建筑用聚丙烯抗冲击排水管的性能优势

冯小婧[1],赵文玉[2]*

(1.中铁四院集团南宁勘察设计院有限公司,广西 南宁 530000;2.桂林理工大学
流域保护与绿色发展广西高校工程研究中心,广西 桂林 541000)

摘　要:为应对传统排水管材在耐腐蚀性、低温韧性及结构效率方面日益凸显的工程局限,建筑用聚丙烯(PP)抗冲击排水管通过系统的材料改性与结构创新实现了综合性能的显著突破。文章系统阐述弹性体增韧、β晶型诱导、矿物增强及协同改性等途径对PP基体抗冲击性能的提升机理,分析多层复合、波纹结构及缠绕中空壁等先进管道设计在轻量化、水力优化及长期可靠性等方面的综合优势。研究表明,PP抗冲击排水管在严苛工况下展现出优异的力学性能、化学稳定性及长期使用寿命。文章为现代建筑排水系统提供兼具高效能与高适应性的管道解决方案。

关键词:聚丙烯;抗冲击性能;材料改性;结构设计;建筑排水;管道工程

中图分类号:TQ325.1+4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)08-0212-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.037

Performance Advantages of Polypropylene Impact Resistant Drainage Pipes For Building

FENG Xiaojing[1], ZHAO Wenyu[2]*

(1. China Railway Siyuan Group Nanning Survey and Design Institute Co. , Ltd. , Nanning 530000, China;
2. University Engineering Research Center of Watershed Protection and Green Development,
Guilin University of Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: To address the increasingly prominent engineering limitations of traditional drainage pipe materials in terms of corrosion resistance, low-temperature toughness, and structural efficiency, impact resistant polypropylene (PP) drainage pipes for building applications have achieved significant breakthroughs in comprehensive performance through systematic material modification and structural innovation. The paper systematically elucidates the mechanisms by which elastomer toughening, β-crystal modification, mineral reinforcement, and synergistic modification approaches enhance the impact resistance of the PP matrix, and analyzes the comprehensive advantages of advanced pipe designs, including multilayer composite, corrugated structure, and spiral hollow-wall configurations, in terms of lightweighting, hydraulic optimization, and long-term reliability. Research demonstrates that PP impact resistant drainage pipes exhibit excellent mechanical properties, chemical stability, and extended service life under harsh operating conditions. The paper offers a piping solution that combines high efficiency and high adaptability for modern building drainage systems.

Keywords: PP; Impact resistance; Material modification; Structural design; Building drainage; Pipeline enginering

随着城市化进程的加快和建筑技术的持续发展,建筑排水系统对管材性能的要求日益提高[1]。材料科学与制造技术的进步推动高分子复合材料在建筑排水管道领域的广泛应用,显著提升管道的综合性能[2]。聚丙烯(PP)作为一种半结晶热塑性聚合物,具有价格低廉、耐酸碱腐蚀、轻便、无毒等优点[3],在包装材料[4]、汽车部件[5]、医疗器械[6]及纺织等领域得到广泛使用。建筑用PP抗冲击排水管多以嵌段共聚PP[7]或无规共聚PP[8]为基体,这类管材在土工合成增强、混凝土/砂浆增强、防渗与排水等重要领域应用广泛[9],耐温性可达到90 ℃以上,适用于冷热水管道系统[10]。上述优异性能使PP纤维复合材料在关键性能上超越传统排水材料,在耐久性、抗腐蚀性要求较高的排水工程中,可

收稿日期Submitted date 2025-11-23;修回日期Revised date 2025-12-29;录用日期Accepted date 2026-01-31
基金项目:国家重点社科基金项目(桂科ZY24212055)
*联系人,m18577187748@163.com
引用本文:冯小婧,赵文玉.建筑用聚丙烯抗冲击排水管的性能优势[J].塑料科技,2026,54(8):212-216.
Citation:FENG X J, ZHAO W Y. Performance advantages of polypropylene impact resistant drainage pipes for building[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 212-216.

