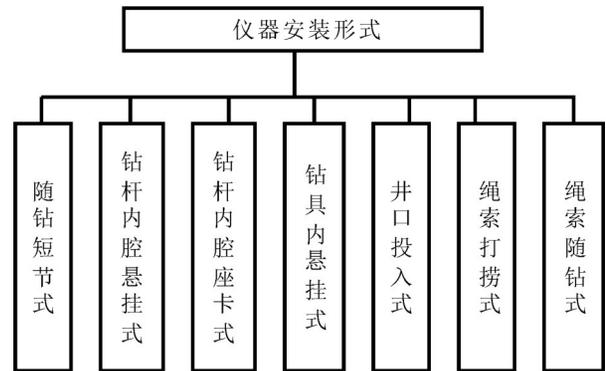


图1 随钻测温仪的多工艺配套方式

Fig.1 Multi-process matching mode of high temperature measurement while drilling instrument

钻测试。其中:技术指标如下:温度测试范围 20~250℃,精度 G0.5,动态响应时间 20 s;耐压密封达 100 MPa。

主要研究内容:(1)针对松科二井工艺特点,研究多工艺配套的随钻测温系统。在不影响钻井安全和钻井进度的条件下设计随钻测试的多工艺配套方式。如图 1 所示。随钻短节式主要解决仪器在不同井深段的温度检测,通过短节组装在钻具的不同部位实现不同点的温度测试;仪器悬挂式则通过悬挂安装在钻具的不同部位,解决安全钻进的问题;绳索式主要解决和绳索取心工艺配套的问题;投入式则为了解决仪器的高温寿命问题而采取的综合措施。

(2)针对深部钻探井下高温高压环境,研究保温绝热、相变蓄热、屈服抗压、高压密封等技术,并将其应用到井下高温随钻测试仪,保证仪器的绝热性能与可靠性。内容包括:多层真空隔热隔热技术、热量反射技术、抗压挤毁和高压密封设计等。

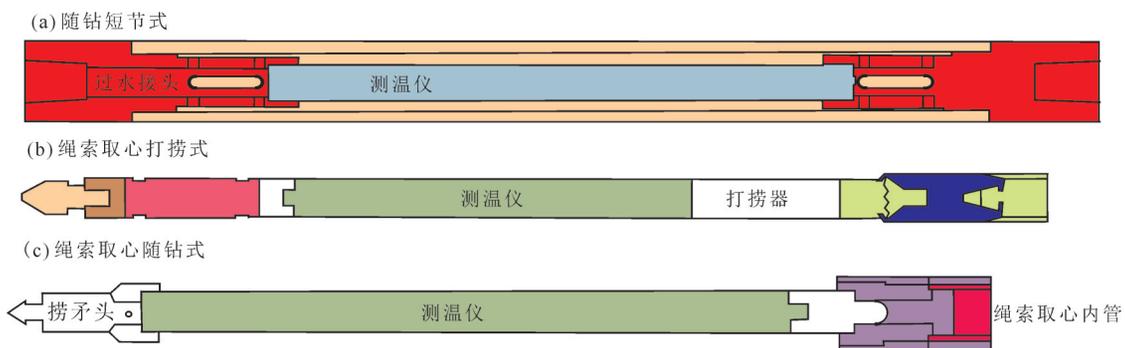


图2 仪器的安装方式

Fig.2 matching mode of instrument

相变材料用于延长仪器的高温态条件下的工作时间和寿命。需要在研究储热理论的基础上优化选择隔热和储热相变材料。

(3)研究井下温度采集系统和存储式测试系统结构,研制出适应于深部钻探井下超高温、超高压环境的存储式温度测试系统。满足井下小尺寸、强振动工作条件。

为了适应松科二井不同工艺要求,该仪器采用了随钻短节式、钻杆内腔悬挂式、钻杆内腔座卡式、钻具内悬挂式、井口投入式、绳索打捞式和绳索随钻式,在工程现场分别进行了测试和实验。

随钻测量短节式如图 2a,仪器放在中间,两边有可以让泥浆通过的专用接头,可直接通过接头连接在钻杆和钻具之间进行随钻测量;绳索取心打捞式(图 2b))可与打捞器连接在一起,打捞内管时提出测量仪器;绳索取心随钻式,仪器与内管总成连接在一起,投入井内并随钻检测,连接如图 2c,取心时与岩心一起打捞上来。

