

高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题

李盛涛¹, 王诗航¹, 杨柳青¹, 李建英¹, 赵健康², 景政红³

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北省 武汉市 430074; 3. 中国石化燕山石化公司, 北京市 房山区 102500)

Important Properties and Fundamental Issues of the Crosslinked Polyethylene Insulating Materials Used in High-voltage Cable

LI Shengtao¹, WANG Shihang¹, YANG Liuqing¹, LI Jianying¹, ZHAO Jiankang², JING Zhenghong³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 3. Sinopec Yanshan Petrochemical, Fangshan District, Beijing 102500, China)

ABSTRACT: High-voltage cable is the key power equipment for urban power transmission grids, as well as for the transmission of offshore wind power to the land power grid and the large-scale utilization of renewable energy. However, crosslinked polyethylene insulating material has become the bottleneck for the production of high-voltage cables in China. The entire process for the production and application of high-voltage cable crosslinked polyethylene insulating materials involves multiple steps, multiple structures, and multiple properties. In this paper, four key properties and five basic scientific issues of high-voltage cable used crosslinked polyethylene insulating materials were proposed. The purpose is to promote the research on the basic theory of high-voltage cable crosslinked polyethylene insulating material, as well as to promote the independent research and development of high-voltage cable crosslinked polyethylene insulating materials.

KEY WORDS: high voltage cable; crosslinked polyethylene; insulation

摘要: 高压电缆是城市输电网的关键电力装备, 是海上风电输送到陆地电网、实现新能源大规模利用的关键电力装备。然而, 高压电缆用交联聚乙烯绝缘料是我国高压电缆生产的“卡脖子”关键电工材料。高压电缆交联聚乙烯绝缘料的生产与应用全流程涉及多步骤、多结构、多性能。该文梳理高

压电缆交联聚乙烯绝缘料的4个关键性能, 凝练出高压电缆交联聚乙烯绝缘的5个基础科学问题。通过基础问题探讨, 旨在推进我国高压电缆交联聚乙烯绝缘料基础理论的研究及自主研发进程。

关键词: 高压电缆; 交联聚乙烯; 绝缘

0 引言

电力能源是城镇化和工业化的基础。我国电能80%以上消费在城市, 城镇化战略使得城市用电量占比和地下能源综合通道建设日益增加^[1]。高压交流电缆是城市地下能源通道的关键电力装备。国家电网有限公司统计数据显示, 截至2021年7月, 国家电网公司在运的66kV电压等级及以上高压电缆回路长度约3.7万km, 已有10个城市超过800km。按照“2060年前实现碳中和”的国家战略要求, 海上风电等新能源将会大规模发展。截至2021年6月底, 全国海上风电累计装机规模超过1110万kW, 海上风电总容量超过德国, 仅次于英国^[2]。高压直流电缆是海上风电并网的核心电力装备。因此, 高压电缆对我国电力能源的高质量发展至关重要, 也对我国能源战略具有重大意义。

我国电线电缆行业产值世界第一, 位居国内制造业第二, 仅次于汽车行业。2020年, 电线电缆行业产值约为1.2万亿元人民币, 占当年GDP比重高达1.18%。2018年, 电线电缆出口额达到215亿美元^[3]。近年来, 随着城市电缆化进程的推进和新能源利用工程的建设, 交流电缆输电电压等级由110、220kV向330、500kV发展, 直流电缆输电电

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(SGAH0000KJJS1900436); 国家自然科学基金(重点基金项目)(U2066204)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGAH0000KJJS1900436); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program)(U2066204).

压等级由±160、±320 向±500kV 发展^[4-5]。高压电缆输电线路年平均增长率超过 10%，电缆行业发展前景广阔。

交联聚乙烯绝缘是高压电缆的主要绝缘形式。然而，长期以来，我国 110kV 电压等级以上电缆生产所需交联聚乙烯绝缘料和半导电屏蔽料依赖进口、受制于人，对我国电力电缆发展和城市输电安全构成极大威胁^[6]。国外电缆绝缘料供应商主要为美国的陶氏化学和欧洲的北欧化工，国内市场被它们垄断。国外以北欧化工为代表的电缆绝缘料生产企业发展历史长，交联聚乙烯交流绝缘电压等级于 1973 年达到 84kV，2001 年达到截止目前最高的 525kV 等级，并随后在各国电缆工程中应用。北欧化工与 ABB 公司合作于 2014 年推出新一代交联聚乙烯直流电缆绝缘料，制造出±525kV/2.6GW 直流电缆系统产品，并通过了试验验证。陶氏化学的交联聚乙烯绝缘料牌号众多，研发历史悠久，也在国内获得了广泛的使用，其产品可以达到 500kV 电压等级。韩国韩华也研制出 220kV 电压等级的电缆绝缘料。

近几年，国外电缆绝缘料供货不稳定，影响国内高压电缆工程建设，电缆绝缘料成为高压电缆生产的“卡脖子”关键电工材料。因此，高压电缆交联聚乙烯绝缘料的自主研发与生产，是我国高压电缆生产迫切需要解决的关键问题。

