

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.245>



超万米深井机械式随钻测温装置研制与试验

朱芝同¹, 左泽旭², 吴川^{2*}, 梁健¹, 刘天乐³, 邵玉涛¹

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300309
2. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为解决超万米深井钻探中电子测温装置因高温失效的难题, 研制了一种基于不可逆热敏显色原理的机械式井下随钻测温装置. 该装置集成于绳索取心钻具内管总成, 利用特定熔点材料覆盖层熔化显色记录最高温度, 并通过打捞矛将内管总成打捞到地表后进行数据的读取. 试验表明, 装置测温范围为 37~260 °C, 测量误差低于 5%, 且在 37~65 °C 区间分辨率为 3 °C, 65~260 °C 区间分辨率为 6 °C. 此外, 装置需要约需 30 min 达到热平衡状态以进行稳定测量, 并在 72 h 长期恒温试验中验证了优异的稳定性. 该机械式测温装置无需电子元件, 成功克服了超深井高温环境限制, 可为万米以深钻探工程提供有效的孔底温度随钻测量手段.

关键词: 机械式; 温度测量; 取心钻具; 超万米深井; 测温试纸.

中图分类号: P634.3

文章编号: 1000-2383(2026)08-2967-10

收稿日期: 2026-05-13

Development and Testing of a Mechanical While-Drilling Temperature-Measurement Device for Ultra-Deep Wells

Zhu Zhitong¹, Zuo Zexu², Wu Chuan^{2*}, Liang Jian¹, Liu Tianle³, Shao Yutao¹

1. *Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin 300309, China*
2. *School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*
3. *School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*

Abstract: To address the failure of electronic temperature-measurement devices caused by extreme downhole temperatures in ultra-deep (10,000-m-class) drilling, this study developed a mechanical temperature-measurement device for while-drilling applications based on an irreversible thermo-chromic (heat-sensitive color-development) principle. Integrated into the inner-tube assembly of a wireline coring drill, the device uses a color-developing coating composed of materials with specified melting points to record the maximum downhole temperature reached. After retrieval of the inner-tube assembly to the surface using an overshot, the temperature record can be read. Experimental results show that the device measures temperatures from 37 to 260 °C, with measurement errors below 5% in the 110 - 260 °C range. The resolution is 3 °C from 37 to 65 °C and 6 °C from 65 to 260 °C. In addition, the device requires about 30 minutes to reach thermal equilibrium for stable measurement, and a 72-hour constant-

基金项目: 深地国家科技重大专项资助; 超万米科学钻探井身结构及绳索取心钻具研发(No. 2024ZD1000901); 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”(No. DD20242850)

作者简介: 朱芝同(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质钻探井下器具研究与开发工作. ORCID: 0009-0004-5709-7963. E-mail: zzt3066@163.com

*** 通讯作者:** 吴川, ORCID: 0000-0002-7275-0295. E-mail: wuchuan@cug.edu.cn

引用格式: 朱芝同, 左泽旭, 吴川, 梁健, 刘天乐, 邵玉涛, 2026. 超万米深井机械式随钻测温装置研制与试验. 地球科学, 51(8): 2967-2976.

Citation: Zhu Zhitong, Zuo Zexu, Wu Chuan, Liang Jian, Liu Tianle, Shao Yutao, 2026. Development and Testing of a Mechanical While-Drilling Temperature-Measurement Device for Ultra-Deep Wells. *Earth Science*, 51(8): 2967-2976.

temperature test verified its excellent stability. Because it contains no electronic components, the mechanical device avoids the high-temperature limitations of ultra-deep wells and provides an effective method for while-drilling bottom-hole temperature measurement in drilling projects exceeding 10,000 meters.

Key words: mechanical; temperature measurement; coring tools; ultra-deep wells; temperature-indicating paper.

0 引言

近年来,超万米深井已从科学探索迈入工程实施阶段,当前有多口超万米深井正在施工或已完钻,其中以深地塔科1井和深地川科1井最具代表性,未来还将谋划实施超万米科学钻探工程,表明我国已具备超万米深井钻探能力并正向更深目标迈进(张正等,2024;杨海军,2025).超万米钻探工程施工过程中,井下温度的准确测量获取至关重要.井底高温直接影响到钻井工具的安全与使用效果(梁健等,2025),同时高温会显著改变钻井液的流变性能、降低其携岩能力、加速其热降解失效,并可能诱发井壁失稳、卡钻等复杂情况(范胜等,2023;吴景华等,2025;章超等,2025).按地温梯度 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 计算,10 000 m井底地层温度可达 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,井底循环钻井液温度约 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$,而目前国内外尚无能够长期工作于 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上环境的电子式随钻测量仪器.因此,获取可靠的超万米深井的井底温度数据,对于优化钻井液配方与性能维护、指导井身结构设计、保障钻具安全及提高机械钻速等均具有不可替代的意义.

目前,测温技术主要包括热电式(韩文康等,2026)、电阻式(劳钧杰等,2025;吴传平等,2025)、半导体式(孙伦业等,2022;赵传锋等,2026)及光纤式(迟名等,2025)等类型.国际上,美国、欧洲等国家和地区围绕高温井下监测与测温开展了大量研究,涉及MEMS井下传感器(Andarawis *et al.*, 2022)、地热井IoT监测系统(Prauzek *et al.*, 2023)、光纤分布式温度传感(Lillo *et al.*, 2022; Konowski *et al.*, 2024)以及高温随钻/测井工具(Vedum *et al.*, 2017; Sugiura and Jones, 2025)等方向.这些方法能够实现单点或分布式的温度剖面测量,具有分辨率高、响应速度快的特点,相关技术也已在国内的地热勘查(刘清晓等,2024)、油气开发(李家骏等,2025;张昊等,2025)及工程监测(任传运等,2025;徐豪等,2025)等领域得到广泛应用.然而,上述方法及其数据处理电路均存在固有的耐温极限.当前主流军品级电子元器件通常难以在 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至

$200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中长期稳定工作.当应用于深部钻探工程时,特别是万米以深的目标层段,受地温梯度影响,井下温度极易超出此阈值,导致电子系统失效、测量中断或数据失真,无法满足超深井高温环境下的可靠测温需求.若测温装置不包含任何电子元件,即采用机械式测温方法,则可有效解决此问题.因此,本文提出一种机械式的井下随钻测温装置,以期突破常规电子式测温系统的耐温极限,实现超高温环境下的井下温度可靠测量.

