

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.010

玄武岩纤维/玄武岩颗粒增强高密度聚乙烯复合材料性能

闫锦锦, 司军辉, 崔志香

(福建理工大学材料科学与工程学院, 福州 350118)

摘要:玄武岩纤维(BF)和玄武岩颗粒(BP)增强高密度聚乙烯(PE-HD)力学性能优良,特别是硬度较高,用于防白蚁高压电缆护套的制造。首先利用硅烷偶联剂KH550对BF和BP进行表面改性,然后利用转矩流变仪熔融共混BP、BF和PE-HD,最后通过微型注塑机制备不同填料含量的PE-HD/BF/BP复合材料。通过扫描电子显微镜、差示扫描量热仪、同步热分析仪、万能试验机、动态力学性能分析仪、邵氏硬度计、流变仪等研究复合材料的形态、力学性能、结晶性能、热稳定性能及流变性能等。结果表明,与PE-HD相比,BF和BP填料的引入显著增强了PE-HD/BF/BP复合材料的力学性能和热稳定性能,当BF含量为20份,BP含量为10份时(BF20BP10),复合材料的力学性能最优,拉伸强度和拉伸弹性模量分别为47.51 MPa和3 331.39 MPa,分别增加了41.7%和211%,硬度达到70.2HD,明显超出防白蚁电缆对硬度的要求,即大于65HD,因此具有更优异的防白蚁啃食性能。与其它配方相比,BF20BP10复合材料具有较高的结晶度、储能模量,较小的损耗因子。因此,PE-HD/BF/BP复合材料的最优配方为BF含量20份,BP含量10份,制备获得的样品具有优异的硬度、良好的热稳定性和流变性能,有望在电缆护套材料领域得到广泛的应用。

关键词: 高密度聚乙烯;玄武岩纤维;玄武岩颗粒;复合材料;力学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0065-07

Properties of high-density polyethylene composites reinforced with basalt fiber/basalt particles

YAN Jinjin, SI Junhui, CUI Zhixiang

(College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract : Basalt fiber (BF) and basalt particle (BP) reinforced high-density polyethylene (PE-HD) have excellent mechanical properties, especially high hardness, and were used in the manufacturing of termite resistant high-voltage cable sheaths. Firstly, BF and BP were modified by silane coupling agent KH550, then BP, BF and PE-HD were melted and mixed by torque rheometer, and finally PE-HD/BF/BP composites with different filler content were prepared by micro-injection molding machine. The morphology, mechanical properties, crystallization properties, thermal stability and rheological properties of the composites were studied by scanning electron microscope, differential scanning calorimeter, synchronous thermal analyzer, universal testing machine, dynamic mechanical properties analyzer, shore hardness tester and rheometer. The results show that compared with PE-HD, the mechanical properties and thermal stability of PE-HD/BF/BP composites are significantly enhanced by the introduction of BF and BP fillers. When BF content is 20 phr and the BP content is 10 phr (BF20BP10), the composite exhibits optimal mechanical properties, with the tensile strength and tensile modulus being 47.51 MPa and 3 331.39 MPa, respectively, which represent an increase of 41.7% and 211%. The hardness reaches 70.02HD, significantly exceeding the hardness requirement for termite-resistant cables, which is greater than 65HD. Therefore, it possesses superior termite-resistant performance. Compared to other formulas, BF20BP10 composite has higher crystallinity, storage modulus and smaller loss factor. Therefore, the optimal formula of PE-HD/BF/BP composite is BF content 20 phr, BP content 10 phr, the prepared sample has excellent hardness, good thermal stability and rheological properties, which is expected to be widely used in the field of cable sheathing materials.

Keywords : high density polyethylene ; basalt fiber ; basalt particle ; composite ; mechanical property

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J01942, 2023J01948), 福厦泉国家自主创新示范区平台项目(3502ZCQXT2023005), 福建省高校产学研项目(2020H6019), 福建省对外合作产业化项目(2023I1006)

通信作者: 崔志香, 教授, 主要研究方向为高分子材料加工

收稿日期: 2023-03-08

引用格式: 闫锦锦, 司军辉, 崔志香. 玄武岩纤维/玄武岩颗粒增强高密度聚乙烯复合材料性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 65-71.

YAN Jinjin, SI Junhui, CUI Zhixiang. Properties of high-density polyethylene composites reinforced with basalt fiber/basalt particles[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 65-71.

