

高压 电缆 线路

郑肇骥 王焜明 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书着重叙述高电压充油电缆及其附件的结构、绝缘和机械性能, 电缆线路的设计和安装技术、载流量和供油系统的计算方法, 高压电缆和电缆线路的主要试验方法以及电缆线路的故障测寻方法等。书中还对高压直流电缆、塑料绝缘电缆、压力电缆、管道压气(SF₆)电缆、低温有阻电缆和超导电缆等作了简要介绍。

本书主要供从事高压电缆线路设计、安装和运行的专业人员阅读, 也可供电缆制造部门和高等院校有关人员参考。

本书编著人员:

郑肇骥(第一章、第九章第1~7节、第十章、附录一、二、四、五、七), 陆德铤(第六章、第七章第6节、第八章), 刘子玉(第二章、第四章、第七章第1~5节、附录三), 王焜明(第三章第2节、第九章第8~9节), 桑纪明(第五章), 徐喆明(第三章第1节、附录六)。

高 压 电 缆 线 路

郑肇骥 王焜明 主编

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 29.25印张 666千字

1983年4月第一版 1983年4月北京第一次印刷

印数0001—7640册 定价2.35元

书号 15143·5081

前 言

随着国民经济的迅速发展, 电力电缆的应用将愈来愈广。在某种意义上说, 电缆使用的普遍性不仅反映了电力工业发展的速度和深度, 同时也反映了城市建设的现代化程度。

电缆线路的建设费用虽然比架空线路昂贵, 但它有很多优点, 而且在一些特殊情况下, 它能完成架空线路不易或甚至无法完成的任务, 例如跨越大水道和海峡的输电以及直接将超高压线路引进城市和工业区中心等。

目前电力电缆已广泛应用于交流 500 千伏及以下的电压等级, 一些国家已在研制并试运行 750 千伏的超高压电缆。高压直流电力电缆的运行电压已达 ± 500 千伏。目前我国已有很多 110~220 千伏充油电缆在各水电站和电网中使用, 330 千伏充油电缆早已成功地投入运行, 500 千伏充油电缆也已经在试制, 更高电压的电缆正在研究中。

充油电缆和其它带有压力特点的电缆的出现使电力电缆的发展进入了一个新的阶段。由于结构型式不同, 不但带来许多新的安装技术问题, 而且也为运行技术的发展开辟了新的途径。例如, 强迫冷却技术的应用就为输送大功率创造了条件, 这就能更好地适应超高压、大电网输送电能的需要。

带有调节压力设备的充油或充气的高压电缆线路所要求的技术条件是比较复杂的。为对这种线路更好地设计安装和运行维护, 必须充分了解所选用的电缆的结构特点、绝缘性能、电缆线路电、热和机械特性及其计算方法, 还必须了解电缆附件的有关知识。

本书根据编著者的工作经验, 结合国内的情况, 并参考有关的国外先进技术, 着重介绍 110 千伏及以上的高压充油电缆及其附件和辅助设备的结构、重要特性和参数的计算方法, 以及电缆的安装技术和试验等。书中对于高压直流电缆和塑料绝缘电缆以及其他一些型式的高压电缆, 如充气电缆、压力电缆、管道压气(SF₆)电缆、低温有阻电缆、超导电缆等也作了简要介绍。

全书共分十章。第一至第三章叙述高压电缆的结构特点、绝缘性能和机械性能; 第四章对长期和短期允许负荷的计算、强迫冷却技术的应用和电缆线路散热环境的控制进行详细的讨论; 第五章主要介绍接头与终端头的设计和构造; 第六、七、八章讨论高压电缆线路的设计和安装技术以及供油系统的计算和供油设备的布置; 第九章着重介绍高压电缆和电缆线路的试验标准和方法; 第十章讨论电缆线路故障测寻, 其中对充油电缆漏油地点和充气电缆漏气地点的测寻方法也作了扼要介绍。关于电缆一般的运行维护和技术管理问题, 本书不作专门叙述。

参加本书编写工作的有高等院校, 科研单位和电缆运行部门等, 使本书内容能更好地理论联系实际。

编者水平有限, 书中谬误之处希读者指正。

编著者

一九八一年七月

目 录

前 言

第一章 高压电缆的种类、结构和特点	1
第1节 高压电缆的发展概况	1
第2节 自容式充油电缆	2
第3节 钢管充油电缆	11
第4节 充气电缆	14
第5节 压力电缆	20
第6节 高压直流电缆	23
第7节 管道压气(SF ₆)电缆	28
第8节 低温有阻电缆	35
第9节 超导电缆	42
第10节 塑料电缆	46
第二章 高压电缆的绝缘特性	52
第1节 高压电缆用的主要绝缘材料	52
第2节 高压电缆绝缘击穿机理	60
第3节 电缆绝缘厚度的确定	65
第4节 直流电缆的绝缘特性	73
第5节 管道压气(SF ₆)电缆的绝缘特性	81
第三章 电缆的机械性能	86
第1节 电缆的一般机械性能	86
第2节 电缆的热机械性能	93
第四章 高压电缆线路的输送容量	107
第1节 电缆的热流场和等值热路	107
第2节 电缆各部分损耗的计算	111
第3节 电缆各部分热阻的计算	119
第4节 恒定负载条件下电缆输送容量的计算	129
第5节 电缆短期和短路情况下负载电流的确定	134
第6节 电缆的热稳定性	138
第7节 电缆线路的充电电流和临界长度	140
第8节 电缆线路的强迫冷却	142
第五章 高压电缆的接头和终端头	149
第1节 概述	149
第2节 接头的型式和结构	152
第3节 终端头的型式和结构	160
第4节 接头的设计和计算	167

第5节	终端头的设计和计算	175
第6节	终端头和接头中电场分布的计算	190
第六章	高压电缆线路的设计	202
第1节	概述	202
第2节	电缆的选型和安装方式	202
第3节	电缆线路的阻抗	204
第4节	单芯电缆护套的工频感应电压	239
第5节	单芯电缆护套的冲击过电压	266
第6节	单芯电缆的护层保护器	274
第7节	信号回路的设计	279
第8节	电缆线路的土建设施	285
第9节	电缆牵引力的计算方法	289
第10节	钢管电缆线路的设计特点	296
第七章	高压电缆线路的供油系统	299
第1节	概述	299
第2节	充油电缆供油设备及其布置	299
第3节	充油电缆的需油率和需油量	306
第4节	充油电缆的暂态压力	314
第5节	充油电缆供油设备和供油长度的确定	324
第6节	钢管电缆线路供油系统的自动油泵站	332
第八章	高压电缆线路的安装	336
第1节	电缆的牵引方法	336
第2节	线芯导体的连接方法	341
第3节	高压电缆油的真空去气	343
第4节	绝缘材料的处理	345
第5节	供油管路	345
第6节	钢管的清洗方法	346
第7节	钢管的允许弯曲半径和弯曲方法	348
第8节	钢管的临时密封	348
第9节	钢管的抽真空和充油	349
第10节	水底电缆的安装特点	350
第11节	高落差电缆的安装特点	353
第九章	高压电缆线路的试验	355
第1节	概述	355
第2节	出厂试验	356
第3节	特殊试验	359
第4节	型式试验	362
第5节	竣工试验	365
第6节	绝缘强度和绝缘稳定性试验	369
第7节	运行中线路的预防性试验	372

