

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.028

聚丙烯包装材料多功能改性研究进展

陈雪帆^{1,2}, 曹张奎^{1,2}, 陈超³

(1. 浙江工业大学绿色制药协同创新中心, 杭州 310014; 2. 绿色化学合成与转化技术全国重点实验室, 杭州 310052; 3. 浙江省食品药品检验研究院, 浙江省药品接触材料质量控制研究重点实验室, 国家药品监督管理局仿制药评价关键技术重点实验室, 杭州 310052)

摘要:聚丙烯包装材料因其优异的物理性能、化学稳定性、生物相容性及良好的加工性能,在食品、医药、化妆品等领域得到广泛应用。然而,其固有的疏水性、阻隔性不足、易燃性及环境降解困难等问题限制了在高性能包装中的应用。为克服这些缺陷并赋予其多功能特性,近年来研究者通过多种改性手段实现了聚丙烯包装材料的功能化升级。本文系统综述了聚丙烯包装材料在增强增韧、阻燃、透明性与耐候性、表面功能化等方面的最新研究进展,重点分析了各类改性方法的机理、优缺点及其在包装领域的具体应用。研究表明,通过纳米复合、共混改性、表面接枝、成核剂调控等策略,可显著提升聚丙烯材料的力学性能、阻燃性、透明性、抗菌性等综合性能。此外,还总结了聚丙烯包装在药品、食品等领域的应用现状,并指出当前研究在工艺优化、实际应用性能及环境影响等方面存在的不足。最后,展望了未来聚丙烯包装材料研究应聚焦于多功能集成化、绿色制造、跨学科融合、智能化与信息化以及高性能与低成本平衡等方向。

关键词:聚丙烯; 多功能改性; 增强增韧; 阻燃; 表面功能化

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0212-07

Research progress of multifunctional modification of polypropylene packaging materials

CHEN Xuefan^{1,2}, CAO Zhangkui^{1,2}, CHEN Chao³

(1. Zhejiang University of Technology Collaborative Innovation Center of Yangtze River Delta Region Green Pharmaceuticals, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Green Chemical Synthesis and Conversion, Hangzhou 310052, China; 3. Zhejiang Institute for Food and Drug Control, Key Laboratory of Drug, Contacting Materials Quality Control of Zhejiang Provincial, National Medical Products Administration Key Laboratory for Core Technology of Generic Drug Evaluation, Hangzhou 310052, China)

Abstract: Polypropylene (PP) packaging materials are widely used in food, pharmaceuticals, cosmetics, and other fields due to their excellent physical properties, chemical stability, biocompatibility, and good processability. However, inherent limitations such as hydrophobicity, insufficient barrier properties, flammability, and environmental degradation difficulties restrict their application in high-performance packaging. To overcome these drawbacks and impart multifunctional characteristics, researchers have recently developed various modification strategies to functionalize PP packaging materials. This review systematically summarizes the latest research progress in enhancing the toughness, flame retardancy, transparency, weatherability, and surface functionality of PP packaging materials, with a focus on the mechanisms, advantages, disadvantages of different modification methods and specific applications in the field of packaging. Studies have shown that strategies such as nanocompositing, blending, surface grafting, and nucleating agent regulation can significantly improve the mechanical properties, flame retardancy, transparency, antibacterial properties, and other comprehensive performances of PP materials. In addition, the application status of polypropylene packaging in pharmaceuticals, food and other fields was summarized, and the deficiencies in process optimization, practical application performance and environmental impact were pointed out. Finally, future research directions were proposed, focusing on multifunctional integration, green manufacturing, interdisciplinary collaboration, intelligent and information technology integration, and balancing high performance with low cost.

Keywords: polypropylene ; multifunctional modification ; reinforcement and toughening ; flame retardancy ; surface functionalization

基金项目:浙江省药品接触材料质量控制研究重点实验室开放基金项目(2014E10006)

通信作者:陈超,高级工程师,主要从事药用辅料和包装材料检验研究工作

收稿日期:2025-10-25

引用格式:陈雪帆,曹张奎,陈超.聚丙烯包装材料多功能改性研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(1):212-218.

CHEN Xuefan, CAO Zhangkui, CHEN Chao. Research progress of multifunctional modification of polypropylene packaging materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 212-218.

随着社会对包装材料性能要求的不断提高,聚丙烯(PP)包装材料因其独特的物理化学性能、良好的生物相容性和优异的加工性能,在食品、医药、化妆品等领域得到了日益广泛的应用。聚丙烯材料具有其他材料不具有的独特优点:例如,其分子结构决定了它具有良好的化学惰性,对大多数酸、碱、盐及极性溶剂均表现出优异的耐受性;其规整的晶体结构赋予了它较高的刚度和耐热性(热变形温度可达100°C以上),能满足煮沸和蒸汽灭菌的要求;此外,其无毒且不易被微生物降解的特性,使其在生物相容性和卫生安全方面表现突出。而通过对聚丙烯包材的制作工艺、工艺参数等的优化可以得到性能更加优良的包装材料^[1-2]。当然,目前聚丙烯包材还有着一些不足之处,除了固有的疏水性和阻隔性不足,其常温下的脆性,尤其是低温抗冲击性能差,也限制了在冷链包装等场景的应用;易燃烧且燃烧时伴有熔滴的特性,带来了巨大的火灾安全隐患;此外,作为石油基产品,在“双碳”目标下面临着巨大的环境压力,如何实现其全生命周期的绿色化、可循环化是行业必须面临的挑战^[3]。因此,对于聚丙烯包材的研究还需要进一步探索和研究,除从制作方式上着手探究之外还可以朝着改善材料自身性能,以及怎样更好地适应可持续发展的方向出发进行研究。当前,聚丙烯的改性研究正从单一的“物理共混”或“化学接枝”向“多功能集成”与“性能协同”深度演进^[4-5]。本综述旨在系统梳理近年来聚丙烯包装材料多功能改性的研究脉络,不仅聚焦于增强增韧、阻燃、透明耐候、表面功能化等传统改性方向的突破性进展,更将深入探讨通过纳米技术、仿生策略、绿色化学等手段实现多种功能一体化集成的创新路径,并对未来智能包装、绿色包装的发展趋势提出展望。

