

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.015

热压成型工艺对 PE-LLD/CFBFA 复合材料性能影响

李亚荣, 廖洪强, 高宏宇, 段德丹

(国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室, 山西大学资源与环境工程研究所, 太原 030001)

摘要: 将循环流化床粉煤灰 (CFBFA) 和线型低密度聚乙烯 (PE-LLD) 通过热压成型法制备成 PE-LLD/CFBFA 复合材料板材, 在 CFBFA 质量分数为 60% 时, 探讨了成型压力、热压温度、热压时间对 PE-LLD/CFBFA 复合材料力学性能的影响, 并在优化的实验条件下探讨了 CFBFA 添加量对复合材料力学性能的影响。结果表明, 复合材料的弯曲性能随成型压力、热压温度和热压时间的增加基本呈现先上升后下降的变化规律, 冲击性能则大致呈现相反的变化趋势, 过高的 CFBFA 添加量会导致复合材料力学性能严重下降。在成型压力 6 MPa、热压温度 180℃ 和热压时间 45 min 条件下, CFBFA 质量分数为 60% 时制得的复合材料邵氏硬度为 66.2, 弯曲强度为 17.69 MPa, 弯曲弹性模量为 2 092 MPa, 冲击强度为 2.91 J/m², 该实验条件属优化参数, 可用于指导工业生产。

关键词: 循环流化床粉煤灰; 线型低密度聚乙烯; 复合材料板材; 热压成型; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0086-06

Effect of Hot Pressing Process on Properties of PE-LLD/CFBFA Composites

Li Yarong, Liao Hongqiang, Gao Hongyu, Duan Dedan

(National Key Laboratory of Coal Waste Resource Utilization Technology for Environmental Protection, Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030001, China)

Abstract : Circulating fluidized bed fly ash (CFBFA) and linear low density polyethylene (PE-LLD) were prepared into PE-LLD/CFBFA composite plates by hot pressing. When the content of CFBFA was 60wt%, the effects of forming pressure, hot pressing temperature and hot pressing time on the mechanical properties of PE-LLD/CFBFA composites were discussed, and the effects of the content of CFBFA on the mechanical properties of composites were discussed under the optimized experimental conditions. The results show that the bending properties of the composites increase first and then decrease basically with the increase of forming pressure, hot pressing temperature and hot pressing time, while the impact properties show the opposite trend generally. Excessive addition of CFBFA can lead to a serious decline in the mechanical properties of the composites. Under the conditions of forming pressure 6 MPa, hot pressing temperature 180℃ and hot pressing time 45 min, when the content of CFBFA is 60wt%, the Shore hardness of the composite is 66.2, the bending strength is 17.69 MPa, the bending modulus is 2 092 MPa and the impact strength is 2.91 J/m². The experimental conditions are optimized parameters and can be used to guide industrial production.

Keywords : circulating fluidized bed fly ash ; linear low density polyethylene ; composite plate ; hot pressing ; mechanical property

线型低密度聚乙烯 (PE-LLD) 在聚乙烯类材料中相对较轻, 具有很好的柔软性和延展性, 化学性能稳定、易加工, 由于其优异的性能, 被广泛应用于许多方面, 如薄膜、模塑产品、管状产品等。但 PE-LLD 也存在刚性差和热稳定性差等缺点, 故需要

对其进行改性, 刚性无机粒子填充是一种有效提高 PE-LLD 性能的方法^[1-3]。循环流化床粉煤灰 (CFBFA) 是煤在循环流化床 (CFB) 锅炉燃烧后的产物, 由于其活性较低, 难以直接规模化用于水泥和混凝土中, 绝大多数 CFBFA 仍处于填埋阶段, 急需

基金项目: 国家重点研发项目 (2020YFB0606205)

通信作者: 廖洪强, 教授, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用

收稿日期: 2021-11-13

引用格式: 李亚荣, 廖洪强, 高宏宇, 等. 热压成型工艺对 PE-LLD/CFBFA 复合材料性能影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1):86-91.

