

不同 α 成核剂调控对 无规共聚聚丙烯 B4801 的影响

王勇*, 苟荣恒, 刘义, 郭晓东, 韩李旺, 杨廷杰, 包璐璐
(国家能源集团新疆化工有限公司, 新疆乌鲁木齐 831400)

摘要:研究了不同 α 成核剂 NX8000K、HB3988、WNA-108、WNA-21、WBQ-88 对无规共聚聚丙烯 B4801 的结晶性能、力学性能、透光率、雾度及熔融指数等的影响。结果表明,5 种成核剂均有效促进了聚丙烯 B4801 的结晶过程,表现出良好的聚丙烯诱导结晶性,其中 WNA-21 的效果最好。5 种成核剂均可以明显提升聚丙烯 B4801 的拉伸性能、弯曲性能、热变形温度,并且在较低质量分数(1 500 $\mu\text{g/g}$)时提升作用基本达到最大,对收缩率和流动性也有一定的提高,但对缺口冲击强度都有不同程度的降低,其中添加 WNA-108 下降尤为明显。除了 WNA-108 外,其余 4 种成核剂的引入均明显提高了聚丙烯的透明性。

关键词: α 成核剂;无规共聚聚丙烯;结晶性;透明性;

中图分类号: TQ325.1+4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)06-0200-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.06.036

Effect of different α nucleating agents on random copolymerized polypropylene

WANG Yong*, GOU Rong-heng, LIU Yi, GUO Xiao-dong, HAN Li-wang,
YANG Ting-jie, BAO Lu-lu

(Xinjiang Chemical Company Limited, China Energy Investment Corporation, Urumqi 831400, China)

Abstract: The effects of different α nucleating agents such as NX8000K, HB3988, WNA-108, WNA-21 and WBQ-88 on the crystallization properties, mechanical properties, light transmittance, fog and melting index of random copolymer polypropylene (PP B4801) are studied. It is shown that each of five nucleating agents can effectively promote the crystallization process of PP B4801, showing a good performance in inducing crystallization of polypropylene. Among them, WNA-21 shows the best effect. They all can significantly improve the tensile properties, bending properties and thermal deformation temperature of PP B4801, and the improvement effect basically reaches the maximum at a low dosage of 1 500 ppm. They all improve the shrinkage rate and fluidity of PP B4801 to some extent, but reduce the notch impact strength to varying degrees, especially WNA-108 reduces the most. Except WNA-108, the addition of the other four nucleating agents improves significantly the transparency of polypropylene.

Key words: α nucleating agent; random copolymer polypropylene; crystallinity; transparency

随着我国汽车、家电、医疗等产业的快速发展及人们生活品质的提高,对汽车零部件、家电外壳、医用产品等的要求越来越高。聚丙烯作为各行业产品使用的主要原材料^[1-4],也对其韧性、刚韧平衡、透明性、加工性能、生产效率等提出了更高的要求^[5-6]。抗冲聚丙烯具有高韧性,但强度比较低、透明性较差,通常需要改性后使用,但常规改性效果不是很理想。

添加成核剂可以有效改善聚丙烯的宏观性能,添加适宜的成核剂后,聚丙烯的结晶位点增多、结晶度提高、球晶尺寸细化、力学性能得到提升、结晶适应性增强,可提高结晶能力和生产加工效率^[7-12]。 α 成核剂可以显著提高聚丙烯的刚性,成为目前共聚聚丙烯性能调控中最常用的成核剂种类。因此,

笔者选取 5 种 α 成核剂对抗冲聚丙烯 B4801 进行成核改性研究,以期高刚抗冲、高透明聚丙烯筛选理想的成核体系。

1 实验部分

1.1 实验原料

聚丙烯粉料 B4801,工业品,神华新疆化工有限公司生产;抗氧剂 1010、抗氧剂 168,工业品,天津利安隆公司生产;硬脂酸钙,工业品,广东炜林纳公司生产;成核剂 NX8000K,工业品,美国美利肯公司生产;成核剂 HB3988,工业品,广州呈和公司生产;成核剂 WNA-108,工业品,广东炜林纳公司生产;成核剂 WNA-21,工业品,广东炜林纳公司生产;成核剂 WBQ-88,工业品,广东炜林纳公司生产。

