

# 丙烯基电缆研究开发及商业应用进展

支妍力<sup>1</sup>, 李俊材<sup>2</sup>, 邓志祥<sup>3</sup>, 潘建兵<sup>3</sup>, 晏年平<sup>3</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 本文综述了目前丙烯基电缆研发中的聚丙烯改性手段、电缆研发及投运情况以及聚丙烯电缆相关的规程规范, 根据聚丙烯电缆研发现状, 总结了聚丙烯电缆将来运行中可能遇到的问题并提出研究建议, 为聚丙烯电缆后续的研究与商业应用提供参考。

**关键词:** 聚丙烯; 电缆; 开发; 商业应用; 进展

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.07.001

## Progress in development and commercial application of polypropylene based cable

ZHI Yanli<sup>1</sup>, LI Juncai<sup>2</sup>, DENG Zhixiang<sup>3</sup>, PAN Jianbing<sup>3</sup>, YAN Nianping<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330077, China;  
2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;  
3. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** In this paper, the modification methods of polypropylene, the development and operation of polypropylene cables, and the existing regulations and specifications of polypropylene cables were reviewed. According to the research and development status of polypropylene cables, the problems that may be encountered in the future operation of polypropylene cables were summarized and research suggestions were put forward, which can provide reference for the subsequent research and commercial application of polypropylene cable.

**Key words:** polypropylene; cable; development; commercial application; progress

## 0 引言

经济的发展使得社会对电能的需求与依赖快速增长。传统的架空线输电方式易受到环境、占地面积大等因素的限制, 难以满足城市配电的需求, 电力电缆输电方式在越来越多的领域中替代架空线输电。目前, 以交联聚乙烯(XLPE)电缆为代表的挤包绝缘电缆被广泛用于170 kV电压等级以下的电力传输<sup>[1]</sup>, 并在许多领域取代绕包型油纸绝缘电缆<sup>[2]</sup>, 而海底电缆受到维护成本、电压等级等因素的限制, 主要采用的还是绕包型油纸绝缘电缆。在高压挤包电缆领域, 欧洲与日本相继成功研制了运行电压为420 kV和525 kV的XLPE电缆, 目前已有多个XLPE电缆投运与多个XLPE高压直流输电工程在建<sup>[3]</sup>。由于气候变暖导致海平面上升等环境问题敦促各国加强对环境保护的重视, 各行各业都需要迫切转型。作为电网架构的重要组成部分, 电缆

的环境兼容性、报废后的处理和回收利用也有了更高的要求。XLPE是热固性材料, 退运后只能掩埋或焚毁处理, 对环境造成不良影响, 与“碳达峰、碳中和”目标以及可持续发展理念不符。为此, 研发可以替代XLPE电缆的新型环境友好电缆成为关注与研究的重点。采用热塑性材料作为绝缘是新型电缆的重要发展方向, 可以在实现产品寿命终期后回收利用的同时, 简化工艺流程进而降低电缆制造过程中的能源消耗与温室气体排放。热塑性绝缘材料的基材包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、热塑性橡胶等, 将它们用于电缆绝缘的研究可追溯到上世纪, 在不断探索的过程中, 聚丙烯被认为是最有望用作热塑性电力电缆绝缘的基料之一。

## 1 丙烯基电缆料、电缆及商用情况

### 1.1 电缆用聚丙烯材料的改性方法

1972年, Uniroyal化工首次对聚烯烃基热塑性橡胶(polyolefin based thermoplastic rubber materi-

als,TPR 橡胶)进行现场评估,讨论其在电线电缆行业中的应用机会与商业效益。评估结果表明,热塑性TPR橡胶的电气性能与力学性能良好,电气强度、体积电阻率较高,柔韧性接近EPDM橡胶,具有加工简单、高回弹、比大多数商用橡胶质量轻等特点,有望用作较低电压等级的电缆绝缘<sup>[4]</sup>,但TPR橡胶的抗撕裂能力差、在外力作用下易破损等特点限制了其在电缆领域的应用。

聚丙烯最早出现在20世纪50年代,其具有耐高温、电气强度高、介质损耗低、造价便宜等优点,被广泛用于医疗、建筑、电气等领域。但聚丙烯柔韧性较差、在低温情况下容易发生脆断、与铜接触易降解的特点使聚丙烯不能直接用作电缆绝缘。为了提升聚丙烯的综合性能,需要对聚丙烯材料进行物理改性与化学改性,改性手段包括共混、共聚、纳米改性、接枝改性等<sup>[5]</sup>。

将聚丙烯与弹性体共混是一种有效提高聚丙烯柔韧性的手段<sup>[6]</sup>,其中熔融共混具有操作简单、改良效率高等优点,适用于工业化生产领域。对于弹性体增韧改性聚丙烯,Bucknall团队提出“银纹-剪切带”理论<sup>[7]</sup>:弹性体与聚丙烯形成的“海-岛”结构使材料在受到外力作用时产生银纹与剪切带,它们能够吸收与消耗部分外力带来的冲击,提高聚丙烯抵御外力冲击的能力。

