

综述与专论

马来酸酐功能化聚烯烃的制备及应用研究进展

姜天赐¹ 李凤红^{1*} 陈立鑫¹ 王德喜² 师 岩¹ 李鹏珍¹

(1.沈阳工业大学石油化工学院,辽阳 111003;2.博仕流体设备有限公司,辽阳 111003)

摘 要 通过聚烯烃接枝马来酸酐提高聚烯烃的极性、亲水性及在聚合物共混中的相容性。在如何提高接枝物的接枝率方面综述了聚烯烃接枝马来酸酐的制备研究进展,并着重介绍了聚烯烃接枝马来酸酐作为相容剂在可生物降解、发泡、阻燃领域的应用。

关键词 马来酸酐,聚烯烃,接枝,相容剂,应用

中图分类号 TQ317

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)07-0001-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.001

Research progress in preparation and application of maleic anhydride functionalized polyolefin

Jiang Tianci¹ Li Fenghong¹ Chen Lixin¹ Wang Dexi² Shi Yan¹ Li Pengzhen¹

(1.School of Petrochemical Engineering,Shenyang University of Technology,Liaoyang 111003;
2.Boshi Fluid Equipment Co.,Ltd.,Liaoyang 111003)

Abstract The polarity, hydrophilicity and compatibility in polymer blending of polyolefin are improved by grafting polyolefin with maleic anhydride. The research progress was reviewed in the preparation of polyolefin grafted maleic anhydride in terms of how to improve the grafting rate of grafts, and focused on the application of polyolefin grafted maleic anhydride as a compatibilizer in the fields of biodegradation, foaming, flame retardancy.

Key words maleic anhydride, polyolefin, grafting, compatibilizer, application

聚烯烃是由乙烯、丙烯、1-丁烯、1-戊烯等 α -烯烃以及某些环烯烃单独聚合或共聚合而得到的一类热塑性树脂的总称^[1]。它价格低廉、综合性能优良,被广泛应用于管材、纤维、电子器件和交通等各个生产工业领域。但聚烯烃属于非极性材料,与其他聚合物之间相容性差,导致共混制备的复合材料存在性能缺陷。例如,聚烯烃的熔点较低,在低温条件下很容易发生热变形,使产品的稳定性较差,而且还有部分出现明显结晶现象、表面能低、与其他材料之间不容易实现键合等问题,这些缺点限制了其应用范围。

目前,马来酸酐与聚烯烃接枝共聚制备功能化聚烯烃的方法最为常见,该方法简单、成本低,便于工业化生产,接枝共聚物的分子结构上含有马来酸

酐(MAH)活性较高的基团,克服了聚烯烃自身的缺陷,拓宽了其应用范围^[2]。

笔者从近几年国内外聚烯烃接枝马来酸酐的制备方法和应用两方面综述了聚烯烃接枝马来酸酐的研究现状和存在的问题,并对未来的发展趋势进行了展望。

1 聚烯烃接枝 MAH 的制备方法

1.1 溶液接枝法

溶液接枝法是将聚烯烃、引发剂、单体等全部溶于溶剂(甲苯、二甲苯等有机溶剂)中,加热搅拌反应的过程。其优点是反应温度较低、操作简单、副反应少、接枝率相对较高^[1];缺点是反应时间长、聚合物熔体黏度太大导致反应难以控制、分离步骤繁琐、使

基金项目:辽宁省高等学校基本科研重点项目(LZGD2017040);2019 省级和沈阳工业大学大学生创新创业计划项目(201950 和 2019244)

作者简介:姜天赐(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向为可降解功能高分子复合材料的制备及应用。

联系人:李凤红(1969-),女,博士,副教授,硕士研究生导师。

用的溶剂有毒、回收困难等。因此,只适用于小批量生产,一般用于实验室探索研究^[2-4]。王盼盼等^[3]将二甲苯和甲苯作为溶剂,同时加入环氧大豆油/调和油防止溶剂挥发。当质量比环氧大豆油/MAH 为 1/8,调和油/MAH 为 1/5,用二甲苯膨润 24h,加入苯乙烯(ST)后接枝率可高达 1.297%。