收稿日期:2023-02-25;修回日期:2023-04-12

作者简介:王勇(1979-),男,学士,工程师,主要从事聚烯烃树脂技术研究工作,通讯联系人,10520951@ceic.com。

1.2 实验仪器

双螺杆挤出机,SHJ-35型,南京诺达挤出装备有限公司生产;注塑机,HT86F型,海天注塑机有限公司生产;差示扫描量热仪,Jade DSC型,美国Perkin Elmer生产;万能试验机,UTM-1422型,承德市金建检测仪器有限公司生产;简支梁冲击试验机,XJJ-5型,承德市金建检测仪器有限公司生产;热变形维卡温度测定仪,XRW-300B4型,承德市金建检测仪器有限公司生产;熔体流动速率仪,SRZ-400G型,长春市智能仪器设备有限公司生产;影像测量仪,JTVMS-2010型,东莞市嘉腾仪器仪表有限公司生产;透光率/雾度测试仪,WGT-S型,上海申光仪器有限公司生产。

1.3 成核聚丙烯标准样品的制备

分别称取 1 000 $\mu\text{g/g}$ 的抗氧剂 168、500 $\mu\text{g/g}$ 的抗氧剂 1 010、500 $\mu\text{g/g}$ 的硬脂酸钙和一定量的成核剂并置于 24 cm \times 36 cm 的 PE 袋中,上下左右晃动各 10 次并搓动摇匀,使得抗氧剂、缚酸剂和成核剂能够充分混合;称取 2.5 kg 聚丙烯粉料并置于 50 cm \times 70 cm 的 PE 袋中,分别向其中加入混合好的添加剂,上下晃动 30 次,保证聚丙烯和添加剂充分混合;置于双螺杆挤出机中进行挤出造粒,具体 1~9 区的温度分别为 170、210、220、210、220、215、215、210、210 $^{\circ}\text{C}$,其中机头温度为 205 $^{\circ}\text{C}$,主机螺杆转速为 300 r/min,喂料转速为 20 r/min,滤网 40+200 目。

将挤出得到的聚丙烯颗粒在注塑机中进行注塑,得到性能测试标准样条,其中注塑机 1~5 段的温度分别为 185、205、210、210、220 $^{\circ}\text{C}$,第 1~3 段的射胶压力分别为 45、35 MPa 和 35 MPa。保压压力为 35 MPa 和 30 MPa。

1.4 测试与表征

1.4.1 聚丙烯结晶熔融行为研究

通过差示扫描量热仪(DSC)研究聚丙烯样品的结晶峰值温度、结晶起始温度、熔融温度、结晶焓等。称量样品 3~5 mg 置于坩埚中,在氮气保护的条件下,50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 2 min,然后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率升温到 230 $^{\circ}\text{C}$,恒温 2 min 以消除热历史,然后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降至 50 $^{\circ}\text{C}$,恒温 2 min,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率升至 230 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4.2 聚丙烯力学性能研究