国内部分企业开展了 110 和 220kV 电压等级电缆绝缘料研发。例如，中国石化燕山石化公司已经建成一条可实现从乙烯生产、聚合到复配过程连续生产的 110kV 电缆绝缘料生产线。扬子-巴斯夫石化公司可以生产低密度聚乙烯基料。江苏德威与浙江万马在国产低密度聚乙烯基料基础上研制出 220kV 交联聚乙烯绝缘料。目前，220kV 交联聚乙烯交流绝缘通过了预鉴定试验，并开展示范应用；±535kV/3GW 高压直流电缆系统通过型式试验，正在张北±500kV 柔性直流输电工程中示范应用，但尚未有连续生产的验证和工程应用数据。交联聚乙烯电缆绝缘料的研发与生产方面国内外差距显著，因此我国正在加快推进电缆绝缘料的国产化进程。

本文结合高压电缆交联聚乙烯绝缘的生产过程，分析了低密度聚乙烯基料流变性能，交联聚乙烯绝缘料脱气性能、耐焦烧性能以及交联聚乙烯绝缘电气绝缘性能的研究现状和研究趋势，并提出与这些性能紧密相关的基础科学问题。

1 高压电缆交联聚乙烯绝缘料关键性能探讨

高压电缆交联聚乙烯绝缘料是电力电缆最重要的电工材料。高压电缆交联聚乙烯绝缘的生产过程如下：乙烯在高温高压条件下由引发剂引发自由基反应聚合为低密度聚乙烯基料；聚合反应在管式法工业装置中进行，聚合速率快、温度高（170~300℃）、压力超高（180~350MPa）^[7]；基料经复配过程引入交联剂和抗氧剂，成为交联聚乙烯绝缘料；绝缘料挤出成型后经交联反应成为电缆绝缘，再经长达 1~2 周的脱气过程去除交联副产物，最终加工成成品电缆。流程如图 1 所示。

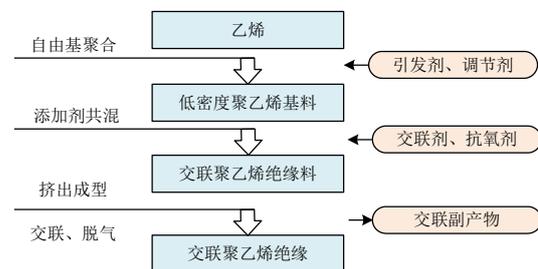


图 1 高压电缆交联聚乙烯绝缘生产流程图

Fig. 1 Flow chart of the high-voltage cable crosslinked polyethylene insulation production

高压电缆交联聚乙烯绝缘料的关键性能主要有以下 4 点：

1) 低密度聚乙烯基料的结构与流变性能。

交联聚乙烯绝缘料的流变性能主要由低密度聚乙烯基料的流变性能决定^[8]，反映其可加工性，并一定程度受复配体系的影响。低密度聚乙烯基料流变性能是指其黏度随温度与剪切速率变化而改变的特性。电缆绝缘料在高温和剪切作用下挤出时，要求其高温剪切黏度低，以降低挤出温度与压力、提高绝缘层表面光滑度；而挤出成型后的降温过程中要求高温零切黏度高，以提高电缆绝缘层的同心度。例如，150℃ 下进口基料零切黏度为 $4.45 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，而国产基料为 $3.81 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[9]。国产低密度聚乙烯基料高温剪切黏度高、高温零切黏度低，流变性能差，造成挤出压力大、挤出表面光滑度不高、绝缘层易偏心等。

低密度聚乙烯基料流变性能主要取决于分子链结构，即相对平均分子量、相对分子量分布、支化度、长支链与短支链结构等^[8,10-11]。低密度聚乙烯分子链示意图如图 2 所示。相对平均分子量越大，黏度越大^[12]；相对平均分子量接近时，相对分子量分布越宽，流动性越好；相对平均分子质

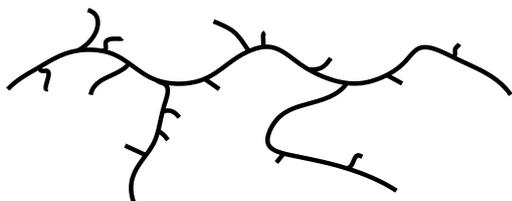


图 2 低密度聚乙烯基料分子链示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the low-density polyethylene molecular chain

量和相对分子量分布接近时，流变性受控于支化结构。不同牌号低密度聚乙烯基料的分子链结构差异很大^[13]。以相对分子量分布为例，国产低密度聚乙烯基料较北欧化工和陶氏化学基料高。以长支链数为例，国产低密度聚乙烯基料高分子量区的长支链数与进口电缆绝缘料接近，而低分子量区长支链数目明显较少。

相对平均分子质量、相对分子量分布、长支链与短支链等分子链结构决定于自由基聚合反应机理和动力学过程。当前，国内外学者对自由基聚合反应的机理和动力学过程已经开展了较为广泛的研究，并提出一些管式反应器稳态模型的建模思路与方法^[14-16]。在模拟聚合物分子的结构性质时提出了多元众体平衡方程，但其计算成本极高。较为常用的模拟低密度聚乙烯分子量分布的方法主要包括 Monte Carlo 法^[11]和二维固定轴心法^[17]，但是尚未在工程系统性建模上运用。此外，也有研究者借助于一些过程模拟软件如 Aspen Polymer Plus^[18]、gPROMS^[19]、Fluent 等进行建模，但其缺乏反应机理支撑。目前还缺少全面完整的高压聚乙烯反应器动态模型，以实现计算预测温度、压力、引发剂、调节剂以及其他各种设计与操作变量对分子链结构的调控。需要从管式法自由基反应和动力学入手研究低密度聚乙烯基料分子链结构的精确控制，设计开发具有优异挤出流变特性的低密度聚乙烯基料，研究提升基料分子链结构批次稳定性的关键技术和工艺，提升高压电缆交联聚乙烯绝缘的成型质量和相关物理性能。