1.2 熔融接枝法

熔融接枝法就是所谓的“反应挤出法”,始于 20 世纪 70 年代。它是将聚烯烃、接枝单体、各种助剂加入密炼机、挤出机或者开炼机中,在特定温度下利用熔融反应制备功能化聚烯烃的方法。其优点是成本较低、反应时间短、设备简单、接枝率高等。缺点是反应温度要在聚烯烃熔点以上、副反应多等。但是共聚物的 MAH 很难均聚,接枝到聚烯烃上会造成聚烯烃主链严重退化。因此,需加入第二单体。池晓明等^[4]研究表明在聚丙烯接枝 MAH(PP-g-MAH)的制备过程中,引入第二单体苯乙烯(St)可以显著地提高接枝率和稳定性能。肖作杰^[5]采用熔融接枝法制备了聚丁烯-1 接枝 MAH,在此过程中引入共单体对甲基苯乙烯(VT),并与引入单体 St 进行比较。结果表明,不加入 VT 或 St 的情况下,MAH 与聚丁烯-1 根本无法进行接枝反应;同时,当温度为 180℃、转速为 60r/min、反应时间为 8min 时,引入共单体 VT 比单体 St 的接枝率高。许巍^[6]研究了 MAH/二乙烯基苯(MAH/DVB)官能团化接枝改性全同聚丁烯-1,用过氧化二异丙苯(DCP)作为引发剂,二乙烯基苯作为共单体。结果表明,共单体的加入可以明显地提升 MAH 的接枝率,并且在温度为 180℃、MAH/DVB 为 4:6 时,接枝率最高,为 3.4%。

在不使用溶剂和引发剂的情况下,也可以利用超声波引发物料熔融态进行接枝,这种方法在熔融接枝法改性中具有很大潜力。Ye 等^[7]实验发现,当超声波强度为 300W、MAH 质量分数为 25%、苯乙烯与 MAH 质量比约 1:1 时,其接枝率最高,为 3.34%。

1.3 固相接枝法

固相接枝法是一种非均相接枝的方法,在 20 世纪 90 年代发展起来。它是将聚烯烃粉末直接与适量接枝单体、界面活性剂、引发剂等物质接触。固相接枝法主要以 PP 接枝改性为主,其优点是高效、环保、成本低廉。其缺点是接枝率不高、易形成接枝单体(如 MAH)均聚物,反应温度在聚合物熔点以下进行,要保持混合物的流动性对搅拌的要求很高。

罗志等^[8]研究发现当 PP 为 40g、过氧化苯甲酰(BPO)为 2g、MAH 为 2.8g、四氢呋喃为 2mL、丙酮为 5mL 时接枝率最高,可达到 2.91%;但仍需要在 100℃以上进行接枝,反应时间较长。肖潇等^[9]采用了 MAH/苯乙烯双单体固相接枝法成功制备出 PP-g-MAH/St 接枝共聚物。结果表明,在反应时间为 1h、反应温度为 120℃、MAH:PP 质量比为 0.14、BPO:PP 质量比为 0.02、St:MAH 摩尔比为 1.2 时,接枝效果最好。涂琴丽等^[10]用发泡聚丙烯固相接枝 MAH。得出结论,当反应温度为 90℃、反应时间为 2h、MAH 质量分数为 20%、BPO 质量分数为 0.6%、乳化剂为 4%时,成功地在发泡 PP 分子链上形成了接枝共聚物。周开源等^[11]以二甲苯、白油和十氢萘作为界面剂,BPO 为引发剂,采用固相接枝法制备了超高分子量聚乙烯(PE)接枝 MAH。结果表明,当二甲苯为 10 份、MAH 为 3 份、BPO 为 1.2 份、反应时间为 4h、温度为 100℃时,接枝率最高,为 1.54%。近年来,研究者们通过应用紫外光、作用力、超声波等方法,对传统固相接枝法进行改进,可以大大降低接枝反应的反应时间和温度,并可以提高接枝反应的接枝效率^[2]。