作为传统管材的替代材料[11]。然而，单一PP材料因自身固有的疏水特性、分子链缺乏极性官能团、缺口敏感性高及缺口冲击强度低等不足，难以直接满足排水管对高抗冲性能的要求[12-15]。因此，针对PP进行改性已成为提升其性能的重要途径和研究趋势[16]。国内外研究人员已围绕PP共混改性开展大量工作，主要包括弹性体共混[17]和无机填料填充[18]等，以改善其抗冲击性能。本文将从PP材料增强改性、PP排水管结构设计等方面系统阐述建筑用PP抗冲击排水管的最新研究进展，为高性能PP排水管的开发及应用提供参考。

1 PP材料抗冲击性能的增强改性

1.1 弹性体增韧

PP因玻璃化转变温度较高，在低温下抗冲击性能较差[19]。因此，引入弹性体与PP共混成为改善其韧性的重要途径。弹性体增韧是提升PP抗冲击性能的关键改性技术，其核心在于向PP刚性基体中引入橡胶相，通过“应力集中-空穴化-剪切屈服”的微观能量耗散机制实现韧性跃升[20]。当材料受到冲击载荷时，分散在基体中的弹性体微粒(粒径在0.2~1.0 μm范围内)作为应力集中点，引发自身或界面空穴化，释放三维静水张力。空穴化引发体积膨胀，导致周围PP基体发生大规模的剪切屈服与银纹化，耗散冲击能量，抑制裂纹扩展。

陈锋等[21]以聚烯烃弹性体(POE)为添加剂，研究不同POE掺量对PP复合物性能的影响。结果表明：复合材料的拉伸性能随着POE质量分数的增加呈逐渐下降的趋势；材料的断裂伸长率、抗弯强度、抗冲击性能随着POE质量分数的增加呈先上升后下降的变化规律；由于填充体系的加入，复合材料的热稳定性得到提高，当POE质量分数为6%时，材料的热稳定性及综合力学性能达到最优，抗冲击性能达到60.8 kJ/m^2。

刘宇飞等[22]对比共聚PP与POE增韧均聚PP两种体系的低温韧性。结果表明：共聚PP在常温缺口冲击强度上更优，而POE增韧均聚PP体系在低温冲击性能上更优；在-30 ℃的低温杜邦冲击测试中，所有POE增韧的均聚PP试样均达到测试要求，但所有共聚PP试样均未达到此项要求。

姚心悦等[23]分别采用苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)、三元乙丙橡胶(EPDM)和POE 3种弹性体增韧剂对聚丙烯/稻壳纤维(PP/RH)复合材料进行增韧改性。结果表明：3种增韧剂对PP/RH复合材料均具有明显的增韧效果，其中SEBS增韧效果最为显著，常温下冲击强度最高提升102%，低温下最高提升166%；当增韧剂含量较高时，其引入的分散相能够吸收大量冲击能量并将外力传递到稻壳纤维，导致纤维发生断裂，从而进一步提高复合材料的抗冲击性能。

弹性体增韧技术通过对PP材料体系进行多尺度结构调控，有效提升分子链段运动能力及宏观能量耗散能力。该技术不仅为改善PP在低温、动态荷载环境中的服役性能提供可行路径，而且推动聚合物材料性能优化从单一性能向“刚性-柔性”协同设计模式的转变，为高性能PP材料在建筑排水领域的应用奠定基础。

1.2 β晶型诱导

除了引入第二相弹性体的典型方法外，调节PP自身的晶体结构，主要是诱导形成β晶型，也是提高PP管材抗冲击性能的重要的改性方法。

PP中的β晶型属于亚稳态六方晶体结构[24]，β晶型的存在对材料断裂行为具有显著影响。PP在断裂过程中，当裂纹扩展路径遇到β球晶时，会出现裂纹偏转和分支，同时裂纹尖端被钝化，这种特殊的晶体形态和分子排列方式使PP具有良好的冲击能量吸收性能[25-26]。为诱导β晶型的形成，常采用熔体淬火诱导结晶、剪切诱导结晶、振动诱导结晶、温度梯度诱导结晶以及添加β成核剂等方法[27]。其中，β成核剂的应用对PP的结晶行为和力学性能的改善效果尤为显著[28-29]。

康少冉等[30]研究指出，均聚聚丙烯管(PPH)经β成核剂(SY01)成核改性后，当添加SY01成核剂母粒的质量分数为12%、纳米碳酸钙的质量分数为10%时，改性材料刚韧性能达到最佳，拉伸强度达到32.6 MPa，简支梁缺口冲击强度达到76.7 kJ/m^2。

