| 第33卷 第2期(338~344) | 中 国 地 震                      | Vol. 33 No. 2 |
|-------------------|------------------------------|---------------|
| 2017年6月           | EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA | Jun. 2017     |

胡哲、蒋延林、张秀霞等,2017,地电观测深井电缆的研制,中国地震,33(2),338~344。

# 地电观测深井电缆的研制

胡哲<sup>1)</sup> 蒋延林<sup>2)</sup> 张秀霞<sup>3)</sup> 赵卫红<sup>2)</sup> 杨恒勇<sup>4)</sup> 王福才<sup>2)</sup> 张骞<sup>2)</sup>

1)中国地震局地壳应力研究所,北京市海淀区西三旗安宁庄1号 100085

2) 江苏省高邮地震台, 江苏高邮 225601

3) 江苏省地震局, 南京 210014

4) 江苏华能电缆股份有限公司, 江苏高邮 225601

摘要 井下地电观测是在地电观测中规避地表环境干扰的手段之一。针对井下地电观测 装置长期稳定性的迫切需求,本文介绍了适用于井下地电观测中室外线路的内部结构、制作工 艺、制作材料和可靠性检测结果等。本文所述型号的电缆能适用于开展井下数百米深度的地电 观测,可保障井下地电观测装置的长期稳定性,是今后发展井下地电观测的关键技术。

关键词: 地电观测 井下电缆结构 高抗拉性 防水、绝缘 长期稳定性 [文章编号] 1001-4683(2017)02-0338-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

# 0 引言

地电观测深井电缆是承载机械负荷进行地电阻率测量的专用电缆。地电阻率观测是地 震监测的主要方法之一,在地震监测预测中发挥着重要作用。1966年邢台地震后,我国开始 开展地电阻率观测,50多年来积累了大量的观测数据和科学研究成果,在方法理论、观测技 术、观测数据应用等方面取得了很大进展(钱复业等,1982;钱家栋等,1985;桂燮泰等,1989; 杜学彬,2010;Ma,2002;Lu et al,2004;陈大元等,1983;陆阳泉等,1990;赵家骝等,1980),在 地震监测预报中取得了实效(叶青等,2005;杜学彬等,2004)。目前,国内的地电阻率观测多 采用对称四极法,其供电电极和测量电极的埋深为 2~3m 左右,供电极距多为 1000~2000m, 多方位布极,观测装置占地面积大,需要环境保护区的范围达 2~5km<sup>2</sup>,较大的保护区使部分 地电台站观测环境保护的任务越来越重(杜学彬等,2006;钱家栋等,2004)。随着地方经济 建设的快速发展,地电观测环境逐渐遭到破坏,各种干扰严重影响了地电阻率观测的质量。 故要将地电阻率的观测装置埋设在地下,以规避或弱化地表金属管线/网、灌溉、地表杂散电 流等环境干扰(苏莺声等,1982;聂永安等,2010;解滔等,2012a、2012b;王兰炜等,2015;毛先 进等,2014)。目前,国内已有一些台站采用了井下地电阻率观测方案,利用钻井的方式将观

<sup>[</sup>收稿日期] 2017-05-06; [修定日期] 2017-06-01

<sup>[</sup>项目类别] 2015年中国地震局星火计划(XH16015)资助

<sup>[</sup>作者简介] 胡哲,男,1983 年生,助理研究员,主要从事地震前兆电磁观测技术研究,E-mail: huzhe008@139.com 蒋延林,通讯作者,男,1960 年生,正研级高工,主要从事电磁监测研究。E-mail: 779854091@qq.com

339

测电极埋到 100~200m 深处,并取得了较好的效果(刘昌谋等,1994;刘允秀,1985;康云生等,2013)。但是,地电阻率井下观测仍存在一些技术问题:①因地电观测不能使用金属装置,目前采用井下绳索吊装和固定电极,再回填土质,这样会在长期观测中造成电极位置的垂向位移,使观测装置不稳定。②如埋入深井中的电缆使得在对地绝缘性进行检查时需在电极处断开电极与连接电缆,这在实际中无法实现。③电缆在井下直接与电极(大地)连通,在高压下液体会顺着导电芯线与绝缘层间向电缆内部渗透,造成电缆导线的绝缘度下降。这些问题是井下地电阻率观测中亟待解决的问题,研制一种高抗拉强度、高压下能场保持高绝缘性的深井地电专用电缆是发展井下地电阻率观测技术的瓶颈问题之一。

