

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.001

PC/NPET复合材料的制备与性能

高伟^{1,2}, 杨序平^{1,2}, 潘星宇^{1,2}

(1.西南科技大学材料与化学学院,四川绵阳 621010; 2.西南科技大学生物质材料教育部工程研究中心,四川绵阳 621010)

摘要: 为了改善聚碳酸酯(PC)存在的刚性高、流动性差,易发生应力开裂的缺点,选用力学性能、热稳定性和柔韧性均优的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)作为填料,采用超声化学沉积法制备了分散性和相容性更优,比表面积更大的纳米PET (NPET),并通过熔融挤出法制备PC/NPET复合材料,采用粒度测试、扫描电子显微镜、熔体流动速率分析、傅里叶变换红外光谱分析、热重分析、动态扫描量热测试和力学性能测试,研究了PC/NPET复合材料的粒径分布情况、流动性、基团归属、结晶性、相容性、热稳定性以及力学性能。结果表明,制备的NPET达到了纳米级;NPET的加入改善了PC的流动性;随着NPET含量的增加,PC/NPET复合材料的特征峰发生偏移且强度增强;PC/NPET复合材料的热稳定性和结晶度有所降低,复合材料的结晶温度呈先降低后增加的趋势,熔融温度逐渐减少;力学性能分析表明,PC/NPET复合材料的断裂伸长率和缺口冲击强度先增加再减少,拉伸强度逐渐减少,综合填充量和力学性能考虑,最佳配比为: $m_{PC}/m_{NPET}=75/25$,此时PC/NPET的断裂伸长率较纯PC增加了20.53%,缺口冲击强度提高了19.52 kJ/m²。

关键词: 超声化学沉积;聚碳酸酯;纳米聚对苯二甲酸乙二醇酯;熔融挤出法;结晶性

中图分类号: TQ314.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0001-06

Preparation and Properties of PC/NPET Composites

Gao Wei^{1,2}, Yang Xuping^{1,2}, Pan Xingyu^{1,2}

[1. School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Engineering Research Center for Biomass Materials (Ministry of Education), Mianyang 621010, China]

Abstract : In order to improve the shortcomings of polycarbonate (PC), such as high rigidity, poor fluidity and easy stress cracking, polyethylene terephthalate (PET), which has excellent mechanical properties, thermal stability and flexibility, was selected as the filler, and better dispersibility and compatibility was prepared by ultrasonic chemical deposition method. Nano PET (NPET) with larger surface area was prepared by melt extrusion method. Particle size test, scanning electron microscopy, melt flow rate analysis, infrared analysis, thermal analysis, differential scanning calorimetry test and mechanical test were used. The particle size distribution, fluidity, Fourier transform infrared group affiliation, crystallinity, compatibility, thermal stability and mechanical properties of PC/NPET composites were studied. The results show that the prepared NPET reaches the nanometer level. The addition of NPET improves the liquidity of PC. With the increase of NPET content, the characteristic peaks of PC/NPET composites shift and their strength increases. The thermal stability and crystallinity of PC/NPET composites decrease, crystallization temperature decreases first and then increases, and melting temperature decreases gradually. Mechanical property analysis shows that the elongation at break and notch impact strength of PC/NPET composites first increase and then decrease, while the tensile strength gradually decreases. Considering the filling amount and mechanical properties, the optimal ratio is: $m_{NPET}/m_{PC}=25/75$, elongation at break of PC/NPET composites increases by 20.53% compared with pure PC, notch impact strength increases by 19.52 kJ/m².

Keywords : ultrasonic chemical deposition ; polycarbonate resin ; nano polyethylene terephthalate ; melt extrusion process ; crystallinity

基金项目: 国家自然科学基金项目(21zg2118),泸州老窖股份有限公司科技开发项目(20zh0153)

通信作者: 杨序平,副教授,硕士生导师,研究方向高分子材料改性

收稿日期: 2023-05-12

引用格式: 高伟,杨序平,潘星宇.PC/NPET复合材料的制备与性能[J].工程塑料应用,2023,51(7):1-6.

Gao Wei, Yang Xuping, Pan Xingyu. Preparation and properties of PC/NPET composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 1-6.