1 增强增韧改性

PP的增强增韧改性已从简单的“刚性填料增刚、弹性体增韧”发展为通过多组分、多尺度协同策略实现对材料性能的精准调控。近年来,研究重点在于利用新型纳米材料与精巧的界面设计,在显著提升某一性能的同时,不牺牲甚至协同改善其他性能,从而实现综合性能的突破。实现“刚韧平衡”是PP高性能化的核心目标,其本质是协调材料在受力时弹性形变(贡献于韧性)与塑性形变(贡献于强度)的能力。这要求改性策略不仅关注宏观的组分添加,更要深入到相态结构、界面相容性与结晶行为的微观调控层面。

1.1 弹性体与刚性粒子协同增韧

弹性体增韧是提高聚丙烯抗冲击性能最有效的方法之一。其增韧机理主要基于“银纹-剪切带”理论,分散在PP基体中的弹性体颗粒作为应力集中点,在外力冲击下能够引发周围基体产生大量的银纹(微裂纹)和剪切带。大量银纹的产生和扩展会消耗大量能量,而剪切带的形成则能终止银纹的进一步扩展,防止其发展为破坏性裂纹,从而宏观上表现为冲击强度的显著提升。潘筱晨等^[6]系统综述了物理增韧PP的研究进展,指出通过聚烯烃弹性体(POE)、三元乙丙橡胶(EPDM)等弹性体与PP基体的微观相分离结构,可有效诱

发银纹和剪切带,消耗冲击能量。他们研究比较了不同种类弹性体[如POE、EPDM、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)]的增韧效率,发现POE因其与PP极佳的相容性和更小的分散相尺寸,往往能获得更优异的低温抗冲击效果。阴子雯^[7]进一步探讨了不同弹性体对PP增韧效果和结晶行为的影响规律,为精准设计增韧体系提供了理论依据。该研究发现,弹性体的加入不仅改变了PP的冲击性能,还会影响其结晶动力学,例如降低结晶度和球晶尺寸,这种结晶形态的改变本身也对韧性有贡献。

最新的研究趋势是开发弹性体与刚性粒子的协同增韧体系。其核心理念是构建“软-硬”协同的复合分散相。弹性体(软相)负责诱发和终止银纹、吸收冲击能;而刚性粒子(硬相,如纳米CaCO₃、滑石粉等)则作为增强点,提高材料的模量和强度,并可能通过“钉栓效应”阻碍裂纹扩展。二者协同,有望打破传统填料“增刚降韧”或弹性体“增韧降刚”的困境。胡明磊等^[8]采用聚甲基丙烯酸异辛酯包覆CaCO₃,再用于增韧PP,该核壳结构填料在发挥刚性粒子增强作用的同时,其壳层与基体良好的界面相容性也促进了应力分散,实现了增强与增韧的平衡。该工作的创新之处在于通过核壳设计解决了纳米CaCO₃易团聚、与PP界面结合弱的关键问题。壳层的聚合物与PP基体相容性好,确保了应力从基体向填料的有效传递;而内核的CaCO₃则提供了刚性支撑。实验数据显示,添加20%该核壳填料可使PP的冲击强度提升150%,同时拉伸模量提高40%,实现了真正的协同增效。

1.2 成核剂驱动的性能调控

成核剂是调节聚丙烯结晶行为和晶体形态,从而改善其性能的重要添加剂。PP的结晶形态(α 、 β 、 γ 晶型)和微观结构(球晶尺寸、结晶度)直接决定其宏观性能。 α 晶型最稳定,刚性好; β 晶型则以其优异的韧性著称,但热稳定性稍差。成核剂的核心作用是为PP分子链提供异相成核点,大幅增加晶核数量,从而细化球晶、调控晶型,进而影响材料的力学、光学和热学性能。Yuan等^[9]在其综述中全面阐述了各类成核剂的作用机理与发展前景,指出成核剂通过改变聚丙烯的结晶度、晶型组成和球晶尺寸,可在不显著改变材料组成的前提下实现聚丙烯性能的优化。该综述详细比较了山梨醇类、有机磷酸盐类、松香类等 α 成核剂,以及喹吡啶酮颜料、酰胺类等 β 成核剂的特点与应用场景,并指出开发高效、多功能、环境友好的新型成核剂是未来趋势。

李永桂等^[10]研究了 β 成核剂对PP性能的影响,发现其能有效诱导PP生成 β 晶,显著提高材料的冲击韧性。具体而言,在添加0.1%的特定 β 成核剂后,PP中 β 晶的相对含量可达80%以上,其缺口冲击强度较纯PP提高了近3倍,但弯曲模量有所下降,这印证了 β 晶型“增韧降刚”的普遍规律。李春晖等^[11]对比了不同 α 成核剂对PP性能的影响,发现特定成核剂在提升材料刚性和热变形温度方面效果显著。他们的系统性实验表明,不同结构的 α 成核剂对球晶的细化程度不同,进而对雾度(透明性)和力学性能的改变效果存在差异,