2) 交联聚乙烯绝缘料脱气性能。

交联聚乙烯绝缘料脱气性能是指交联聚乙烯绝缘在脱气工艺中除去内部交联副产物的能力。脱气性能的优劣体现在脱气时间长短和残余交联副产物含量高低两方面，直接关系到电缆生产效率以及电缆绝缘性能。一方面，电缆绝缘层脱气处理所需要的时间相比其他电缆加工环节而言，在整个电缆制造时间中占比最大，约占 50%~70%。

国内外脱气性能研究以脱气过程表征为主。例如，以失重法或高效液相色谱法分析交联副产物从电缆绝缘中的脱除过程，或者模拟交联副产物扩散速度，预测脱气时间以提升脱气效率^[20-21]。北欧化工和陶氏化学两家公司生产的最新牌号的电缆绝缘料所需脱气时间明显减少，脱气时间相比旧牌号绝缘料缩短了 40%~50%^[20]，可使电缆的生产效率大幅提升。

另一方面，脱气性能改善能够提升电缆交联聚乙烯绝缘的纯净度，优化电缆绝缘性能。交联聚乙烯绝缘料脱气性能与交联剂密切相关。例如，北欧化工高压电缆绝缘料的交联剂含量约 1.6%，而国产高压电缆绝缘料为 1.75%~2%^[22]，所需脱气时间长，生产效率低，纯净度低，电缆绝缘介电损耗大。

交联反应过程不仅与复配体系相关，还受低密度聚乙烯基料的分子链结构影响^[23]，如乙烯基团、分子量、分子链支化程度等。乙烯基团可以显著提升交联效率，可在较短的时间内获得较高的凝胶含量；分子量的影响表现为较高的数均分子量可增加交联网络结构的交联密度。因为短分子链难以引入交联体系，降低了获得高凝胶含量的可能性，而长分子链增加了交联网络结构中束缚与缠结；长链支化度高的分子链线团占据体积小，更倾向于在线团内部发生交联反应，形成分子内交联点，对有效交联网络并没有贡献，会削弱交联聚合物的网络强度^[24-25]。

提升脱气性能的核心问题在于保证交联聚乙烯绝缘热、力学性能的基础上提升交联剂作用效率、降低交联剂用量、改善电缆绝缘脱气性能，从而提高高压电缆生产效率，优化交联聚乙烯绝缘纯净度，并提高高压电缆交联聚乙烯绝缘性能。因此需要揭示交联剂复配与低密度聚乙烯基料聚集态结构的关联、交联反应效率与基料分子链结构的关联，进一步优化绝缘料交联剂复配配方和复配工艺，并提出基料链结构改进方案。此外，针对目前过氧化二异丙苯交联剂可引发焦烧现象并需要脱气处理的局限性，国外学者开展的新型交联方式研究也具有借鉴意义^[26-27]。例如，通过两种接枝聚乙烯共聚物组成的混合材料^[27]，该材料在 120~140℃ 温度范围内不发生交联反应，而当温度高于 150℃ 时发生交联反应而不产生任何副产物。

3) 交联聚乙烯绝缘料耐焦烧性能。

交联聚乙烯绝缘料耐焦烧性能是指抑制其挤

出过程中过早交联、生成凝胶现象的能力。电缆绝缘料耐焦烧意味着挤出过程中允许温度波动程度更大,高温加工时间更长,加工窗口更宽,可加工性更好^[28]。此外,电缆绝缘料耐焦烧可降低凝胶含量。一方面,避免了凝胶产物堵塞挤出滤网,增加了电缆挤出长度,提升了电缆生产效率;另一方面,残留在电缆主绝缘中的凝胶少,局部缺陷少,有利于提升绝缘介质内部结构的均匀性,改善电气绝缘性能。

实验室一般采用电缆绝缘料在固定高温和剪切作用下转矩随时间的变化趋势分析其耐焦烧性能,将转矩由最小值增加 10N·m 所需时间值来定量化表征耐焦烧性能。测试结果表明,北欧化工电缆绝缘料转矩提升 10N·m 的时间较长,陶氏化学电缆绝缘料次之,而某批次国产电缆绝缘料时间最短,耐焦烧性能较差。这反映出国产电缆绝缘料连续挤出加工时间较短,电缆生产效率低,可能存在绝缘内部结构不均匀,电缆绝缘性能不足的风险。