系统主要由 3 个功能模块组成:(1)低功耗、小尺寸、稳定性强的温度检测系统硬件电路;(2)实现整个仪器功能的软件;(3)耐高温、抗高压的仪器机械结构。如图 3 所示。

硬件电路采用经过高温筛选的元器件,将硬件电路放在恒温箱中进行筛选,同时将硬件电路的测

量温度与恒温箱的温度进行对比与标定,确保测试的温度准确性,最终获得了极限工作温度 230℃ 的高温电路。

测量系统软件程序的主要功能:接收上位机发送的命令,并传输温度和时间数据。软件可方便地记录、传输与删除数据。

上位机的程序运用 LabVIEW 语言编写,其主要作用发送指令,进行实时时间的设置,数据的采集、传输,和数据的擦除等。

井下高温对测试仪器电路的影响非常大,由于超过芯片温度极限,导致电子器件的电学参数漂移、硅片连线故障、封装故障、电迁移等。因此电路板和传感器的隔热保护显得尤其重要。隔热效果不好,就会使硬件电路失效,而使得测试失败(Denney,2007;Sur,2016; Parker and Cooper,2016)。

针对仪器的井下高温高压条件,设计时考虑了仪器的强度、密封性和耐高温性能。本仪器主要采用真空隔热、绝热棉隔热、镜面热量反射、吸热体吸热、抗压挤毁和高压密封的技术。设计的仪器筒体具有很大的热阻,内筒外表面光洁如镜面,可以反射热量。将电路板和电池放在中间的保护仓中,内置特殊吸热保护材料,将漏热量暂储存起来,起到保护电路板和电池的作用。仪器的外筒采用高强度材料制作,能满足抗挤毁强度要求,仪器采用了

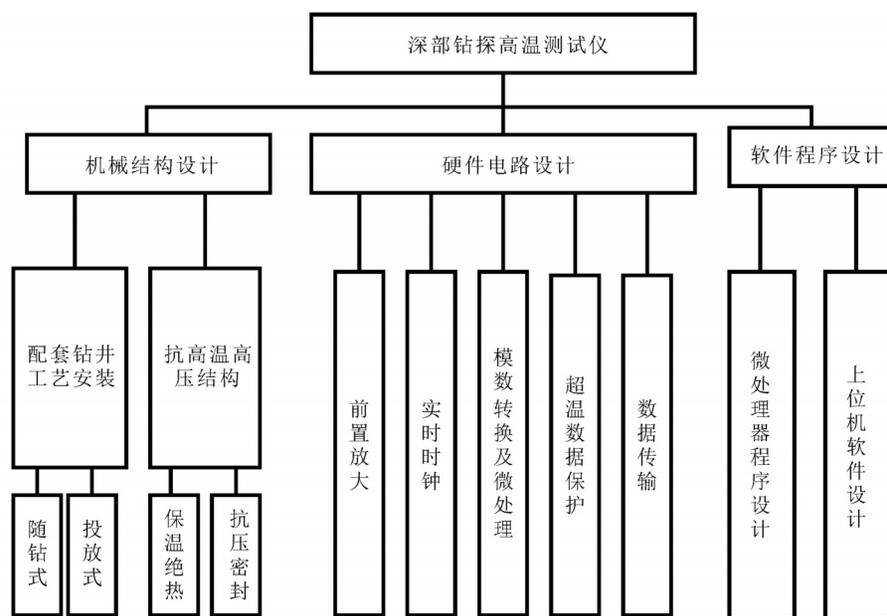


图3 松科二井高温测试仪系统的组成

Fig.3 Composition of high temperature measurement while drilling instrument system

特殊结构密封,能满足 100 MPa 泥浆压力密封。

4 现场实验与数据分析

该仪器已经在松科二井的钻进现场多次应用,取得了 对 钻 井 工 艺 有 参 考 意 义 的 井 底 温 度 曲 线,本 文 选 择 部 分 测 温 数 据 进 行 分 析 对 比。

4.1 第 213 回次的测温数据分析

图 4 为 松 科 二 井 第 213 回 次 的 测 温 数 据,记 录 的 温 度 同 时 可 以 反 映 工 况 的 变 化,第 213 回 次 每 工 况 节 点,测 试 温 度 都 有 对 应 变 化 波 动。从 20 日 0:40 测 温 仪 开 始 下 井,测 试 温 度 上 升;到 20 日 8:45 下 到 井 底(4180 m),测 温 仪(3954 m)温 度 达 到 第 一 个 最

