

5137

5/5311

71783⁴

测井电缆及其使用

〔苏〕П. А. 戈尔平科著

7
311

石油工业出版社

测井电缆及其使用

〔苏〕Л. А. 戈尔平科 著

葛起庭 译

石油工业出版社

内 容 提 要

电缆是从事地球物理工作的关键性装备之一，然而有关这个专题的著书确为罕见。本书从使用者的角度出发，首先对测井电缆的结构、电气性能和机械性能进行了详细的介绍，而后就测井电缆的使用、维护和可靠性的计算作了系统的讨论。

本书供从事石油（天然气）、煤田、水文测井工作的技术人员和操作工人阅读，也可供测井电缆制造厂家的有关人员参考。

Л. А. ГОРБЕНКО

КАРОТАЖНЫЕ КАБЕЛИ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Изд. 2, перераб.

Москва «Недра» 1978

*

测井电缆及其使用

[苏] Л. А. 戈尔平科 著

葛起庭 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 $1/32$ ；开本 $5\frac{3}{4}$ ；印张 126 千字 印数 1,601-2,800

1981 年 2 月北京第 1 版 1982 年 8 月北京第 2 次印刷

书号：15037-2248 定价：0.49 元

目 录

第一章 概论	1
第一节 测井电缆的使用现状和前景	1
第二节 在苏联不同含油气地区中使用的电缆的选择	2
第三节 井内的泥浆	3
第四节 测井电缆在密封井口的井内的使用特点	5
第五节 对测井电缆的要求	6
第六节 测井电缆的分类和标志	8
第七节 电缆的改进方向	10
第二章 测井电缆的结构	12
第一节 电缆的结构元件	12
第二节 铠装电缆的结构	20
第三节 射频电缆	26
第四节 KTO-1、KTO-2、KTIII-0.3、KTIII-2和KTIII-4 型软护套和编织的三芯电缆	27
第五节 深井电缆(10~12公里)	29
第六节 探测电缆	30
第三章 测井电缆的电气参数	31
第一节 电缆导电线芯和铠装层的电阻	31
第二节 电缆线芯的绝缘电阻	38
第三节 电缆的电容	49
第四节 电缆的电感	50
第五节 电缆线路的二次参数	53
第六节 电磁能在电缆中的传播速度	62
第四章 测井电缆的机械性能	65
第一节 对电缆机械性能的要求	65
第二节 铠装电缆的强度	66
第三节 铠装电缆的极限长度	77

第四节	电缆的安全系数	78
第五节	提高电缆耐磨性和强度的措施	80
第五章	测井电缆的使用	82
第一节	电缆提升设备	82
第二节	电缆下井装置	86
第三节	电缆在绞车滚筒上的固定	94
第四节	电缆在使用前的准备工作	95
第五节	电缆在井内的负荷	97
第六节	电缆在井内的允许移动速度	104
第七节	电缆在井内的伸长	106
第八节	电缆的深度标记	115
第九节	电缆在密封井口的井内的使用	121
第十节	测井电缆的研制和应用的技术经济分析	125
第十一节	电缆的缺陷和故障	127
第十二节	电缆的寿命	135
第十三节	电缆的可靠性	136
第十四节	电缆故障点的测定	146
第十五节	电缆线芯和绝缘层的修理	155
第十六节	组合电缆的使用	165
第十七节	电缆卡井及其解脱方法	166
第十八节	电缆在使用中的消耗量	167
第十九节	电缆在使用期间的登记工作	169
第二十节	电缆的包装、运输和贮存	170
第二十一节	电缆的验收	171
第二十二节	国外的电缆	172
第二十三节	电缆安全使用的条件	177

第一章 概 论

第一节 测井电缆的使用现状和前景

在钻探石油、天然气、煤炭、多金属矿和其他矿产的探井和生产井时，必须用地球物理方法研究井眼周围岩石的性质。在进行测井的过程中，信息通过电缆传输到地面，作为信息通路的电缆是各种测量仪器——地面记录仪器系统中最重要的部件之一。