第8节	电缆油的取样方法	374
第9节	电缆油的一些试验方法	379
第十章	电缆线路故障的测寻	398
第1节	概述	398
第2节	电气绝缘故障的测寻	398
第3节	充油电缆漏油点的测定	405
第4节	充气电缆漏气点的确定	416
附录一	高压电缆油技术性能的比较	422
附录二	国外一些高压充油和充气电缆的结构尺寸和参数	424
附录三	单芯电缆暂态温升和需油率计算公式的推导	428
附录四	275千伏及以下的充气(内气压)电缆及其附件的试验	447
附录五	275千伏及以下的压力(外气压)电缆及其附件的试验	450
附录六	额定电压为600千伏及以下的直流电力电缆试验的推荐标准	453
附录七	电缆及其附件的冲击电压试验	458

第一章 高压电缆的种类、结构和特点

第1节 高压电缆的发展概况

随着电力工业的发展,各种电压等级的电缆也相继出现。1908年英国有了20千伏的电缆网,1910年德国的30千伏电缆网已具有现代结构,1924年法国首先使用了单芯66千伏电缆,1927年美国开始采用132千伏充油电缆,并于1934年完成第一条220千伏电缆的敷设。1952~1955年法国制成了380~425千伏充油电缆,并在1960年左右试制了500千伏大容量的充油电缆。至七十年代初期500千伏电缆已在一些国家投入运行,目前一些国家已在研制和试验750千伏的电缆。为满足大容量输电的需要,近十年来,对低温电缆,蒸发冷却电缆和超导电缆等进行了研究。

在高压电缆的发展过程中,有两个里程碑。首先是1914年德国工程师M.霍斯司特达对于统包型电缆绝缘结构进行了改革,提出了屏蔽型电缆的结构,从而改善了电缆内部电场分布,消除了沿绝缘表面的正切应力。其次是1924年意大利工程师L.伊曼努里提出了采用低粘度的矿物油来浸渍电缆的纸绝缘,并在电缆内部设置油道与供油箱相连以保持电缆中的压力,从而抑制了电缆绝缘内部气隙的产生,使电缆的工作电压能提高到110千伏以上。

消除游离的关键是防止气隙的产生,抑制气隙的方法大致可以归纳为三类:

(1) 采用低粘度的矿物油作为纸绝缘的浸渍剂,并在线芯导体中心或线芯绝缘周围设置油的通道,这样可使压力经常地施加在浸渍剂上以阻止气隙的产生;

(2) 在普通油浸纸绝缘电缆的外部施加压力,并采用柔软的、不渗透的护套如铅包或聚乙烯包皮将加压媒质与油浸纸绝缘隔开。这样当电缆冷却收缩时,由于外部压力的压缩,在绝缘层内就不易形成气隙或低压力的空隙;

(3) 在电缆的铅包内充入高压力的惰性气体,它直接与绝缘接触,并作为绝缘的一部分。

根据上述三种方法可制造出各种类型的高压电力电缆,如自容式充油和充气电缆,钢管充油和充气电缆,自容式和钢管压力电缆,管道压气电缆等。本书将着重介绍有关充油电缆方面的技术。

1924年在意大利米兰安装了第一条130千伏充油电缆,1927年美国纽约和芝加哥各安装了一条132千伏充油电缆,并成功运行近50年。

充油电缆的电气性能可靠、机械性能良好、安装简便、维修容易,能适用于各种不同的敷设条件。它还有一个重要特点,即当电缆受到外力破坏而发生漏油时,不必马上进行停电处理,而只需经常从补油设备处加入一些油,使测漏和修理工作能延长。

充油电缆在运行中发热时,油体积增加,一部分油被排出到电缆外部;当电缆冷却时,这些油又自动地送回电缆内部,这样就防止了电缆内部气隙的产生,因此它的运行温

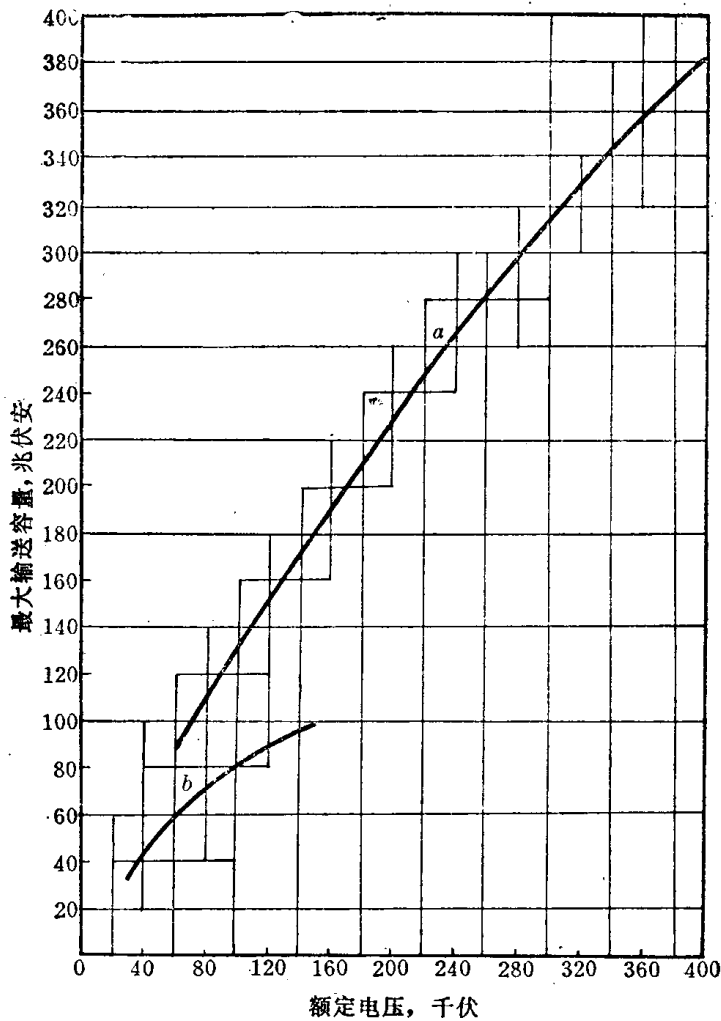


图 1.1.1 低压力充油电缆最大输送容量与额定电压的关系
a—单芯电缆；b—三芯电缆

度就可大大提高，对于同样大小的线芯截面，充油电缆的载流量约比普通油纸绝缘电缆大 30~40%。为了使油能自由流动，在电缆全长内部必须有一个或多个的纵向油道，并在两端，有时还在中间，设置供油箱，使电缆线路在任何不利的运行条件下，在线路上任何一点的油压都高于大气压力。