聚碳酸酯(PC)是一种综合性能优良的热塑性工程塑料^[1],具有优异的电绝缘性,较高的耐热性、耐寒性、尺寸稳定性及耐化学腐蚀性,在工程塑料中的用量位居第二,仅次于聚酰胺,被广泛用于汽车、电子电气、包装、建筑材料、医疗等领域^[2-4]。但PC分子链的刚性较大,空间位阻高,导致其柔韧性和流动性差,加工困难,因此在实际应用中,常常对PC进行改性^[5-6]。PC改性的方法有很多,通常通过加入聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)和聚丙烯(PP)等高聚物与PC熔融共混,来改变PC的性能不足。但通过现有改性方法制得的复合材料在性能提升上有其局限性,因此急需找到一种新的改性方法。笔者选择细化到纳米级的PET作为填料与PC熔融共混,以提升PC的综合性能。

PET不仅是重要的合成纤维原料,而且可用于制造薄膜,是包装领域最具潜力的树脂品种之一,其分子链柔韧性较高,具有熔体流动性较好等特点^[7-8]。此外,纳米PET(NPET)具有更大的比表面积、较好的耐热性、较强的力学性能及流动性好等优点^[9-12],将NPET与PC共混可以更好地实现聚酯材料的生产加工^[13]。

笔者以PET为原料,通过超声化学沉积法制备了NPET^[14-15],以PC为基材,不同比例的NPET为填料,采用熔融挤出法制备了PC/NPET的复合材料,并研究了PC/NPET复合材料的结晶性、相容性、热稳定性以及力学性能等。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:1302-10,韩国LG化学公司;

PET:CR8863,华润化学材料科技股份有限公司;

六氟异丙醇:H107501,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

转矩流变仪:HAAKE PolyLab OS型,美国赛默飞世尔科技公司;

切粒机:LSQ-15型,上海科创橡塑机械设备有限公司;

微量注塑机:RR/TSMP/B4型,上海威讯科技有限公司;

电热鼓风干燥箱:101-0AB型,林茂科技(北京)有限公司;

激光粒度分析仪;90Plus型,美国布鲁克海文公司;

扫描电子显微镜(SEM):TM4000型,相确精密仪器(上海)有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spectrum One型,美国PE仪器公司;

热重(TG)分析仪:TGA Q500型,美国沃斯特公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC Q200型,美国TA仪器公司;

温控式电子万能材料试验机:C54504型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

熔体流动速率(MFR)测试仪:XRL-400型,山东德瑞克仪器股份有限公司。

1.3 样品制备

(1) NPET的制备。

将20 g的PET在室温条件下完全溶解在200 mL的六氟异丙醇溶剂中,得到浓度为100 mg/mL的聚合物溶液。把得到的有机溶液缓慢滴加到180 W超声波条件下的冰浴冷却的蒸馏水中,超声5~10 min。此过程中,聚合物溶剂迅速溶解到蒸馏水中,在空化作用下形成NPET粒子^[16]。超声结束后,将得到的聚合物溶液用旋转蒸发仪蒸掉有机溶剂,再过滤掉存在的固体悬浮物,最后得到纳米颗粒和蒸馏水的悬浮液,该方法得到的NPET的平均粒径为84 nm,粒径集中在60~100 nm。

(2) NPET和PC材料的预处理。

将NPET和PC严格按照质量比例混合均匀,放入烘箱中,在(100±10)°C条件下干燥12 h。

(3) PC/NPET复合材料的制备。

将干燥好的NPET和PC一起加入转矩流变仪中,在(270±10)°C,60 r/min的条件下熔融共混。将得到的混合材料切粒后加入微量注塑机在(280±10)°C,120 MPa的条件下,注塑得到测试样条,每组制备5根样条。样品配方见表1。

