聚丙烯接枝改性的应用研究进展

方烁涵，左子康，吕鹏飞*

（江南大学纺织科学与工程学院，江苏 无锡 214000）

摘　要：在传统聚丙烯（PP）原料严重过剩的背景下，对PP进行改性逐渐成为当前的研究热点。接枝改性可赋予PP多样化功能。文章综述现有化学接枝PP的方法及接枝改性后PP性能的变化，介绍改性PP材料在电力电缆、储能薄膜、医用无纺布、相容剂、偶联剂等传统领域的应用，概述现有接枝PP的绿色处理工艺，最后对未来PP材料的发展前景进行展望。

关键词：聚丙烯；接枝改性；接枝技术；绿色工艺

中图分类号：TQ325.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）09-0193-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.034

Application Research Progress of Graft Modification of Polypropylene

FANG Shuohan, ZUO Zikang, LÜ Pengfei*

(School of Textiles and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

Abstract: Against the backdrop of a severe surplus of conventional polypropylene (PP) raw materials, the modification of PP has gradually become a research hotspot. Graft modification can endow PP with diverse functionalities. The article reviews the existing chemical grafting methods for PP and the changes in the properties of PP after graft modification. It introduces the applications of modified PP materials in traditional fields such as power cables, energy storage films, medical nonwovens, compatibilizers, and coupling agents. The existing green processing technologies for grafted PP are summarized. Finally, the future development prospects of PP materials are discussed.

Keywords: Polypropylene; Graft modification; Grafting technique; Green technology

聚丙烯(PP)是由丙烯单体聚合而成的一种热塑性树脂，按立体规整性可分为等规PP(iPP)、间规PP(sPP)和无规PP (aPP)[1]。该材料具有密度小、刚性好、强度高、化学稳定性良好、加热可塑化等优点，已广泛应用于家电、汽车、日用品及包装材料等领域[2-3]。目前，国内PP的供应市场趋于饱和，原料严重过剩，通用料占比过高，而高端专用料(如汽车轻量化用改性PP、高压电缆绝缘PP)缺口较大。PP正向差异化、精细化、高端化方向发展，PP改性处理成为当前研究热点[4]。PP改性方法主要包括物理改性和化学改性[5-6]。其中，对PP的化学接枝改性是将适当极性的支链引入PP分子链，能够显著改善PP性能，同时还可能获得新的物化性质，显著提高极性、抗冲击性和热学性能等[7]。常见PP化学接枝方法包括熔融接枝、溶液接枝、悬浮接枝、固相接枝、辐照接枝等。接枝改性的PP及其衍生物可应用于高压电缆绝缘材料、复合材料关键助剂、生物医学工程、功能化薄膜等领域。本文系统对比5种主流PP接枝方法，整合其在电力、医疗、包装等多领域的应用突破，提出绿色接枝工艺，展望未来发展方向。

1　接枝体系与反应机理

1.1　接枝单体

含功能基团的常见单体主要包括以下几类：以马来酸酐(MAH)[8]、丙烯酸(AA)等为代表的含羧基单体；以甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)为代表的含环氧基单体；以丙烯酰胺(AM)为代表的含氨基或酰胺基的单体；以甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)为代表的含羟基的单体。

1.2　引发体系

有机过氧化物类：在引发体系中，有机过氧化物类引发剂应用广泛，例如热分解引发剂过氧化二异丙苯(DCP)、过氧化苯甲酰(BPO)等。

辐照引发体系：该体系不需要外加引发剂，利用高能辐射直接破坏PP分子链的C—H键或C—C键，形成PP链自由基，进而引发接枝反应。

收稿日期Submitted date 2025-09-12；修回日期Revised date 2025-10-08；录用日期Accepted date 2025-11-10

*联系人，pengfeilv@jiangnan.edu.cn

引用本文：方烁涵，左子康，吕鹏飞．聚丙烯接枝改性的应用研究进展[J]. 塑料科技，2026，54(9)：193－198.

Citation：FANG S H, ZUO Z K, LÜ P F. Application research progress of graft modification of polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 193-198.