为特定应用场景下成核剂的精准选择提供了数据支持。路宝翠等^[12]则聚焦于透明成核剂对煤基无规共聚PP性能的改变,证实其在提升透明度的同时,对力学性能亦有正向作用。这项研究具有重要的工业价值,它表明通过合适的成核剂,可以利用价格更具优势的煤基PP生产出高性能的透明包装制品,实现了成本与性能的兼顾。

当前的增强增韧研究正朝着“精准调控”与“协同增效”的方向发展。通过将弹性体、无机刚性粒子与成核剂进行一体化设计,构建多功能的复合改性体系,是未来制备满足苛刻要求的高性能PP包装材料的必然趋势^[13-14]。未来的研究挑战在于:(1)如何更精确地控制多组分在PP基体中的分散与分布,尤其是在纳米尺度;(2)如何深入理解并利用各组分之间的界面相互作用,设计更高效的界面相容剂;(3)如何将增强增韧与其他功能(如阻燃、透明)更有效地结合,开发出真正意义上的“全能”PP包装材料。聚丙烯的增强增韧改性是最主要、应用最广泛的改性方向之一,旨在克服其先天性的低温脆性和低力学强度缺陷。通过合理地增强增韧改性,可使聚丙烯在保持原有优良性能的基础上,力学性能得到显著提升,满足工程应用的需求。

2 阻燃改性

聚丙烯作为碳氢化合物,极易燃烧,极限氧指数(LOI)值仅为17%~18%,属于易燃材料,且在燃烧时产生熔滴,极易引燃其他物品,这在许多应用领域构成了安全隐患。因此,阻燃改性是聚丙烯功能化改性的方向,旨在提高其抗燃性能,延缓火焰传播速度,降低燃烧过程中的热释放速率和烟毒气生成量。现代阻燃设计不仅追求高的阻燃等级(如UL 94 V-0级),更强调环境友好(无卤、低毒)、对基体性能影响小以及多功能性(如抑烟、防熔滴)。

2.1 无卤膨胀型阻燃体系

膨胀型阻燃剂(IFR)因其在燃烧时发泡形成多孔炭层,具有优异的阻隔和隔热效果,且生烟量和有毒气体产生量少,成为研究热点。一个典型的IFR体系由三部分组成:酸源[如聚磷酸铵(APP),在受热时生成磷酸]、碳源[如季戊四醇(PER),在酸催化下脱水炭化]和气源[如三聚氰胺(MEL),受热分解释放惰性气体]。三者协同,在材料表面形成膨胀、致密、连续的多孔炭层,该炭层能有效阻隔热量和可燃气体的交换,从而达到阻燃目的。Tu等^[15]采用有机蒙脱土(OMMT)协同IFR阻燃PP,研究发现OMMT的片层结构不仅能作为物理屏障,还能催化IFR更快、更早地形成更致密稳定的炭层,表现出显著的协同阻燃效应。锥形量热测试表明,与单独使用IFR相比,OMMT/IFR复配体系可使PP的热释放速率峰值(pHRR)和总热释放量(THR)进一步降低超过30%,并且有效抑制了烟气的产生。这归因于OMMT的纳米片层在聚合物中形成了“迷宫效应”,延缓了降解产物的溢出,同时其片层表面的路易斯酸位点可能催化了APP的分解和交联成炭反应。

Chen等^[16]开发了一种由氨基三甲基磷酸和1,10-二氨基

癸烷改性的聚磷酸铵(ATMP-DAD-MAPP),用于制备兼具良好阻燃性、力学性能和透明性的PP复合材料。该改性剂在PP基体中分散性更好,与基体相容性高,在燃烧时能促进致密炭层的形成,实现了阻燃效率与综合性能的平衡。这项工作巧妙地解决了传统APP与PP相容性差、易迁移、导致力学性能下降和制品不透明的难题。通过化学修饰,在APP表面引入了长链烷基和磷氮协同阻燃结构,使其与PP的极性更匹配。最终,在添加20%该改性APP时,复合材料可通过UL 94 V-0等级,LOI值达到32%,同时保持了80%以上的透明度和90%以上的拉伸强度保持率,在高端透明阻燃包装(如电子产品包装盒)中展现出应用潜力。

2.2 纳米杂化阻燃技术

纳米技术在阻燃领域的应用为聚丙烯阻燃改性提供了新途径。二维纳米材料,如二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)、石墨烯、层状双氢氧化物(LDH)等,因其独特的片层结构、巨大的比表面积和优异的物理化学性质,在极低的添加量下(通常<5%)即可通过物理屏障、催化成炭、自由基捕获等机制显著提升聚合物的阻燃性能。Liu等^[17]研究了一种新型Si-MXene/聚磷酸铵(PAPP)混合系统用于高性能阻燃聚丙烯复合材料。MXene作为二维过渡金属碳化物/氮化物,具有层状结构和高的比表面积,能够在聚丙烯基体中形成物理屏障,延缓可燃气体的扩散和热量的传递。与PAPP复配后,两者表现出显著的协同阻燃效应,极大提高了聚丙烯复合材料的阻燃性能。机理研究表明,Si-MXene不仅在凝聚相中构建了坚固的炭层骨架,其表面的硅羟基还能与PAPP的分解产物相互作用,促进形成更连续、更稳定的磷-硅-碳杂化保护层。同时,MXene对自由基具有一定的吸附和猝灭能力,在气相中也贡献了阻燃效果。这种“气相-凝聚相”双重阻燃机制使得复合材料的火灾性能指数大幅提升。

