

高压、超高压直流电缆绝缘料用 LDPE 性能研究

刘淑军¹ 吴启仁¹ 曾浩² 高凯²

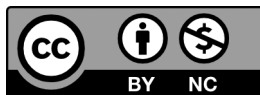
1. 中国三峡新能源（集团）股份有限公司，北京；
2. 南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院有限公司），南京

摘要 | 为实现碳达峰碳中和目标，应构建以新能源为主体的新型电力系统，而高压、超高压直流电缆将成为新型电网的主力骨干网络组成部分。直流电缆的研究重点是绝缘料，然而行业内对绝缘料用低密度聚乙烯（LDPE）研究较少。本文选取国内外中高压电缆绝缘料专用的四种 LDPE A、B、C、D，通过高温凝胶渗透色谱（GPC）、拉伸测试、体积电阻率测试、直流击穿测试以及杂质检测等手段，对比性能参数，优选出基础树脂 A，为实现超高压直流电缆绝缘料国产化提供了实验和数据支撑。

关键词 | 超高压直流电缆；LDPE；凝胶渗透色谱；体积电阻率；直流击穿

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

随着输送容量需求的不断提高以及跨海工程、洲际联网工程的日益增加，特别是为实现“碳达峰 碳中和”目标，建设以新能源为主体的新型电力系统，直流输电应用越来越广泛。与交流输电相比，直流输电具有传输容量大、损耗

基金项目：中国三峡新能源集团科技项目“三峡新能源柔性直流输电工程国产化高压直流海底电缆总体设计和关键参数计算”研究资助的课题。

通讯作者：高凯（1985—），南瑞集团有限公司（国网电科院有限公司），高级工程师。

文章引用：刘淑军，吴启仁，曾浩，等. 高压、超高压直流电缆绝缘料用 LDPE 性能研究 [J]. 电气工程与技术，2021，2（2）：1-9.

<https://doi.org/10.35534/eet.0202006>

小（基本上只有电阻损耗，没有电磁损耗和介电损耗）、不存在无功功率、电源连接方便、易于调节和控制等优点，特别适用于新能源。与此同时，直流电缆线路没有电容电流的干扰，可靠性更高^[1]。

直流输电作为一种新型的输电技术，大多采用的是 XLPE 绝缘电缆。在直流高压作用下，XLPE 内部极易积累空间电荷，由于空间电荷的不断积累，导致局部电场发生畸变，从而使 XLPE 内部最大电场比平均电场高出 5 ~ 11 倍^[2]，严重情况下甚至会导致绝缘电击穿。在如何抑制 XLPE 中的空间电荷方面，国内外的专家做了大量的研究，并取得一定成效。一般来说，研究人员是采用添加纳米粒子和化学接枝这两种方法抑制 XLPE 内部的空间电荷^[3-7]。ABB 采用北欧化工直流绝缘料 LS4258 DCE 研制了 ± 525 kV 直流电缆系统，并于 2015 年通过了预鉴定试验。

LDPE 树脂是直流电缆绝缘料的基础树脂，其结构与加工性能很大程度上决定了绝缘料的结构与加工性能，而基础树脂的洁净度影响着绝缘料的电压等级^[8]。然而，与抑制 LDPE 空间电荷积累的大量研究相比，行业内对直流电缆绝缘料用基础树脂其他性能的研究较少。

本文选用市售的几种中高压电缆绝缘料用的基础树脂作为研究对象，通过高温凝胶渗透色谱（GPC）、拉伸测试、体积电阻率测试、直流击穿测试以及杂质检测等手段等测试手段，研究其关键性能参数，筛选出较宜用于直流电缆绝缘料的基础树脂。

2 实验部分

2.1 试样

本文选取国内外中高压电缆绝缘料用的四种基础树脂 A、B、C、D，密度约为 0.92 g/cm^3 ，熔体流动速率为 $(2 \pm 0.2) \text{ g/10 min}$ 。

2.2 分析测试

高温凝胶渗透色谱（GPC）：采用 Waters 的 PL-GPC 220 型凝胶渗透色谱仪，测试温度 140°C ，溶剂为 1, 2, 4 三氯苯（TCB），流速为 1 mL/min 。

拉伸测试：按照 GB/T 1040—2006 规定测试，试样为 2 型哑铃片，厚度为

(1.0 ± 0.1) mm, 每组至少 5 个样条, 标距为 25 mm, 拉伸速度为 (250 ± 50) mm/min。

体积电阻率测试: 应按 GB/T 1410—2006 规定测试, 试片厚度为 (1.0 ± 0.1) mm, 每组至少 5 个试样, 测试电压为 -20kV, 测试温度分别为 30℃、50℃、70℃。