表1 样品组成 %

样品	NPET	PC
PC	0	100
NPET-5	5	95
NPET-10	10	90
NPET-15	15	85
NPET-20	20	80
NPET-25	25	75
NPET-30	30	70

1.4 性能测试与表征

粒度测试:通过激光粒度分析仪对利用超声化学沉积法制备的NPET悬浮液在室温条件下进行粒度测试。

SEM测试:将PC/NPET复合材料进行液氮淬断并对断面喷金处理后,通过SEM对复合材料的淬断面进行形貌分析。

MFR测试:样品质量控制在6 g以内,温度设置为270 °C,预热时间为4 min,切割间隔时间为15 s,测试5个切割样品取平均值。

FTIR测试:通过FTIR仪分析复合材料表面化学基团的变化,扫描次数为32次,扫描范围为400~4 000 cm^{-1} 。

TG测试:样品质量控制在5 mg以内,氮气流速为20 mL/min,温度范围为25~800 °C,升温速率为10 °C/min。

DSC测试:样品质量控制在5 mg以内,氮气流速为50 mL/min,温度范围为25~200 °C,升温速率为10 °C/min。

力学性能测试:

① 室温(25 °C)下,采用温控电子万能材料试验机按照ISO 527-21BA测试复合材料拉伸性能,哑铃型标准样条,拉伸速率为20 mm/min。

② 缺口冲击强度按照GB/T 1843-2008测试,冲击能2 J,V型缺口,测试5个试样取平均值。

2 结果与讨论

2.1 粒度分析

经计算得出NPET的平均粒径为84 nm,粒径集中在60~100 nm,且分布较窄,达到了纳米材料的要求,为后续测试提供了数据支持,粒径分布见图1。

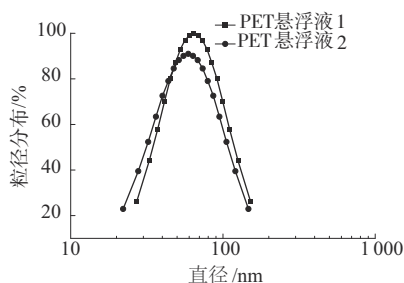
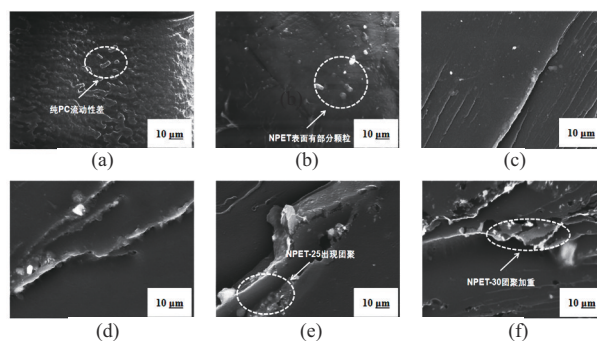


图1 NPET的粒径分布图

2.2 SEM和MFR分析

NPET作为一种高分子聚合物,加入到PC中能够影响PC/NPET复合材料的相容性和分散性等。图2是PC, NPET, NPET-10, NPET-20, NPET-25和

NPET-30复合材料的淬断面在5 000倍下的SEM图。结合表2和图2可以看出,纯PC内部粒子的结合不够紧凑,流动性较差,当NPET质量分数低于25%时,随着NPET含量的增加,复合材料的相容性和流动性得到改善,这可能是因为随着NPET含量的提高,PC发挥了成核剂的作用,复合材料的晶体结构得以改善。从图2e可以看出,当NPET质量分数达到25%时,复合材料已经出现团聚现象,在其质量分数达到30%时,团聚现象加重,这可能会影响复合材料的性能提升,具体情况需要后续分析验证。



a—PC; b—NPET; c—NPET-10; d—NPET-20;
e—NPET-25; f—NPET-30

图2 PC/NPET复合材料的SEM照片

通过公式(1)计算得到MFR。 W 表示切取样条质量的算数平均值; t 表示切样的间隔时间,具体数值见表2。

$$\text{MFR} = \frac{600W}{t} \quad (1)$$

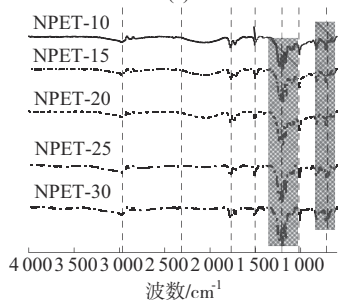
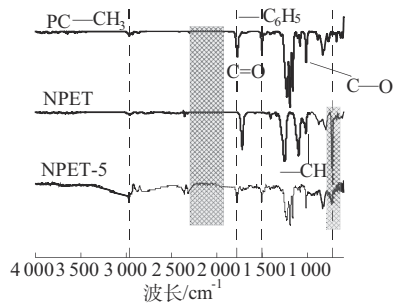
表2 样品的MFR

