

甲基丙烯酸甲酯改性纳米纤维素对PMMA 复合材料力学性能的影响

王怀英¹, 蔡小玲²

(1. 吉林工程职业学院, 吉林 四平 136001; 2. 无锡城市职业技术学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 以脱脂棉为原料, 利用硫酸水解法制备纳米纤维素(NCC), 利用甲基丙烯酸甲酯(MMA)对NCC进行接枝改性, 得到NCC-g-MMA, 将NCC-g-MMA分散至聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 制备PMMA/NCC-g-MMA复合材料。结果表明: NCC成功接枝改性, 相较纯PMMA, PMMA/NCC-g-MMA复合材料具有较好的热稳定性。由于NCC-g-MMA的力学性能较好, 复合材料体内能够形成致密的立体网状结构, 从而分担应力而减缓裂纹的进一步发展, 故而提升复合材料的硬度、拉伸强度和冲击强度。当NCC-g-MMA的质量分数为1%时, PMMA/NCC-g-MMA复合材料的维氏硬度达到23.3, 拉伸强度达到25.4 MPa, 冲击强度达到25.2 kJ/m²。由此可知, 接枝改性技术是改善纳米纤维素表面的基团、提高纳米纤维素与聚合物相容性的有效方法。研究结果为满足实际生产需求的PMMA材料改性提供了实验参考。

关键词: 纳米纤维素; 甲基丙烯酸甲酯; 聚甲基丙烯酸甲酯; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0076-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.014

Effect of Methyl Methacrylate-modified Nanocellulose on Mechanical Properties of PMMA Composites

WANG Huaiying¹, CAI Xiaoling²

(1. Jilin Engineering Vocational College, Siping 136001, China; 2. Wuxi City College
of Vocational Technology, Wuxi 214000, China)

Abstract: Cotton linters were used as the raw material to prepare nanocellulose crystals (NCC) via the sulfuric acid hydrolysis method. NCC was then grafted with methyl methacrylate (MMA) to obtain NCC-g-MMA. The NCC-g-MMA was dispersed into poly(methyl methacrylate) (PMMA) to fabricate the PMMA/NCC-g-MMA composites. The results indicated that the grafting modification of NCC was successful. Compared with pure PMMA, the PMMA/NCC-g-MMA composites exhibited better thermal stability. Due to the superior mechanical properties of NCC-g-MMA, a dense three-dimensional network structure could be formed within the composites, which could distribute stress and mitigate the further propagation of cracks, thereby enhancing the hardness, tensile strength, and impact strength of the composites. When the mass fraction of NCC-g-MMA was 1%, the Vickers hardness of the PMMA/NCC-g-MMA composites reached 23.3, the tensile strength reached 25.4 MPa, and the impact strength reached 25.2 kJ/m². It can be concluded that grafting modification technology is an effective method to modify the surface groups of nanocellulose and improve its compatibility with polymers. The research results provide experimental references for the modification of PMMA materials to meet practical production demands.

Keywords: Nanocellulose; Methyl methacrylate; Polymethyl methacrylate; Mechanical property

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)是一种极为重要的合成高分子聚合物, 由甲基丙烯酸甲酯(MMA)单体经加成聚合反

收稿日期 Submitted date 2025-07-21; 修回日期 Revised date 2025-09-05; 录用日期 Accepted date 2025-10-20

基金项目: 2025—2026年度江苏省职业教育研究项目(XHYBLX2025244)

联系人, 1461891813@qq.com

引用本文: 王怀英, 蔡小玲. 甲基丙烯酸甲酯改性纳米纤维素对PMMA复合材料力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 76-80.

Citation: WANG H Y, CAI X L. Effect of methyl methacrylate-modified nanocellulose on mechanical properties of PMMA composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 76-80.