光引发体系：该体系用光引发剂吸收特定波长的光能(主要为紫外线，波长200~400 nm)，然后被激活，生成自由基或阳离子，进而引发PP接枝反应。该体系反应条件温和，在室温下即可进行。

1.3 反应机理

自由基接枝机理包括以下阶段：(1)链引发：初级自由基夺取PP链上的叔氢原子，形成PP大分子自由基。(2)链增长：单体与PP大分子自由基结合，发生接枝反应。“PP-单体”自由基(PP-M·)继续与更多单体反应，使接枝侧链不断延长，形成长链结构。单体浓度越高，反应时间越长，接枝链就越长(接枝率越高)。(3)链终止：自由基活性消失后反应终止，形成稳定的接枝PP (PP-*g*-单体)，终止方式分为偶合终止与歧化终止。

接枝过程伴随多种副反应。PP大分子自由基的β-断裂，致使分子量下降与降解；单体均聚反应生成均聚物；引发剂在高温或杂质存在下可能发生无效分解，即未参与自由基生成或转移，而经其他路径消耗，导致引发效率降低。

2 PP接枝方法

目前，接枝PP的方法主要包括熔融法、溶液法、辐射法、固相法、悬浮法等[9]。表1为PP的接枝方法。

表1 PP接枝方法的分类

Tab.1 Classification of polypropylene grafting methods

项目	宏观特征	反应温度	副反应	溶剂用量	反应时间	后处理	生产方式
熔融接枝	非均相整体改性	高于聚合物熔点	较多	无	较短	难	连续式生产
溶液接枝	均相整体改性	低于溶剂熔点	较少	较多	较长	较难	间歇式生产
辐射接枝	非均相局部改性	低于聚合物熔点	少	无	较短	较易	间歇式生产
固相接枝	非均相局部改性	低于聚合物熔点	较少	无	较长	较易	间歇式生产
悬浮接枝	非均相局部改性	低于水沸点	较少	较少	较长	较易	间歇式生产

2.1 熔融接枝

熔融接枝是利用反应挤出实现化学接枝的方法。其反应机理是在双螺杆挤出机中实现连续反应，该方法兼具经济性、环境友好性与高效性。反应过程为：首先，引发剂在180~220 ℃下分解为初级自由基，如·OH或·$OOCCH_3$；初级自由基攻击PP主链上的叔氢原子，生成PP大分子自由基·PP；然后PP与极性单体(如MAH、GMA)发生加成反应，形成接枝链(PP-*g*-MAH)；未反应的·PP易发生β-断裂(主链断裂生成小分子链)或双基偶联(交联)，导致PP降解或凝胶化。反应过程中动力学调控需要关注以下关键因素：温度方面，每升高10 ℃，引发剂分解速率提升2~3倍(如DCP在190 ℃时半衰期为1.0 h，210 ℃时半衰期缩短至0.2 h)，但温度过高会加剧PP降解；单体与引发剂的物质的量比方面，当该比值控制在50~100时，接枝效率最高，可有效避免单体自聚。常见的接枝单体大多数为有极性、热稳定性好的小分子化合物，如MAH、HEMA、GMA等[10]。

熔融接枝的显著优势在于规避复杂工序，有效降低环境污染风险。此外，该方法可直接利用密炼机、单/双螺杆挤出机等常规聚合物加工设备实施，生产效率显著提升，具备实现连续化生产及工业化应用的潜力[10]。该方法对大多数聚烯烃均适用，非常适合解决PP因自身非极性结构所导致的相容性差等问题。然而，熔融接枝法通常在PP熔点以上进行，导致PP降解严重，同时伴随接枝单体自聚产生凝胶，进而降低支化效率。这两点是熔融接枝生产工艺上亟待解决的难点。

针对熔融接枝副反应难以控制、PP降解与单体自聚问题，现有研究提出两类解决方案。(1)新型单体体系：季显丰等[11]利用自主合成的两种具有不同双键官能团反应活性的接枝单体——丙烯酸烯丁酯(BAC)、1-(烯丁氧甲基)-4-乙烯基苯(BMVB)，在过氧化物引发剂作用下熔融接枝长链支化PP(LCB-PP)，利用光散射信号计算样品。结果表明，峰值分子量从3.16×10^5 g/mol最高可上升至459×10^5 g/mol，抑制PP降解效果良好；对比加入相同浓度接枝单体情况，BMVB的接枝率高于BAC的接枝率。吴航等[12]在马来酸酐接枝聚丙烯(PP-*g*-MAH)制备过程中分别添加3种聚乙烯(PE)，混合均匀后经双螺杆挤出机挤出造粒。研究发现，在PE添加量为4%时，加入高密度聚乙烯PE-HD的产物接枝率最高提升0.14%。(2)助剂协同效应：谢海生等[13]先采用反应性熔融挤出法制备PP-*g*-MAH，之后将含有双键的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)与苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SIS)应用于PP-*g*-MAH中。结果表明，添加充油SBS或充油SIS均能够显著改善PP-*g*-MAH的性能。进一步对比分析发现，充油SBS对提升熔体流动速率的效果更为显著，而充油SIS在提高接枝率与降低挥发分含量方面更具优势。两者的添加可协同增效，获得综合性能最优的改性材料。

