

电缆的屏蔽

张弘 温胜军 张乒 陈学武 郑州电缆(集团)股份有限公司

[摘要]: 本文对电缆的屏蔽作用、结构和材料进行了阐述、分析。

[关键词]: 电缆; 屏蔽;

1. 引言

电缆屏蔽有非金属屏蔽和金属屏蔽两种形式。采用哪一种屏蔽形式取决于电缆的种类,如电力电缆主要是为了屏蔽和均化电场,承载短路电流,而通讯电缆则要屏蔽电磁场,以消除线芯间和外部对电缆的干扰。电力电缆的屏蔽同时具有非金属屏蔽和金属屏蔽形式,具体取决于电缆的电压等级和短路电流的大小等,对于金属屏蔽部分还取决于以及金属材料的导电性、热性能、结构和加工方式等,通讯电缆则多为金属屏蔽。这里就电缆的屏蔽作用、结构和材料进行了简单介绍。

2. 屏蔽的作用

2.1 均化电场

实心的导体相对表面比较光滑,电场的分布比较均匀。绞合的导电线芯由于是有多根单线组成,线芯表面各点电场分布不均匀,单线半径的大小和其表面场强的大小成反比关系,这就产生多导丝效应。导体因加工产生的毛刺、粉屑,造成尖端放电,也需要导体屏蔽。为了使导体表面的电场分布相对比较均匀,只有绕包带屏蔽和挤出屏蔽层,才能均化电场消除这些效应。

导电线芯电场分垂直和相切两个方向的分量。如没有半导体层,对于绕包类型的绝缘来说易产生移滑放电;另外切向方向的场强使绝缘的耐压降低10~15倍,降低了绝缘强度和绝缘的效果。

多芯电缆填充处有电场。由于填充处绝缘材料的本身耐电强度较低,因此使电缆的整体绝缘水平下降。半导体材料主要是由部分碳黑组成,碳黑除有半导电的作用外也可以吸附气体杂质,使相应面的绝缘的长期电场强度降低,避免电缆绝缘外表面发生游离,提高电缆的使用寿命。

为了避免电场过于集中,常采用半导体层结构改变电场的方向,避免绕包绝缘产生移滑

放电，使多芯电缆的填充处于无电场状态；半导体层中的炭黑可以吸附气体杂质。屏蔽气泡不受电场作用，对于绞合的导体，由于是由多根单线胶合而成，表面单线突出的电场强度和凹进部分相比可提高 30%。

2.2 减少干扰

我们都知道电场和磁场是交互变化而存在的统一体，变化的电场产生变化的磁场影响周围媒质，从而产生对其他载流回路产生干扰，电磁场的作用是电场和磁场产生干扰作用的总和。

在电场和磁场的作用下，电流对回路之间的不平衡而引起的电干扰和磁干扰。干扰的产生可分为电感、电容、电阻在回路产生相应的感抗、容抗和阻抗，而产生相应的损耗。

通信电缆的频率较高，比较容易产生干扰，电力电缆的频率较低，而比较容易产生损耗。

采用合理的屏蔽结构和有效的接地方式，就能够较少干和损耗。

2.3 热屏蔽

由于导体的导电性能比较好，对流过其本身的电流有较小的电阻，因此导电率较高。绝缘体的绝缘性能较高，对电流又较大的电阻，电流几乎不可能穿透绝缘体，因此绝缘电阻率较高。导电性能高的材料也相对有较高的导热性能，绝缘性能较高的材料必然有较高的热阻，导电性能的不同对热导的性能也有所不同，半导体材料的导电性能和导热性能介于导体和绝缘体之间。如果电力电缆发生短路，导体流过大的电流使其温度突然升高，由于采用了内半导电屏蔽层，就防止了过高的温度直接作用到绝缘层上，不致因热冲击而损伤绝缘层，在这种情况下，内屏蔽层就起到了热屏蔽作用，也可以称为热缓冲层。在绝缘或半导电屏蔽表面上绕包或挤出一层金属屏蔽，不但使圆形导体电缆填充处无电场，而且因为金属屏蔽散热效果好，在意外短路的情况下，可以承受一定的短路电流，避免绝缘过热产生热击穿。