应用地球物理方法研究钻井岩石断面的主要任务，是鉴别和评定产油层和含水层。为此目的而采用的地球物理方法很多，其中电法测井在整个地球物理研究中占60%左右；放射性测井法约占20%；声波和感应测井方法目前虽用得不多，但正在逐渐增加。在井内要测量温度、井斜、井径以及水泥在套管外返高液面等，还要取石油和天然气的试样。用于射开油层的射孔-爆炸仪器要通过电缆下至井内。在产油井内和另一些场合，测井电缆被用于测量井底压力和油层压力。

测井电缆，有单芯、三芯、七芯电缆和同轴电缆。电缆线芯根数的选择取决于所用仪器的型号和用途。苏联主要采用单芯和三芯测井电缆，七芯电缆在其他国家用得较多。适宜于在井温250℃和流体静压150兆帕以下的条件下使用的测井电缆，已能成批生产。具有足够抗拉强度的电缆，供在8000米以下的深井内使用。电缆元件的标准化工作正在开展。

电缆的电气性能和机械性能有所提高。已经开始研制在温度 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 和压力 $250\sim 300$ 兆帕井身条件下使用的测井电缆。

在15公里井深条件下使用的测井电缆将具有特殊的结构,以保证必要的强度和良好的电气性能。已经制造出10公里长的单芯和三芯电缆。要制造耐热高达 350°C 、有可靠导电芯绝缘层的电缆,会遇到不少困难。

要研制有一根或几根同轴对以及几根辅助线芯的射频电缆,在200千赫以上的频率时用作传输信息的通路,这种电缆是很有使用前途的。

第二节 在苏联不同含油气地区中 使用的电缆的选择

测井电缆,其特点表现在以下一些数据方面,如:耐热性能、制造长度、抗拉强度、衰耗系数和导电线芯电阻等。在深度不到3000米的井内使用的电缆,制造长度较短,导电线芯以橡胶或聚乙烯绝缘,价格较低。而在石油和天然气的蕴藏深度为5000~6000米的地区,要求电缆耐高温和有良好的电气、机械性能,这种电缆的制造长度大,价格较高。

目前生产的测井电缆,61%用于 90°C 以下,37%用于 $90\sim 180^{\circ}\text{C}$,只有2%左右用于 250°C 以下。这样的比例可以满足矿山-地球物理机构和钻井企业的需要。井底温度接近 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 的深井钻探量正在不断增长,但是大部分井眼的温度在 $90\sim 180^{\circ}\text{C}$ 之间。

苏联大部分含油气地区的地温梯度接近 $3^{\circ}\text{C}/100$ 米。因此,耐热 250°C 和耐流体静压150兆帕的电缆,完全适合在7000米以内的深井中工作。目前对这种电缆的需要量还不小,

每年150~200公里。但是随着井底温度超过180℃的井数的增加,必将提高耐热250℃的电缆的产量。

相当数量的油井和气井是斜钻的,井斜角度为20~40°或更大。斜井是在用联合法开发矿床的过程中钻探的,即用一个钻井架钻几口分布在不同方向的井。定向钻井用于海洋、沼泽以及石油矿床在建筑面积下面的地区。在斜井内进行测井是比较复杂的,因为增加了电缆在井壁摩擦的次数,也恶化了电缆和仪表下井的条件。由于电缆在井壁上不断地摩擦,加速了铠装层的磨损,因此提高铠装钢丝的耐磨性是一个需要解决的问题。

第三节 井内的泥浆

测井通常都是在充满泥浆或水的井内进行的,所以连接仪器下至井内的电缆,总是要受到泥浆及其混合物的影响。测井工作者对泥浆的要求,主要是它的物理性能不致使井内的研究结果失真。

下面,把目前使用的泥浆特性作一个简要的分析。

泥浆是根据溶液的成分和溶液内含有的固相进行分类的。钻井使用最广的泥浆是水基泥浆,有人造的和天然的。天然泥浆是在钻井时产生的,里面包含着非泥质岩的颗粒。泥浆是一种多相的多散性物体,其中很细的粘土岩和被钻碎的岩石颗粒都处于悬浮状态。

