

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.009

滚塑用抗静电交联聚乙烯的制备

李双¹, 张宜鹏^{1,2}, 廖辉荣¹, 刘博¹

(1.北京华腾京研科技有限公司,北京 100084; 2.北京市化学工业研究院有限责任公司,北京 100084)

摘要:为解决交联聚乙烯(XLPE)滚塑制品的静电积聚问题,本研究采用熔融共混与模压交联工艺,探究了炭黑(CB)、石墨(Gr)及非离子型抗静电剂(F611)对XLPE性能的影响。结果表明,CB在添加10份时形成逾渗网络,使XLPE材料的体积电阻率与表面电阻率降至 $10^6 \Omega \cdot m$ 与 $10^6 \Omega$,抗静电效果最优;F611在添加5份时,通过离子导电将XLPE材料的表面电阻率降至 $10^{11} \Omega$,但其活泼氢会阻碍交联,导致凝胶含量从纯XLPE的76.3%降至30%~40%;Gr则呈现体相导电优先特性,在20份添加量下XLPE的体积电阻率为 $10^7 \Omega \cdot m$,表面电阻率达到了 $10^9 \Omega$ 。力学性能测试表明,所有添加剂均在一定程度上降低了材料性能,但通过8份的CB与2份F611复配,可将XLPE材料的电阻率稳定在 $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot m$ 量级的同时,将凝胶含量提升至65%以上,并维持150%以上的断裂伸长率,显著优于单一组分体系。从整体抗静电效果而言,CB体系的抗静电效果最优,显著优于F611体系与Gr体系。上述复配方案不仅平衡了导电性、交联度与力学性能之间的制约关系,也为开发适用于滚塑工艺的抗静电XLPE制品提供了可行的材料设计途径。

关键词:滚塑成型;抗静电性能;交联聚乙烯;炭黑;石墨;抗静电剂

中图分类号:TQ317.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)01-0066-07

Preparation of antistatic cross-linked polyethylene for rotational molding

LI Shuang¹, ZHANG Yipeng^{1,2}, LIAO Huirong¹, LIU Bo¹

(1. Beijing Huateng Jingyan Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China; 2. Beijing Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: To address the electrostatic accumulation issue in rotationally molded cross-linked polyethylene (XLPE) products, the effects of three functional additives such as carbon black (CB), graphite (Gr) and non-ionic antistatic agent (F611) on the properties of XLPE using melt blending and compression molding cross-linking processes were investigated. The results show that a percolation network forms by adding 10 phr CB, significantly reducing both volume and surface resistivity to $10^6 \Omega \cdot m$ and $10^6 \Omega$, respectively, demonstrating the optimal antistatic performance. F611, at 5 phr loading, reduces surface resistivity to $10^{11} \Omega$ via ionic conduction mechanism. However, its active hydrogen groups hinder the cross-linking reaction, causing the gel content to drop from 76.3wt% of pure XLPE to a range of 30wt%–40wt%. Gr exhibits a volume conduction priority characteristic, with a volume resistivity of $10^7 \Omega \cdot m$ at 20 phr loading, while XLPE's surface resistivity remains as high as $10^9 \Omega$. Mechanical tests indicate that all additives degrade the material's properties to some extent. However, by combining 8 phr CB with 2 phr F611, the electrical properties of XLPE materials can stabilize at the level of $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot m$, the gel content is increased to over 65wt%, and the tensile elongation at break is maintained at more than 150%, significantly outperforming the adding single-group system. From the perspective of overall anti-static performance, CB system has the best anti-static performance, which is significantly superior to F611 system and Gr system. This compounding strategy not only balances the trade-offs among conductivity, crosslinking degree and mechanical properties, but also provides a feasible material design approach for developing anti-static XLPE products suitable for rotational molding.