2.4 防护作用

对高分子材料，因其内部和形成整个混合体的结构不同，在一定条件下水对材料都有一定的渗透率。在不同敷设条件和特殊环境下，为了使电缆在设计的使用寿命下安全运行，就要采用相应的防护结构。金属带或丝屏蔽主要是在发生短路的情况下，在一定时间内承受一部分短路电流，避免绝缘在过高的电流影响下产生热击穿。前提是金属屏蔽必须有牢靠的接地措施，电压电流的大小应满足设计的要求，总之不应产生过大的损耗。电力电缆的金属屏蔽的截面大小是根据电压的大小来确定的，屏蔽的面积不能小于有关标准的规定，线路电压和屏蔽截面的关系见表 1。金属屏蔽的截面应尽量满足表 1 的要求，避免产生不必要的经济损失。

表 1 电压与屏蔽截面

电压 kV (U)	金属屏蔽最小截面 mm ²
6~10	25
35	35
63	50
110	75
220	95
330	120
500	150

金属套屏蔽方式表面较其它屏蔽结构光滑，对于高频、低频都有较好的屏蔽效果，承受的短路电流比较高。另外其防水性能尤为突出，这决定于金属材料的防腐蚀性能和分子结构，铅或合金铅的密度较大，防水效果最好。由潮湿环境或水下敷设的电缆、跨江、河、湖、海和桥敷设是最好的防水结构，铅或合金铅套的耐震动性也比较好，在桥梁上敷设是最佳的选择。

3. 屏蔽分类

对于不同类型的电缆，屏蔽的作用有所不同。电缆的屏蔽按照屏蔽的原理可以分为三种：静电屏蔽、静磁屏蔽、电磁屏蔽。

静电屏蔽的作用是使电场终于屏蔽体的金属表面上，干扰和被干扰是一个相对的统一体，有电场势必要产生相对的磁场，磁场的变化就有电场的存在，减少磁场的干扰也就是将电场或磁场产生的电荷导入大地。图 1、图 2 是产生干扰和消除干扰的说明。静电场产生静电屏蔽能产生的效果必要条件是接地，其效果的大小与接地的质量有关。制造静电屏蔽体可以采用任何金属，而且对于屏蔽体的厚度及导电率均无任何要求。

静磁屏蔽体的作用是使磁场限制与屏蔽内，它是强磁材制成的。由于屏蔽体的磁导系数很高，屏蔽体的磁阻很小，因而干扰源产生的磁通就大部分被限制于强磁屏蔽中，而只有少部分进入被屏蔽体的空间（如图 3 所示）。屏蔽体的导磁系数和厚度越大，导磁效果越好，此外屏蔽效果还与屏蔽体尺寸有关，磁屏蔽体半径越大，则屏蔽效果越差。

静电屏蔽体和静磁屏蔽体仅在低频是有效。在频率增高后，屏蔽体内涡流作用加大，静磁屏蔽体就会转入电磁屏蔽体的工作状态。

为防止交变电磁场的作用，需要采用电磁屏蔽体。电磁波在屏蔽体表面的反射现象以及屏蔽体金属厚度内的高频能量衰减是电磁屏蔽体的作用基础。

电磁波通过屏蔽体的过程与能量沿回路传输的过程是相类似的。在研究屏蔽体的时候，所研究的不是能量沿线路的移动，而是垂直于线路。由于干扰源至屏蔽体，再穿过屏蔽体至

屏蔽体外空间的能量转移。电磁能 W 到达屏蔽体的界面上要有 W_1 的能量反射回来（如图 4 所示），能量的反射是由于介质的波阻抗和用以制造屏蔽体的金属的波阻抗不一致而引起的。波阻抗相差越大，则由反射