1 工作原理

图1所示为机械式随钻测温装置的结构及工作原理示意图.如图1a所示,机械式随钻测温装置由绳索取心钻具内管总成、测量短节和捞矛头三部分组成,其中测量短节安装于捞矛头与岩心管之间,实现测温功能.测量短节内部装有经过标定的测温试纸,当井下温度发生变化时,试纸对应温度刻度的颜色随之改变,通过人工观察颜色变化并读取相应数值,即可获取温度信息.

实际作业时,测温短节随绳索取心钻具内管投入井底开始测温.提取岩心时,整套装置通过打捞矛随内管总成提至地表,卸下测量短节的密封盖板后进行温度读取.测温试纸为一次性使用,每次读数后需更换,且仅记录当次入井期间井底的最高温度,无法单次获取多个温度测值.

进一步结合图1b对测温试纸的工作原理进行介绍.测温试纸由基底、底色层和多级热敏覆盖层组成,不同温度区间的覆盖层选用具有特定熔点的材料:低温区常用蜡聚合物,中温区采用聚氨酯或丙烯酸共聚物,高温区则使用环氧树脂、酚醛树脂或高交联聚合物.当环境温度升至某一覆盖层材料的熔点时,该层熔化并失去遮蔽能力,对应位置的底色随即显露.若温度继续升高,更高熔点的覆盖层依次熔化,使更高温度对应的底色区域逐步显现.随后通过识别显露底色的最高温度区段,即可读取该测温点所经历的最高温度.覆盖层熔化显色过程不可逆,因此试纸仅能记录测量周期内出现的温度峰值.同时,受覆盖层材料熔点精度的限制,该

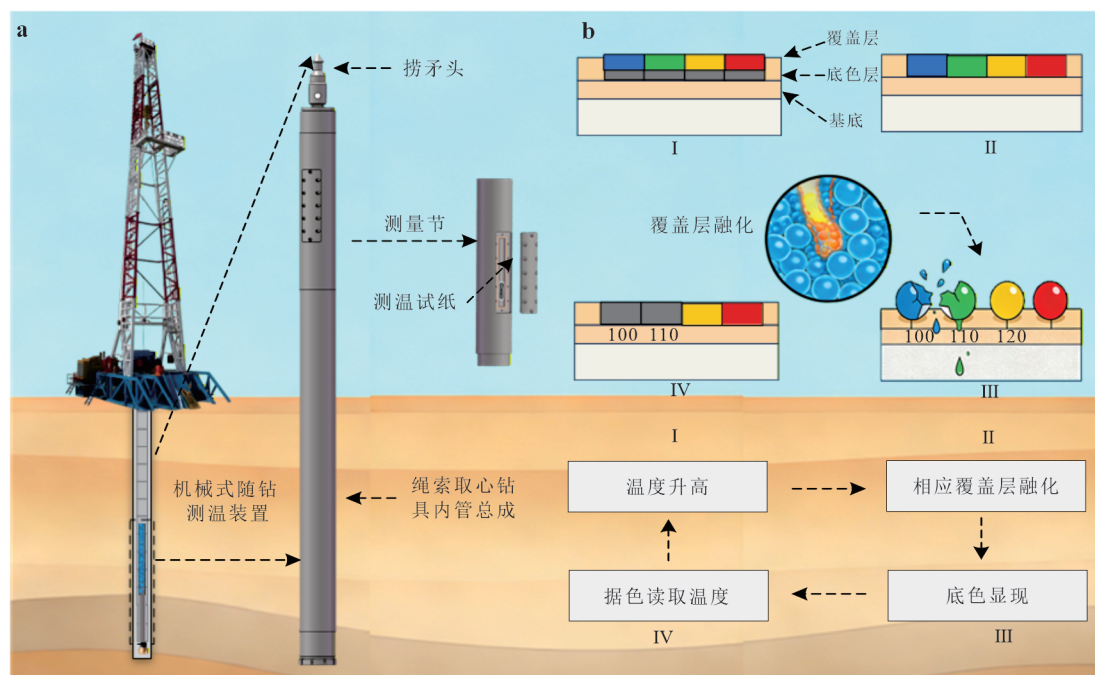


图1 测温装置结构及工作原理示意图

Fig. 1 Structure and working principle of the downhole temperature-measurement device

a. 测温装置结构示意图; b. 测温原理示意图

方法本质上测量的是某一温度区间。

2 结构仿真

为优化随钻测温短节的热响应性能,对其升温过程进行了仿真分析。图2a为环境温度200℃条件下的仿真结果。分析表明,盖板下方存放试纸的空腔区域升温速率显著高于同截面实心部分,其原因是空腔结构减小了内壁有效厚度并降低了热阻,从而加速了热量传递。据此,在测温短节盖板上设计沟槽结构,以使井底温度快速传递至测温试纸,有效缩短响应时间。进一步对不同盖板厚度下的升温过程进行仿真(图2b),结果显示盖板越薄升温越快,但不同厚度间的升温速率差异有限。综合结构强度与温度响应速度要求,盖板厚度确定为12 mm。

随后,评估了45碳素钢、42CrMo和2Cr13三种常用材料对测温短节升温性能的影响。图2c仿真结果表明,45碳素钢因热导率较高、比热容较低,升温速度最快,但其力学性能弱于42CrMo。为兼顾力学性能与升温速度,选择42CrMo作为钻具材料。最后,对优化后的测温短节在150℃、200℃和250℃工况下的升温行为进行了仿真验证。图2d升温曲线显示,不同温度下曲线形态一致,均呈现初期快速上升后逐渐趋稳的特征。鉴于更高温度下传热规律