# 1 室外线路的技术要求

在地电阻率观测中,为保障地电阻率观测数据长期可靠,室外线路对地绝缘性应符合以 下技术要求(杜学彬等,2006;钱家栋等,2009):

①供电导线漏电电流与供电电流的比值不应大于 0.1%,供电导线漏电电位差的绝对值与人工电位差的比值不应大于 0.5%。

②测量导线对地绝缘电阻不应小于 5MΩ。

上述对地表观测装置室外线路的技术要求同样适用于井下地电阻率观测。另一方面, 由于井下地电阻率观测一般井深在100m以上,电极植入井中联通电极的井下线路将被回填 埋设,这样就需要井下线路还应满足以下技术要求:

①井下线路应采用铠装电缆,在电极自重为 50kg 范围内,拉断力大于 2.0 倍电极重量, 并且拉断力不小于 8kN。其目的是为了避免电极自重下移导致的地电阻率观测装置的变化 影响观测装置的长期稳定性。

②一般来说,地下数 10 米至百米左右深度的浅层介质是饱水的,铠装电缆的芯线与铠(即金属屏蔽层)之间的绝缘电阻应大于 1000MΩ/km,浸入水中时的绝缘电阻大于 1000MΩ/km。这样可保障金属铠层对地的绝缘电阻足够大,而不至于影响地下介质电阻率 观测数据的真实性。

③在地电阻率观测中,需要定期检测室外线路对地介质的绝缘电阻和回路电阻(即接地 电阻定期测试的要求),这样需要在井下电缆与电极的接头处密封金属铠层,通过测量金属 铠层对地绝缘性检测井下线路的测量线、供电线对地的绝缘性,用于检测观测装置的长期稳 定性。

④测量导线、供电导线的线路电阻要小于 10Ω/km,并要求埋入地下深处的导线须适应 温压 100℃、30MPa 的防水抗压的物理环境。

上述对室外线路的技术要求,应能满足20年以上的连续深井地电阻率观测。

## 2 井下电缆设计

为使井下地电阻率观测的室外线路的技术指标满足上述技术要求,作者与江苏省高邮 市江苏华能电缆股份有限公司合作,从一个全新角度对井下电缆的结构进行了设计、研制, 生产了井下地电观测专用的承载防水电缆(WBUPF型电缆;其中符号W为承荷探测电缆 (地电观测深井电缆),B为改性聚丙烯材料,U为弹性体护套材料,P为绝缘检测金属层,F

2 期

СМҮК

#### 2.1 电缆结构

新型井下电缆的结构设计如图 1。电缆结构采用两芯导线(即图中导体)加密封层、绝缘检测层、阻水层、2股高抗拉纤维绳和抗压外护层。



图 1 电缆结构

2芯导线:用于供电导线和测量导线,与金属电极焊接,链接到观测室内的测量仪器。导 线电阻为 4.61Ω/km,满足线路电阻小于 10Ω/km 的技术要求。

绝缘层:电缆中具有耐电压特定功能的绝缘材料组件,用于增加导线的电绝缘性。

密封层:在缆芯外面的非金属包覆层,用于密封绞合缆芯的间隙,阻挡水从缆芯间隙进 入绝缘检测层。

绝缘检测层:包裹在密封层上的金属材料,用于检测供电、测量导线对地的绝缘性。只 要本绝缘层对地绝缘,就可以保障导线线路的绝缘性。

阻水层:绝缘检测层上非金属阻水包裹层,可阻止水进入绝缘检测层,与密封层在井下 一端熔为一体。

抗拉纤维绳: 芳纶纤维编织成的电缆承荷层, 电缆承载破断拉力大于 8000N。用于增大 电缆的抗拉强度, 保障电极在深井中的位置, 使观测装置不宜发生变化。

抗压外护层:包裹在电缆最外层的非金属护套材料,增加电缆的抗压程度。

2.2 电缆选材

对深井电缆的选材,既要充分考虑到导体部分的导电性能,又要兼顾到绝缘材料的绝缘 性能以及长期耐化学腐蚀性能。同时,还要考虑到承载材料的高强度抗拉、耐压性能以及护 套材料的高韧及耐磨性能。以下是 WBUPF 电缆制造材料的详细参数。