共聚改性是将聚丙烯与乙烯等烯烃共聚,可以改善聚丙烯的抗冲击能力、延展性、可加工性等,共聚物可划分为嵌段共聚物与无规共聚物。HUANG X Y等<sup>[8]</sup>研究了丙烯-乙烯嵌段共聚物、丙烯-乙烯无规共聚物和丙烯-乙烯-丁烯三元无规共聚物的热学性能、力学性能、电学性能。结果表明,嵌段共聚物具有与等规聚丙烯(i-PP)相近的熔点,但电气强度较低、脆性高;无规共聚物的熔点较i-PP明显降低,约为139℃,但其断裂伸长率较i-PP与嵌段共聚物明显提升。另外,不同的加工方法对聚丙烯基共聚物的综合性能影响显著,采用拉挤法制备的共聚物比压力成形法制备的共聚物具有更高的断裂伸长率以及拉伸强度。

纳米改性的主要作用是提高聚丙烯材料的介电性能,部分研究中发现,添加纳米颗粒也有利于提高聚丙烯的力学性能。20世纪90年代,T J LEWIS<sup>[9]</sup>提出纳米电介质理论,为后续一系列纳米改性材料研究奠定基础。用于丙烯基材料改性的纳米颗粒有MgO、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO、SiO<sub>2</sub>等<sup>[10-11]</sup>,研究指出,纳米颗粒与聚合物基体的界面上存在大量深陷阱,深陷阱能够捕获载流子,从而降低载流子的迁

移率,提高材料的体积电阻率。另外,随着纳米颗粒质量分数的增加,材料的直流电气强度、空间电荷抑制能力等介电性能通常呈先增大后降低的趋势。

聚丙烯与改性聚合物的分子极性存在差异,为了获得相容性良好的改性丙烯基材料,可通过接枝改性引入官能团与支链到聚丙烯的非极性主链上,常用的接枝改性单体有马来酸酐及其衍生物<sup>[12]</sup>。接枝马来酸酐的作用是向聚丙烯分子中引入羧基,提高丙烯基材料与极性聚合物的相容性,以得到分散更加均匀的聚丙烯复合材料。另外,通过接枝改性可获得与纳米改性相近的效果,且可避免纳米颗粒团聚带来的负面影响,使得材料的综合性能更加稳定可靠,兼顾改性的科学性与工程可实施性<sup>[13]</sup>。

以上4类改性手段均可有效提升聚丙烯的综合性能,改性效果对比见表1。从表1可以看出,与传统XLPE相比,改性聚丙烯的力学性能较差,但热稳定性与电气性能具有显著优势。另外,接枝改性的总体效果优异,应用前景良好,且具有适用于大规模工业化生产的特点,是一种极具发展价值的技术路线。

表1 各种改性方法效果对比

项目	改性方法			
	接枝改性	共混改性	共聚改性	纳米掺杂
改性过程	接枝引入官能团	与弹性体/烯烃混合	与烯烃单体共聚	掺杂纳米颗粒
电荷积聚	抑制	加剧	抑制	抑制
电气强度	提高	提高	提高	提高
力学性能	改善低温脆性与韧性	改善低温脆性与韧性	改善低温脆性与韧性	改善韧性
面临的问题	副产物、残留单体难去除	相界面导致电气性能降低	加入烯烃单体导致熔点降低	纳米颗粒团聚导致电气性能降低

## 1.2 电缆研制

聚丙烯按照结构可分为等规、间规、无规聚丙烯,开发新型电缆的相关研究主要围绕等规与间规聚丙烯展开,研究者经过多年对材料改性的探索,部分研究工作已经推进到研制论证电缆运行可行性的原型电缆。

C D GREEN等<sup>[14]</sup>首先研究了质量分数为20%的高密度聚乙烯(HDPE)与质量分数为80%的低密度聚乙烯(LDPE)共混物的电气性能和力学性能,并测试了共混物分别在23、64、97℃条件下的电气

强度。结果表明,在97℃时,共混物的电气强度较前两种温度明显降低,即聚乙烯不适合用于高温工况下。相比乙烯基材料,丙烯基材料具有更高的熔点,能在更高温度下保持良好的电气性能,其中i-PP的熔点达到170℃,但明显的球晶边界使其硬度过高、加工性变差。另外,球晶边界对高能载流子的承受能力较低,易形成电击穿弱点。当球晶尺寸较大、分布较密时,容易发生击穿,且球晶尺寸与电气强度呈现负相关的趋势。

C D GREEN等<sup>[15]</sup>设计并制备了i-PP以及丙烯-乙烯共聚物作为绝缘的微型电缆,并进行极端弯曲试验以检验电缆导体-半导体层-绝缘界面的完整性。结果表明,丙烯-乙烯共聚物作为微型电缆绝缘时,界面接触良好,具有比XLPE电缆更高的电气强度,但绝缘的低温力学性能与聚乙烯添加量之间的关系难以推导,仅通过增加聚乙烯含量来解决聚丙烯的低温脆性比较困难。