Keywords: rotational molding; antistatic property; cross linked polyethylene; carbon black; graphite; antistatic agent

高密度聚乙烯(PE-HD)因其优异的耐化学腐蚀性、力学强度和加工流动性,成为滚塑成型工艺中

制造大型中空制品的理想材料^[1]。然而,传统的PE-HD在高温、强腐蚀等苛刻环境下,其耐热性、抗环

通信作者:李双,硕士,材料工程师,主要从事高分子材料改性、结构与性能等方面的研究工作

收稿日期:2025-10-31

引用格式:李双,张宜鹏,廖辉荣,等.滚塑用抗静电交联聚乙烯的制备[J].工程塑料应用,2026,54(1):66-72.

LI Shuang, ZHANG Yipeng, LIAO Huirong, et al. Preparation of antistatic cross-linked polyethylene for rotational molding[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 66-72.

境应力开裂性^[2-3]及尺寸稳定性通常难以满足要求。为了解决这些难题,研究者们对PE-HD进行了交联改性,通过交联形成三维网状分子结构,从而显著提升了材料的耐热性、力学强度^[4]等,成为高性能滚塑制品的理想选择。

尽管通过改性赋予了交联聚乙烯(XLPE)卓越的物理与热学性能,但聚乙烯固有的高绝缘性仍然保留,会导致材料易产生并积聚静电^[5]。这对于储存易燃易爆化学品十分不利,内部积聚的静电放电产生的火花存在巨大的安全隐患,严重限制了其在安全敏感领域的应用。因此,对XLPE进行有效的抗静电改性,赋予其持久、可靠的导静电能力,已成为进一步拓展XLPE应用范围亟需解决的关键问题。

目前,聚合物的抗静电改性主要遵循两种机理:一是依靠导电填料在基体中构建导电网络的“体积导电”机制;二是依靠抗静电剂迁移至表面形成离子导电层的“表面导电”机制。为系统比较不同机理在XLPE滚塑体系中的适用性与优劣,本研究有针对性地选取了三种具有代表性的改性剂:导电炭黑(CB)、石墨(Gr)和非离子型聚醚酯酰胺类抗静电剂F611。其中,CB与Gr同属碳系导电填料,但二者在形态与导电效率上存在差异。两者都是通过在本体相中相互接触形成渗透网络来实现电子传导,效果相对持久,且二者成本低廉、易于获取,是工业上首选的导电添加剂^[6]。而非离子型抗静电剂F611则代表了表面迁移机制^[7],其分子中的亲水基团通过吸附环境水分子在制品表面形成导电层以耗散静电^[8]。特别需要指出的是,选择非离子型抗静电剂是考虑到其通常更能适应XLPE过氧化物交联所需的高温加工环境。

目前鲜有报道针对XLPE的抗静电性能改性进行探究。本研究通过添加CB、Gr以及非离子型抗静电剂F611对XLPE进行抗静电改性的探究。论文将重点分析不同抗静电类型的添加量对XLPE导电性能、力学性能及微观结构的影响规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-HD:密度0.956 g/cm³,熔体流动速率为20.0 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),埃克森美孚公司;

双叔丁基过氧异丙基苯(BIPB):分析纯,上海阿拉丁试剂公司;

三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC):分析纯,上海阿拉丁试剂公司;

β -(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸十八碳醇酯:1076,纯度 $\geq 98\%$,天津利安隆新材料股份有限公司;

CB:XL G2,工业级,常州市川磷化工有限公司;

Gr:F-1,3 500目(4.29 μm),工业级,上海一帆石墨有限公司;

聚醚酯酰胺类抗静电剂:F611,工业级,山东聚力防静电科技有限公司;

二甲苯:分析纯,上海阿拉丁试剂公司。

1.2 仪器及设备

定制滚塑机:无锡毅爽滚塑科技有限公司;

平板硫化机:ZC-LH001C-SOT-300,东莞众诚精密仪器公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q100,美国沃特斯国际股份有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):phenom XL,美国Thermo Fisher Scientific公司;

万能力学试验机:WDT-W,美国美特斯工业系统(中国)有限公司;

高阻计:HP4329A,上海精密科学仪器有限公司;

哈克流变仪:HAAKE PolyDrive,美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.3 试样制备