随着电力行业的快速发展,电线电缆作为国民经济的“动脉”与“神经”,正朝着高压、高绝缘、功能化、环保化方向发展^[1]。为了减少电线电缆裸露在外经受长时间的日晒雨淋等导致的电缆老化问题,往往将电缆铺于地下,既美化城市,又减少安全隐患。但电缆埋于地下易受到白蚁的啃食,白蚁啃食电缆造成短路、停电停产、爆炸等事故时有发生。目前白蚁的防治方法有生态防治法、生物防治法、物理机械防治法和化学防治法等多种方法^[2-3],但這些方法存在对土壤造成污染、使用材料价格昂贵、生产工艺复杂等缺点。基于高密度聚乙烯(PE-HD)的易挤塑加工性和高硬度,使其在制备具有物理趋避性能的环保电力电缆方面具有较大的应用潜力。但是如何制备具有超高硬度、优异防蚁鼠啃食、耐环境应力开裂、环境友好等性能的PE-HD基电缆护套用复合材料仍是具有挑战性的问题。

PE-HD材料在建筑、电子、医疗、汽车、航空航天、传感、电力电缆等领域已得到广泛应用^[4-6],为了更好地满足各行各业的需求,采用无机填料对PE-HD进行改性,以提高其力学、电气、介电、热性能和阻燃性能等也得到了广泛关注^[7-12]。隋洋等^[13]研究了TiO₂填充PE-HD复合材料的力学性能、流动性能和结晶性能,结果表明,在PE-HD基体内添加低含量的TiO₂纳米粒子,复合材料的力学性能、流动性能和流动性能显著增强。Islam等^[14]制备了金属氧化物填充PE-HD复合材料用于高压电缆,研究了纳米颗粒对复合材料的拉伸性能、弯曲性能、冲击强度和硬度等影响,结果表明,金属氧化物的引入显著提高了复合材料的力学性能和电性能。Moura等^[15]研究了花岗岩废料对PE-HD复合材料的性能影响,结果表明,废料的回收利用显著降低了成本,同时增强了复合材料力学性能和微波吸收功能,可用于电子设备。Adole等^[16]采用偶联剂对玄武岩纤维进行预处理后制备了PE-HD/玄武岩纤维复合材料,结果表明,复合材料的拉伸强度提高了300%。笔者利用玄武岩填料优异的力学性能、丰富的材料来源、较低的价格以及PE-HD易加工成型性和高硬度等优势,制备成本低、绿色环保且具有较高硬度的防蚁电缆复合材料。同时应用玄武岩纤维(BF)和玄武岩颗粒(BP)的主要原因是,BF由于其高的拉伸强度和弹性模量,能够提供优异的增强效果,而BP与BF相互协同有利于提高材料的韧性和抗冲击性,

BF和BP的双重加入可以显著提高复合材料的力学强度、弹性模量和硬度。

因此,笔者首先采用硅烷偶联剂对BF和BP进行预处理,随后采用熔融共混方法制备PE-HD/BF/BP复合材料。获得的PE-HD/BF/BP复合材料具有优异的硬度、良好的热稳定性和流变性能,同时采用物理趋避方法实现防白蚁啃食电缆材料的目的,具有良好的环保意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-HD:CS K-3364 NT,苏州安俊尔塑胶科技有限公司;

玄武岩粉末:颗粒大小400目(38 μm),河北科旭建材有限公司;

玄武岩纤维:直径12 μm,长3 mm,常州市博超工程材料有限公司;

3-氨丙基三乙氧基硅烷:工业级,东莞市鼎海塑胶化工有限公司;

无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

去离子水:实验室自制。

1.2 实验仪器

转矩流变仪:HAAKE Polyab OS,德国Netzsch公司;

微型注塑机:HAAKE minijet pro,德国Netzsch公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Nova-Nano450,美国FEI公司;

万能试验机:AGS-X,日本SHIMADZU公司;

邵氏硬度计:LX-D,无锡市前洲测量仪器厂;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-204HP,德国Netzsch公司;

同步热分析仪:TG-209F1 Libra,德国Netzsch公司;

动态热机械性能分析(DMA)仪:DMA242E,德国Netzsch公司;