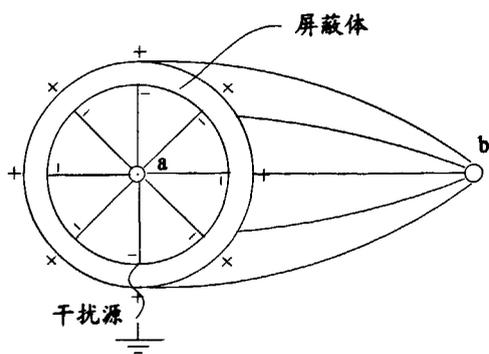


图1 屏蔽体与地不接触时，被干扰导体b上受到静电感应影响

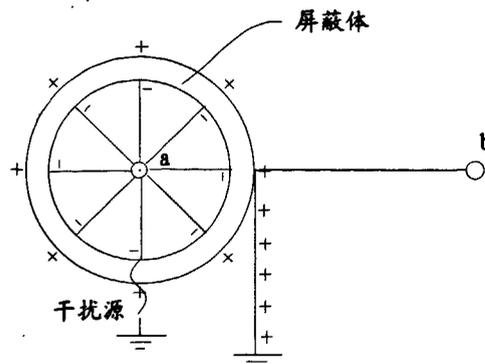


图2 屏蔽体与地接触时，被干扰导体b上不受静电感应影响

引起的屏蔽效应越强，能量在穿过屏蔽体的过程中损耗掉 W_2 。屏蔽体内的能量损耗是由于金属内涡流的热消耗引起的，频率越高及屏蔽越厚，则屏蔽衰减越大。当能量穿过第二个界面既屏蔽体和介质之间，又产生了能量的反射 W_3 ，最后只剩下部分能量到达被屏蔽的空间。能量穿过屏蔽体的结果已由 W 减为 W_p 。

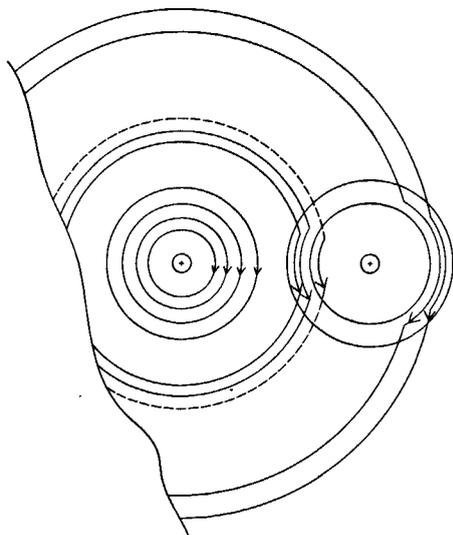


图3 静磁屏蔽体

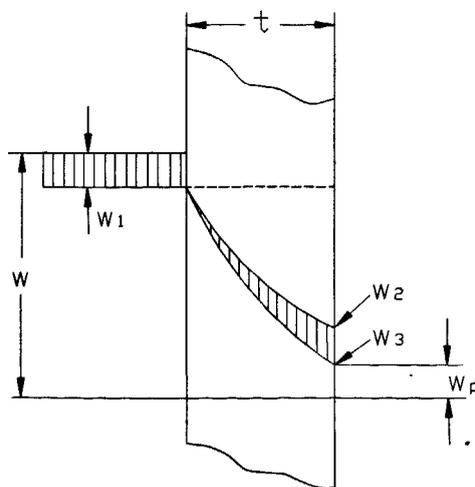


图4 电磁能通过屏蔽体的穿越过程

4 屏蔽的型式

4.1 屏蔽结构

电缆的屏蔽从结构上讲：可以分为非金属屏蔽、金属屏蔽和非金属屏蔽与金属屏蔽同时采用三种形式。根据电缆电压级和使用要求的不同，又可分为统包屏蔽和分相屏蔽。统包屏蔽一般是在多芯成缆后绕包在成缆线芯上；这种屏蔽结构效果为使电场屏蔽于缆芯内部，消除对外界的干扰，通常用于电压比较低的场合，但能承受一部分机械力。分相屏蔽是每个绝缘线芯上绕包或挤出屏蔽层，这种屏蔽方式改变了电场的辐射方向，电场分布垂直于屏蔽表面、电场分布比较均匀。也就是由所谓的非径向电场向径向电场的转变（见图 5）。这种方式屏蔽效果好，又能承受部分短路电流，适用于电压级较高的电缆。

4.2 屏蔽方式

从加工工艺上来说，电缆的非金属屏蔽有：绕包半导体带、挤出半导体层、半导体带和挤出半导体层复合方式；金属屏蔽有：金属带单、双层绕包，金属丝加绑扎金属带屏蔽，金属丝在同层方向的SZ绞合，小截面电缆的金属带纵包，金属和塑料复合带、挤出金属套、纵包氩弧焊等等。对于有些特殊用途的电缆，利用在绝缘表面镀上一层金属层，来达到屏蔽的效果。金属丝编织也是常用的屏蔽方式，一般使用在有较大拉力的敷设场合。

