

35kV城市轨道交通用电力电缆的设计探究

陈 奎 何中杰 朱风雨
中铁(上海)投资有限公司 上海 200120

摘 要：电力电缆是保障城市轨道交通正常运行的重要工具，需要对电力电缆相关内容展开深入研究。本文将35kV城市轨道交通用电力电缆的设计作为研究对象，叙述其总体设计框架，从导体结构、半导体层、电缆绝缘、金属屏蔽、防水层、铠装层、隔火层、外护层等维度，整理分项设计内容，在性能测试中确认电力电缆达到城市轨道交通使用需求，可以作为城市轨道交通用电力电缆设计参考使用。

关键词：35kV电力电缆；城市轨道交通；电力电缆设计

前言：轨道交通系统通过高效率人员运输，为城市经济建设提供基础保障，对于城市良性发展具有重要意义。为实现全国各个地区经济健康发展，需要将大量轨道交通投入应用，35kV电力电缆则成为城市轨道交通生产体系的重要设计内容，需要从使用安全性、稳定性等角度，对35kV城市轨道交通用电力电缆的设计进行详细分析。

1 35kV 城市轨道交通用电力电缆总体设计框架

城市轨道交通工作环境主要为人口密集的区域，单日人流量大。这意味着如果出现突发事故，需要更多投入的人力物力资源进行救援，并要保障过程中电力资源的稳定供应。在35kV城市轨道交通用电力电缆总体设计框架中，需要做好结构的设计工作，合理规避因电力电缆引发的安全隐患。参考《额定电压1kV（ $U_m = 1.2kV$ ）到35kV（ $U_m = 40.5kV$ ）挤包绝缘电力电缆及附件第3部分》（GB/T12706-2020）和《额定电压35kV（ $U_m = 40.5kV$ ）交联聚乙烯绝缘轨道交通电力电缆》（T/ZZB0595—2018），总体设计框架需要做好以下三项内容：第一，电力电缆结构。在设计电力电缆结构时，需要选择单芯铜导体结构，既可以提升单位时间的载流量，提高电力电缆的运行负荷，也可以合理规避电力电缆发生绝缘故障时引起的相间短路问题。相比于多芯铜导体结构，采用单芯铜导体结构的电力电缆重量更低，可以有效提高电力电缆的装载量，便于远距离运输与高效率施工；第二，电力电缆材料。在选择电力电缆制造材料时，需要选择具有低烟、阻燃特性的材料，参考A类阻燃标准设计隔火层，避免在电力电缆燃烧过程中，生成干扰疏散、救援的烟雾与有毒有害气体，保护人员安全，保障机械设备的正常运行；第三，电力电缆防水层。对于大多数的电力电缆，会敷设在地下空间或管道内，这些区域容易被水侵入。为避免电力电缆受到水分

子的长时间侵蚀，加快老化、降解速度，缩短使用寿命，需要设计防水层^[1]。

2 35kV 城市轨道交通用电力电缆分项设计内容

2.1 导体结构

可以使用通过绞合紧压处理的圆形铜导体结构，作为电力电缆导体结构使用。对于导体铜线，需要参考《电工圆铜线》（GB/T3953-2024）相关规定，对于导体直流电阻，需要参考《电缆的导体》（GB/T3956-2008）相关规定。在进行电力电缆导体的绞合紧压处理时，需要检查框绞机是否拥有除尘设备，确保在绞合紧压作业中可以随时清理导体表面残留的铜屑等杂物。为提升电力电缆导体的圆整度与光滑度，在生产过程中可以考虑通过纳米级金刚石复合涂层，对导体做拉模处理。为合理提升电力电缆导体的紧压系数，需要通过分层作业模式，进行拉模、紧压处理，以此控制导体绞合紧压过程的导体损耗，合理提升导体的弯曲性能。

2.2 半导体层

在35kV城市轨道交通用电力电缆中，半导体屏蔽层可以当作拥有热阻性能的导热体使用，可以作为电力电缆的热缓冲部分，合理抵挡电力电缆运行产生的热量，让热量可以通过半导体屏蔽层接触绝缘屏蔽层。避免热量与绝缘屏蔽层直接接触，合理控制绝缘屏蔽层的老化速度。对于电力电缆的半导体屏蔽层，可以细化为内半导体屏蔽层与外半导体屏蔽层两个部分，需要使用增加碳黑的XLPE（交联聚乙烯）材料，利用内半导体屏蔽层与电力电缆导体结构扩散的金属离子，合理抑制绝缘屏蔽层的金属离子活动，以此达到削弱绝缘屏蔽层局部放电的效果在制造半导体屏蔽层时，需要检查其表面是否发生开裂、缺陷等情况，内部是否存在不溶性杂质，做好相应的处理工作，合理提升电力电缆的使用寿命。同时，需要考虑半导体屏蔽层的热膨胀系数，建议参考绝