高 峰 120.73℃;开 泵 循 环,温 度 迅 速 下 降,在 10:11 冷 却 到 最 低 89.02℃之 后,又 开 始 上 升;到 14:20 时,由 于 冲 管 损 坏,关 泵,更 换 冲 管,温 度 上 升 斜 率 增 大,到 21 日 0:59 时 更 换 完 成,温 度 达 到 第 二 个 峰 值 132℃;开 泵 继 续 钻 进,井 底 开 始 冷 却,温 度 急 剧 下 降 到 最 低 后,又 开 始 上 升;到 6:30 时 测 温 仪 掉 到 滤 网 处,泵 压 突 然 增 大 2 MPa,将 泵 冲 由 90 SPM 降 到 83 SPM,温 度 有 一 个 抖 动 上 升;在 10:10~11:20,1 h 10 min 时 间 里 关 泵 加 单 根 和 修 上 旋 塞,温 度 有 一 个 急 剧 上 升,开 泵 温 度 有 一 个 迅 速 下 降 后,又 开 始 稳 定 上 升;在 22 日 0:00~0:35,35 min 时 间,关 泵 加 单 根,温 度 又 是 一 个 急 剧 上 升,开 泵 继 续 钻 进,温 度 平

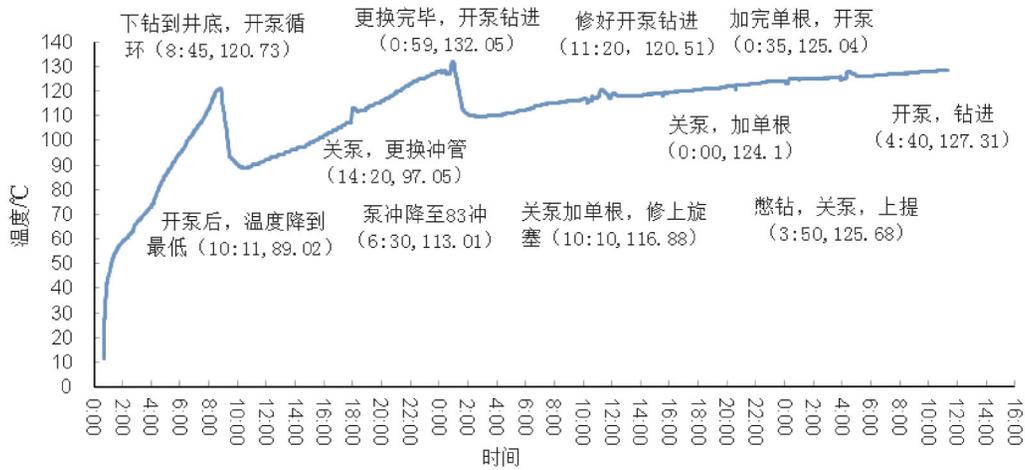


图4 松科二井213回次测温数据
Fig.4 Time-temperature curve in the 213th roundtrip

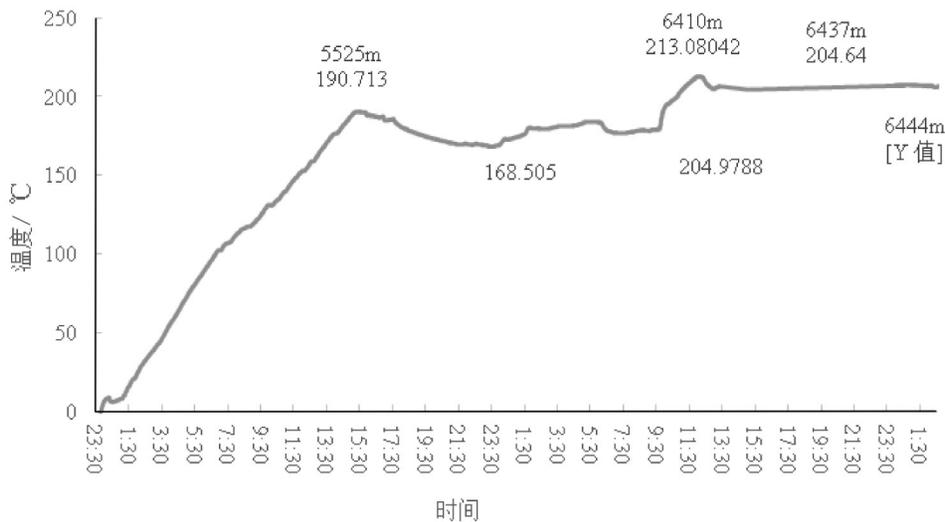


图5 433WU-TX287回次随钻测温数据
Fig.5 Time-temperature curve in the 433WU-TX 287th roundtrip