1.4 预辐射接枝法

预辐射接枝法就是用高能射线照射聚烯烃,使其产生自由基,然后再与接枝单体反应形成共聚物。如,紫外光在光敏引发剂上产生光敏剂自由基,而光敏剂自由基向高分子聚合物的转移速率远远低于向小分子化合物 MAH 的转移速率,适当调节光化学反应的时间和 MAH 浓度可以有效地避免聚烯烃分子的交联,实现接枝反应中自由基之间的靶向反应。这种技术的优点是反应过程简单快速、原料少、处理量大,在材料合成和加工过程中得到广泛应用。常艳杰等^[12]采用预辐射接枝法得出,当 MAH 质量分数为 4%、反应温度为 100℃、反应时间为 4h 时,接枝率最高,为 0.67%。与未处理的 PP 相比,其晶型有所改变,接枝率明显提高。乔文静^[13]得出,当紫外光辐射时间约为 30s、二苯甲酮浓度为 0.37%、MAH 浓度为 4.8%时,接枝率最高,为 1.59%。王杨^[14]运用了 Gaussian 09 程序,以对二苯甲酮为光引发剂,在紫外光辐射条件下制备的 PE 接枝 MAH 进行计算机模拟,解释了 PP-g-MAH 的成型机理,从理论上验证了 MAH 可以在 PE 发生交联反应之前接枝到 PE 链上。

1.5 超临界 CO₂ 流体接枝法

超临界 CO₂ 流体接枝法克服了熔融接枝法接

枝率低、链降解等缺点,是一种操作与分离过程简单、扩散系数较大、无毒无污染的绿色环保方法^[2]。超临界 CO₂ 流体对大多数聚合物不溶,却可溶解多数小分子有机物和少量含硅、氟的高分子,可以使聚合物呈现出不同程度的溶胀效果,并将反应物与单体渗入到聚合物中,进行接枝改性,接枝率最高可达 5.23%。Cao 等^[15]研究了 PP-g-MAH 的反应挤出过程。结果表明,超临界 CO₂ 的存在,可以有效地抑制主链降解,双螺杆挤出机反应段的工艺温度由 190℃ 降至 160℃,且合成的 PP-g-HAM 接枝率显著提高。Kun 等^[16]设计了一种利用超临界 CO₂ 反应挤出法制备长链支化 PP 的新策略。结果表明,超临界 CO₂ 的存在显著地降低了加工温度,促进接枝和长链分支的生长,并且使改性 PP 熔体的黏度、拉伸强度增大。

1.6 悬浮接枝法

悬浮接枝法是 20 世纪末期才发展起来的一种新接枝方法,是将聚烯烃粉料、纤维或者薄膜与单体在水相中先低温混合均匀,再升高温度进行自由基接枝聚合的过程。其优点是后处理简单,副反应少,交联度较小,属于环境友好型的接枝共聚法。缺点是反应时间过长,目前无法连续化生产,接枝单体加入量不能小于基体的 5%,否则会使得接枝不均匀等。祝宝东等^[17]采用水相悬浮接枝法,制备了 MAH/St 双单体接枝 PP 共聚物。结果表明,当 PP/水/MAH/St/BPO 为 10/25/1/1/0.04 (质量比),并且在 60℃ 条件下溶胀 2h 后,在 90℃ 下反应 5h 时,接枝率最高,为 8.97%。

