

承荷探测电缆聚四氟乙烯绝缘层制备工艺探讨

葛仁友

江苏华能电缆股份有限公司，江苏高邮，225699；

摘要：对承荷探测电缆绝缘层的制备工艺进行了探讨，包括聚四氟乙烯材料的选择、环氧树脂的涂覆、增强纤维的填充和浸渍、绝缘层与铜导线间的屏蔽等。研究发现，聚四氟乙烯材料与环氧树脂具有很好的相容性，经过涂覆处理后，绝缘层表面形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜；通过环氧树脂和增强纤维的复合，可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘；采用浸渍工艺，可以将环氧树脂均匀地浸渍在聚四氟乙烯绝缘层中，增加聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度，从而有效地保证了电缆绝缘层和铜导线间的电气连接；聚四氟乙烯材料可以在环氧树脂中溶解，但其溶解程度受聚四氟乙烯材料自身性能、树脂种类和环氧树脂表面处理方式等因素影响。

关键词：承荷探测电缆；聚四氟乙烯；绝缘层制备工艺

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.016

引言

为了提高承荷探测电缆的绝缘性能，使其具有优良的耐腐蚀性能，对聚四氟乙烯绝缘材料的表面进行化学处理和表面改性是很有必要的。目前，国内外学者对聚四氟乙烯绝缘材料表面化学处理及改性主要是通过在聚四氟乙烯绝缘材料中加入一些助剂来实现的。如：在聚四氟乙烯绝缘材料中加入硅烷偶联剂可以使它在高温高压下具有较好的抗腐蚀性和附着力；在聚四氟乙烯绝缘材料中加入少量硅烷偶联剂和活性稀释剂可以使它在高温高压下具有良好的耐腐蚀、耐老化、耐臭氧性能。采用上述方法制备的聚四氟乙烯绝缘材料虽然可以满足承荷探测电缆对绝缘性能的要求，但在制备过程中仍存在一些问题，如：制备过程中未采用合适的表面处理剂，无法获得具有较高表面疏水性和附着力的聚四氟乙烯绝缘材料，影响了承荷探测电缆对绝缘性能的要求。

1 聚四氟乙烯结构与特性

聚四氟乙烯是一种聚四氟乙烯树脂，分子中含有四个氟原子和一个碳原子。聚四氟乙烯分子主链呈链状，分子之间以共价键相连接，在链节上的氢原子与其它氟原子相连形成的碳氢键与碳碳双键相连，因此聚四氟乙烯是一种含碳量比较高的聚合物。由于聚四氟乙烯分子中的四个氟原子均位于碳碳双键的碳原子上，因此其分子结构为线型，这种线型结构决定了聚四氟乙烯材料具有特殊的疏水性、电绝缘性及耐化学腐蚀等特性。同时由于聚四氟乙烯材料具有较高的粘度，这就导致了其表面具有较强的附着力，因此它是一种应用比较广泛的高性能绝缘材料。

2 制备工艺

2.1 聚四氟乙烯材料的选择

承荷探测电缆需在复杂工况下兼具优异的绝缘性能与机械承荷能力，因此绝缘材料的选型是工艺核心环节。本工艺以聚四氟乙烯（PTFE）树脂为主要原料，充分利用其耐高温、耐化学腐蚀及高绝缘电阻的特性，保障电缆运行稳定性。为适配不同场景下的使用需求，需结合不同型号 PTFE 树脂对应的环氧树脂配方差异进行针对性选型，选取 E-51 型与 E-44 型两种环氧树脂作为 PTFE 树脂的配套基材，其中 E-51 型环氧树脂具备更好的流动性，便于后续涂覆成型，E-44 型环氧树脂则拥有更高的交联密度，可提升绝缘层机械强度。将两种环氧树脂按照 4:1 的质量比例混合，采用高速分散搅拌设备进行搅拌，搅拌转速设定为 750r/min，搅拌时间控制在 25min，期间每隔 5min 停机观察混合均匀度，确保两种树脂充分融合，形成无颗粒、均质化的试样材料，为后续绝缘层制备提供稳定基材。