绝缘料复配过程中引入的抗氧化剂能捕获自由基,抑制挤出过程中的焦烧现象,但同时也将抑制挤出成型后的交联反应,降低交联效率,造成绝缘层交联度下降^[29-31]。而过多使用抗氧化剂将造成交联聚乙烯电气绝缘性能的变化,尤其是直流场下的绝缘性能^[32]。可见,提升耐焦烧性能的关键在于从提升抗氧化剂作用效率,改善电缆绝缘料复配体系与复配工艺。国外研究表明,使用新型有机抗氧化辅助剂、交联剂和交联辅料,调节抗氧化剂和交联剂的协同作用,可提高电缆绝缘料的耐焦烧性能,避免挤出过程中发生焦烧现象^[28]。2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物及其衍生物等的硝基自由基能够“捕获”自由基,生成聚合物烷氧基胺,降低了抗氧化剂在低温下由于材料热氧老化造成的消耗,提高了抗氧化剂的利用效率,同时有效抑制了电缆绝缘料在挤出过程中的焦烧^[30]。此外,新型交联过氧化物(过氧化异丙烷基二异丙苯)和新型辅料(2-甲氧基-4-烯丙基苯基烯丙基醚)的使用显著提高了电缆绝缘料的耐焦烧性能,减少了电缆绝缘料中的交联副产物,提高了电缆绝缘料的生产效率^[26]。因此,从提升抗氧化剂作用效率等方面入手,改善电缆绝缘料抗氧化剂复配体系与复配工艺,从而提升电缆绝缘料耐焦烧性能是优化高压电缆交联聚乙烯加工性能和绝缘性能的关键。

4) 交联聚乙烯绝缘电气绝缘性能。

交联聚乙烯绝缘的电气绝缘性能关键指标包

含了介电损耗、介电常数、电导率、击穿场强等。相比北欧化工电缆绝缘料,国产电缆绝缘料各介电参数不足的原因包括:首先,国产电缆绝缘料化学纯净度低,表现为极性基团、交联副产物和抗氧化剂等含量高;其次,每千克国产电缆绝缘料中 100 μm 尺寸以上的杂质约有 2~5 个,而进口电缆绝缘料没有大于 100 μm 的杂质。微米级杂质的引入将导致击穿场强显著下降。此外,各个电性能参数均与交联聚乙烯绝缘分子链结构和聚集态结构相关^[32-35],例如链结构将直接影响电缆绝缘的电-机械击穿温度特性,分子量为 2500 的低密度聚乙烯,球晶尺寸为 17~20 μm ,其直流击穿场强仅为 250kV/mm,而分子量为 37000 的低密度聚乙烯,球晶尺寸仅为 6~8 μm ,直流击穿场强高达 430kV/mm^[36]。

目前多种技术途径的电缆绝缘料研发工作往往以电气绝缘性能的提升为目标^[37],尤其以提升直流电气绝缘性能为主。直流电缆绝缘料研究中强调抑制电荷注入^[38]、调控电导率特性^[39]、优化直接地电树枝特性^[40]、获得高击穿场强^[41]等。就电气绝缘性能而言,高压交流电缆绝缘和高压直流电缆绝缘差异明显,表现在电场分布特性、电热老化特性、电树枝特性等方面。电导温度依赖特性、空间电荷特性及其耦合关系等是决定交联聚乙烯直流绝缘性能的基础,而介电常数、介电损耗、介电强度等是决定交联聚乙烯交流绝缘性能的基础。高性能电缆绝缘研发需要首先明确上述多种介电特性与交联聚乙烯绝缘多级结构和杂质缺陷的量化关系。

电树枝化是交流高压电场下造成电气绝缘击穿的主要形式,能够直接反映高压电缆交联聚乙烯绝缘的老化特性和长期服役性能。电树枝引发与生长主要受交联聚乙烯结构和杂质缺陷的影响^[34]。杂质缺陷或屏蔽层凸起是电树枝引发的关键位置。国产电缆绝缘料杂质含量高、挤出绝缘表面不光滑、绝缘/屏蔽层界面凸起等缺陷数量多,造成电缆绝缘电树枝引发概率高,电气绝缘性能不足。然而,随着高压电缆电压等级不断提升,电缆绝缘微米级杂质与屏蔽层凸起缺陷位置外仍可以发现电树枝现象。国内外对电树枝研究局限在电树枝引发与生长过程的物理机制,重点关注结晶结构、抗氧化剂与其他改性填料(电压稳定剂^[42-43]、纳米填料^[41])对电树枝的影响。没有从抑制电树枝角度,对交联聚乙烯链结构提出要求,无法指导低密度聚乙烯基料分子链结构设计和复配体系设计。因此,需要从乙烯聚

合和复配过程入手，研究提升电缆绝缘料纯净度、减少电缆绝缘料缺陷数量的方法，揭示电树枝与电缆绝缘料链结构的关联，提升电缆绝缘耐电树枝能力，提高高压电缆交联聚乙烯绝缘性能。

综上所述，我国高压电缆交联聚乙烯绝缘料自主研发的关键是基料链结构与流变性能、脱气性能、耐焦烧性能和电气绝缘性能。

2 高压电缆交联聚乙烯绝缘料基础科学问题探讨

上文论述了高压电缆交联聚乙烯绝缘料的四大关键性能(即流变性能、脱气性能、耐焦烧性能和电气绝缘性能)。实现这些性能的提升是电缆绝缘料自主研发工作中的关键任务，也是重要挑战。基于关键性能的分析，本文凝练出 5 个基础科学问题，如图 3 所示。