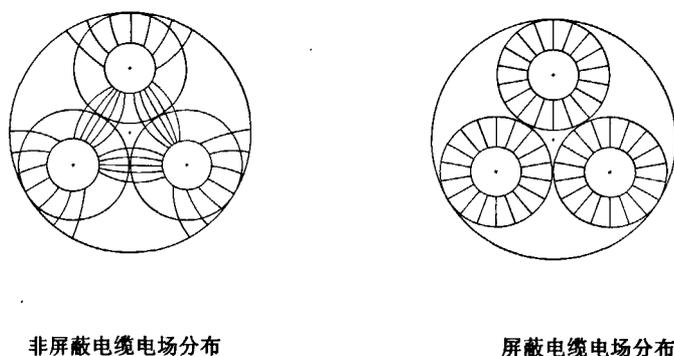


图5 非径向电场向径向电场的转变

5. 屏蔽材料

电缆非金属屏蔽常采用带状半导体材料，一般根据电缆的绝缘材料而定；在性能上符合半导体的性能，有一定的机械强度就能够满足要求。常见的有：半导体纸，半导体胶带，半导体尼龙带，半导体聚酯带，半导体布带，金属化纸，半导体无纺布带（晴纶、维纶、涤纶等）和半导体阻水带等。挤出型有：半导体聚氯乙烯，半导体橡胶：例如天然、丁腈、丁苯、乙丙、硅橡胶等配合物），半导体聚乙烯：例如可交联型、可剥离型、易剥离型、不可剥离型，

超光滑型交联聚乙烯等。屏蔽导电聚氯乙烯主要技术要求：20℃时的体积电阻率小于 $1 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，抗张强度大于 10Mpa，断裂伸长率大于 100%。交联型导电聚乙烯的主要技术要求：20℃时的体积电阻率不大于 $1 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，抗张强度 14~22Mpa，断裂伸长率大于 200~400%；可根据不同的导电类型加以选用。

电缆金属屏蔽常用的绕包材料有：铜带、合金铝带单层绕包或多层绕包，铝塑复合带绕包（单面或双面），带屏蔽一般是用厚度 0.1~0.15mm 金属带绕包而成，编织屏蔽一般用直径 0.1~0.3mm 的软铜线、镀银铜线、镀锡铜线或扁线单层或双层编织而成。铜丝、铝合金丝、铜包钢、铜包铝（或铜包铝合金）、铜合金等的疏绕和密绕；疏绕或是密绕要根据要求短路电流的大小，或者是屏蔽系数的要求，或者是机械强度的高低而定。疏绕要用较窄的金属带扎紧，避免松股现象的发生。

电缆的挤出金属套屏蔽一般是使用铜、铝、铅或铅合金，挤制成密封性较好的外屏蔽方式。这种方法是在电气上是最理想的结构。它具有屏蔽好、机械强度高、防潮及密封性能好等优点。缺点是柔软性差、允许弯曲半径大。另类是采用金属板材纵包，厚度一般为 0.7~2.4mm，再用氩弧焊成管状然后挤压成皱纹套。常用的有皱纹铝套、皱纹铜套、皱纹钢套等。它具有良好的密封性能和机械强度、有较好的弯曲性能、是十分理想的外导体形式。

由于近年来合金材料的发展，越来越多的合金材料将在电线电缆行业得到广泛的应用。比如：铝合金丝、铝合金带、铜包钢线、铜包铝线等等，对于编织类的屏蔽材料，这些合金材料具有代替铜丝或镀锡铜丝的可能性。在特定的条件下这些材料具有优良的电性能，而同时具有不生锈，较高机械强度的强度和耐疲劳特性。应用到电缆屏蔽的金属材料的性能，主要导电性能、导热性能和机械性能。常见材料的主要性能如下。