按 GB/T 1040 中所述的方法测试拉伸强度,拉伸速度为 50 mm/min。按 GB/T 9341 中所述的方法

测试弯曲性能,弯曲试验加载速度为 2 mm/min,4 倍挠度。按 GB/T 1043.1 中所述的方法测试简支梁缺口冲击强度。

1.4.3 负荷热变形温度测试

按 GB/T 1634.3 中所述的测试方法测试负荷热变形,负荷为 0.45 MPa。

1.4.4 收缩率测试

按 GB/T 17037.4 中所述的方法测试收缩率。

1.4.5 熔体流动速率测试

按 GB/T 3682.1 中所述的方法 A 测试熔体流动速率,230 $^{\circ}\text{C}/2.16$ kg。

1.4.6 透光率和雾度测试

利用 WGT-S 透光率/雾度测试仪测试透光率和雾度,样板厚度为 2 mm。

2 结果与讨论

2.1 不同成核剂对聚丙烯 B4801 力学性能的影响

不同成核剂对聚丙烯 B4801 力学性能的影响如表 1 所示。

表 1 不同成核剂改性 B4801 的力学性能的影响

试样	添加量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	拉伸 强度/ MPa	弯曲 强度/ MPa	弯曲 模量/ MPa	冲击强度/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)
空白	0	23.2	23.5	632	28.2
NX8000K 改性 B4801	1500	25.0	27.2	819	27.1
	1875	26.1	27.4	842	26.4
	2250	25.7	27.1	820	25.7
	2625	25.3	26.9	806	26.0
	3000	25.1	27.0	847	26.3
HB3988 改性 B4801	1500	24.5	27.1	785	26.3
	1875	25.2	27.4	832	25.5
	2250	25.3	27.5	827	25.8
	2625	25.2	27.8	879	26.0
	3000	25.7	28.0	826	25.6
WNA-108 改性 B4801	1500	24.8	26.8	794	16.0
	1875	24.6	27.3	803	11.8
	2250	24.7	27.6	743	10.8
	2625	25.1	27.8	816	8.4
	3000	25.1	28.5	757	8.7
WNA-21 改性 B4801	1500	24.9	28.1	821	27.6
	1875	24.9	28.2	847	26.8
	2250	25.7	28.2	846	26.0
	2625	24.6	28.2	861	26.2
	3000	25.3	28.5	901	26.3

续表

试样	添加量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	拉伸 强度/ MPa	弯曲 强度/ MPa	弯曲 模量/ MPa	冲击强度/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)
WBQ-88 改性 B4801	1500	24.8	27.2	835	23.1
	1875	24.7	27.0	829	24.5
	2250	25.1	27.0	803	24.5
	2625	24.5	27.1	810	24.7
	3000	25.6	26.6	810	24.7

2.1.1 不同成核剂对聚丙烯 B4801 拉伸性能的影响

从表 1 拉伸强度数据可以看出,所有成核剂在质量分数为 1 500 $\mu\text{g}/\text{g}$ 时,对聚丙烯的拉伸强度达到最大,后续随着成核剂质量分数增加,拉伸强度的提升有限,基本不再剧烈增加。5 种成核剂在质量分数为 1 500 $\mu\text{g}/\text{g}$ 时,对聚丙烯的拉伸强度分别提升为 7.8%、5.6%、6.9%、7.3%、6.9%。从平均值来看,NX8000K 和 WNA-21 效果稍好。

2.1.2 不同成核剂对聚丙烯 B4801 弯曲性能的影响

从表 1 弯曲强度和弯曲模量的数据可以看出,5 种成核剂加入后,也是在 1 500 $\mu\text{g}/\text{g}$ 较低质量分数即拥有了较好的增刚效果,随着质量分数的增加,强度和模量没有呈现剧烈波动,从绝对数据来看,WNA-21 较另外 4 种成核剂拥有较高的增刚效果,强度提高约 20.2%,模量提高约 35.3%。

2.1.3 不同成核剂对聚丙烯 B4801 冲击性能的影响

增透成核剂均属于 α 成核剂,添加到聚丙烯中使聚丙烯的结晶度显著提高,链段排列更加规整,因此聚丙烯的刚性提高,即拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量均有较大提高。但是 α 成核剂在提高刚性的同时会对聚丙烯的韧性带来不利影响。从表 1 冲击强度数据可以看出,WNA-108 对缺口冲击强度的影响最大,伴随质量分数的提高,几乎呈直线下降,在 3 000 $\mu\text{g}/\text{g}$ 时下降了约 70%。从冲击强度的保持率来看,添加 NX8000K、HB3988 和 WNA-21 三种成核剂的聚丙烯的冲击强度略有下降,但不影响 B4801 的使用,其中 WNA-21 的缺口冲击保持最好。