样品	W/g	t/s	$\text{MFR}/[\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1}]$
PC	0.060	15	2.4
NPET-5	0.074	15	2.96
NPET-10	0.091	15	3.64
NPET-15	0.103	15	4.12
NPET-20	0.116	15	4.64
NPET-25	0.162	15	6.48
NPET-30	0.139	15	5.56

2.3 FTIR分析

图3为PC/NPET复合材料的FTIR谱图。从图3可以看到,NPET与PC熔融共混后制得的复合材料保留了PC的特征峰,但PC/NPET复合材料在1 780 cm^{-1} 处特征峰的峰宽变窄且峰面积变小,这可能是因为PC在两种聚合物之间发生了结晶成核作用,导致复合材料在1 780 cm^{-1} 处的特征基团发生了变化,结合图2可以看到,复合材料的相界面的相

容性更好,这也表明NPET和PC已经开始混合。图中 2966 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 的不对称伸缩振动峰,随着NPET含量的增加, 2966 cm^{-1} 的特征峰开始向波数小的方向偏移,这可能是因为在复合材料中 2966 cm^{-1} 处的 $-\text{CH}_3$ 的吸收强度增加,导致该处特征峰发生偏移。 1502 cm^{-1} 处的振动吸收峰是 $-\text{C}_6\text{H}_5$ 的特征吸收峰, $1227, 1194\text{ cm}^{-1}$ 和 1161 cm^{-1} 处为PC的3个并列的强吸收峰。此外,可以看到复合材料出现了NPET特有的特征峰,且随着NPET含量的增加,该特征峰特征越明显,对比图3a和图3b可以发现,当NPET质量分数达到5%时,复合材料在 727 cm^{-1} 处的特征峰也出现了类似的偏移,这是因为熔融共混后复合材料的相互作用增强,导致该处的 $-\text{CH}$ 吸收强度增加,从而出现了特征峰的偏移,在相关文献中也有类似报道^[17-19]。且质量分数30%的NPET复合材料在 727 cm^{-1} 的特征峰比其他比例处更宽,这可能是因为在熔融共混时,复合材料的分子链相互作用减小了能量的转移率。PC及PC/NPET复合材料的FTIR振动峰归属列于表3。



a—PC, NPET, NPET-5;

b—NPET-10, NPET-15, NPET-20, NPET-25, NPET-30

图3 PC/NPET复合材料的FTIR谱图

2.4 TG分析

图4是不同比例的PC/NPET复合材料的TG曲线。具体配比见表4。结合图4和表4可以看出,随着NPET含量的增加,复合材料的热稳定性逐渐降低,NPET比例从0增加到30%,而热分解温度则从

表3 FTIR振动峰的归属

波数/ cm^{-1}	基团结构	官能团
2966	$-\text{CH}_3$	甲基不对称伸缩
1780	$\text{C}=\text{O}$	$\text{C}=\text{O}$ 酯键
1502	$-\text{C}_6\text{H}_5$	苯基吸收
1227, 1194, 1161	$\text{C}-\text{O}$	$\text{C}-\text{O}$ 伸缩
1015	$\text{C}-\text{O}$	$\text{C}-\text{O}$ 伸缩
727	$-\text{CH}$	$\text{C}-\text{H}$ 伸缩
709	$-\text{CH}$	$\text{C}-\text{H}$ 伸缩

$364\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到了 $349\text{ }^\circ\text{C}$,这说明NPET的加入降低了共混体系的热稳定性,比例越高,分解温度越低,这可能是因为随着NPET含量的增加,复合材料的链段结构和官能团发生了变化,从而降低了复合材料的分解温度。此外,从表4可以看到,随着NPET含量的增加,复合材料的残炭率获得了较大提升,NPET比例从0增加到30%,而残炭率则从9.64%增加到了20.12%,这可能是因为PC和NPET均有较高的残炭率,且PC在降解过程中形成了不稳定片段,与NPET的分子链进一步反应生成聚芳烃等,较高的聚芳烃限制了复合材料在较低的温度下转化成更多的挥发物,导致了残炭率提高^[17]。综上,随着NPET含量的增加,PC/NPET复合材料的热稳定性较PC均有所降低,残炭率有所增加,与FTIR分析结论一致。