1.7 机械化学接枝法

机械化学接枝法是一种节能高效的合成方法,也叫做机械研磨。主要是通过强大应力场作用而诱导高聚物的分子结构发生改变。与传统的化学接枝法相比,其具有反应温度低、无需使用溶剂、经济环保等优点,在无机、有机合成,高分子材料共聚甚至成功工业化方面都具有重要意义。Zhang 等^[18]以 MAH 和 St 为接枝材料,不添加任何溶剂,利用机械化学法,在几分钟之内成功制备出多相增容剂 PP-g-(MAH-co-St)。

2 聚烯烃接枝 MAH 的应用

2.1 聚烯烃接枝 MAH 在可生物降解聚合物领域的应用

目前环境问题日益加重,石油资源日益减少,可生物降解聚合物越来越受到人们关注,空果串

(EFB)、大麻、红麻等天然纤维具有成本低、密度低、可生物降解、保温隔热等优点已取代玻璃、碳等传统纤维^[17]。然而,天然纤维天然的亲水性和热塑性材料本身的疏水性,使得二者不相容,导致界面粘结不良。使用聚烯烃接枝 MAH 作为相容剂可以改善二者的相容性。Othman 等^[19]研究表明,与未加入 PP-g-MAH 相比,加入后可使 PP/EFB 复合材料的拉伸强度从 5% 提高到 10%,EFB 纤维在 PP 基体上的分散性和附着力得到改善。Ragunathan 等^[20]研究了 PP-g-MAH 作为相容剂对 EFB 与 PP/再生丁腈橡胶(rNBR)复合材料性能的影响。结果表明,PP-g-MAH 增强了基体的附着性,并通过红外光谱证实了复合材料因酯化反应形成了 C—O—C 键,进一步说明 PP/rNBR 基体与 EFB 可以良好地融合。Techawinyutham 等^[21]实验表明,与纯 PP 相比,PP-g-MAH 加入 PP 基体后,增强了椰子纤维/PP 复合材料的拉伸强度。Kim^[22]将 PP-g-MAH 加入到纳米红麻/PP 复合材料中。结果表明,纳米红麻表面与 PP 通过形成相容界面而增加了界面附着力,提高了相容性。Affandi 等^[23]将 PP-g-MAH 作为 PP/rNBR/棕榈核壳(PKS)的相容剂。结果表明,PP-g-MAH 改善了界面附着力,提高了复合材料的相容性和热稳定性,拉伸性能提高了 10%~20%,结晶率提高,与不相容复合材料相比延伸断裂率降低了 50% 左右。

目前,除天然高分子以外的生物基可生物降解物质也备受关注。如,聚乳酸(PLA)、聚碳酸丙烯酯(PPC)等。Bai 等^[24]研究了 PLA/PP/PP-g-MAH 共混体系。结果表明 PP-g-MAH 是一种有效的相容剂,对二元共混物的黏度有稀释作用,对相形态有明显的影响,对 PLA 共混物的热变形温度(HDT)有积极的影响,提高了共混物的热稳定性。李杨等^[25]研究了 PP-g-MAH 对 PLA 流变行为及气体阻隔性的影响。结果表明 PP-g-MAH 与 PLA 基体有一定的相容性。在实验范围内,添加 20% 的 PP-g-MAH,可使水蒸汽、氧气透过系数均达到最小。Tian 等^[26]研究了以不同比例的 PP-g-(MAH-co-St)为相容剂,制备了可降解的 PPC/PP 熔喷非织造布片。实验表明适当添加 PP-g-(MAH-co-St)可以提高 PPC/PP 切片的降解速度、热分解温度和拉伸强度。

2.2 聚烯烃接枝 MAH 在阻燃材料领域的作用

很多聚合物的性能优良,但是易燃烧,因此限制了在很多领域上的应用,如 PP、PE 等。因此,需要

加入阻燃剂、增韧剂等对其进行改性。阻燃成分一般包括质量分数 50%~60% 的无机填料,用于燃烧过程中分解吸热的惰性气体。而大多数增韧剂是非极性高分子材料,因此他们与基体的相容性极差,导致性能上存在缺陷。最好的方法就是加入相容剂。金静等^[27]研究 MAH 接枝 PP 和接枝乙烯辛烯(POE)共聚物对膨胀阻燃增韧共混复合体系力学性能与阻燃性能的影响。结果表明,相容剂不仅可以使被阻燃剂引入降低的力学性能得到提升,还提高了共混物的燃烧性能。Chen 等^[28]制备了力学性能良好的导电阻燃高密度聚乙烯接枝 MAH(HDPE-g-MAH)纳米复合材料。结果表明,使用相容剂显著地改善了氧化石墨烯在 HDPE-g-MAH 基体中的界面相容性与分散性,增强了其力学性能、导电性能和阻燃性能。

2.3 聚烯烃接枝 MAH 在发泡材料方面的应用

泡沫塑料具有质量轻、成本低、隔音、抗冲击、导热率低等优点,广泛应用于包装、军事、建筑和航空航天等领域。但大多数发泡材料因熔体强度低在发泡温度下会出现发泡倍率低、泡体尺寸大、串孔等现象,所以需对其改性。一般使用聚烯烃类改性材料,但聚烯烃类分子链上没有反应性和极性基团,与发泡材料基体的相容性差,MAH 接枝聚烯烃类共聚物可以有效地解决以上问题。在发泡基体中引入接枝物,可以让两相聚合物中的官能团相互反应,不仅可以改善材料间相容性的问题,还可以显著地提高共混发泡基体的流变性能,改善了发泡材料的泡孔密度、发泡倍率和泡孔分布等。Liu 等^[29]采用微孔注射成型技术研究了聚醚酰亚胺(PEI)/PP-g-MAH 共混物的发泡行为。结果表明,加入接枝共聚物后,泡沫的孔隙率和泡孔密度均有所提高,且泡孔直径由 30mm 降至 10mm,当接枝物质量含量为 10% 时,泡沫的泡孔密度最高。Kasiri 等^[30]以 PE-g-MAH 为相容剂,采用挤出法制备 LDPE/纳米黏土复合发泡材料。结果表明,MAH 接枝 PE(MAH-g-PE)的存在,导致纳米黏土周围成核能降低,使得复合泡沫材料平均泡孔尺寸减小,但泡孔密度和微观结构均匀性增加,泡沫的阻燃性能也得到了改善。李明昆等^[31]将氢化聚苯乙烯-聚丁二烯-聚苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)接枝 MAH(SEBS-g-MAH)、自制偶氮二甲酰胺(AC)发泡剂、热塑性聚酯弹性体(TPEE)用单螺杆熔融挤出法制备发泡片材。结果表明,SEBS-g-MAH 对 TPEE 发泡片材的力学性能和表观密度有一定影响,当 SEBS-g-MAH

含量为 4 份时发泡效果最好,压缩永久形变与断裂伸长率都趋于稳定,泡孔大小、分布均匀。

聚烯烃类发泡材料属于极难降解的物质,因此,研究可降解发泡材料取代不可降解发泡材料是当今研究发泡塑料的热门话题。未来,随着科学技术的不断创新发展,石油资源日趋紧缺,要着重研究可循环、可回收、可降解的新型绿色环保多功能发泡材料。Wang 等^[32]制备了 PLA/PP-g-MAH 共混发泡体系。结果表明,PP-g-MAH 中的酸酐基团可与 PLA 基体的端羟基发生反应,形成少量具有支化结构的 PP-g-MAH 共聚物,大幅度地改变了 PLA 的熔体弹性、流变性能与热性能,对泡沫密度也有显著改善;且一定含量的 PP-g-MAH 可使高膨胀率的 PLA/PP-g-MAH 共混物泡孔形态更均匀、细化。芦涛等^[33]研究以 PE-g-MAH 为相容剂对 HDPE/木粉发泡材料的影响。结果表明,PE-g-MAH 含量为 5% 时,发泡材料的力学性能最好。王亚桥等^[34]以超临界 CO₂ 为发泡剂,PS-g-MAH 为相容剂,通过熔融共混法制备了 PS/PLA 共混发泡体系。结果表明,PS-g-MAH 接枝物的加入,可以显著地改善 PS/PLA 体系的相容性,使分散相粒径减小,其数量增多,有利于气泡成核,泡孔密度从 7.62×10^7 个/cm³ 增至 1.53×10^8 个/cm³。

3 结语

随着科学技术水平的不断发展,人们在环保方面的意识逐渐提高,像溶液接枝、熔融接枝这类对环境污染大、接枝率低的方法终将被淘汰,只适合在实验室作为研究使用。未来工业化生产中将着重应用绿色环保、接枝率高、操作简单、价格低廉的接枝方法,如超临界 CO₂ 流体接枝法、预辐射接枝法。聚烯烃接枝 MAH 共聚物作为增容剂,广泛用于 α -烯烃类与各种其他聚合物共混改性。同时,也可以应用于阻燃材料、可生物降解材料、发泡材料等众多领域。

参考文献

- [1] 许广通,马晨,张婷婷,等.马来酸酐功能化改性聚烯烃材料的研究进展[J].塑料科技,2018,46(12):123-127.
- [2] 温亦兴.马来酸酐接枝聚丙烯的改性方法及其应用[J].广州化学,2013,38(2):77-82.
- [3] 王盼盼,韩龙,王莉,等.高接枝率聚丙烯接枝马来酸酐的制备[J].塑料工业,2018,46(9):35-38.
- [4] 池晓明,游华燕,匡俊杰,等.双单体接枝聚丙烯的制备研究[J].塑料工业,2012,40(9):52-56.

- [5] 肖作杰.马来酸酐/对乙烯基甲苯官能团化改性聚丁烯-1 的研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
- [6] 许巍.马来酸酐/二乙烯基苯官能团化改性聚丁烯-1 的研究[D].青岛:青岛科技大学,2016.
- [7] Ye Y, Qian J, Xu Y. Ultrasonic induced grafting of maleic anhydride onto polypropylene in melt state[J]. Journal of Polymer Research, 2011, 18(6): 2023-2031.
- [8] 罗志, 李化毅, 张辽云. 超细聚丙烯固相接枝马来酸酐用作相容剂的研究[J]. 石油化工, 2017, 46(6): 731-738.
- [9] 肖潇, 郑玉婴, 卢鑫, 等. 双单体固相接枝聚丙烯的制备与应用[J]. 中国塑料, 2019, 33(6): 31-37.
- [10] 涂琴丽, 周建萍, 许文英, 等. 马来酸酐乳液固相接枝发泡聚丙烯泡沫的研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(2): 47-50.
- [11] 周开源, 董淑强, 钱天语, 等. 超高分子量聚乙烯固相接枝马来酸酐的研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4): 7-11.
- [12] 常艳杰, 张德文, 杨帅, 等. 聚丙烯熔融接枝和预辐射接枝马来酸酐的比较[J]. 塑料工业, 2016, 44(6): 41-45.
- [13] 乔文静. 紫外光辐照聚乙烯接枝马来酸酐的制备及其光化学原理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [14] 王杨. 紫外光辐照极性分子接枝聚乙烯反应的理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [15] Cao K, Shen Z C, Yao Z, et al. New insight into the action of supercritical carbon dioxide for grafting of maleic anhydride onto isotactic polypropylene by reactive extrusion[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(5): 1621-1626.
- [16] Kun W, Wang S S, Fei W, et al. A new strategy for preparation of long-chain branched polypropylene via reactive extrusion with supercritical CO₂ designed for an improved foaming approach[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(5): 2705-2715.
- [17] 祝宝东, 王鉴, 冉玉霞. 聚丙烯水相悬浮接枝双单体苯乙烯和马来酸酐[J]. 现代塑料加工应用, 2009, 21(5): 9-11.
- [18] Zhang Y L, Guo Z F, Zhang L M, et al. Mechanochemistry: a novel approach to graft polypropylene with dual monomers [PP-g-(MAH-co-St)] [J]. Polymer Bulletin, 2015, 72(8): 1949-1960.
- [19] Othman N S, Santiagoo R, Zainal M, et al. Tensile and morphological studies of polypropylene/empty fruit bunch composite; effect of maleic anhydride-grafted polypropylene[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 429(1): 1-7.
- [20] Ragunathan S, Nurul S O, Abdillahi K M, et al. Effect of maleic anhydride-grafted polypropylene on polypropylene/recycled acrylonitrile butadiene rubber/empty fruit bunch composite[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2018, 24(3): 275-280.
- [21] Techawinyutham L, Frick A, Siengchin S. Polypropylene/maleic anhydride grafted polypropylene (MAGPP)/coconut fiber composites[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(5): 1-9.
- [22] Kim K J. Modification of nano-kenaf surface with maleic anhydride grafted polypropylene upon improved mechanical properties of polypropylene composite[J]. Composite Interfaces, 2015, 22(6): 433-445.
- [23] Affandi R D, Ragunathan S, Ismail H, et al. A study on mechanical and thermal properties of polypropylene/recycled acrylonitrile butadiene rubber/palm kernel shell composites with maleic anhydride grafted polypropylene as compatibilizer[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2018, 24(51): 125-132.
- [24] Bai Z, Qiang D. Rheology morphology crystallization behaviors mechanical and thermal properties of poly (lactic acid)/polypropylene/maleic anhydride-grafted polypropylene blends[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(3): 959-969.
- [25] 李杨, 周琴, 马智慧, 等. PP-g-MAH 对聚乳酸流变行为和阻隔性能的影响[J]. 塑料科技, 2018, 46(7): 81-85.
- [26] Tian Z, Pan L S, Pan Q. Polypropylene grafted with maleic anhydride and styrene as a compatibilizer for biodegradable poly(propylene carbonate)/polypropylene [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14: 1-9.
- [27] 金静, 王昊, 舒中俊, 等. 两种马来酸酐接枝物对膨胀阻燃聚丙烯增韧共混复合体系性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(3): 219-225.
- [28] Chen Y, Yao J, Xu M K, et al. Electrically conductive and flame retardant graphene/brominated polystyrene/maleic anhydride grafted high density polyethylene nanocomposites with satisfactory mechanical properties[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2019, 37(5): 509-517.
- [29] Liu T, Chen Z, Lei Y, et al. Foaming behaviors of polyetherimide/polypropylene-graft-maleic anhydride blends in the microcellular injection molding process[J]. Journal of Cellular Plastics, 2015, 51(4): 387-400.
- [30] Kasiri A, Rezaei M, Zandi F. The effect of polyethylene graft maleic anhydride compatibilizer on the physical, mechanical, and thermal properties of extruded noncross-linked low-density polyethylene nanocomposite foams[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(11): 1537-1549.
- [31] 李明昆, 苑会林, 王新星. 马来酸酐接枝 SEBS 对热塑性聚酯弹性体发泡性能的影响[J]. 中国塑料, 2012, 26(4): 72-76.
- [32] Wang X, Liu W, Li H, et al. Role of maleic anhydride-grafted polypropylene in supercritical CO₂ foaming of poly (lactic acid) and its effect on cellular morphology[J]. Journal of Cellular Plastics, 2016, 52(1): 37-56.
- [33] 芦涛, 沈烈, 方征平. 马来酸酐接枝聚乙烯对高密度聚乙烯/木粉发泡材料泡孔形态及力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(3): 27-30.
- [34] 王亚桥, 江翰川, 霓敬越, 等. 马来酸酐接枝 PS 对 PS/PLA 共混体系发泡行为的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(2): 35-39.

收稿日期: 2019-12-02

修回日期: 2020-04-20