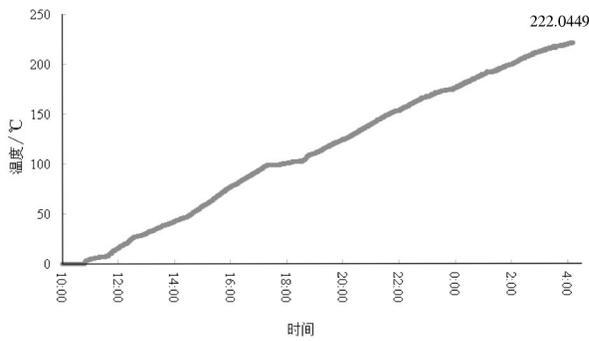


图6 444WU-TX298回次随钻测温曲线图

Fig.6 Time-temperature curve in the 444WU-TX 298th roundtrip

稳上升,上升速度缓慢;在3:50~4:40,50 min时间里由于憋钻,关泵上提,温度又是一个急剧上升,开泵钻进后,温度有一点下降趋势后,又缓慢上升,直到该回次钻进结束提钻。

4.2 433WU-TX287回次随钻测试

在433WU-TX287回次进行了随钻测试,仪器连接在取心钻具的单动的下方。

该回次测温测得的最高温度为213.08°C,深度6410 m(钻位减去取心筒长度)(图5)。仪器从12月1日0点开始下入,12月1日15:20仪器测得温度为190.71°C,停泵40 h,之后开泵循环,泵量8.07 L/s,温度下降,23:21~23:42温度最低为168.51°C。12月2日11:55,下到6410 m,测得最高温度为213.08°C。12:10~12:50共40 min开泵循环划眼,泵量8.07 L/s,温度降为204.98°C。测试数据表明:温度与下深呈正相关关系,温度梯度与综合测井数据吻合。数据分析可知:恢复循环后,测点温度下降幅值最大达22.2°C。这是经由地表冷却的钻井液循环到测试点时引起的最大温度降。当钻井液循环后,划眼采用小泵量流量时,温度下降幅值为8.1°C,对比数据充分说明了钻井液流量的大小对井下温度的降幅影响很大。因此高温钻井过程中,循环流量的增大,有利于钻井液的安全,也有利于增加井下螺杆钻具的寿命。

4.3 444WU-TX298回次随钻测试

随钻高温测温仪在444WU-TX298回次进行了随钻高温测试。读取的数据如图6所示。钻位为6700 m,测温仪深度为6660 m,温度222°C,停泵时

间约46 h。此时电池在222°C时已经被破坏,222°C为电池的极限温度。测试效果表明:测温结果与综合物理保温瓶测井数据吻合;随钻测试仪器的组装形式可适应不同的井下环境,仪器连接方式和配套形式灵活多变,能满足多种钻探工艺条件。试验也表明,仪器除电池出现极限破坏外,电路关键芯片和元器件还具有测试功能,测试电路部分承受了220°C的极限考验。

5 结 论

(1)该仪器在松科二井的钻进现场发挥了重要作用,经理论验证与测井资料的对比证实了所测数据的准确性,为泥浆的配置提供了数据支持。该仪器不仅可应用于不同钻井工艺条件下的井内高温的测试,也可拓展用于高温态井下其他参数的测试。

(2)仪器的力学强度和密封效果在高温深井参数检测实践中得到了检验,为高温井的随钻测试技术提供了重要参考。

(3)井下高温仪器研究任重道远,高温电子元件、高温电池和高温传感技术目前都存在瓶颈技术问题。另外井下仪器的高温工作性能,与仪器的保温隔热技术、高温电子测试技术、以及钻井工艺技术均有直接关系。多学科的交叉和融合是未来深井高温仪器发展的必由之路。