直流击穿强度测试: 按照 GB/T 1408—2006 规定测试, 厚度为 (0.5 ± 0.1) mm, 每组至少 5 个样条, 周围媒介为变压器油, 电极为球形电极, 测试温度分别为 30℃、50℃、70℃。测试采用快速升压方式, 升压速度为 5kV/s,

杂质含量检测: 按照 JB/T 10437—2004 规定测试, 采用德国 OCS 公司高精度光学设备, 试样重量为 1 kg。

3 结果与讨论

3.1 高温凝胶渗透色谱 (GPC)

分子量大小与分子量分布是聚合物最基本的参数之一, 对聚合物的使用性能和加工性能有着很重要的影响。凝胶渗透色谱 (GPC) 又称为体积排除色谱 (SEC), 是测量聚合物材料分子量大小与分子量分布最常用的方法。该方法是利用聚合物溶液通过多孔状凝胶组成的柱子, 在柱子上按照分子大小进行分离。

图 1 和表 1 分别是四种基础树脂的 GPC 图谱、分子量与分子量分布。

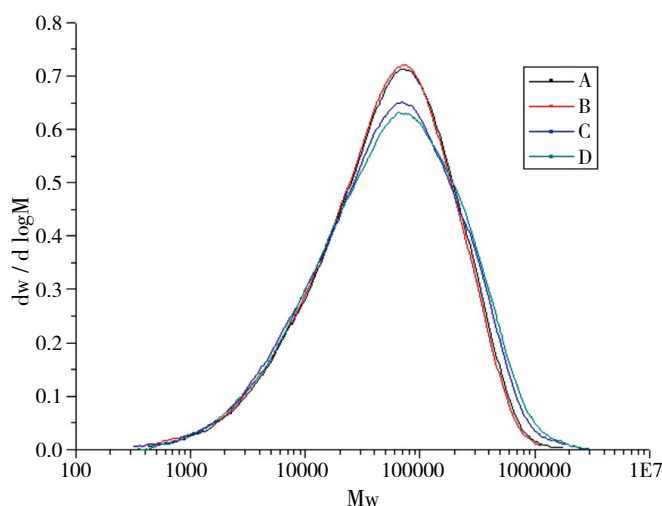


图 1 四种 LDPE 的 GPC 图谱

Figure 1 GPC Atlas of four kinds of LDPE

表 1 四种 LDPE 的分子量与分子量分布

Table 1 Molecular Weight and Molecular Weight Distribution of four kinds of LDPE

项目	A	B	C	D
M_w	104126	98461	119451	127654
M_n	17427	16266	15829	17110
分布宽度指数 (M_w/M_n)	5.97	6.05	7.55	7.46

由图 1 和表 1 数据可知，四种基础树脂的分子量大小接近，但是 A 和 B 分子量分布较窄。如果仅仅从分子量和分子量分布的角度来看，基础树脂 A 和 B 具有更好的使用性能，C 和 D 具有更好的加工性能。

3.2 拉伸测试

拉伸测试是测量聚合物材料拉伸性能常用的方法。对基础树脂来说，最重要的拉伸测试参数是拉伸强度和断裂伸长率。拉伸强度是样条直到断裂所承受的最大拉伸应力；而断裂伸长率则是样条断裂时标距的增加量与初始标距的比值。表 2 是四种基础树脂的拉伸强度和断裂伸长率。

表 2 四种 LDPE 的拉伸强度和断裂伸长率

Table 2 Tensile Strength and Elongation at Break of four kinds of LDPE

项目	A	B	C	D
拉伸强度 (MPa)	15.0	15.6	16.5	15.3
断裂伸长率 (%)	593	569	666	527

由表 2 可知，四种基础树脂的机械性能良好，拉伸强度和断裂伸长率都高于电缆绝缘料用基础树脂的技术要求，完全满足实际需求。

3.3 体积电阻率测试

与交流电缆不同，直流电缆绝缘层的电场分布由绝缘料的体积电阻率决

定,而体积电阻率又与温度和电场有关^[9]。考虑到实际工程中直流电缆绝缘层的平均场强为 10 ~ 20 kV/mm,因此,体积电阻率测试采用 -20 kV 作为测试电压而不采用 GB/T 1410—2006 中推荐的测试电压。图 2 是四种基础树脂分别在 30℃、50℃、70℃下的体积电阻率。