对于导线芯线及地电检测层材料,选用了含铜量大于 99.95%的优质无氧铜杆,确保了 导体及地电检测层的良好导电性能。绝缘层材料选用的是改性聚丙烯绝缘料,其最高耐温 可达 150℃,而且改性聚丙烯具有很好的耐化学性能,能耐酸、耐碱、耐油、耐极性溶剂等。改 性聚丙烯的主要技术参数见表 1(王卫东,2011;徐应麟,2002)。非金属承载(抗拉)材料,选 用的是高模量的芳纶纤维,具有超高抗拉强度、耐高温、耐酸耐碱、重量轻、绝缘、抗老化、生 命周期长等优良性能。护套材料,选用的是聚醚型弹性体护套料,其具优良的耐磨、抗撕裂

340

СМҮК

# 性能。

# 2.3 电缆制造工艺

除严格选材外,在电缆的制造过程 中还要有细心的工艺设计。导线芯线 采用多根软铜丝绞合而成,并在绞合间 隙填充阻水型导体专用油膏,以达到充 分阻水渗入铜丝的间隙,同时对铜丝抗 氧化起了一定作用。在绝缘层和护套 层的制作中,采用了挤压式挤包形式, 将塑料层紧密地包覆在导体线芯上

| 表 1 改性聚丙烯的主要技术参数     |  |                         |  |  |  |  |
|----------------------|--|-------------------------|--|--|--|--|
| 项目                   | 单位                                     | 指标                      |  |  |  |  |
| 密度                   | $g/cm^3$                               | 0.895~0.915             |  |  |  |  |
| 灰份                   | %                                      | ≤0.04                   |  |  |  |  |
| 熔体流动速度               | g/10min                                | ≤5                      |  |  |  |  |
| 拉伸屈服强度               | MPa                                    | ≥23                     |  |  |  |  |
| 断裂伸长率                | %                                      | ≥200                    |  |  |  |  |
| 相对介电常数(100kHz~1MHz)  |  | $2.24 \sim 2.27$        |  |  |  |  |
| 介质损耗角正切(100kHz~1MHz) |  | ≤0.0005                 |  |  |  |  |
| 体积电阻率                | $\Omega \boldsymbol{\cdot} \mathbf{m}$ | $\geq 1 \times 10^{15}$ |  |  |  |  |

(图 2)。挤压式挤包挤出的塑料层致密度高,绝缘强度可靠,挤包的塑料能嵌入线芯的间隙 中,与导体或线芯紧密结合、无间隙,并且外表面平整光滑。挤塑过程中对各段加工温度也 进行了严格控制(表 2)。

| 4C =   |              |              |              |              |              |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 材料 -   |              |              | 温度/℃         |              |              |
|        | 1 区          | 2 区          | 3 区          | 4 区          | 5 区          |
| 改性聚丙烯  | $195 \pm 10$ | $200 \pm 10$ | $205 \pm 10$ | 210±10       | 220±10       |
| 聚醚型弹性体 | $180 \pm 10$ | 190±10       | $195 \pm 10$ | $200 \pm 10$ | $205 \pm 10$ |

各区的加工温度



图 2 挤压式挤包示意图

检查井下电极装置稳定性的检测层需要与大地绝缘,以使密封层与阻水层形成一个绝缘体,因此在地电检测层井下一端密封制造时,井下一端电缆通过采用高强度阻水密封溶合剂并高温塑化,溶合密封层与井下一端的阻水层。

为确保地电深井观测电极垂直定位精度误差在可控范围内,选用了高强度的芳纶纤维 材料。为了能提供更好的承载力,在制造过程中采用高抗拉纤维在阻水层外编织的方法,这 样用高模量芳纶纤维两股便能承载 8000N 以上的力,芳纶纤维编织时收线张力和放线张力 一般也能控制在 2000N 以上。

表 2

СМҮК

341

33 卷

## 3 电缆可靠性检测

对研制的 WBUPF 电缆样品的可靠性进行物理检测实验。首先对电缆密封性进行了检测。在密封性检测过程中,将制造完工的电缆井下的一端浸入水中 6hr,然后测量地电检测层的绝缘性能,最终检测结果显示,其绝缘电阻大于 1000MΩ/km,满足地电观测的要求。其次,检测中从成品电缆上截取长度不小于电缆外径 20 倍,且不小于 250mm 长度的实验样本,进行承载负荷(抗拉)强度检测(图 3)。由图 3 可见,在测程 0~300kN 的拉力实验机上做破断拉力实验,本电缆的实验结果达 8210N (图 3),其承载负荷有助于固定深埋入井下的电极不会因自重下移或尽可能避免弱化电极下移造成的观测装置变化。



