

中压交联电缆导体屏蔽凹陷分析及改进

刘 洋¹, 简冰玉²

(1. 上海华普电缆有限公司, 上海 201111; 2. 上海电气输配电集团有限公司, 上海 201499)

摘 要: 针对中压交联聚乙烯绝缘电缆出现的导体屏蔽凹陷现象, 分别从导体绞合、导体屏蔽材料的选取、交联工艺和设备控制等方面分析导体屏蔽凹陷的原因, 并提出了相应的改进措施和方案。

关键词: 交联聚乙烯绝缘线芯; 导体屏蔽凹陷; 导体绞合

中图分类号: TM247. 1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2024)06-0041-05

Analysis and Improvement of Conductor Shielding Depression in Medium Voltage Cross-Linked Cables

LIU Yang¹, JIAN Bingyu²

(1. Shanghai Huapu Cable Co., Ltd., Shanghai 201111, China;

2. Shanghai Power Transmission & Distribution Co., Ltd., Shanghai 201499, China)

Abstract: In response to the phenomenon of conductor shielding depression in cross-linked polyethylene insulated cables, reasons of conductor shielding depression were analyzed from aspects of conductor stranding, selection of conductor shielding materials, cross-linking and equipment control. At last, corresponding improvement measures and schemes were put forward.

Key words: cross-linked polyethylene insulated wire core; conductor shielding depression; conductor stranding

0 引 言

中压交联电缆绝缘线芯通常采用三层共挤结构, 即导体屏蔽层、绝缘层和绝缘屏蔽层分别作为内、中、外层从挤塑机中同时挤出, 生产的电缆具有紧密度良好、外观平整、亮度高、有光泽、不鼓包等特点^[1-2]。其中, 挤出的导体屏蔽层、绝缘屏蔽层应与绝缘层紧密结合, 光滑包覆, 没有凸起的绞线纹路、尖角、颗粒和擦伤痕迹^[3-4]。然而, 在实际生产过程中, 中压交联电缆的质量受到工艺、材料、设备等多种因素的影响, 如导体屏蔽材料可能会挤进导体表面缝隙处, 产生导体屏蔽凹陷现象, 导致线芯内部电场分布不均匀, 甚至击穿等问题, 严重影响电缆的电气性能和使用寿命^[4]。

本工作从导体结构、设备因素、屏蔽料选取和交联工艺参数控制等多个方面对线芯导体屏蔽凹陷问题进行全面分析, 并提出相应的改进措施, 以减轻或避免导体屏蔽凹陷现象。

1 导体屏蔽凹陷现象

目前, 中压交联绝缘线芯的生产流程为: 铜杆通过拉丝机拉制成单丝, 再经退火处理, 然后将多根铜单丝绞合成导体, 最后经过三层共挤工艺, 进入硫化管交联。然而, 大截面绝缘线芯在生产阶段, 可能出现导体屏蔽嵌入导体外层缝隙的现象, 绝缘层与导体屏蔽层的接触面不光滑, 呈“梅花”状。导体屏蔽凹陷示意图见图 1。

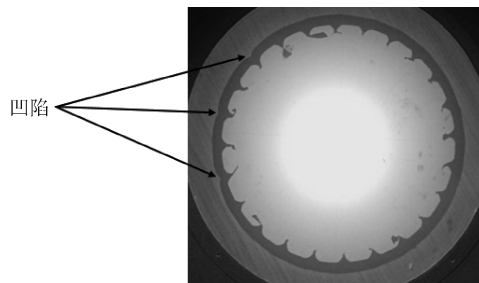


图 1 导体屏蔽凹陷示意图

2 凹陷原因分析

2.1 导体最外层松散

紧压工艺阶段, 铜导体经过紧压模具挤压变形、

收稿日期: 2024-06-29

作者简介: 刘 洋 (1976—), 男, 高级工程师。

E-mail: 13651792604@163.com

定型、反弹(导体外径大于模具直径)后形成最终形态,其最外层应紧实且无明显缝隙。若最外层铜丝间的反弹程度不一致,或铜丝的整体反弹程度过大,可能会导致最外层铜丝松散有缝隙,造成导体屏蔽料渗入,形成导体屏蔽凹陷。导体外层松散情况见图 2。

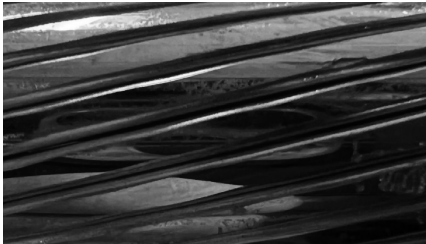


图 2 导体外层松散情况

造成导体外层松散、缝隙大的因素主要有绞合工艺不合理、导体结构设计不合理、导体外层铜丝反弹程度不均匀等,分别针对这 3 种因素进行分析。

2.1.1 导体绞合工艺

导体绞合生产时,各层铜丝间的张力控制不够、绞合速率和绞合节径比等控制不当,以及绞合模具的内径不合适等,均会使绞线导体表面松散,最外层导体之间出现缝隙,不够紧实,进而导致导体屏蔽材料向导体区域挤压,出现导体屏蔽凹陷^[5]。

2.1.2 导体结构设计

导体通常采用分层紧压设计,内层紧压系数的大小会影响外层导体紧压后的反弹程度。以生产的标称截面积为 400 mm² 的铜导体为例,导体结构按照 1+6+12+18+24/3.02 排列,工艺一和工艺二的导体实际外径分别为 23.73 mm 和 23.85 mm,内层紧压系数及导体外径参数的对比见表 1。

表 1 内层紧压系数及模具外径参数对比

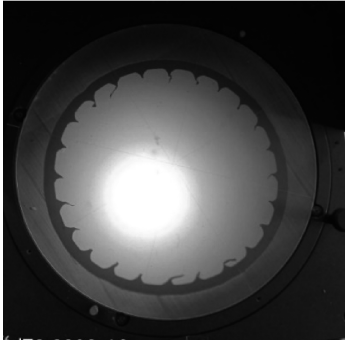
导体层数	节径比/ mm	工艺一		工艺二	
		模具外径/ mm	紧压 系数	模具外径/ mm	紧压 系数
第一层	23~27	8.3	0.85	8.3	0.85
第二层	19~22	13.6	0.87	13.7	0.86
第三层	14~16	18.9	0.87	19.1	0.86
第四层	12~14	23.6	0.91	23.6	0.92

由表 1 可知,当工艺一的内层(第二层与第三层)的紧压系数为 0.87 时,导体外径的反弹(导体外径减模具外径)为 0.1~0.2 mm;当工艺二的内层紧压系数为 0.86 时,导体外径的反弹为 0.2~0.3 mm。导体外径反弹越大,外层股线越容易松散,铜丝间的缝隙越大。

控制交联工艺、屏蔽料种类和生产设备不变,内层紧压系数不同时导体屏蔽凹陷情况见图 3。



(a) 紧压系数为0.86



(b) 紧压系数为0.87

图 3 内层紧压系数不同时导体屏蔽凹陷情况

由图 3 可知,内层紧压系数越小,导体外径的反弹越大,绝缘线芯的导体屏蔽凹陷越明显。因此,除调节导体的外层紧压系数之外,内层紧压系数也需要控制在一定的范围内,以缓解或避免导体屏蔽凹陷。

2.1.3 导体外层铜丝反弹程度不均匀

导体外层铜丝反弹不均匀,会导致外层个别铜丝间缝隙较大,产生导体屏蔽凹陷现象。主要原因为铜丝的生产来源不一致、导体最外层铜丝退火不均匀或不充分、导体接头处理不当。

1)铜丝的生产来源不一致。不同供应商提供的铜杆与不同拉丝机拉制的铜丝的性能均存在微小差异。绞线时,若最外层混用不同供应商的铜杆或不同拉丝机拉制的铜丝,尤其是大截面铜芯导体(如截面积为 400 mm²),其单丝较粗,反弹差异较大,更容易产生大间隙,导致导体屏蔽向导体外表面的缝隙处凹陷。

2)导体最外层铜丝退火不均匀或不充分。排查导体屏蔽凹陷的影响因素时发现,拉丝机功率与设备速率呈线性关系。退火工艺会导致铜丝在开机和停机时出现部分硬丝,硬丝的拉伸率较低,形变应力不均匀。当用于绞合导体最外层时,硬丝的反弹程度与其他铜丝不一致,极有可能导致外层铜丝松

散,出现导体屏蔽凹陷现象。若导体最外层铜丝退火不充分,经过紧压模具后,会在不均匀的应力作用下松散,造成导体屏蔽凹陷。

3)导体接头处理不当。目前,导体接头通常采用焊接或压接的方式。采用焊接方式时,若操作不慎,极易导致接头位置的铜丝硬化而松股。导体接头引起的凹陷一般集中在导体接头位置,可结合整根线芯的凹陷问题来判断。

2.2 屏蔽料的选型和保存

三层共挤工艺中,挤出压力相同时,屏蔽料的熔融指数与黏度成反比。熔融指数越高,黏度越低,屏蔽料更容易沿绞合导体的单线纵向嵌入导体缝隙内。因此,在选取导体屏蔽料时,应根据熔融指数来选择流动性适中的屏蔽料。

此外,若导体屏蔽料因保存不当而受潮,在挤出前又未进行烘干处理,会导致挤出的导体屏蔽料不均匀,易形成孔窝状,使绝缘层与导体屏蔽层之间的接触不平整,从而产生导体屏蔽凹陷现象。

2.3 交联工艺参数设置

交联工艺中,机头压力过大或硫化管内氮气压力设置不合理,均会导致导体屏蔽凹陷。在进行三层共挤时,为确保线芯具有良好的圆整度和同心度,挤塑机通常采用挤压式挤塑模具。挤塑机机头处于加温状态,当熔融状态下原材料与螺杆之间产生的挤出压力过大时,会使屏蔽料嵌入导体缝隙内^[6]。挤出压力受绞合导体外径、模芯与模套尺寸、模具之间相对位置等因素的影响,因此挤塑模具的结构选择至关重要^[7]。其次,在交联过程中,硫化管内氮气压力过大时,还未完全固定成型的交联线芯内部受到较大压力挤压,导致屏蔽料向导体内部产生形变和凹陷。

此外,在进行三层共挤时,若牵引器使导体的前进方向偏离挤塑机机头的中心轴,穿过模具后铜芯可能会发生偏移。挤出后的导体屏蔽料在铜芯截面上的压力分布不均,挤出压力较大的一侧容易产生导体屏蔽凹陷现象。

2.4 设备控制

在框式绞线机绞合过程中,若导体牵引轮的偏转方向与铜芯导体最外层的绞线方向不一致,收线时导体会在牵引轮上逐渐松股,松股后最外层导体因紧压度不够出现缝隙,就会产生导体屏蔽凹陷问题。

其次,框绞机张力应控制在合理范围内。排查发现,在绞线过程中,最外层铜丝进入紧压模具前,少数铜丝出现弯曲现象,说明框绞机的张力控制器

存在问题,导致铜丝的张力不均。绞线过程中张力不均现象见图 4。



图 4 绞线过程中张力不均现象

此外,中压电缆生产过程中,应正确安装悬链交联线的搓线器,可有效预防紧压导体在放线时出现的外层松股现象。搓线器沿导体外层绞合方向旋转,确保框绞机牵引轮的旋转方向和悬链生产线中储线器的旋转方向与导体最外层绞向一致,避免导体松股^[8]。

3 改进措施

3.1 导体绞合

针对因导体绞合工艺不合理、导体结构设计不合理、导体外层铜丝反弹程度不均匀等问题导致的屏蔽凹陷问题,提出以下应对方案和措施。

1)在绞线过程中,最外层避免混用不同供应商的铜杆或不同拉丝机拉制的铜丝,以防止因最外层铜丝性能差异而产生较大间隙,进而导致导体屏蔽料进入缝隙。

2)制定合理的导体绞合工艺,控制单线的抗拉强度,且在绞合时保持张力均匀、一致,并选择合适的紧压系数(包括内层紧压系数和外层紧压系数)与绞合节距。在保证绞线质量的前提下,可适当减小内层绞合节距,确保导体在绞合紧压后不会松股。导体外层铜丝反弹现象与铜丝材质、导体内层的紧压系数有关。最外层铜丝的紧压系数一定时,内层的紧压系数越小,最外层股线受到的挤压压力越大,导体外径的反弹越大。因此,导体在设计过程中,应控制好内层紧压系数。同时,在一定程度下,提高导体结构的紧压系数,可有效阻止导体屏蔽料沿纵向进入导体内部。通常,当最外层的紧压系数不小于 0.9、内层紧压系数不小于 0.87 时,能够有效避免线径反弹,紧压后的导体结构更紧密。此外,导体绞合过程中,线速率应控制在合理范围内,通常每分钟绞合长度为 13~16 m。

3) 针对铜芯在生产过程中退火不均匀或不充分的问题,应加大铜丝的质量检测频次和力度。①退火不稳定导致同一盘铜丝伸长率不稳定时,应提高镍带的更换频率,并在拉丝机开机前,对其进行检查、打磨,以保证退火稳定性。②考虑到不同铜杆厂家生产的铜丝质量不同,要求同一绞笼中采用的铜丝必须来自同一供应商。③提高拉丝液及退火冷却液的检查频率,拉丝液含脂量控制在 10%~15%,pH 控制在 7~8 之间,避免因拉丝液导致的铜丝质量问题。④连续退火高速拉丝机在开机时会存在一段退火不完全的铜丝,若用在绞合导体最外层会导致明显的缝隙。因此,对开机过程中的铜丝进行特别标识,并规定此类铜丝不能用于导体最外层。⑤针对硬丝问题,可以调整拉丝机退火工艺的调整系数曲线(见图 5 中曲线 2),将开机和关机时铜丝的拉伸率控制在正常范围内,减少出现硬丝的几率,避免导体屏蔽凹陷。

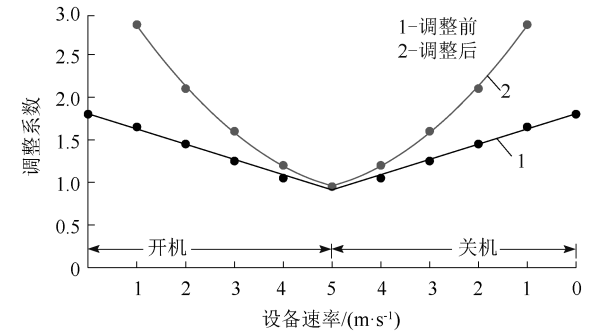


图 5 拉丝机退火工艺的调整系数曲线

4) 处理导体接头时,建议采用压接方式,避免接头处导体出现松股、断股、跳股等现象。

3.2 屏蔽材料

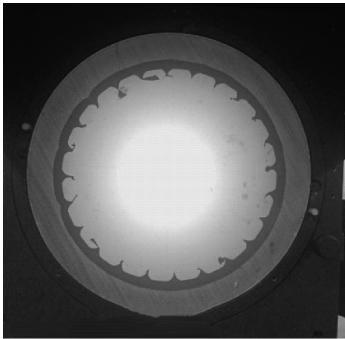
以 10 kV 普通导体屏蔽材料配方为例,选取导体屏蔽材料的原料时,可以采用以下改进方案:①在保证加工性能的基础上,采用 2.5 g·(10 min)⁻¹ 较低熔融指数的 V4110J 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物替代原有熔融指数为 3.0 g·(10 min)⁻¹ 的基体材料,以降低其流动性;②在导体屏蔽材料的配方中,选用柔性聚烯烃材料代替部分乙烯-醋酸乙烯酯共聚物,使材料特性趋硬,从而在相同温度下更容易定型,且不会出现凹陷;③采用电导率更高的炭黑,以应对基体材料变化对炭黑包覆量的影响。改进后的 10 kV 防凹陷导体屏蔽材料配方见表 2。