2.2 不同成核剂对聚丙烯 B4801 热变形温度的影响

不同成核剂对聚丙烯 B4801 热变形温度的影

响如表 2 所示。

表 2 不同成核剂改性 B4801 的物理性能

试样	添加量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	热变形 温度/ $^{\circ}\text{C}$	收缩 率/%	MFR/[$\text{g}\cdot$ (10 min) $^{-1}$]	透光 率/%	雾度/ %
空白	0	62.5	1.33	1.8	14.8	59.40
NX8000K 改性 B4801	1500	68.0	1.66	2.4	23.4	5.68
	1875	66.2	1.72	1.9	34.9	5.63
	2250	65.2	1.79	2.0	39.4	5.49
	2625	65.3	1.78	2.5	42.4	5.27
	3000	68.8	1.85	2.3	42.6	5.22
HB3988 改性 B4801	1500	63.4	1.66	2.3	34.1	5.50
	1875	65.3	1.69	2.5	39.4	5.49
	2250	66.3	1.73	2.3	40.2	5.18
	2625	67.3	1.71	2.1	42.8	5.17
	3000	65.6	1.80	2.0	42.6	5.00
WNA-108 改性 B4801	1500	68.2	1.51	2.4	10.9	24.16
	1875	69.4	1.53	2.0	11.4	23.01
	2250	68.6	1.54	2.3	12.4	21.51
	2625	65.7	1.57	2.2	10.9	19.86
	3000	67.0	1.58	2.4	11.3	18.77
WNA-21 改性 B4801	1500	70.5	1.45	2.6	39.6	5.03
	1875	69.5	1.51	2.4	40.5	4.93
	2250	72.5	1.52	2.6	42.2	4.94
	2625	67.6	1.47	2.6	45.2	4.83
	3000	68.6	1.46	2.2	47.4	4.77
WBQ-88 改性 B4801	1500	67.8	1.66	2.4	35.7	6.19
	1875	65.3	1.72	2.2	39.4	6.01
	2250	67.9	1.76	2.3	41.7	5.68
	2625	65.3	1.80	2.1	42.1	5.48
	3000	68.4	1.76	2.4	46.1	5.58

从表 2 中可以看出,作为 α 成核剂的 5 种增透成核剂对材料结晶度的提升较为明显,同样,也提高了材料的耐热性能。添加成核剂后,材料热变形温度都有不同程度的提高,其中 WNA-21 对热变形温度的提高最为明显,约 11.5%。

2.3 不同成核剂对聚丙烯 B4801 收缩率的影响

从表 2 中收缩率的数据可以看出,成核剂的加入使得聚丙烯的结晶度提高,球晶尺寸变小,材料的结晶度高、密度大,自然材料的尺寸变化也大,进而收缩率更大。从 24 h 收缩率的数据来看,WNA-21 具有最好的尺寸稳定性,添加 WNA-21 后收缩率变化最小。

2.4 不同成核剂对聚丙烯 B4801 流动性的影响

从表 2 中流动性数据可以看出,成核剂的引入均使聚丙烯的熔体质量流动速率(MFR)提高了约 27%,从 1.8 g/10 min 提高到约 2.2 g/10 min,说明所有的 α 成核剂对聚丙烯的流动性均有一定的改善作用。

2.5 不同成核剂对聚丙烯 B4801 透明性的影响

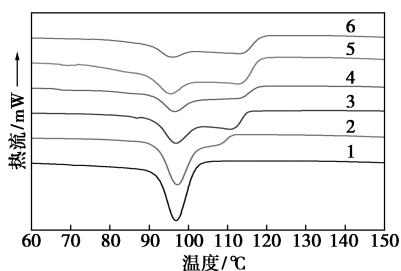
从表 2 中透明性数据可以看出,除 WNA-108 外,其余 4 种成核剂的加入都明显提高了聚丙烯的透明性,随着成核剂质量分数的增加,结晶位点增多,结晶度提高,球晶尺寸更小、更细化,使得聚丙烯的透明性明显提高。其中 WNA-21 的增透效果最显著,当质量分数为 3 000 $\mu\text{g/g}$ 时,其透光率从空白的 14.8% 提高到了 47.4%。