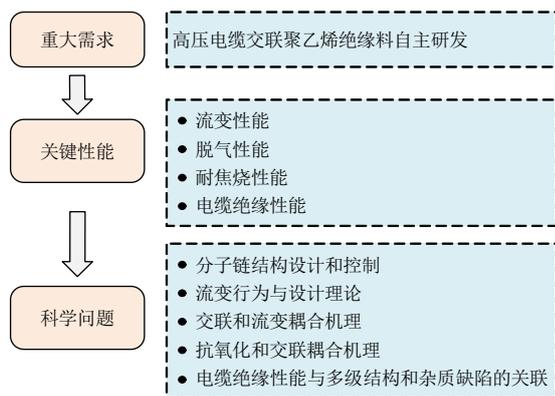


图 3 高压电缆交联聚乙烯绝缘料自主研发的基础科学问题

Fig. 3 Scientific issues of research on XLPE insulating materials for high-voltage cable

2.1 低密度聚乙烯分子链结构设计和控制

交联聚乙烯绝缘料的流变性能与低密度聚乙烯分子链结构直接相关。同时，分子链结构还决定了其可交联性以及添加剂复配过程，影响分子链交联网状结构和结晶结构。我国目前采用进口管式法工业装置，经超高压高温反应合成制备低密度聚乙烯基料，这对装置的安全稳定运行要求极高。国内相关化工企业不掌握关键专利技术，缺乏生产运行过程安全操作边界工艺技术研究基础，而对低密度聚乙烯的多参数工艺调整必然引发巨大的安全生产风险性，不能对基料进行全面系统的工艺条件优化。这些制约了低密度聚乙烯基料的分子结构优化与性能提升。

针对低密度聚乙烯分子链结构设计和控制这

一科学问题，首先要综合加工性能和电气绝缘性能需求，明确低密度聚乙烯基料分子链结构的优化方案。然后，结合模拟仿真计算、小试装置试验、反应控制技术等方面开展研究工作。需要开展的研究包括：构建低密度聚乙烯分子链结构与自由基聚合基元反应的关联；低密度聚乙烯合成的实验研究；高压低密度聚乙烯管式法聚合工艺的模拟计算方法；管式反应器各区转化率控制技术；控制低密度聚乙烯链结构的关键技术和工艺等。

2.2 电缆绝缘料流变行为与设计理论

电缆绝缘料的分子链设计需要以优异的流变性能获得目标分子链结构。同时，流变性能也影响着电缆绝缘料的复配过程，即影响抗氧剂的添加过程。针对电缆绝缘料流变行为与设计理论这一科学问题可以开展如下研究工作：构建电缆绝缘料低密度聚乙烯基料分子链结构与流变行为的关联；研究低密度聚乙烯基料流变行为与复配过程关联的机理；研究电缆绝缘料应用周期内熔体黏弹特性和动态成型中的流动状态，提出电缆绝缘料挤出流变行为理论，进而设计符合不同电压等级电缆挤出加工工艺的流变行为；研究绝缘料挤出动态成型调控方法及其对绝缘成型后多级结构的影响规律与机制。

2.3 电缆绝缘料交联和流变耦合机理

优化设计电缆绝缘的复配体系，精准控制电缆挤出动态成型过程，需要关注电缆绝缘料交联和流变的耦合机理，针对这一科学问题可以开展如下研究工作：掌握交联剂扩散迁移对交联的作用规律和机理；研究交联剂在电缆绝缘料中的扩散特征与长时稳定性；揭示交联与流变的耦合作用机制，从分子链结构层面研究流变特性与交联特性的相互影响作用；研究交联流变耦合提高交联效率的理论，研究提升交联剂交联效率的理论方法。

2.4 电缆绝缘料抗氧化和交联耦合机理

改善电缆绝缘料的焦烧特性，优化电缆绝缘料复配体系，提升电缆绝缘料的加工性，需要关注电缆绝缘料抗氧化和交联耦合机理，针对这一科学问题可以开展如下研究工作：研究电缆绝缘料抗氧化机理；研究绝缘料挤出过程中的产热规律，厘清内生固相杂质与基料流变行为的关联；阐明复配体系中抗氧剂扩散和迁移的微观机制，揭示抗氧剂微观行为与电缆绝缘料耐焦烧性能的关联，研究提高电缆绝缘料耐焦烧性能的理论和方法；研发新型抗焦烧复配体系；研究交联和抗氧化在分子层面的匹

配机制,研究交联与耐焦烧的耦合机理及两者同时提高的理论。

2.5 电缆绝缘性能与交联聚乙烯多级结构和杂质缺陷的关联

高压电缆交联聚乙烯绝缘料研发的目标是使得最终高压电缆绝缘的性能优异。随着高压电缆电压等级和传输容量的提升,不能仅凭增加聚烯烃绝缘厚度实现整体性能提升,否则将造成电缆散热问题和电缆生产、安装问题,交联聚乙烯承受的平均工作电场不断增强,对交联聚乙烯绝缘料性能提出了极高的要求。因此,需要建立电缆绝缘性能与交联聚乙烯多级结构和物理化学杂质缺陷的关联,探索交联聚乙烯绝缘性能强化方法。掌握分子链结构、聚集态结构、各类结构缺陷和不同尺度杂质对交联聚乙烯绝缘电荷输运特性、电场分布特性、介电强度、长期耐老化特性和电树枝引发与生长过程的影响机制具有重要意义。如上文所述,交联聚乙烯的多级结构和杂质缺陷与自由基聚合、添加剂复配、挤出成型、交联与脱气过程等息息相关。因此,厘清电气绝缘性能与交联聚乙烯多级结构和杂质缺陷的关联,是对高性能电缆绝缘料研发与生产中各个环节提出具体需求的理论基础。