李永桂等[31]采用β成核剂对PP进行改性，制得β成核剂质量分数为5%的PP母粒。研究表明：β成核剂对均聚PP的冲击韧性有明显提升效果；当β成核剂质量分数为0.02%时，常温缺口冲击强度由5.0 kJ/m^{2}提高到9.1 kJ/m^2，增幅为82%；当β成核剂质量分数增加到0.15%时，常温缺口冲击强度达到最高值11.5 kJ/m^2，比初始值5.0 kJ/m^{2}提高130%；材料低温下的冲击强度随β成核剂添加量的增加而不断提高，从2.0 kJ/m^{2}提高至2.6 kJ/m^2，增幅为30%。

β成核技术在提高PP韧性方面已经被证实，因此现有研究除了对β成核技术的改性工艺进行优化外，更加关注高效、稳定且与PP相容性良好的新型β成核剂的开发。日本新理化公司研发的N,N'-二环己基-2,6-萘二甲酰胺，作为一类性能优越的高效β型成核剂，展现出与PP良好的相容性。HORVÁTH等[32]制得N,N'-二环己基甲酰胺同系物，当其质量分数为0.2%时，可诱导PP中生成约60%的β晶型，从而显著提升材料的冲击韧性。

β晶型诱导作为一种基于材料本征结构的增韧技术，为提升PP性能提供新的思路。通过对β成核剂的分子设计与加工工艺的精准调控可有效提高PP基体的固有韧性。当与传统的弹性体增韧技术联用时，两者可产生显著的协同效应，从而实现材料抗冲击性能的显著提高。

1.3 矿物增强

矿物增强是PP排水管抗冲击改性技术体系中调控刚韧平衡与尺寸稳定性的重要技术路径。利用特定形貌的

无机刚性粒子在PP基体中构建多尺度增强网络，冲击过程中粒子引发基体剪切屈服并通过自身断裂、界面脱黏及裂纹偏转等多种耗能机制吸收冲击能量。与弹性体增韧相比，矿物增强体系在提升冲击韧性的同时能够更好地保持材料的刚性、耐热性及尺寸稳定性，因此更适用于承压管道。

滑石的加入可有效提升PP的抗冲击性能。邹勇等[33]研究发现，滑石粉细度越高，其比表面积越大，颗粒与聚合物基体的接触面积也随之增大，从而使复合材料的抗冲击性能显著提高。在该实验中，通过系统考察滑石粉细度对材料性能的影响，观察到简支梁冲击强度随滑石粉细度的增加呈现显著上升的趋势，由10.7 kJ/m^{2}提升至12.3 kJ/m^2，而悬臂梁的冲击强度亦相应增长，从11.1 kJ/m^{2}提升至13.6 kJ/m^2。因此，在滑石的超细加工过程中，对其细度的精准控制至关重要。

梁津昊等[34]利用高压碳化法在重质碳酸钙(GCC)表面原位生长纳米碳酸钙，制备表面包覆纳米碳酸钙的GCC，将改性GCC填充至PP中，发现复合材料的冲击强度较未改性GCC填充体系提高28.86%。

不同种类填料的协同效应也很重要。万嘉欣等[35]研究发现，引入改性煅烧高岭土与改性云母可显著增强PP的冲击性能。当两种填料各添加5%进行协同填充时，复合材料的冲击强度较纯PP提高35.6%。这一增强效果主要归因于填料异相成核作用所导致的基体结晶度提升。然而，需注意的是，尽管上述成分能够有效改善冲击韧性，但云母的引入会引起复合材料拉伸强度的轻微下降。

矿物增强技术是实现“刚韧平衡”的关键路径，与弹性体增韧不同，矿物增强技术通过特定形貌的无机刚性粒子(滑石粉、碳酸钙、高岭土等)显著提高冲击韧性，同时保持材料刚性、耐热性和尺寸稳定性，使PP排水管具有良好的综合力学性能和工程应用性。

1.4 复合改性

单一改性手段虽有一定效果，但难以同步实现强度、韧性、耐热性等多方面的协同提升。为此，复合改性通过多技术整合构建多尺度协同的性能优化体系，成为突破性能局限的重要途径。复合改性并非多种添加剂的叠加，而是基于对“材料-界面-结构-性能”关系的深入理解，将弹性体增韧、β晶诱导、矿物增强等多种增韧机理在分子、微观及宏观层面整合成一体，从而达到刚性、韧性、短期强度与长期耐久性、加工可行性及应用需求之间的统筹兼顾。