熔融接枝PP应用广泛，例如PP-*g*-MAH这类含强极性官能团的产品，与铝材、钢材等金属进行黏接时能获得较高剥离强度，因此可作为层压材料或用于制备金属多层复合膜。采用熔融接枝极性单体能够提升PP的极性与表面亲水性，由此制成的农用膜表面会形成亲水层，进而具备永久防雾滴性能，材料的染色性、吸湿性、抗静电性及机械性能等也随之提升。此外，当PP分子链中部分叔氢原子被取代后，其接枝产物的耐热性能也会相应增强[14-15]。在制作高效阻燃剂方面，孙凌刚等[16]加入自制的氮膦协效反

应型阻燃剂与乙烯基硅烷偶联剂，对PP熔融接枝进行改性，极限氧指数(LOI)最高可达40.7%，远高于普通PP。

2.2 溶液接枝

溶液接枝采用溶剂溶胀PP实现均相接枝，其机理特点为：溶剂(如三氯甲烷、甲苯)渗透PP无定形区，使分子链舒展，初级自由基(如偶氮二异丁腈分解产生的·CN)可均匀攻击叔氢，接枝链分布更均一。动力学核心是溶剂极性调控。极性溶剂(如三氯甲烷)可提升偶氮二异丁腈的引发效率，使接枝率较非极性溶剂(甲苯)高20%~30%。

溶液法使PP在溶剂中充分溶解或溶胀，接枝均匀性优异，相比熔融接枝法，溶液法拥有更高的接枝率。在反应可控性方面，溶液法可以调控单体浓度、引发剂用量、反应温度和时间等参数，减少副反应的产生，提高接枝效率。王旭东[17]以马来酸二甲酯(DMM)为接枝单体、三氯甲烷为溶剂、偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂，采用溶液法在不同条件下对氯化PP(CPP)进行接枝改性研究。结果表明，在反应温度为63 ℃、反应时间为8 h、m_{DMM}∶m_{CPP}为0.22、m_{AIBN}∶m_{CPP}为0.06的条件下，DMM的接枝效率为20.94%，CPP-*g*-DMM的接枝率为3.77%。

溶液接枝PP应用广泛。黄荣成等[18]以十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为改性剂，以γ-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)为偶联剂，采用溶剂法制备改性蒙脱土复合PP薄膜。结果表明，添加5%改性蒙脱土的PP复合材料抗冲击性能优于其他添加量，平均冲击强度从1.601 kJ/m^{2}提高至8.610 kJ/m^2。ZANG等[19]运用溶液接枝法，采用马来酸酐改性废弃PP口罩，合成新型原油流改进剂，将其命名为MPP。结果表明，在30 ℃时，PP与马来酸酐物质的量比为1∶2时的杨楼油样黏度降低92.48%，凝点降低4.2 ℃。

然而，与可借助挤出机连续生产、反应时间仅数分钟的熔融接枝相比，溶液接枝多为间歇式反应，反应时间通常长达数小时，生产效率较低，难以满足大规模工业化生产需求。此外，在工业化生产中，溶液接枝虽接枝率较高，但受限于有机溶剂后处理带来的成本及环境问题，其发展受到制约。提升反应效率、优化反应条件、改进有机溶剂后处理工艺等措施，对推动其发展具有重要意义[20]。

2.3 辐照接枝

辐照接枝法利用高能辐射(如加速电子束、^{60}Co、γ射线、等离子体或紫外线等[21])诱导PP分子链断裂，产生自由基，引发接枝反应。该技术表面选择性突出，辐照效应集中于PP表层，可抑制本体降解及单体残留，引发效率高，反应速率快，副产物少，但应用成本相对较高。按工艺划分，PP辐照接枝主要分为预辐照接枝法、共辐照接枝法[22]及电子束辐照。

2.3.1 预辐照接枝法

预辐照接枝是利用高能射线(如γ射线、电子束)对高分子材料(如PP、PE等)进行预处理，使其产生活性自由基，随后与单体发生接枝反应，达到改性目的。预辐照接枝法具有以下优势：反应条件要求较低，能够实现化学法难以完成的接枝反应；射线引发反应，无须添加引发剂，所得接枝共聚物除单体均聚物外纯度较高；操作简便，辐照与接枝为两个独立环节，互不干扰，便于研究人员和生产部门开展工作；接枝反应过程中单体不直接受辐照，可减少单体均聚反应，有利于控制均聚物生成[23]。LIU等[24]利用^{60}Co源预辐照诱导反应性共混，制备PP/PB/PAM共混物，表面过氧化物在60 ℃下分解产生自由基，引发接枝反应，自由基耗尽后反应终止。单体具有自由基清除功能，可以抑制热降解。该“固态接枝”工艺能够抑制热降解，原位生成的接枝PP在熔融分散中起增容作用，促进组分分散。