旋转流变仪:ARES G2,德国Netzsch公司。

1.3 试样制备

BP颗粒与BF纤维预处理。首先,将BP颗粒和BF纤维分别浸泡在丙酮溶液中2 h,随后用去离子水冲洗5次,置于60℃烘箱中干燥24 h;其次,将硅烷偶联剂KH550放入20%的乙醇水溶液,机械搅拌

20 min,配置获得硅烷偶联剂浓度为0.75%的均一改性溶液;再次,将BF和BP放入上述配置的KH550改性溶液,机械搅拌处理3 h、超声处理1 h、120 °C加热处理4 h;最后,抽滤取出BF和BP,经去离子水洗涤3次,在60 °C干燥箱内干燥处理24 h,获得改性的BP颗粒和BF纤维。

转矩流变仪熔融共混BP颗粒、BF纤维和PE-HD。首先,将PE-HD颗粒放入60 °C的烘箱中干燥处理8 h,随后,将上述改性获得的BP颗粒、BF纤维与PE-HD以一定的比例混合均匀后放入转矩流变仪中制备不同填料含量的PE-HD/BF/BP复合材料。转矩流变仪的温度为190 °C,转子转速为80 r/min,共混时间为5 min,挤出后造粒备用。PE-HD/BF/BP复合材料配方见表1。

表1 PE-HD/BF/BP复合材料配料表
Tab. 1 Formulation of PE-HD/BF/BP composites

Samples	Polymer/phr	Fillers/phr	
	PE-HD	BF	BP
F30P0	100	30	0
F25P5	100	25	5
F20P10	100	20	10
F15P15	100	15	15
F10P20	100	10	20
F5P25	100	5	25
F0P30	100	0	30
F0P0	100	0	0

微型注塑机制备PE-HD/BF/BP样品。将制得的PE-HD/BF/BP复合材料颗粒放入微型注塑机,在190 °C下进行试样条制备,其中模具温度为70 °C,注射压力为70 MPa,保压时间为9 s。

1.4 测试与表征

形貌观察:液氮脆断复合材料,随后喷铂处理,采用FESEM在5 kV下观察形貌与结构;

拉伸性能表征:使用万用试验机进行拉伸试验,样条根据ISO 6892-1:2019制备为哑铃型,样条尺寸为160 mm×13 mm×6 mm,设备速度为10 mm/min;

弯曲性能表征:使用万能试验机进行弯曲试验,所使用的弯曲样条按照GB/T 1449-2005制备,样品尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,弯曲速率为10 mm/min;

硬度性能表征:使用邵氏硬度计进行试验,所使用的样品厚度为2 mm;

热性能和结晶性能表征:采用DSC仪在氮气氛围下升温,升温速率10 °C/min,升温区间为25~

220 °C;

热降解性能表征:采用同步热分析仪在氮气氛围下,以10 °C/min的升温速率,从30 °C升温至600 °C;

动态力学性能表征:采用DMA仪在-20~125 °C范围内升温,加热速率为3 °C/min,恒定频率为1 Hz;

流变性能表征:采用动态流变仪在180 °C下,应变为0.1%,频率为100~0.01 Hz下进行测试,样品直径为25 mm,厚度为2 mm。

2 结果与讨论

2.1 PE-HD/BF/BP复合材料形貌分析

图1为不同BF和BP含量下的PE-HD/BF/BP复合材料断面SEM图。BF含量分别为30,25,20,15,10,5,0份,相对应的BP含量分别为0,5,10,15,20,25,30份。由图1a和图1g可以看出,BF纤维和BP颗粒都分别均匀分散在PE-HD基体内,BF纤维镶