从表 2 中雾度数据可以看出,WNA-21 拥有较好的增透效果,质量分数为 1 500 $\mu\text{g/g}$ 时,其雾度达到 5%,相比空白样,下降了约 91%,体现出优良的增透效果。WNA-21 优良的分散性和高效的成核效率使其对聚丙烯透明性的改善效果最佳,添加质量分数为 2 625 $\mu\text{g/g}$ 以上,获得良好的透明性和雾度,有效改善了聚丙烯的透明效果。

2.6 成核剂对聚丙烯 B4801 结晶性能的影响

2.6.1 NX8000K 对结晶性能的影响

不同质量分数 NX8000K 对聚丙烯 B4801 的 DSC 图如图 1 所示。



1—纯 PP;2—1 500 $\mu\text{g/g}$;3—1 875 $\mu\text{g/g}$;4—2 250 $\mu\text{g/g}$;
5—2 625 $\mu\text{g/g}$;6—3 000 $\mu\text{g/g}$

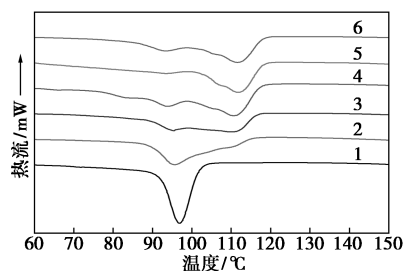
图 1 不同质量分数 NX8000K 改性 B4801 的 DSC 曲线

从图 1 中可以看出,随着成核剂质量分数的增加,相比空白样,在 110 $^{\circ}\text{C}$ 附近出现了新的结晶峰,为聚丙烯晶区的结晶峰。由于 B4801 是无规共聚聚丙烯,含有部分乙烯相,在未添加成核剂时,表现出单一的乙烯结晶峰,随着成核剂质量分数的增加,丙烯相结晶区开始增多,并且随着成核剂质量分数的增加,结晶速率进一步提高,结晶峰温度逐渐升

高,相反,乙烯相结晶区结晶温度逐渐降低,表明体系结晶以丙烯相为主,成核剂的加入有效提高了聚丙烯的结晶速率和结晶度。熔融峰温度也随着成核剂的增多而逐渐升高,表明聚丙烯结晶区片晶厚度逐渐增大,进而影响熔点逐渐提高。

2.6.2 HB3988 对结晶性能的影响

不同质量分数 HB3988 对聚丙烯 B4801 的 DSC 图如图 2 所示。



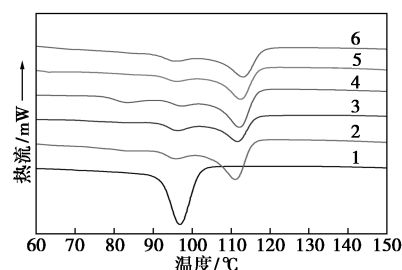
1—纯 PP;2—1 500 $\mu\text{g/g}$;3—1 875 $\mu\text{g/g}$;4—2 250 $\mu\text{g/g}$;
5—2 625 $\mu\text{g/g}$;6—3 000 $\mu\text{g/g}$

图 2 不同质量分数 HB3988 改性 B4801 的 DSC 曲线

从图 2 中可以看出,加入 HB3988 后,变化规律与 NX8000K 类似,随着成核剂 HB3988 质量分数的增加,聚丙烯晶区逐渐增多,占据主要结晶区,结晶速率增加,结晶温度逐渐提高,乙烯相结晶温度逐渐降低。熔融峰温度也随着成核剂质量分数的增大而逐渐升高,表明聚丙烯结晶区片晶厚度逐渐增大,进而影响熔点逐渐提高。