2.3.2 共辐照接枝法

共辐照接枝法对PP和单体表面同时照射高能射线，使二者各自生成相应自由基，进而引发接枝反应[21]。与预辐照接枝法相比，共辐照法的反应过程更直接、简单，自由基参与接枝反应的比例更高，接枝率更易提升。在工业上，共辐照接枝法将“辐照产生活性自由基”与“自由基与单体接枝反应”两个步骤合并为一个连续过程，适合连续化生产，降低操作复杂度，减少人为误差，提高生产效率。

詹杰等[25]以共辐射诱导方法将GMA接枝到PP非织造布上，采用乙二胺(EDA)进行化学改性，合成新型胺类材料PP-*g*-GMA@EDA。结果表明，在pH值为4时，该材料对初始浓度为0.87 mg/g的Ag·Nps吸附效率达到100%，最大吸附容量为101.44 mg/g。AABIDIN等[26]以PP废料为基体，合成偕胺肟基吸附剂，采用共辐射接枝法在10 kGy辐照剂量下制备PPw-*g*-AO-10。研究表明，吸附剂用量为30 g/L时，铁去除效率达到96.46%。值得注意的是，该技术采用回收PP，可在降低生产成本的同时保持良好性能，具有良好的生产效益。

2.3.3 电子束辐照接枝法

电子束辐照接枝法以高能电子束为辐照源，引发聚合物基材与单体发生接枝共聚反应。其核心在于电子束能量激发基材分子链产生活性位点(如自由基、离子等)，进而引发单体在这些位点聚合，形成接枝链，最终实现基材表面或本体性能的改性。该技术具有工艺简单、快速高效、污染小等优点[27]。

YUAN等[28]发现，衣康酸酐(2.5%~10.0%)接枝PP在120 ℃时仍保持优异的电绝缘性能，接枝的衣康酸酐依靠强静电引力捕获自由载流子，抑制电荷注入和传输，改善聚合物的高温电性。ZHONG等[29]利用30 kGy电子束辐照将聚苯乙烯(PS)接枝到PP基质上，进一步增强PP的储能性能，图1为PP-*g*-PS的制备工艺。研究发现，与纯PP(2.1 J/cm^3)相比，接枝质量分数为8%的PP-*g*-PS薄膜在室温下的放电能量密度达到5.43 J/cm^3；在110 ℃时，最佳的PP-*g*-PS(8%)薄膜放电能量密度达3.44 J/cm^3，较纯PP薄膜

(1.78 J/cm^3)提高93%。ZHAO等[30]利用电子束辐照对商用PP隔膜进行接枝改性，形成良好的阳极/隔膜界面，这使钠||钠对称电池在1 mA/cm^{2}和1 mAh/cm^{2}的条件下循环寿命可延长至5 519 h。这表明采用简便的电子束辐照对聚烯烃隔膜进行特定改性能够构建稳定的电极/隔膜界面，显著提升钠金属阳极性能。这种高效策略有望提升除钠金属电池之外的各种电池系统的性能。