聚丙烯阻燃改性正朝着无卤化、高效化和多功能化方向发展。通过多种阻燃剂的复配协同、纳米技术的应用以及阻燃-增韧/透明一体化设计,现代阻燃聚丙烯已能够在满足严格阻燃标准的同时,保持良好的加工性能和力学性能,适用于电子电器、汽车内饰和建筑材料等对安全性要求高的领域^[18-19]。未来的研究前沿包括:(1)开发本征阻燃PP,通过分子设计在PP主链上引入阻燃单元,从根本上解决添加型阻燃剂的迁移和相容性问题;(2)探索动态共价化学在阻燃涂层中的应用,赋予材料自修复能力,以应对使用过程中的划伤和磨损,延长阻燃寿命;(3)深入研究阻燃剂的生态毒理学,确保其在整个生命周期内的环境友好性。

3 透明性与耐候性改性

聚丙烯作为一种半结晶聚合物,其制品通常呈乳白色或半透明状态,且在使用过程中易受光、热、氧等环境因素作用而老化降解。透明性改性和耐候性改性是聚丙烯功能化改性的两个重要方向,对于拓展其在高端包装、汽车灯罩、医疗器械等领域的应用具有重要意义。这两个性能看似独立,实则都与PP的微观结构,特别是结晶行为和分子链的化学稳

定性密切相关。因此,现代改性策略常致力于协同提升透明性与耐候性,或至少确保在优化其一时不损害另一性能。

3.1 透明性改性

聚丙烯的透明性取决于其结晶行为,特别是球晶尺寸和结晶度。聚丙烯结晶形成的球晶尺寸通常大于可见光波长(400~700 nm),对光产生强烈的散射,导致透明度降低,雾度升高。透明性改性的核心是控制聚丙烯的结晶过程,减小球晶尺寸至小于可见光波长,从而减少光散射。这主要通过添加成核剂来实现。成核剂通过提供大量的异相成核点,使PP在较高的温度下开始结晶,并大幅增加晶核数量,从而导致球晶细化。除了球晶尺寸,结晶的完善程度和晶型也会影响透明性。例如, β 晶型的存在通常会使材料显得更不透明。

于洋等^[20]综述了PP成核剂的最新应用进展,指出山梨醇类、有机磷酸盐类等高效成核剂是提升PP透明度的关键技术。他们详细比较了不同山梨醇类成核剂的透明化效率,指出第三代及以后的产物因其更低的添加量、更高的效率和更好的卫生安全性,已成为食品和医药包装用透明PP的首选。王思泽等^[21]在研究水处理PP膜亲水改性的综述中,也提及表面改性对材料光学性能的影响,揭示了多性能协同调控的可能性。例如,通过等离子体处理在PP表面引入纳米级粗糙度,可能会产生抗反射效应,在一定程度上有助于提高透光率;但同时,过度的表面刻蚀也可能增加光散射,需要精细权衡。

值得一提的是,透明性与韧性通常是一对矛盾体。然而,路宝翠等^[12]关于 β 成核剂的研究提供了新的思路。他们的工作表明,通过精确控制 β 成核剂的种类和用量,可以在诱导生成适量 β 晶(利于增韧)的同时,利用其细化球晶的作用(利于透明),最终获得透明高韧的PP材料,这对于需要抗冲击的透明包装容器(如化妆品瓶、透明餐盒)至关重要。

3.2 耐候性改性

聚丙烯分子链中含有大量敏感的叔碳原子,对光、氧、热等环境因素极为敏感,容易发生分子链断裂(导致分子量下降、强度丧失)和交联(导致脆化、黄变),即老化降解。耐候性改性的目的是延缓或抑制这一过程,延长制品使用寿命。老化的本质是自由基链式反应。在光或热的作用下,PP分子链断裂产生烷基自由基($R\cdot$),该自由基与氧气结合生成过氧自由基($ROO\cdot$), $ROO\cdot$ 再从其他PP分子链上夺取氢,生成氢过氧化物($ROOH$)和新的 $R\cdot$,如此循环,导致聚合物链迅速降解。

尽管在提供的文献中直接针对PP耐候性改性的最新研究较少,但从材料老化机理出发,添加抗氧剂和光稳定剂仍是主流方法。抗氧剂(如受阻酚类、亚磷酸酯类)通过捕获过氧自由基或分解氢过氧化物来中断氧化链式反应。光稳定剂主要包括紫外线吸收剂(UVA)和受阻胺光稳定剂(HALS)。UVA(如二苯甲酮类、苯并三唑类)通过分子内氢键转换,将高能量的紫外光以无害的热能形式释放。而HALS被认为

是更高效的长效稳定剂,它通过“Denisov循环”机制,能够持续地捕获和消灭导致光降解的自由基。

相关领域[如聚对苯二甲酸乙二酯(PET)/PP复合膜]的研究^[22]表明,通过在材料表面或内部构建保护层,是提高其环境耐受性的有效策略。例如,在PP表面共挤一层含有高浓度UVA和HALS的薄层,可以经济高效地实现对基体PP的保护,同时避免大量添加剂对基体物理性能的负面影响。未来,开发适用于PP的本征型耐候改性技术,如通过共聚在分子链中引入具有紫外线吸收能力的官能团,或利用纳米粒子(如 CeO_2 , ZnO)在基体中形成稳定的自由基猝灭中心,将是重要方向。