未发生本质变化,该温度范围内的分析已可充分表征钻具的热响应特性。

在完成材料及结构优化后,进一步对采用42CrMo合金钢的测温短节在200 MPa外压工况下进行了静力学仿真分析。由图3a等效应力分布结果可知,结构高应力主要集中于盖板螺钉孔边缘及盖板与筒体连接过渡区域,说明孔边及截面突变位置存在一定的局部应力集中现象,而筒体主体区域应力分布相对均匀。仿真结果显示,测温短节最大等效应力为839.3 MPa,低于42CrMo合金钢屈服强度980 MPa,表明结构在200 MPa外压作用下未发生屈服失效。由图3b总位移分布结果可知,较大位移主要出现在盖板中部区域,说明盖板在外压作用下产生局部挠曲,但整体变形仍处于可控范围内。综合分析可知,测温短节具有较好的整体承压能力和结构刚度,但螺钉孔及盖板连接区域仍是强度薄弱部位,因此在后续加工过程中应避免尖角结构,并适当增加倒角或圆角过渡,以降低局部应力集中和最大等效应力,提高结构承压可靠性。

3 室内试验

基于优化设计方案,加工了随钻测温装置样机,并利用电热恒温干燥箱对其进行温度试验。受

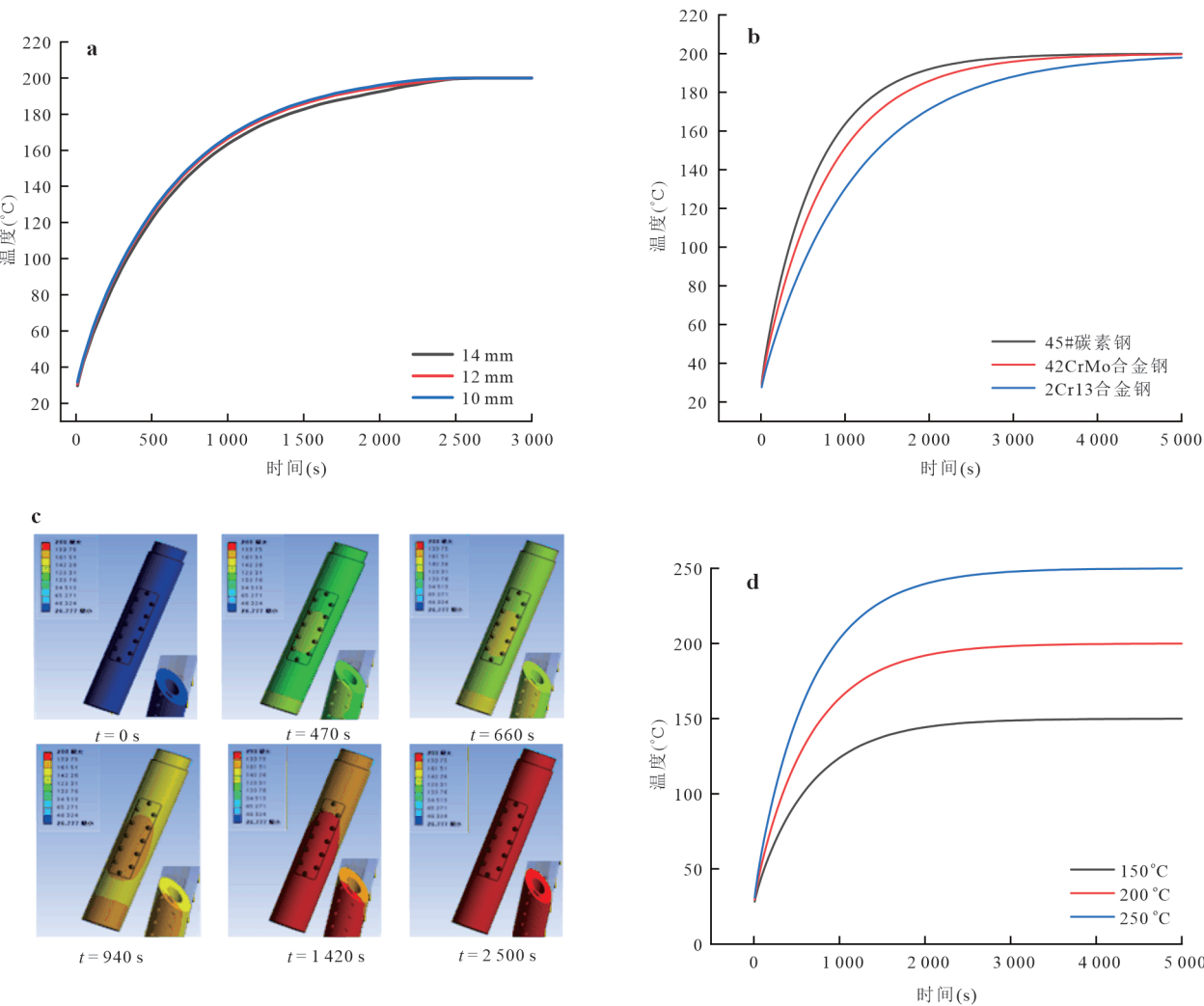


图 2 测温短节升温过程仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the heating process of the temperature-measurement section