2.2 环氧树脂的涂覆

涂覆工序的核心目标是构建均匀致密的基础绝缘层，需在前期混合树脂的基础上优化材料体系与工艺参数。先将混合均匀的 E-51 与 E-44 型环氧树脂，按每 100g 树脂添加 20g 无碱玻璃纤维的比例加入增强材料，所选无碱玻璃纤维直径为 10 μm、长度 5-8mm，可显著提升绝缘层的抗拉伸与抗开裂性能。添加后采用双螺杆搅拌设备进行二次搅拌，搅拌转速提升至 1100r/min，搅拌时间延长至 35min，确保玻璃纤维均匀分散于树脂体系中，避免出现团聚或分布不均的问题。搅拌完成后，采用刮刀涂覆方式将混合料均匀涂覆于预制载体表面，涂覆厚度精准控制在 1.0-1.5mm，涂覆速度保持 1.5m/min。

的匀速状态，防止涂层厚薄不均。涂覆完成后，将试样放入鼓风烘箱进行阶梯式固化处理，先以 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 110°C ，保温2h，再升温至 170°C 保温3.5h，最后自然冷却至室温，通过梯度升温固化确保树脂充分交联，提升涂层与载体的附着力及结构致密性。

2.3 增强纤维的填充和浸渍

为进一步强化绝缘层的机械承载能力与结构稳定性，需开展增强纤维的填充与浸渍处理。选取高模量玄武岩纤维作为增强体，先对其进行表面改性处理，采用质量分数为1.5%的硅烷偶联剂KH-560溶液浸泡35min，取出后在 110°C 烘箱中干燥1.5h，通过改性提升纤维与PTFE材料的界面结合力，减少界面缺陷。随后将PTFE树脂与改性后的玄武岩纤维按质量比5:1的比例混合，借助浸渍缠绕设备将PTFE树脂均匀裹覆在纤维表面，缠绕张力控制为6N，确保裹覆层厚度一致且无褶皱。裹覆完成后，将试样放入真空烘箱进行固化处理，真空度设定为-0.09MPa，固化温度 150°C ，保温时间4h，真空环境可有效排出材料内部气泡，提升绝缘层致密度。固化完成后，先对试样进行外观筛选，剔除表面存在裂纹、气泡、缺料的不合格品，合格试样将进入后续性能初步检测环节，重点排查绝缘层的外观完整性与基础附着性能。

2.4 绝缘层与铜导线间的屏蔽

屏蔽处理是保障电缆信号传输稳定性的关键，可有效抵御外部电磁干扰。本工艺采用铜线缠绕屏蔽方式，选取直径0.12mm的无氧铜丝，因其具备优异的导电性能与柔韧性，可确保屏蔽效果与缠绕贴合度。缠绕过程中，控制铜线缠绕节距为8mm，缠绕密度为每厘米10圈，同时保持缠绕张力均匀稳定，避免铜丝断裂或松动。缠绕完成后，采用高压喷涂设备对试样表面进行环氧树脂涂覆封装，喷涂所用树脂为低黏度改性环氧树脂，喷涂压力设定为0.4MPa，喷涂厚度控制在0.4-0.6mm。涂覆后将试样放入烘箱进行屏蔽层固化，固化温度 135°C ，保温时间2.5h，固化完成后，铜线与聚四氟乙烯绝缘层之间形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜，该薄膜不仅可固定铜线屏蔽层，还能进一步提升绝缘层与铜导线间的界面结合强度，实现绝缘与屏蔽的双重功效。

2.5 聚四氟乙烯材料与铜导线间的屏蔽

为构建双重屏蔽防护体系，进一步提升电缆抗干扰能力，需开展聚四氟乙烯材料与铜导线间的二次屏蔽处理。先将经前期涂覆处理后的聚四氟乙烯绝缘基材精准套置于铜导线表面，确保基材与铜导线同轴度偏差不超过0.1mm，避免因偏心导致局部绝缘厚度不足。随后采