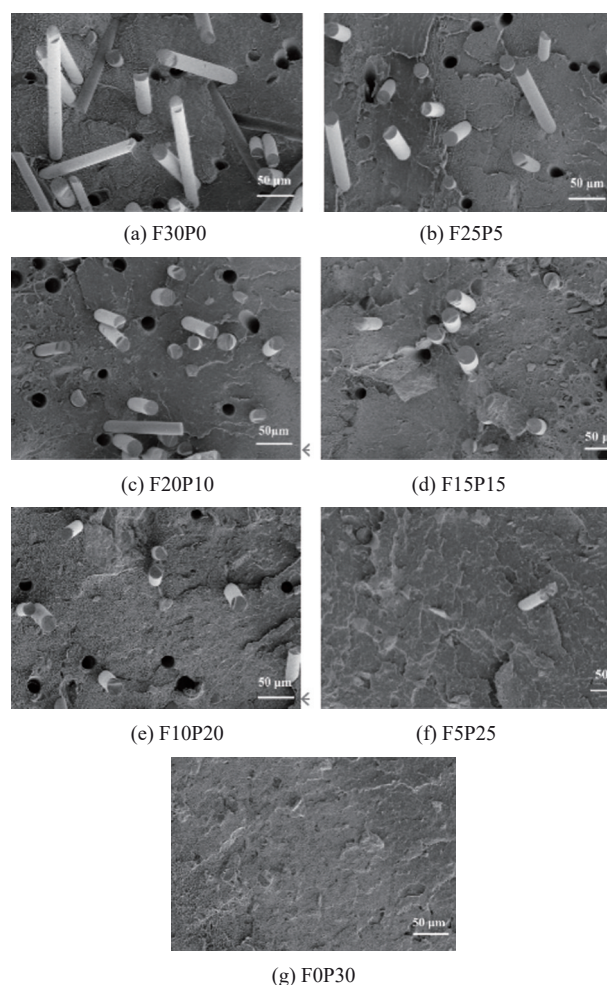


图1 PE-HD/BF/BP复合材料SEM图

Fig. 1 SEM images of PE-HD/BF/BP composites

嵌于 PE-HD 基体,与基体的界面明显,BP 颗粒被 PE-HD 基体包裹,无明显界面。由图 1b~图 1f 可以看出,随着 BF 纤维含量的降低和 BP 颗粒含量的增加,BF 纤维与 PE-HD 基体界面逐渐模糊,脆断受力时纤维拔出现象降低,这表明 BP 颗粒的添加,使 BF 纤维与基体的相容性提升,界面结合力增强,这有利于复合材料力学性能的提升。

2.2 PE-HD/BF/BP 复合材料力学性能分析

图 2 为 PE-HD/BF/BP 复合材料应力-应变曲线,由应力-应变曲线计算获得复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量见表 2。由表 2 可以看出,与 PE-HD 相比,PE-HD/BF/BP 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均高于 PE-HD,这说明 BF 纤维和 BP 颗粒的加入均可显著增强 PE-HD/BF/BP 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量。随着 BF 纤维含量的降低,BP 颗粒含量的增加,复合材料拉伸强度和拉伸弹性模量先增加后降低,当 BF 含量为 20 份,BP 含量为 10 份时,复合材料的拉伸强度及其弹性模量达到最大值,分别为 47.51 MPa 和 3 331.39 MPa,比 PE-HD 增加了 41.7% 和 211%,这主要是由于当仅加入 BF 纤维时(F30P0),BF 纤维镶嵌于 PE-HD 基体内,BF 本身具有优异的强度和刚度,导致 BF/PE-HD 复合材料的抗拉和抗弯能力显著增强,当同时加入 BF 纤维和 BP 颗粒时(F25P5,F20P10),少量 BP 的加入

增加了 BF 与 PE-HD 基体间的界面结合作用,使 PE-HD/BF/BP 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量提升,但是,当进一步增加 BP 颗粒,减少 BF 纤维时(F15P15,F10P20,F5P25),由于 BP 本身的强度和刚度低于 BF,同时 BP 含量增加易引起团聚现象等导致 PE-HD/BF/BP 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量反而降低。表 2 给出了复合材料弯曲强度、弯曲弹性模量和硬度,可以看出,BF 纤维和 BP 颗粒的增加虽然使复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量稍微下降,但是其硬度明显增加,复合材料的硬度均大于 69HD,显著高于 PE-HD 材料的硬度 64HD,当 BF 含量为 20 份,BP 含量为 10 份时,复合材料的硬度达到最大值 70.02 HD,比 PE-HD 增加了 9.4%,在研究中表明邵氏硬度大于 64HD 时对白蚁具有防啃食的作用^[17],因此具有更优异的防鼠防蚁啃食性能,在电缆护套材料领域具有广泛的应用前景。

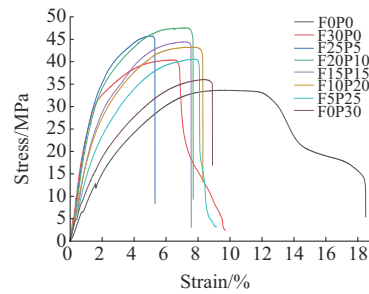


图 2 PE-HD/BF/BP 复合材料的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of PE-HD/BF/BP composites