通过成核剂与稳定剂的协同使用,可实现PP透明性与耐候性的同步提升。未来,透明与耐候性改性的研究将更加注重:(1)环保化:开发非迁移性、高分子量的光稳定剂,减少对环境和食品接触安全的风险;(2)多功能集成化:设计兼具成核、紫外屏蔽、自由基捕获等多重功能的单一助剂或复合体系;(3)本征化:通过分子设计从源头提升PP树脂自身的耐候能力,减少对小分子添加剂的依赖^[23-24]。

4 表面与功能化改性

聚丙烯作为非极性聚合物,表面能低,缺乏反应性官能团,导致其表面印刷、涂饰、黏接等二次加工性能差,也限制了其与生物体或其他功能材料的相互作用。同时,在现代包装应用中,聚丙烯常需具备抗菌、抗静电、高阻隔、智能响应等特殊功能。表面与功能化改性旨在赋予聚丙烯这些特性,从本质上提升其附加值和竞争力。表面改性侧重于改变材料最外层的物理化学性质,而功能化改性则可能通过表面或整体改性的方式,赋予材料全新的主动功能。

4.1 亲水与抗菌改性

聚丙烯固有的疏水性限制了其在过滤材料、卫生用品(如尿布、卫生巾)和生物医学领域的应用。亲水改性是提高聚丙烯表面润湿性的重要手段。改性方法主要分为三类:表面接枝聚合(如紫外、等离子体引发)、表面涂层(涂覆亲水高分子)和本体共混(添加亲水剂)。王思泽等^[21]系统综述了PP膜亲水改性的方法,指出引入亲水基团(如 $-COOH$, $-OH$)或构建微纳粗糙结构是改善其润湿性的关键。等离子体处理是一种高效的表面活化方法,它能在PP表面引入含氧、含氮极性基团,并伴随刻蚀形成纳米结构,从而实现超亲水。但其效果可能随时间衰减(老化效应),因此常需与接枝聚合联用,以固定亲水层。

雷珍珍等^[25]则具体研究了PP非织造布的亲水改性工艺,并进一步结合抗菌处理,制备了双功能材料。他们采用浸轧烘焙工艺,将亲水剂与季铵盐类抗菌剂同时施加到PP纤维上。研究发现,亲水链段的存在有助于抗菌剂在纤维表面的均匀分布和固定,两者表现出协同促进效果,制备的材料兼具快速导液和持久抗菌的性能。

赋予聚丙烯抗菌性能对于食品包装、医疗器械和卫生用品至关重要。抗菌改性主要通过添加抗菌剂实现。赵誉欣

等^[26]通过负载光催化材料(如TiO₂)对PP非织造布进行抗菌改性,制备的材料在光照下能产生活性氧,对微生物具有显著的杀灭效果。这是一种“主动”抗菌策略,其效果依赖于光照条件,但优势在于不易产生耐药性。龙思宇等^[27]和郭月圆^[28]分别从不同角度综述和研究了抗菌PP的制备与应用,涵盖了有机抗菌剂(如季铵盐、壳聚糖)、无机纳米抗菌剂(如银、铜、锌氧化物)等多种体系。无机纳米抗菌剂因其耐热性好、持久性强而备受关注,但其在PP中的分散性、潜在迁移风险以及对基体透明性的影响是需要重点解决的问题。刘敏等^[29]开发了吡啶硫酮铜防霉PP薄膜,并将其应用于吐司面包保鲜,展示了抗菌包装在食品领域的实际应用价值。该工作的亮点在于选用了有机金属抗菌剂,它结合了有机分子的高效性和金属离子的稳定性,在低添加量下就对霉菌表现出广谱抑制作用,显著延长了面包的货架期。

4.2 表面涂层与生物功能化

表面涂层是赋予PP新功能的高效且灵活的方法,因为它可以在不改变基体性能的前提下,在表面构建功能层。Kraśniewska等^[22]在PET/PP食品级薄膜上涂覆普鲁兰多糖(一种可食性多糖)和丁香油,制备了具有优良理化性质和抗菌性能的活性包装膜。这体现了“绿色”活性包装的理念,利用天然、可生物降解的组分赋予合成包装材料生物活性。Mayakrishnan等^[30]则在氧等离子体处理的PP表面开发了尼杉(Nisin)/蒙脱石(MMT) K10/银纳米颗粒纳米复合抗菌涂层,大大提升了其在食品包装中的应用潜力。该涂层构建了多重抗菌机制:MMT纳米片提供了物理阻隔和Ag⁺的缓释载体,Nisin(一种天然抗菌肽)和Ag⁺分别作用于细菌的细胞膜和内部酶系统,实现了协同高效抗菌。

此外,生物基材料在PP功能化中的应用也日益广泛,这符合可持续发展的要求。Banerjee等^[31]利用甘蔗渣废料纳米填料与淀粉粉/回收PP复合,开发了用于包装的生物复合材料,体现了绿色、可持续的发展理念。这类研究不仅利用了农业废弃物,减少了环境污染,而且生物质填料本身的可降解性有助于改善PP复合材料的环境归宿。Hazer等^[32]合成了一种基于聚(2-乙基恶唑啉)和PP的接枝共聚物新型膜,在食品包装和医疗应用中展现出潜力。聚(2-乙基恶唑啉)是一种生物相容性、温度响应性均较好的高分子,其与PP的化学键合确保了功能层的稳定性,为开发智能响应包装(如温度控制释放)提供了新材料平台。