此外，充油电缆的起始游离电场强度较高，其工作电场强度可为普通油纸绝缘电缆的两倍以上，因而不需过分增加电缆绝缘的厚度就可制造电压较高的电缆。综上所述，充油电缆特别适用于在高电压下输送大功率电能。

图 1.1.1 示出了低压力充油电缆的最大输送容量与额定电压的关系，这是按敷设在电缆沟内的情况而计算的。从图中可见，一条单根的单芯充油电缆或一组

三根单芯充油电缆，已足够用于输送同样电压下相应的一台变压器和一条架空线路的最大容量。目前，充油电缆又有了很多改进，因此更加安全、经济、可靠。同时还简化了安装方法，有些电缆可直接引入到变压器或封闭式组合电器内。

第 2 节 自容式充油电缆

1.2.1 自容式充油电缆的特点

自容式充油电缆一般简称为充油电缆，有单芯的和三芯的。单芯的电压等级为 60~750 千伏，三芯的电压等级一般为 35~132 千伏。其特点是采用经过去气的低粘度绝缘油充入电缆绝缘内部，并借补油设备给以一定的压力，以消除在绝缘内部产生气隙的可能性。

按工作压力，充油电缆可分为低压力、中压力和高压力三种，它们的长期工作油压分别为 0.1~3 公斤/厘米²、3~8 公斤/厘米²、10~15 公斤/厘米²。

低油压电缆有两种供油方式，一种是采用恒定压力的供油设备（重力供油箱），其长期工作压力不超过 1 公斤/厘米²，最低可在 0.1~0.2 公斤/厘米² 下正常运行。虽然有时由

于线路存在落差，电缆低端可能承受较高压力，但从电气观点来说，电缆仍属于低压力的。另一种是采用可变压力的油补偿设备（压力箱）来调节电缆内部的油压，其工作油压在 $0.3\sim 3$ 公斤/厘米²的范围之内，由于工作压力较高，电缆铅包需要辐向加强，或采用机械强度较高的铝包。这种电缆能够在较大范围的压力下工作，因此有可能增加电缆线路的允许落差，增加两个压力箱之间电缆段的长度，从而降低线路造价。图1.2.1示出了单芯充油电缆。

中压力的充油电缆，由于工作压力较高，所以铅包的辐向需更好加强。

高压力的充油电缆与低压力的和中压力的电缆一样使用铅包或铝包作为护套。当采用铅包时，其外部有两层加强层，第一层的包绕节距较小用以加强铅包辐向的强度，第二层的包绕节距较大则用以加强铅包的轴向强度。采用铝包时，由于铝的机械强度较好，能承受高的内部压力，外部的加强层可以省去。铝包电缆除了可节省铅之外，还可以减轻电缆重量，降低电缆造价。但铝包电缆直接埋设或敷设在隧道中时，应特别注意防止化学腐蚀。此外，由于铝包的损耗比铅包大，对电缆的载流量有一定的影响，在设计线路时应加以考虑。

1.2.2 油道结构

单芯充油电缆的线芯中心有一个油道。它一般是由不锈钢带或约0.6毫米厚的镀锡铜带绕成螺旋管状作为线芯导体的支撑。这种螺旋支撑还具有扩大线芯直径减小线芯表面最大电场强度和减小集肤效应的效果。线芯由一层或多层铜线围着螺旋支撑绞制而成，如图1.2.2所示。有的空心线芯是由一层或多层成型的铜条（又称型线）构成的如图1.2.3所示，在这种情况下就不需要螺旋形的支撑管。这两种型式的油道结构各有其优缺点：前者的优点是制造简单，电缆的可曲性好，但其油道对油流的阻力大，在热的暂态过程中形成油压的变化比较大，在电缆线路比较长时就需要增加塞止接头的数量，因而使线路复杂而昂贵；后者的结构虽没有上述这些缺点，同时也免除了制造螺旋形管的设备和技术，但其弯曲性能较差，不利于制造大截面的线芯。国产66千伏及110千伏充油电缆曾采用此种结构，其线芯由Z形和弓形两种型线组成（见图1.2.4）。为了保证油在油道与绝缘之间能自由地通过，型线表面沿AB, BC, CD几个面有着与型线成垂直的刻纹，其宽度与深度均为 $0.3\sim 0.4$ 毫米，彼此相距约 $1.0\sim 1.5$ 毫米。

油道的尺寸必须根据许多技术和经济因素来选择，同时也要考虑电缆尺寸，最大电场强度，电缆中的油量，电缆铅包上的内压力以及一段充油电缆中油的流体静压力的容许压力差，它的值又决定了线路上塞止接头的数目和补油设备的数量等。