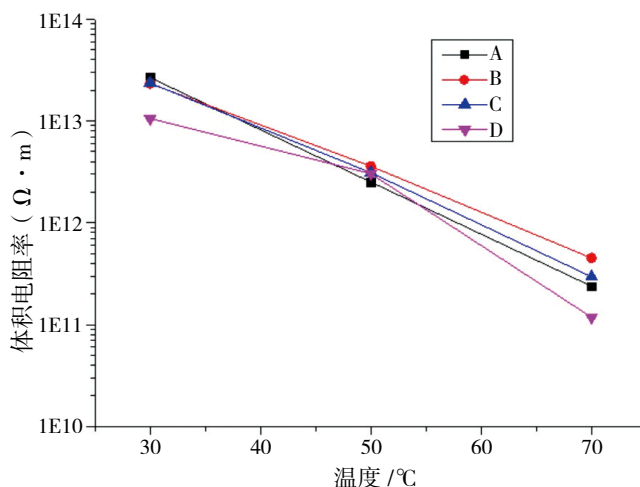


图 2 四种 LDPE 的体积电阻率

Figure 2 Volume resistivity of four kinds of LDPE

由图 2 可知,四种基础树脂的体积电阻率随着测试温度的升高而减小,虽然降低幅度略有不同,但相同温度下的电阻率都在一个数量级。考虑到测试误差,除了 D 稍差之外,其他三种基础树脂的体积电阻率在相同温度、相同高电场下的体积电阻率基本上差不多。

3.4 直流击穿测试

表征电介质材料绝缘性能最基本的因素之一是击穿强度。国内外专家学者对电介质材料的击穿强度做了大量研究,形成了多种击穿机理,例如电击穿、热击穿、电化学击穿、机械击穿等^[10]。图 3 是四种基础树脂分别在 30℃、50℃、70℃下的直流击穿强度。

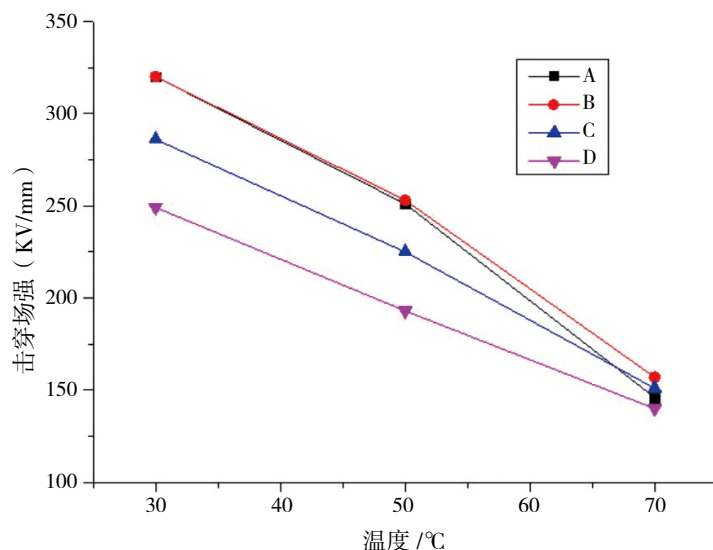


图 3 四种 LDPE 的直流击穿强度

Figure 3 DC Brakdown of four kinds of LDPE

由图 3 可知, 在较低的测试温度时, 基础树脂 A、B 的直流击穿强度较高, 随着测试温度的升高, 四种基础树脂击穿强度都有不同程度的下降, 当测试温度升高到 70 °C 时, 四种基础树脂的击穿强度逐渐相近。可能的原因是 C、D 的分子量分布较宽, 低分子量部分较多, 在较低的测试温度时, 更容易发生电击穿; 当测试温度升高后, 试片的击穿不仅仅是单一的电击穿, 应该是电场和热场的共同作用。

3.5 杂质检测

在高压电场下, 任何能引起电缆绝缘层局部电场畸变的物质, 都可能给绝缘带来危害。虽然试片的直流击穿强度在一定程度上能够反映绝缘料的耐压性能, 但对整根电缆来说, 绝缘料中的杂质也可能造成电缆的击穿, 因此, 评估高压电缆绝缘料时杂质含量的检测是必不可少的。表 3 是四种基础树脂的杂质含量。