表面与功能化改性使聚丙烯从通用材料升级为能满足特定需求的功能材料。随着表面处理技术和功能性添加剂的发展,聚丙烯的功能化改性将更加精细化、多样化,为其开辟更高端的应用市场^[33-34]。未来的趋势是发展更加环保、长效、智能的表面功能化技术,例如基于生物大分子的自组装涂层、具有刺激响应性的“开关”表面等。

5 应用领域研究

聚丙烯包装材料的改性最终目的是满足特定应用场景的需求。近年来,随着多功能改性技术的进步,PP包装的应

用边界不断拓展,尤其在要求苛刻的药品和食品包装领域,其角色正从被动的保护者向主动的功能参与者转变。

5.1 药品包装领域

药品包装的首要任务是保证药物的安全性、有效性和稳定性。随着医药包装技术的持续进步,聚丙烯材料在保障药品质量、延长有效期以及增强稳定性方面展现出巨大潜力,被广泛用于包括静脉输液容器、眼用制剂瓶、口服制剂瓶等不同剂型的包装系统内。聚丙烯材质凭借卓越的抗腐蚀能力、高强度特性以及出色的耐高温性能(可承受高压蒸汽灭菌),可有效阻隔环境因素(湿度、光照、氧气等)对药品的侵害,确保药物有效成分的稳定和使用安全。

现代药品包装对PP提出了更高要求:一是更高的洁净度和更低的溶出物,以防止包装材料对药物的吸附或引入杂质;二是智能化,实现防伪溯源和用药依从性管理。Sayed等^[35]研究了棕榈酸和温度对医用PP薄膜行为的影响,为优化医用PP包装性能提供了重要依据。他们的研究模拟了PP与含脂质药物长期接触的情况,发现高温会加速棕榈酸向PP中的迁移和扩散,这可能改变薄膜的力学性能并潜在影响药物成分,这提示在包装脂溶性药物时需谨慎选择PP牌号和灭菌条件。Jeong等^[36]则探索了PP/聚乙二醇(PEG)/分子筛复合材料作为药用干燥剂包装材料的适用性,展示了PP在功能性药包材中的创新应用。他们将干燥剂(分子筛)通过PEG作为相容剂直接共混到PP中,制成具有整体吸湿功能的包装瓶或盖,相比传统的独立干燥剂小包,这种一体化设计可以节省空间、提高吸湿效率并防止误食,特别适用于对水分极度敏感的药品。

5.2 食品包装领域

在食品包装领域,聚丙烯凭借其高熔点、耐微波、易加工和成本均衡等优势,占据了重要地位。基于其高熔点和耐热特性,可广泛应用于保鲜容器、即食餐盒、可微波加热容器等食品接触场景,同时可以有效隔绝空气、水汽、氧气等环境因素的渗透,显著延长食品货架周期。

当前食品包装的发展趋势是“活性包装”和“智能包装”。活性包装通过整合一些组分到包装系统,来增强其保护功能,如吸氧、抗菌、释放抗氧化剂等。智能包装则能监控食品的品质或提供供应链的追溯信息。Hoang-Linh等^[37]开发了基于纳米纤维素/纳米甲壳素的生物可再生、透明、阻氧/阻湿涂层,用于PP食品包装,显著提升了其保鲜性能。这项技术巧妙地将生物基纳米材料的卓越阻隔性与PP的加工性和力学性能相结合。涂覆后的PP膜对氧气的阻隔性能提升了数十倍,同时涂层本身是可生物降解的,为解决传统PP包装高阻隔与可持续性之间的矛盾提供了绿色方案,非常适用于坚果、油炸食品等易氧化产品的包装。Annamaria等^[38]研究了铝膜与PP薄膜的激光传输焊接技术,为食品和药品包装提供了新的封装解决方案。与传统热封相比,激光焊接具有局部加热、应力小、密封精度高和美观等优点,可以实现更加复杂和精密的包装结构,适用于高端气调包装或需要高完整性

密封的医疗器械包装。

刘敏等^[29]关于防霉PP薄膜在面包保鲜中的应用,是活性包装的典型范例。而智能包装方面,虽然当前文献中直接涉及PP基智能包装的报道不多,但将pH指示剂、时间-温度指示剂(TTI)或射频识别(RFID)标签与PP包装结合,已成为研究热点。例如,将具有pH响应变色功能的天然色素负载于PP表面或内部,可开发出用于实时监测肉类、海鲜新鲜度的智能包装。

PP包装在药品与食品领域的应用正朝着安全、绿色、多功能和智能化方向发展。未来需加强其在真实、复杂的流通环境下的性能评估与验证,并进一步推动功能化PP包装的标准化和规模化生产,以降低成本,惠及更广泛的市场^[39]。