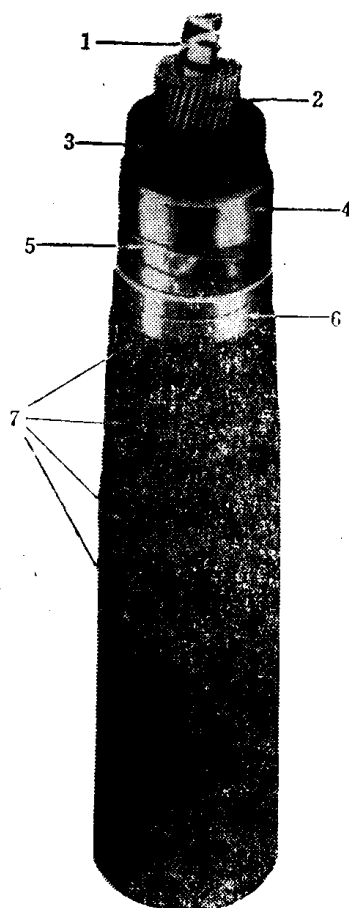


图 1.2.1 单芯充油电缆

1—油道； 2—线芯； 3—纸绝缘； 4—铅护套； 5—织有钢丝的布带； 6—加强铜带； 7—橡胶护层

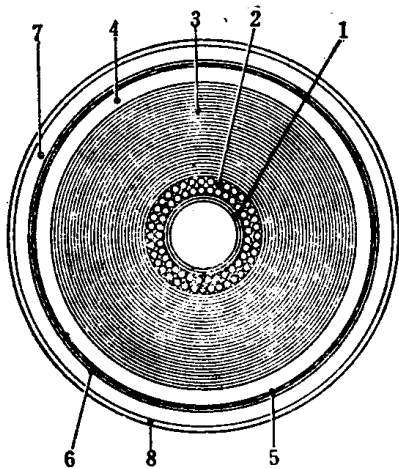


图 1.2.2 油道由螺旋支撑构成的单芯充油电缆的截面

1—螺旋形支撑构成的油道；2—线芯；3—纸绝缘；4—铅护套；5—纵向加强层；6—辐向加强层；7—橡胶护套；8—麻护层

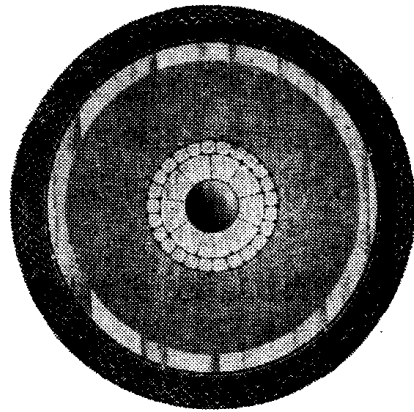


图 1.2.3 油道由型线组成的单芯充油电缆的截面

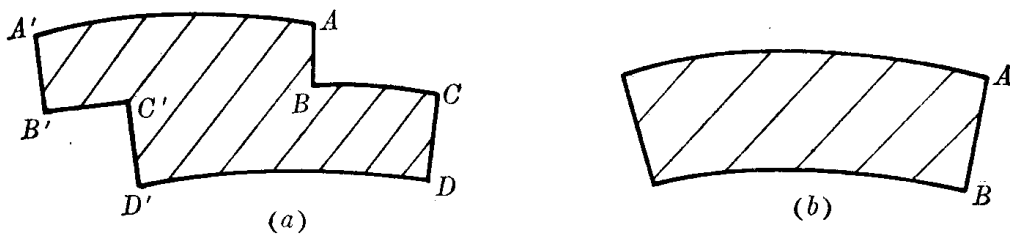


图 1.2.4 充油电缆线芯用的型线
(a)Z形型线(第一层)；(b)弓形型线(第二层)

增大油道的尺寸会使电缆材料消耗量和电缆重量增大，使电缆中的总油量加多，从而使供油设备变得复杂。

减小油道直径虽然能使电缆的重量减轻，成本降低，但却使油在油道中流动时的阻力增大，供油长度就必须相应地缩短，而接头和工井数量将增多，使整个装置费用变得昂贵。

由此可见，必须针对具体的电缆线路选出最合理的电缆结构。目前对于110~220千伏的电缆，油道直径一般为8~14毫米，400~500千伏的电缆，其油道直径则为18~22毫米，但在一些特殊情况下，油道直径最小为7毫米，最大达23毫米。

充油电缆的油道有时也有在铅包下面的，如图1.2.5所示。油道位于线芯的中心和位于铅包下面这两种结构各有其优缺点。在同样的线芯截面下，前者尺寸比后者大。在同样的工作电压和同样的绝缘厚度下，后者的线芯表面最大电场强度较大。油道在铅包下面时，线芯结构简单，制造方便，但铅包的构造则较复杂。油道在线芯中心时，电缆内部的油受到较高温度的作用。对于400千伏及以上的高压力充油电缆，两种油道兼而有之，如图1.2.6所示，其优点是可以减少在绝缘径向的压力降。

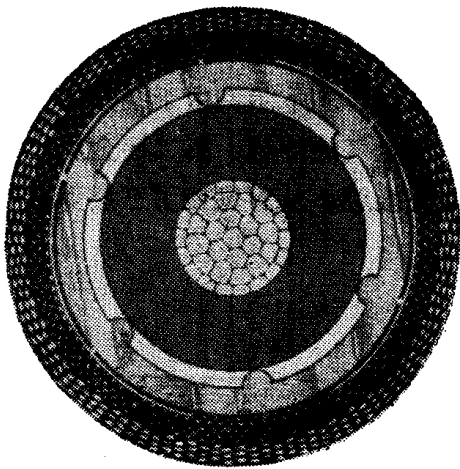


图 1.2.5 油道在铅包下面的充油电缆

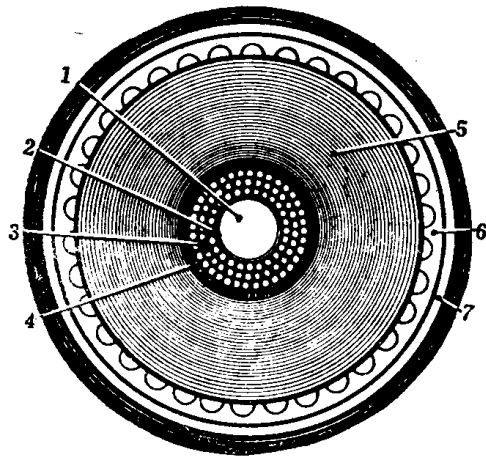


图 1.2.6 兼有线芯中心油道和铅包下油道的超高压充油电缆

1—线芯中心油道；2—螺旋支撑管；3—线芯；4—线芯屏蔽；5—纸绝缘；6—第一层铅包；7—第二层铅包，其外围为铅包下的油道

1.2.3 线芯导体

充油电缆的线芯导体由初炼的镀锡铜线绞成。铜线镀锡后可大大减轻对油的催化作用。当线芯导体截面过大时，集肤效应和邻近效应对其电阻的影响就很严重。例如1000平方毫米的导体，由于这些效应使电阻增加达23%之多。为此，对于大截面的线芯（超过1000平方毫米）常采用分裂导体结构，线芯由四个或六个彼此用半导体纸分隔开的扇形导体组成如图1.2.7所示。

为了改善电缆的介电性能，高压电缆的线芯表面一般都包有半导体屏蔽纸带。35千伏及以下的电缆，通常包2~3层，对于400~500千伏的超高压电缆则增加到5~7层。紧靠纸绝缘的最外层半导体纸带的厚度通常与第一层纸绝缘带的厚度相同。

在220~500千伏的电缆中，包在线芯屏蔽最外一层的屏蔽纸带，是由一面为半导体，另一面为绝缘的双色半导体纸带以重叠的方式包绕。因此，在半导体屏蔽层与绝缘层交界面处的油膜不存在了，只有绝缘层中的油膜存在（见图1.2.8）。