应制得^[1-3]。相较于普通玻璃,PMMA 具有诸多优异性质,如透光性好、密度低、绝缘性高以及力学性能优良等^[4-7]。因此,PMMA 已在建筑材料、汽车玻璃、光学设备及医疗器械等领域得到广泛应用^[8-10]。然而,与聚碳酸酯等其他塑料相比,PMMA 存在表面硬度低、抗冲击性差等缺点,这限制其在更多领域的应用。为提升PMMA 的力学性能,研究人员通过添加不同纳米填料制备复合材料,以增强其性能^[11-14]。纳米纤维素(NCC)是一种从天然纤维素(如木材、秸秆、竹材等)中提取的纳米级生物基材料(直径1~100 nm),具有较高的化学反应活性,兼具轻质、高强、高弹性模量等特性,是一种新型生物环保材料^[15-16]。研究表明,NCC复合形成的复合材料展现出较高的热稳定性、硬度、刚性等,在建筑材料等领域具有巨大的应用潜力^[17-18]。将NCC与PMMA复合,理论上可增强复合材料的硬度和冲击强度,从而扩展其应用范围。然而,NCC在复合过程中存在一些技术难题,其表面大量的羟基极性基团导致其与PMMA相容性差,易团聚,难以均匀分散于聚合物基质中。

接枝改性技术是一种在聚合物主链上引入支链改变其性质的方法。采用接枝改性技术改变NCC表面的基团是提高其在聚合物基质中相容性的有效方法^[19]。NCC接枝改性的关键在于用聚合物链取代NCC表面羟基上的氢原子,改变NCC表面的极性键合状态,减少NCC分子中的氢键与有机相的排斥作用,从而改善其与有机相的相容性。研究表明,自由基聚合、离子聚合、原子转移自由基聚合和开环聚合等方法均可用于NCC的接枝改性^[20-22]。本文采用原子转移自由基聚合技术在NCC表面接枝MMA,以改善其与PMMA的相容性,制备PMMA/NCC-g-MMA复合材料,并探究该复合材料的力学性能。

1 实验部分

1.1 主要原料

脱脂棉,普通医用脱脂棉,浙江省台州市恒泰染织敷料有限公司;硫酸(H_2SO_4),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;MMA、二甲基亚砷、甲基丙烯酸缩水甘油酯、四甲氧基苯酚、二氯甲烷,分析纯,沃凯化学试剂有限公司;2-溴异丁酸乙酯、过氧化苯甲酰,分析纯,阿法埃莎化学试剂有限公司;盐酸,3 mol/L,国药集团化学试剂有限公司;五甲基二乙烯三胺,分析纯,伊诺凯科技有限公司;溴化铜、四氢呋喃、甲醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;抗坏血酸,分析纯,广州佳途科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

X射线衍射仪(XRD),D8ADVANCE-A25,德国Bruker/AXS公司;凝胶渗透色谱仪(GPC),1100型,美国安捷伦公司;差示扫描量热仪(DSC),DSC-2500,美国TA仪器公司;热重分析仪(TG),TG 209 F3 Tarsus,德国耐驰公司;数字式显微硬度计,HVT-1000A,迈格仪器(苏州)有限公司;电子万能试验机,UTM/CMT5105,美特斯工业系统

(中国)有限公司;冲击试验机,XJJ-5,方圆试验仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 活化NCC的制备

将脱脂棉与质量分数为40%的 H_2SO_4 以1 g:40 mL的比例置于三口瓶,将其在恒定60℃水浴中加热搅拌2 h,得到分散均匀的乳白色悬浮液。静置等待混合物分层后再倒出上层清液,将悬浮液进行离心。将离心产物重新加入去离子水反复洗涤和离心数次,直到溶液pH值无限接近7后停止。将产物以去离子水作为透析液倒入透析袋中透析,透析至液体的电导率基本不发生变化后停止,将上述产物放入真空干燥箱烘干,得到粉末状NCC。将上述NCC和一定量的二甲基亚砷放入三口瓶中,通入氮气,在65℃水浴中加热搅拌15 min。再加入适量的甲基丙烯酸缩水甘油酯、四甲氧基苯酚和浓度为3 mol/L的盐酸进行水浴加热(65℃,搅拌6 h),得到的产物加入去离子水混合后透析,透析至液体的电导率基本不发生变化后停止,最后将上述产物放入真空干燥箱烘干,得到活化的NCC。