表 2 PE-HD/BF/BP 复合材料力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of PE-HD/BF/BP composites

Samples	Tensile strength/ MPa	Tensile elastic- modulus/MPa	Elongation at break/%	Bending strength/ MPa	Bending elastic- modulus/MPa	Hardness(HD)
F0P0	33.52	1 070.08	38.39	22.8	518.42	64.0
F30P0	40.37	2 832.7	19.41	34.3	2 423.01	70.58
F25P5	45.69	3 287.14	10.62	33.8	1 768.31	70.01
F20P10	47.51	3 331.39	15.40	31.9	1 758.32	70.02
F15P15	44.42	2 380.55	15.15	29.8	1 411.54	69.10
F10P20	43.24	2 287.86	16.61	28.7	1 134.6	69.54
F5P25	40.56	1 702.33	18.24	27.3	907.12	69.45
F0P30	36.02	1 694.42	17.81	25.8	727.132	69.80

2.3 PE-HD/BF/BP 复合材料热性能分析

图 3 为不同 BF 和 BP 含量下 PE-HD/BF/BP 复合材料降温和二次升温过程 DSC 曲线。从 DSC 曲线计算获得的复合材料的熔融温度、结晶温度和结晶度见表 3。由图 3 可以看出,PE-HD/BF/BP 复合材料的结晶峰和熔融峰都为单一降热峰和吸热峰,说明 BF 和 BP 的加入没有改变 PE-HD 的晶型。在降温

过程中(图 3a 和表 3),与 PE-HD 相比,PE-HD/BF/BP 复合材料的结晶度稍微下降,这主要是由于填料的加入阻碍了高分子链在结晶过程中运动。随着 BP 颗粒含量的增加,BF 纤维含量的降低,复合材料的结晶度先增加后降低,当 BF 含量为 20 份,BP 含量为 10 份时,复合材料的结晶度达到最大值 53.6%,说明 BF 和 BP 具有协同效应,合适的填料比例对高

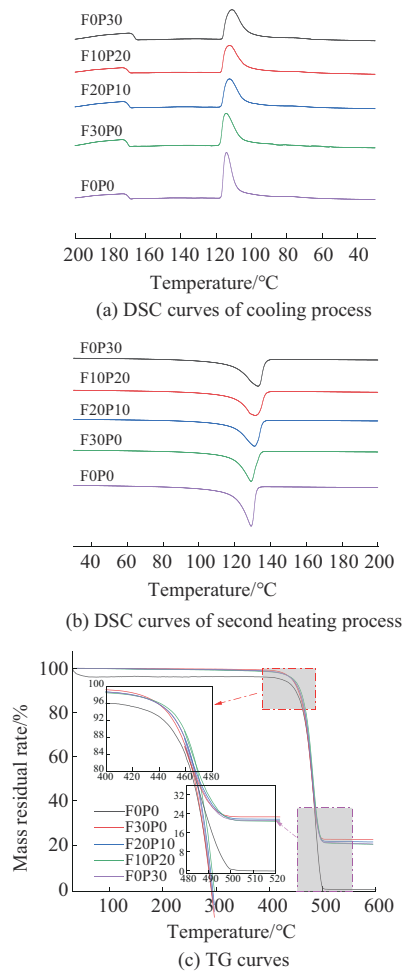


图3 PE-HD/BF/BP复合材料结晶性能和热稳定性能

Fig. 3 Crystallization and thermal stability property of PE-HD/BF/BP composites

表3 PE-HD/BF/BP复合材料熔融温度、结晶温度和结晶度

Tab. 3 Melting temperature, crystallization temperature and crystallinity of PE-HD/BF/BP composites

Samples	$T_m/^\circ\text{C}$		$T_c/^\circ\text{C}$		$X_c/\%$
	Onset	Peak	Onset	Peak	
F30P0	115.6	129.1	117.7	115.4	51.1
F20P10	115.8	130.5	117.5	112.6	53.6
F10P20	116.4	131.5	117.3	112.3	48.5
F0P30	116.5	133.3	117.0	110.4	47.5
F0P0	110.6	128.8	119.1	114.5	55.2

Note: T_m is melting temperature, T_c is crystallization temperature, X_c is crystallinity.