β晶型诱导与弹性体增韧的协同效应在具体研究中得到有力的验证。李姝姝等[20]研究采用PP为基体，SEBS和β成核剂(β-NAs)为增韧剂，采用熔融共混法，制备PP/SEBS/β-NAs共混物，当添加质量分数为20%的SEBS和0.05%的β-NAs时，PP/SEBS/β-NAs共混物样品的冲击强度达到76.1 kJ/m^2，比纯PP的3.9 kJ/m^{2}提高1 851.3%，表明SEBS与β-NAs协同增韧PP的同时还能够改善PP的加工性能。

材料性能的优化，本质上依赖组分的相互作用。梁一萌等[36]选用三元共混体系协同效应对PP进行增韧增强，弹性体选POE和乙丙橡胶(EPM)，刚性粒子选玻璃纤维(GF)和碳酸钙。碳酸钙与GF具有相近的增强效果，但碳酸钙会大幅降低材料韧性。POE的增韧效果优于EPM。其中，样品70%PP/15%POE/15%GF在刚性、韧性及综合力学性能间达到最佳平衡，为多组分协同设计提供直接依据。

为进一步验证复合改性策略的工程实用性，董红艳等[37]构建PP/丁苯橡胶/碳酸钙三元复合体系。经配比优化后，该体系的拉伸强度达19.5 MPa，冲击强度达25.5 kJ/m^2，展现出优异的力学性能。在老化处理后，该体系仍保持稳定的耐磨性能，磨耗损失仅增加2%，充分体现复合体系在长期耐久性方面的技术优势。

复合改性标志着PP抗冲击材料正朝着系统化与精准化方向迈进。该策略通过多机理协同与多尺度结构设计，突破单一改性手段的性能局限，实现材料韧性、刚性、耐久性及可加工性的最佳协同。这一技术途径不仅为高性能PP排水管的开发奠定材料基础，更体现高分子材料设计从“经验混合”向“结构-性能一体化调控”的范式转变。

2 PP排水管结构设计

2.1 多层复合结构设计

PP排水管的管壁有单层和三层两种不同的类型，该材料具备噪声低、抗高温、耐化学腐蚀、防冻裂、可循环利用等多种性能优势。三层构造的PP管在减振降噪方面尤为出色，能够有效改善静音效果[38]。图1为三层结构PP排水管。从图1可以看出，三层构造内层为光滑PP层，可减少流动阻力，防止结垢；中间层为增韧吸音层，含有弹性体和矿物填料，可降低水流噪声；外层为增强保护层，可提高耐候性和机械强度。这种采用三层共挤成型的设计，使管材功能梯度分布，综合性能最佳。

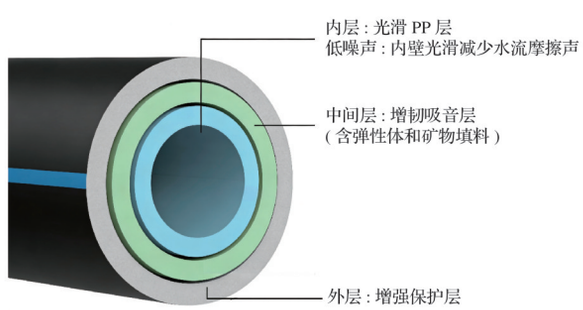


图1 三层结构PP排水管

Fig.1 PP drainage pipe with three-layer structure

吕建兵等[39]认为，在排水过程中，波纹管结构周期性凹凸轮廓会诱导产生周期性涡流，加剧水流扰动和湍流强度，严重降低结晶物质在管壁上的附着概率和速率。流固耦合和相场法数值模拟表明，波纹结构相比光滑内壁结晶

沉积速率降低30%~45%，可延缓排水管化学淤堵进程。

结构改进是提升建筑用PP排水管综合性能的重要途径。多层复合结构可实现降噪功能以及耐候能力与力学性能的系统整合。波纹结构可借助流场调控效应有效抑制化学淤积。两种结构改进方案分别针对建筑排水的声学环境与长期通畅性问题，为PP排水管在严苛工况下的高性能可靠应用提供实用的解决方案。