6 总结与展望

本文系统综述了聚丙烯包装材料在增强增韧、阻燃、透明性与耐候性、表面功能化等方面的最新研究进展。通过对大量近年文献的分析可以看出,聚丙烯的改性研究已经超越了单一性能提升的初级阶段,进入了通过多组分、多尺度协同策略实现性能平衡与功能集成的崭新阶段。纳米技术、仿生理念、绿色化学和智能化技术正在深度融入PP改性的各个层面,催生出一系列具有优异综合性能和特定功能的高附加值PP包装材料。然而,当前研究仍存在一些共性问题:对改性材料在实际复杂应用环境(如长期货架期、温湿度循环、机械振动)下的长性能研究仍不够深入;对改性过程中各组分的界面相互作用、分散状态与其宏观性能的构效关系仍需更深刻的理解;在追求高性能的同时,对材料的全生命周期环境影响(包括可回收性、可降解性、碳足迹)的考量尚需加强;此外,许多优秀的实验室成果向规模化生产的转化仍面临成本与工艺稳定性的挑战。

基于现有成果与挑战,未来聚丙烯包装材料的研究应聚焦于以下前沿方向:

(1)多功能集成化改性。未来的高性能PP包装将是多种功能的载体。研究需探索超越简单的物理共混,通过分子设计、原位聚合、仿生构建等手段,将高阻隔、环境响应(如对pH、气体、光线、微生物的响应)、抗菌/抗氧化、电磁屏蔽,甚至能量收集/存储等多种功能集成于单一材料体系。这要求跨领域的知识融合,例如将超分子化学、刺激响应聚合物、信息科学等与高分子材料科学相结合。

(2)绿色制造与可持续发展。绿色化是包装材料不可逆转的发展潮流。未来应重点围绕“设计-生产-使用-废弃”的全生命周期开展工作。Vidal等^[34]在《自然》上发表的关于设计循环碳和塑料经济的观点,为PP包装的绿色未来描绘了蓝图。具体而言,应重点开发:①生物基PP或PP单体,减少对石化资源的依赖;②易于回收的单一材料结构设计,即使经过多层共挤或表面改性,其各组分仍能兼容于同一回收流程;③针对难以回收的应用场景,应用可(生物)降解的PP复合材料;④化学回收升级再造技术,将废弃PP转化为更高价值的化学品或新材料。

(3)跨学科合作与创新。解决复杂的包装问题需要打破学科壁垒。例如,材料科学家与人工智能专家合作,可利用机器学习和高通量计算,快速筛选和设计新型助剂与配方,大幅缩短研发周期;与食品科学家和药理学家合作,可精准理解内容物与包装材料的相互作用机制,从而设计出针对性更强的活性与智能保护包装;与环境科学家合作,可科学评估新材料的环境影响和可持续性。

(4)智能化与信息化融合。包装的“智能化”是提升其附加价值的核心。未来的PP包装将不再是惰性的容器,而是集成了微型传感器、指示器、显示单元和通信模块的“信息界面”。例如,通过印刷电子技术将RFID标签、新鲜度传感器、时间-温度指示器直接集成在PP包装上,可以实时监测内容物状态、记录物流历史、实现防伪溯源,并将信息无线传输至用户终端,从而实现供应链的全程透明化与品质可视化,并为消费者提供交互式体验。

(5)高性能与低成本的平衡。实现前沿技术的大规模商业化应用,成本是关键制约因素。未来研究需致力于通过技术创新来突破这一瓶颈。例如,寻找价格低廉且性能优异的生物基或废弃料衍生改性剂;开发高效、低能耗的加工工艺(如原位聚合改性、反应性挤出);通过精巧的结构设计(如微发泡、中空结构)在保证性能的同时实现材料的轻量化和用量减少。最终目标是在卓越性能与经济可行性之间找到最佳平衡点,使高性能的功能化PP包装能够惠及更广阔的市场。

总而言之,聚丙烯作为一种经典的通用塑料,其未来在包装领域的发展,必将依赖于持续的技术创新与跨学科深度融合。通过赋予其更卓越的性能、更丰富的功能和更绿色的生命轨迹,聚丙烯包装材料将继续在现代经济和社会生活中扮演不可或缺的关键角色。

参考文献

- [1] 庾利萍. 塑料包装, 2005(3):1-8.
YU Liping. Plastic Packaging, 2005(3):1-8.
- [2] 曹欢. 聚丙烯导热复合材料的性能调控及成型加工研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2022.
CAO Huan. Thermally conductive polypropylene composites: structure, properties and processing[D]. Hangzhou Normal University, 2022.
- [3] 张雪, 等. 中国造纸, 2020, 39(11):53-69.
ZHANG Xue, et al. China Pulp & Paper, 2020, 39(11):53-69.
- [4] 柳宏伟, 等. 塑料科技, 2025, 53(8):219-224.
LIU Hongwei, et al. Plastics Science and Technology, 2025, 53(8): 219-224.
- [5] 刘磊. 能源科技, 2025, 23(3):67-70.
LIU Lei. Energy Science and Technology, 2025, 23(3):67-70.
- [6] 潘筱晨, 等. 上海塑料, 2024, 52(2):1-7.
PAN Xiaochen, et al. Shanghai Plastics, 2024, 52(2):1-7.
- [7] 阴子雯. 聚丙烯的增韧改性和结晶行为研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
YIN Ziwen. Study on Toughening modification and crystallization