为了提高泥浆的质量,里面要添加石油、石墨、煤碱剂(УИП)、淀粉、碱类、铬盐、食盐、石灰和其它物质。为了加重溶液,还要加入碾成粉末的天然矿石和精选矿石、冶炼厂的废渣、赤铁矿石、磁铁矿石和重晶石等作为加重剂。加重剂的密度为3.2~5.2克/厘米³。为了减轻泥浆,要加入

发泡物质。

乳浊液属于另一类泥浆。在这类泥浆中，除了上述混合物以外，还含有微小的石油滴或柴油滴。这些添加物在泥浆中的含量占8~50%。溶液的乳化，由一些乳化剂，如皂类、有机物质、煤碱剂、淀粉和多磷酸盐等的作用下产生。乳化状态由一些稳定剂，如环烷磺酸等固定。乳化剂的加入量很少（千分之几~万分之几）。

乳浊液对电缆铠装层不会产生有害的作用，相反，由于它增强了润滑作用，减轻了粘附力，从而减少了电缆上提时的张力。乳浊液也减少了产生沉淀和电缆卡井的可能性。同样，产生泥包的可能性也是很小的。同不加乳浊液的溶液相比，电缆在这种溶液中操作的危险性要小。

在某些情况下，如必须钻开低液压或低气压的生产层以及有膨胀粘土夹层的砂层时，就采用油基泥浆。它的基液是柴油、石油馏出物，并以钠皂稳定的沥青、氧化石蜡或石蜡脂作为分散相。油基泥浆的粘度由碱类或有机酸添加剂调节。碱类添加剂使泥浆变浓，而有机酸添加剂能够冲淡泥浆，降低其粘度。

油基泥浆会引起电缆线芯的橡胶绝缘层膨胀。酸和碱会同电缆的铠装钢丝在空气中相互作用，但是，电缆铠装层在油基泥浆中停留后涂上了一层油后，能够防止金属受到酸、碱以及空气中氧气的强烈作用。

井眼在通过膨胀和崩塌的粘土层和其它岩层时，可以采用加固井壁的溶液。钻这类井时，一般采用硅酸盐溶液。这种溶液是把粘土溶解在硅酸钠的浓缩溶液——混合氯化钠或氯化钾的水玻璃中，还可以加入加重剂。硅酸盐溶液具有较大的粘度和静止位移值，而在钻井时，在溶液中加入磨碎的

岩石后，这两种值还有增大的趋势。溶液的粘度和位移力可加入苛性钠进行调节。

由此看来，井内的泥浆含有各种化学物质，它们对电缆线芯的绝缘材料产生不良的影响。此外，它们会引起铠装钢丝的腐蚀，提高周围介质的导电性。在井内高压和高温的作用下，泥浆中的液相也会渗透到电缆的绝缘层中，使其产生电流漏泄现象。

第四节 测井电缆在密封井口的 井内的使用特点

通常，接在电缆上的地球物理仪表通过打开的井口下至井眼，井内充满着泥浆，电缆就在泥浆中移动，受到泥浆和泥浆中各种添加剂的作用。

在生产井内，测井以及开采制度规定的各种测试，都是在井口密封的情况下进行的。在某些情况下，当钻井结束时，也是在密封井口的井内进行套管射孔。

国外广泛采用密封井口的方法钻开地层，但是在苏联这种方法目前尚未获得推广应用。

在密封井口的井内进行测井，井内没有泥浆，而是充满着天然气、石油或水。接有测量仪表或射孔-爆炸仪器的电缆在下井时，先要穿过装在防喷盒中的水封或盘根。电缆的铠装层在防喷盒内移动时受到剧烈的磨损，在井内石油气或石油中所含硫化氢的作用下，铠装钢丝变黑、发脆、直至断裂，遭到迅速的破坏。以奥伦堡地区的天然气井为例，天然气或石油中的硫化氢含量从千分之几到6%。