Li Yarong, Liao Hongqiang, Gao Hongyu, et al. Effect of hot pressing process on properties of PE-LLD/CFBFA composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):86-91.

开发利用^[4-6]。将 CFBFA 用作聚乙烯树脂的填料,一方面可以提高材料的性能,并可以达到降低成本的效果^[7-10];另一方面可以拓展固体废弃物 CFBFA 的利用途径,从而保护环境。这方面研究已经引起科技工作者的广泛兴趣,如 Deepthi 等^[11]制备了高密度聚乙烯(PE-HD)/粉煤灰空心微珠复合材料,对粉煤灰进行硅烷接枝改性,同时利用增容剂顺丁烯二酸二丁酯(DBM)对 PE-HD 进行接枝,合成了 PE-HD-g-DBM,研究了复合材料的力学和热学性能。黄勇等^[12]以改性粉煤灰作填充母料,使用双螺杆挤出设备得到 PE-HD 复合材料,研究了母料熔体的流动性及复合材料的热性能。然而这方面研究才刚刚开始,工业化尚未真正形成,大量的基础研究工作急需开展。

加工工艺参数是影响复合材料性能和界面特性的重要因素^[13],因此选择合适的工艺参数以获得性能更好的复合材料非常重要。以往的研究中多对粉煤灰进行改性后填充到树脂基体中,但对复合材料制备工艺参数的探讨研究较少。笔者将 CFBFA 添加到 PE-LLD 中,通过热压成型工艺制备了 PE-LLD/CFBFA 复合材料板材,探究工艺条件(成型压力、热压温度、热压时间)及 CFBFA 添加量对复合材料板材试件性能的影响,从而得到制备复合板材所需较优的工艺条件,以期工业应用提供基础数据。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-LLD 粉料:DJM1820,密度 916 kg/m³,熔体流动速率 2.5 g/10 min,中国石化扬子石油化工有限公司;

CFBFA:中位粒径 $D_{50}=23.3\ \mu\text{m}$,山西阳泉某电厂。

1.2 主要仪器和设备

平板硫化机:QLB-60t 型,南通海利特橡塑机械有限公司;

游标卡尺:0~150 mm,江苏无锡凯保鼎工具有限公司;

硬度计:LX-D 型,浙江台州艾测有限公司;

多功能万能试验机:CL-5000N 型,江都区昌隆试验机械厂;

数显悬臂梁冲击试验机:CL-3003 型,江都区昌隆试验机械厂;

扫描电子显微镜(SEM):TM3030 型,日本日

立公司。

1.3 试件制备

按 PE-LLD:CFBFA 质量比为 4:6 称取一定量原料,混合均匀,并将混合好的物料在模具中铺平,所用模具尺寸为 300 mm×300 mm,然后放置在平板硫化机上。设置一定的压力、温度和热压时间,压制完成冷却后脱模得到板材,将板材按一定标准尺寸裁剪后得到不同尺寸试件,用于测试性能。

1.4 性能测试与表征

密度按照 GB/T 17657-2013 测定,试件密度为试件质量与体积之比,试件尺寸 50 mm×50 mm。

邵氏硬度按照 GB/T 2411-2000 进行测试。

弯曲性能按照 GB/T 17657-2013 测试,采用三点加载方式,试件尺寸 150 mm×50 mm×4 mm,试件跨距 100 mm,下压速率 4 mm/min。

冲击性能按照 GB/T 1843-2008 测试,试件尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,冲击能量 5.5 J,摆锤预扬角 150°。

断面形貌分析:样品取自冲击试件,将适量样品用导电胶粘贴在样品台上,经喷金处理后置于 SEM 中观察其冲击断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 成型压力对复合材料试件性能的影响

实验用物料总质量 400 g,在保持热压温度 180 ℃、热压时间 45 min 条件下,固定 PE-LLD:CFBFA 质量比为 4:6,分别在 2,4,6,8,10 MPa 压力下热压成型制备了 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件,其密度、硬度、弯曲强度、弯曲弹性模量和冲击强度数据见表 1。