将0.4份交联剂BIPB,0.6份交联助剂TAIC,0.1份抗氧剂1076和不同比例的CB、Gr和F611分别加到PE-HD中混匀后再加入到转矩流变仪进行熔融共混,设置共混温度为140 °C,螺杆转速为60 r/min,混合时间为10 min,在共混过程中,记录了各配方的加工行为:纯PE-HD与添加F611的体系扭矩较低,加工顺畅;而随着CB与Gr添加量的增加,共混扭矩显著升高,表现出更高的熔体黏度与加工难度,具体配方见表1。

将混完的样品颗粒放置在直径100 mm的圆形模具中,在平板硫化机中制样。在150 °C条件下预热15 min后,在220 °C下模压交联25 min,设定压力10 MPa。所有配方在此模压工艺下均能顺利成型,并获得表面光滑、无可见缺陷的测试样。

表1 XLPE及其改性材料配方

Tab. 1 XLPE and its modified material formula

Samples	PE-HD	BIPB	TAIC	1076	CB	Gr	F611
XLPE	100	0.4	0.6	0.1			
CB-5	100	0.4	0.6	0.1	5		
CB-8	100	0.4	0.6	0.1	8		
CB-10	100	0.4	0.6	0.1	10		
CB-15	100	0.4	0.6	0.1	15		
Gr-5	100	0.4	0.6	0.1		5	
Gr-10	100	0.4	0.6	0.1		10	
Gr-15	100	0.4	0.6	0.1		15	
Gr-20	100	0.4	0.6	0.1		20	
F611-5	100	0.4	0.6	0.1			5
F611-10	100	0.4	0.6	0.1			10
F611-15	100	0.4	0.6	0.1			15
F611-20	100	0.4	0.69	0.1			20
C ₂ F ₈	100	0.4	0.6	0.1	2		8
C ₅ F ₅	100	0.4	0.6	0.1	5		5
C ₈ F ₂	100	0.4	0.6	0.1	8		2

1.4 测试与表征

DSC测试:取5~10 mg样品放在坩埚中,以10 °C/min的速率升温至250 °C,再以10 °C/min的速率降温到25 °C。

SEM测试:将试样放入液氮中浸泡30 min后脆断,对断面喷金,然后放入SEM下观察样品的微观形貌。

凝胶含量测试:称取0.2 g样品颗粒置于质量为 M_1 的铜网中称重,质量为 M_2 ,以二甲苯为溶剂,在150 °C条件下用索氏抽提器抽提12 h,然后在100 °C的真空烘箱中干燥至恒重,称重记为 M_3 。凝胶含量(G)计算公式见式(1)。

$$G = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100\% \quad (1)$$

力学性能测试:在万能力学试验机上按GB/T 1040-2016进行测试,拉伸速度为10 mm/min,标距为50 mm,每组测试样条均取3个样品进行测试,最后记录平均值。