3 结论

本文梳理了高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能,提出相关的基础科学问题。

1) 交联聚乙烯绝缘料的流变性能是影响高压电缆绝缘成型质量的关键性能,主要受低密度聚乙烯基料流变性能和复配体系影响。而基料流变性能受控于分子链结构,因此需要研究的基础科学问题是低密度聚乙烯分子链结构设计和控制、电缆绝缘料流变行为与设计理论。

2) 电缆绝缘料脱气性能和耐焦烧性能是关乎其可加工性能优劣和生产效率高下的关键性能,也会影响电缆绝缘层的电气绝缘性能。需要研究的基础科学问题是电缆绝缘料交联和流变耦合机理、抗氧化和交联耦合机理。通过优化复配体系、提高交联效率等,可实现脱气性能和耐焦烧性能的提升。

3) 交联聚乙烯绝缘的电气绝缘性能是保障高压电缆安全可靠运行的关键性能,构建其与交联聚乙烯多级结构和杂质缺陷的关联,是提升电气绝缘性能的基础科学问题。

4) 高压电缆交联聚乙烯绝缘研究对应于电缆

绝缘料生产和应用的全流程,涉及多尺度结构和多种物理性能,突破这些基础科学问题,是实现各项关键性能协同提升的基础。

参考文献

- [1] 陈树民. 我国电力需求影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
CHEN Shumin. Study on influencing factors of electricity demand in China[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018(in Chinese).
- [2] GWEC. Global offshore wind report 2021[EB/OL]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2021[2022-04-25]. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2021/>.
- [3] 国家数据 [EB/OL]. 北京: 国家统计局, 2022[2022-04-25]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm>. National Data[EB/OL]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2022[2022-04-25]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm>(in Chinese).
- [4] 田诗语, 卢奕城. 500kV 电缆纳入城市综合管廊的应用研究[J]. 电工技术, 2019(8): 58-59.
TIAN Shiyu, LU Yicheng. Application research on incorporating 500kV cables into urban utility tunnel[J]. Electric Engineering, 2019(8): 58-59(in Chinese).
- [5] 张华. 海淀 500kV 电缆工程的技术研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHANG Hua. Research and application of the technology of Haidian 500kV cable project[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014(in Chinese).
- [6] 李国倡, 魏艳慧, 雷清泉, 等. 高压电缆半导电屏蔽料关键问题及研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1271-1285.
LI Guochang, WEI Yanhui, LEI Qingquan, et al. Key problems and research progress of semi-conductive shielding materials for high voltage cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1271-1285(in Chinese).
- [7] 张师军, 乔金樑. 聚乙烯树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
ZHANG Shijun, QIAO Jinliang. Polyethylene resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011(in Chinese).
- [8] MENDELSON R A, BOWLES W A, FINGER F L. Effect of molecular structure on polyethylene melt rheology. II. Shear-dependent viscosity[J]. Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics, 1970, 8(1): 127-141.
- [9] 罗军, 潘晨美, 帅选阳, 等. 超高压交联聚乙烯电缆绝缘料流变行为研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(11): 49-53.
LUO Jun, PAN Chenmei, SHUAI Xuanyang, et al. Study on rheological behavior of EHV XLPE cable insulation materials[J]. Insulating Materials, 2015, 48(11): 49-53(in