a. 测温短节在 200 °C 环境下的升温过程;b. 不同盖板厚度对升温过程的影响;c. 不同材质对升温过程的影响;d. 不同环境温度下的升温过程曲线

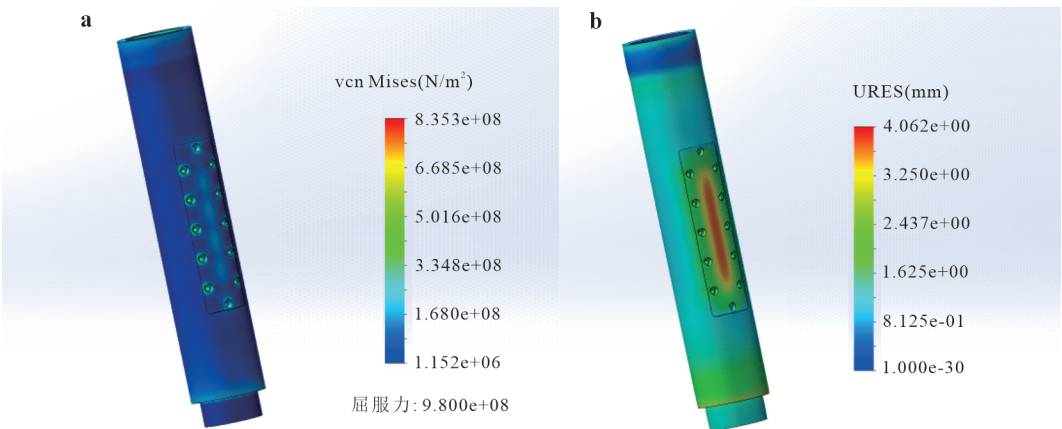


图 3 测温短节在 200 MPa 外压作用下的静力学仿真结果

Fig.3 Static structural simulation results of the temperature-measuring sub under an external pressure of 200 MPa

a. 应力分布仿真结果;b. 总位移仿真结果

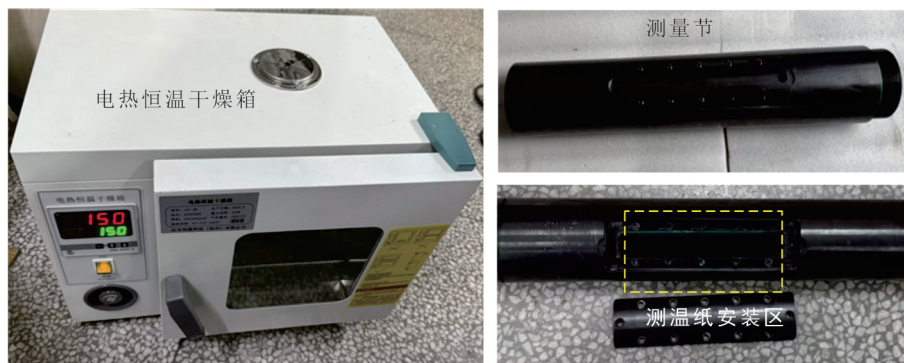


图 4 测温短节室内实验

Fig. 4 Temperature-sub section indoor experiment.

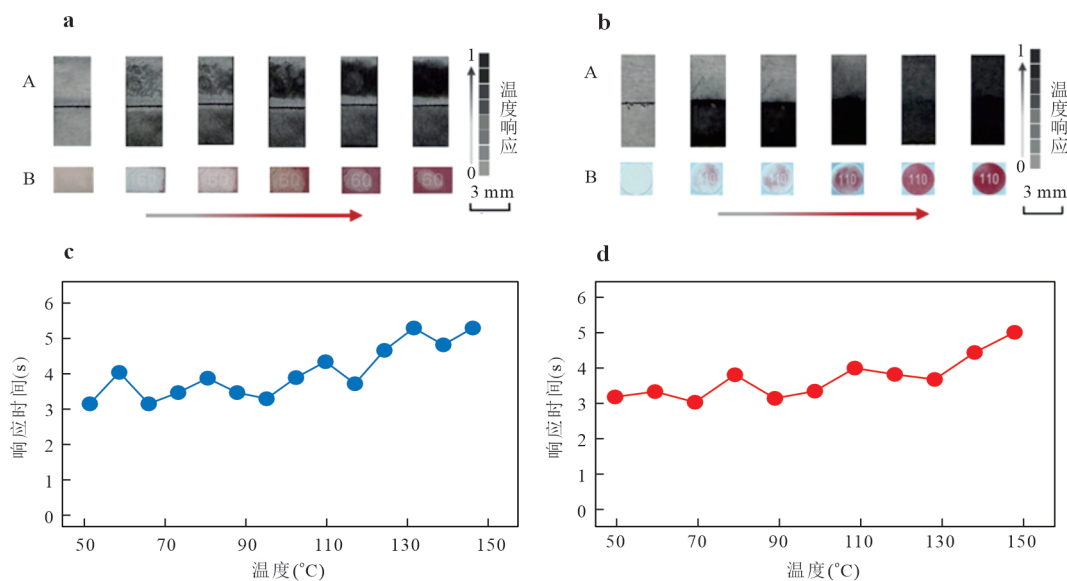


图 5 不同类型测温试纸的温度响应特性

Fig. 5 Temperature-response characteristics of different types of temperature-sensitive papers

a. A、B 型试纸在 60 °C 条件下的颜色变化过程; b. A、B 型试纸在 110 °C 条件下的颜色变化过程; c. A 型试纸在 50~150 °C 范围内的响应时间; d. B 型试纸在 50~150 °C 范围内的响应时间

整套装置长度限制,试验时仅将测温短节置于干燥箱内,通过干燥箱控制按键设定不同的温度及保持时间,完成对测温装置的试验.室内试验装置及测温短节实物照片如图 4 所示.