参考文献

- Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, MA Feng, Fu Wei, Wang Pujun, Huang Yongjian, Zou Changchun, Gao Youfeng, Gao Yuan, Zhang Laiming, Yang Jin, Guo Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. *Geology in China*, 45(4): 641-657(in Chinese with English abstract).
- Hu Yule, Zhang Hui, Wang Wenshi. 2018. Key Technology of Deep Core Drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 274-280(in Chinese).
- Hu Yule, Zhang Hui. 2013. Deep Geothermal Drilling and Well Formation Technology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2-10(in Chinese).
- Kong Fanjun, Liu Yonggui. 2005. Study and application of the MWD pressure and temperature system[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 24(1): 76-79 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yonggui, Shao Tianbo. 2004. A kind of measuring tool for downhole pressure and temperature[J]. *Petroleum Drilling*

- Techniques, 32(6):27-31(in Chinese with English abstract).
- Liu Yuejin. 2007. Present state and development of core drilling machine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 34(1):39-43 (in Chinese with English abstract).
- Maldonado B, Arrazola A, Morton B. 2006. Ultradeep HP/HT Completions: Classification, Design Methodologies, and Technical Challenges[C]. Offshore Technology Conference, OTC-17927-MS.
- Parker T, Cooper P. 2016. Taking the Heat: Logging While Drilling at Extreme Temperatures. Society of Petroleum Engineers[C]/IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, IADC/SPE-180592-MS.
- Ran Hengqian, Zhang Jinchang, Xie Wenwei, Zhang Yongqin, Song Zhibin, Xiang Junwen, Liu Fanbai, Feng Qizeng, Yan Taining, Jia Meiling, Tao Shixian, Hu Jiliang. 2011. Application study of geo-drilling technology[J]. Acta Geologica Sinica, 11(11):1806-1822 (in Chinese with English abstract).
- Shan Wenjun, Tao Shixian, Fu Fan, Yue Weimin, Zhao Zhitao. 2014. High Temperature Drilling Fluid Technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 31(5):10-13(in Chinese with English abstract).
- Sur A, Rashid K, Winslow D, Mcpheeters S. 2016. Analysis of bottlenecks in the efficient thermal dissipation from the electronics in a drilling tool[C]/IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, IADC/SPE-178778-MS.
- Wang H, Ge Y, Shi L, 2017. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016-2020)[J]. Natural Gas Industry B, 37(4):319-326.
- Wang L. 2015. Halliburton launched the "Two high" with while drilling measurement system[J]. Overseas Logging Technology, 9(2):63-63(in Chinese).
- Yan Bing. 2019. Research on while drilling temperature measurement technology for circulating fluid in high temperature geothermal well[J]. Petrochemical Technology, 40(1):228-229(in Chinese).
- Zhao Zhixue, Han Yuan, Meng Xiangguang, Bai Xiaojie, GaoXiang. 2010. Development and application of the instrument for LWD measurement of downhole pressure and temperature[J]. China Petroleum Machinery, 38(1):44-47(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 单文军,陶士先,付帆,岳伟民,赵志涛. 2014. 抗240℃高温水基钻井液体体系的室内研究[J]. 钻井液与完井液, 31(5):10-13.
- 侯贺晨,王成善,张交东,马峰,符伟,王璞珺,黄永建,邹长春,高有峰,高远,张来明,杨璠,国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4): 641-657.
- 胡郁乐,张惠,王稳石. 2018. 深部岩心钻探关键技术[M]. 武汉:中国地质大学出版社,274-280.
- 胡郁乐,张惠. 2013. 深部地热钻井与成井技术[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2-10.
- 孔凡军,刘永贵. 2005. 随钻压力温度测量系统的研究与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 24(01):76-79.
- 刘永贵,邵天波. 2004. 井下压力温度测试工具的开发应用[J]. 石油钻探技术, 32(6):27-31.
- 刘跃进. 2007. 岩心钻探设备的现状与发展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 34(1):39-43
- 冉恒谦,张金昌,谢文卫,张永勤,宋志彬,向军文,刘凡柏,冯起赠,鄢泰宁,贾美玲,陶士先,胡继良. 2011. 地质钻探技术与应用研究[J]. 地质学报, 11(11):1806-1822.
- 王丽忱. 2015. 哈里伯顿推出“两高”随钻测量系统[J]. 国外测井技术, 9(2):63-63.
- 闫冰. 2019. 高温地热井循环流体温度随钻测量技术研究[J]. 石化技术, 40(1):228-229.
- 赵志学,韩玉安,孟祥光,白晓捷,高翔. 2010. 随钻测量井下压力、温度仪器的研制及应用[J]. 石油机械, 38(1):44-47.