缘屏蔽层选择的制造材料热膨胀系数,合理提升半导体屏蔽层与绝缘屏蔽层的粘附性能,避免因为电力电缆使用过程中生成的冷热循环,出现半导体屏蔽层与绝缘屏蔽层膨胀幅度不同步,发生半导体屏蔽层开裂、脱离等情况。

2.3 电缆绝缘屏蔽层

绝缘屏蔽层是保障电力电缆正常使用的核心部分,需要谨慎对待。在35kV城市轨道交通电力电缆中,额定电压可以划分为21kV、26kV两类:对于21kV电缆,适合在发生单相接地故障时,可以在1min内快速解决的A类电力电缆系统,以及仅在单相接地故障过程中,可以满足1min~2h之间短时运行的B类电力电缆系统;对于26kV电缆,则为不属于A类与B类的电力电缆C类系统。在综合分析设计内容后,本文设计的电力电缆绝缘屏蔽层将采用XLPE材料,额定电压设定为26kV,设置10.5mm的绝缘屏蔽层厚度,确保城市轨道交通的电力资源供应系统在发生接地故障时,可以快速自动解除当前电力供应,降低电力电缆绝缘屏蔽层承受的电场数据。在早期电力电缆绝缘屏蔽层制造中,采用湿法交联工艺,会导致大量水分侵入绝缘层内部,降低电力电缆的使用安全性。现在可以考虑使用三层共挤工艺,即将内半导体层、外半导体层、绝缘屏蔽层同时挤出以此达到合理预防杂质侵入绝缘屏蔽层的效果,预防绝缘屏蔽层的损伤,提升起始游离放电电压,为电力电缆正常使用提供有效保障^[2]。考虑到电缆绝缘屏蔽层如果存在微孔、突刺等情况,会导致电力电缆的电场出现畸变,让电缆绝缘屏蔽层的局部位置发生击穿现象,进而形成影响更严重的放电情况。在设置电缆绝缘屏蔽层时,需要检查结构的完整性,做好相应的修补工作。

2.4 金属屏蔽层

在电力电缆的金属屏蔽层设计中,可以考虑使用铜带屏蔽结构或铜丝屏蔽结构,但是在城市轨道交通视域下,需要考虑在发生不同故障情况下,电力电缆的最大短路容量,需要保证电力电缆的金属屏蔽层截面积 $\geq 16\text{mm}^2$ 。在综合多项因素后,本文拟采用铜丝屏蔽结构设置电力电缆的金属屏蔽层。使用软铜丝作为制造材料,采用疏绕工艺进行制造,选择直径为0.8mm的软铜丝,平均间隙 $\leq 4\text{mm}$ 。在软铜线形成的反向间隙中,通过绕包工艺设置软铜带,并进行紧固处理。在设置金属屏蔽层时,需要确保电力电缆的电场方向与金属屏蔽层的绝缘半径方向保持一致,合理预防电力电缆轴向表面放电现象。其中,通过铜丝疏绕工艺设置的金属屏蔽截面积S,可以参考公式(1)进行计算:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} (1)$$

其中,n疏绕工艺使用的铜丝数量;d为疏绕工艺使用的铜丝直径,单位为mm。对于公式(1),并不考虑疏绕铜丝的绞入率,忽略绕包工艺铜带的截面积。

又因为疏绕工艺的铜丝在前期制造与后期应用中,很容易被外力影响,勒入电力电缆的绝缘屏蔽层中,导致电力电缆绝缘线芯的完整性被破坏,出现电力电缆的局部放电量超过预期标准的现象。如果局部放电量过大,还会发生电力电缆击穿情况。所以为合理规避铜丝疏绕对电力电缆绝缘线芯造成的损伤,在设计电力电缆的金属屏蔽层时,可以考虑通过以下两种方式优化设计内容:第一种,增加尼龙带。可以在电力电缆线芯的外层,通过绕包工作,额外增加每层厚度为0.2mm的半导体尼龙带,设置1~2层即可;第二种,增加厚度。可以在三层共挤工艺中,额外增加绝缘屏蔽层的厚度,为铜丝疏绕损伤提供一定的冗余空间。

2.5 防水层

在一些自然降雨频率与降雨量较大的地区,或是地下水充沛地区,在地下空间敷设的电力电缆容易被积水长时间浸泡,水分子会逐渐渗透电力电缆外保护层,侵入电力电缆内部。水分子会加快绝缘层的老化与降解,引起电力电缆的绝缘击穿现象,缩短电力电缆的使用寿命。为此,在设计35kv城市轨道交通电力电缆时,需要设置径向的防水层。本文设计的电力电缆防水层将使用铝-塑组合结构,即在设置金属屏蔽层后,在其外部以纵向包覆的方式,设置一层厚度在0.25~0.3mm之间的铝塑复合带,选择低烟无卤阻燃聚烯烃,使用挤包工艺设置为外层护套,以此提升电力电缆的防水性能与阻燃性能。在水密性方面,铝-塑组合结构要强于聚乙烯护套防水层。通过挤包工艺设置聚烯烃护套时,会提供高温、压力的制造条件,让聚烯烃护套可以和铝塑复合带表面产生有效的粘结,提升铝塑复合带的衔接位置粘结效果,以此达到封堵水分子渗透电力电缆的路径,提升电力电缆的阻水性能。而且,在生产电力电缆径向防水层时,需要通过纵包设备,确保铝塑复合带的包覆完整,保障衔接位置粘结密实。对于铝塑复合带的衔接位置,需要保证重叠 $\geq 6\text{mm}$ ^[3]。