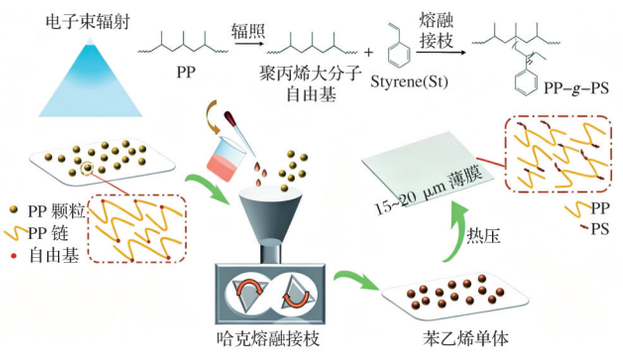


图1 PP-*g*-PS薄膜的制备工艺

Fig.1 Preparation process of PP-*g*-PS film

2.4 固相接枝

固相接枝先将PP、接枝单体、引发剂等原料混合，再置于反应釜中升温完成接枝反应。由于反应温度不高，PP始终保持固态，有助于减少副反应发生。固相接枝法具有操作压力低、无回收溶剂、后处理简便、高效节能、设备与生产工艺简单等优点。但固相接枝本质是表面受限反应，接枝反应多发生在固体表面、分子内的无定形区域以及晶格缺陷部位。因此，该方法主要适用于表面改性或PP颗粒改性。用于PP颗粒时，PP为粉状且粒径越小时，接枝率较高[31-32]。与辐照接枝相比，固相接枝法通常在较低温度(低于单体或基材熔点)和惰性气氛中进行，不需要高能辐射，因此能够有效避免高分子主链因辐照引发的断链、交联或氧化降解问题，尤其适用于对辐射敏感的材料。刘太闯等[33]基于固相接枝制备高熔体强度PP，所得材料适用于PP发泡领域。祝萌等[34]在固相接枝MAH的同时进行微波诱导，在不添加引发剂的情况下加入第二单体苯乙烯，最高接枝率达到1.4%，同时亲水性能得到大幅改善，随着MAH含量的增加，表面水接触角从125.4°降至95.0°。除了微波诱导之外，比较常见的固相接枝引发方式还包括热引发、光引发、等离子体引发等，但不论引发方式如何，应始终将开发绿色环保的生产方法置于首位。

2.5 悬浮接枝

悬浮接枝是将PP悬浮在含单体和引发剂的水相中，在90~95 ℃条件下借助固液界面完成接枝[20]。悬浮接枝优势在于其环境友好性。与依赖有机溶剂的其他接枝方法不同，悬浮接枝在水相中进行，从根本上避免使用有机溶剂。在充分分散的PP颗粒中，单体可渗透至颗粒内部进行深度接枝，接枝率可达1.5%~3.0%，接枝分布均匀。

XIE等[35]优化双引发、连续悬浮接枝过程，制备新型纤维吸附剂。结果表明，最佳改性条件为界面剂质量分数3.5%、分散剂质量浓度8 mg/L、单体含量80%、m_{AA}∶m_{MAH} 0.8、搅拌速度1 000 r/min，130 ℃下先用3.5%引发剂DBPH接枝3 h，然后90 ℃下用1.0%引发剂BPO接枝2 h。此时，PP-*g*-AA-MAH的接枝率高达31.2%。孙立科等[36]利用水相悬浮聚合法，以丙烯酸丁酯(BA)为接枝单体，以聚丙二醇二甲基丙烯酸酯(PPGDMA)为交联剂，以过氧化苯甲酰为引发剂，制备PP与BA和PPGDMA的接枝共聚物。结果显示，接枝率达30.0%，接枝效率为94.0%~99.0%。为提高功能化PP的电学性能，ZHANG等[37]使用水悬浮接枝法将4-甲基苯乙烯接枝到PP上，接枝比为0.88%的改性PP显示出最佳的空间电荷抑制效果，体积电阻率和击穿强度均较高。但连续化悬浮接枝技术尚不成熟，对设备要求高，实现连续化生产依旧任重道远。

3 接枝PP的性能与应用

传统PP具有较好的物理化学性质与出色的综合性能[38]。在此基础上，运用不同接枝方式，选取不同单体对PP进行接枝改性，能够弥补传统PP的性能短板，从而应用于高端制造、新能源、电子信息等新兴领域。

3.1 基于“电学性能优化”的应用

3.1.1 PP电力电缆绝缘材料

近年来，PP绝缘电力电缆因其优异的高温电气性能和环境友好属性得到大力发展和推广应用[39]。然而，PP结晶度高，刚性大，柔韧性差，机械韧性不佳，必须对其进行改性方可在电力电缆领域应用[40]。WANG等[41]在水相溶剂环境中对PP进行化学双接枝处理，PP-*g*-MA/AA的总接枝率约为85%，材料的体积电阻率数量级与直流击穿强度明显提升。这表明双接枝改性PP电学性能优异，可应用于高压电缆绝缘领域。HUANG等[42]开发出新型水相接枝PP绝缘材料，新型水相接枝PP具有优越的热性能和机械灵活性，优于传统的PE材料，其电性能与交流/直流击穿强度明显提高，空间电荷积累明显受到抑制。这表明接枝PP非常适合应用于高压电缆系统，可为研发更高电压等级的下一代可回收PP电缆奠定基础。PP绝缘电缆在国内市场依旧有较大空白，对PP绝缘中压电力电缆的绿色环保开发有良好的发展前景[43]。

3.1.2 PP储能薄膜

罗兵等[44]采用电子束辐照接枝法开发高性能的PP基介电薄膜。该薄膜可有效抑制泄漏电流，明显提高能量密度。

3.2 基于“机械性能提升”的应用

MEHTA等[45]采用新型γ射线诱导接枝聚合技术将丙烯酸接枝到非织造PP(NWPP)织物上，图2为Ag NP-(NWPP-*g*-AA)织物合成涉及的反应机理。制备出的织物柔韧性好，机械强度优异，抗菌活性持久，可作为伤口敷料材料。