2.6.3 WNA-108 对结晶性能的影响

不同质量分数 WNA-108 对聚丙烯 B4801 的 DSC 图如图 3 所示。



1—纯 PP;2—1 500 $\mu\text{g/g}$;3—1 875 $\mu\text{g/g}$;4—2 250 $\mu\text{g/g}$;
5—2 625 $\mu\text{g/g}$;6—3 000 $\mu\text{g/g}$

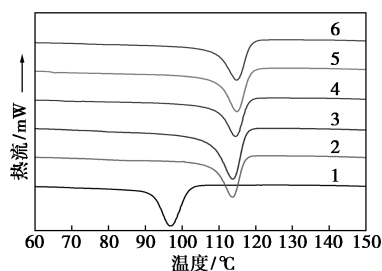
图 3 不同质量分数 WNA-108 改性 B4801 的 DSC 曲线

从图 3 中可以看出,WNA-108 表现出较高的聚丙烯诱导结晶速率,在 WNA-108 质量分数为 1 500 $\mu\text{g/g}$ 时,即可达到较高的 PP 结晶速率。随着质量

分数的增加,结晶速率逐渐增大,结晶温度逐渐升高,达到了 113.08℃。片晶厚度的增加也使熔融温度逐渐提高,相较 NX8000K 和 HB3988 拥有更高的熔融温度,在质量分数为 3 000 μg/g 时,熔融温度达到 142.88℃,较空白提高了 4.84℃。

2.6.4 WNA-21 对结晶的影响

不同质量分数 WNA-21 对聚丙烯 B4801 的 DSC 图如图 4 所示。



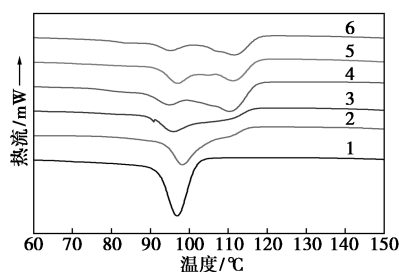
1—纯 PP;2—1 500 μg/g;3—1 875 μg/g;4—2 250 μg/g;
5—2 625 μg/g;6—3 000 μg/g

图 4 不同质量分数 WNA-21 改性 B4801 的 DSC 曲线

从图 4 中可以看出,WNA-21 在 5 种成核剂中表现出最高的聚丙烯诱导结晶性,其 DSC 结晶图上只表现出了聚丙烯的结晶峰,并未出现乙烯相结晶峰。随着成核剂质量分数的增加,结晶速率逐渐增大,结晶温度逐渐升高,并且获得最高的结晶度,片晶厚度增加使得熔融温度升高,在质量分数为 3 000 μg/g 时,熔融温度达到了 143.86℃,较空白提高了 5.82℃。

2.6.5 WBQ-88 对结晶性能的影响

不同质量分数 WBQ-88 对聚丙烯 B4801 的 DSC 图如图 5 所示。



1—纯 PP;2—1 500 μg/g;3—1 875 μg/g;4—2 250 μg/g;
5—2 625 μg/g;6—3 000 μg/g

图 5 不同质量分数 WBQ-88 改性 B4801 的 DSC 曲线

从图 5 中可以看出,WBQ-88 也表现出了与 NX8000K、HB3988、WNA-108 类似的结晶特性,随

着 WBQ-88 质量分数的增加,乙烯相的结晶温度逐渐降低,丙烯相的结晶温度逐渐升高,结晶速率增加,且结晶峰面积逐渐增大,表现出良好的诱导 PP 结晶作用。随着结晶度的提高,片晶厚度增加,熔融温度从 138.04℃ 逐渐提高到 141.72℃。

结合结晶温度和结晶曲线可知,5 种成核剂中 WNA-21 表现出了最优的诱导聚丙烯结晶特性,成核剂的加入显著降低了聚丙烯的成核自由能,在无规共聚聚丙烯中,显著提高了丙烯晶区结晶能力,增大结晶度的同时有效降低了球晶尺寸,使得聚丙烯材料的强度、模量、热变形温度都有明显提高,透明性增加,雾度降低。