2.2 缠绕结构壁管技术

图2为缠绕结构PP排水管。从图2可以看出，高性能缠绕结构壁管由PP型材经螺旋缠绕、熔接成型后形成中空结构壁，具有较高的比强度和良好的抗变形能力。

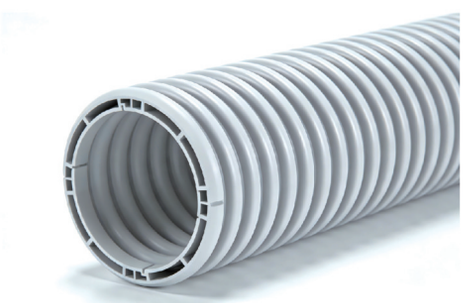


图2 缠绕结构PP排水管

Fig.2 PP drainage pipe with winding structure

向前程等[40]针对中空壁塑钢缠绕排水管，采用“Ω”形钢骨架加上柔性内壁的复合结构，实现刚性承载和柔性协调的统一。钢骨架使核心环刚度达到SN16，而柔性内壁却可以吸收冲击，适应形变，这样管材在动态荷载和软土地基之下具备高抗压性、抗疲劳性和良好的形变协调能力，综合工程性能优于传统混凝土排水管。

王秋腾[41]采用高模量PP材料制备PP缠绕管。结果表明，相较于传统高密度聚乙烯中空壁缠绕管，在相同口径与环刚度要求下，材料用量可减少15%以上。其环刚度随时间呈稳定上升趋势(达到B1 600等级)，展现出优异的长期力学性能。同时，该材料兼具良好的抗老化性、耐热性及焊缝拉伸强度。与实壁管相比，缠绕结构壁管在相同环刚度条件下，可节省材料20%~30%，生产工艺灵活，可制造口径达3 000 mm的大直径管道。管道内壁光滑，水流性能优越，摩擦系数仅为0.009，低于混凝土管的0.014。缠绕管采用承插式电熔连接，整体性强，密封性好，特别适用于市政排水及工业废水输送等工程场景。

缠绕结构壁管技术通过独特的螺旋缠绕和中空结构设计，使PP排水管在保持良好力学性能的同时有效优化材料用量。该结构使管材具有优异的环刚度与形变协调能力，具备良好的长期性能稳定性与水力性能。同时，其可靠的连接方式保障管道系统的整体密封性，为建筑排水工程提供兼具轻量化与高性能的管材解决方案。

2.3 接口与连接技术

接口是排水管的薄弱部分，其密封性与连接可靠性直接影响整体稳定性。优化接口设计对防止泄漏和提高系统可靠性具有重要意义。

橡胶密封圈承插连接利用橡胶密封圈的柔性，依靠压缩橡胶密封圈达到密封[42]。该技术安装便捷，可以补偿温度变化或地基沉降产生的轴向和角向位移，抗变形能力强，适合地质条件复杂、室外埋地和室内非压力排水系统。热熔连接包括承插、对接和电熔，通过加热使PP材料熔融结合，形成与管材本体性能一致的接口[43]。该技术具有优异的环刚度和可靠的密封性能，可以承受水锤、压力波动和长期应力作用，从而显著降低泄漏风险。因此，该管道系统特别适用于高层建筑立管、压力输送及高防渗等级要求的工程场景[44]。无论是橡胶密封圈的柔性密封，还是热熔连接的本体融合，其核心目标均在于将兼具抗冲击、耐腐蚀及低流阻特性的PP管段整合为密封可靠、结构稳固且能够适应动态服役环境的管道系统。先进的接口技术增强了PP管材的固有性能优势，确保系统在低噪声状态下运行，避免因接口泄漏或振动而破坏声学品质，维持光滑内壁的水力连续性，防止局部紊流及沉积生成。更重要的是，先进的接口技术保证管道系统具有优异的抗冲击能力与形变协调能力，使其能够有效抵御施工荷载、地基沉降及建筑结构变形等长期作用，从而真正实现建筑排水系统安全、低噪、耐久的高性能目标。由此可见，接口与连接技术的精细化与标准化是充分发挥建筑用PP抗冲击排水管综合性能优势的关键环节。

3 结论

建筑用PP抗冲击排水管的性能优势能否充分发挥，取决于材料改性技术与结构设计创新的协同推进。在材料层面，弹性体增韧、β晶型诱导及矿物增强等手段通过多尺度多机理的协同作用有效克服PP材料低温脆性高的固有缺陷，实现了材料韧性、刚性与长期耐久性的协同优化。复合改性仍是当前重要的技术发展方向，借助多种增强机制的耦合，前沿研究正逐渐突破传统的经验式共混模式，朝着“结构-性能一体化”的精准设计理念迈进。

在结构层面，多层复合结构、波纹结构以及缠绕中空壁等创新设计不仅显著改善管材的力学性能和流体输送特性，还有效缓解排水噪声与淤积堵塞等实际工程问题。同时，针对连接接口的优化设计也为管道系统提供可靠的长期密封保障。

PP抗冲击排水管凭借轻质、高强、耐腐蚀、抗冲击及设计灵活等综合优势，有效弥补传统管材在严苛工况下的性能不足，尤其适用于严寒、腐蚀及振动等恶劣环境。未来，随着改性技术的持续进步与绿色制造理念的深入推广，该管材在提升建筑排水系统安全性、耐久性及可持续性方面将展现出更大的应用潜力。

参考文献

[1] 张裕健. 新型材料在给排水领域的应用分析[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(11): 65-67.

[2] 周铄. 高分子复合材料在给排水管道中的应用研究进展[J]. 合成材

料老化与应用, 2025, 54(6): 63-66.
[3] PASZKIEWICZ S, ANDRZEJEWSKI J, GROCHAŁA D, et al. Thinking green on 3D printing: Sustainable polymer compositions of post-consumer polypropylene and tire rubber crumbs intended for industrial applications[J]. Materials, 2024, 17(21): 5209.
[4] HOSSAIN M T, SHAHID M A, MAHMUD N, et al. Research and application of polypropylene: A review[J]. Discover Nano, 2024, 19 (1): 2.
[5] 云宁. 聚丙烯复合材料在车用内饰件中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(1): 75-77.
[6] ELBAKYAN L, ZAPOROTSKOVA I. Polypropylene modified with carbon nanomaterials: Structure, properties and application: A review [J]. Polymers, 2025, 17(4): 517.
[7] 唐钰, 李少阳, 张龙波. PP-B管材料结晶行为、力学性能和热学性能的改性[J]. 塑料工业, 2023, 51(9): 163-168.
[8] 蔡豪坤. 给水用PP-R管材熔融温度不确定度评定[J]. 现代塑料加工应用, 2023, 35(5): 36-39.
[9] 程子卿, 卢成帅, 陈钊, 等. 聚丙烯纤维在土木工程中的应用研究进展 [J/OL]. 塑料科技, 1-10[2025-12-29]. https://link. cnki. net/urlid/21.1145.TQ.20251229.1134.002.
[10] 周燕涛. 新型给排水工程材料在住宅建筑中的应用及其节能效果研究[J]. 居舍, 2025(16): 70-72.
[11] 李玉娥, 俞峰, 者东梅, 等. 管材专用高刚性聚丙烯耐蠕变性能评价方法影响因素研究[J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(4): 59-64.
[12] LIU C, SHI J Y, LUO F X, et al. Preparation, characterization and antibacterial properties of hydro-charged melt-blown nonwovens coated with an *N*-halamine[J]. New Journal of Chemistry, 2024, 48(45): 19355-19363.
[13] ÇINÇIK E, ASLAN E. Assessing the sound and heat insulation characteristics of layered nonwoven composite structures composed of meltblown and recycled thermo-bonded layers[J]. Polymers, 2024, 16 (10): 1391.
[14] 柳宏伟, 董国亮, 温彦博, 等. 聚丙烯改性技术研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 219-224.
[15] 石敏, 朱建华, 吉玉碧, 等. DCP对动态硫化EPDM/PP性能的影响[J]. 塑料科技, 2016, 44(12): 27-31.
[16] YAMAMOTO K, ASAHARA H, HARADA K, et al. One-step antibacterial modification of polypropylene non-woven fabrics via oxidation using photo-activated chlorine dioxide radicals[J]. Journal of Materials Chemistry, B, 2023, 11(23): 5101-5107.
[17] WANG G, DONG M Y, DENG H H, et al. Polypropylene foaming using supercritical carbon dioxide: A review on fundamentals, technology, and applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 8(1): 84.
[18] QIU J, LYU J W, YANG J L, et al. Review on preparation, modification and application of nano-calcium carbonate[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2024, 41(11): 2400097.