1.3.2 NCC-g-MMA的制备

将一定量的二甲基亚砷放入三口瓶搅拌并通入氮气,按照摩尔计算比例(1.00:200.00:0.10:0.05:0.20:1.00)分别加入活化的NCC、MMA单体、溴化铜、抗坏血酸、五甲基二乙烯三胺和2-溴异丁酸乙酯投入三口瓶,进行水浴加热(30℃,搅拌9 h),停止反应后加入适量的二氯甲烷进行稀释,将液体进行离心并过滤(重复上述操作),初步得到改性的NCC,再分别用二氯甲烷、四氢呋喃和甲醇等有机溶剂洗去NCC表面所残余的反应物和副产物等杂质,得到NCC-g-MMA。

1.3.3 NCC-g-MMA/PMMA复合材料的制备

称取一定量的MMA和0.16%的过氧化苯甲酰,分别放入锥形瓶中,混合均匀,完全溶解后,加入不同含量的NCC-g-MMA(质量分数为0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%)进行水浴加热(65℃,40 min;70℃,20 min;75℃,20 min)。当体系稍显黏稠状时停止水浴加热,倒入小试管中,密封后放入烘箱(50℃,48 h),使其初步固化,然后升高烘箱温度(115℃,1 h),聚合完全后冷却脱模,制备得到PMMA/NCC-g-MMA复合材料。

1.4 性能测试与表征

XRD测试:在室温下进行,采用Cu靶 $K\alpha$ 射线(λ 为0.154 2 nm)进行衍射,测试步长为 0.013° ,衍射角度范围为 $10^\circ\sim 50^\circ$ 。

DSC测试:样品的升温速率为 $10^\circ C/min$,温度范围为60~180℃。

GPC测试:选择四氢呋喃作为溶剂,同时也为流动相,测试的标准对比样为聚苯乙烯,测试温度为30℃,样品的质量浓度为1 000 g/L,实验流速为1.0 mL/min。

力学性能测试:采用维氏硬度计在49 N载荷下测试材

料硬度。拉伸性能按 ASTM D638 标准,使用 Type I 哑铃形样条(厚度约 4 mm),以 5 mm/min 的速率进行测试。冲击强度按 GB/T 1843—2008 标准,使用带 A 形缺口的样条(80 mm×10 mm×4 mm),在 2.75 J 冲击能量下进行悬臂梁冲击测试。

2 结果与讨论

2.1 NCC-g-MMA 的结构分析

图 1 为 NCC 和 NCC-g-MMA 的 XRD 谱图。从图 1 可以看出,两个样品在 XRD 图谱衍射峰的位置基本相同,但是 NCC-g-MMA 样品的 XRD 图谱上衍射峰强度有所降低。由此可见,NCC 与 NCC-g-MMA 具有相似的结晶结构,表明接枝改性后 NCC-g-MMA 的结晶结构没有改变,但是 NCC-g-MMA 样品的结晶度相比 NCC 样品稍有降低,这与文献[21]的接枝改性实验具有相似的结果,表明 NCC 接枝成功。接枝改性后 NCC-g-MMA 样品的结晶度降低可能是因为 NCC 在接枝后破坏了部分表面结构,NCC 表面羟基部分减少而降低接枝后 NCC 的结晶度^[21]。

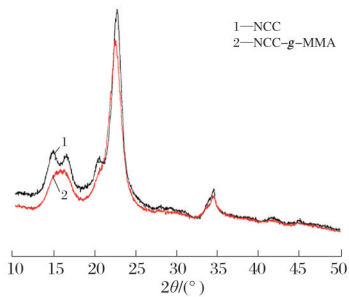


图 1 NCC 和 NCC-g-MMA 的 XRD 谱图

Fig.1 XRD patterns of NCC and NCC-g-MMA

在 NCC 接枝过程中,NCC 表面以及溶液通过催化剂利用 Cu 的络合物进行原子自由基聚合,分别发生 MMA 单体的接枝共聚反应,从而生成聚合物^[23]。而 MMA 的接枝及产物情况可以通过沉淀得到的自由聚合物 PMMA 的分子量及分布进行初步判断^[17,24],即可以测量样品的 GPC 色谱。

表 1 为 NCC-g-MMA 中 PMMA 的 GPC 结果。从表 1 可以看出,溶液中析出沉淀物的数均分子量(M_n)主要在 7 572 g/mol,重均分子量(M_w)主要在 8 708 g/mol,计算得出的分子量分布指数为 1.15。结果表明:沉淀物的分子量分布相对较窄,基本达到预设聚合度的范围。结果表明,利用再生电子转移催化剂原子自由基聚合方法能够成功将 PMMA 在 NCC 进行接枝。

表 1 NCC-g-MMA 中 PMMA 的 GPC 结果

Tab.1 GPC results of PMMA in NCC-g-MMA

样品	M_n /(g·mol ⁻¹)	M_w /(g·mol ⁻¹)	分子量分布指数
NCC-g-MMA 中 PMMA	7 572	8 708	1.15

2.2 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料热稳定性分析

图 2 为纯 PMMA 和 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的

DSC 曲线。从图 2 可以看出,纯 PMMA 的玻璃化转变温度(t_g)为 105 °C,而 NCC-g-MMA 质量分数为 1% 的 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的 t_g 升高至 124 °C,与文献[25-26]结果类似。由此可知,NCC-g-MMA 的加入使 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料具有更好的耐热性,提高了 PMMA 材料的使用温度。PMMA 是线性主体,链条之间容易发生相对运动,其 t_g 低。而将具有多支链的 NCC-g-MMA 加入 PMMA 后,酯基团氢键的作用^[27]使 NCC-g-MMA 与 PMMA 界面紧密结合,形成致密网络结构,使主体为线性的 PMMA 链段的热运动受抑制,从而有效提高复合材料的 t_g 。

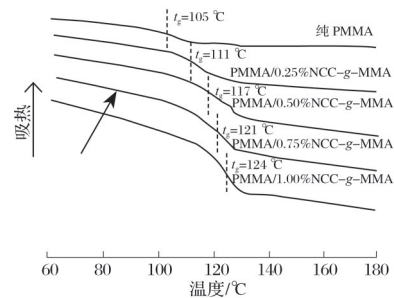


图 2 纯 PMMA 和 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的 DSC 曲线

Fig.2 DSC curves of pure PMMA and PMMA/NCC-g-MMA composites

图 3 为纯 PMMA 和 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的 TG 曲线。从图 3 可以看出,制备的 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的热分解温度依次为 323.24、376.19、392.22、410.92、401.06 °C。由此可知,PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的热稳定性随着 NCC-g-MMA 含量的增加而提高,表现出更好的耐热性,这与 DSC 的实验结果类似。这是因为 NCC-g-MMA 能够均匀分散在 PMMA 中,使 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料整体的结晶度提高。另外,NCC-g-MMA 分子中含有大量的能够形成氢键的羟基,成键能够提高 PMMA 分子间作用力^[2],使 NCC-g-MMA 与 PMMA 界面紧密结合,形成致密网络结构,提高复合材料的热稳定性。综上所述,NCC-g-MMA 的加入使 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的热稳定性提高。

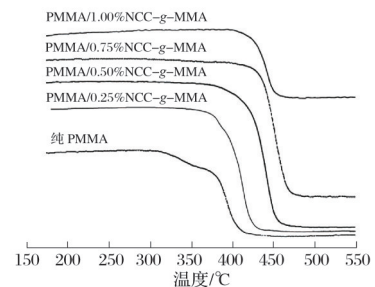


图 3 纯 PMMA 和 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料的 TG 曲线

Fig.3 TG curves of pure PMMA and PMMA/NCC-g-MMA composites

2.3 PMMA/NCC-g-MMA 复合材料力学性能分析

2.3.1 维氏硬度

图4为PMMA/NCC-g-MMA复合材料的维氏硬度和压痕曲线。从图4可以看出,纯PMMA的维氏硬度为17.5,其平均压痕深度为72.3 μm 。随着NCC-g-MMA含量的增加,PMMA/NCC-g-MMA复合材料的维氏硬度呈上升趋势,而复合材料的压痕深度随着NCC-g-MMA含量的增加而变浅。NCC-g-MMA的质量分数从0.25%、0.50%、0.75%、1.00%依次递增,此时PMMA/NCC-g-MMA复合材料的维氏硬度分别为21.3、22.5、23.1、23.3,压痕深度分别为66.2、65.1、64.5、64.2 μm 。由热分析可知,NCC-g-MMA同PMMA基体的相容性也较好,加入NCC-g-MMA后,NCC-g-MMA与PMMA形成的复合材料体内两者之间界面处的氢键结合紧密,从而改善两者之间界面相互作用,能够形成致密的立体网状结构,表现出硬度增加,压痕深度降低。此外,加入的NCC-g-MMA硬度相对较大,进一步增加了复合材料的硬度。因此,随着NCC-g-MMA含量的增加,PMMA/NCC-g-MMA复合材料的硬度变大,压痕变浅,复合材料的力学性能得到改善。

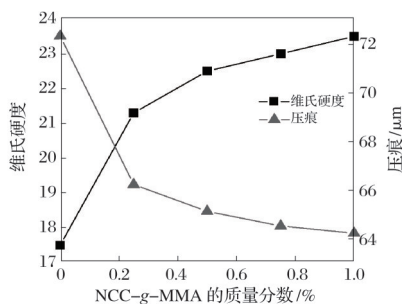


图4 PMMA/NCC-g-MMA复合材料的维氏硬度和压痕曲线

Fig.4 Vickers hardness and indentation curves of PMMA/NCC-g-MMA composites

2.3.2 拉伸强度和断裂伸长率

图5为PMMA/NCC-g-MMA复合材料的拉伸强度和断裂伸长率。从图5可以看出,NCC-g-MMA质量分数分别为0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%时,PMMA/NCC-g-MMA复合材料的拉伸强度从23.8 MPa增加至25.4 MPa,断裂伸长率从37.5%提升至43.0%。此结果与上述复合材料的硬度和压痕结果类似,复合材料的力学性能得到改善。出现该现象的原因是添加少量NCC-g-MMA至PMMA中形成复合材料时,由于处于纳米级的NCC-g-MMA样品的比表面积大,NCC-g-MMA以纳米级分散,占据在PMMA基体表面,提高与PMMA基体之间的接触面积,改善界面相互作用,增强氢键相互作用,形成更多的网状结构,从而提高了复合材料的稳定性。同时,PMMA/NCC-g-MMA复合材料受到拉伸作用时,由于NCC-g-MMA的力学性能较好,且复合材料的网状结构能够分担复合材料的应力,裂纹的进一步发展得到减缓,因此PMMA/NCC-g-MMA复合材料的拉伸性能得到

提高^[28-29]。

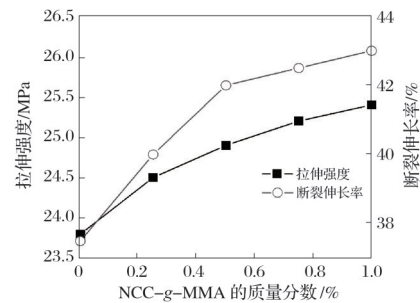


图5 PMMA/NCC-g-MMA复合材料的拉伸强度和断裂伸长率

Fig.5 Tensile strength and elongation at break of PMMA/NCC-g-MMA composites

2.3.3 冲击强度

图6为PMMA/NCC-g-MMA复合材料的冲击强度。从图6可以看出,NCC-g-MMA质量分数分别为0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%时,PMMA/NCC-g-MMA复合材料的冲击强度依次为18.2、22.1、23.8、24.7、25.2 kJ/m^2 。即随着NCC-g-MMA含量的增加,PMMA/NCC-g-MMA复合材料的冲击强度也增强。此结果同样表现出力学性能的增强。同样是因为少量比表面积大纳米级的NCC-g-MMA添加至PMMA基体表面,界面通过氢键紧密结合,改善PMMA/NCC-g-MMA复合材料界面之间的相互作用,使复合材料能够形成致密的立体网状结构。当复合材料受到冲击外力作用时,复合材料内的网状结构能够分担外在的冲击力,减缓了裂纹的进一步发展,从而增强了PMMA/NCC-g-MMA复合材料的韧性^[19]。

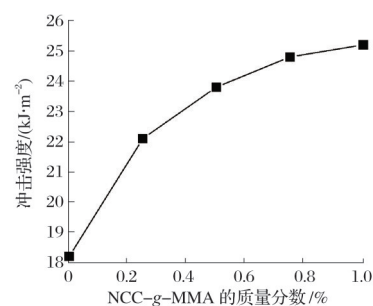


图6 PMMA/NCC-g-MMA复合材料的冲击强度

Fig.6 Impact strength of PMMA/NCC-g-MMA composites

3 结论

利用原子自由基聚合,使MMA在NCC表面自增长接枝,改善其与PMMA的相容性,制备得到PMMA/NCC-g-MMA复合材料。通过XRD、TG分析以及GPC测试分析,表明接枝产物NCC-g-MMA与NCC具有类似的结构,PMMA/NCC-g-MMA复合材料具有更高的 t_g 、更好的耐热性以及热稳定性。通过维氏硬度、拉伸强度和冲击强度等力学性能测试分析NCC-g-MMA对PMMA/NCC-g-MMA复合材料性能的影响。当NCC-g-MMA质量分数逐渐增加至1.00%时,由于NCC-g-MMA的力学性能较好,PMMA/NCC-g-MMA复合材料体内能够形成致密的立体

网状结构,能够分担应力而减缓裂纹的进一步发展。PMMA/NCC-g-MMA复合材料的硬度、拉伸强度和冲击强度均得到提高。研究表明,接枝改性技术是改善NCC表面基团、提高NCC与有机物相容性的有效方法。

参考文献

- [1] 乔冰,王帅,樊星,等.聚甲基丙烯酸甲酯发展现状及展望[J].化学工业,2024,42(3):27-34
- [2] 陈鹏旭,李佳,崔皓昱,等.甲基丙烯酸甲酯的共聚改性研究[J].化学与粘合,2024,46(4):350-352
- [3] 赵炳雄,黄技,陈志明.有机玻璃材料在海洋工程结构物的应用现状与发展趋势综述[J].机电工程技术,2023,52(9):25-30.
- [4] 陈思斌,庞文键,牛蓉.超疏水玻璃密封剂的制备及性能研究[J].山西化工,2023,43(11):9-11.
- [5] 徐国峰,吴桐,郭雷.甲基丙烯酸甲酯生产工艺研究进展[J].山东化工,2024,53(20):96-98
- [6] 王晓庆,崔健,顾一鸣,等.“一锅法”制备聚(苯乙烯-丙烯酸)共聚物改性的硅基固定相及其在混合模式液相色谱中的应用[J].色谱,2023,41(7):562-571.
- [7] 徐慧琴,李莉萍,王莉,等.高韧高光泽PMMA复合材料的制备及性能研究[J].塑料科技,2021,49(4):39-42.
- [8] MA Y, ZHAO Y N, YANG X M, et al. SaBOX/copper-catalyzed synthesis, degradation, and upcycling of a PMMA-based copolymer[J]. Macromolecules, 2023, 56(17): 7032-7042.
- [9] 康炜,刘喜军,曹卫艳,等.PMMA/DEAM-RGO纳米复合材料的制备与性能测试[J].中国塑料,2021,35(1):47-53.
- [10] BAI H, WU H L, SHEN Y Q, et al. Preparation of poly acrylamide-poly (methyl methacrylate) emulsion for enhancing the adhesion of polyester/cotton yarn[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(13/14): 3081-3093.
- [11] 李丽霞.石墨烯/PMMA和多壁碳纳米管/PMMA复合材料的热降解动力学研究[J].塑料科技,2020,48(6):33-38.
- [12] KOZŁOWSKI S, LIPÍŃSKA M, SLOUF M, et al. The implication of PMMA molecular weight on compatibility of SAN/PMMA blends containing GO-g-PMMA hybrid compatibilizers[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107393.
- [13] 朱从山,钟敏.低分子量SAN对PMMA流动性及力学性能的影响[J].塑料科技,2025,53(2):78-81.
- [14] ILCIKOVA M, GALEZIEWSKA M, KOLARIK R, et al. Influence of PMMA brushes grafted from GO on rheological properties of PMMA/SAN immiscible blend in shear and elongation flow[J]. Polymer, 2023, 279: 126015.
- [15] 唐丽荣,黄彪,戴达松,等.NCC晶体的制备及表征[J].林业科学,2001,47(9):119-122.
- [16] 卿彦,蔡志勇,吴义强,等.纤维素纳米纤维研究进展[J].林业科学,2012,48(1):145-151.
- [17] 尹焯,魏晓奕,李积华,等.天然植物纤维素的改性技术及研究进展[J].广东化工,2012,39(15):17-19.
- [18] 杨扬,康燕,蔡志楠,等.纤维素接枝反应的研究进展[J].纤维素科学与技术,2009,17(3):53-58.
- [19] 王能,丁恩勇,程时.纳米微晶纤维素表面改性研究[J].高分子学报,2006(8):982-987.
- [20] 周刘佳,叶代勇.丙烯酸单体接枝纳米纤维素晶须[J].精细化工,2010,27(7):720-725.
- [21] 王超.纤维素接枝共聚物的可控合成及性能研究[D].广州:中山大学,2009.
- [22] GUO Y, WANG X, SHENG Z. Repatation of cellulose-2-hydroxyethyl cellulose for doxorubicin delivery[J]. Journal of Baboscience and Nanotechnology, 2008, 8(5): 1-7.
- [23] 胡述锋.蔗渣纳米纤维纤维素的制备及在薄膜材料中的应用[D].广州:华南理工大学,2015.
- [24] 鲍园园,石小琴,赵军,等.秸秆纤维素接枝甲基丙烯酸甲酯的合成及其疏水性研究[J].兰州石化职业技术学院学报,2022,22(2):1-4.
- [25] 田春燕,邱磊,张静.球磨处理炭黑对PMMA复合材料性能的影响[J].塑料科技,2021,49(5):20-23.
- [26] 冯婷婷.纳米纤维素表面处理对PMMA复合材料的性能影响研究[J].塑料科技,2022,50(2):27-30.
- [27] SZYMAŃSKA-CHARGOT M, JOLANTA C, CHYLIŃSKA M, et al. Effect of ultrasonication on physicochemical properties of apple based nanocellulose-calcium carbonate composites[J]. Cellulose, 2018, 25: 4603-4621.
- [28] 周旭婷,唐武飞.高强度PMMA基复合材料的制备及在室内设计中的应用[J].塑料科技,2021,49(7):38-42.
- [29] 王雅珍,朱猛,董少波,等.玻璃纤维表面接枝聚甲基丙烯酸甲酯及其在高密度聚乙烯中的应用[J].化学世界,2021,62(4):246-250.