3 结论

(1)5 种成核剂对聚丙烯的拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量都有一定的提升作用,从绝对数据来看,WNA-21 较另外 4 种成核剂拥有较高的增刚效果。

(2)5 种成核剂对筒支梁缺口冲击强度的影响中,WNA-108 对缺口冲击强度的影响最大,从保持率来看,添加 NX8000K、HB3988 和 WNA-21 这 3 种成核剂的聚丙烯的冲击强度略有下降,其中 WNA-21 的缺口冲击强度保持的最好。

(3)5 种成核剂对材料结晶度的提升较为明显,也提高了材料的耐热性能,材料热变形温度都有不同程度的提高,其中 WNA-21 对热变形温度的提高最明显。从 24 h 收缩率数据看,WNA-21 具有最好的尺寸稳定性,所有的成核剂对聚丙烯的流动性均有一定的改善作用,WNA-21 对聚丙烯透明性的改善效果最佳。

(4)从分析结果来看,WNA-21 是 B4801 改性的优选 α 增透成核剂。

参考文献

- [1] Sun M M, Gao D L, Zhang H B, et al. Toughening effects of nucleating agent on impact polypropylene copolymer [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(17): 8705-8713.
- [2] 韩李旺,包璐璐,杨廷杰,等.高熔体流动速率透明无规共聚聚丙烯的工业化生产及应用[J].合成树脂及塑料,2022,39(2): 46-49.
- [3] Busico V, Cipullo R. Microstructure of polypropylene [J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(3): 443-533.
- [4] Galli P, Vecellio G. Polyolefins; The most promising large-volume materials for the 21st century [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2004, 42: 396-415.

(下转第 211 页)