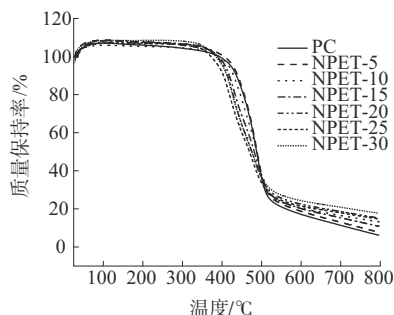


图4 PC/NPET复合材料的TG分析图

表4 样品的TG数据

样品	$T_{d,10\%}/^\circ\text{C}$	$T_{d,20\%}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	700 $^\circ\text{C}$ 残炭率/%
PC	364	466	533	9.64
NPET-5	363	464	533	11.57
NPET-10	360	463	529	16.21
NPET-15	358	461	528	14.37
NPET-20	356	358	526	18.13
NPET-25	354	455	520	17.43
NPET-30	349	356	517	20.12

注: $T_{d,10\%}$ 表示失重率为10%的温度; $T_{d,20\%}$ 表示失重率为20%的温度。

2.5 DSC分析

图5是PC/NPET复合材料的DSC降温和二次

升温曲线。从图5可以看出,随着NPET含量的增加,复合材料的结晶温度(T_c)和熔融温度(T_m)发生转变,复合材料的 T_c 先增大后减小,这是因为随着NPET含量的增加,复合材料的分子间作用力增强,使其结晶温度增大,但当NPET比例达到25%时,因为复合材料开始出现团聚,因此结晶温度表现为先增大后减小。 T_m 逐渐减小,这表明NPET与PC熔融共混会降低其熔融温度,降低复合材料的热稳定性,与TG分析一致。通过公式(2)可以计算出复合材料的结晶度, $\chi_{PC/NPET}$ 为复合材料的结晶度, $\Delta H_{PC/NPET}$ 为复合材料的结晶焓, $\Delta H_{100\%}$ 为PC在100%结晶度时的结晶焓,具体的数值见表5。从表5可以看出,

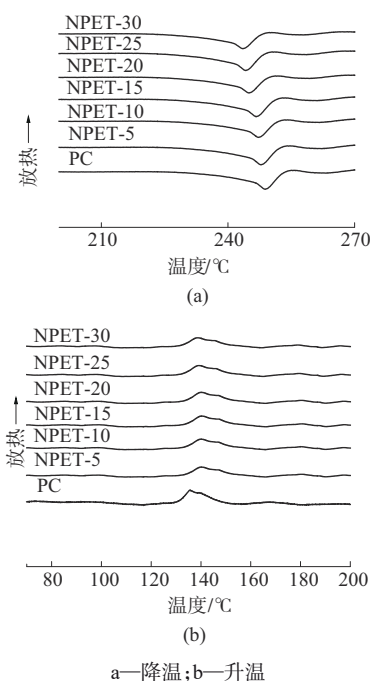


图5 PC/NPET复合材料的DSC二次升温曲线

在加入NPET后,复合材料的结晶度先增大后减少,说明加入NPET与PC熔融共混能够改善复合材料的结晶性能。

$$\chi_{PC/NPET} = \frac{\Delta H_{PC/NPET}}{\Delta H_{100\%}} \quad (2)$$

表5 样品的DSC数据

样品	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_{PC/NPET}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$\chi_{PC/NPET}/\%$
PC	141.29	140.09	249.13	0.29	1.5
NPET-5	143.67	139.26	247.29	0.65	2.3
NPET-10	144.98	138.94	246.65	1.6	2.7
NPET-15	145.89	138.92	246.53	2.5	3.3
NPET-20	146.21	137.65	245.04	4.7	4.8
NPET-25	145.67	138.32	244.35	7.6	8.2
NPET-30	145.92	139.87	243.94	4.2	4.3

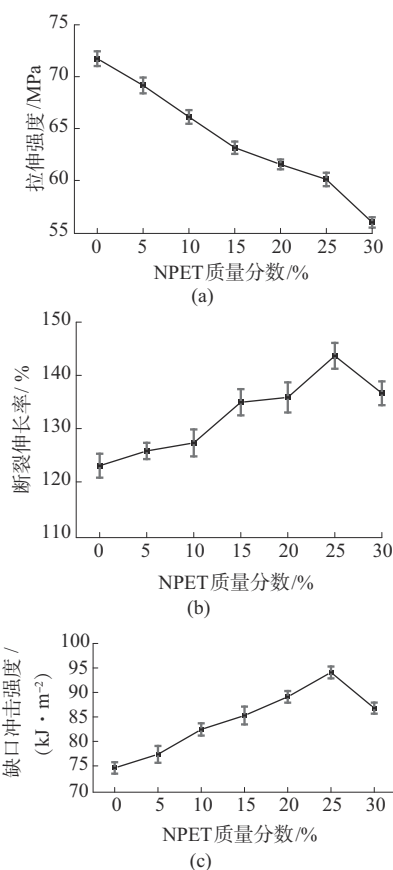
注: T_g 为玻璃化转变温度。

2.6 力学性能分析

图6是PC/NPET复合材料的力学性能。从图6可以看出,PC/NPET复合材料的断裂伸长率和缺口冲击强度变化趋势一致,均为先增大后减小,在NPET质量分数为25%时最大,PC/NPET复合材料的断裂伸长率和缺口冲击强度达到最大,分别较纯PC增加了20.53%,19.52 kJ/m²,但在NPET质量分数超过25%后,断裂伸长率和缺口冲击强度都出现了下降,这可能是因为NPET含量达到一定比例后,复合材料的团聚现象影响了其性能的进一步提升。此外,从图6可以看出,随着NPET含量的增加,PC/NPET复合材料的拉伸强度逐渐降低,且在NPET质量分数超过25%后下降幅度更大,同样说明了复合材料的团聚现象会影响其拉伸强度,这可能减小了复合材料分子链间界面作用力,因而导致复合材料的拉伸强度降低。综上所述,NPET与PC熔融共混能改善复合材料的力学性能,综合考虑在NPET质量分数为25%时,力学性能最优。

3 结论

(1) 粒度分析表明,NPET的平均粒径为84



a—拉伸强度;b—断裂伸长率;c—缺口冲击强度

图6 PC/NPET复合材料的力学性能

nm,达到了纳米材料的要求。

(2) SEM和MFR分析表明,NPET的加入改善了PC流动性差的问题,但在其质量分数超过25%后,复合材料的团聚现象加重。

(3) FTIR分析表明,随着NPET含量的增加,PC/NPET复合材料的特征峰发生偏移且强度增强。

(4) TG分析表明,随着NPET含量的增加,PC/NPET复合材料的热稳定性较PC均有所降低。

(5) DSC分析表明,NPET的加入会降低复合材料的结晶度,随着NPET含量的增加,复合材料的 T_g 先降低后增加, T_m 逐渐减少。

(6)力学性能分析表明,PC/NPET复合材料的断裂伸长率和缺口冲击强度先增加再减小,拉伸强度降低,综合填充量和力学性能考虑,最佳配比为: $m_{PC}/m_{NPET}=75/25$,此时断裂伸长率较纯PC增加了20.53%,缺口冲击强度增加了19.52 kJ/m²。