表 1 不同成型压力下 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件性能数据

成型压力 / MPa	密度 / (kg·m ⁻³)	硬度	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模量 / MPa	冲击强度 / (J·m ⁻²)
2	1317	55.7	14.70	1679	3.45
4	1389	62.6	16.42	1905	2.94
6	1401	66.2	17.69	2092	2.91
8	1417	62.1	16.98	1906	3.39
10	1446	62.0	15.81	1895	3.38

由表 1 结果发现,复合材料试件的密度随压力增大而增大,从 2 MPa 的 1317 kg/m³ 增至 10 MPa 的 1446 kg/m³,增幅约为 9.8%;硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量随成型压力的增大呈现先增加后降低的变化趋势,冲击强度趋势相反。成型压力从 2 MPa 增大至 6 MPa 时,试件的硬度从 55.7 增至 66.2,增幅约为 18.8%,对应弯曲强度和弯曲弹性模量分别从 14.70 MPa 和 1679 MPa 升高至

17.69 MPa 和 2092 MPa,增幅分别约为 20.3% 和 24.6%,对应冲击强度从 3.45 J/m² 降至 2.91 J/m²,降幅约为 15.7%。而后,成型压力从 6 MPa 再继续增加至 10 MPa 时,试件的硬度从 66.2 降至 62.0,降幅约为 6.3%,对应弯曲强度和弯曲弹性模量则分别降低至 15.81 MPa 和 1895 MPa,降幅分别约为 10.6% 和 9.4%,对应冲击强度从 2.91 J/m² 增至 3.38 J/m²,增幅约为 16.2%。制品的硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量在 6 MPa 成型压力下达到极大值,分别为 66.2,17.69 MPa 和 2092 MPa;而冲击强度则达到极小值,为 2.91 J/m²。这说明成型压力对试件的力学性能有较大影响,在可实施成型压力变换范围内(2~10 MPa),成型压力可影响材料密度最大变化幅度约为 9.8%,影响硬度最大变化幅度约为 18.8%,影响弯曲强度和弯曲弹性模量的最大变化幅度分别约为 20.3% 和 24.6%,影响冲击强度的最大变化幅度约为 16.2%。

通过 SEM 对不同成型压力下试件的冲击断面观察(如图 1),发现成型压力从 2 MPa 增大至 6 MPa 时,试件中的空隙减少,致密度增加,塑性物料在无机颗粒间的填充更加均匀;当成型压力从 6 MPa 增大至 10 MPa 时,试件中的塑性物料则出现了明显的聚集现象。这说明,塑化物料在高压下易出现流动聚集现象,反而影响有机组分和无机组分之间的均匀分布,导致弯曲强度和弯曲弹性模量降低。