电学性能测试:体积电阻率和表面电阻率在高阻计上按照GB/T 1410-2006进行测试,取3个样品进行测试,最后记录平均值。

2 结果与讨论

2.1 交联结构的表征

为验证PE-HD交联改性成功,对PE-HD和交联后的XLPE样品进行了DSC测试,如图1所示。测试结果表明,交联作用显著影响了材料的结晶行为

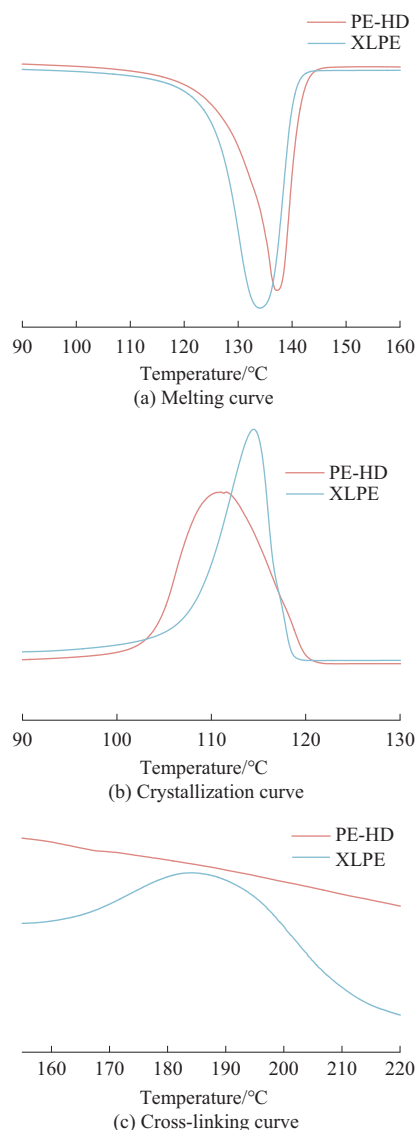


图1 PE-HD和XLPE的熔融、结晶和交联DSC曲线

Fig. 1 DSC curves for melting, crystallization and cross-linking of PE-HD and XLPE

与热性能。首先,从图1c可以发现交联后的样品XLPE相比于不交联的样品PE-HD在170~200 °C范围内多出一个明显的峰,这是典型的交联而导致的放热峰^[9],其次,从图1a和图1b对比熔融与结晶参数可以发现,XLPE的熔融峰温从PE-HD的137 °C降低至134 °C,结晶峰温从111 °C升高至114 °C。一方面,交联网络动力学上促进成核,使结晶起始于更高温度;另一方面,它热力学上限制晶体生长,导致最终形成的晶体不完善,从而熔点降低。这种“促进成核但抑制生长”的效应,是交联聚合物结晶行为的典型特征,也从热性能角度有力地证实了交联网络的成功构建。DSC测试结果从多个方面共同证实了交联改性成功。另外,将所有实验样品进

行了凝胶含量测试,结果见表2,从表中数据可以看到,XLPE复合材料的凝胶含量均随着抗静电成分的

表2 XLPE样品的凝胶含量数据

Tab. 2 Gel content data of XLPE sample

Samplpes	Gel content/%
XLPE	76.3
CB-5	75.79
CB-8	72.32
CB-10	67.69
CB-15	61.21
Gr-5	71.02
Gr-10	70.18
Gr-15	63.51
Gr-20	61.63
F611-5	42.12
F611-10	39.83
F611-15	35.43
F611-20	30.25
C ₂ F ₈	45.58
C ₃ F ₅	51.62
C ₈ F ₂	62.13

增加而降低,其中添加CB和Gr的两种体系相较于XLPE虽有降低但凝胶含量也都在60%以上,满足XLPE的实际使用要求。而添加F611的体系,凝胶含量下降得较为明显,这可能是由于添加胺脂类的非离子型抗静电剂结构里有活泼氢,会优先捕获交

联剂分解所产生的自由基,使其无法有效引发聚乙烯分子链产生大分子自由基,从而限制了交联网络的形成。值得注意的是,将CB和F611复配后加入XLPE中,凝胶含量比单加F611显著增加。

2.2 不同功能化添加剂对电阻率的影响

在XLPE的基础上分别添加了三种不同的抗静电材料,每种材料分别探究了其添加量对体积电阻率和表面电阻率的影响,测试结果见表3。从表中可以发现,CB为8份时,XLPE材料的表面电阻率为 $10^{11}\Omega$,体积电阻率为 $10^9\Omega\cdot\text{m}$,相较于5份的添加量虽有下降,但并不明显且仍然处于绝缘状态,这表明在此阶段,分散在XLPE基体中的CB颗粒仍处于分散独立状态,未能形成有效的电子传输通路,随着CB进一步增加到10份,材料从绝缘状态转为导电状态,体积和表面电阻率出现数量级的突变,均降低至 10^6 量级,出现了典型的“渗流阈值”效应^[10-11],这说明当CB含量达到并超过临界值时,分散的CB聚集体会相互搭接,形成贯穿的导电通道^[12],同时,相邻聚集体之间的聚合物薄层不足以完全阻挡电子,电子借助量子隧穿效应^[13]在它们之间跃迁,构成有效的导电网络。