参考文献

- [1] 储俊雨,王卫卫,王恒,等.聚碳酸酯合成工艺研究进展[J].辽宁化工,2022,51(8):114-117.
Chu Junyu, Wang Weiwei, Wang Heng, et al. Research progress in synthesis technology of polycarbonate[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(8): 114-117.
- [2] Theo H, Jan G, Han V, et al. Improved chemical resistance of transparent bisphenol A polycarbonate materials[J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(5). DOI:10.1002/PEN.25928.
- [3] Devinda W, Gong Youyun, Shaila A, et al. Mechanical and thermal properties of graphene nanoplatelets-reinforced recycled polycarbonate composites[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2023, 6(1). DOI: 10.1016/J. IJLMM.2022.09.001.
- [4] Sai Ting, Ran Shiya, Huo Siqi, et al. Sulfonated block ionomers enable transparent, fire-resistant, tough yet strong polycarbonate[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433(P2). DOI: 10.1016/J. CEJ.2021.133264.
- [5] 朱爱华.聚碳酸酯的改性与应用研究[J].产业创新研究,2020(14):114-115.
Zhu Aihua. Study on modification and application of polycarbonate [J]. Industrial Innovation Research, 2020(14):114-115.
- [6] 廖源,杨序平,杨琴,等.抗开裂PC/PET复合材料的制备及其性能[J].西南科技大学学报,2022,37(2):25-28.
Liao Yuan, Yang Xuping, Yang Qin, et al. Preparation and properties of anti-cracking PC/PET composites[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2022, 37(2):25-28.
- [7] 程海涛.聚对苯二甲酸乙二醇酯塑料循环利用进展[J].塑料,2021,50(6):63-68.
Cheng Haitao. Development of polyethylene terephthalate plastic recycling[J]. Plastic, 2021, 50(6):63-68.
- [8] Kumar S S, Ranjan M J, Kumar N B, et al. Fabrication and characterization of acrylic acid treated rattan fiber reinforced polyethylene terephthalate composites for packaging industries[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(13). DOI: 10.1080/15440478.2021.1889439.
- [9] Zhu Zihao, Gao Cong, Shen Yucai, et al. Improving oxygen barrier properties of pet composites via grafting hydroxy-terminated polybutadiene with nanosilica[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(11). DOI:10.1002/pat.4983.
- [10] Zheng Mingna, Li Yanwei, Xue Rui, et al. Hydrolases catalyzed nanosized polyethylene terephthalate depolymerization: New insights from QM/MM analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377. DOI:10.1016/J. JCLEPRO.2022.134429.
- [11] Lin Qiang, Wang Xiuli, Wang Deyi, et al. Durable flame retardant finishing of PET/cotton blends using a novel PVA-based phosphorus-nitrogen polymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 122(1). DOI:10.1002/app.34182.
- [12] Subhakanta N, Kumar J P, Priyaranjan S, et al. Improvement of mechanical and thermal properties of polyethylene terephthalate (PET) composite reinforced with chemically treated ladies finger natural fiber[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(13). DOI: 10.1080/15440478.2021.1932680.
- [13] 贾义军,翁书元,严欢焕,等.可任意比例混合的阻燃PC/PET工程塑料合金的制备[J].上海塑料,2022,50(3):27-33.
Jia Yijun, Weng Shuyuan, Yan Huanhuan, et al. Preparation of flame retardant PC/PET engineering plastic alloy with arbitrary mixing ratio[J]. Shanghai Plastics, 2022, 50(3):27-33.
- [14] 陈喜蓉,郑典模.超声波法制备纳米粉体工艺[J].江西化工,2003(4):13-16.
Chen Xirong, Zhen Dianmo. Preparation technique of nanometer powder under ultrasound[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2003(4): 13-16.
- [15] 李育强.纳米PET生物催化分解研究[D].天津:天津工业大学,2018.
Li Yuqiang. Study on Biocatalytic decomposition of nano-PET [D]. Tianjin:Tianguang University, 2018.
- [16] 徐英杰.纳米二氧化硅填充对苯二甲酸乙二醇酯的结晶行为及老化性能研究[D].杭州:浙江大学,2015.
Xu Yingjie. Effects of nanosilica on crystallization and thermal aging behaviors of polyethylene terephthalate[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [17] Singh R K, Ruj B, Sadhukhan A K, et al. A TG-FTIR investigation on the co-pyrolysis of the waste HDPE, PP, PS and PET under high heating conditions[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(3). DOI:10.1016/j.joei.2019.09.003.
- [18] Kai Xingping, Li Rundong, Yang Tianhua, et al. Study on the co-pyrolysis of rice straw and high density polyethylene blends using TG-FTIR-MS[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 146. DOI:10.1016/j.enconman.2017.05.026.
- [19] Pereira Ana Paula dos Santos, Silva Marcelo Henrique Prado da, Lima Júnior Édio Pereira, et al. Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymers concrete waste[J]. Materials Research, 2017, 20(suppl 2). DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0734.