K KURAHASHI等<sup>[16]</sup>采用均相茂金属作为催化剂制备间规聚丙烯(s-PP),然后采用乙烯-辛烯共聚物(POE)、极低密度聚乙烯(V-LDPE)与s-PP共混首次制出以s-PP为绝缘的电压等级为22 kV和600 V的电力电缆。结果表明,与i-PP相比,s-PP球晶较小,结晶度更低,在电气性能与力学性能方面具有更大优势,也有更好的抗铜降解能力。为了进一步验证电缆长期运行的可靠性<sup>[17]</sup>,对根据JEC 3408-1997研制出的22 kV s-PP绝缘电力电缆进行为期3个月的加速劣化试验以评估电缆的使用寿命。结果表明,该电缆具有超过30年的使用寿命,且相比XLPE电缆能更有效地抑制水树生长。

随着聚丙烯电缆研究工作的推进,研究者们也逐步对聚丙烯电缆的配套设施进行研究,如电缆接头等。CHEN J等<sup>[18]</sup>对35 kV聚丙烯电缆模制接头与预制接头进行了电热耦合仿真。结果表明,模制接头由于没有应力锥与活动界面,等电位线分布更加均匀,与电缆本体基本一致,安全隐患更小。同时他们对电缆接头可能出现的杂质、突起以及气隙缺陷进行进一步研究。结果表明,聚丙烯需要具备一定的硬度,以在接头内部形成良好的界面<sup>[19]</sup>。另外,在江西首条中压聚丙烯电缆工程施工过程中,发现中压聚丙烯电缆存在半导体屏蔽难以剥离的问题。该条中压聚丙烯电缆半导体沿用XLPE电缆结构,只将绝缘层更换为聚丙烯,半导体屏蔽层材料为添加炭黑的聚丙烯。制作电缆接头首先需要去除半导体屏蔽,该条电缆的半导体屏蔽材料与绝缘层融为一体,需要在加热环境下才能去除,与

XLPE电缆相比,聚丙烯电缆在制作接头时去除半导体层需要更长时间,如图1所示。为了确保供电质量、方便运维工作,开发适用于聚丙烯电缆的新型环保可剥离半导体屏蔽材料十分重要。根据江西某10 kV丙烯基电缆工程建设经验,梳理了丙烯基电缆研制亟需解决的关键问题及研制目标,如表2所示。



图1 江西某工程中压聚丙烯电缆去除半导体屏蔽  
Fig.1 Removing the semiconducting shield of medium voltage polypropylene cable for a project in Jiangxi

表2 聚丙烯电缆研制亟需解决的关键问题

Tab.2 Key problems urgently need to be solved in the development of polypropylene cable

研制环节	关键问题	研制目标
电缆料改性配方	改性手段机理研究,数值仿真,工作温度、电气性能、力学性能的权衡	综合考虑成本、性能、加工难度,选择最切实可行的技术方案
半导体屏蔽层	研制可剥离的丙烯基半导体材料	减少电缆敷设与维护施工时间,保障供电质量
工业生产	优化工艺,降低副产物产率,减少杂质引入	实现电缆原料的自主化生产,确保不同批次电缆性能的稳定

### 1.3 商业应用

目前对丙烯基电缆的研究停留在绝缘料阶段。在商业化应用方面,聚丙烯电缆已经在欧洲获得了较大规模应用,国内则处于起步阶段。

意大利普瑞斯曼集团基于PP开发出的新型热塑性绝缘化合物高性能热塑性弹性体(HPTE)是热塑性电缆领域的重要突破<sup>[20]</sup>。基于HPTE制备出的P-Laser电缆,是世界上第1种商业化用于电网的生态可持续电缆。相比XLPE电缆,P-Laser电缆的制备工艺简单、碳排放量低,可以与已有的输变电设备兼容运行。截至2010年,P-Laser电缆已生产超过3 000公里。与目前的XLPE电缆生产工艺相比,P-Laser电缆无需交联、脱气等环节,简化了生产流程。2016年,普瑞斯曼完成了525 kV和600 kV改性直流P-Laser电缆的研发,处于国际领先地位。

德国能源走廊项目中,普瑞斯曼负责敷设 2 300 km 电缆,涉及 Suedlink、A-Nord、Suedostlink 3 条 525 kV 高压直流输电工程,其中 Suedlink 工程中采用的是 XLPE 电缆,A-Nord 与 Suedostlink 工程中由普瑞斯曼负责的部分使用新开发的 525 kV 改性 P-Laser 电缆,这也是丙烯基电缆在高压直流领域一次重要的大规模应用。

除了 P-Laser 电缆,普瑞斯曼还将丙烯基材料应用到电潜泵电缆绝缘,进一步拓宽聚丙烯在电缆中的应用范围。

近年来,随着新型聚丙烯电缆研制与试运行工作的推进,我国也逐渐在聚丙烯电缆领域拥有一席之地。2016 年,上海华普电缆与上海交通大学合作开发了适用于 35 kV 以下等级电力电缆的聚丙烯绝缘材料;2018 年 2 月,该团队成功开发出环保型 PP 绝缘电缆,10 月,该电缆通过中国电力企业联合会的新产品技术鉴定,填补了国内聚丙烯电缆的空白<sup>[21-22]</sup>。

2020 年 1 月,国内首条改性聚丙烯绝缘 A 类阻燃性电力电缆(规格为 ZA-PPV-8.7/10 kV,3×400 mm)在上海挂网试运行,电缆结构如图 2 所示。电缆总长度为 478 m,采用预制式终端及中间接头,负责为徐汇中心区域某新建小区及周边商户供电。另外,东方电缆等电缆行业主要企业也在积极研发新型聚丙烯电缆。

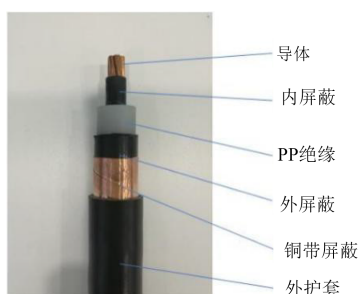


图2 ZA-PPV-8.7/10 kV 电缆

Fig.2 ZA-PPV-8.7/10 kV Cable

总而言之,聚丙烯电缆代表了新一代环境友好型电缆的发展趋势,工艺流程的简化、电压等级以及运行温度的提高让聚丙烯电缆具备足够的市场竞争力,结合“碳达峰、碳中和”的背景,聚丙烯电缆的推广应用进程势在必行。

## 2 丙烯基电缆检测规程规范

目前,全球范围内丙烯基电缆制造及运行仍处于起步阶段,相关产品检测、运维检修标准规范体系尚未建立。在聚丙烯电缆的现行有关规程规范

中,IEC 60811-607:2012《电气和光纤电缆-非金属材料测试方法》规定了电缆非金属材料各项性能指标的测试方法,被广泛用于各种类型的电缆。其中,对聚乙烯、聚丙烯等热塑性材料涉及的测试包括耐应力开裂性能、长期稳定性、熔体流动指数、空气中热老化后卷绕试验、高温处理后的拉伸强度和断裂伸长率等测试<sup>[23-25]</sup>。另外,IEC 60811-607:2012 还介绍了测试炭黑在聚乙烯与聚丙烯中分散程度的方法<sup>[26]</sup>。在研发聚丙烯电缆过程中,为了增强绝缘层与导电层的相容性,研究者们更倾向使用丙烯基材料研制导电层配方,而不是沿用常用于 XLPE 电缆导电层的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、乙烯丙烯酸丁酯(EBA)材料,该标准对评价电缆导电层的综合性能有一定的借鉴与参考意义。

IEEE 1017.3-2021《指定潜水泵电缆的推荐做法-聚丙烯绝缘》规定了用于向潜水泵电机提供三相交流电力的三芯圆形和扁平型油井电缆的技术要求,适用于相间电压低于 8 kV、导体运行温度为 -10~96℃的运行工况<sup>[27]</sup>。对聚丙烯老化性能要求为:在铜导体存在的情况下置于 121℃条件下老化 1 星期,其抗张强度与断裂伸长率的保留率要高于 75%。另外,在弯曲半径为电缆总直径的 7 倍时,电缆铠装不能发生分离。

通信电缆方面,EN 50290-2-25:2014《通信电缆第 2-25 部分:通用设计规则和结构-聚丙烯绝缘化合物》规定了用于通信电缆的聚丙烯绝缘化合物性能的最低要求,包括最高使用温度、熔体流动指数、抗张强度、断裂伸长率、收缩试验、低温弯曲试验等<sup>[28]</sup>。EN 50290-2-38:2014《通信电缆第 2-38 部分:通用设计规则和结构同轴电缆用聚丙烯绝缘》则规定了用于同轴的聚丙烯绝缘化合物的要求,针对新一类聚丙烯作出了要求,这类聚丙烯专为高抗压性能与优良介电性能的同轴电缆而设计。这类聚丙烯具有更大的硬度,但运行温度为 -10~70℃时,氧化诱导期也有所降低。另外,该标准还规定聚丙烯电缆绝缘料基于阿伦尼乌斯理论的预测寿命应高于 20 000 h,需要在 -30℃或 -15℃条件下进行低温弯曲试验<sup>[29]</sup>。

国内目前尚无专门用于聚丙烯电缆的国家标准、行业标准。团体标准方面,华普电缆等单位制定了中国电器工业协会团体标准 T/CEEIA 591—2022《额定电压 6 kV( $U_m=7.2$  kV)到 35 kV( $U_m=40.5$  kV)热塑性聚丙烯绝缘电力电缆》,为国内首个聚丙烯电缆标准,该标准于 2022 年 6 月 24 日开始执行。

上海交通大学等单位制定了上海市塑料工程技术学会团体标准 T/SHPTA 014—2021《额定电压 6 kV 到 35 kV 电力电缆用改性聚丙烯绝缘及屏蔽材料》，其中规定了用于 6~35 kV 电压等级电缆绝缘的改性聚丙烯与应用于电缆半导体层的聚丙烯、导电炭黑混合材料的多项力学、电学、抗老化性能的最低要求以及试验方法、包装、运输与贮存流程等内容。

对于聚丙烯电缆退运后的处理流程,可参照

GB/T 23685—2009《废电器电子产品回收利用通用技术要求》相关规定<sup>[30]</sup>,尽可能实现资源利用最大化、环境污染最小化。

表 3 为现行聚丙烯电缆的相关标准。从表 3 可以看出,目前针对电力用丙烯基电缆的标准较少,远不足以指导电缆选型、入网检测、运维检修等工作。因此,在丙烯基电缆商业推广同时,需着力加快相关标准研究及制修订。

表 3 现行聚丙烯电缆有关标准

Tab.3 Current relevant standards for polypropylene cables

标准名称	规范内容	标准类别	适用对象
IEC 60811-607《电气和光纤电缆-非金属材料测试方法》	聚丙烯等材料性能测试方法	国际标准	电气和光纤电缆
IEEE 1017.3-2021《指定潜水泵电缆的推荐做法-聚丙烯绝缘》	向潜水泵电机提供三相交流电力的三芯圆形和扁平型油井电缆的技术要求	国际标准	电力电缆
EN 50290-2-25《通信电缆 第2-25部分:通用设计规则和结构-聚丙烯绝缘化合物》	用于通信电缆的聚丙烯绝缘化合物的性能最低要求	欧洲标准	通信电缆
EN 50290-2-38《通信电缆 第2-38部分:通用设计规则和结构同轴电缆用聚丙烯绝缘》	用于同轴的聚丙烯绝缘化合物的要求	欧洲标准	通信电缆
T/CEEIA 591—2022《额定电压 6 kV( $U_m=7.2$ kV)到 35 kV( $U_m=40.5$ kV)热塑性聚丙烯绝缘电力电缆》	额定电压 6 kV( $U_m=7.2$ kV)到 35 kV( $U_m=40.5$ kV)热塑性聚丙烯绝缘电力电缆技术要求	中国电器工业协会团体标准	电力电缆
T/SHPTA 014—2021《额定电压 6 kV 到 35 kV 电力电缆用改性聚丙烯绝缘及屏蔽材料》	用于 6kV 至 35kV 电压等级电缆绝缘的改性聚丙烯性能最低要求	上海市塑料工程技术学会团体标准	电力电缆
GB/T 23685—2009《废电器电子产品回收利用通用技术要求》	聚丙烯电缆退运后的回收处理要求	国家标准	各类电缆

### 3 丙烯基电缆运行状态的评估

为保障电缆的正常运行,需要对电缆的运行状态以及剩余寿命等信息进行评估。随着运行年限的增加,电缆的电气强度、局部放电、介质损耗等指标会逐渐下降,电缆的检测与状态评估工作也主要围绕这些指标展开。

#### 3.1 电缆状态检测方法

电缆的电气性能检测可分为离线检测与在线检测,离线检测包括绝缘电阻、局部放电、击穿试验等。绝缘电阻是电缆绝缘性能指标判断的典型依据,反映电缆的整体绝缘水平,缺点是测试结果受环境影响较大,难以准确测出电缆的局部缺陷。局部缺陷可通过局部放电测出,电缆在长期运行过程中,局部放电会促进绝缘材料劣化并导致局部放电更易发生,加速电树生长,最终导致绝缘击穿,故局部放电量可作为绝缘优劣的判据,用来检测电缆绝缘的局部缺陷发展水平<sup>[31]</sup>。击穿试验是判断电缆绝缘水平最直接的检测方法,在绝缘老化过程中,电缆内部微孔缺陷的大小与数量都随着时间推移而

增大,造成自由体积增大,电子可在自由体积中获得更高的能量,从而更容易破坏绝缘的分子链结构,使电气强度降低,造成击穿<sup>[32]</sup>。通过对直流与交流击穿试验的结果作概率统计分析可得到电缆的整体耐压水平。

在线监测手段包括温度、护层电流、局部放电监测等。局部放电目前被 CIGRE、IEEE、IEC 多家权威机构认为是最适合评价电力电缆绝缘的测试方法,在线监测局放的关键问题在于如何提高传感器抗干扰能力,实现局部放电点准确定位及放电模式识别<sup>[33]</sup>。温度监测涉及点式测温与分布式光纤测温,其中点式测温主要在电缆线路的重要部位进行测温,而分布式光纤测温则可实现对数公里电缆的温度监测<sup>[34]</sup>。护层电流与电缆绝缘性能存在一定的联系,绝缘击穿前,常有护层电流增大的现象。

非电气性能方面,电缆绝缘的拉伸强度与断裂伸长率随着电缆热老化时间的增加均呈降低趋势<sup>[35]</sup>。另外,氧化诱导期(OIT)、熔融温度、羰基指数等也可反映电缆的热老化程度,这些测试方法通常在实验室条件下进行,需要的样品量很少。研究