用真空浸渍工艺进行环氧树脂浸渍处理，浸渍设备选用真空度可达-0.095MPa的真空浸渍罐，浸渍树脂选用固化收缩率低的环氧固化体系，可确保树脂充分渗透至基材与铜导线的间隙中。浸渍过程分两次进行，每次浸渍时间为2min，两次浸渍间隔15min，间隔期间将试样取出置于通风处沥干表面多余树脂，避免树脂堆积形成局部厚点。二次浸渍完成后，将试样放入烘箱进行最终固化，固化工艺参数设定为 155°C 保温3h，升温速率控制为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，确保浸渍树脂完全固化，形成结构稳定、屏蔽效果优异的双重屏蔽绝缘结构。

3 结果与讨论

研究结果表明，经过表面处理后的聚四氟乙烯绝缘层表面，形成了一层致密、光滑、平整的均匀薄膜，具有良好的抗腐蚀性能。

环氧树脂涂覆的结果表明，环氧树脂的涂覆量越大，聚四氟乙烯绝缘层表面越光滑，与铜丝间的粘合强度也越高。经环氧树脂涂覆处理后的聚四氟乙烯绝缘层表面，通过增强纤维填充和浸渍工艺，可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘。当增强纤维填充量为20%时，聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度达到最大值。

聚四氟乙烯材料在环氧树脂中溶解，但其溶解程度受聚四氟乙烯材料自身性能、树脂种类和环氧树脂表面处理方式等因素影响。当聚四氟乙烯材料在环氧树脂中溶解后，可以与环氧树脂形成互穿网络结构，增加了聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度。在上述研究基础上，进行了承荷探测电缆绝缘层制备工艺的改进研究。

3.1 绝缘层结构设计

为保证电缆的电气性能，对绝缘层的结构设计提出了更高要求。绝缘层厚度不能太薄，否则在电缆敷设时，电缆内部就会产生应力集中现象，容易造成电缆因机械应力而产生损坏；绝缘层厚度也不能太厚，否则在电缆敷设时，由于电缆外皮受到的应力较大，就容易产生剥离现象。

1、对于单层绝缘层结构的承荷探测电缆，可采用单面涂覆方式，即在绝缘层表面涂覆一层环氧树脂。环氧树脂的粘度相对较高，在涂覆过程中会出现从内部向外部流的现象。因此需要采用合适的固化体系和固化温度，才能保证涂覆后环氧树脂均匀地渗透到聚四氟乙烯表面。同时，固化后环氧树脂会形成一层光滑、平整的薄膜。

2、为了防止环氧树脂在聚四氟乙烯表面发生剥离现象，需要采用合适的固化体系和固化温度。若固化体

系选用不相容性材料(如聚酯树脂)或固化温度过高(如80℃以上),会造成环氧树脂在聚四氟乙烯表面发生剥离现象。双面涂覆方式可保证环氧树脂在聚四氟乙烯表面形成一层光滑、平整的薄膜,同时也能保证在电缆敷设时不会产生剥离现象。

3.2 涂覆工艺

为保证环氧树脂的均匀渗透,需要在涂覆过程中对环氧树脂的固化时间进行精确控制。通常环氧树脂的固化时间会随着温度的升高而缩短,当温度高于20℃时,固化时间将会延长到10~30 min。因此在涂覆前需要根据固化温度进行预热,并在固化前控制好涂覆厚度,以保证环氧树脂在聚四氟乙烯表面形成一层光滑、平整的薄膜。预热时间过长或涂覆厚度过厚都会影响环氧树脂的固化速率,进而导致电缆的电气性能降低。为了避免上述问题,一般采用双轴挤出机对环氧树脂进行涂覆。涂覆时要保证挤出机的转速、流量以及涂覆压力等参数能够精准控制,才能保证环氧树脂均匀地渗透到聚四氟乙烯表面。