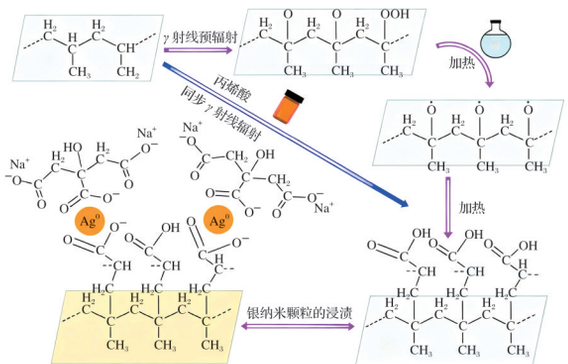


图2 Ag NP-(NWPP-*g*-AA)织物合成涉及的反应机理

Fig.2 Reaction mechanism involved in fabric synthesis of Ag NP-(NWPP-*g*-AA)

3.3 基于“界面相容性提升”的应用

3.3.1 相容剂

BELHAOUES 等[46]将环氧天然橡胶、ENR/PP-*g*-MA以1∶1的质量比混合，将其作为相容剂用于天然橡胶/PP(NR/PP)热塑性弹性体(TPE)。研究发现，该混合物相容性良好，储存模量显著提高。YAO 等[47]选择高效、低气味的引发剂L101，结合自由基捕获剂α-甲基苯乙烯(AMS)成功制备相容剂衣康酸酐接枝聚丙烯(ITA-*g*-PP)，其接枝率可达1.45%，在小麦纤维/PP复合材料中添加ITA-*g*-PP可使冲击强度最高提升29%，而添加MAH-*g*-PP仅提升17%。SHAFAATTALAB 等[48]将MAH-*g*-PP作为相容剂，增加PP基体与丁苯橡胶液滴之间的界面黏附力。结果表明，同时采用相容剂和动态硫化可以产生协同效应，提高样品的机械性能，使断裂伸长率显著增加70%，拉伸强度增加31%。

3.3.2 偶联剂

AGGARWAL 等[49]采用m-异丙烯基-α-α-二甲基苯基异氰酸酯(m-TMI)接枝PP作为偶联剂，制备黄麻纤维填充的PP复合材料。傅里叶变换红外光谱分析表明，偶联剂有效促进黄麻纤维与PP之间的偶联。HWANG 等[50]将MAH-*g*-PP作为偶联剂，喷雾干燥的纤维素纳米纤维(SDCNFs)作为增强材料复合至PP基体。结果表明，与纯PP相比，在PP基质中添加质量分数为10%的SDCNFs和MAPP后，拉伸强度、拉伸模量、弯曲强度、弯曲模量及冲击强度均显著提高。

4 接枝PP的绿色工艺

4.1 等离子体处理

杜宣萱等[51]将等离子体处理与接枝聚合相结合，有效增强多巴胺在光滑PP纤维表面的附着力，显著改善纤维膜的润湿性。LI 等[52]利用熔体静电纺丝法和自主研发的新型技术制备PP膜和抗菌PP膜。所制PP膜具有较高的细菌杀灭率和优异的附着力和耐洗性。超声处理30 min后，物理涂层样品已失去抗菌效果，等离子体接枝样品仍保持91.67%杀菌率。

4.2 连续化绿色设备

开发“微波-挤出”联用设备，可将固相接枝与连续生产结合，产能达500 kg/h，能耗较传统熔融接枝降低30%，目前已在国内某企业试点应用[53]。

5 结论

采用接枝改性方法可以赋予PP材料新的特性，从而扩大其在高性能电力电缆绝缘层、储能薄膜、医用无纺布以及高效相容剂、偶联剂等领域的应用范围。未来，应从深度交叉融合与协同创新角度针对接枝PP的绿色工艺进行深入研究。核心目标在于开发新一代高效、环保、可控的接枝改性技术，如新型引发体系、绿色溶剂工艺、等离子体/辐照接枝等。通过接枝改性和绿色工艺有望系统性解决国内传统PP产能的结构性过剩问题，驱动PP材料产业向更高端、更功能化、更绿色可持续的方向转型升级。

参考文献

[1] FANG Y, DENG Y, LAO S, et al. Effect of stereoregularity and grafting monomers on dielectric constant of polypropylene[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021. Conference Hybrid, Xi'an, China: IET, 2022.

[2] 李花, 姚云, 高莹, 等. 中国聚丙烯市场现状及发展趋势[J]. 中外能源, 2022, 27(10): 63-69.

[3] LANGSTON J, DONG J Y, CHUNG T C. One-pot process of preparing long chain branched polypropylene using C_2-symmetric metallocene complex and a "T" reagent[J]. Macromolecules, 2005, 38(14): 5849-5853.

[4] 颜安, 翁长永, 刘毓敏. 聚丙烯改性技术及其产品应用进展[J]. 现代化工, 2022, 42(S2): 58-61.