[19] 赵文朋, 李嘉程. 弹性体物理增韧聚丙烯的研究进展[J]. 广东化工, 2025, 52(22): 70-72.
[20] 李姝姝, 程鹏飞, 马应霞, 等. SEBS与β-NAs对PP的协同增韧作用及增韧机理研究[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 282-289.
[21] 陈锋, 董斌. 抗老化PP复合管材的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 61-65.
[22] 刘宇飞, 黎造文, 徐博, 等. 共聚聚丙烯和增韧均聚聚丙烯低温韧性研究[J]. 广州化工, 2025, 53(13): 50-52.
[23] 姚心悦, 方超, 徐彦, 等. 不同增韧剂对聚丙烯/稻壳纤维复合材料的性能影响[J]. 广东化工, 2024, 51(24): 39-42.
[24] IWASAKI S, YAMAZAKI A, HATAKEYAMA K, et al. Preparation of microporous film composed of polypropylene containing β -form nucleating agent[J]. Nihon Reoroji Gakkaishi, 2022, 50(2): 171-179.
[25] 许文杰, 吴波, 陈俊, 等. 聚丙烯酰胺类β成核剂研究进展[J]. 塑料助剂, 2023, (3): 38-48, 77.
[26] MI D S, LIU H, ZHANG L, et al. The changes of microstructure and physical properties of isotactic polypropylene/β nucleation agent/ polyolefin elastomer induced by annealing following processing[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2015, 54(11): 1376-1390.
[27] 郭俊强, 李倩, 罗志, 等. 聚丙烯β成核剂的研究进展[J]. 高分子通报, 2022, 35(7): 11-21.
[28] 魏聪, 施智勇, 张华珅, 等. 可控增压条件下等规聚丙烯/β-成核剂的结晶行为研究[J]. 高分子学报, 2024, 55(12): 1742-1753.
[29] 乔泽爽, 邹发生, 宋文波, 等. 基于结晶调控制备低收缩聚丙烯[J]. 高分子学报, 2023, 54(8): 1186-1195.
[30] 康少冉, 马乐波, 闫鹏, 等. 纳米改性β-晶聚丙烯高性能材料的制备及性能研究[J]. 化工管理, 2023(16): 145-147.
[31] 李永桂, 李剑, 李彭, 等. β成核剂对聚丙烯性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 96-99.
[32] HORVÁTH F, BIHARI L, BODROGI D, et al. Effect of N, N′-dicyclohexyldicarboxamide homologues on the crystallization and properties of isotactic polypropylene[J]. ACS Omega, 2021, 6(13): 9053-9065.
[33] 邹勇, 张晓明, 王振, 等. 超细滑石粉在PP及PVC领域的应用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(6): 73-75.
[34] 梁津昊, 燕溪溪, 张素娜, 等. 纳米碳酸钙包覆重质碳酸钙增强聚丙烯复合材料力学性能的研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2025, 42 (1): 10-16.
[35] 万嘉欣, 侯桂香, 谢建强. 煅烧高岭土与云母复配改性聚丙烯及其力学性能研究[J]. 云南化工, 2024, 51(12): 97-101.
[36] 梁一萌, 王奕舒, 吴枫, 等. POE/GF协同增韧增强聚丙烯研究[J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37(4): 1-3.
[37] 董红艳, 魏风军. SBR/$CaCO_3$协同改性聚丙烯复合物及其在输送带覆盖胶中的应用研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 130-135.
[38] 安晓超, 李鸿, 王亚倩, 等. 建筑排水管隔声降噪研究及技术措施探讨[J]. 中国住宅设施, 2024(5): 140-142.
[39] 吕建兵, 陈祖儒, 李佳, 等. 波纹排水管结晶沉积机理及应用研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 24-37.
[40] 向前程, 段宇帆, 刘兴华. 中空壁塑钢缠绕排水管在市政排水工程中的应用[J]. 四川水力发电, 2025, 44(3): 34-37.
[41] 王秋腾. 聚丙烯中空壁缠绕管的开发研究[J]. 广东建材, 2020, 36(4): 16-18.
[42] 王伟, 胡艺. HTPP静音排水管施工技术应用研究[J]. 住宅与房地产, 2024(29): 123-125.
[43] 李世昌, 向青云, 杨亮, 等. PUR热熔胶对PP、PC的防水密封效果的研究[J]. 汽车工艺与材料, 2019(5): 59-63.
[44] 傅铭洋. 市政工程道路排水管道施工技术分析[J]. 居业, 2021(12): 122-123.