3.1 测温试纸试验

为评估不同测温试纸对测量结果的影响,选取 A 型与 B 型两种常用试纸进行对比分析. A 型试纸测温范围为 37 °C 至 260 °C,温度分辨率为 3 °C 或 6 °C. B 型试纸测温范围为 40 °C 至 150 °C,分辨率为 10 °C. 两种试纸的测温点离散分布,仅 60 °C 和 110 °C 为共同测温点. 图 5a 和图 5b 分别给出了两种试纸在 60 °C 和 110 °C 条件下的显色结果,均可清晰辨识是否达到目标温度. 进一步在 50 °C 至 150 °C 区

间内测试了两种试纸的温度响应时间以评价其响应性能,结果如图 5c 和图 5d 所示,两种试纸均在 6 s 内完成响应. 经多次重复实验,记录显色变化及对应温度读数,并与标准温度值对照计算测量偏差. 结果表明,两种试纸在测量灵敏度与稳定性方面表现相近,但 A 型试纸在测温范围与温度分辨率上具有显著优势,更适用于井下复杂环境下的温度监测. 因此,选用 A 型试纸作为测温试纸,该随钻测温装置可测量 37 °C 至 260 °C 范围内的温度,其中 37 °C 至 65 °C 区间分辨率为 3 °C,65 °C 至 260 °C 区间分辨率为 6 °C.

3.2 测温特性试验

为验证随钻测温装置的测量特性,在 37 °C 至

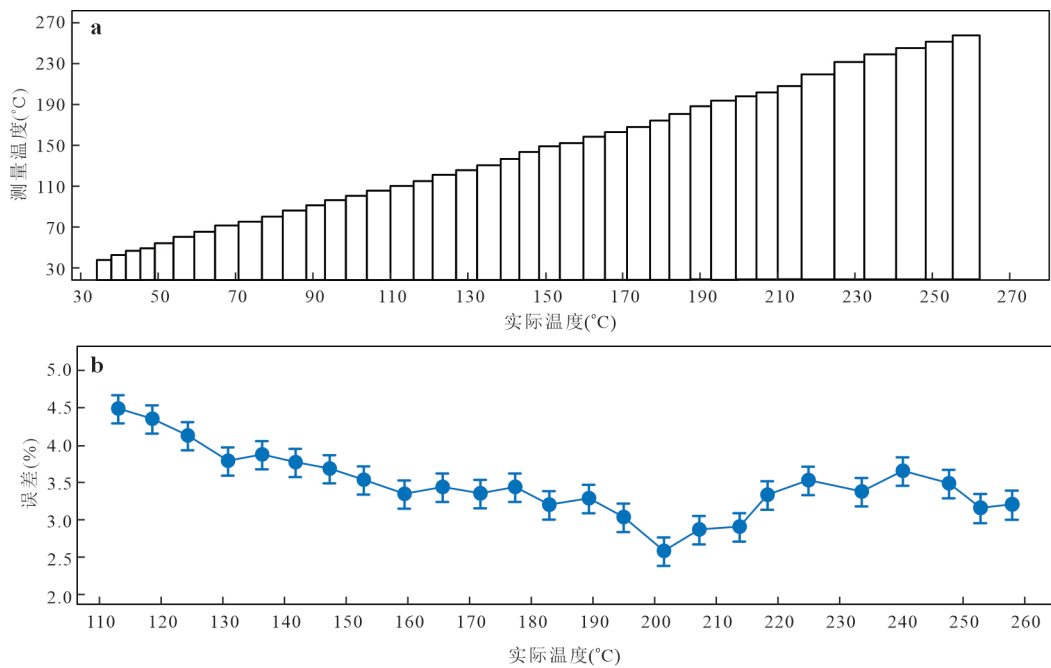


图 6 不同温度下的测量结果
Fig. 6 Measurement results at different temperatures
a. 不同温度下的测温结果对比图; b. 测量误差曲线图

260 °C范围内开展了温度测量试验,并对测量结果及其误差进行了系统分析. 试验过程中,每个设定温度点均执行10次独立测量,选取平均值作为有效测量值. 鉴于目标应用场景集中于中高温地热井环境,低温段温差较小且试纸的显色阶梯会放大误差百分比,影响整体误差评价的客观性,故将110 °C以上区间作为误差分析范围. 图6a和图6b的结果表明,随钻测温装置在整个试验温区内的测量误差均低于5%,且误差随温度升高呈现先下降后上升的趋势,这主要归因于测温试纸基于离散温度点显色. 在110 °C至约200 °C区间,各显色点温度间隔相对均匀,随着温度升高,相对误差逐渐减小. 在200 °C以上区间,相邻可用显色温度段间隔显著增大,导致读取温度时的离散误差增大,进而使整体误差上升.

3.3 高温动态响应时间试验

为验证装置在高温工况下的动态响应时间,研究选取150 °C和200 °C两组典型高温进行恒温试验. 如图7a、7b所示试验结果可知,在升至两个目标温度点的过程中,装置均需约30 min达到稳定测量状态. 该响应时间主要源于外部环境热量需通过热传导进入装置内部,随后测温试纸才能准确响应. 在实际井下随钻测温应用中,装置随绳索取心钻具内管总成下放过程耗时较长,其温度已在此过程中

逐步升高,因此到达孔底时,装置与孔底高温环境达到热平衡所需时间远少于30 min. 同时,孔底取心作业持续时间通常超过30 min,因此该装置在井下应用时能够充分达到热平衡并进行有效温度测量,其动态响应性能满足实际工程需求.

3.4 测温装置长期稳定性试验

随钻测温装置的提取与下放频率与取心作业同步,其在井下滞留时间通常较长. 为评估装置在长期高温工况下的测量稳定性,选取150 °C和200 °C两种典型温度,在恒温条件下开展了72 h耐久性试验. 每组试验持续恒温加热72 h,分别于0 h、12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h记录测温读数,以观测测量值随时间的变化. 图8的试验结果表明,72 h内各时间点的测量读数保持稳定. 由此可见,该随钻测温装置在长期高温工况下具有优异的稳定性与可靠性.

3.5 同类技术对比分析

为评估测温装置在高温地质钻探中的适用性,从测温范围、分辨率及结构特点等方面,与现有典型高温测温技术进行了对比分析,结果如表1所示. 现有高温井下测温技术主要包括机械式无源测温、电子式随钻测温 and 光纤分布式测温3类. 机械式测温方法具有结构简单、无需供电、耐温能力较强等优点. 其中,毛细管/熔点阈值式测温范围可达70~

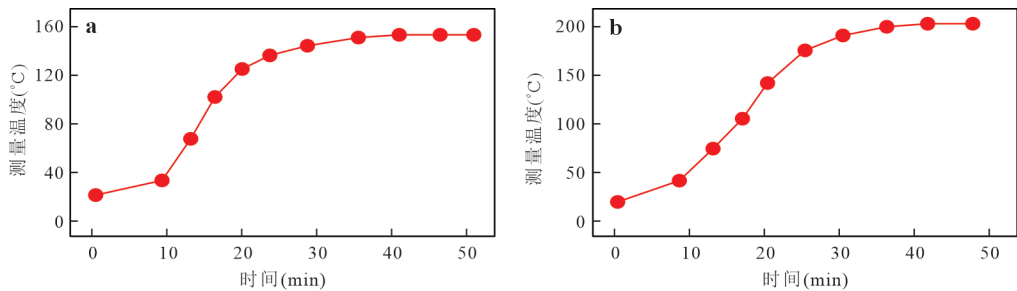


图 7 高温动态响应时间试验结果

Fig. 7 High-temperature dynamic response test results

a. 150℃下的测量响应时间曲线; b. 200℃下的测量响应时间曲线.

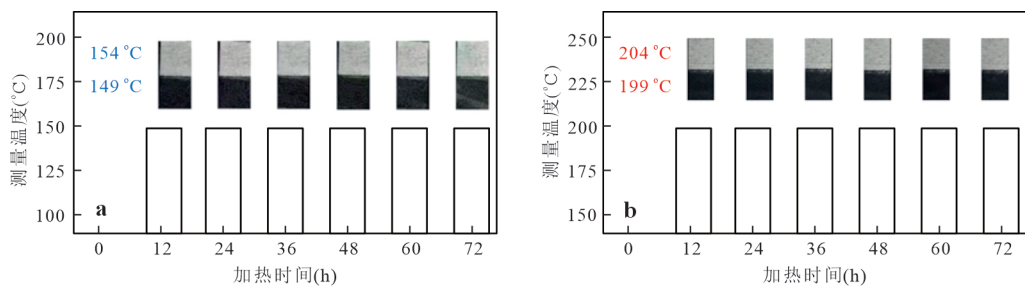


图 8 测温长期稳定性试验结果

Fig. 8 Results of long-term temperature-measurement stability tests

a. 150℃下的长期稳定性试验结果; b. 200℃下的长期稳定性试验结果

表 1 高温井下测温技术对比分析

Table 1 Comparative analysis of high-temperature downhole temperature measurement technologies			
技术类型	测温能力	分辨率	装置特点
毛细管/熔点阈值式机械测温	70~630℃	30~117℃	可测超高温、结构简单,离散点温度测量,分辨率极低
液体膨胀机械温度计	范围 350℃	2℃	分辨率较高,但利用水银测温有剧毒,现已基本淘汰
双金属式温度记录仪	0~470℃	1℃	可测超高温,分辨率较高,但尺寸过大,不适用于小口径及狗腿度较高的钻孔
耐高温随钻测温系统	高温元件式:≤200℃	0.05℃	分辨率高,但电子系统存在耐温上限,高温井下无法使用
	金属保温瓶式:300℃/6 h内	0.5℃	分辨率高,但仅能在有限时间内使用,超时仪器温度将上升,损坏随钻测量系统
光纤 DTS 分布式测温	300℃	0.01℃	耐高温,分辨率极高,随钻领域无使用,多用于完孔以后的测井
本文测温装置	37~260℃	3~6℃	适用于高温,体积小,适用于小口径钻进,但分辨率较低

630℃,分辨率仅为30~117℃,更适用于温度阈值判断.液体膨胀式机械温度计最高测温范围约350℃,分辨率约2℃,但多为单点测量,且含汞介质存在安全与环境风险.双金属式温度记录仪可在0~470℃范围内工作,分辨率约1℃,然而其装置尺寸较大,在小口径及高狗腿度钻孔中的应用受到一定限制.

电子式随钻测温系统与光纤分布式测温具有更高的测温分辨率,高温元件式随钻测温系统分辨率可达0.05℃,金属保温瓶式系统为0.1~0.5℃,光纤DTS可达0.01℃.但上述技术在高温地质钻探中

仍受限于电子元件耐温上限、隔热保护时间、井下供电及随钻布设条件等因素.本文提出的测温装置测温范围为37~260℃,分辨率为3~6℃,虽然分辨率低于电子式与光纤式系统,但具备无源、小型化、结构简单、耐高温和易于布设等特点,更适用于小口径高温地质钻探中的温度阈值识别与辅助测温.

4 现场试验

为检验测温装置在实际工况下的性能,借助某公司试验基地开展了现场试验.鉴于超高温井试验

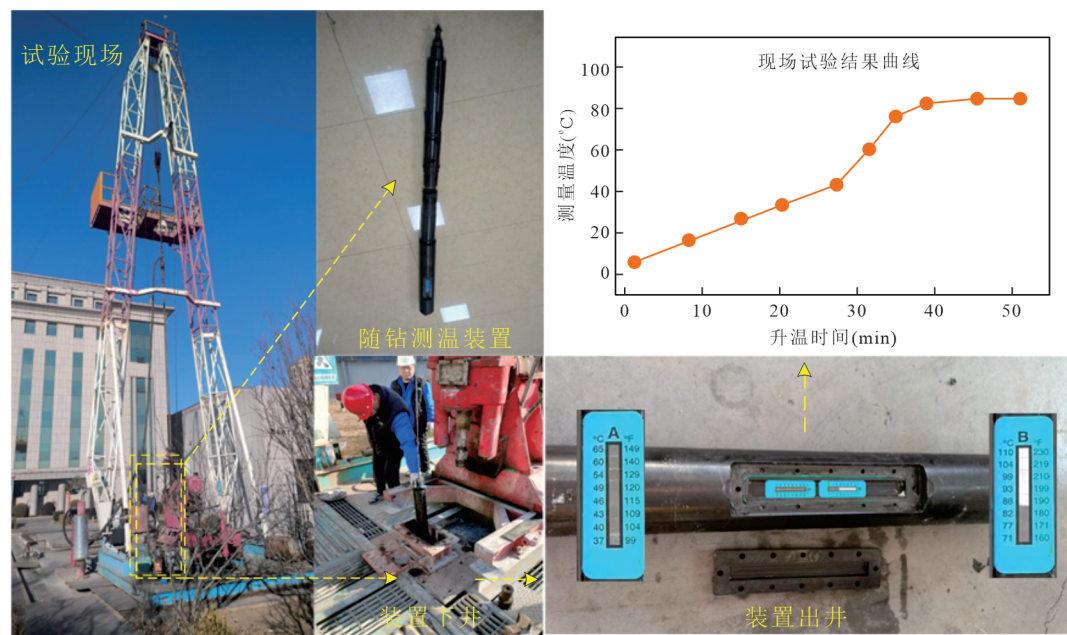


图9 现场试验结果
Fig.9 Field test results

条件难以获取,现场通过人工加热方式升高孔底温度以模拟井下高温环境,同时考核装置的整体装配与工况适应性.试验过程中,设置不同时间间隔将随钻测温装置通过绳索提至地表进行数据读取.图9的现场试验结果表明,测量温度随时间增加逐渐上升,但受气温较低及初期环境散热影响,前期升温速率较缓,中后期升温速率逐渐增大.最终测得孔底温度为82℃,与温度计实测的井底泥浆温度相差2℃.由此可见,该随钻测温装置在实际应用中具备可行性.

5 结论

本文提出了一种机械式井下随钻测温装置,其测温范围为37℃至260℃,其中37℃至65℃区间分辨率为3℃,65℃至260℃区间分辨率为6℃,全量程测量误差均低于5%.装置在高温工况下约30 min达到热平衡,72 h连续恒温试验中测量稳定性优异.现场试验测得孔底温度82℃,与温度计实测值相差2℃,验证了装置的实际可行性.

本文创新点主要有两个方面.第一,提出了一种基于热敏覆盖层不可逆显色原理的机械式测温方法,装置不含任何电子元器件,从原理上规避了电子系统在超高温环境下易失效的问题,因此能够在超高温井下长期可靠测量井底温度.第二,将测温装置集成于绳索取心钻具内管总成,实现了测温

与取心作业的同步进行,无需单独下放测量工具,不增加现场额外工作量,不影响钻探效率,并且能够在多个取心回次连续获取井底温度数据.

然而,目前装置仅能记录单次最高温度,后续将通过多段触发式试纸设计实现多温度点记录.同时该装置的测温上限与分辨率有待提升,未来将研发耐更高温度的感温材料,扩展量程并细化温度识别区间.此外,未来还需推进装置小型化以增强对小直径井眼的适应性,并围绕机械与电子混合测温、随钻实时监测及极端工况适应性等方向持续优化,以提升装置在特深井钻探中的应用能力.

References

Andarawis, E.A., Lin, D., Popp, J., et al., 2022. A MEMS Gyroscope for Reliable Long Duration Measurement While Drilling at 300 °C. GE Global Research, Niskayuna, New York. <https://doi.org/10.2172/1879864>

Chi, M., Chen, J.B., Wang, H.P., et al., 2025. Application of Semi-Permanent Optical Fiber Outside Tubing in Offshore Heavy Oil Steam Huff and Puff Thermal Recovery Block. *Well Logging Technology*, 49(3): 481–486 (in Chinese with English abstract).

Fan, S., Jiang, G.C., Yi, H., et al., 2023. Research and Application of High-Temperature Resistant Plugging, Wall-Fixing and Anti-Collapse Water-Based Drilling Fluid. *Drilling & Production Technology*, 46(2): 146–152 (in Chinese with English abstract).

