

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.002

复合成核剂对聚丙烯菌袋膜低温韧性及耐高温性能的影响

麻玉龙^{1,2}, 杨康¹, 张怡¹, 王聚恒^{1,2}, 曾舒¹, 徐裕勇³, 黄晓泉¹

(1. 贵州省冶金化工研究所, 贵阳 550014; 2. 贵州聚兴塑业有限公司, 贵阳 550014; 3. 贵州省纳米材料工程中心, 贵阳 550016)

摘要: 通过双层共挤下吹工艺技术, 结合 α 成核剂(NX8000K)与 β 成核剂(WBG-II)复配协同调控聚丙烯(PP)菌袋膜异相成核作用, 采用扫描电子显微镜、差示扫描量热分析仪、动态热机械分析仪等设备, 分析了NX8000K与WBG-II复配对PP菌袋膜低温韧性及耐高温性能的影响规律。结果表明, NX8000K与WBG-II添加一定的复配量有利于改善PP菌袋膜的低温韧性及耐高温性能。当NX8000K, WBG-II添加质量分数分别为0.4%和0.3%时, PP菌袋膜具有理想的低温韧性及耐高温性能; 在 -30°C 下, 穿刺强度提高到了11.8 N/mm, 是未添加成核剂(穿刺强度为4.25 N/mm)时的2.8倍, 储能模量在高温 120°C 下提高了695 MPa, 为757.1 MPa; 此外, PP菌袋膜的结晶能力不断完善, 结晶度明显提高, 同时提高了材料的结晶温度和熔融温度, 诱导 β 晶生成并起到细化晶粒的作用, 从而有效改善PP菌袋膜的低温韧性及耐高温性能。

关键词: 成核剂; 聚丙烯菌袋膜; 低温韧性; 耐高温性能

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0007-06

The Effect of Composite Nucleating Agents on the Low Temperature Toughness and High Temperature Resistance of Polypropylene Bacterial Bag Membrane

Ma Yulong^{1,2}, Yang Kang¹, Zhang Yi¹, Wang Juheng^{1,2}, Zeng Shu¹, Xu Yuyong³, Huang Xiaoxiao¹

(1. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Engineering, Guiyang 550014, China; 2. Guizhou Juxing Plastic Industry Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Nanomaterial Engineering Center, Guiyang 550016, China)

Abstract : Through double-layer co-extrusion down-blowing process technology, combining α -nucleating agent (NX8000K) with β -nucleating agent (WBG- II) as the compound nucleating agent, the heterogeneous nucleation effect of polypropylene (PP) bacterial bag membrane was regulated and controlled synergistically. Scanning electron microscope, differential scanning calorimeter and dynamic thermomechanical analyzer were used to analyze the influences of the compound nucleating agent on the low-temperature toughness and high-temperature resistance of PP bacterial bag membranes. The results show that adding a certain compound amount of NX8000K and WBG-II can significantly improve the low-temperature toughness and high-temperature resistance of PP bacterial bag membranes. When the compound addition amounts of NX8000K and WBG- II are 0.4wt% and 0.3wt%, the PP bacterial bag membranes have ideal low-temperature toughness and high-temperature resistance. At -30°C , the puncture strength increases to 11.8 N/mm, which is 2.8 times that of no nucleating agent (the puncture strength is 4.25 N/mm). The storage modulus increase by 695 MPa at 120°C , which is 757.1 MPa; in addition, the crystallization ability of PP bacterial bag membranes is constantly improved, and the crystallinity is significantly improved. Meanwhile, the crystallization temperature and melting temperature of the material are increased, inducing the generation of β crystals and refining the grains, thus effectively improving the low-temperature toughness and high-temperature resistance of PP bacterial bag membranes.

Keywords : nucleating agent ; polypropylene film for bacterial bag ; low temperature toughness ; high temperature resistance

基金项目: 贵州省科技支撑计划[2020]4Y063, 贵阳市科技计划项目[2023]6-4号, 贵阳市科技计划项目[2021]43-21号, 贵阳市科技计划项目[2020]37-4号, 贵州省科技支撑计划[2020]4Y224号

通信作者: 黄晓泉, 高级工程师, 研究方向为高分子材料

收稿日期: 2023-10-22

引用格式: 麻玉龙, 杨康, 张怡, 等. 复合成核剂对聚丙烯菌袋膜低温韧性及耐高温性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 7-12.

Ma Yulong, Yang Kang, Zhang Yi, et al. The Effect of Composite Nucleating Agents on the Low Temperature Toughness and High Temperature Resistance of Polypropylene Bacterial Bag Membrane[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 7-12.

随着塑料工业和农业实现的突破性研究以及人们对产品质量问题的日益关注,塑料凭借其优异的特性、便捷的成型工艺和相对较低的成本,在农业领域得到广泛应用。聚丙烯(PP)具有质轻、价廉、卫生及易加工成型等特点,主要应用于小型家电、玩具、洗衣机、汽车零配件、包装、农材等领域。但是,传统PP材料由于耐高温性能不足,导致包装材料在灭菌环节中易发生破袋问题,无法满足食用菌袋类农包材高温高压灭菌工艺环境的使用要求,再加上低温性能欠佳,严重限制了其在高端农业领域的推广应用。

目前,国内外科技工作者为改善PP菌袋膜的低温韧性及耐高温高压灭菌等性能作了大量研究,主要采用共混改性、填充改性及成核剂异相成核改性^[1-3]方式。其中,共混改性存在相容性问题;而填充改性对低温性能的改善幅度较小且容易发生团聚等问题;成核剂改性则可通过调控异相成核作用,细化晶粒,增强界面黏附,从而提高低温韧性及耐高温性能。因此,改善PP菌袋膜低温及耐高温性能主要以成核剂改性为主^[4-6]。董莉等^[7]研究了3种 α 成核剂对PP力学性能与结晶性能的影响。结果表明,成核剂EPX715对改善PP的成核效果最明显,晶粒最均匀致密,提高结晶温度,(040)晶面的衍射峰强度及结晶度增加,综合力学性能相对理想。王莹等^[8]研究了3种透明成核剂对EP08T的光学性能、力学性能以及结晶行为的影响。结果表明,随着成核剂添加量的增大,所得样品的光学性能、冲击强度以及结晶温度(T_c)大幅提升,拉伸强度、弯曲强度以及弯曲弹性模量略有改善,其中NX8000改善效果最佳。孙彩迪^[9]考察了NX8000K成核剂对PP的结晶行为、成核效率、光学性能、力学性能和热性能的影响,并在NX8000K成核剂适宜用量的基础上研究了助剂对PP的雾度和弯曲强度的影响。实验结果表明,NX8000K成核剂质量分数为0.6%时,PP的光学性能、力学性能和热性能均较好。以上研究均采用单一成核剂改性PP,虽然结果表明可一定程度地改善PP材料的力学性能及热性能,但是在菌袋膜领域,针对低温韧性($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)协同理想的耐高温性能(耐 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高压灭菌)的相关研究仍存在欠缺。

鉴于此,笔者以PP为基材,针对单一成核剂改性存在的问题,采用 α 成核剂山梨醇二缩醛

(NX8000K)协同 β 成核剂有机稀土类(WBG-II)的异相成核作用,结合共混改性技术制备菌袋用PP薄膜,探究NX8000K和WBG-II不同添加量比例对PP菌袋膜低温韧性及耐高温性能的调控规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP:F4908,乙烯质量分数为2.8%,熔体指数为 $7\text{ g}/10\text{ min}$ ($230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2.16 kg),中国石油化工股份有限公司茂名分公司;

α 成核剂:NX8000K,白度 $\geq 95\%$,堆积密度为 $0.28\text{ g}/\text{cm}^3$,熔点为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,宁波市汇旺诚塑化有限公司;

β 成核剂:WBG-II,密度为 $1.14\pm 0.03\text{ g}/\text{cm}^3$,金属氧化物含量 $\geq 3.0\%$,广东炜林纳新材料科技股份有限公司;

抗氧剂:630,白色粉末,熔点 $244\text{ }^{\circ}\text{C}$,广州志一化工有限公司;

PP蜡:白色粉末,熔点为 $110\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$,张家港保税区启诚国际贸易有限公司。

1.2 主要仪器及设备

差示扫描量热分析(DSC)仪:DSC-25型,美国TA公司;

双螺杆挤出机:SHJ-65型,南京杰恩特机电有限公司;

热鼓风干燥箱:CS101型,重庆量子实验设备有限公司;

双层下吹吹膜机组:CX-2G-40/40-650型,浙江超信机械科技有限公司;

穿刺强度测试仪:MCT-02 A型,美国TA公司;

动态热机械分析(DMA)仪:DMA/SDTA 1型,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):EM-30 PLUS型,北京欧波同光学技术有限公司。

1.3 试样制备

在PP基材中,按照表1配方采用双螺杆挤出机制备PP粒料,其挤出工艺为:温度分别为 $150, 190, 230, 230, 230, 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔体温度为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,主机转速为 $30\text{ r}/\text{min}$ 。挤出料分别于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热鼓风干燥箱中干燥 4 h ,冷却备用。再置于双层下吹膜机组中吹至薄膜(外层为表1配方,内层为F4908),外层:内层厚度比为 $1:3$,工艺温度为外层温度 $200, 230, 230, 230, 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,内层温度为 $200, 230, 230, 230, 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却

后测试表征。

表1 不同样品添加质量分数 %

样品	抗氧剂 630	PP蜡	NX8000K	WBG-Ⅱ	F4908
1 [#]	0.15	0.1	0	0	100
2 [#]	0.15	0.1	0.6	0.1	100
3 [#]	0.15	0.1	0.5	0.2	100
4 [#]	0.15	0.1	0.4	0.3	100
5 [#]	0.15	0.1	0.3	0.4	100

1.4 测试与表征

(1)穿刺强度测试。按 GB/T 16578-2008 进行测试。

(2)结晶行为。按 GB/T 19466.1-2004, 切取 3~5 mg 试样置于铝坩埚内, 采用 DSC 在氮气气氛下, 升温速率为 10 °C/min。

结晶度 X_{DSC} 计算方法如式(1)^[10]:

$$X_{\text{DSC}} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_{DSC} 为结晶度; ΔH_m 为熔融过程热焓; ΔH_m^0 为试样结晶度 100% 时对应熔融热焓, 其值取 177 J/g^[11]。

(3) DMA 分析。在氮气氛围下, 以 5 °C/min 的升温速度在拉伸模式下测量, 测试温度范围为 -60 °C~100 °C, 测试频率为 1 Hz。

(4)微观结构表征。将 PP 膜样置于液氮环境下脆冷, 再置于冲击强度测试仪上快速冲断, 然后对断面进行喷金处理, 采用 SEM 在特定加速电压条件下拍试样断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 穿刺强度分析

图 1 为 -30 °C 下, α 成核剂 NX8000K 与 β 成核剂 WBG-Ⅱ 不同添加量条件下 PP 菌袋膜的穿刺强度变化曲线。由图 1 可知, 当 NX8000K, WBG-Ⅱ 添加质量分数分别为 0.6% 和 0.1% 时, 薄膜穿刺强度为 6.58 N/mm; 当添加质量分数分别为 0.4% 和 0.3% 时, 穿刺强度为 11.8 N/mm, 是未添加成核剂条件下

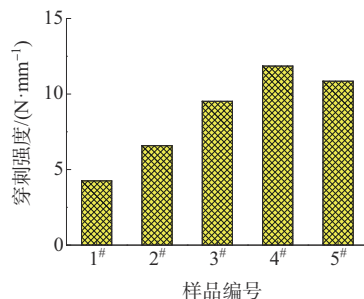
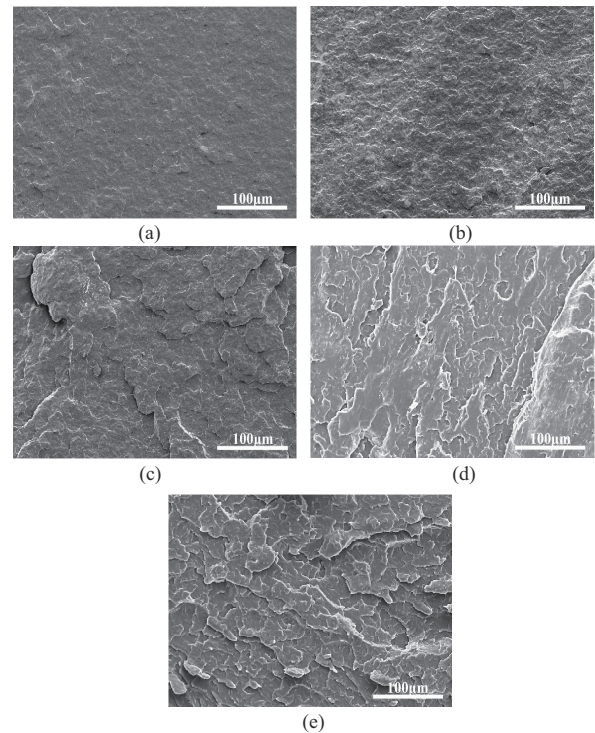


图1 PP菌袋膜的穿刺强度

(4.37 N/mm) 的 2.7 倍。随着 NX8000K, WBG-Ⅱ 添加质量分数继续改变为 0.3% 和 0.4% 时, 薄膜的穿刺强度降低, 这表明当 NX8000K, WBG-Ⅱ 添加量为 0.4% 和 0.3%, 薄膜的穿刺强度最理想, 低温韧性优异, 这主要是由于复配成核剂粒子分散在材料内部可作为应力集中点, 促使大量剪切带产生, 消耗外界能量, 提高穿刺强度^[12-13]。此外, 成核剂除了起阻滞、转向并终止小裂纹拓展的作用外, 还可形成较强界面黏附和细化粒子, 促使复合材料具有较高穿刺强度。

2.2 微观结构分析

图 2 为 -30 °C 时 PP 菌袋膜的微观结构特征。由图 2 可以看出, 随着 NX8000K, WBG-Ⅱ 添加质量分数分别由 0 增加到 0.6% 和 0.1%, 再到 0.5% 和 0.2%, 材料断面粗糙, 应力发白区域及界面层厚度增加, 呈现出以韧性断裂为主的韧脆转变特征。当 NX8000K 和 WBG-Ⅱ 添加质量分数为 0.4% 和 0.3% 时, PP 菌袋膜(图 2d)冲击断面均呈现出较强的界面黏结及应力发白区域。此时, 当材料受到外界冲击力时, 可引起较多能量耗散, 从而显著提高材料的综合力学性能。然而, 当 NX8000K 和 WBG-Ⅱ 添加质量分数为 0.3% 和 0.4% 时, PP 菌袋膜界面黏结度明显减弱甚至消失(图 2e), 这与上述力学性能分析



a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]; e—5[#]

图2 PP菌袋膜微观结构特征

结果一致。因此,在NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时,PP菌袋膜低温韧性最理想。其机理主要是由于添加复配成核剂后,材料的界面黏结及应力发白现象在受到外力作用时,可诱发大量的银纹和剪切屈服从而促进聚合物的能量耗散^[14-15]。此外,改性成核剂添加量的增加及分散性的提高都可以有效促进界面黏结及应力发白现象的产生,对材料综合力学性能的改善存在至关重要的作用。但是,改性成核剂的分散性存在最大值,故对界面黏结及应力发白作用有其极限值。这表明当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时,PP菌袋膜可获得较为理想的低温韧性。这与上述的讨论结果一致。

2.3 结晶行为分析

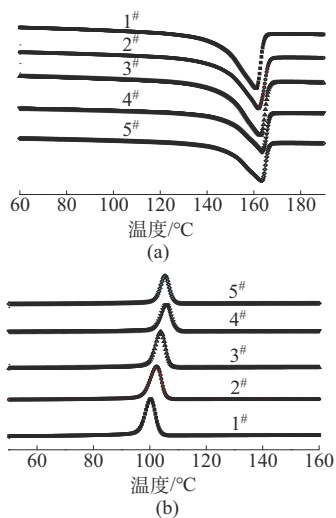
图3为PP菌袋膜的熔融行为及结晶行为。表2为PP菌袋膜的结晶及熔融值。由图3a及表2可看出,随着NX8000K,WBG-Ⅱ添加质量分数分别由0增加到0.6%和0.1%,再到0.3%和0.4%,材料的熔融温度呈现增加趋势。当NX8000K和WBG-Ⅱ的添加质量分数为0.4%和0.3%时,材料的熔融温度为163.8℃。主要原因是复配成核剂产生的异相成核作用,优化了材料内部链结构的松弛过程和重排

力度,细化了晶粒及完善了材料结晶的过程,从而增加熔融温度及力学性能^[16]。而当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.3%和0.4%时,熔融温度及结晶温度降低,分别为163.1℃和105.2℃,这说明失衡成核剂配比抑制了结晶速率及结晶能力的增加,使得非晶区占比增加,一定程度上降低了材料的力学性能。由图3b及表2可知,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时, T_c 增加了5.7%,由100.2℃增加至105.9℃,而半峰宽(T_d)呈现递减趋势,这主要是由于增加WBG-Ⅱ,结晶速率进一步提升,促使结晶能力提高,降低了分子间缠接能力,增加了分子链柔顺性及晶格堆砌的规整度,优化了晶区与非晶区比,从而促进了结晶的进一步完善,提升了穿刺强度,提高低温韧性^[17]。但是,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.3%和0.4%时, T_c 小幅度下降,这主要原因是聚合物片晶的亚稳定性,在较高的成核剂添加量下,材料晶片厚度显著增加,从而导致 T_c 降低^[18]。因此,NX8000K和WBG-Ⅱ复配添加时, β 成核剂WBG-Ⅱ添加量过高并不利于薄膜穿刺强度的提升。

此外,由表2可知,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时, X_{DSC} 为28.9%,较未添加成核剂(13%)时增加了15.9%。这主要是由于随着WBG-Ⅱ添加量的增加,弱化了分子间作用力,优化了材料内部分子构象,从而加速了分子链松弛度和重构规整度,使材料的结晶趋于完善,从而增加了结晶度^[19-20]。当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.3%和0.4%时,结晶度较添加质量分数为0.4%和0.3%条件下降低了0.6%,较未添加成核剂时增加了15.3%。这主要是由于随着复配成核剂中WBG-Ⅱ进一步增加,加剧了分子间运动,导致分子链更加紧密堆积,从而限制了分子间距,材料失去结晶结构,阻碍了结晶度的进一步提高^[21]。故此,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%,材料的结晶行为较佳,穿刺强度最理想,与力学性能分析结果一致。

2.4 DMA分析

图4a为PP菌袋膜储能模量-温度曲线图。表3为PP菌袋膜DMA测试值。由图4a及表3可知,随着WBG-Ⅱ添加量的增加,储能模量先缓慢下降,随后急剧下降,最后到达平衡状态。产生这种现象的原因可能是由于初始低温状态升至一定温度,试样



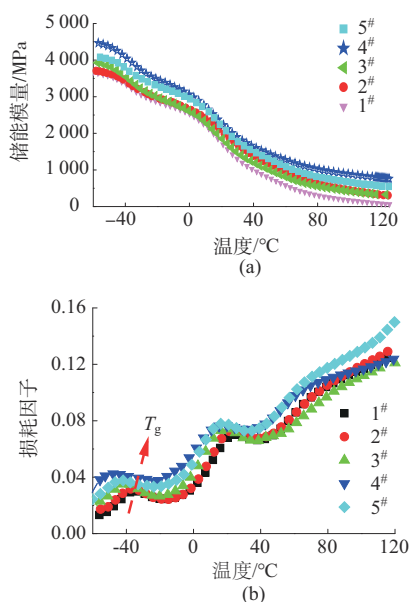
a—熔融行为;b—结晶行为

图3 PP菌袋膜熔融行为及结晶行为

表2 PP菌袋膜结晶及熔融值

试样编号	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_{DSC}/\%$
1 [#]	100.2	5.35	160.7	22.98	13.0
2 [#]	102.4	4.54	161.8	37.67	21.3
3 [#]	103.9	4.01	162.7	43.45	24.5
4 [#]	105.9	3.05	163.8	51.22	28.9
5 [#]	105.2	2.43	163.1	50.15	28.3

注: T_m 为熔融温度; ΔH_m 为熔融焓; X_{DSC} 为DSC测试结晶度。



a—储能模量-温度曲线;b—损耗因子-温度曲线

图4 PP菌袋膜储能模量-温度和损耗因子-温度曲线

表3 PP菌袋膜DMA测试值

试样编号	$T_g/^\circ\text{C}$	I_β	I_α	储能模量/MPa	
				25 °C	120 °C
1 [#]	-35.3 °C	1.36	3.26	1 485.8	62.1
2 [#]	-36.6 °C	1.98	3.02	1 834.0	290.1
3 [#]	-40.7 °C	2.69	2.36	1 638.3	322.5
4 [#]	-50.8 °C	3.89	2.13	2 083.7	757.1
5 [#]	-44.4 °C	3.26	1.52	1 952.8	550.6

注: I_β 为 β 松弛峰面积; I_α 为 α 松弛峰面积。

所处的环境变化导致复合材料储能模量有缓慢的下降;随后储能模量急剧下降是因为玻璃化转变过程中,复合材料由刚性状态转变为弹性状态,期间伴随着模量的释放;最终达到平衡状态,此时试样的刚性状态减弱,表现为弹性状态。未添加成核剂时,材料在高温 120 °C 环境下,储能模量为 62.1 MPa,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时,仍能保持较高的储能模量,为 757.1 MPa。根据 Voigt-Kelvin 模型可知,储能模量增加,材料黏性变大,弹性变形也变大,耐温性能提高^[22]。由此可知,表明当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时,薄膜具有相对理想的耐高温性能。

图4b为PP菌袋膜损耗因子-温度曲线图。由图4b及表3可知,在20 °C左右所有试样的损耗因子曲线均呈现了 α 松弛峰,表明PP菌袋膜晶体相结构存在的缺陷导致受限制材料分子链的松弛,被定义为耐温参数^[23]。-40 °C左右呈现的损耗因子峰被定义为 β 松弛峰,表征的是PP菌袋膜非晶区无限制材料

内部分子链的玻璃化转变温度(T_g)点,用来表征基体材料分子链流动性^[24]。与未添加成核剂样品对比,所有样品的 T_g 均向低温区转移,表明分散相在PP菌袋膜中分散性理想。当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时, T_g 的降低幅度最大,表明在低温环境下PP菌袋膜非晶区相分子链的流动性显著增强,这在一定程度上提高了低温韧性。此外,当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时, I_β 最大,为3.89,是未添加成核剂条件下(I_β 为1.36)的2.9倍, β 松弛峰强度越大,耗散的抗穿刺能量越大,材料的抗穿刺强度则越高。表明当NX8000K和WBG-Ⅱ添加质量分数为0.4%和0.3%时,PP菌袋膜低温性能及耐高温性能最理想,与上述分析一致。

3 结论

(1)当NX8000K和WBG-Ⅱ复配添加质量分数为0.4%和0.3%时,PP菌袋膜在低温(-30 °C)环境下具有较高的穿刺强度,为11.8 N/mm,是未添加成核剂(穿刺强度为4.25 N/mm)时的2.8倍。此外,由SEM图可知,当NX8000K和WBG-Ⅱ复配添加质量分数为0.4%和0.3%时,PP菌袋膜冲击断面均呈现出较强的界面黏结及应力发白区域,当材料受到外界冲击力时,可引起较多能量耗散,从而显著提高材料的穿刺强度。

(2)当NX8000K和WBG-Ⅱ复配添加质量分数为0.4%和0.3%时,材料的熔融温度为163.8 °C, T_c 增加了5.7%,由100.2 °C增加至105.9 °C,而 T_i 呈现递减, X_{DSC} 为28.9%,较未添加成核剂条件下(13%)增加了15.9%。促使PP的结晶能力不断完善,诱导 β 晶生成并起到细化晶粒的作用,从而有效的改善PP菌袋膜的低温性能及耐温性能。

(3)当NX8000K和WBG-Ⅱ复配添加质量分数为0.4%和0.3%时,仍能保持较高的储能模量,为757.1 MPa, T_g 降低幅度最大, I_β 最大为3.89,是未添加成核剂条件下(I_β 为1.36)的2.9倍, β 松弛峰强度越大,耗散的抗穿刺能量越大,表明材料具有相对理想低温韧性及耐高温性能。

参考文献

- [1] Dai Xiyang, Xing Zhaoliang, Yang Wei, et al. The effect of annealing on the structure and electric performance of polypropylene films [J]. International Journal of Polymer Science, 2022, 22(9): 1 011–1 023.
- [2] Wang Xin, Zhang Xiao, Zhu Bofeng. Influence of surface fluorina-

- tion treatment on properties of polypropylene film[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6):2 058–2 064.
- [3] Wu Xudong, Tang Shaokai, Song Guanghui, et al. High-temperature resistant polypropylene films enhanced by atomic layer deposition[J]. Nano Express, 2021, 2(1):10 025–10 037.
- [4] Liu, Hui, Li, DongLi, Xu, Wencai, et al. Crystalline structure and morphology in uniaxially oriented polypropylene film modified with nanosilica[J]. Packaging Technology & Science, 2019, 32(11): 537–544.
- [5] Hernández-F, Joaquín R, Emilio L J, et al. Enhancing the thermal stability of polypropylene by blending with low amounts of natural antioxidants[J]. Macromolecular Materials & Engineering, 2019, 304(11):1 900 379–1 900 385.
- [6] Malganova I, Andrey E. Development of heating devices from polypropylene(article)[J]. Astra Salvensis, 2017, 17(8):93–106.
- [7] 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.
Dong Li, Li Li, Duan Hongyi, et al. The effect of nucleating agents on the mechanical and crystalline properties of polypropylene[J]. Synthetic Resins and Plastics, 2019, 36(2):53–56.
- [8] 王莹,康文倩,罗京,等.成核剂对透明抗冲聚丙烯性能影响[J].塑料科技,2023,51(4):40–45.
Wang Ying, Kang Wenqian, Luo Jing, et al. The effect of nucleating agents on the properties of transparent impact resistant polypropylene[J]. Plastic Technology, 2023, 51(4):40–45.
- [9] 孙彩迪. NX8000K成核剂对等规聚丙烯透明改性及热性能的影响[J].石油化工,2015,44(5):46–52.
Sun Caidi. The effect of NX8000K nucleating agent on the transparent modification and thermal properties of isotactic polypropylene [J]. Petrochemical, 2015, 44(5):46–52.
- [10] Pintor S, Josua S, Karya S, Mechanical properties of polypropylene composites with different reinforced natural fibers-A comparative study[J] Journal of Ecological Engineering, 2023, 24(7): 311–317.
- [11] Rao Y K S S, Ahmad A, Battula S K, et al. Mechanical properties of arecanut and GFR hybrid polypropylene composites[J]. Advances in Polymer Technology, 2022, 22(1):1–9.
- [12] Gumus B E. Effect of MA-g-PP addition on mechanical properties of polypropylene/hollow glass spheres/nanoclay composites[J]. Polymer bulletin, 2023, 80(3):3 405–3 422.
- [13] Wada T, Kitabayashi I, Chammingkwan P, et al. Physical property of isotactic polypropylene blended with less crystalline polypropylene[J]. Macromolecular Reaction Engineering, 2022, 16(6): 125–129.
- [14] Zhang X, Tang F, Lyu W, et al. Effect of an active β -nucleating agent on the crystallization behavior of polypropylene random copolymer[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(1):1–13.
- [15] Li H, Zhang Y F, Li Y, et al. Effect of a novel bio-based β -nucleating agent on the properties of isotactic polypropylene[J]. Journal of Polymer Research, 2021, 28(12):1–12.
- [16] Vyncke G, Fiorio R, Cardon L, et al. The effect of polyethylene on the properties of talc-filled recycled polypropylene[J]. Plastics Rubber and Composites, 2020, 1:1–8.
- [17] Saad F U S M, Salim N, Roslan R. Physical and mechanical properties of kenaf/seaweed reinforced polypropylene composite[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 51(2):1 372–1 375.
- [18] Kim B, Gavande V, Jeong M, et al. Properties of blends of ultra-high molecular weight polypropylene with various low molecular weight polypropylenes[J]. Molecular Crystals & Liquid Crystals, 2023, 762(1):1–8.
- [19] Sang X W Z. Crystallization and mechanical properties of basalt fiber-reinforced polypropylene composites with different elastomers[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2018, 134(3): 1 256–1 275.
- [20] Sylwester Norwiński, Postawa P, Sachajko R, et al. The investigations of thermomechanical properties of polypropylene composites [J]. Advances in Polymer Technology, 2019, 19(11):1–10.
- [21] Tan H, Guo X, Tan H, et al. Crystallization and mechanical properties of carbon nanotube/continuous carbon fiber/metallocene polypropylene composites[J]. Materials Research Express, 2021, 9(1): 15 302–15 308.
- [22] Chen Q, Sai T, Fang Z, et al. Thermal stability and oxygen resistance of polypropylene composites with fullerene/montmorillonite hybrid fillers[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 146(3):1 383–1 392.
- [23] Stoian S A, Gabor A R, Albu A M, et al. Recycled polypropylene with improved thermal stability and melt processability[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138(4):2 469–2 480.
- [24] Yue Y, Sha X, Wang F, et al. The effect of β -nucleating agent on the self-nucleation of isotactic polypropylene[J]. Polymers, 2021, 229:124 009–124 016.