采用炭黑半导体纸作屏蔽，还可以改善介质损失正切和温度关系曲线的斜率，增加绝缘的电气强度，提高它的稳定性，并可减少气隙放电的破坏作用。

当线芯用三层金属化纸带作屏蔽时，第一层的包绕间隙为5~7毫米，其金属面向着铅

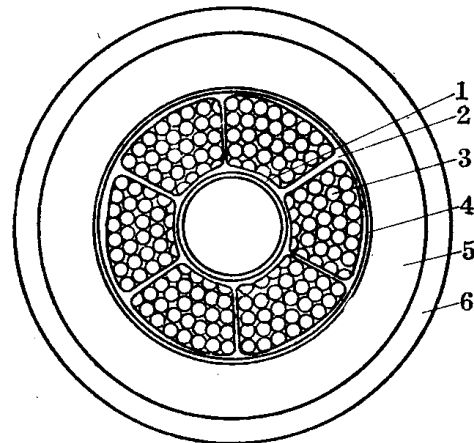


图 1.2.7 线芯由六个扇形导体组成的大截面单芯充油电缆的截面图

1—油道的螺旋支撑；2—隔开扇形导体的半导体纸；3—扇形导体；4—线芯屏蔽；5—纸绝缘；6—铅护套

包；第二层的包绕间隙亦为5~7毫米，但其金属面朝着线芯；第三层最薄，其厚度不应超过第一层纸绝缘的厚度，其金属面朝着线芯，包绕间隙为0.5~2毫米。每一层金属化纸带包绕，必须使其宽度中心处在下面一层的间隙上面如图1.2.9所示。由于绕紧的金属化纸带的弯曲作用，第一层与第三层金属化纸带在间隙处有电气的接触；第二层金属化纸带与线芯在第一层金属化纸带边缘的间隙处也同样的有电气接触。从而保证了三层屏蔽纸的金属面相互间都有电气上的连接。

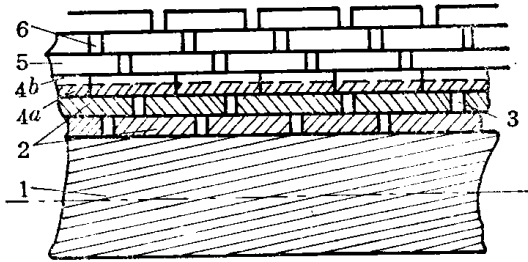


图 1.2.8 线芯屏蔽最外层的双色半导体屏蔽纸带的包绕方法

1—线芯；2—半导体纸带；3—被屏蔽的油间隙；
4—双色半导体屏蔽纸带(a为炭黑面，b为绝缘面)；
5—纸绝缘；6—绝缘层中的油间隙

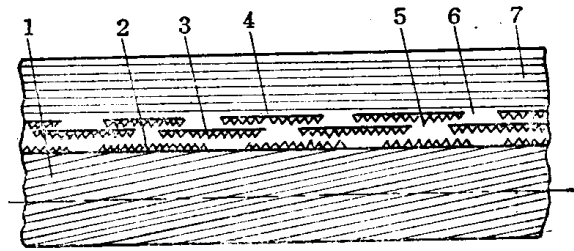


图 1.2.9 线芯用三层金属化屏蔽纸带的包绕方法

1—线芯；2—第一层金属化纸带(金属面朝着铅包)；
3—第二层金属化纸带(金属面朝着线芯)；4—第三层金属化纸带(金属面朝着线芯)；5—金属化纸带边缘被屏蔽的油间隙；6—不被屏蔽的油间隙；7—纸绝缘

当使用两层金属化纸带作屏蔽时，两层的金属面均应向朝着线芯，但这样屏蔽的效果较差。

线芯用金属化纸带屏蔽后，可使电缆的冲击耐压强度提高4~7%，逐级升高的工频耐压强度提高12~15%。当用半导体纸屏蔽时，耐压强度的增加还要大一些。

1.2.4 绝缘层

在线芯屏蔽层的外部为电缆的绝缘层。它是由许多层宽度为10~30毫米，厚度为0.014~0.175毫米的纸带以螺旋状形式包绕而成的。纸带边缘相互间有0.5~3.5毫米宽的间隙，这是为了使电缆在受到弯曲、绝缘层纸带间发生位移时，不致造成相邻纸带边缘的破裂。这些间隙虽为浸渍剂所填充，但其电气强度远低于纸带的强度。因此要求相邻两层纸带的间隙不能重合，以使间隙的厚度不超过一层纸带的厚度。

为制造380千伏及以上的充油电缆，其最大工作电场强度必须提高到16~20千伏/毫米，否则电缆绝缘厚度将增大，给电缆制造和安装造成很大困难，有时甚至不可能实现。为此，一般应用高的压力和高密度的薄纸来提高电缆的工频电气强度和冲击强度。高压电缆纸的密度一般在0.85~1.1克/厘米³之间。但应注意随着纸的密度增大，其电气强度特别是冲击强度将增大，但同时也使介质常数、介质损失角正切值增大(见图1.2.10)。

介质常数的增大将使电缆的电容电流加大，而介质损失角正切值的加大则使电缆的损耗加大。两者都影响电缆的载流量，因此在超高压电缆中一般都要用强迫冷却的方法来提提高输送容量。