[5] 李升. 聚丙烯抗老化改性研究进展[J]. 山东纺织科技, 2019, 60(3): 53-56.

[6] 赵明儒. 聚丙烯改性[J]. 中国塑料, 1989(2): 69-77.

[7] LUNAC B B, SILVA BARBOSA FERREIRA EDA, SIQUEIRAD D, et al. Additivation of the ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) with maleic anhydride (MA) and dicumyl peroxide (DCP): The impact of styrene monomer on cross-linking and functionalization[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(9): 7323-7346.

[8] DE ROOVER B, SCLAVONS M, CARLIER V, et al. Molecular characterization of maleic anhydride-functionalized polypropylene[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1995, 33(5): 829-842.

[9] 王崧合. 选择性加热固相接枝法及其在聚丙烯功能化方面的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.

[10] 王丽丽, 刘超, 郑方远. 聚合物熔融接枝技术研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2023(1): 60-66.

[11] 季显丰, 邱健, 李明罡, 等. 利用非对称结构接枝单体调控聚丙烯熔融自由基支化反应[J]. 高分子学报, 2018, 49(5): 588-597.

[12] 吴航, 李春, 邱子跋, 等. 聚乙烯的添加对马来酸酐接枝聚丙烯制备及性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 15-20.

[13] 谢海生, 兰修才, 李谦, 等. 低挥发高接枝率马来酸酐接枝聚丙烯的制备及其在增强聚丙烯材料中的应用[J]. 塑料工业, 2022, 50(10): 149-153.

[14] 刘建清, 徐晓冬, 高秀敏, 等. PP熔融接枝改性研究进展[J]. 高分子通报, 2008, 21(5): 39-44.

[15] 王文杰. 聚丙烯改性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.