表3 XLPE样品的表面和体积电阻率数据

Tab. 3 Volume and surface resistivity data of XLPE sample

Samplpes	Surface resistivity/ Ω	Surface resistivity MAE/%	Volume resistivity/ $(\Omega\cdot\text{m})$	Volume resistivity MAE/%
CB-5	4×10^{15}	2.81	9.8×10^{10}	1.73
CB-8	7×10^{11}	1.73	1.08×10^9	2.32
CB-10	5.4×10^6	2.16	5.8×10^6	1.48
CB-15	3.2×10^6	2.64	2.7×10^6	2.66
Gr-5	9×10^{15}	3.25	1.27×10^{15}	2.42
Gr-10	8×10^{14}	2.36	1.9×10^{15}	3.25
Gr-15	5.2×10^{12}	2.32	3.1×10^{13}	2.57
Gr-20	2×10^9	1.28	1.1×10^7	1.34
F611-5	1.2×10^{11}	3.21	6.4×10^{11}	2.33
F611-10	4.2×10^{10}	2.55	3.9×10^{10}	2.54
F611-15	2.3×10^9	1.89	1.1×10^9	1.27
F611-20	1.5×10^9	2.39	1.8×10^9	2.20

Notes:MAE indicates the average deviation of individual measurements from the mean.

相比之下,具有片层结构的Gr虽然在20份添加量时通过搭接有效降低了体积电阻率,达到 $10^7\Omega\cdot\text{m}$,但其表面电阻率在同一含量下仍高出2个数量级,呈现出“体相导电优先、表面导电滞后”的特点。这表明,Gr片层在基体内部更易形成通路,却难以有效富集于材料表面。与前两者导电机理不同的非离子型抗静电剂F611主要是依靠离子导电,不需要构建物理导电网络,而是通过分子迁移

在材料表面形成离子通道。F611为5份时,XLPE材料的表面电阻率为 $10^{11}\Omega$,显著低于添加同等含量的CB与Gr,随着F611含量的增加,最终表面和体积电阻均达到 10^9 量级。然而,当F611添加量升至15份时,XLPE样品表面出现不同尺寸的气泡,说明非离子型抗静电剂与基体材料之间发生了相分离现象,这不仅破坏了材料的完整性,也阻碍了其电学性能的进一步提升,因此在使用时要合理控制

F611用量。整体而言,抗静电效果:CB体系>F611体系>Gr体系,而且添加三种材料的抗静电性能最终都能达到 10^9 量级,满足基本的抗静电要求。电阻率数据为3个平行样品测量值的平均值,其误差以平均绝对误差MAE表示。该误差主要反映了测试过程中仪器的固有波动及样品制备时可能存在的微观不均匀性。所有平行测试结果的MAE值均处于较低水平,表明数据具有良好的可重复性。

为进一步探究CB与F611的协同效应,本研究

设计了三组复配实验,实验结果见表4。从表4可以看到,复配后样品的表面电阻率和体积电阻率明显优于单方面添加其中一种的抗静电效果,当CB添加8份,F611添加2份时,XLPE材料的表面电阻降至 $10^9 \Omega$,体积电阻率降至 $10^8 \Omega \cdot m$ 。这是由于CB的引入与F611产生了显著的协同抗静电作用,CB提供了内部体相导电通路,而迁移至表面的F611则增强了离子导电能力,二者共同构建了“体-表协同”的电荷耗散机制。

表4 C_xF_y 型XLPE样品的表面和体积电阻率数据

Tab. 4 Volume and surface resistivity data of C_xF_y type XLPE sample

Samples	Surface resistivity/ Ω	Surface resistivity MAE/%	Volume resistivity/ $(\Omega \cdot m)$	Volume resistivity MAE/%
C_2F_8	5.2×10^{11}	2.88	5.8×10^{10}	2.17
C_3F_5	1.6×10^{10}	1.67	3.6×10^9	2.33
C_8F_2	8.9×10^9	1.61	1.2×10^8	1.49

2.3 改性XLPE微观形貌分析

通过SEM对CB、Gr及F611在XLPE基体中的分散状态与微观结构进行观察,如图2至图4所示。如图2所示,对于CB体系,随着CB含量的增加,逐步呈现出完整的网络构建。具体而言,在添加5份的CB时,断面形貌较为平整,有极少的CB以孤立的点状分散,未形成连续通道;当CB增至8份,CB均匀分散,而且开始出现明显的网络结构;当CB增至10~15份时,该网络结构愈发致密,复合材料断面上CB粒子间的间距减小,有利于彼此相互接触,从而形成导电通道^[14]。

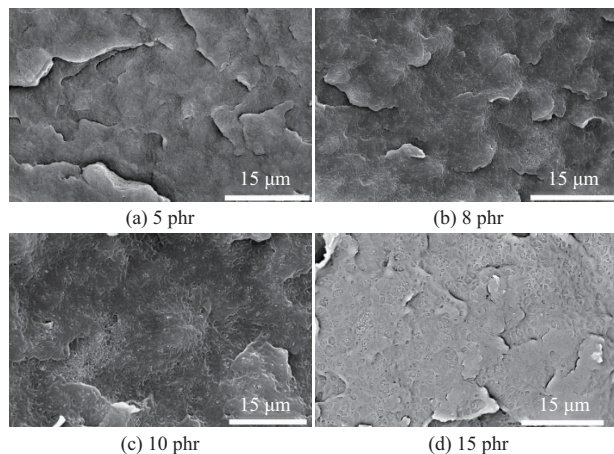


图2 CB不同添加量时XLPE复合材料截面的SEM照片

Fig. 2 SEM photos of cross-section of XLPE composites adding different amounts of CB

Gr体系则呈现出独特片层堆叠特征^[15],其形貌如图3所示,在Gr添加为5份时,出现细小纹路与零星片层,随Gr含量增加,片层结构增多并形成网络骨架,在Gr增加至20份时,最终呈现出片层密集堆

砌形态,这种结构有利于在XLPE体相内形成导电通路。F611在XLPE中的分散情况如图4所示,

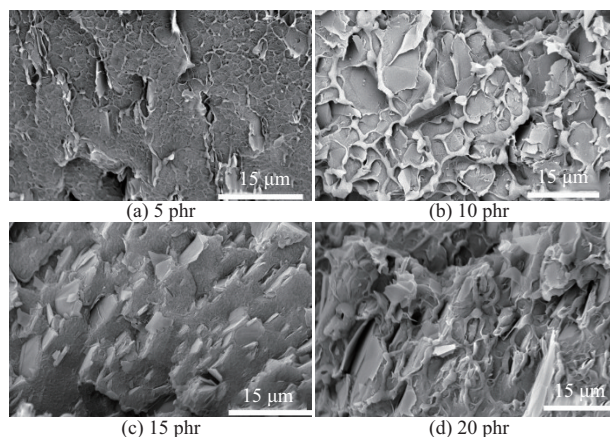


图3 Gr不同添加量时XLPE复合材料截面的SEM照片

Fig. 3 SEM photos of cross-section of XLPE composites adding different amounts of Gr

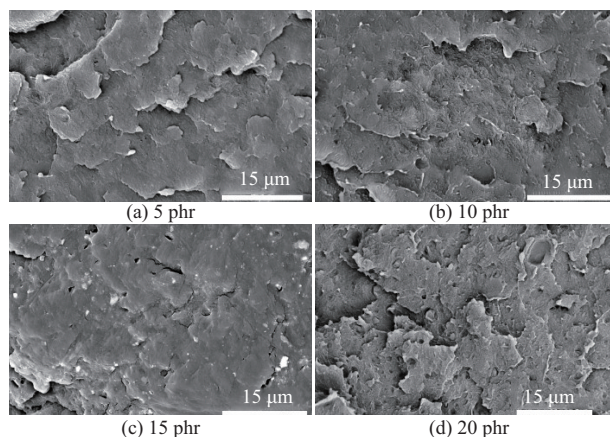


图4 F611不同添加量时XLPE复合材料截面的SEM照片

Fig. 4 SEM photos of cross-section of XLPE composites adding different amounts of F611