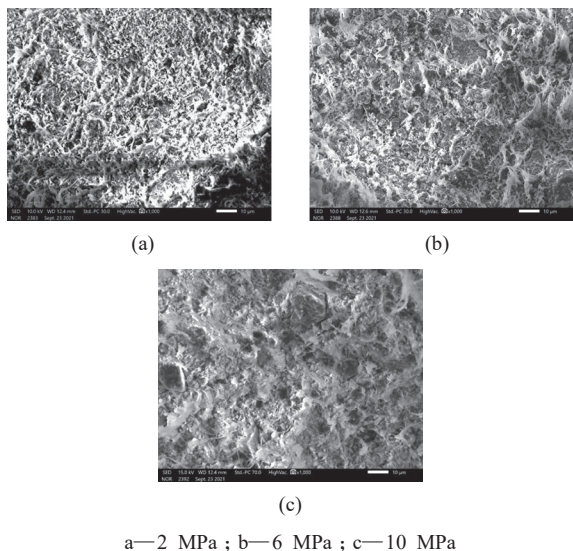


图1 不同成型压力下 PE-LLD/CFBFA 复合材料
试件断面 SEM 照片

弯曲强度和弯曲弹性模量主要考察复合材料的刚性,冲击性能主要考察复合材料的韧性,两者都

是考察物体发生形变的难易程度。复合材料的韧性和刚性呈负相关,其刚性和韧性的大小一方面取决于复合材料中无机刚性粒子的添加量,另一方面取决于复合材料中无机和有机粒子界面结合情况。树脂在高温下处于粘流状态,成型压力的不同,影响复合材料内部气泡的形成和生长迁移,从而影响复合材料孔隙大小,影响复合材料的密实程度^[14](这从表 2 中复合材料的密度随成型压力增大而增大可以看出),进而影响树脂与无机粒子的界面结合情况,由此影响有机和无机组分对复合材料性能的协同作用,最终表现为影响复合材料的力学性能。

2.2 热压温度对复合材料试件性能的影响

实验用物料总质量 400 g,保持成型压力 6 MPa、热压时间 45 min 条件不变,固定 PE-LLD:CFBFA 质量比为 4:6,分别在 170,175,180,185,190℃ 温度下热压成型制备了 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件,其密度、硬度、弯曲强度、弯曲弹性模量和冲击强度数据见表 2。

表 2 不同热压温度下 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件性能数据

热压温度 / ℃	密度 / (kg · m ⁻³)	硬度	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模 量 /MPa	冲击强度 / (J · m ⁻²)
170	1430	65.0	16.70	1733	5.42
175	1395	63.4	17.17	1934	3.40
180	1401	66.2	17.69	2092	2.91
185	1399	64.3	16.77	1562	2.88
190	1394	64.2	15.57	1604	3.59

由表 2 结果发现,复合材料的密度随热压温度影响变化不大,硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量随热压温度的增加基本呈现先增加后减小的变化趋势,冲击强度趋势相反。当热压温度从 170℃ 增至 180℃ 时,试件的硬度从 65.0 增至 66.2,增幅约为 1.8%,对应的弯曲强度和弯曲弹性模量分别从 16.7 MPa 和 1733 MPa 增加至 17.69 MPa 和 2092 MPa,增幅分别约为 5.9% 和 20.7%,而对应冲击强度则从 5.42 J/m² 降至 2.91 J/m²,降幅约为 46.3%。当热压温度从 180℃ 继续升高至 190℃ 时,试件的硬度从 66.2 降至 64.2,降幅约为 3.0%,对应弯曲强度和弯曲弹性模量分别从 17.69 MPa 和 2092 MPa 降至 15.57 MPa 和 1604 MPa,降幅分别约为 12.0% 和 23.3%,而对应冲击强度则从 2.91 J/m² 增至 3.59 J/m²,增幅约为 23.4%。试件的硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量在 180℃ 时达到极大值,分别为 66.2,17.69 MPa 和 2092 MPa;而冲击强度则在 185℃ 达到极小值,为 2.88 J/m²。这说明,热压温度对复合材料的力学性能也有较大影响,

主要表现在影响弯曲弹性模量和冲击强度两指标上,在 20℃ 可变热压温度范围内 (170 ~ 190℃),复合材料的冲击强度最大变化幅度约为 46.3%,而弯曲弹性模量的最大变化幅度约为 23.3%,弯曲强度的最大变化幅度约为 12%,硬度的最大变化幅度约为 3.0%,密度的最大变化幅度约为 2.0%。

由此说明热压温度对复合板材力学性能有一定影响,主要是因为温度低时,PE-LLD 熔体的流动性较小,与无机粒子的界面作用差,随温度增加到 180℃ 树脂基体的流动性增大,从而 PE-LLD 复合材料黏度下降,熔体内自由体积增大,链段运动所要克服的活化能减少,PE-LLD 分子能够很好地包覆在无机粒子的表面,表现为力学性能良好^[15],当温度继续增加至 190℃,树脂基体流动性更大而造成有机料与无机料之间的分离,使有机料和无机料之间分布不均匀,从而降低了试件的弯曲性能。