[16] 孙凌刚, 王海涛, 朱之军, 等. 一种接枝改性抗老化阻燃聚丙烯及其制备方法: CN120059061B[P]. 2025-07-25.
[17] 王旭东. 氯化聚丙烯的接枝改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
[18] 黄荣成, 仲洲, 陆健, 等. 溶液法制备改性蒙脱土复合聚丙烯薄膜及其性能研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(8): 145-147.
[19] ZANG Y L, JI W T, WANG Y, et al. Modification of discarded polypropylene mask and its utilization as crude oil flow improver[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(27): e55614.
[20] PLUMMER C M, ZHOU H B, LI S H, et al. A direct functionalization of polyolefins for blend compatibilization by an insertion of 1, 1-bis (phenylsulfonyl) ethylene (BPSE)[J]. Polymer Chemistry, 2019, 10(24): 3325-3333.
[21] 姜纹昕, 顾雪萍, 冯连芳, 等. 聚丙烯辐照接枝改性技术及其应用[J]. 塑料, 2021, 50(6): 140-145.
[22] LÓPEZ-SAUCEDO F, ALVAREZ-LORENZO C, CONCHEIRO A, et al. Radiation-grafting of vinyl monomers separately onto polypropylene monofilament sutures[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 132: 1-7.
[23] 曹人平, 游革新, 杭义萍, 等. 预辐照聚丙烯接枝研究状况[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2005, 23(5): 257-261.
[24] LIU Y G, TIAN B, LIU X Y. Preparation of polypropylene blends with the long chain branched behavior through reactive blending induced by pre-irradiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 177: 109188.
[25] 詹杰, 苏兴东, 李家文, 等. 共辐照接枝合成胺基型吸附剂对放射性废液中离子态和胶体态110Agm的去除[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(5): 1017-1023.
[26] AABIDIN H Z U, HASSAN M I U, YASIN T, et al. Removal of iron from leached geological samples using polypropylene waste amidoxime-based radiation grafted adsorbent[J]. Journal of Polymer Materials, 2025, 42(1): 141-150.
[27] 宋鹏飞, 刘静, 丛林. 电子束辐照技术在纺织领域的应用现状研究[J]. 山东纺织科技, 2022, 63(5): 54-56.
[28] YUAN C, ZHOU Y, ZHU Y J, et al. Improved high-temperature electrical properties of polymeric material by grafting modification[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(27): 8685-8693.
[29] ZHONG S Y, LIU X M, ZHENG S, et al. Achieving high energy storage capability of polypropylene films through clean electron beam irradiation induced grafting strategy[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(1): 247-257.
[30] ZHAO Y B, ZHAN J J, LIU X, et al. Stable anode/separator interface enabled by graft modification of polypropylene separator via electron beam irradiation technique toward high-performance sodium metal batteries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 670: 246-257.
[31] 李忠磊, 赵帅, 殷一凡, 等. 基于化学接枝改性的聚丙烯电缆绝缘性能强化方法研究进展及展望[J]. 绝缘材料, 2025, 58(3): 1-14.
[32] 余世勤, 赵鑫鹏, 郑艳, 等. 官能化聚烯烃的进展和应用[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2487-2503.
[33] 刘太阁, 靳玲, 聂恒凯, 等. 一种基于固相接枝制备高熔体强度聚丙烯的方法: CN104356305B[P]. 2017-11-07.
[34] 祝萌, 彭文俊, 张先明. 微波诱导马来酸酐固相接枝聚丙烯的制备及性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 787-794.
[35] XIE S J, FANG Z Y, LIAN Z Y, et al. A novel, dual-initiator, continuous-suspension grafting strategy for the preparation of PP-*g*-AA-MAH fibers to remove of indigo from wastewater[J]. Polymers, 2024, 16(15): 2144.
[36] 孙立科, 赵丹, 马育红. 丙烯酸丁酯和聚丙二醇二甲基丙烯酸酯水相悬浮接枝PP的制备[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(6): 17-21.
[37] ZHANG Y Y, SHI K S, ZANG C Y, et al. Improved insulation properties of polypropylenes in HVDC cables using aqueous suspension grafting[J]. Materials, 2022, 15(18): 6298.
[38] 郭福全, 范吉昌. 马来酸酐接枝可控流变聚丙烯的制备与性能[J]. 应用化工, 2025, 54(1): 106-109.
[39] 朱宝军, 张熙宇, 施云峰, 等. 110kV接枝聚丙烯绝缘电力电缆本体机械特性[J]. 电线电缆, 2025, 68(2): 12-17.
[40] Niu S K, Zhang T D, Zhang H Y, et al. Balancing the mechanical toughness and electrical insulation of polypropylene by blending and grafting modifications[J]. Macromolecular Chemistry & Physics, 2025, 226(6): 2500029.
[41] WANG M T, HU S X, ZHANG W J, et al. Electrical properties enhancement of dually grafting modification for polypropylene cable insulation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(44): e56169.
[42] HUANG S S, ZHOU Y X, HU S X, et al. Comprehensive properties of grafted polypropylene insulation materials for AC/DC distribution power cables[J]. Energies, 2023, 16(12): 4701.
[43] 彭二磊, 马壮, 苏艳文, 等. 新型环保聚丙烯绝缘中压电力电缆的研究[J]. 电线电缆, 2021, 64(5): 13-16.
[44] 罗兵, 李君洛, 王少杰, 等. 接枝聚丙烯电容薄膜的高温储能特性[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3371-3377.
[45] MEHTA K, KUMAR V, RAI B, et al. Silver nanoparticles-immobilized-radiation grafted polypropylene fabric as breathable, antibacterial wound dressing[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, 204: 110683.
[46] BELHAOUES A, RIAHI F, MARCOS-FERNÁNDEZ ÁA. Enhancement of the rheological, dynamic mechanical, and morphological properties of thermoplastic natural rubber based on NR/PP blends using ENR/PP-*g*-MA as a compatibilizer[J]. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 2025, 41(1): 3-35.
[47] YAO X Y, XU Y, ZHU D H, et al. Bio-based high-grafting-rate compatibilizer: Dynamic reactive extrusion synthesis of itaconic anhydride-based copolymers with polypropylene grafts and the application in plant fiber composites[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 226: 120619.
[48] SHAFAATTALAB F, JALALI-ARANI A. Effect of maleic anhydride-grafted polypropylene as a compatibilizer and dynamic vulcanization on morphology, rheology, mechanical and thermal properties of polypropylene/butadiene rubber blend[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(24): e57006.
[49] AGGARWAL K P, RAGHU N, KARMARKAR A, et al. Jute-polypropylene composites using m-TMI-grafted-polypropylene as a coupling agent[J]. Materials & Design, 2013, 43: 112-117.
[50] HWANG S, HAN Y, GARDNER J D. Morphological characteristics of spray dried cellulose nanofibers produced using various wood pulp feedstocks and their effects on polypropylene composite properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 268: 111093.
[51] 杜宣萱, 辛斌杰, 许晋豪, 等. 复合等离子体处理对聚丙烯纤维膜润湿改性的研究[J]. 现代纺织技术, 2021, 29(5): 110-115.
[52] LI X G, YANG Q, ZHANG K, et al. Property improvement and compatibilization mechanism of biodegradable polylactic acid/maleic anhydride-based/polypropylene spunbonded nonwoven slices[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134097.
[53] 赵世成, 吴航, 邱子跋. 一种采用微波-熔融接枝制备马来酸酐接枝聚丙烯的方法: CN116515043B[P]. 2025-07-22.