表 3 四种 LDPE 的杂质含量

Table 3 Impurity of four kinds of LDPE

尺寸 (μm)	数量 / 个 / kg			
	A	B	C	D
70 ~ 100	0	2	1	0
100 ~ 175	0	2	0	1
175 ~ 250	0	0	0	0
250 ~ 500	0	1	0	0
>500	0	2	1	0
总计	0	7	2	1

由表 3 可知, 基础树脂 A 不含 70 μm 以上的杂质含量, 而 B、C、D 都含有不同尺寸的杂质, 因此基础树脂 A 洁净度最高。目前, 国内外尚未有直流电缆绝缘料相关标准, 但参考交流标准 GB/T 22078.2-2008 额定电压 500 kV ($U_m=550\text{ kV}$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 2 部分 额定电压 500 kV ($U_m=550\text{ kV}$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆附录 B 中规定绝缘料杂质颗粒尺寸 $>0.075\text{ mm}$ (1000 g 样带) 的数目为 0, 因此基础树脂 A 满足超高压电缆绝缘料的洁净度要求。

4 总结

1) 四种基础树脂具有相近的分子量大小和体积电阻率, 机械性能良好; A、B 具有较窄的分子量分布, 在低温时直流击穿强度更高, 但是随着测试温度的升高, 四种基础树脂的直流击穿强度逐渐接近; 基础树脂 A 的洁净度最高, 满足超高压电缆绝缘料的洁净度要求。

2) 通过分析比较四种基础树脂的关键性能参数, 优选出基础树脂 A, 为实现高压、超高压直流电缆绝缘料的国产化提供了实验支撑。

参考文献

[1] K Johannesson, U Axelsson. The Development of an Extruded HVDC Cable System and its First Application in the Gotland HVDC Project [J] . CIGRE

- paper, 2000, 9: 2–5.
- [2] Yewen Zhang, Jacques Lewiner, Claude Alquier. Evidence of strong correlation between space charge buildup and breakdown in cable insulation [J] . IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3 (6) : 778–783.
- [3] K Y Lau, A S Vaughan, G Chen, et al. On the space charge and DC breakdown behavior of polyethylene/silica nanocomposites [J] . Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1) : 340–351.
- [4] Yoshinobu Murakami, Shunsuke Okuzumi, Masayuki Nagao, et al. Space Charge Measurement in MgO/LDPE Nanocomposite up to Breakdown under DC Ramp Voltage [J] . Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 5: 395–399.
- [5] 王霞, 王陈诚, 朱有玉等. 高压直流塑料电缆绝缘用纳米改性交联聚乙烯中的空间电荷特性 [J] . 高电压技术, 2015, 41 (3) : 1096–1103.
- [6] 党智敏, 亢婕, 屠德民. 乙烯–丙烯酸共聚物改性聚乙烯的空间电荷对电树和水树的影响 [J] . 电工技术学报, 2001, 16 (2) : 79–82.
- [7] 尹毅, 屠德民, 霍振宇等. 氯化聚乙烯共混对聚乙烯的空间电荷效应的影响 [J] . 电工技术学报, 2000, 15 (4) : 52–57.
- [8] 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.
- [9] 杨黎明, 朱智恩, 杨荣凯等. 柔性直流电缆绝缘料及电缆结构设计 [J] . 电力系统自动化, 2013, 37 (15) : 117–124.
- [10] 陈伟涛. 吸潮对 MgO/LDPE 与 SiO₂/LDPE 纳米复合介质介电特性影响 [D] . 哈尔滨理工大学, 2013.

Research on LDPE for HV/EHVDC Cable Insulation Material

Liu Shujun¹ Wu Qiren¹ Zeng Hao² Gao Kai²

1. *China Three Gorges Renewables (Group)Co., Ltd., Beijing;*

2. *NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing*

Abstract: In order to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality, a new power system with new energy as the main body should be built, and HV and EHV DC cables will become the main backbone network component of the new power grid. The focus of DC cable research is on insulating materials, but there is little research on low density polyethylene (LDPE) for insulating materials in cable industry. Four kinds of LDPE (A, B, C, D) for MV/HV cable insulation material from manufacturers home and abroad were selected in this paper. The key performance parameters were compared by means of GPC, tensile test, volume resistivity test and DC breakdown test. A is more suitable as the base resin and these results will provide experimental and data support for the localization of EHVDC cable insulation material.

Keywords: EHVDC cable; LDPE; GPC; Volume resistivity; DC breakdown