表明,OIT与熔融温度在电缆长期老化后降低,羰基指数与热氧老化程度正相关<sup>[36]</sup>。

根据普瑞斯曼等单位现有电缆运行经验分析,聚丙烯电缆与传统的XLPE电缆在状态检测方法方面是兼容的,聚丙烯电缆适用于已有的标准评价体系。

### 3.2 电缆寿命评估方法

早期电缆寿命评估方法模型主要有Weibull分布模型和Arrhenius模型等。其中Weibull分布模型依赖击穿场强,如式(1)所示,而Arrhenius模型主要考虑温度的影响,如式(2)所示。

$$P(E,T) = 1 - e^{-c(E/E_0)^b(T/T_0)^a} \quad (1)$$

式(1)中: $P$ 为电缆施加电场 $E$ 后经过时间 $T$ 时发生击穿的概率; $a$ 为概率函数; $b$ 为形状系数; $c$ 为常数; $T_0$ 为当前电缆在场强 $E_0$ 下的寿命期望最小值。

$$K(T) = A_0 \exp[-E_a/(RT)] \quad (2)$$

式(2)中: $K$ 为化学反应常数; $A_0$ 为指前因子; $E_a$ 为活化能; $R$ 为气体常数; $T$ 为热力学温度。

Weibull分布模型和Arrhenius模型都是单因素评估模型。然而,造成电缆老化的因素包括电、热、机械作用等,仅靠单一指标难以建立准确有效的电缆老化模型。为此,需要对多个指标进行综合评价,得到合理的电缆老化状态评估体系。

常用的多参量评估方法有线性加权法和模糊诊断法。其中,线性加权法根据专家经验,给电缆各项指标赋予一定权重以及评分标准,对各指标进行单独打分然后乘以各自权重进行累加,得到最终的综合分数,其运算过程简单,但对专家经验依赖性大。另外,当一些单一指标超出范围时,需要立即采取停电检修措施,不适合继续用线性加权法。此时,可以采用模糊诊断法对电缆状态进行继续评估,如模糊层次分析法(FAHP)。相比线性加权法,模糊诊断法只需要人为比较各指标间的重要程度,无需给定精确的权重,其关键在于选取与老化状态具有紧密关系的性能指标作为特征参量。近年来,神经网络发展迅猛,群体智能算法等新技术在模糊诊断法中有所应用。在大量统计数据的基础上,还可开发基于历史数据与试验数据的电缆老化数据管理库,建立电缆运行状态与各指标的关系。这种方法在XLPE电缆上已有许多应用。

目前,国内聚丙烯电缆配方与选型多处于研发与挂网试运行阶段,离商业化应用还有距离,因此聚丙烯电缆从投运到退运完整生命周期的运行数据十分有限。为此,对聚丙烯电缆的状态监测与寿命评估需要借鉴目前已有的各类电缆运维中的检

测手段,结合聚丙烯电缆自身特点、运行环境以及实际运行中出现的问题制定合理有效的状态评价和寿命评估方法。

## 4 丙烯基电缆运行需重点关注的突出问题

在电缆生产与敷设过程中,面临拉伸与弯折等情况。安装与运行过程中,电缆的最小弯曲半径通常在10~20倍电缆外径之间<sup>[37]</sup>,弯曲会造成电缆外侧面产生拉伸,对于柔韧性较差的丙烯基材料,需注意拉伸带来的影响。在弯曲产生的拉伸应力作用下,丙烯基材料的晶体结构受到破坏,在电缆内部会产生裂纹等缺陷<sup>[38]</sup>,进而降低电缆的电气性能<sup>[39]</sup>。另外,电缆处于拉伸状态时,水树与电树的生长速度较未拉伸状态快,为电缆安全运行带来隐患<sup>[40]</sup>。为此,需要结合已有的标准与聚丙烯电缆的实际情况确定合理的弯曲半径。

发展丙烯基材料的重要原因是其具有较好的温度耐受能力,有望在更高电压等级与传输容量下运行。电压等级的提高需要更厚的绝缘层进行匹配,而绝缘厚度增加,半结晶高聚物绝缘在挤出过程中外层会先于内层完成冷却,而外侧体积保持不变,导致在外层-内层之间产生应力作用<sup>[41]</sup>,后续内层冷却收缩的过程中容易产生微孔等缺陷,且内层结晶度较外层低,容易形成不均匀大球晶,当其承受更高的工作场强时,容易发生击穿。因此,提高运行电压等级需要建立在改良挤出工艺、电缆绝缘更加均匀的前提之上。

丙烯基材料的低温性能同样也需要关注,受到不同配方的影响,丙烯基材料的脆化温度为-35~5℃,在我国东北、新疆、西藏等中高纬度地区,冬季气温会低于-50℃,给聚丙烯电缆的应用带来严峻挑战<sup>[42-43]</sup>。一方面需要继续研究如何降低丙烯基材料的脆化温度,另一方面针对不同地区的气候特点,选用的丙烯基绝缘材料配方应有所调整,确保环境温度在电缆运行的工作温度范围,以避免电缆因低温脆断造成严重的停电事故。除了低温环境,电缆材料的紫外光老化性能以及与铜导体接触时的耐铜老化性能也影响其是否能长期稳定运行,也是丙烯基电缆实现应用前需要解决的问题。

最后,由于未交联,PP电缆的短路温度较低,作为热塑性材料,温度远高于熔点时,聚丙烯会很快融化,可能会造成电缆变形、绝缘层厚度变化等,即使是熔点最高的等规聚丙烯(约为180℃),短路温度也难以达到目前规定的250℃,这也是电缆实现规模应用前需要研究并协调兼顾的因素。

## 5 结束语

聚丙烯熔融温度高、绝缘性能良好、具有热塑性,可回收再利用,是环保电缆的理想基料。但未经改性的聚丙烯材料存在机械韧性不足、导热能力低以及容易发生电树枝老化等缺点。目前聚丙烯电缆应用仍处于起步阶段,没有达到大规模应用阶段,基料、工艺、施工、运维检修各阶段仍有问题亟待解决:

(1)在基料研制方面,共混、接枝、共聚等改性手段可有效改良聚丙烯的性能,但在改性过程中,各种性能提升技术路线之间往往存在冲突,例如共混弹性体可改善材料的力学性能,但会降低电气强度。为此,需要关注不同改性手段、填料种类与含量对材料的影响,平衡材料的电气性能与力学性能。

(2)在工艺开发方面,需要考虑改性手段在规模化生产中的可行性以及生产环节的工艺把控,选择合适的改性材料与工艺进行研发,并在模拟实际运行的情况下完成各项性能指标的型式试验,为正式投运奠定基础。

(3)在规程规范方面,欧洲已实现聚丙烯电缆商业化应用多年,敷设里程处于领先地位,在规程规范方面也相对完善,相比之下,国内目前处于起步阶段,还需长时间的经验累积,在借鉴国外的同时,还需要根据电缆运行的实际情况,制定合理有效的标准规范。

(4)在电缆运行评价方面,为保障聚丙烯电缆可靠运行,需要通过离线检测和在线检测,基于电气性能、力学性能等指标,通过线性加权法、模糊评价法、建立数据库等手段构筑综合性能评价体系。

(5)聚丙烯电缆处于弯曲状态的结构与性能变化、绝缘厚度增加时挤出过程中内、外温差可能导致的不均匀现象以及如何提高允许的短路温度、能否将丙烯基电缆用于我国冬季温度低于 $-50^{\circ}\text{C}$ 的中高纬度地区,这些方面也需要关注。

## 参考文献:

- [1] LARSEN K B. HV cables at the turn of the century[C]//2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore: IEEE,2000.
- [2] 钟力生,任海洋,曹亮,等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术,2017,43(11):3473-3489.
- [3] 张翀,查俊伟,王思蛟,等. 高压直流电缆绝缘材料的发展与展望[J]. 绝缘材料,2016,49(2):1-9.
- [4] ALLEN K R. TPRM thermoplastic rubber in wire and cable applications[C]//1973 EIC 11th Electrical Insulation Conference. Chicago, USA:IEEE,1973.
- [5] 高铭泽. 聚丙烯基电缆绝缘材料改性方法与介电性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
- [6] 胡胜,侯一凡,王雄,等. 橡胶与弹性体增韧改性聚丙烯的研究进展[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(5):104-109.
- [7] 孙以实,张增民,傅增力,等. 弹性体共混改性聚丙烯的增韧机理[J]. 高分子学报,1995(1):82-87.
- [8] HUANG X Y, FAN Y Y, ZHANG J, et al. Polypropylene based thermoplastic polymers for potential recyclable HVDC cable insulation applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3):1446-1456.
- [9] LEWIS T J. Nanometric dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1994,1(5):812-825.
- [10] ZHOU Y, HU J, DANG B, et al. Effect of different nanoparticles on tuning electrical properties of polypropylene nanocomposites [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(3):1380-1389.
- [11] KRENTZ T, KHANI M M, BELL M, et al. Morphologically dependent alternating-current and direct-current breakdown strength in silica-polypropylene nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science,2017,134(1):44347.
- [12] 林晓燕,方伟,金政伟,等. 马来酸酐接枝改性聚丙烯研究及应用进展[J]. 石油化工应用,2020,39(11):23-27.
- [13] 胡世勋,张雅茹,邵清,等. 不同改性技术路线的聚丙烯基高压直流电缆绝缘材料综合性能比较[J]. 中国电机工程学报,2022, 42(4):1243-1252.
- [14] GREEN C D, VAUGHAN A S, STEVENS G C, et al. Recyclable power cable comprising a blend of slow-crystallized polyethylenes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(1):1-9.
- [15] GREEN C D, VAUGHAN A S, STENVENS G C, et al. Thermoplastic cable insulation comprising a blend of isotactic polypropylene and a propylene-ethylene copolymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(2):639-648.
- [16] KURAHASHI K, MATSUDA Y, UEDA A, et al. The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan:IEEE,2002.
- [17] KURAHASHI K, MATSUDA Y, UEDA A, et al. The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable (3)[J]. IEEJ Transaction on Fundamentals and Materials, 2002,123(8):1278-1283.
- [18] CHEN J, HOU S, ZHAN Y P, et al. Comparison of installation process and electric field distribution of prefabricated and molded 35kV Polypropylene cable joint[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference. Nanjing, China:IEEE, 2022.
- [19] ZHAN Y P, HOU S, FU M L, et al. Electric field simulation analysis of typical defects of 220kV molded joints of polypropylene cable[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference. Nanjing, China:IEEE,2022.
- [20] BELLI S, PEREGO G, BAREGGI A, et al. P-Laser: Breakthrough in power cable systems[C]//2010 IEEE International