2.6 铠装层

在设计电力电缆时,需要增设金属材料制作的铠装层,合理预防外力因素破坏电力电缆稳定结构,避免老鼠、白蚁等生物对电力电缆造成的损伤。而且,在实际应用中,金属铠装层也可以有效提升电力电缆的阻燃

性能,保障电力电缆的正常使用。因为本文设计的电力电缆为单芯铜导体结构,所以在设计金属铠装层时,需要选择具有非磁性特性的材料,避免金属铠装层材料与单芯铜导体结构发生磁感应,生成可以提高电力电缆运行温度的涡流,进一步提升电力电缆的阻燃性能。可以优先考虑使用软铜带制造电力电缆的金属铠装层,利用软铜带的柔软性能,提升电力电缆的弯曲性能,方便敷设作业。在设计软铜带金属铠装层时,需要采用厚度为0.12mm的软铜带,使用单层重叠绕包工艺进行制造,要求软铜带的重叠率 $\geq 20\%$ 。

2.7 隔火层

为提升电力电缆的阻燃性能,在设计隔火层时,可以考虑放弃以往挤包工艺+高阻燃隔氧层材料的组合方式,采用绕包工艺+陶瓷化硅橡胶带的新组合方式,每层橡胶带厚度控制在0.4mm左右。对于陶瓷化硅橡胶带,其在350~3000℃高温条件下,可以在电力电缆外层形成质地密实的陶瓷状的铠装结构,极大提升电力电缆的防火性能与耐火性能,起到有效的阻燃效果。使用绕包工艺+陶瓷化硅橡胶带组合方式处理的电力电缆,成品外径更小,重量更低,可以有效提升电力电缆的弯曲性能。

2.8 外护层

对于电力电缆的外护层,需要选择挤包工艺+低烟无卤阻燃聚烯烃材料的组合方式。在制造配方中,需要添加可以预防白蚁啃咬的化学添加剂,确保添加剂对人体、环境的无害性。在颜色选择方面,可以考虑采用黑色外护层,合理提升电力电缆的防紫外线性能。在电力电缆露天敷设作业时,黑色的外护层也可以获得更长的使用寿命。考虑到电力电缆会被老鼠啃咬,所以需要根据老鼠的张口直径,合理设计电力电缆的外径。通过实验室测试,可以发现电力电缆直径 $> 40\text{mm}$,即超过普通

老鼠的张口直径时,电力电缆表面没有咬伤痕迹。又因为在本文设计的35kV城市轨道交通用电力电缆中,电力电缆外径 $> 40\text{mm}$,可以有效降低老鼠啃咬概率,所以在外护层的制造配方中,不需要添加驱鼠的化学添加剂。

3 35kV 城市轨道交通用电力电缆性能测试

针对本文设计的35kV城市轨道交通用电力电缆进行性能测试,现将性能指标进行整理:第一,导体电阻符合GB/T3956-2008;第二,局部放电量为声明背景灵敏度下无可检测出放电;第三,无卤性能, $\text{Ph} \geq 4.3$,电导率 $\leq 10\mu\text{S}/\text{mm}$;第四低烟性能,最小透光率 $\geq 60\%$;第五阻燃性能达阻燃A类标准;第六防水性能,将电力电缆浸泡在水中,维持72h,绝缘层表面没有水痕;第七防白蚁性能,通过蚁巢法I级蛀蚀测试;第八,防鼠性能,使用SD大鼠进行测试,电力电缆护套表面没有SD大鼠啃咬痕迹。通过以上性能测试结果,可以证明本文设计的35kV城市轨道交通用电力电缆符合(T/ZZB0595—2018)标配,可以投入城市轨道交通系统中进行应用。

结语:在设计35kV城市轨道交通用电力电缆时,需要详细分析城市轨道交通电力资源消耗情况,从导体结构、半导体层、电缆绝缘、金属屏蔽、防水层、铠装层、隔火层、外护层等方面,系统性整理设计内容,做好性能测试工作,提升电力电缆使用的安全性,保障城市轨道交通的正常运行。

参考文献

- [1]于思杰.一种阻燃B₁级防火中压电力电缆的设计、检测与应用[J].电工技术,2023,(16):157-159.
- [2]尤越.高压电动机电缆设计的探讨[J].天津化工,2023,37(02):123-125.
- [3]魏飞.基于高电压电缆的输电线路设计[J].电子技术,2022,51(10):266-267.