分子链的阻碍作用较小,能使PE-HD在更高的温度下结晶,而当BP或BF某相含量较大时反而使复合材料的结晶度下降。在升温过程中(图3b和表3),PE-HD的起始熔融温度和熔融峰值温度为110.6℃和128.8℃,而PE-HD/BF/BP复合材料起始熔融温度和熔融峰值温度向高温处偏移,当BF纤维含量为10份、BP颗粒含量为20份时,复合材料的起始熔

融温度和熔融峰值温度达116.4℃和131.5℃,分别升高了5.8℃和2.7℃,因此,BF和BP引入可显著提升PE-HD/BF/BP复合材料的热稳定性能,这主要是由于填料与PE-HD具有较好的相容性以及填料本身具有良好的比热能。图3c为PE-HD和PE-HD/BF/BP复合材料TG曲线图,可以看出,与PE-HD相比,PE-HD/BF/BP复合材料具有较高的热降解温度,表明复合材料的热稳定性能得到提升。

2.4 PE-HD/BF/BP复合材料动态热力学性能分析

图4为不同BF和BP含量下PE-HD/BF/BP复合材料的动态热力学性能。从图4a可以看出,复合材料的储能模量都随着温度的升高而下降,这是因为随着温度的升高,PE-HD的流动性增加,复合材料的刚性下降。在相同温度下,复合材料的储能模量均高于PE-HD,这是因为BP和BF刚性材料的加入增强了复合材料的刚性,降低了流动性能。当BF为20份,BP含量为10份时,复合材料具有最高的储能模量,这是因为F20P10复合材料的结晶度高于其他复合材料(表3),从而导致储能模量显著增加。由图4b可以看出,随着温度升高,复合材料的损耗因子($\tan\delta$)增大,这是因为温度升高导致PE-HD分子链的自由运动空间增大,分子间相互摩擦损耗增大。当BF含量较高时复合材料的 $\tan\delta$ 较小,当BP含量较高时复合材料的 $\tan\delta$ 较大,这主要是由于BF

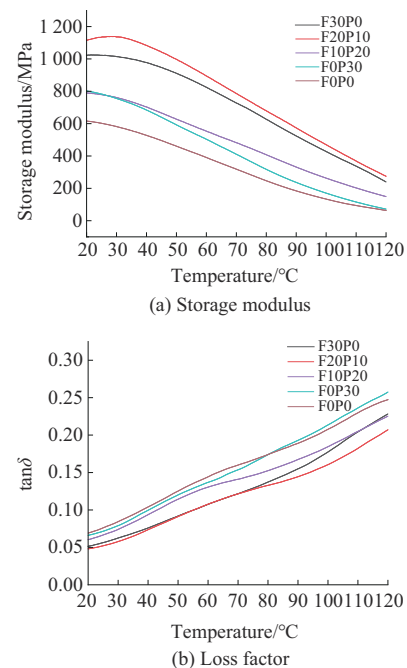


图4 PE-HD/BF/BP复合材料动态热力学性能

Fig. 4 Dynamic thermo-mechanical property of PE-HD/BF/BP composites

纤维具有较高的长径比,对PE-HD分子链运动的限制作用较大,促使能量耗散小。

2.5 PE-HD/BF/BP复合材料流变性能分析

图5为PE-HD/BF/BP复合材料流变性能,即复合材料的储能模量、损耗模量和复合黏度与频率的关系。储存模量和损耗模量分别表示分子纠缠引起的可逆弹性变形和聚合物链滑移引起的不可逆黏性流动。