图 3 破断拉力实验曲线

最后,测试了电缆承载的伸长率。将编织好的芳纶纤维绳取样 15m,挂重 50kg,进行垂 直伸长实验。实验时间持续 5 天,结果伸长 15mm;实验 10 天,伸长 20mm;实验 15 天,伸长 22mm;实验 20 天,伸长 23mm;实验 25 天,伸长 23mm。根据此实验结果,可以得出在实验条 件下芳纶纤维绳的伸长率小于 0.2%。若将其应用于地电观测装置上,本电缆能够很好解决 地电深井观测中的电极垂直定位精度问题。

垂直挂重实验后的电缆一端再次浸入水中 6hr,然后测量地电检测层的绝缘性能,最终 检测结果表明,其绝缘电阻仍为 1000MΩ/km,能满足长期地电观测对外线路的电绝缘要求。

# 4 结论

本文针对目前我国井下地电观测的迫切需求,介绍了用于井下地电长期观测的 WBUPF 型号电缆的技术要求、电缆内部结构、制作工艺、制作材料、可靠性检测结果等。从对电缆样 样本的检测结果看,WBUPF 型号电缆适用于井下数百米深的地电观测,能长期(20 年内)保 障地电观测装置的稳定性,对规避地表干扰的井下地电观测有重要意义,有助于地电观测和 地震监测研究的进一步深入。

**MYK** 

### 5 结语

随着观测技术的发展,作为对一种新方法的探索,人们将越来越重视井下地电阻率观测,而如何保障观测系统的长期稳定性,是目前面临的重要课题,井下电缆的研制,为井下观测提供了技术支撑,即室外-井下线路。实验室测试结果表明,该电缆性能满足井下地电阻率观测需求,其各项性能指标达到并超过了"井下地电阻率观测技术指导意见"要求,有效解决了深井电缆绝缘漏电检测、承载重量及抗深井压力等问题。可以预期,将新型抗拉纤维、高强度阻水密封溶合剂、耐磨抗撕裂材料等新材料应用于地电观测深井电缆的制作,并结合电极耐用性问题的解决,可以有效地保证装置系统的长期稳定性。

#### 参考文献

陈大元、陈峰、王丽华,1983,单轴压力下岩石电阻率的研究-电阻率的各向异性,地球物理学报,26(增刊),783~792。 杜学彬, 2010, 在地震预报中的两类视电阻率变化,中国科学:D辑,40(10),1321~1330。 杜学彬、席继楼、谭大诚等,2006,地震台站建设规范(DB/T18.2-2006),北京:地震出版社。 杜学彬、叶青, 2004, 2003年民乐-山丹地震前山丹地电中短期-短期前兆变化和无临震显示问题, 西北地震学报, 26(4), 334~338 杜学彬、赵家骝、谭大诚等,2006,地震台站建设规范(DB/T18.1-2006),北京:地震出版社。 桂燮泰、关华平、戴经安,1989, 唐山、松潘地震前视电阻率短临异常图象重现性, 西北地震学报,11(4),71~74。 解滔、杜学彬、陈军营等, 2012a, 井下地电阻率观测中地表电流干扰影响的计算, 地球物理学进展, 27(1), 112~121。 解滔、杜学彬、郑国磊等, 2012b,水平两层均匀介质中井下电阻率观测信噪比的理论计算, 西北地震学报, 34(1), 18~22。 康云牛、安海静、马可兴等, 2013, 天水地电阻率地表与井下多种观测方式的实验分析, 地震工程学报, 35(1), 190~195。 刘昌谋、桂燮泰、柴建勇等,1994,河源地电台全空间地电阻率实验,华南地震,13(3),40~45。 刘允秀,1985,二层剖面地电阻率测量的最佳电极距选择,华南地震,5(4),66~70。 陆阳泉、王玉祥、温新民,1990,受压岩(土)体地电阻率变化的原地实验及大地震前后地电异常的初步分析,马瑾、王绳 祖编,第二届构造物理学术讨论会文集,158~168,北京:地震出版社。 毛先进、杨玲英、钱家栋,2014,水平层状介质中深埋装置系统地电阻率影响系数特征研究,地震学报,36(4),678~685。 聂永安、巴振宁、聂瑶,2010,深埋电极的地电阻率观测研究,地震学报,32(1),33~40。 钱复业、赵玉林、于谋明等, 1982, 地震前地电阻率的异常变化, 中国科学: B辑, (9), 831~839。 钱家栋、陈有发、金安忠, 1985, 视电阻率法在地震预报中的应用, 北京:地震出版社。 钱家栋、杜学彬、蔡晋安等,2009,地震地电观测方法(DB/33.1-2009),北京:地震出版社。 苏莺声、王邦本、夏良苗等,1982,井下电极观测地电阻率排除地面千扰的实验,地震学报,4(3),274~276。 王兰炜、张宇、张世中等,2015,我国井下地电阻率观测技术现状分析,地震地磁观测与研究,36(2),95~102。 王卫东主编,2011,电缆工艺技术原理及应用,北京:机械工业出版社。 徐应麟主编,2002,电线电缆手册2,北京:机械工业出版社。 叶青、杜学彬、陈军营等, 2005, 2003年大姚和民乐-山丹地震1年尺度预测, 地震研究, 28(3), 226~230。 赵家骝、陈才军, 1980, 地电测量中的干扰和抑制, 西北地震学报, 2(3), 31~38。 Chen D Y, Chen F, Wang L H, 1983, Study of rock resistivity under uniaxial press-Anisotropy of resistivity, Chinese J Geophys, **26**(Sup),783~792. Du X B, 2011, Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction, Sci China Earth Sci, 54(1), 145~156. doi: 10.1007/s11430-010-4031-y. Gui X T, Guan H P, Dai J A, 1989, The short-term and immediate anomalous pattern recurrences of the apparent resistivity before the Tangshan and Songpan earthquakes of 1976, Northwestern Seismological Journal, 11(4), 71~74.