普通导体屏蔽材料和改进后防凹陷屏蔽材料经相同的交联工艺、设备和导体绞合工艺后生产的线芯截面见图 6。

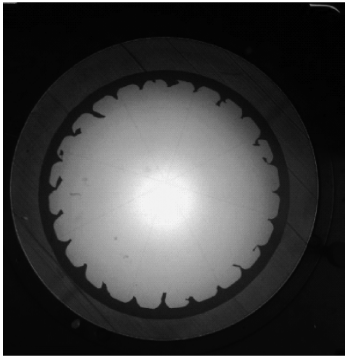
由图 6 可知,采用防凹陷屏蔽材料的导体屏蔽

表 2 改进后的 10 kV 防凹陷导体屏蔽材料配方

材料	牌号	份数/%
乙烯-醋酸乙烯酯共聚物	V4110J	38.50
聚乙烯	1C7A	10.00
聚烯烃弹性体	9371	11.00
导电炭黑	YD-280	32.00
白油	—	5.60
过氧化二异丙苯	AR 级	0.85
其他助剂	—	2.05



(a) 普通导体屏蔽材料



(b) 防凹陷屏蔽材料

图 6 普通导体屏蔽材料与改进后防凹陷屏蔽材料形成的线芯截面图

外层平整度明显提高,凹陷情况得以改善。除上述防凹陷屏蔽材料的配方改进外,还可以直接购买或自主研发防导体屏蔽凹陷屏蔽材料。其次,需要正确保存导体屏蔽材料,避免因材料受潮、挤出不均匀导致屏蔽凹陷。

3.3 交联工艺

挤塑过程中,适当减小机头压力,可采用更换合适的挤塑模具、增加导体与模芯之间的间隙、调整模芯外侧角度等方式,改善导体屏蔽凹陷。交联过程中,硫化管内氮气压力须设定在合理范围内,如 35 kV 电缆悬链生产线的氮气压力通常在 0.8~1.0 MPa,在保证绝缘线芯交联度质量的前提下,可适当降低氮气压力至 0.8~0.9 MPa,以减少因硫化管内氮气压力过大而产生的导体屏蔽凹陷问题。

3.4 设备控制

为确保导体最外层绞合紧密,改善导体屏蔽凹陷,应定期检修排查导体绞合设备(框绞机)。检查框绞机的张力控制能力,必要时可采用动平衡盘具,以保证绞线张力均匀。同时,每次开机前,须观察框绞机的牵引轮和悬链生产线中储线器的旋转方向,确保与导体最外层绞向一致,避免因方向不一致导致导体最外层松股,产生导体屏蔽凹陷现象。

4 结 论

中压交联绝缘线芯导体屏蔽凹陷会导致电缆内部电场产生畸变,严重影响电缆质量和使用寿命。导体外层铜丝松散、框绞机张力不足、铜丝退火质量不佳,以及导体屏蔽材料流动性过高等因素是导致导体屏蔽凹陷的主要原因。本工作从导体绞合、屏蔽材料选取、交联工艺改善、设备控制等方面进行分析,并提出相应的解决措施和方法,

可为电缆生产企业解决导体屏蔽凹陷问题提供有效参考和指导。

参考文献:

[1] 钱志明. 浅析高压交联电缆绝缘线芯质量缺陷的控制[J]. 电力建设, 2006(9): 66-67.

[2] 马书彦. 交联电力电缆的导体屏蔽缺陷的分析[J]. 电线电缆, 1999(6):20-21.

[3] 蒋佩南. 提高交联电缆产品质量的途径[C]//中国电工技术学会交联聚乙烯绝缘电力电缆的制造及应用技术交流会. 郑州:中国电工技术学会电线电缆专业委员会, 1991.

[4] 明祥,欧阳本红,李文杰. 交联电缆常见故障及原因分析[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 66-70.

[5] 罗风魁,赵丹丹,黄付环. 减少 10 kV 交联电缆生产过程中的绝缘缺陷 [J]. 电线电缆, 2017(1):42-43.

[6] 宋彩华,林爱华. 中压交联电缆内屏凹陷问题浅析[J]. 电子元器件与信息技术, 2021,5(6):113-114.

[7] 张宗军. 中压交联电缆导体屏蔽内嵌问题的探讨[J]. 电线电缆, 2014(1):22-24.