F611在较低含量时,截面相对平整,有微量的像“小液滴”状的形貌出现。值得注意的是,当F611添加量达到15~20份时,截面上出现一些孔洞,这可能是由于F611与XLPE基材的相容性不好而出现的相分离现象。

2.4 改性XLPE力学性能分析

在XLPE中引入不同的抗静电成分在赋予材料导静电性能的同时,不可避免地会对其力学性能产生影响。添加抗静电成分后,力学性能较添加前的PE-HD均有不同程度的降低,这可能是由于刚性填料颗粒在基体中的存在,会破坏聚合物相结构的连续性,成为应力集中点,所以在添加任何助剂时,都应该严格把控比例。

本研究系统测试了PE-HD和XLPE改性样品的拉伸强度与断裂伸长率,结果见表5。由表5可知,对于CB体系,随CB添加量的增加,XLPE的拉伸强度小幅上升,这可能是由于分散的CB颗粒在基体中起到了应力集中的作用,并在一定程度上阻碍了分子链的滑移,从而提升了材料强度。然而,CB颗粒的引入也同时导致了材料脆性增加,表现为断裂伸长率随添加量增加而持续下降。对于Gr体系,在低添加量时,其片层结构对拉伸强度影响不大,但会显著损害材料的韧性,导致断裂伸长率下降。当添加量超过10份后,大量的Gr片层成为严重的应力缺陷点,导致拉伸强度与断裂伸长率均显著降低。对于F611体系,从前文的交联度测试数据可以看到F611的引入会阻碍了交联网络的形成,一个不完整、疏松的交联网络使得分子链在外力下更易滑移,因此F611样品在低添加量时会表现出相对较高的断裂伸长率。为平衡抗静电性能和力学性能,将CB与F611进行了复配,从数据上可以看到,随着复配体系中CB比例的增加,材料的拉伸强度稳步回升,这得益于CB对强度的贡献以及其对交联网络的负面影响较小。同时,所有复配样品均保持了高于150%的断裂伸长率,显著优于同等导电水平下的单一CB体系。这一结果表明,复配策略成功地实现了在获得优良抗静电性能的同时,有效规避了单一组分带来的主要力学性能的缺陷。

3 结论

(1)通过DSC证实了PE-HD的交联改性成功。系统阐明了三种抗静电剂的构效关系:CB通过逾渗网络在10份添加量时实现电阻率 $10^6 \Omega \cdot m$ 的突

表5 PE-HD和XLPE改性样品的力学性能
Tab. 5 Mechanical properties of PE-HD and modified XLPE samples

Samplpes	Tensile strength/MPa	Breaking elongation/%	Breaking elongation-MAE/%
PE-HD	22.32	400.00	1.28
CB-5	17.62	155.41	2.51
CB-8	18.65	132.21	2.68
CB-10	18.97	121.86	3.23
CB-15	21.85	102.40	2.18
Gr-5	20.61	148.91	3.62
Gr-10	20.20	127.24	1.58
Gr-15	15.52	113.69	2.79
Gr-20	13.93	95.31	3.32
F611-5	18.15	170.25	1.76
F611-10	17.23	173.63	3.32
F611-15	16.35	152.47	2.98
F611-20	13.51	83.19	3.54
C ₂ F ₈	17.65	168.96	2.27
C ₃ F ₅	18.31	160.88	2.65
C ₈ F ₂	20.66	156.36	3.26

破;F611通过离子迁移,在5份添加量时显著降低表面电阻,但会损害交联度;Gr由于片层堆叠呈现出“体相导电优先、表面导电滞后”的特点。三种抗静电体系的效果:CB体系>F611体系>Gr体系。

(2)提出并验证了CB与F611的复配协同策略,当添加8份CB和2份F611时,材料在电阻率、交联度与韧性之间实现了最佳平衡,此配方为解决单一组分性能缺陷提供了具体、可行的方案。