Lu J, Xue S Z, Qian F Y, et al, 2004, Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in

2 期

МҮК

 $\label{eq:Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array, Phys Earth Planet Inter, 145 (2004), 87 \sim 97.$ 

Lu Y Q, Wang Y X, Wen X M, 1990, In situ experiment of earth resistivity variation of pressed rocks (soils) and the primary analysis of geo-electrical anomaly before and after large earthquake, Collections of the Second Workshop of Tectonophysics, Beijing: Seismological Press, 158~168.

Ma Q Zh, 2002, The boundary element method for 3-D resistivity modeling in layered earth, Geophysics, 67(2), 601~617.

Mao X J, Yang L Y, Qian J D, 2014, Characteristics of the influence coefficient in the cases of deeply-buried configurations for geoelectrical resistivity observation [J]. Acta Seismologica Sinica, 36(4),678~685.

Qian F Y, Zhao Y L, Yu M M, et al, 1982, Geo-resistivity anomaly before earthquake, Sci China Ser B, (9), 831~839.

Qian J D, Chen Y F, Jin A Z, The apparent resistivity method used in earthquake prediction, Beijing: Seismological Press, 83~103.

Wang Lanwei, Zhang Yu, Zhang Shizhong, et al, 2015, The status of deep-well geo-electrical resistivity observation in China, Seismic Geomagnetic Observation and Research, **36**(2),95~102.

Zhao J L, Chen C J, 1980, Interference and interference suppression in the geo-electric measurement, Northwestern Seismological Journal, 2(3), 31~38.

## A Deep Underground Cable for Geoelectric Observation

Hu Zhe<sup>1)</sup> Jiang Yanlin<sup>2)</sup> Zhang xiuxia<sup>3)</sup> Zhao Weihong<sup>2)</sup> Yang Hengyong<sup>4)</sup> Wang Fucai<sup>2)</sup> Zhang Qian<sup>2)</sup>

1) Institude of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

2) Gaoyou Seismological Station, Gaoyou 225601, Jiangsu, China

3) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjng 210014, China

4) Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou 225601, Jiangsu, China

**Abstract** Deep underground observation is one of the future geoelectric observation methods for earthquake monitoring and prediction in China. This method is good for overcoming and reducing surface environment interference. In response to the demand of long-term stability of observation configuration in deep underground observation, this paper introduces a deep underground cable that involves the cable internal structure, making processes and preferred materials as well as the reliability test results. This type of cables can be used in geoelectric observation in deep underground. This cable can make sure the long-term stability of geoelectric observation configuration in deep underground, and also is a key technology to further continue the geoelectric observation in underground in China.

Key words: Geoelectric observation; Cable structure; High tensile strength; Waterproof and insulation; Long-term stability

344

СМҮК