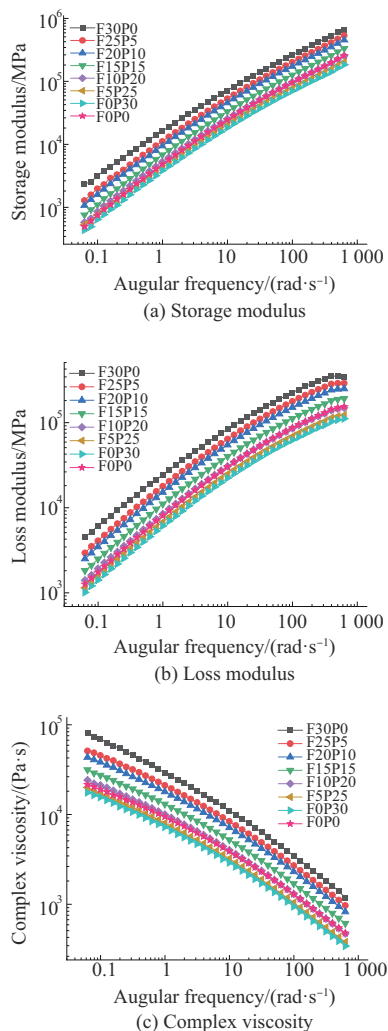


图5 PE-HD/BF/BP复合材料流变性能

Fig. 5 Rheological property of PE-HD/BF/BP composites

由图5a和图5b可以看出,PE-HD/BF/BP复合材料表现出黏弹性行为,在相同频率下,与PE-HD相比,当BF具有较高含量时,PE-HD/BF/BP复合材料具有较高的储存模量和损耗模量,且随着BF含量的增加,复合材料的储存模量和损耗模量增加,这可能是由于BF含量的增加使复合材料熔体更容易形成缠结结构,缠结效应产生可逆弹性变形,并一定程度上阻止了熔体结构的松弛。从图5c可以

看出,随着BF纤维含量的增多,PE-HD/BF/BP复合材料的黏度逐渐变大,这使复合材料的加工成型性降低。同时,PE-HD和PE-HD/BF/BP复合材料均表现出剪切变稀的现象,与PE-HD熔体相比,PE-HD/BF/BP熔体的黏度在所有频率下都表现出更强的剪切变稀趋势,这种趋势随着BF含量的增加而增强。

3 结论

采用转矩流变仪和微型注塑机成型的方法制备了PE-HD/BF/BP复合材料,探究了不同BF和BP填料含量对复合材料形态、力学性能、结晶性能、热稳定性能及流变性能等影响,主要得出以下结论:

(1) 改性BF和BP填料可以在PE-HD基体内均匀分散,当添加适当含量的填料时,可获得具有优异综合力学性能和热稳定性能的PE-HD/BF/BP复合材料。

(2) 随着BF含量的降低,BP含量的增加,PE-HD/BF/BP复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量先增加后降低,当BF含量为20份,BP含量为10份时(BF20BP10),复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量达47.51 MPa和3 331.39 MPa,比PE-HD分别增加了41.7%,211%。

这是因为合适的BP颗粒的加入,协同增强了BF与PE-HD基体间的相容性,提升了复合材料界面结合作用。

(3) 当BF含量为20份,BP含量为10份时,复合材料的硬度达到70.02 HD,比PE-HD增加了9.4%,因此具有更优异的防蚁啃食性能,在电缆护套材料领域具有广泛的应用前景。

(4) 随着BP颗粒含量的增加,BF纤维含量的降低,复合材料的结晶度先增加后降低,当BF含量为20份,BP含量为10份时,复合材料的结晶度达到最大值53.6%,说明BF和BP具有协同效应,合适的填料比例对高分子链的阻碍作用较小,能使PE-HD在更高的温度下结晶。

(5) 当BF为20份,BP含量为10份时,复合材料具有最高储能模量,这是因为F20P10复合材料的结晶度高于其他复合材料,从而储能模量显著增加。

(6) PE-HD/BF/BP复合材料的最优配方为BF含量20份,BP含量10份,获得的样品具有优异的硬度、良好的热稳定性和流变性能,有望在电缆护套材料领域得到广泛的应用。

参考文献

[1] 何帮飞. 环保型防鼠防蚁中高压电力电缆的研制[J]. 光纤与电缆

- 及其应用技术,2017(4):28-30.
- HE Bangfei. Development of eco-friendly anti-rat/termite medium and high voltage power cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2017(4):28-30.
- [2] 钟文锋. 高压电力电缆白蚁危害及综合治理研究[J]. 电线电缆, 2008(3):12-16.
- ZHONG Wenfeng. Termite damage to HV power cables and investigation of the counter measures[J]. Wire & Cable, 2008(3):12-16.
- [3] 李战毓,刘玉飞,王宁,等. 塑料用环保型防蚁防鼠驱避剂的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015(5):24-27.
- LI Zhanshu, LIU Yufei, WANG Ning, et al. Research progress in eco-friendly type anti-ant and anti-rat repellents for plastics[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2015(5):24-27.
- [4] 向贵锋,刘超,赵瑞,等. 滚塑工艺对IV型储氢瓶PE-HD内胆性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9):77-82.
- XIANG Guifeng, LIU Chao, ZHAO Rui, et al. Effect of rotational molding process on the performance of PE-HD liner of type IV hydrogen storage tank[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9):77-82.
- [5] 孙海涛,凌礼恭,陈树山,等. 核电厂核级高密度聚乙烯管道应用技术要求[J]. 中国塑料, 2021, 35(4):93-97.
- SUN Haitao, LING Ligong, CHEN Shushan, et al. Technical requirements for application of nuclear class piping made by PE-HD in nuclear power plant[J]. China Plastics, 2021, 35(4):93-97.
- [6] 曹张然,孟翔,马桂宁. 高压电缆用膨胀型阻燃聚乙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2022(3):25-28.
- CAO Zhangran, MENG Xiang, MA Guining. Preparation and properties of intumescent flame retardant polyethylene composites for high voltage cables[J]. Plastics Science and Technology, 2022(3):25-28.
- [7] HELAL E, POTTIER C, DAVID E, et al. Polyethylene/thermoplastic elastomer/zinc oxide nanocomposites for high voltage insulation applications: Dielectric, mechanical and rheological behavior[J]. Eur Poly J, 2018, 100:258-269.
- [8] 薛禹,谢锦辉,谭妍妍,等. HDPE/BaSO₄复合材料的制备及热氧老化性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7):64-74.
- XUE Yu, XIE Jinhui, TAN Yanyan, et al. Preparation of HDPE/BaSO₄ composites and thermal oxygen aging properties[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(7):64-74.
- [9] 宋宣. 氮化硼/椰壳炭/聚乙烯复合材料制备及综合性能实验研究[D]. 北京:华北电力大学, 2022.
- SONG Xuan. Experimental study on preparation and comprehensive properties of boron nitride/coconut shell carbon/polyethylene composites[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [10] 谢锦辉. HDPE/改性无机纳米粒子复合材料的制备与性能研究[D]. 贵阳:贵州民族大学, 2023.
- XIE Jinhui. Preparation and properties of HDPE/modified inorganic nanoparticle composites[D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2023.
- [11] 闫永思,吴纯,孙萍,等. 基于碳材料的高密度聚乙烯导热材料的制备[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):25-29.
- YAN Yongsu, WU Chun, SUN Ping, et al. Preparation of high-density polyethylene thermal conductive materials based on Carbon Fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):25-29.
- [12] 陈涛,肖雄,汪济奎,等. 聚焦磷酸哌嗪在高密度聚乙烯中的阻燃性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9):132-138.
- CHEN Tao, XIAO Xiong, WANG Jikui, et al. Flame retardant properties of piperazine polypyrophosphate flame retarded PE-HD[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9):132-138.
- [13] 隋洋,仇张杰,崔毅,等. TiO₂纳米粒子增强超高分子量聚乙烯和高密度聚乙烯复合材料的性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2):16-22.
- SUI Yang, QIU Zhangjie, CUI Yi, et al. Properties of ultra-high molecular weight polyethylene and high-density polyethylene composites reinforced with TiO₂ nanoparticles[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):16-22.
- [14] ISLAM M, RAHAMAN M, ALDALBAHI A, et al. High density polyethylene and metal oxides based nanocomposites for high voltage cable application[J]. J Appl Polym Sci, 2022, 139(11). DOI:10.1002/app.51787.
- [15] DE MOURA L C R, SOARES B G, INDRUSIAK T, et al. Granitic quarry waste as a dual functional filler for high density polyethylene - based composites: Mechanical and microwave absorbing properties[J]. J Appl Polym Sci, 2022, 139(8). DOI: 10.1002/app.51675.
- [16] ADOLE O, ANGUILANO L, MINTON T, et al. Basalt fibre-reinforced high density polyethylene composite development using the twin screw extrusion process[J]. Polym Test, 2020, 91. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106467.
- [17] 曹永刚,李影丽,杨建伟,等. 尼龙12在防白蚁电力电缆的应用[J]. 电线电缆, 2012(6):32-34.
- CAO Yonggang, LI Yingli, YANG Jianwei, et al. The application of nylon 12 in termite resistant power cables[J]. Wire & Cable, 2012(6):32-34.