参考文献

- [1] 秦晨元,邸麟婷,王文英,等. 聚乙烯滚塑专用料耐候性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10):82-85.
QIN Chenyuan, DI Linting, WANG Wenying, et al. Study on weather resistance of polyethylene for rotational molding[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(10):82-85.
- [2] GOBETTI A, RAMORINO G. Application of short-term methods to estimate the environmental stress cracking resistance of recycled HDPE[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27(11). DOI: 10.1007/s10965-020-02332-w.
- [3] 郭容,龚明健,代云中. MCA-APP-HT复配型无卤阻燃高密度聚乙烯的制备及性能研究[J]. 广东化工, 2025, 52(14):7-9, 36.
GUO Rong, GONG Mingjian, DAI Yunzhong. Preparation and performance study of MCA-APP-HT ternary halogen-free flame retardant high density polyethylene[J]. Guangdong Chemical Industry, 2025, 52(14):7-9, 36.
- [4] LIU S Q, ZHANG R, FU C C, et al. Changes in heat resistance and mechanical properties of peroxide cross-linking HDPE: Effects of compounding cross-linkers[J]. Polymers, 2025, 17(4). DOI: 10.3390/polym17040535.

- [5] JÖRGENS C, CLEMENS M. Fast calculation of steady-state charge distribution in high voltage power cables[J]. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2020, 33(5). DOI:10.1002/jnm.2713.
- [6] 刘艳玲,徐广海,苏家凯,等. 浅析导电炭黑在UHMWPE纤维中的应用研究[J]. *合成纤维*, 2025, 54(7):23–25, 44.
LIU Yanling, XU Guanghai, SU Jiakai, et al. Study on the application of conductive carbon black in UHMWPE fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2025, 54(7):23–25, 44.
- [7] ZHANG C M, CUI Y H, LIN S P, et al. Preparation and applications of hydrophilic quaternary ammonium salt type polymeric anti-static agents[J]. *e-Polymers*, 2022, 22(1):370–378.
- [8] 汪晓鹏. 高分子塑料抗静电剂的机理分析和应用[J]. *西部皮革*, 2021, 43(11):29–30, 47.
WANG Xiaopeng. Mechanism analysis and application of polymer plastic antistatic agents[J]. *West Leather*, 2021, 43(11):29–30, 47.
- [9] 刘博,张宜鹏,廖辉荣,等. 滚塑中交联高密度聚乙烯的交联行为[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(2):126–133.
LIU Bo, ZHANG Yipeng, LIAO Huirong, et al. Crosslinking behavior of cross-linked high-density polyethylene in rotational molding[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(2):126–133.
- [10] PÊ F R, RODRIGUES T A C S, DA CUNHA R B, et al. PLA/CB and HDPE/CB conductive polymer composites: Effect of polymer matrix structure on the rheological and electrical percolation threshold[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(12): 6 014–6 030.
- [11] MAMUNYA Y, MARUZHENKO O, PIDLISNYI A, et al. Heating elements based on PVC and carbon fillers[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(5):3 385–3 394.
- [12] 王晗,鹿立新,李亚飞. 炭黑含量对阻燃抗静电聚乙烯流变性能及力学性能的影响[J]. *塑料科技*, 2024, 52(4):39–42.
WANG Han, LU Lixin, LI Yafei. Effects of carbon black content on rheological properties and mechanical properties of flame-retardant and antistatic polyethylene[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(4):39–42.
- [13] 张煜,张琢,崔锡文,等. 金属有机框架材料对导电炭黑/水性聚氨酯紫外光固化涂层抗静电性能增强作用[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3):1 425–1 435.
ZHANG Yu, ZHANG Zhuo, CUI Xiwen, et al. Enhancement of antistatic properties of conductive carbon black/waterborne polyurethane UV-curable coatings by metal-organic framework materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(3):1 425–1 435.
- [14] 鲁超飞. 导电炭黑/尼龙6复合材料的制备与研究[D]. 成都:西南石油大学, 2020.
LU Chaofei. Preparation and study of conductive carbon black/nylon 6 composites[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020.
- [15] 张学锋,高斌,任业伟,等. 石墨烯改性抗静电塑料的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(4):37–42.
ZHANG Xuefeng, GAO Bin, REN Yewei, et al. Preparation and properties of graphene modified antistatic plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(4):37–42.