石油气对电缆的绝缘材料也具有腐蚀性。电缆的橡胶绝缘层吸收在井内压力下渗透进来的气体，当电缆提出地面

后，压缩气体从绝缘层中逸出，经常使绝缘层受到破坏。聚乙烯和氟塑料绝缘层在天然气和石油介质中比较稳定，不易受到破坏。

第五节 对测井电缆的要求

对于测井电缆，由于其使用条件非常复杂，必须提出一些特殊的要求。

电缆应能在泥浆中安全地使用。泥浆中各种物质的含量如下：石灰和盐酸从千分之几到饱和；苛性钠10~20%；石油10%以下，氢离子浓度指数（pH）为7~10。对于用在油基泥浆中的电缆，也是同样的情况，油基泥浆含石油80%以下、沥青20%以下、苛性钠1%以下、水10%以下。

为了使电缆能正常地使用，石油中碳氢化合物的成分必须在如下范围内：甲烷0.05~45%；环烷烃75%以下；芳香族烃60%以下；硫6%以下；沥青-树脂物质28%以下；地层水20%以下。同样，对于在天然气介质中使用的电缆，要求甲烷的含量为93~99%；乙烷、丙烷、丁烷在5%以下；硫化氢6%以下；氮气20%以下。在上述条件下，电缆应具有耐石油气性和耐腐蚀性，不受有害介质的影响。

井内的温度和流体静压随着井深增加而提高，因此要求电缆，主要是绝缘层，必须具有耐高温性能。在北方地区使用时，电缆长期处于-60℃以下的严寒条件，必须相应地具有耐寒性能。在流体静压的作用下，液体会渗入绝缘层使其性能恶化，所以电缆线芯的绝缘层应具有足够的防水性能。

测井电缆还必须具有耐机械作用、静负荷和动负荷的稳定性。电缆应有足够的机械强度，在井内自重的作用下不断裂，并能承受提升时同井壁摩擦和由于泥浆与电缆表面产生

的粘附作用而产生的附加负荷。

电缆突然被井壁上崩塌下来的岩石卡住时，会产生急剧增加的张力。在射开地层或排除井内故障时，射孔器的射击或井下爆炸器的爆炸都会使电缆受到动力冲击和震动。电缆在冲击负荷的作用下应不致被拉断。电缆在生产厂或井内拉伸后，在不超过拉伸张力的负荷作用下，应无剩余伸长。

电缆在滑轮上弯曲和绕在起重绞车滚筒上时，应具有韧性和弹性。电缆在相当于本身抗拉强度30%的张力作用下，应能在井口滑轮上弯曲3000次以上，这时，铠装钢丝不应断裂，结构应保持完整。绕在起重绞车滚筒上的电缆，在受到多层叠绕的张力作用下，应能承受较大的挤压负荷，这时，导电线芯的绝缘层应保持在容许极限内，不应损坏。对于在张力作用下通过井口滑轮的电缆，也是同样的要求。

电缆在井内移动时，要接触到井壁。井壁是犬牙交错的岩石层，上面覆盖着一层泥饼。如果井眼是用管子加固的，电缆就在粗糙不平的管壁上摩擦。这时，电缆的铠装层会受到磨损。磨损的速度和磨损值取决于电缆在井壁上的压力、电缆的移动速度、井斜和磨损路程的长度。覆盖在井壁上的泥饼起着缓和磨损的作用。外层铠装上突出的钢丝和表面粗糙、有纹路的地方，磨损得最厉害。因此，为了减少表面的磨损，铠装钢丝应具有较高的耐磨性。

电缆在井内上提、下放时，会产生振动，这种振动增加了电缆的总负荷。为此，电缆应具有耐振性，在动力振动的作用下不受到损失。

对测井电缆的另一方面的要求，是其电气性能，这是传输通路的主要特性。目前测井技术不断改进，一台下井仪器可以安装多种装置，如电动探测开关、打开和压紧机构、电

气装置的可携出元件和传感器等。这些装置需要较大的电功率。电能消耗增加了，势必要降低电缆线芯的电阻和电容。在某些情况下，传感器经常发出弱信号，这就要求减少电缆的衰减系数和改善它的传输系数。