此外，减薄纸的厚度也可提高电缆的冲击强度，而增加油压力可提高电缆的工频强度，图1.2.11示出不同厚度纸带在长期工频电压作用下的击穿强度与油压力的关系。

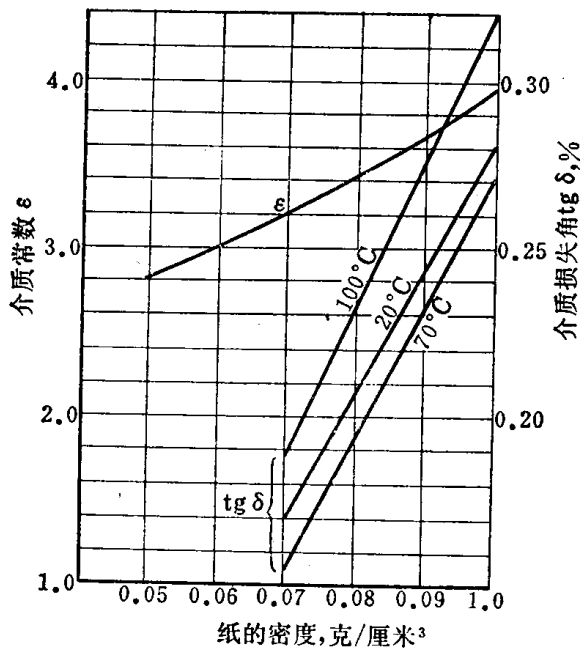


图 1.2.10 纸的介质常数和介质损失角正切值与纸的密度的关系

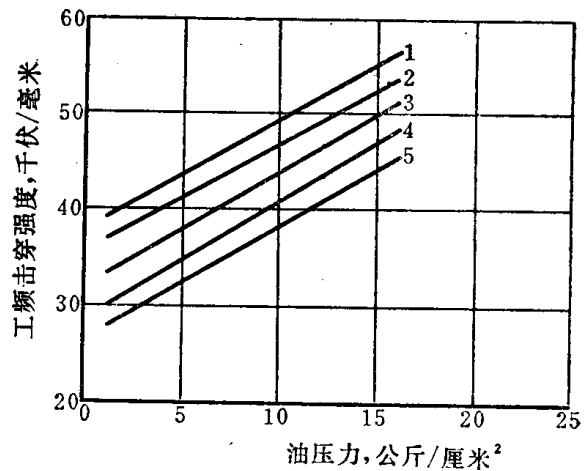


图 1.2.11 不同厚度的纸带在工频电压长期作用下的击穿强度与油压力的关系

1—纸带厚度为0.030毫米；2—纸带厚度为0.045毫米；
3—纸带厚度为0.075毫米；4—纸带厚度为0.125毫米；
5—纸带厚度为0.175毫米

采用薄纸能提高电缆的冲击强度是因为纸带间隙中的油膜是绝缘中的薄弱环节，而在冲击试验时，有很大一部分电压作用在油膜上。纸的厚度愈薄，油膜也愈薄，冲击击穿电压也就愈高。由于接近线芯表面的电位梯度最大，故一般只需在这一部分使用薄纸，其包绕厚度可以根据径向电场强度的变化加以计算而定。其余部分的绝缘则可用一般的厚纸来包绕。

图1.2.12表明当电缆绝缘厚度大于10毫米时，靠近线芯的纸带厚度对电缆冲击击穿强度的关系。从图可见采用0.04毫米厚的纸带代替普通的0.125毫米的纸带可以提高冲击强度约40%，而采用0.025毫米厚的纸带则可以提高约60%左右。

电缆纸带的高的机械强度和拉伸率保证了绝缘包绕的紧密度，从而使电缆在受弯曲和安装接头时有必要的机械强度。

电缆纸带沿纵向的拉断强度为7~10公斤/毫米²，横向的拉断强度为3~5公斤/毫米²，其相应的拉伸率沿纵向不小于2.5~5%，而沿横向则不小于5~7%。干的未浸渍过的纸带能承受1500~3000次摺叠，而浸渍过的则只

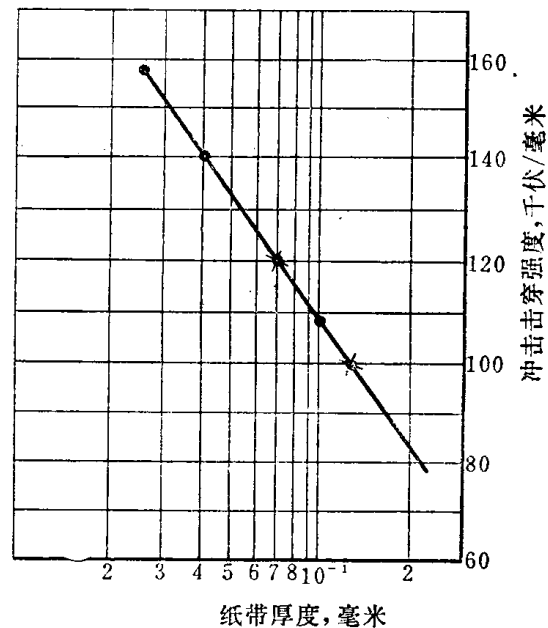


图 1.2.12 纸带厚度与电缆冲击击穿强度的关系

能承受 5~10 次摺叠。

包绕纸带时的张力必须仔细地调节并保持恒定，以防止在制造过程中和在安装敷设时使纸绝缘产生皱纹和开裂的情况。纸带张力要小于纸包半径的径向应力上限，以防止电缆弯曲后发生皱纹，纸带张力要大于径向应力下限。以防止电缆弯曲后会发生松皱。纸带皱纹对电缆的冲击击穿强度有影响，严重的皱纹可使冲击击穿强度降低 25%。

充油电缆的绝缘厚度对于 30、60、120、150、220 和 400 千伏的电压大约分别为 3、6、11、13、20 和 27 毫米。对于上述这些电压，导体表面的电场强度一般在 8 千伏/毫米至 14 千伏/毫米之间。

在纸绝缘层的外表面也有屏蔽层，它一般是用两层半导体纸带或刺有小孔的金属化纸带包绕而成。在有些情况下，纸绝缘与金属化纸带之间还插入一层半导体纸带。

电缆的纸绝缘经过充分干燥后进行压铅，再加热到 100℃ 并抽真空达到规定的真空度后将油充入电缆，使全部绝缘得到充分的浸渍。

在浸渍过程中，纸绝缘层间的空隙以及纸的毛细孔均被绝缘油所充满。浸渍过的纸是一个复杂的介质，它由各种不同介质常数和导电率以及不同性质损耗的绝缘组成。用洁净的油浸渍过的纸，其介质损耗在很大程度上决定于它在浸渍前的介质损耗。

110 千伏及以上电缆的介质损耗比 35 千伏电缆的大很多，因为介质损耗与电压成平方关系。尽管在 110 千伏及以上的电缆中采用了高质量的纸和低损耗的油，110~220 千伏电缆的介质损耗与导体损耗相比仍是可观的。当电压为 500 千伏时，介质损耗甚至超过导体的损耗（见表 1.2.1）。

表 1.2.1 电缆绝缘的介质损耗与线芯导体损耗之比

额定电压, 千伏	在工作温度下的介质 损失角正切 $\text{tg}\delta$ 值	介质损耗, 千瓦/公里	介质损耗等于导体 损耗的百分率, %	线芯截面, 毫米 ²
35	0.008	0.2	1.5	185
110	0.005	2	10.8	270
220	0.004	5	34.0	356
500	0.0035	21	大于 100	550