- [9] Fu G, Ma L, Gan M, *et al.* Fabrication of 3D Spongia-shaped polyaniline/MoS₂ nanospheres composite assisted by polyvinylpyrrolidone (PVP) for high-performance supercapacitors[J]. *Synthetic Metals*, 2017, 224: 36–45.
- [10] Zhang X, Ma L, Gan M, *et al.* Controllable constructing of hollow MoS₂/PANI core/shell microsphere for energy storage[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 460: 48–57.
- [11] Li L, Lou Z, Han W, *et al.* Highly stretchable micro-supercapacitor arrays with hybrid MWCNT/PANI electrodes [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(3): 1600282.
- [12] 王攀, 刘国龙, 蒋倩茹. 石墨烯/聚吡咯/聚苯胺复合材料的制备与电容性能[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(4): 9.
- [13] 王巍, 郭俊宏. 新型纳米管状二硫化钼的制备[J]. *中国材料进展*, 2021, 40(1): 69–73.
- [14] Ren L, Zhang G, Lei J, *et al.* Growth of PANI thin layer on MoS₂ nanosheet with high electro-capacitive property for symmetric supercapacitor[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 798: 227–234.
- [15] Liang X, Zhao L, Wang Q, *et al.* A dynamic stretchable and self-healable supercapacitor with a CNT/graphene/PANI composite film [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(47): 22329–22334.
- [16] Zhang J, Zhu A. Study on the synthesis of PANI/CNT nanocomposite and its anticorrosion mechanism in waterborne coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 159: 106447.
- [17] Zou Y. Structure-properties relationships in continuous carbon and polymer nanofibers[D]. Nebraska; The University of Nebraska-Lincoln, 2018.
- [18] Choudhary R, Mandal G. MoS₂ decorated with graphene and polyaniline nanocomposite as an electron transport layer for OLED applications[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(2): 1302–1316.
- [19] Hu H, Zhong X, Yang S, *et al.* Tough and stretchable Fe₃O₄/MoS₂/PANI composite hydrogels with conductive and magnetic properties [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 182: 107623.
- [20] Saha S, Chaudhary N, Mittal H, *et al.* Inorganic-organic nanohybrid of MoS₂-PANI for advanced photocatalytic application[J]. *International Nano Letters*, 2019, 9(2): 127–139.
- [21] Ghaleghafi E, Rahmani M B. Exploring different routes for the synthesis of 2D MoS₂/1D PANI nanocomposites and investigating their electrical properties[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 138: 115128.
- [22] Krithika S, Balavijayalakshmi J. Synthesis and fabrication of nanostructured MoS₂/PANI nanocomposites by microwave assisted method for electrochemical applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 50: 17–25.
- [23] Yang J, Ye M, Han A, *et al.* Preparation and electromagnetic attenuation properties of MoS₂-PANI composites: A promising broadband absorbing material[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(1): 292–301.
- [24] Dai J, Lv Y, Zhang J, *et al.* Effect of morphology and phase engineering of MoS₂ on electrochemical properties of carbon nanotube/polyaniline@ MoS₂ composites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 590: 591–600.
- [25] Dai J, Zeng S, Lv Y, *et al.* A facile strategy for tailoring polyaniline by MoS₂ nanosheets to obtain excellent electrochemical properties [J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 378: 138149.
- [26] Cao Y J, Lu C Y, Zhang Z W, *et al.* N/O Co-doped porous carbons derived from coal tar pitch for ultra-high specific capacitance supercapacitors[J]. *ACS Omega*, 2022, 27(7): 23342–23352.
- [27] Yewale M, Jadhavar A, Kadam R, *et al.* Hydrothermal synthesis of manganese oxide (Mn₃O₄) with granule-like morphology for supercapacitor application [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(19): 29429–29437.
- [28] Raj T V, Hoskeri P A, Hamzad S, *et al.* Moringa Oleifera leaf extract mediated synthesis of reduced graphene oxide-vanadium pentoxide nanocomposite for enhanced specific capacitance in supercapacitors [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2022, 142: 109648.
- [29] Liu H, Zhang F, Li W, *et al.* Porous tremella-like MoS₂/polyaniline hybrid composite with enhanced performance for lithium-ion battery anodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 167: 132–138.
- [30] Lei J, Jiang Z, Lu X, *et al.* Synthesis of few-layer MoS₂ nanosheets-wrapped polyaniline hierarchical nanostructures for enhanced electrochemical capacitance performance [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 176: 149–155.
- [31] Wang H, Ma L, Gan M, *et al.* Design and fabrication of macroporous polyaniline nanorods@ graphene-like MoS₂ nanocomposite with high electrochemical performance for supercapacitors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699: 176–182. ■

(上接第 204 页)

- [5] 董莉, 李丽, 段宏义, 等. α 成核剂对聚丙烯力学性能与结晶性能的影响[J]. *合成树脂及塑料*, 2019, 36(2): 53–56.
- [6] 邵灵芝, 李术, 符茂华, 等. 聚丙烯在汽车内外饰方面的研究进展[J]. *汽车实用技术*, 2022, 47(10): 184–187.
- [7] 朱锦羨, 杨营, 姚棋, 等. 成核剂对无规共聚聚丙烯性能影响的比较研究[J]. *广东化工*, 2022, 49(19): 7–10.
- [8] 赵莹, 刘国明, 周勇, 等. 聚丙烯多层次结构调控: 成核作用与合金化研究进展[J]. *高分子通报*, 2021(6): 35–47.
- [9] 李馥梅. 透明聚丙烯的制备方法及其性能控制因素[J]. *塑料科技*, 2004(5): 39–45.
- [10] 陈枝晴, 王华, 李跃文. 聚丙烯透明改性的研究[J]. *塑料工业*, 2008, 36: 243–245.
- [11] 左瑞清, 丁筠, 乔辉, 等. 成核剂对聚丙烯力学性能与结晶行为的影响[J]. *合成树脂及塑料*, 2013, 30(3): 9–11.
- [12] 张跃飞, 罗贤祖, 常瑶, 等. 二环[2.2.1]庚烷二羧酸盐成核剂对聚丙烯结晶行为和力学性能的影响[J]. *塑料工业*, 2013, 41(3): 76–78. ■