- Chinese).
- [10] DORDINEJAD A K, SHARIF F, EBRAHIMI M, et al. Rheological and thermorheological assessment of polyethylene in multiple extrusion process[J]. *Thermochimica Acta*, 2018(668): 19-27.
- [11] PLADIS P, MEIMAROGLOU D, KIPARISSIDES C. Prediction of the viscoelastic behavior of low-density polyethylene produced in high-pressure tubular reactors [J]. *Macromolecular Reaction Engineering*, 2015, 9(3): 271-284.
- [12] GABRIEL C, LILGE D. Molecular mass dependence of the zero shear-rate viscosity of LDPE melts: evidence of an exponential behaviour[J]. *Rheologica Acta*, 2006, 45(6): 995-1002.
- [13] ZHOU Zhe, PESEK S, KLOSIN J, et al. Long chain branching detection and quantification in LDPE with special solvents, polarization transfer techniques, and inverse gated ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Macromolecules*, 2018, 51(21): 8443-8454.
- [14] VALLERIO M, LOGIST F, VAN ERDEGHEM P, et al. Model-based optimization of the cooling system of an industrial tubular LDPE reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(4): 1656-1666.
- [15] AZMI A, AZIZ N. Simulation studies of low-density polyethylene production in a tubular reactor[J]. *Procedia Engineering*, 2016(148): 1170-1176.
- [16] GUPTA S K, KUMAR A, KRISHNAMURTHY M V G. Simulation of tubular low-density polyethylene [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1985, 25(1): 37-47.
- [17] KRALLIS A, MEIMAROGLOU D, KIPARISSIDES C. Dynamic prediction of the bivariate molecular weight - copolymer composition distribution using sectional-grid and stochastic numerical methods[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(17): 4342-4360.
- [18] BOKIS C P, RAMANATHAN S, FRANJIONE J, et al. Physical properties, reactor modeling, and polymerization kinetics in the low-density polyethylene tubular reactor process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(5): 1017-1030.
- [19] ASTEASUAIN M, TONELLI S M, BRANDOLIN A, et al. Dynamic simulation and optimization of tubular polymerization reactors in gPROMS[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2001, 25(4-6): 509-515.
- [20] SUN Yabin, PERSON T. Crosslinked polyethylene insulation materials technology for reduction of cable degassing time[C]//*Proceedings of 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. Dallas: IEEE, 2016: 1-4.
- [21] SMEDBERG A, BOREALIS A B, WALD D. Determination of diffusion constants for peroxide by-products formed during the crosslinking of polyethylene[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Vancouver: IEEE, 2008: 586-590.
- [22] 刘美兵, 杨凯军, 屠德民. 高压 XLPE 电缆绝缘料综合性能的对比分析[J]. *电线电缆*, 2014(2): 21-25. LIU Meibing, YANG Kaijun, TU Demin. Comparative analysis of performances in HV XLPE cable materials [J]. *Electric Wire & Cable*, 2014(2): 21-25(in Chinese).
- [23] BREMNER T, RUDIN A, HARIDOSS S. Effects of polyethylene molecular structure on peroxide crosslinking of low density polyethylene[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1992, 32(14): 939-943.
- [24] SMEDBERG A, HJERTBERG T, GUSTAFSSON B. Characterization and crosslinking properties of a poly(ethylene-co-divinylsiloxane)[J]. *Polymer*, 2004, 45(14): 4845-4855.
- [25] SMEDBERG A, HJERTBERG T, GUSTAFSSON B. Effect of molecular structure and topology on network formation in peroxide crosslinked polyethylene[J]. *Polymer*, 2003, 44(11): 3395-3405.
- [26] CARONIA P J, COGEN J M, DLUZNESKI P. Novel polymer crosslinking chemistries for cable insulation[C]//*Proceedings of 2014 IEEE Electrical Insulation Conference(EIC)*. Philadelphia: IEEE, 2014: 392-396.
- [27] MAURI M, PETERSON A, SENOL A, et al. Byproduct-free curing of a highly insulating polyethylene copolymer blend: an alternative to peroxide crosslinking [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(42): 11292-11302.
- [28] GUSTAFSSON B, BOSTROM J O, DAMMERT R C. Stabilization of peroxide crosslinked polyethylene[J]. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1998, 261-262(1): 93-99.
- [29] ZHANG Xiaohu, YANG Hongmei, SONG Yihu, et al. Assessment of hindered phenol antioxidants on processing stability of peroxide-cure LDPE by rheology and DSC analysis[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126(3): 939-946.
- [30] CHAUDHARY B I, CHOPIN L, KLIER J. Nitroxyls for scorch suppression, cure control, and functionalization in free-radical crosslinking of polyethylene[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2007, 47(1): 50-61.
- [31] ZHANG Xiaohu, YANG Hongmei, SONG Yihu, et al. Influence of binary combined systems of antioxidants on the stabilization of peroxide-cured low-density polyethylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126(6): 1885-1894.
- [32] WANG Shihang, CHEN Peixing, LI Huan, et al. Improved

- DC performance of crosslinked polyethylene insulation depending on a higher purity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1809-1817.
- [33] NILSSON S, HJERTBERG T, SMEDBERG A, et al. Influence of morphology effects on electrical properties in XLPE[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(6): 3483-3494.
- [34] XIE Ansheng, LI Shengtao, ZHENG Xiaoquan, et al. The characteristics of electrical trees in the inner and outer layers of different voltage rating XLPE cable insulation [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(12): 125106.
- [35] MIN Daomin, LI Shengtao, OHKI Y. Numerical simulation on molecular displacement and DC breakdown of LDPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 507-516.
- [36] KOLESOV S N. The influence of morphology on the electric strength of polymer insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1980, 5(5): 382-388.
- [37] 李盛涛, 王诗航, 李建英. 高压直流电缆料的研发进展与路径分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1399-1411. LI Shengtao, WANG Shihang, LI Jianying. Research progress and path analysis of insulating materials used in HVDC cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1399-1411(in Chinese).
- [38] WANG Shihang, CHEN Peixing, YU Shihu, et al. Nanoparticle dispersion and distribution in XLPE and the related DC insulation performance[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2349-2357.
- [39] 尹毅, 陈炯, 李喆, 等. 纳米 SiO₂/聚乙烯复合材料强场电导特性的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 22-26.
YIN Yi, CHEN Jiong, LI Zhe, et al. High field conduction of the composites of low-density polyethylene/nano-SiO₂ [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 22-26(in Chinese).
- [40] 王雅妮, 李光道, 吴建东, 等. 不同温度下高压直流电缆纳米复合绝缘中的周期性直流接地电树枝特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3674-3681.
WANG Yani, LI Guangdao, WU Jiandong, et al. Characteristics of periodic grounded DC tree in high voltage DC cable nano-composite insulation under different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3674-3681(in Chinese).
- [41] LI Shengtao, YIN Guilai, CHEN G, et al. Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1523-1535.
- [42] WUTZEL H, JARVID M, BJUGGREN J M, et al. Thioxanthone derivatives as stabilizers against electrical breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable applications[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015(112): 63-69.
- [43] 李春阳, 韩宝忠, 张城城, 等. 电压稳定剂提高 PE/XLPE 绝缘耐电性能研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4850-4864.
LI Chunyang, HAN Baozhong, ZHANG Chengcheng, et al. Review of voltage stabilizer improving the electrical strength of PE/XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4850-4864(in Chinese).