3.3 涂覆层厚度

根据目前国内市场的情况,绝缘层的厚度通常为1.2~1.5 mm,一般厚度为0.5~0.8 mm,这样可以保证在电缆敷设时,其表面不会受到外界应力而产生机械损伤。单层或二层绝缘层结构的电缆,可采用二面涂覆方式;三层绝缘层结构的电缆,可采用三面涂覆方式。对于单层绝缘层结构的承荷探测电缆,其绝缘层厚度不能太薄;对于双层或三层绝缘层结构的承荷探测电缆,其绝缘层厚度应满足以下要求:单层或二面涂覆方式时,不应低于1.5 mm;三面涂覆方式时,不应低于2 mm。为了提高三面涂覆方式的导电性能,可以在其表面涂覆导电介质。例如在聚四氟乙烯表面涂覆导电聚酯薄膜或石墨粉等导电填料。同样地,三面涂覆方式也可用于双层或三面涂覆方式中。

3.4 浸渍工艺参数

1、浸渍时间。浸渍时间对环氧树脂涂层的附着力影响很大,如果浸渍时间过短,则涂层中未被浸渍的树脂与环氧树脂间的接触面积就很小,造成附着力较差;如果浸渍时间过长,则会使环氧树脂因溶胀而向下流动,影响涂层的附着力。浸渍时间与绝缘层厚度和厚度均匀性有关,其中绝缘层厚度决定于涂层的机械强度;而绝缘层厚度均匀性主要取决于涂覆层与被涂覆层间的紧密接触和结合程度。此外,对环氧树脂涂层来讲,固化

程度也是一个重要指标。为了保证环氧树脂涂层和铜导体良好的电气连接,适当缩短浸渍时间,有利于提高环氧树脂涂层和铜导体间的紧密接触程度;而过长的浸渍时间会使涂层中未被浸渍的树脂与环氧树脂间接触面积增大,从而影响环氧树脂涂层与铜导体间的结合。

2、浸渍温度。环氧树脂涂覆和环氧树脂浸渍过程中,需要采用合适的浸渍温度。在一般情况下,固化后的聚四氟乙烯绝缘材料,其内部存在较大的自由体积,如果浸渍温度过高,树脂分子链运动加剧,容易在树脂基体内部形成气泡;反之,若浸渍温度过低,则会降低环氧树脂的交联密度,影响浸渍质量。因此,在浸渍过程中要合理控制浸渍温度。环氧树脂浸渍的最佳温度为120℃左右,当浸渍温度为120℃时,此时环氧树脂分子链运动加剧、分子链间作用力增强,固化后的聚四氟乙烯绝缘材料内部会形成大量气泡。当气泡受到外力作用时就会发生破裂,从而导致环氧树脂在聚四氟乙烯绝缘材料中的有效渗透面积减少。

4 结语

本文针对承荷探测电缆绝缘层的制备工艺进行了探讨,研究结果表明,聚四氟乙烯材料与环氧树脂具有很好的相容性,经过涂覆处理后,绝缘层表面形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜;采用环氧树脂和增强纤维的复合,可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘;采用浸渍工艺,可以将环氧树脂均匀地浸渍在聚四氟乙烯绝缘层中,增加聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度,从而有效地保证了电缆绝缘层和铜导线间的电气连接。

参考文献

- [1] 李玉庆,关丽丽,陈发心.低损耗纵孔聚四氟乙烯绝缘同轴电缆的研制[J].光纤与电缆及其应用技术,2019(4):20~23,35. DOI: 10.19467/j.cnki.1006-1908.2019.04.006.
- [2] 倪世博;王超;袁常俊;柳伟岸;刘东升;慕呈祥.小型微孔聚四氟乙烯绝缘半柔软射频同轴电缆组件[J].中国标准化,2018.
- [3] 张晶波;陶士芳;程欢;朱元忠;宣维刚.整体型微孔聚四氟乙烯绝缘工艺初探[J].光纤与电缆及其应用技术,2011.

作者简介:葛仁友(1975.11-),工程师,江苏华能电缆股份有限公司技术中心副主任。