电缆绝缘的 $\text{tg}\delta$ 值增大，就迫使允许载流量降低。当 $\text{tg}\delta$ 值增大到 0.01 时，220 和 400 千伏电缆的允许载流量将分别降低 7% 和 30%。当 220 千伏电缆的 $\text{tg}\delta$ 值增大到 0.04 以及 400 千伏电缆的增大到 0.015 时，这些电缆的允许载流量将接近于零。由于介质损耗的缘故，500 千伏以上的电缆必须采用低损耗新型绝缘纸，而且一般都采用强迫冷却。例如美国试制的 750 千伏钢管充油电缆采用纸和聚丙烯薄膜组合成的绝缘，其介质常数为 2.3， $\text{tg}\delta$ 约为 5×10^{-4} ，可大大地减少电缆的充电电流，降低介质损耗，使电缆的输送容量提高很多。

充分浸渍的单层电缆纸的电气强度与电压作用时间长短的关系不大，但是由浸渍纸层间的油膜组成的电缆绝缘的电气强度则随着加压时间的增长而大大地降低。这是由于电缆

中的油膜（或气隙）产生游离，使绝缘逐渐破坏。气体的产生可能是由于油在电场作用下的分解，或者是过高的温度使一小部分油的气化，亦可能是安装不良（如油的去气不充分或安装接头时真空处理不够）所引起的。油膜的体积越小，则起始游离电压越高，而电缆的电气强度就愈好。

1.2.5 三芯充油电缆

三芯充油电缆在导体中心设有油道。线芯与普通电缆一样用多股铜线绞成或经过紧压成型。绝缘层的包绕方法及其表面的屏蔽层与单芯电缆的结构完全相同。三个缆芯扭绞在一起并在芯与芯之间的空隙处设置三个螺旋形管油道，如图1.2.13所示。为了便于寻找漏油，有的设计将一个螺旋形油道改用金属管代替。缆芯与油道之间用纸来填充使其成圆形，然后用金属带或带有金属丝的布带扎紧。经过干燥后立即加以压铅，以后的工艺则与单芯电缆相同。

还有一种如图1.2.14所示的扁形三芯充油电缆，它是由丹麦工程师J.摩勒霍札在1941年发明的，所以也称摩勒霍札型充油电缆。三个具有屏蔽的缆芯平行排列在扁形的铅包内，缆芯与铅包之间的空隙充满经过净化的环烷基矿物油，其粘度在20、50和100℃时分别为170、33和3.9厘施。在铅包外面包有由浸渍纸、沥青、布带和铜带组成的保护层。在这保护层上沿铅包的扁平面有两层具有弹性的波纹青铜片，它被铜线所扎紧。外面是防腐

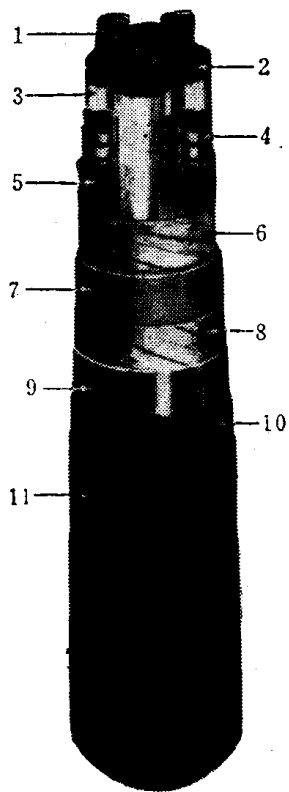


图 1.2.13 有三个螺旋形管的三芯充油电缆
1—镀锡铜线芯；2—纸绝缘；3—屏蔽层；4—螺旋形管油道；5—浸渍纸填料；6—织有铜丝的布带；7—铅包；8—织有铜丝的布带；9—加强铜带；10—浸渍沥青的布带；11—橡胶护层

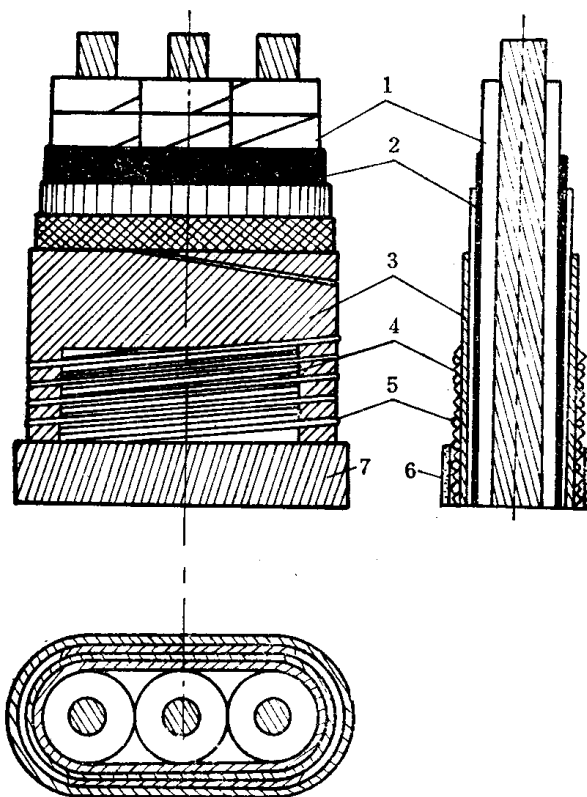


图 1.2.14 扁形三芯充油电缆
1—绝缘层；2—铅包；3—内衬垫及铜带；4—波纹弹性青铜片；5—铜扎线；6—防腐层；7—铝装丝

层和铠装丝。

扁形电缆的电压有33、66、132和220千伏,最大工作场强分别为7.5, 8.0和12.5千伏/毫米。绝缘层采用0.0635~0.127毫米厚的电缆纸分阶包绕而成。这种电缆的特点是,铅包的扁平面能起供油设备中弹性元件的作用,它可以改变电缆内部的体积,因此不需任何供油设备就可使电缆在运行温度范围内将油压保持在2~6公斤/厘米²的范围内,而扁平面的变动范围为1.5~3毫米,视电缆的大小而定。由于这种电缆不需供油设备,因此特别适宜于在水底作大长度的敷设。此外,由于油的比重略小于1,而且在岸边电缆的上端部分约有2公斤/厘米²的压力,当敷设深度未达到250~270米时,电缆内部的油压总是高于外部水压,即使铅包密封不好,水也不致侵入电缆内部,见图1.2.15。自1949年起,这种电缆已大量用于水底敷设。