2.3 热压时间对试件性能的影响

实验用物料总质量 400 g,保持热压压力 6 MPa、热压温度 180℃ 条件不变,固定 PE-LLD:CFBFA 质量比为 4:6,分别在热压时间 15,30,45,60 min 下热压成型制备了 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件,其密度、硬度、弯曲强度、弯曲弹性模量和冲击强度数据见表 3。

表 3 不同热压时间下 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件性能数据

热压时间 / min	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硬度	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模 量 /MPa	冲击强度 / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
15	1312	64.5	15.06	1407	3.35
30	1337	64.6	16.05	1743	3.03
45	1401	66.2	17.69	2092	2.91
60	1392	65.3	17.04	1868	2.92

由表 3 结果发现,复合材料的密度、硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量随热压时间的增加出现先增加后减小的变化趋势,而冲击强度随热压时间的延长基本呈下降趋势。热压时间从 15 min 增加至 45 min 时,试件的密度从 1312 kg/m^3 增加至 1401 kg/m^3 ,增幅 6.8%;硬度从 64.5 增加至 66.2,增幅 2.6%;弯曲强度和弯曲弹性模量从 15.06 MPa 和 1407 MPa 增加至 17.69 MPa 和 2092 MPa,增幅分别为 17.5% 和 48.7%;而冲击强度从 3.35 J/m^2 降至 2.91 J/m^2 ,降幅 13.1%。当热压时间继续增加到 60 min 时,试件的密度和冲击强度变化不大,硬度从 66.2 降至 65.3,降幅约为 1.4%,弯曲强度和弯曲弹性模量分别从 17.69 MPa 和 2092 MPa 降至 17.04 MPa 和 1868 MPa,降幅分别约为 3.67% 和 10.7%。制品的密度、硬度、弯曲强度和弯曲弹性

模量在 45 min 时达到极大值,分别为 1401 kg/m^3 , 66.2, 17.69 MPa 和 2092 MPa。这说明热压时间对试件的力学性能有较大影响,在 45 min 热压时间范围内 (15 ~ 60 min),复合材料的弯曲弹性模量的最大变化幅度约为 48.7%,弯曲强度的最大变化幅度约为 17.5%,冲击强度的最大变化幅度约为 13.1%,密度的最大变化幅度约为 6.8%,硬度的最大变化幅度约为 2.6%。

由此说明热压时间对试件的力学性能影响较大,因为热压时间过短,可能导致树脂熔融不充分,使树脂的流动性降低,进而影响有机和无机物料的分布,从而影响试件的性能;而热压时间过长,可能会使试件因过度受热而出现较大应力的情况^[16]。

2.4 CFBFA 添加量对试件性能的影响

在成型压力为 6 MPa、热压温度为 180℃、热压时间为 45 min 条件下,实验考察了不同 CFBFA 添加量 (质量分数为 50%,55%,60%,65%,70%) 对 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件性能的影响,结果见表 4。

表 4 不同 CFBFA 添加量下 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件性能数据

CFBFA 质 量分数 /%	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硬度	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模 量 /MPa	冲击强度 / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
50	1322	60.5	15.53	1329	4.77
55	1378	61.0	16.22	1662	4.18
60	1401	66.2	17.69	2092	2.91
65	1435	57.0	14.39	1888	0.62
70	1302	56.5	6.46	1058	0.36

由表 4 结果发现,复合材料密度随 CFBFA 添加量的增加而增加,但 CFBFA 质量分数为 70% 时密度降低;硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量随着 CFBFA 添加量的增加呈现先增加后减小的趋势,冲击强度随 CFBFA 添加量的增加而降低。当 CFBFA 质量分数从 50% 增至 65% 时,试件的密度从 1322 kg/m^3 增至 1435 kg/m^3 ,增幅约为 8.5%,平均每增加 5% CFBFA 对应平均密度增幅约为 2.8%;当 CFBFA 质量分数从 65% 增至 70% 时,试件的密度则从 1435 kg/m^3 降至 1302 kg/m^3 ,降幅约为 9.3%。说明无机粒子 CFBFA 添加量对试件密度影响较大,尤其是 CFBFA 质量分数从 65% 增至 70% 时,试件密度明显降低。当 CFBFA 质量分数从 50% 增至 60% 时,试件的硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别从 60.5, 15.53 MPa 和 1329 MPa 上升至 66.2, 17.69 MPa 和 2092 MPa,增幅分别约为 9.4%, 13.9% 和 57.4%;当 CFBFA 质量分数从 60% 增至 70% 时,试件的硬度、弯曲强度和弯曲

弹性模量分别从 66.2, 17.69 MPa 和 2092 MPa 下降至 56.5, 6.46 MPa 和 1058 MPa, 降幅分别约为 14.65%, 63.5% 和 49.4%。当 CFBFA 质量分数从 50% 增至 70% 时, 试件的冲击强度整体呈降低趋势, 从 4.77 J/m² 降至 0.36 J/m², 降幅达 92.5%。试件的硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量在 CFBFA 质量分数为 60% 时达到极大值, 分别为 66.2, 17.69 MPa 和 2092 MPa, 而对应的冲击强度为 2.91 J/m², 该配方可以作为工业生产的参考配方。

上述实验结果表明, CFBFA 添加量对复合材料的力学性能影响十分显著, 尤其是在 CFBFA 高添加量的情况下, 复合材料的力学性能出现陡然下降趋势, 这可能因为无机粒子 CFBFA 大量掺入, 降低了有机粒子的含量, 过低含量的有机粒子不足以热熔包裹全部无机粒子, 导致材料弯曲强度、弯曲弹性模量以及冲击强度陡然下降。从不同 CFBFA 添加量的试件断面 SEM 照片 (图 2) 观察可以看出, CFBFA 质量分数为 70% 对应的试件断面 SEM 照片中出现了明显的裂纹。

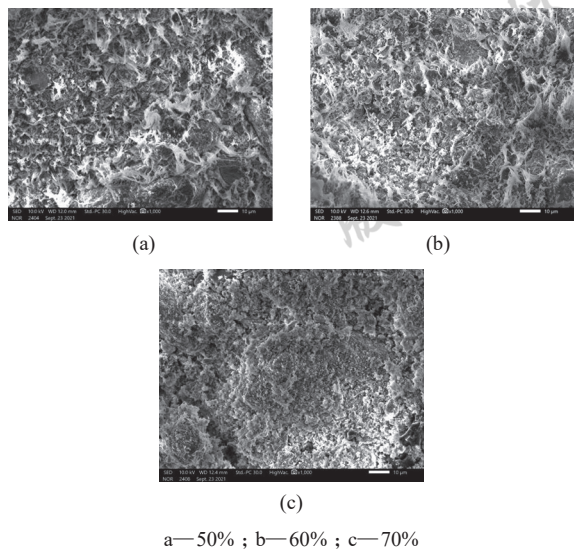


图2 不同 CFBFA 添加量下 PE-LLD/CFBFA 复合材料试件断面 SEM 照片

3 结论

通过热压成型制备了 PE-LLD/CFBFA 复合材料, 讨论了成型压力、热压温度、热压时间及 CFBFA 添加量对复合材料性能的影响, 并通过 SEM 表征了复合材料微观形貌, 得到如下结论。

(1) 成型压力从 2 MPa 增至 10 MPa, 复合材料的密度增加, 增幅约为 9.8%; 硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量呈现先增加后降低的变化趋势, 其中硬度最大增幅约为 18.8%, 最大降幅约为 6.3%, 弯曲

强度和弯曲弹性模量最大增幅分别约为 20.3% 和 24.6%, 最大降幅均在 10% 左右; 而冲击强度先降低后增加, 其最大增降幅度均在 16% 左右。

(2) 热压温度从 170℃ 升至 190℃, 复合材料的密度变化不大; 弯曲强度和弯曲弹性模量随温度的增加基本呈现先增加后降低的变化趋势, 弯曲强度的增降幅相对较小, 而弯曲弹性模量的最大增降幅分别约为 20.7% 和 23.3%; 冲击强度先降低后增加, 其变化幅度较大, 其最大增降幅分别约为 23.4% 和 46.3%。

(3) 热压时间从 15 min 增至 60 min, 复合材料的密度、硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量呈现先增加后降低的变化趋势, 其中弯曲强度的增幅最大, 其最大增幅约为 48.7%; 冲击强度基本呈下降趋势, 最大降幅约为 13.1%。

(4) 适当增加 CFBFA 添加量可提高复合材料的密度、硬度、弯曲强度和弯曲弹性模量, 尤其是弯曲弹性模量增加显著, 最大增幅约为 57.4%, 但当 CFBFA 质量分数达到 70% 时, 复合材料的力学性能出现陡然下降。

(5) 复合材料在成型压力为 6 MPa、热压温度为 180℃、热压时间为 45 min 和 CFBFA 质量分数为 60% 的实验条件下, 制得了密度为 1401 kg/m³、邵氏硬度为 66.2、弯曲强度为 17.69 MPa, 弯曲弹性模量为 2092 MPa 和冲击强度为 2.91 J/m² 的 PE-LLD/CFBFA 复合材料板材。

(6) 复合材料的力学性能主要与无机粒子及有机树脂之间的分布密切相关, 只有彼此分布均匀, 才能获得力学性能优异的复合材料。

参考文献

- [1] 张光宇, 王庭慰, 王泽. 填充改性线性低密度聚乙烯性能研究 [J]. 现代塑料加工应用, 2012, 24(6): 14-17.
Zhang Guangyu, Wang Tingwei, Wang Ze. Research on properties of linear low density polyethylene modified by filler [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2012, 24(6): 14-17.
- [2] 罗四海, 曹新鑫, 王优, 等. LLDPE/粉煤灰复合材料非等温结晶动力学研究 [J]. 塑料助剂, 2014(1): 41-47.
Luo Sihai, Cao Xinxin, Wang You, et al. Nonisothermal crystallization kinetics of LLDPE/fly ash blend [J]. Plastic Additives, 2014(1): 41-47.
- [3] 樊斌斌. 改性粉煤灰对 LLDPE 性能的影响 [J]. 塑料助剂, 2017(4): 37-40.
Fan Binbin. Effect of modified fly ash on the properties of LLDPE [J]. Plastic Additives, 2017(4): 37-40.
- [4] 常可可. 循环流化床锅炉粉煤灰理化性质研究 [D]. 太原: 山西

- 大学,2017.
- Chang Keke. Characteristics of fly ash and slag in circulating fluidized bed boiler[D]. Taiyuan:Shanxi University,2017.
- [5] 任才富,王栋民,郑大鹏,等. 循环流化床粉煤灰特性与利用研究进展 [J]. 商品混凝土,2016(1):26-29.
- Ren Caifu, Wang Dongmin, Zheng Dapeng, et al. Progress of characteristics and utilization study of circulating fluidized bed fly ash[J]. Ready-mixed Concrete,2016(1):26-29.
- [6] 单雪媛,马志斌,郭彦霞,等. 不同粒径循环流化床粉煤灰组成特性研究 [J]. 煤炭科学技术,2018,46(11):232-238.
- Shan Xueyuan, Ma Zhibin, Guo Yanxia, et al. Study on characteristics of circulating fluidized bed pulverized fuel ash with different particle sizes[J]. Coal Science and Technology,2018,46(11):232-238.
- [7] Das A, Satapathy B K. Structural, thermal, mechanical and dynamic mechanical properties of cenosphere filled polypropylene composites[J]. Materials & Design,2011,32(3):1477-1484.
- [8] Labella M, Zeltmann S E, Shunmugasamy V C, et al. Mechanical and thermal properties of fly ash/vinyl ester syntactic foams[J]. Fuel,2014,121:240-249.
- [9] 宋建强,彭鹤松,王光硕,等. 不同无机粉体在 PE 木塑复合材料中的应用研究 [J]. 中国塑料,2017,31(1):70-74.
- Song Jianqiang, Peng Hesong, Wang Guangshuo, et al. Study on application of different inorganic fillers in polyethylene wood-plastic composites [J]. China Plastics,2017,31(1):70-74.
- [10] 吴婷婷. 粉煤灰 / 钢渣 -HDPE 复合材料的制备及性能研究 [D]. 太原: 山西大学,2018.
- Wu Tingting. Preparation and properties of fly ash and/or steel slag-HDPE composites[D]. Taiyuan:Shanxi University,2018.
- [11] Deepthi M V, Sharma M, Sailaja R R N, et al. Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene-fly ash cenospheres composites[J]. Materials and Design,2010,31(4):2051-2060.
- [12] 黄勇,刘俊红,周世林,等. 粉煤灰填充母料对 HDPE 复合材料性能的影响 [J]. 塑料科技,2018,46(4):44-48.
- Huang Yong, Liu Junhong, Zhou Shilin, et al. Influence of fly ash filled masterbatch on properties of HDPE composites[J]. Plastics Science and Technology,2018,46(4):44-48.
- [13] Ku H, Wang H, Pattarachaiyakoo N, et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites[J]. Composites:Part B,2011,42(4):856-873.
- [14] 李树健,湛利华,李常平,等. 树脂基复合材料热压成型工艺数值模拟研究进展 [J]. 宇航材料工艺,2018,48(1):10-15.
- Li Shujian, Zhan Lihua, Li Changping, et al. Progress on numerical simulation for polymer matrix composite during hot pressing process[J]. Aerospace Materials & Technology,2018,48(1):10-15.
- [15] 张阁昊,赵雪松,李奇,等. 热压工艺对木橡塑三元复合材料力学性能的影响 [J]. 塑料科技,2020,48(10):1-4.
- Zhang Gehao, Zhao Xuesong, Li Qi, et al. Effect of hot pressing process on mechanical properties of wood-rubber-plastic ternary composites[J]. Plastics Science and Technology,2020,48(10):1-4.
- [16] 李治. 聚乳酸基复合材料热压成型技术及性能研究 [D]. 无锡: 江南大学,2021.
- Li Zhi. Research on hot pressing molding technology and performance of polylactic acid-based composites[D]. Wuxi:Jiangnan University,2021.

(上接第 53 页)

- [13] 矫佳利,杨卫民,高晓东,等. 回收聚乙烯模板法制备碳纤维的机理分析 [J]. 中国塑料,2021,35(8):94-99.
- Jiao Jiali, Yang Weimin, Gao Xiaodong, et al. Mechanism analysis of carbon fiber prepared by recycled polyethylene-template method[J]. China Plastics,2021,35(8):94-99.
- [14] 谢元,唐亚文,常晓昕. 高密度聚乙烯电缆护套料的研制 [J]. 化工新型材料,2007,35(8):80-82.
- Xie Yuan, Tang Yawen, Chang Xiaoxin. Study of high polyethylene cable jacket[J]. New Chemical Materials,2007,35(8):80-82.
- [15] 齐东峰. 改性聚烯烃电缆料的国内现状 [J]. 合成树脂及塑料,2014,31(1):81-84.
- Qi Dongfeng. Domestic status of modified polyolefins for cable material[J]. China Synthetic Resin and Plastics,2014,31(1):81-84.
- [16] 周云飞. 高性能聚乙烯电缆护套料的研制 [J]. 光纤与电缆及其应用技术,1997(1):45-47.
- Zhou Yunfei. Research on high performance PE Sheath compound for cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications,1997(1):45-47.
- [17] 蔡绪福,王贵恒,万洪澜,等. 添加炭黑和交联剂的 EVA 半导体化合物性能研究 [J]. 四川联合大学学报: 工程科学版,1998,2(2):6-12.
- Cai Xufu, Wang Guiheng, Wan Honglan, et al. A study on properties of EVA composites added carbon black and cross-linkage agent[J]. Journal of Sichuan Union University:Engineering Science Edition,1998,2(2):6-12.