李盛涛

在线出版日期: 2022-04-11。

收稿日期: 2021-10-11。

作者简介:

李盛涛(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电介质理论及其应用、电缆绝缘材料与绝缘技术、电气功能材料及器件等研究工作, sli@mail.xjtu.edu.cn;

王诗航(1990), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电缆绝缘材料与纳米复合电介质的研究, wangshih@mail.xjtu.edu.cn;

杨柳青(1986), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事能量储存和电气绝缘相关的功能电介质材料等研究, yanglq@mail.xjtu.edu.cn;

李建英(1972), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压绝缘技术和电工绝缘材料等相关研究, lijy@mail.xjtu.edu.cn;

赵健康(1963), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事电力电缆运行技术等研究工作, zhaojiankang@mail.xjtu.edu.cn;

景政红(1969), 女, 教授级高工, 主要从事合成树脂材料工业合技术研究与应用、电缆绝缘材料制备技术与加工应用研究, jingzh.yssh@sinopec.com。

(编辑 胡琳琳)

Important Properties and Fundamental Issues of the Crosslinked Polyethylene Insulating Materials Used in High-voltage Cable

LI Shengtao¹, WANG Shihang¹, YANG Liuqing¹, LI Jianying¹, ZHAO Jiankang², JING Zhenghong³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University);

2. China Electric Power Research Institute; 3. Sinopec Yanshan Petrochemical)

KEY WORDS: high voltage cable; crosslinked polyethylene; insulation

High-voltage cable is the key power equipment for urban power transmission grids, as well as for the transmission of offshore wind power to the land power grid and the large-scale utilization of renewable energy. In recent years, the domestic crosslinked polyethylene insulation technology has been extensively studied and has achieved rapid development.

The entire process for the production and application of high-voltage cable crosslinked polyethylene insulating materials involves multiple steps, multiple structures, and multiple properties. In this paper, four key properties were proposed, namely the molecular structure and rheological properties of the low-density polyethylene base materials, the degassing performance, the scorch resistance, and the insulation properties of the crosslinked polyethylene insulation materials, as shown in Fig. 1. The paper reviews the current research status and research trends related to these properties.

As shown in Fig. 1, five basic fundamental scientific issues are proposed, namely the design and regulation of the low-density polyethylene molecular structure, the rheological behavior and its design theory of low-density polyethylene, the coupling mechanism of the crosslinking and the rheology in crosslinkable polyethylene, the coupling mechanism of the anti-oxidation and the crosslinking in crosslinkable polyethylene, and the correlation of the insulation performance and the multilevel structure as well as impurity defects. The importance of these issues and the research work that needs to be carried out in the future are put forward.

The purpose is to promote the research on the basic theory of high-voltage cable used crosslinked polyethylene insulating materials, as well as to promote the independent research and development of the advanced high-voltage cable.

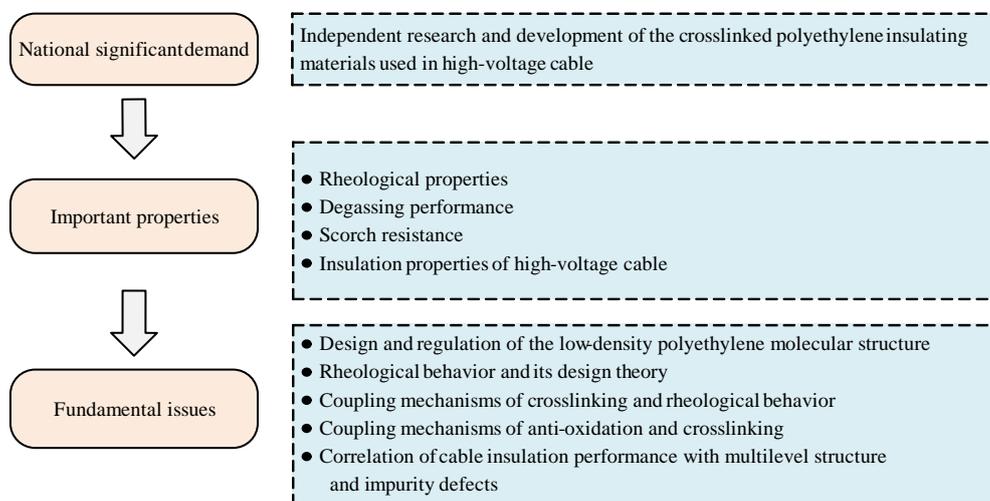


Fig. 1 Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable