

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.005

乙烯基非交联电缆屏蔽料性能与分散剂含量关系研究

张亚¹, 王晓阳², 龚敏¹, 刘晓洁², 詹陶¹, 李论之³,
刘世力¹, 张宏², 高景晖²

(1. 重庆泰山电缆有限公司, 重庆 401120; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 3. 长安大学能源与电气工程学院, 西安 710064)

摘要: 非交联绝缘材料具有优异的电气机械性能,同时生产能耗少、可回收利用,成为目前电缆绝缘料的研究热点,但与之匹配的非交联半导电屏蔽料的研究还鲜有报道。导电炭黑的分散性对屏蔽料的性能影响重大。文中选用线性低密度聚乙烯(LLDPE)为基体树脂,白油为分散剂,采用熔融共混法制备了非交联电缆屏蔽料。研究了白油含量对屏蔽料中炭黑分散、结晶性能、体积电阻率和机械性能的影响。结果表明添加白油会促进炭黑的分散,但白油含量过大会降低屏蔽料的结晶度,增加其体积电阻率并降低拉伸强度和断裂伸长率。当白油含量为2 wt%时,屏蔽料体积电阻率最小,力学性能最佳。该研究为非交联半导电屏蔽料在乙烯基非交联电缆的应用研究提供了参考。

关键词: 半导电屏蔽料; 白油; 导电炭黑; 非交联聚乙烯; 分散剂; 线性低密度聚乙烯(LLDPE)

Study on the Relationship Between the Properties of Vinyl Non-cross Linked Cable Shielding Material and the Content of Dispersant

ZHANG Ya¹, WANG Xiaoyang², GONG Min¹, LIU Xiaojie², ZHAN Tao¹, LI Lunzhi³,
LIU Shili¹, ZHANG Hong², GAO Jinghui²

(1. Chongqing Taishan Cable Co., Ltd., Chongqing 401120, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Non-cross linked insulating materials have become a research hot spot of cable insulating materials due to their such advantages as low energy consumption, recyclability and excellent electrical and mechanical properties. However, little research has been reported on the matching non-cross linked semi-conductive shielding materials. The dispersion of conductive carbon black has a significant impact on the performance of shielding materials. In this paper, non-cross linked cable shields are prepared by melt blending method using linear low density polyethylene (LLDPE) as the base resin and white oil as the dispersant. The effects of white oil content on the dispersion of carbon black, crystallization properties, volume resistivity and mechanical properties of shielding material are studied. The results show that the addition of white oil will promote the dispersion of carbon black, but the excessive content of white oil will reduce the crystallinity of the shielding material, increase its volume resistivity and reduce the tensile strength and breakage elongation. When the white oil content is 2 wt%, the shielding material has the lowest volume resistivity and the best mechanical properties. This study provides a reference for the application research of non-cross linked semi-conductive shielding material in vinyl non-cross-linked cables.

Key words: semi-conductive shielding material; white oil; conductive carbon black; non-cross linked polyethylene; dispersant; linear low density polyethylene(LLDPE)

0 引言

交联聚乙烯(XLPE)电缆具有良好的电气绝缘性能、优异的耐热性能和较高的机械强度,是目前电缆绝缘料的主流。但XLPE电缆存在生产耗能多和难回收利用的问题^[1-2]。近年来随着“双碳战略”的提出,迫切需要开发可回收环保型电缆绝缘材料。

非交联聚烯烃材料由于其加工耗能少、可回收利用等优点,逐渐成为电缆绝缘材料的研究热点。热塑性的聚丙烯(PP)基和聚乙烯(PE)基绝缘材料是非交联电缆研究的主流方向^[3-4]。PP由于其高结晶度在常温下硬度和脆性大,通常需要改性使用^[5-8]。PE基绝缘材料的研究早期以低密度聚乙烯(LDPE)为主,然而LDPE熔点低,耐高温性能不足仍需要改性^[9-11]。而LLDPE作为一种新型的PE材料,电气、机械性能优异,熔点较LDPE明显提高。2015年,西安交通大学的钟力生团队提出了以LLDPE为基体树脂,高密度聚乙烯(HDPE)为共混物的新型共混材料,研究发现与XLPE相比,配比为70%LLDPE和30%HDPE的共混材料具有更优异的交、直流电气性能、机械性能、抗水树和电树老化性能^[12-14]。

非交联绝缘料已经取得了一定的研究成果,然而与之配合使用的非交联半导体屏蔽料的研究还较少。半导体内屏蔽层位于电缆绝缘层和金属导体之间,可以减少绝缘材料和金属导体界面间隙,可以使电缆内电场的分布更加均匀,减少局部放电^[15-17]。

目前XLPE还是电缆首选的绝缘材料,因此当前关于电缆半导体屏蔽料的研究大多还是针对XLPE电缆。XLPE电缆用半导体屏蔽料一般由基体树脂、交联剂、导电填料、抗氧剂和其他加工助剂组成。基体树脂通常选用与主绝缘相容性较好的材料,比如乙烯—醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、乙烯—丙烯酸丁酯共聚物(EBA)等。导电炭黑具有良好的导电性和稳定性、易于加工分散、性价比高且品类非常丰富,是半导体屏蔽料常用的导电填料^[18]。抗氧剂一般选用抗氧化剂300,分散剂有白油、石蜡、EBS等^[19-20],其中白油可以根据粘度选型、容易添加且纯度高,使用非常广泛。非交联电缆屏蔽料与XLPE电缆屏蔽料的主要不同是聚合物基料不需要交联,而导电填料、分散剂和抗氧剂的选取则可以借鉴XLPE电缆屏蔽料的研究成果。其中非交联聚丙烯基电缆半导体屏蔽料一般使用与绝缘相同的材料PP作为基体树脂^[21-23]。

非交联LLDPE基共混物具有优异的电气、机

械、老化等性能,具有作为电缆绝缘材料的潜在应用价值,但与之匹配的非交联半导体屏蔽料还需系统研究。屏蔽料的导电填料,例如炭黑、碳纳米管等,其尺寸在nm级别,在加工过程中非常容易团聚,严重影响屏蔽料性能,因此屏蔽料基体树脂中需要加入分散剂,但分散剂对屏蔽料性能的影响规律尚不明确。因此,文中制备了以LLDPE为基体树脂,炭黑为导电填料,白油为分散剂的非交联半导体屏蔽材料。研究了分散剂白油含量对屏蔽料炭黑分散、结晶性能、体积电阻率和机械性能的影响。

1 实验

1.1 主要原料

屏蔽料主要由基体树脂和炭黑组成。基体树脂选用北欧化工的FB2230型LLDPE;导电填料使用卡博特VXC-72炭黑;分散剂使用粘度适中的46号白油(河南鲁营化工有限责任公司);抗氧剂300(山东优索化工科技有限公司)。

1.2 试样制备

制备前将各组材料在真空烘箱中干燥12 h备用。采用德国哈克Polylab QC转矩流变仪的密炼腔进行熔融共混。首先将密炼腔预热到175℃,将按配方称量好的LLDPE、炭黑、白油和抗氧剂物理搅拌使其初步混合。然后将原料加入已经预热好的密炼腔中进行共混。共混转速50 r/min,温度175℃。共混10~20 min后,转矩趋于恒定,表明混炼已经均匀,最后将屏蔽料从密炼腔中取出,待其冷却后剪碎备用。

将制得的屏蔽料粒料用YT-LH20B型平板硫化机压制不同形状和厚度的试样。热压温度170℃,压强10 MPa,热压时间10 min。

1.3 实验方法

使用日本吉恩士VE-9800S扫描电子显微镜观察屏蔽料中炭黑的分散情况。将厚度为1 mm屏蔽料试样浸入液氮后进行脆断,形成平整的观察断面,观察前对试样断面进行喷金处理。

使用瑞士梅特勒—托利多DSC822E型差示扫描量热法得到材料的热流率随温度/时间的变化曲线。升、降温速率均为10℃/min,测试时通入流量为50 mL/min的氮气作为保护气体。

当试样体积电阻率大于 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时,试样尺寸为100 mm×100 mm×1 mm,参照GB/T 1410—2006中的规定,采用美国吉士利6517B+8009型绝缘电阻率测试仪测试体积电阻。当试样体积电阻率小于 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时,试样尺寸为110 mm×50 mm×1 mm。参

照 GB/T 1551—2021 和电子行业标准 SJ/T 10314—1992 中的四电极测试方法, 使用 DX200H(西安宏鹄)四探针导体/半导体电阻率测试仪。

机械拉伸性能测试使用东莞市仪通检测设备有限公司 CMT4503—5kN 微机控制电子万能试验机, 并按照 GB/T 1040.2—2022^[24]进行测试。试样为厚度 1 mm 的标准哑铃型, 标距 20 mm, 拉伸速度 200 mm/min, 温度为室温。测试前将试样放入 70 ℃ 烘箱内退火处理 12~24 h, 以消除残余应力。

2 结果与讨论

2.1 炭黑含量对屏蔽料体积电阻率的影响

屏蔽料的体积电阻率会随着炭黑含量的增加而降低^[25]。根据标准 GB/T 11017.2—2014^[26]中 110 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件中半导电屏蔽料的相关规定, 室温下屏蔽料体积电阻率应小于 $100 \Omega \cdot \text{cm}$ 。文中制备了炭黑含量为 5~35 wt% 的屏蔽料, 根据其电阻率来确定炭黑含量, 此时白油质量分数定为 2 wt%。

不同炭黑含量时屏蔽料在室温下的体积电阻率见图 1。从图 1 中可以看出随着炭黑含量的升高, 屏蔽料的体积电阻率先缓慢下降然后陡然下降, 最后趋于平缓。当炭黑含量从 5 wt% 提高到 10 wt% 时, 屏蔽料的体积电阻率从 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, 仅下降了 1 个数量级。这是因为炭黑含量低于 10 wt% 时, 炭黑粒子之间距离很大, 炭黑在聚合物中难以形成稳定的导电网络^[27-29]。当炭黑含量从 10 wt% 提高到 20 wt%, 屏蔽料的体积电阻率从 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, 下降幅度高达 13 个数量级。在这个阶段, 炭黑粒子之间的平均距离较小, 虽然炭黑粒子间仍然没有接触, 但形成了隧穿效应^[30]。这使得屏蔽料中也能形成近似连续的导电网络, 因此屏蔽料的体积电阻率骤然下降。当炭黑含量上升到 20 wt% 之后, 材料的体积电阻率下降速率变缓, 即使炭黑含量提高到 35 wt% 时, 电阻率也仅下降了 2 个数量级。这是因为此时屏蔽料中已经基本形成了连续的导电网络, 虽然炭黑含量的增加可以增大炭黑粒子之间的相互接触, 导电网络更加密集完善, 但对屏蔽料导电性的贡献降低, 因此屏蔽料体积电阻率的下降速率大幅度降低, 趋于平缓。虽然炭黑含量越高, 体系导电网络越稳定, 但高含量炭黑会严重影响材料的机械性能和加工性能。因此, 文中确定屏蔽料炭黑含量 25 wt%, 研究分散剂白油含量对其性能的影响。此时屏蔽料的体积电

阻率为 $14.31 \Omega \cdot \text{cm}$, 完全满足国标要求。

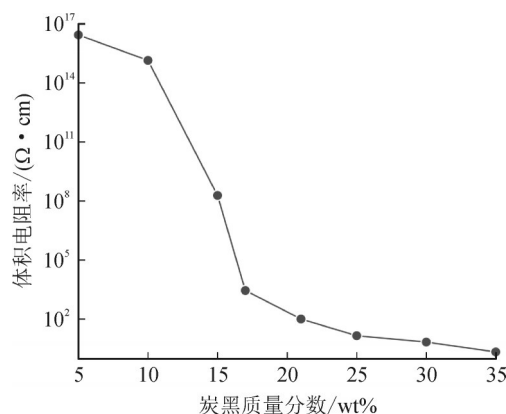


图1 不同炭黑含量的屏蔽料在室温下体积电阻率

Fig. 1 Volume resistivity of shielding materials with different carbon black content at room temperature

2.2 白油含量对屏蔽料炭黑分散的影响

白油的分子结构见图 2。其上的极性基团与炭黑表面亲水基团相结合, 降低炭黑之间的相互作用, 增加炭黑的分散性^[20, 31-32], 减少屏蔽料混炼过程中的热量积累。为了研究白油含量对屏蔽料性能的影响, 分别制备了白油含量为 0.2、4、6 wt% 的屏蔽料。白油含量不同时的 LLDPE/炭黑屏蔽料的液氮脆断面扫描电镜(SEM)见图 3。

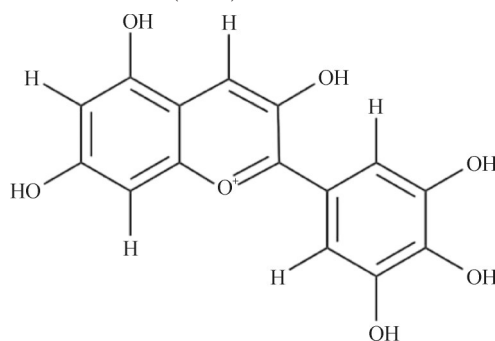


图2 白油分子结构示意图

Fig. 2 Molecular structure of oleic acid amide

从图 3 中可以看出白油含量对炭黑分散性有较大影响。白油含量为 0 wt% 时, 从图 3(a)中可以明显看到屏蔽料中存在较多炭黑团簇聚集体, 说明炭黑的分散性较差。团聚现象不仅不利于屏蔽料中导电网络的形成, 影响材料的体积电阻率, 并且炭黑的团聚会在材料中形成缺陷, 影响材料的机械性能。当白油含量增加到 2 wt% 以上时, 如图 3(b)、(c)、(d)所示, LLDPE 基体中没有观察到炭黑团簇聚集体, 说明炭黑颗粒比较均匀地分散在材料中, 因此容易形成稳定的导电网络, 并且材料中缺陷也会大幅减少。可见, 白油含量增大, 炭黑颗粒之间的团聚现象越少, 炭黑分散性提高。

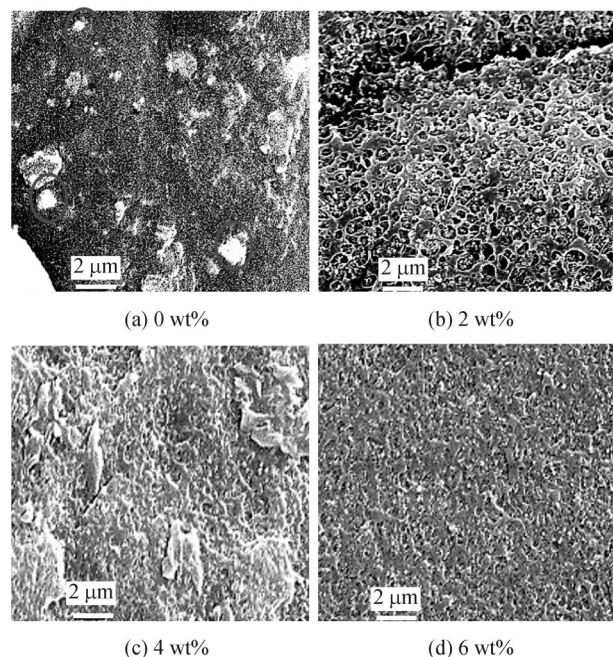


图3 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料SEM图像
Fig. 3 SEM diagram of LLDPE/CB shielding material with different white oil parts

2.3 白油含量对屏蔽料结晶性能影响

不同白油含量时屏蔽料熔融和结晶DSC曲线见图4。从图4中可以看出不同组分的屏蔽料都在升温过程的125℃左右出现了熔融峰,在降温过程的110℃左右出现了结晶峰。随着白油含量的提高,屏蔽料熔融温度向低温方向移动,熔融峰面积即熔融焓逐渐减小;结晶峰温度也向低温方向移动,结晶峰面积即结晶焓逐渐减小。

通过屏蔽料的熔融焓数值,可以计算出屏蔽料的结晶度为

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m\infty}(1 - X_r)} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: X_c 为屏蔽料的结晶度,%; ΔH_m 为单位质量屏蔽料的熔融焓, $J \cdot g^{-1}$; $\Delta H_{m\infty}$ 为聚乙烯100%结晶时的单位质量熔融焓,287.3 J/g; X_r 为炭黑和白油总的质量分数,wt%。

不同白油含量LLDPE/炭黑屏蔽料的熔融和结晶性能参数见表1。结合表1和图4可以看出,当白油含量从0 wt%上升到6 wt%时,屏蔽料熔融峰温度降低了0.57℃,结晶峰温度下降了1.29℃,结晶焓下降了2.20 J/g,结晶度下降了0.77%。可见随着白油含量的提高,屏蔽料熔融温度、熔融焓和结晶度都呈下降趋势。这是因为白油分子的存在会增加LLDPE分子链之间的距离,使其分子间作用力减弱,导致LLDPE分子链热运动增加,降低其内聚能,使得聚合物结晶能力下降,所以结晶温度和结晶度会下降^[21,33]。

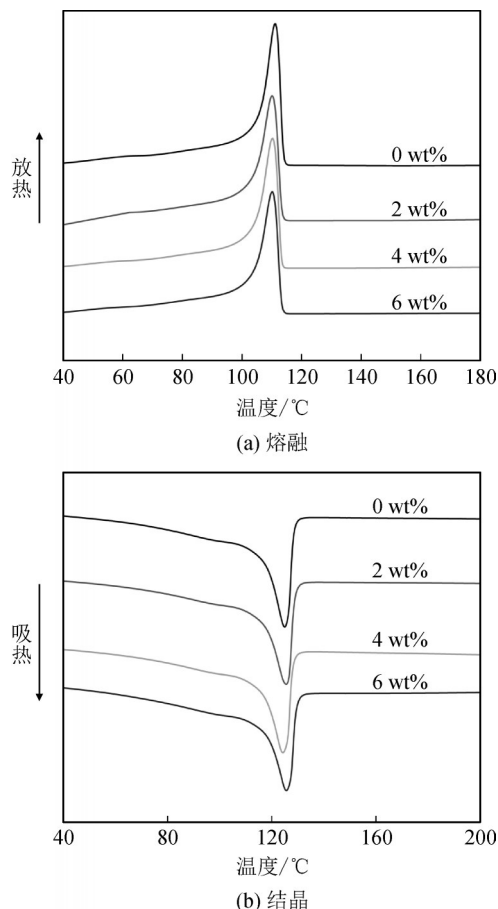


图4 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料熔融和结晶DSC曲线

Fig. 4 Melting and crystallization DSC curves of LLDPE/CB shielding materials with different white oil content

表1 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料的熔融和结晶过程表征参数

Table 1 Parameters for characterizing the melting and crystallization process of LLDPE/CB shielding materials with different white oil content

白油含量/wt%	熔融峰温度 $T_m/^\circ\text{C}$	熔融焓 $\Delta H_m/(J \cdot g^{-1})$	结晶度 $C_c/\%$	结晶峰温度 $T_c/^\circ\text{C}$
0	125.00	107.61	37.46	111.24
2	124.87	106.88	37.20	110.48
4	124.34	106.38	37.03	110.35
6	124.43	105.41	36.69	109.95

2.4 白油含量对屏蔽料体积电阻率的影响

不同白油含量时屏蔽料的体积电阻率变化曲线见图5。从图5中可以看出,随着白油含量的提高,屏蔽料体积电阻率先降低后升高,在含量为2 wt%附近出现最小值。当白油含量从0 wt%提高到2 wt%时,屏蔽料的体积电阻率从22.1 $\Omega \cdot \text{cm}$ 下降到14.31 $\Omega \cdot \text{cm}$,降低了35.3%。这是因为添加白油后促进了炭黑在试样中的分散,减少了炭黑团聚现

象, 炭黑粒子之间的平均距离减少, 形成了更为密集的导电网络, 因此体积电阻率下降。这和图3中SEM图像观察到的炭黑分散情况一致。

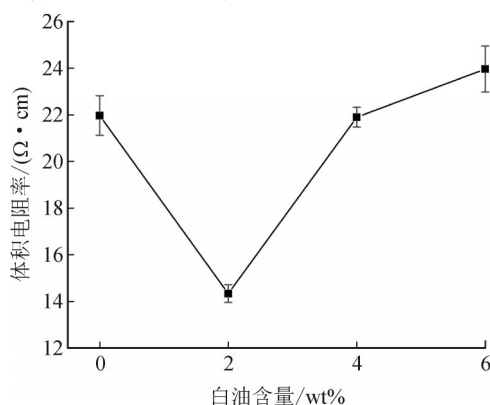


图5 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料的体积电阻率

Fig. 5 Volume resistivity of LLDPE/CB shielding materials with different white oil content

然而, 白油含量提高为4 wt%和6 wt%时, 屏蔽料体积电阻率比白油含量为2 wt%时分别增加了37.8%和68.5%。虽然图3的SEM结果显示炭黑分散性良好, 但屏蔽料体积电阻率反而增大。这是因为白油本身为绝缘体, 如果包裹在炭黑周围, 会阻碍炭黑之间载流子的传输。白油添加量过高会影响炭黑导电网络的导电性, 从而增加屏蔽料的体积电阻率。因此白油含量不能过高, 白油含量在2 wt%附近时, 屏蔽料的体积电阻率最低。

2.5 白油含量对屏蔽料机械性能的影响

不同白油含量时屏蔽料的拉伸强度和断裂伸长率见图6。从图6可以看出, 当白油含量为0 wt%时, 屏蔽料的拉伸强度和断裂伸长率相比较非常低, 这是因为此时炭黑在屏蔽料中分散不均匀, 团聚现象严重(见图3(a)), 造成的局部缺陷较为严重, 因此屏蔽料的拉伸性能非常差。添加白油分散剂之后, 屏蔽料拉伸强度和断裂伸长率都大幅度上升, 这是因为白油的添加提高了炭黑的分散性能, 减少了炭黑的团聚现象。由图6可以看出, 当白油含量为2 wt%时, 拉伸强度出现最大值。随着白油含量的进一步提高到4 wt%和6 wt%, 屏蔽料的拉伸强度和断裂伸长率有缓慢减小的趋势。表1中DSC测试结果说明随着白油的添加, 屏蔽料的结晶度下降, 无定型区增加。一般聚合物中的缺陷常存在于无定型区或者晶区和非晶区界面, 因此LLDPE中缺陷可能随着白油添加量增大而增多。另外, 白油作为绝缘小分子的存在也很可能成为屏蔽料的机械弱点。这些都导致了屏蔽料的拉伸强度和断裂伸长率的降低。白油含量在2 wt%附近时, 屏蔽料的力学性能最好。

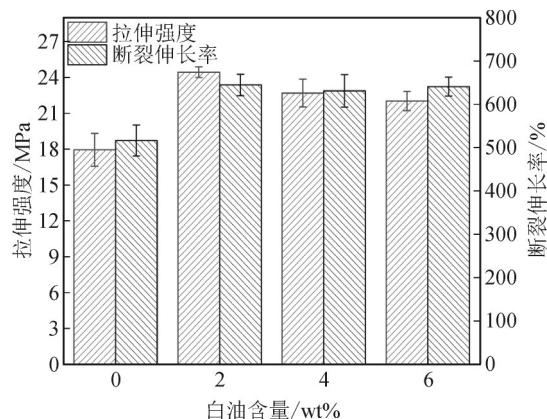


图6 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料的拉伸强度和断裂伸长率

Fig. 6 Tensile strength and elongation at break of LLDPE/CB shielding materials with different white oil content

不同白油含量时屏蔽料的弹性模量见图7。从图7中可以看出, 屏蔽料的弹性模量随着白油含量的增加而降低。这是因为白油含量增加, 屏蔽料结晶度降低, LLDPE晶片之间作用力减弱, 使得屏蔽料容易发生形变, 所以屏蔽料弹性模量呈下降趋势。

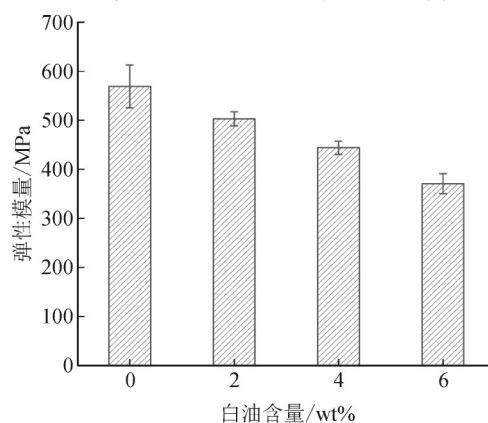


图7 不同白油含量的LLDPE/炭黑屏蔽料的弹性模量

Fig. 7 Modulus of elasticity of LLDPE/CB shielding materials with different white oil content

3 结论

文中以LLDPE为基料, 炭黑为导电填料, 白油为分散剂, 以熔融共混法制备了乙烯基非交联电缆半导电屏蔽料。在炭黑添加量为25 wt%时, 研究了白油含量对屏蔽料中炭黑分散、结晶性能、体积电阻率和机械性能的影响, 得到以下结论。

- 1) 白油对屏蔽料中炭黑的分散有促进作用。添加白油后屏蔽料中炭黑的团聚现象明显减弱。
- 2) 白油含量对屏蔽料结晶性能有一定影响。添加白油会降低屏蔽料的内聚能, 使屏蔽料结晶度下降。
- 3) 白油含量对屏蔽料体积电阻率有较大影响。白油的添加可以提高炭黑的分散性, 降低屏蔽料电

阻率。但是作为绝缘体的白油本身也很大可能阻碍炭黑间载流子的传输,含量过高会导致屏蔽料体积电阻率的增加。对于炭黑含量为25 wt%的LLDPE/炭黑屏蔽料体系,白油含量为2 wt%时其体积电阻率最低。

4)白油含量对屏蔽料力学性能有明显影响。适当白油的添加可以减少炭黑团聚现象,大幅度提高屏蔽料拉伸强度和断裂伸长率。但白油含量过高也会降低屏蔽料结晶度,增加机械弱点,影响拉伸强度和断裂伸长率。对于炭黑含量为25 wt%的LLDPE/炭黑屏蔽料体系,白油含量为2 wt%时,力学性能最佳。

参考文献:

- [1] 何金良,彭琳,周 垚. 环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 337-343.
HE Jinliang, PENG Lin, ZHOU Yao. Research progress of environment-friendly HVDC power cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 337-343.
- [2] 林 涛,翟 璐,孙浩飞,等. 长距离330 kV交联聚乙烯电缆交接试验研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 28-36.
LIN Tao, ZHAI Lu, SUN Haofei, et al. Study on commissioning test of long-distance 330 kV XLPE power cable[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 28-36.
- [3] 李忠磊,赵宇彤,韩 涛,等. 高压电缆半导体屏蔽材料研究进展与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2341-2354.
LI Zhonglei, ZHAO Yutong, HAN Tao, et al. Research progress and prospect of semi-conductive shielding composites for high-voltage cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2341-2354.
- [4] 欧阳本红,黄凯文,赵 鹏,等. 电力电缆聚丙烯材料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2022, 55(8): 6-15.
OUYANG Benhong, HUANG Kaiwen, ZHAO Peng, et al. Research progress of polypropylene materials for power cables[J]. Insulating Materials, 2022, 55(8): 6-15.
- [5] ZHOU Yao, HU Jun, DANG Bin, 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.
- [6] 张 伟,徐 曼,陈光辉,等. 等规和嵌段聚丙烯的结构和性能[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3634-3644.
ZHANG Wei, XU Man, CHEN Guanghui, et al. Structure and properties of isotactic polypropylene and ethylene-propylene copolymer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3634-3644.
- [7] 杜伯学,侯兆豪,徐 航,等. 高压直流电缆绝缘用聚丙烯及其纳米复合材料的研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2769-2780.
DU Boxue, HOU Zhaohao, XU Hang, et al. Research achievements in polypropylene and polypropylene/inorganic nanocomposites for HVDC cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2769-2780.
- [8] 陈 鸿,赵健康,黄凯文,等. 不同改性聚丙烯电缆绝缘料的结构与性能对比分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 233-239.
CHEN Hong, ZHAO Jiankang, HUANG Kaiwen, et al. Comparative analysis of astructure and properties of different modified polypropylene cable insulation materials [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 233-239.
- [9] HOSIER I L, VAUGHAN A S, SWINGLER S G. Structure-property relationships in polyethylene blends: The effect of morphology on electrical breakdown strength[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(17): 4523-4531.
- [10] GREEN C D, VAUGHAN A S, STEVENS G C, et al. Electrical and mechanical properties of new recyclable power cable insulation materials based upon polyethylene blends [C]//International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2011). Hannover, Germany: [s.n.], 2011: 1394-1399.
- [11] 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.
- [12] LI Lunzhi, ZHANG Kai, ZHONG Lisheng, et al. Dielectric behaviors of recyclable thermo-plastic polyolefin blends for extruded cables[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney: IEEE, 2015: 180-183.
- [13] LI Lunzhi, ZHANG Kai, ZHONG Lisheng, et al. Treeing phenomenon of thermoplastic polyethylene blends for recyclable cable insulation materials[J]. AIP Advances, 2017, 7(2): 6-9.
- [14] ZHANG Kai, LI Lunzhi, ZHONG Lisheng, et al. DC dielectric properties of thermo-plastic polyolefin materials[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada: IEEE, 2016: 470-473.
- [15] 李忠磊,赵宇彤,韩 涛,等. 高压电缆半导体屏蔽材料研究进展与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2341-2354.
LI Zhonglei, ZHAO Yutong, HAN Tao, et al. Research progress and prospect of semi-conductive shielding composites for high-voltage cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2341-2354.
- [16] 屠德民,仇 斌,刘 越,等. 新型半导体电缆屏蔽料的工作原理[J]. 电工技术学报, 1993(4): 46-51.
TU Demin, QIU Bin, LIU Yue, et al. The working principle

- of a new type of semi conductive cable shielding material [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 1993 (4):46-51.
- [17] 李国倡, 魏艳慧, 雷清泉, 等. 高压电缆半导体屏蔽料关键问题及研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1271-1284.
- 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): 1271-1284.
- [18] LI Weikang, YAN Hongda, ZHOU Yuan, et al. Supersmooth semiconductive shielding materials use for XLPE HVDC cables[C]//1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Xi'an, China: IEEE, 2017: 447-451.
- [19] 刘春林, 王贵才, 谢汝兴, 等. 电力电缆用可交联半导体屏蔽料[J]. 现代塑料加工应用, 2001, 13(1):8-10.
- LIU Chunlin, WANG Guicai, XIE Ruxing, et al. Semiconductive and shielding crosslinking materials used for power cable[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2001, 13(1):8-10.
- [20] 侯 帅, 傅明利, 黎小林, 等. 加工助剂对高压电缆半导体屏蔽料性能影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3):1222-1230.
- HOU Shuai, FU Mingli, LI Xiaolin, et al. Effect of processing AIDS on performance of semi - conductive shielding materials for high voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3):1222-1230.
- [21] 梁 月. 非交联改性聚丙烯高压直流电缆材料的制备与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- LIANG Yue. Preparation and properties of non crosslinked modified polypropylene high - voltage DC cable materials [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [22] 孙博阳. 热塑性电力电缆半导体屏蔽材料的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- SUN Boyang. Research on semi conductive shielding materials for thermoplastic power cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [23] 朱荧科, 孙博阳, 张 军, 等. 碳黑/MXene热塑性电力电缆半导体屏蔽材料[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4820-4830.
- ZHU Yingke, SUN Boyang, ZHANG Jun, et al. Carbon black/MXene thermoplastic power cable semi conductive shielding material[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12):4820-4830.
- [24] 塑料拉伸性能的测定, 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2—2022[S]. 2022.
- Determination of tensile properties of plastics, part 2: Test conditions for molded and extruded plastics: GB/T 1040.2—2022[S]. 2022.
- [25] 陈 哲, 黄兴溢, 江平开. 具有高流动性的LLDPE/POE/CB半导体复合材料的研究[J]. 电线电缆, 2009(2):28-32.
- CHEN Zhe, HUANG Xingyi, JIANG Pingkai. Study of the LLDPE/POE/CB semiconductive composites with high flowability[J]. Electric Wire & Cable, 2009(2):28-32.
- [26] 额定电压110 kV($U_m=126$ kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件, 第2部分: 电缆: GB/T 11017.2—2014[S]. 2014.
- Cross linked polyethylene insulated power cables and their accessories with rated voltage of 110 kV($U_m=126$ kV), part 2: Cables: GB/T 11017.2—2014[S]. 2014.
- [27] WEI Yanhui, HAN Wang, LI Guochang, et al. Research progress of semiconductive shielding layer of HVDC cable [J]. High Voltage, 2020, 5(1):1-6.
- [28] DENG H, SKIPA T, ZHANG R, et al. Effect of melting and crystallization on the conductive network in conductive polymer composites[J]. Polymer, 2009, 50(15):3747-3754.
- [29] 孙博阳, 陈 哲, 谢 傲, 等. 高碳黑含量聚丙烯电力电缆屏蔽材料[J]. 高电压技术, 2020, 46(5):1631-1638.
- SUN Boyang, CHEN Zhe, XIE Ao, et al. Highly filled polypropylene/Carbon black shielding materials for power cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1631 - 1638.
- [30] LUX F. Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials [J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(2):285-301.
- [31] NSIB F, AYED N, CHEVALIER Y. Selection of dispersants for the dispersion of Carbon black in organic medium[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 55(4):303-310.
- [32] 傅明利, 侯 帅, 王 磊, 等. 高压电缆半导体屏蔽料研究进展及关键技术分析[J]. 材料导报, 2023, 37(21): 64-70.
- FU Mingli, HOU Shuai, WANG Lei, et al. Research progress and key technologies of semi-conductive shielding materials for high - voltage cables[J]. Materials Reports, 2023, 37(21):64-70.
- [33] 肖玉红, 卢秀首, 乔秀颖, 等. SEBS基热塑性磁流变弹性体复合材料的制备、结构与性能[J]. 磁性材料及器件, 2014(2):1-5.
- XIAO Yuhong, LU Xiushou, QIAO Xiuying, et al. Preparation, structure and properties of SEBS based thermoplastic magnetorheological elastomer composites[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2014(2):1-5.

张 亚(1988—), 男, 工程师, 主要从事高压电缆的工艺技术及研发工作(E-mail:454401339@qq.com)。