铜：良好的导电能力，100%导电率，电阻率 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。良好的导热能力，高的延展性、机械强度较高，延伸率。抗张强度：硬线 35~47 kg/mm²、软线 22~27 kg/mm²，伸长率：硬线 0.5~2.0%、软线 30~45%，比重 8.89g/cm³。线膨胀系数 $17 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，耐腐蚀性好。一般作为带状绕包。

铝：较好的导电性能，电阻率 $2.8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，导电率 62%，重量轻，比重 2.703g/cm³；线膨胀系数 $24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。抗张强度：硬线 15~21 kg/mm²、软线 7~11 kg/mm²，伸长率：硬线 0.5~2.0%、软线 15~25%；铝具有优良的耐腐蚀性，可塑性较好，易于加工成型。如果能加工成和铜同样的直径铝合金丝，达到铜丝的机械强度，作为绕包、编织金属屏蔽层代替铜丝，不但节约有限的铜资源，而且大大节约产品成本。

铜包铝（铜 15%）：较好的导电能力，68%导电率，电阻率 $2.54 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。抗张强度：硬线 18~24 kg/mm²、软线 9~12 kg/mm²，伸长率：硬线 0.5~2.0%、软线 20~30%，比重 3.6g/cm³。线膨胀系数 $21.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，较好的延展性和机械性能。

铜包铝合金线（铜 10%）：较好的导电能力，66%导电率，电阻率 $2.54 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。抗张

强度：硬线 $19\sim 25\text{ kg/mm}^2$ 、软线 $10\sim 13\text{ kg/mm}^2$ ，伸长率：硬线 $1.5\sim 3.0\%$ 、软线 $25\sim 35\%$ ，比重 3.4 g/cm^3 。线膨胀系数 $22.2\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，较好的延展性和机械性能。

铜包钢线（铜 21.3%）：既有钢的强度又有铜的优良电性能，导电率 30%，电阻率 $5.747\times 10^{-4}\ \Omega\cdot\text{m}$ 。铜占总重量的 23.6%，比重 8.02 g/cm^3 ，抗张强度：硬线 76.0 kg/mm^2 、软线 38.0 kg/mm^2 。既有铜的优良电性能、不生锈，又有钢的强度和耐疲劳特性。铜包钢线的电阻与裸铜线一样，而机械强度是裸铜线的 2 倍。改变铜的含量，可以达到不同的导电性能和机械性能。铜包钢线在较高频的屏蔽效果尤为突出，是一种理想的编织屏蔽结构。

铜合金线（铍铜、铈铜等）：机械强度比一般的铜高， $42.8\sim 52.0\text{ kg/mm}^2$ ，导电率 $80\sim 85\%$ ，伸率 $20\sim 85\%$ 。软化点高、具有较高的耐高温性，抗氧化性能好、耐腐蚀。

其他类的合金材料比较多，不再一一列举，合金材料的特点就是：耐高温，较高的机械强度、较大的伸长率、线胀系数也比较小，耐环境性也比较好。电线电缆行业如对这些特殊材料的特点加以应用，对电缆的性能无疑是有较大的提高，电力电缆的传输容量也是一个飞跃，对电线电缆绝缘材料的发展也是一种促进作用。目前，铂铑合金的长期工作温度已达到 1700°C ，由于绝缘材料发展的滞后，通常的电线电缆长期工作温度最高也只能达到 400°C ，这就限制了合金材料在这上面的应用。对于合金材料，对其机械物理性能研究的较多，对于它的电性能、热性能研究的少之又少，可电线电缆就是要应用这些材料的电性能和热性能，因此加强该方面的研究是必要。

6 结束语

繁多的金属材料种类给电缆的发展提供了一个开拓的空间，从金属材料的研究开发到电缆产品的推广应用毕竟是一个系统的产业链，协同作战和相互配合才能促进科学技术的进步和创新。对电缆来说发热是绝缘产生热击穿的主要原因之一，为了使电缆在满负荷状态安全运行，除合理选择合适的绝缘材料外，对于金属屏蔽材料的选择、合情合理的结构、也是尤为重要的。建议拓展对金属材料在屏蔽上应用的研究范围，促进电线电缆行业的发展。

参考文献：

- [1] 郑玉东.《通信电缆》. 哈尔滨电工学院. 1980.12
- [2] J·D·克劳斯 .《电磁学》. 1979.03