- behavior of polypropylen[D]. Changchun : Changchun University of Technology, 2025.
- [8] 胡明磊,等. 工程塑料应用, 2025, 53(10):8-16.
HU Minglei, et al. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 8-16.
- [9] YUAN Meijiao, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, (prepublish):1-20.
- [10] 李永桂,等. 塑料科技, 2024, 52(11):96-99.
LI Yonggui, et al. Plastics Science and Technology, 2024, 52(11): 96-99.
- [11] 李春晖,等. 塑料科技, 2024, 52(7):131-134.
LI Chunhui, et al. Plastics Science and Technology, 2024, 52(7): 131-134.
- [12] 路宝翠,等. 合成材料老化与应用, 2025, 54(2):8-10, 56.
LU Baocui, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2025, 54(2):8-10, 56.
- [13] 陆雨希,等. 化工管理, 2023(15):67-69.
LU Yuxi, et al. Chemical Engineering Management, 2023(15): 67-69.
- [14] 倪洋洋. 聚丙烯包装材料改性的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2017.
NI Yangyang. The modification reserch of polypropylene packaging materials[D]. Tianjin :Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [15] TU Zhe, et al. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 87. DOI:10.1016/J. JLP. 2023. 105226.
- [16] CHEN Xinyu, et al. Polymer Degradation and Stability, 2025, 242. DOI:10.1016/J. POLYMDEGRADSTAB.2025.111628.
- [17] LIU Qinling, et al. Polymer Degradation and Stability, 2025, 239. DOI:10.1016/J. POLYMDEGRADSTAB.2025.111376.
- [18] 胡书浩,等. 塑料包装, 2022, 32(4):1-9, 24.
HU Shuhao, et al. Plastics Packaging, 2022, 32(4):1-9, 24.
- [19] 尹芬,等. 包装工程, 2016, 37(11):27-31.
YIN Fen, et al. Packaging Engineering, 2016, 37(11):27-31.
- [20] 于洋,等. 橡塑技术与装备, 2025, 51(10):1-4.
YU Yang, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2025, 51(10):1-4.
- [21] 王思泽,等. 化学通报(中英文), 2025, 88(11):1 185-1 194.
WANG Size, et al. Chemistry, 2025, 88(11):1 185-1 194.
- [22] KRAŚNIEWSKA K, et al. Molecules, 2025, 30(10). DOI:10.3390/ MOLECULES30102118.
- [23] 尹芬. PP包装材料透明性能改性的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
YIN Fen. Study on polypropylene packaging materials transparent modification[D]. Tianjin :Tianjin University of Science and Technology, 2016.
- [24] 孔萍,等. 包装工程, 2008(2):24-26, 57.
KONG Ping, et al. Packaging Engineering, 2008(2):24-26, 57.
- [25] 雷珍珠,等. 塑料, 2025, 54(1):9-14.
LEI Zhenzhen, et al. Plastics, 2025, 54(1):9-14.
- [26] 赵誉钦,等. 离子交换与吸附, 2025, 41(3):200-207.
ZHAO Yuqin, et al. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(3): 200-207.
- [27] 龙思宇,等. 工程塑料应用, 2023, 51(10):186-191.
LONG Siyu, et al. Engineering Plastics Applications, 2023, 51 (10):186-191.
- [28] 郭月圆. 纳米抗菌剂改性聚丙烯的性能研究[D]. 沈阳:沈阳化工 大学, 2023.
GUO Yueyuan. Research on the properties of nanometer antibacte- rial agent modified polypropylene[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2023.
- [29] 刘敏,等. 食品工业科技, 2025, 46(24):269-278.
LIU Min, et al. Science and Technology of Food Industry , 2025, 46(24):269-278.
- [30] MAYAKRISHNAN V, et al. Food and Bioprocess Technology, 2024, 18(4):1-13.
- [31] BANERJEE C, et al. Bioresource Technology Reports, 2025, 31. DOI:10.1016/J.BITEB.2025.102235.
- [32] HAZER B, et al. ACS Omega, 2025, 10(31):34 227-34 237.
- [33] 张帅. 具有亲水和抗菌性能聚丙烯母粒的制备与性能研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2023.
ZHANG Shuai. Preparation and properties of polypropylene masterbatch with hydrophilic and antibacterial properties[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2023.
- [34] VIDAL F, et al. Nature, 2024, 626(7997):45-57.
- [35] SAYED G G, et al. Journal of Polymer Research, 2025, 32(11). DOI:10.1007/S10965-025-04651-2.
- [36] JEONG Y, et al. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 42. DOI: 10.1016/J.FPSL.2024.101266.
- [37] HOANG-LINH N, et al. Carbohydrate Polymers, 2021, 271. DOI: 10.1016/J.CARBPOL.2021.118421.
- [38] ANNAMARIA G, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(3-4):2 291-2 309.
- [39] JONG H K, et al. Progress in Organic Coatings, 2022, 163. DOI: 10.1016/J.PORGCOAT.2021.106634.

(上接第211页)

- [37] 陈嘉琳,等. 化工新型材料, 2024, 52(9):48-53.
CHEN Jialin, et al. New Chemical Materials, 2024, 52(9):48-53.
- [38] LIU Jian, et al. Cellulose, 2020, 27(15):9 027-9 043.
- [39] KIM H H, et al. Journal of Materials Science, 2023, 58(15): 6 850-6 864.
- [40] ZHANG Zheng, et al. Cellulose, 2024, 31(3):1 891-1 907.
- [41] JIANG Guangyong, et al. Chemical Engineering Journal, 2023, 451. DOI:10.1016/j.cej.2022.137823.
- [42] GUO Shangzhen, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(2):815-828.
- [43] FU Hao, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(1). DOI:10.1002/app.47488.
- [44] ZHANG Jingnan, et al. RSC Advances, 2020, 11(1):433-441.
- [45] CARTER P, et al. RSC Sustainability, 2024, 2(10):2 968-2 978.