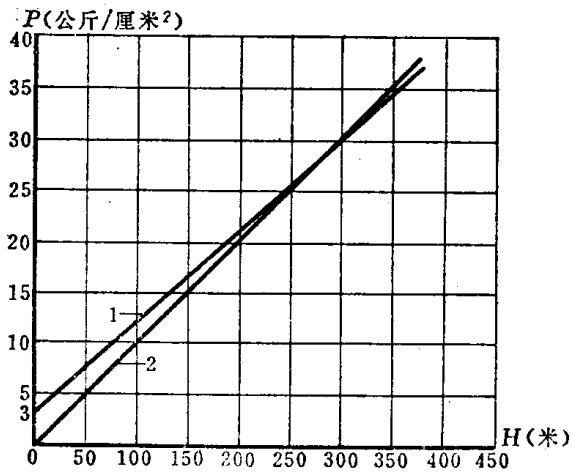


图 1.2.15 电缆内部油压和外部水压 P 与扁形水底电缆敷设深度 H 的关系
1—电缆内部油压; 2—电缆外部水压

这种电缆已大量用于水底敷设。

1.2.6 金属护套和加强层

充油电缆的金属护套一般采用铅包,但也有用铝包的。后者机械强度高,故多用于高油压充油电缆。铝包电缆的可曲性差,故有时将铝包做成波浪形,称为皱纹铝包。与普通电缆相比对充油电缆铅包有一些特殊的要求。例如,自容式充油电缆的铅包除了作为不透水和不透气的保护层,并对防止绝缘受到机械损伤有一定的作用外,还必须承受由于电缆内部油压的变化所引起的附加作用。当铅包内部承受压力时,铅包需具有较好的抗蠕变性能,这样就可以提高内部压力,从而减少绝缘

厚度或增加工作电压的数值。因此对于充油电缆,要求铅包具有更满意的硬度和可塑性、更高的抗张强度和抗磨强度以及更好的耐振性能和在运行条件下性能的稳定性的。

铅包的压制,基本上与普通纸绝缘电缆一样。采用新型的连续压铅机改进了电缆压铅技术,能制造出无接缝的铅包。此外,为了防止在压铅过程中绝缘受潮,也有采取在真空条件下压铅的方法。为了保证铅包质量,电缆经过压铅后对铅包需作几个大气压的耐压力试验。

低压力和中压力的充油电缆的铅包外边,一般有一个幅向加强层以提高其耐受内部油压的能力。加强层由两层0.2毫米厚的硬拉铜带以很短的节距和2~4毫米的间隙紧紧地包绕在铅包外面,形成一个金属层。

加强层与铅包之间用纸带或纱带衬垫。有时为了保证它们之间的电气连续性,采用织有金属丝的布带。

高压力的充油电缆以及用于高落差敷设条件或坡度很大的倾斜路线的充油电缆,除了有幅向加强层外,还必须有抵御纵向拉力的加强层,它是以较长的节距直接包在铅包外面的。理论证明,单层的加强层如果以54度的斜角包绕时已足够承受幅向和纵向的应力,但

是一般为了更加可靠起见都采用双层的加强层。

为了避免铁损，单芯电缆的加强层必须用非磁性材料制成。

1.2.7 外护层

在加强层外面有防止铅包和加强层腐蚀的外护层，故有时也称防腐层。它由几层不透水的天然或合成橡胶带或塑料带和沥青包绕而成。近年来逐渐采用挤压方法在加强层外挤上一层氯丁橡胶、聚氯乙烯或聚乙烯套作为防腐层。这种结构比包绕结构具有更好的防止化学和电化腐蚀的效果。采用包绕结构时，护层中的沥青必须具有良好的粘附性和较高的软化点。不透水的包带必须用不与沥青发生化学作用的材料制成，否则会严重影响防腐的性能。而且这一防腐层外面需要有黄麻保护层。具有黄麻护层的电缆如敷设在室内时必须作防火处理，如涂上水玻璃或其它阻燃涂料。

单芯电缆的防腐层除了起防腐作用外，还必须满足金属护套在一端接地时，耐受护套过电压的要求。在必要时，制造厂应按使用部门的要求，对防腐层进行特殊设计，以满足一定的绝缘水平。关于护套过电压的计算和护层的过电压保护问题将在第六章中作详细讨论。

充油电缆一般都是按各个工程所规定的敷设条件和工作条件进行设计和制造的，因此不象普通油浸渍纸绝缘电缆那样有一系列现成的标准产品可供选择。表 1.2.2 列出了国产自容式单芯充油电缆的结构尺寸。在附录二中列出其它一些国家的高压充油电缆和充气电缆的结构尺寸和电气参数以供参考。

表 1.2.2 国产自容式充油电缆结构尺寸

序 号	线芯截 面 积 S 厘米 ²	油道 直径 D ₀ 厘米	线芯 外径 D _c 厘米	螺旋管 道厚度 Δ 厘米	螺旋管 道宽度 b 厘米	绝缘层外径 D _i 厘米			护层外径 D _s 厘米			电 缆 外 径 D _e 厘米		
						110 千伏	220 千伏	330 千伏	110 千伏	220 千伏	330 千伏	110 千伏	220 千伏	330 千伏
						1	1.0	1.2	1.86	0.06	0.6	4.26	6.06	7.06
2	2.4	1.2	2.39	0.06	0.6	4.79	6.59	7.59	5.56	7.46	8.46	7.6	9.50	10.5
3	4.0	1.2	2.93	0.06	0.6	5.33	7.13	8.13	6.10	8.00	9.00	8.1	10.0	11.0
4	6.0	1.2	3.47	0.06	0.6	5.87	7.67	8.67	6.64	8.54	9.54	8.7	10.6	11.6
5	7.0	1.26	3.74	0.08	0.6	6.14	7.94	8.94	6.91	8.81	9.81	8.9	10.8	11.8
6	8.45	1.26	4.00	0.08	0.6	6.40	8.20	9.20	7.17	9.07	10.07	9.2	11.11	12.0
7	1.0	1.2	1.90	0.1	0.55	4.06	5.46	7.06	4.66	6.16	7.76	5.94	7.44	9.04
8	1.8	1.2	2.24	0.1	0.55	4.40	5.80	7.40	5.00	6.50	8.10	5.08	7.78	9.38
9	2.7	1.2	2.32	0	0	4.48	5.88	7.48	5.08	6.58	8.18	6.36	7.86	9.46
10	4.0	1.2	2.62	0	0	4.78	6.18	7.78	5.38	6.88	8.48	6.66	8.16	9.97
11	6.0	1.2	3.10	0	0	5.26	6.66	8.26	5.96	7.36	9.06	7.24	8.64	10.34
12	7.0	1.2	3.70	0.1	0.55	5.86	7.76	8.86	6.56	7.96	9.66	7.84	9.24	10.94

第3节 钢管充油电缆

1.3.1 概述

高油压充油电缆的另一种型式是钢管充油。就是把没有铅包的三个电缆芯置于无缝钢