电缆通讯电路的质量应能保证多路遥测系统的使用和多参数地球物理组合仪表在井下的工作。电缆应具有足够宽的频带。七芯电缆用在多路遥测系统中是最合适的，也最适合在温度 250°C 的井内使用。在采用垂直地震剖面法和地震测井法进行研究工作的超深井中，七芯电缆得到日益广泛的使用。对七芯电缆的要求是：线芯的所有参数要完全对称，在工作中要非常可靠，因为在七根导电线芯中只要一根线芯发生故障，线芯的绝缘层损坏，整根电缆就不能胜任它所担负的复杂的工作。

在为了查明矿藏而钻探的井内进行光谱研究时，就要采用同轴电缆。目前同轴电缆的制造长度为 $1000\sim 2200$ 米，而随着矿区井深的增加，电缆制造长度必须增加到 $3000\sim 3500$ 米。

现有的测井电缆能够满足对它们提出的大部分要求，特别是对电缆电气参数的要求，因为测井所使用的电流频率基本上不超过 50 千赫（经常使用几千赫）。但考虑到测井工作今后发展的方向，应该研制通过电流频率达几兆赫的电缆。

第六节 测井电缆的分类和标志

电缆制品的大类主要有电力电缆、通信电缆、射频电缆、矿用电缆和测井工作电缆等，另外一些电缆可以分别归并在上述这些电缆中。

各种电缆可以根据其结构元件的组成或形式，如导电线

芯的根数、有无铠装层等进行分类。但是这样的分类不能反映这些电缆的主要用途和使用条件。根据电缆的绝缘材料进行分类较能反映电缆的使用范围，但又不能完全适用，例如橡胶绝缘电缆和聚乙烯绝缘电缆的用途是一样的，辐照聚乙烯绝缘电缆和氟塑料40III绝缘电缆也属于同样的情况。

最好根据耐热性能对测井电缆进行分类。电缆的耐热性能够确定它的绝缘材料、允许使用的井深和流体静压以及它的电气特性，并且电缆的强度和机械性能也同耐热性能有关。

根据耐热性能进行分类，测井电缆可以分为耐温90℃、180℃和250℃三种。属于耐热90℃的电缆，有导电线芯用橡胶和高密度聚乙烯绝缘的单芯、三芯和七芯电缆。这些电缆的型号是：КОБД-6、КІІКО-2、КІІКО-6、КІІКТ-2、КТБД-6、КІІКТ-6、КСБ-8、КРК-2、КРТ-3、КТО-1、КТО-2、КТШ-0.3、КТШ-2和КТШ-4。

属于耐温180℃的电缆，有导电线芯用氟塑料40III绝缘的单芯、三芯、七芯电缆以及试制的辐照-改性聚乙烯绝缘电缆。这些电缆的型号是：КОБДФМ-2、КОБДФ-6、КСБФ-6和КОБДП-6。

属于耐热250℃的电缆，有导电线芯用氟塑料4、4Д和4МБ绝缘的单芯和三芯电缆，在绝缘层上均包有乙丙橡胶(СКЭП)密封护套。这些电缆的型号是：ККФБ-1、ККФБ-3、ККТФБ-1、ККТФБ-3和КФКО-6。ККФБ和ККТФБ型电缆性能相似，但两者所用的护套橡胶不同，ККФБ型电缆用РШ-2橡胶，ККТФБ和КФКО型电缆用СКЭП橡胶。ККФБ型电缆耐温220℃，ККТФБ型电缆耐温250℃。

测井电缆的标志还没有统一的标准。每一种新研制的电缆型号都有一个代号。第一个标志字母K表示电缆。第二个

标志字母通常表示电缆导电线芯的根数，如：O——单芯；T——三芯；C——七芯。但在有些电缆中，第二个字母表示绝缘材料的种类，如П——聚乙烯。也有代表电缆用途和使用范围的，如K——测井；З——探测；P——射频。第三个字母也表示电缆的某些特性，但又很不统一。如Б表示电缆有钢丝铠装层；K——测井；T——耐热250℃或三芯，如ККТФБ和KPT；O——单芯，III——电缆有橡胶护套。第四个字母也代表几种意思：II——双层钢丝铠装；O——单芯电缆；Φ——导电线芯的绝缘层用氟塑料制成；T——三芯电缆。第五个字母表示特性：П——电缆线芯绝缘层用辐照-改性聚乙烯制成；Φ——氟塑料绝缘层；Б——铠装电缆。只有КОБДФМ-2型电缆有六个字母，其中M表示新产品，在有些出版物中，也有表示小尺寸的意思。