- Symposium on Electrical Insulation. San Diego, USA: IEEE, 2010.
- [21] 周雁,苗森,吴良,等. 中压 26/35kV 及以下 PP 电力电缆的制备工艺:CN201710913715.X[P].2018-02-09.
- [22] 周雁,苗森,吴良,等. 中压 26/35kV 及以下 PP 电力电缆: CN201710913547.4[P].2018-02-16
- [23] International Electrotechnical Commission. Electric and optical fibre cables-Test methods for non-metallic materials-Part 511: Mechanical tests-measurement of the melt flow index of polyethylene compounds: IEC 60811-511-2012[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2012.
- [24] International Electrotechnical Commission. Electric and optical fibre cables-Test methods for non-metallic materials-Part 512: Mechanical tests-methods specific to polyethylene and polypropylene compounds-tensile strength and elongation at break after conditioning at elevated temperature: IEC 60811-512-2012[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2012.
- [25] International Electrotechnical Commission. Electric and optical fibre cables-Test methods for non-metallic materials-Part 513: Mechanical tests-methods specific to polyethylene and polypropylene compounds-wrapping test after conditioning: IEC 60811-513-2012[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2012.
- [26] International Electrotechnical Commission. Electric and optical fibre cables-Test methods for non-metallic materials-Part 607: Physical tests-test for the assessment of carbon black dispersion in polyethylene and polypropylene: IEC 60811-607-2012[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2012.
- [27] IEEE Power and Energy Society. IEEE recommended practice for specifying electric submersible pump cable-polypropylene insulation: IEEE Std 1019-2013[S]. New York,US:IEEE,2013.
- [28] European Committee for Electrotechnical Standardization. Communication cables-Part 2-25: Common design rules and construction-polypropylene insulation compounds: EN 50290-2-25: 2002[S]. Brussels, Germany:CENELEC,2002
- [29] European Committee for Electrotechnical Standardization. Communication cables-Part 2-28: Common design rules and construction; Filling compounds for filled cables: EN 50290-2-28: 2002[S]. Brussels, Germany:CENELEC,2002
- [30] 全国电工电子产品与系统的环境标准化技术委员会. 废电器电子产品回收利用通用技术要求:GB/T 23685—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [31] 时亨通,陈浩,徐阳,等. 10kV 电缆局部放电老化过程的 Weibull 统计分析[J]. 绝缘材料,2017,50(9):72-78.
- [32] 郁利超. 160kV 直流电缆绝缘材料老化特性及击穿特性研究[D]. 保定:华北电力大学,2017.
- [33] 刘文浩,吴毅江,李文泽,等. 基于随机决策森林的高压电缆局部放电模式识别[J]. 高压电器,2022,58(6):165-170,177.
- [34] 李玥. 基于光纤测温的电缆监测系统研究[J]. 电工技术,2022(4):30-31,75.
- [35] 欧阳本红,李欢,李建英,等. 不同温度热老化条件下交联聚乙烯电缆绝缘热性能和力学性能的劣化趋势研究[J]. 绝缘材料, 2018,51(1):57-63.
- [36] BELL R M, DOYLE T E, REYNOLDS A B. Correlation of oxidative induction time with thermal and radiation aging of EPR and XLPE cable insulation[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto, Canada:IEEE,1990.
- [37] 能源行业电网设计标准化技术委员会. 城市电力电缆线路设计技术规定:DL/T 5221—2016[S]. 北京:国家能源局,2016.
- [38] 苏金刚,徐航,杜伯学. 拉伸状态下聚丙烯/聚烯烃弹性体共混物的空间电荷和陷阱分布特性[J]. 高电压技术,2017,43(2): 453-459.
- [39] 李志磊,王赫宇,范铭升,等. 机械拉伸对聚丙烯绝缘空间电荷与击穿特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11): 4255-4266.
- [40] ILDSTAD E, LINDSETH T A, FAREMO H. Water treeing of XLPE cables during dynamic mechanical tension[C]//2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Juan, USA:IEEE,2012.
- [41] 王以田,郑晓泉,CHEN G,等. 聚合物聚集态和残存应力对交联聚乙烯中电树枝的影响[J]. 电工技术学报,2004,19(7):44-48.
- [42] 宋鹏先,贺春,李隆基,等. 极寒环境下户外充油电缆终端故障机理研究[J]. 绝缘材料,2022,55(6):71-77.
- [43] 周扬,蔡银哥,孙海明,等. 耐低温-50℃电缆绝缘和护套材料配方的研究[J]. 黑龙江电力,2017,39(5):411-415.

收稿日期:2022-08-17 修回日期:2022-10-17

作者简介:支妍力(1978-),女(汉族),江西南昌人,高级工程师,主要从事科技数字化、环保的工作。