- Han, W. K., Zhao, J. F., Liu, Z. Q., et al., 2026. Review of Temperature Measurement Methods Based on Thermoelectric Sensors and Current Status of Their Application in Intelligent Cutting Tools. *Journal of Mechanical Engineering*, 62(2): 17—34 (in Chinese with English abstract).
- Konowski, M. R., Nermoen, A., Thomas, P. J., et al., 2024. Borehole Optical Fibre Distributed Temperature Sensing Vs. Manual Temperature Logging for Geothermal Condition Assessment: Results of the OptiSGE Project. *Sensors*, 24(23): 7419. <https://doi.org/10.3390/s24237419>
- Lao, J.J., Zhang, N.X., Wang, T.C., et al., 2025. Research on High - Precision Cu/CuNi Flexible Thermocouple Temperature Sensor. *Micronanoelectronic Technology*, 62(11):119—125 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.J., Wu, X.L., Zhang, Z.Q., et al., 2025. Development and Application of Batch Conversion Software for DTS Distributed Optical Fiber Temperature Logging Data. *Well Testing*, 34(4):72—78 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Li, X.Y., Zhou, H.J., et al., 2025. Development Status and Trend Analysis of Geological Core Drilling Technology and Equipment in China During the 14th Five - Year Plan Period. *Drilling Engineering*, 52(6):1—14 (in Chinese with English abstract).
- Lillo, M., Suárez, F., Hausner, M. B., et al., 2022. Extension of Duplexed Single - Ended Distributed Temperature Sensing Calibration Algorithms and Their Application in Geothermal Systems. *Sensors*, 22(9): 3319. <https://doi.org/10.3390/s22093319>
- Liu, Q. X., 2024. Application of Real - Time Fiber Optic Transmission Technology for Dynamic Monitoring of Geothermal Temperature. *Urban Geology*, 19(3): 275—280 (in Chinese with English abstract).
- Prauzek, M., Kucova, T., Konecny, J., et al., 2023. IoT Sensor Challenges for Geothermal Energy Installations Monitoring: a Survey. *Sensors*, 23(12): 5577. <https://doi.org/10.3390/s23125577>
- Ren, C. Y., Zhang, K. L., 2025. Development of High-Precision Infrared Radiation Sensor. *Acta Photonica Sinica*, 54(11): 1154311 (in Chinese with English abstract).
- Sugiura, J., Jones, S., 2025. High-Temperature Measurement -While-Drilling Tools for Oil/Gas and Geothermal Drilling: Current Trends, Future Directions and Potential Impacts. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Richardson: Society of Petroleum Engineers, SPE 227910-MS. <https://doi.org/10.2118/227910-ms>
- Sun, L. Y., Pei, R., Liu, Y. J., et al., 2022. Design of Electrolyte Temperature Monitoring System Based on STM32 in LabVIEW Environment. *Instrument Technique and Sensor*(10): 93—98 (in Chinese with English abstract).
- Vedum, J., Røed, M. H., Kolberg, S., et al., 2017. Development of a Novel Logging Tool for 450°C Geothermal Wells. *Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, and CICMT)*, 2017: 011—019. <https://doi.org/10.4071/2380-4491.2017.hiten.11>
- Wu, C. P., Wang, Y. T., Chen, C. H., 2025. Design of High - Precision Temperature Isolation Transmitter System Based on Thermocouples. *Instrument Technique and Sensor* (12): 45—50 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.H., Feng, H.T., Xie, J.G., et al., 2025. Development of High-Temperature Drilling Fluid for Drilling Complex Formations in Medium-Deep Geothermal Wells. *Drilling Engineering*, 52(5):61—66 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Chu, F., Shen, M., et al., 2025. Temperature Monitoring and Optimization Technology of Coal Conveying System Based on Distributed Optical Fiber Temperature Measurement. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 38(12):2272—2278 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H.J., Wang, C.S., Yang, X.Z., et al., 2025. Key Technology Progress and Scientific Significance of 10 000 m Ultra-Deep Drilling in Well Shendi Take - 1. *Petroleum Exploration and Development*, 52(5): 1180—1188 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Sun, J. S., Huang, X. B., et al., 2025. Research Progress and Prospect of Cooling Technology for Drilling Fluid in Deep and Ultra-Deep Wells. *Chinese Journal of Engineering*, 47(6): 1161—1174 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Zheng, G.M., Zou, X.J., 2025. Optical Fiber Monitoring Algorithm for Two-Phase Medium Interface in Cavity - Making Wells. *Science Technology and Engineering*, 25(10):4102—4108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Ran, H.Q., Zhang, Y., et al., 2024. Technical Status and Development Suggestions of Ultra-Deep Scientific Drilling Equipment. *Drilling Engineering*, 51(4): 14—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. F., Wang, X., 2026. Design of a Hydrographic Survey Data Acquisition and Transmission System Based on STM32 Microcontroller. *Instrumentation Technology*(1): 35—37, 60 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 迟名,陈建波,王海朋,等,2025.油管外半永置式光纤在海上稠油蒸汽吞吐热采区块的应用.测井技术,49(3):481—486.
- 范胜,蒋官澄,易浩,等,2023.抗高温封堵固壁防塌水基钻井液

- 研究与应用. 钻采工艺, 46(2):146—152.
- 韩文康, 赵金富, 刘战强, 等, 2026. 基于热电式传感器的测温方法及其在智能刀具中的应用现状综述. 机械工程学报, 1—18[2026-01-28].
- 劳钧杰, 张柠溪, 王田晨, 等, 2025. 高精度 Cu/CuNi 柔性热电偶温度传感器研究. 微纳电子技术, 62(11):119—125.
- 李家骏, 吴晓龙, 张子前, 等, 2025. DTS 分布式光纤温度测井数据批量转换软件开发与应用. 油气井测试, 34(4):72—78.
- 梁健, 李小洋, 周红军, 等, 2025. “十四五”我国地质岩心钻探技术装备发展现状及趋势分析. 钻探工程, 52(6): 1—14.
- 刘清晓, 2024. 面向地热温度动态监测的光纤实时传输技术应用研究. 城市地质, 19(3):275—280.
- 任传运, 张凯临, 2025. 高精度红外辐射传感器研制. 光子学报, 54(11):140—150.
- 孙伦业, 裴瑞, 刘永杰, 等, 2022. LabVIEW 环境下基于 STM32 的电解液温度监测系统. 仪表技术与传感器, (10): 93—98.
- 吴传平, 王玉涛, 陈春华, 2025. 基于热电偶的高精度温度隔离变送系统的设计. 仪表技术与传感器, (12):45—50.
- 吴景华, 冯海涛, 谢俊革, 等, 2025. 中深地热井复杂地层钻进高温钻井液研制. 钻探工程, 52(5):61—66.
- 徐豪, 储峰, 沈萌, 等, 2025. 基于分布式光纤测温的输煤系统温度监测及优化技术. 传感技术学报, 38(12):2272—2278.
- 杨海军, 王春生, 杨宪彰, 等, 2025. 深地塔科 1 井万米特深井钻探关键技术进展与科学意义. 石油勘探与开发, 52(5):1180—1188.
- 张昊, 郑恭明, 邹先坚, 2025. 造腔井两相介质界面光纤监测算法. 科学技术与工程, 25(10):4102—4108.
- 张正, 冉恒谦, 张毅, 等, 2024. 特深科学钻探装备技术现状与发展建议. 钻探工程, 51(4):14—22.
- 章超, 孙金声, 黄贤斌, 等, 2025. 深井超深井钻井液降温技术研究进展及展望. 工程科学学报, 47(6):1161—1174.
- 赵传锋, 王星, 2026. 基于 STM32 的海道测量数据采集与传输系统设计. 仪表技术, (1):35—37.