电缆代号的最后一个数字表示电缆的抗拉强度，单位为吨-力(按国际制为千牛顿)，例如КОБД-6型电缆即为单芯、双层钢丝铠装、抗拉强度为6吨-力 ≈ 60 千牛顿。

上述电缆标志中的抗拉强度值，只是指电缆终端固定时的拉力。许多电缆的标志值接近实际值，有时同实际值相差两倍甚至更多，如КПКТ-2和КРК-2型电缆的标志表示它们的抗拉强度约为20千牛顿，但实际上分别为46和53千牛顿。也有电缆标志中的抗拉强度高于实际值的情况，如КОБД-6、КПКО-6和КОБДФ-6型等电缆的抗拉强度，按标志为60千牛顿，但实际上为54~58千牛顿。

第七节 电缆的改进方向

当前，高耐热性的优质材料已被用作导电线芯的绝缘层。以氟塑料为例，不久前因价格昂贵而不能推广应用，目前价

格已经下降，从而在电缆制品中得到大量采用。在不久的将来，耐温 90°C 的电缆将被淘汰，只生产耐温 180 和 250°C 的电缆。在国外，已经生产用于井底温度为 160 和 230°C 的测井电缆。

成批生产的测井电缆已经开始统一标准，并要提高电缆的一系列参数，这将促使起重设备、电缆终端接头和计量滑轮也实行标准化。电缆的电气性能和机械性能正在得到提高。为了在超深井中进行科学研究，制造了前所未有的、能在温度 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 和流体静压 $250\sim 300$ 兆帕下工作的耐高温电缆。要生产这种电缆，必须采用出色的耐热材料和设计不同于现在所用的新的电缆结构。

随着电流的载波频率提高到兆赫水平，必须生产品种全、长度大、结构新的同轴射频电缆，例如有几个同轴对和附加控制线芯的电缆。

要研制超强度金属，用于生产高强度的电缆铠装钢丝，这样可以使电缆的直径缩小。还要用高导电率的材料制造电缆的线芯，解决了这个问题，就能以更低的绝缘电阻有效而无损耗地传输电气信号。

第二章 测井电缆的结构

第一节 电缆的结构元件

测井电缆由一根或几根导电线芯组成，每根线芯外都有绝缘层。在有些结构中，线芯绝缘层外用棉纱编织或绕包布带。几根线芯绞合成电缆，电缆外绕包布带后挤包橡皮护套或用棉纱编织，或根据电缆的结构型式和使用范围绕包两层铠装钢丝。

1. 导电线芯

测井电缆的导电线芯应具有尽可能低的电阻，并能在井下和地面上的各种工作状态下，在受到从电缆传来的各种形式的负荷时具有稳定性。单芯电缆的线芯和七芯电缆的中间线芯受到的负荷最大。电缆线芯的寿命同线芯的绝缘材料也有关系。例如，橡胶绝缘的线芯同氟塑料40III或聚乙烯绝缘的线芯相比，前者的使用期限短，损坏次数多。这是因为塑料绝缘层能够阻止线芯的伸长超过弹性变形极限，线芯就不会发生故障。

下井的电缆线芯经受着纵向变形、弯曲变形和扭转变形，最主要的是沿线芯导线截面均匀分布的纵向变形。其它类型的变形出现在沿边的导线上，影响着导线的疲劳性。当电缆在井口滑轮或起重绞车的滚筒上弯曲时，线芯中的导线和线芯本身都在向绝缘层移动，而绝缘层，特别是硬性材料的绝缘层紧贴在线芯的导线上，阻碍着这种移动，因此产生