

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.024

聚丙烯用有机羧酸盐类成核剂的研究进展

袁美娇, 卢翠红, 张跃飞

(长沙理工大学化学化工学院, 电力与交通材料保护湖南省重点实验室, 长沙 410114)

摘要: 成核剂改性具有用量少、操作简单且效果显著等优点, 被广泛应用于聚丙烯加工过程中。为推进有机羧酸盐类成核剂在聚丙烯改性中的应用, 实现聚丙烯的高性能化, 简述了近十几年来有机羧酸盐类成核剂的研究进展, 介绍了不同种类的 α 、 β 晶型有机羧酸盐类成核剂。 α 晶型成核剂主要有苯甲酸盐金属盐、取代苯甲酸盐金属盐、六氢化邻苯二甲酸盐金属盐、邻苯二甲酸盐等; β 晶型成核剂有芳香族及脂肪族二元羧酸盐金属盐等。此外, 针对有机羧酸盐类成核剂目前存在的问题提出相应解决措施, 总结展望未来发展。

关键词: 聚丙烯; 成核剂; 羧酸盐; α 晶型成核剂; β 晶型成核剂

中图分类号: TQ320.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0121-06

Research progress of organic carboxylate nucleating agents for polypropylene

YUAN Meijiao, LU Cuihong, ZHANG Yuefei

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Hunan Province Key Laboratory of Materials Protection for Electric Power and Transportation, Changsha 410114, China)

Abstract : Nucleating agent modification has the advantages of low dosage, simple operation, and significant effect, and is widely used in polypropylene processing. To understand the application of organic carboxylate nucleating agents in polypropylene modification and realize the high-performance of polypropylene better, the research progress of organic carboxylate nucleating agents in the past decade was summarized, and different types of α and β crystalline organic carboxylate nucleating agents were introduced. The main α crystalline nucleating agents included alkali metal benzoate, substituted metal benzoate, hexahydrophthalic acid metal salt, phthalic acid salt, and so on. β nucleating agents included aromatic and aliphatic dicarboxylic acids metal salts. Additionally, the current challenges faced by organic carboxylate nucleating agents and offers potential solutions were addressed while summarizing and forecasting future developments in this field.

Keywords : polypropylene ; nucleating agent ; carboxylate salt ; α nucleating agent ; β nucleating agent

聚丙烯(PP)的发展速度在五大通用塑料中占据首位^[1], 目前被广泛应用于汽车、家电、建筑、航空航天及包装行业中, 在耐溶剂性、力学性能、加工性能以及价格竞争力方面呈现出独特的优势^[2]。但是自然形成的PP球晶尺寸较大, 结晶时间较长, 因此研究PP改性方法已经成为提升PP应用性能的主要趋势。PP的改性方法多种多样, 其中物理改性方法中的成核剂改性由于用量少、操作简单且效果显著, 已经成为PP改性的热门途径。

等规聚丙烯(iPP)在聚丙烯领域中的研究最多, 根据化学结构组成, iPP成核剂可以划分为无机成核剂、有机成核剂及高分子成核剂三大类。有机羧酸盐类成核剂是有机成核剂

中的重要分支, 最早被发现并应用于工业生产。有机羧酸盐是一种分散型iPP增强改性成核剂, 成本较低, 能够均衡提高iPP的刚性、韧性和表面光泽度等^[3], 在注塑成型和压延成型产品上的应用较多。有机羧酸盐类成核剂大致可以分为两类: 一类是环状羧酸盐, 包含芳香环和脂肪环结构, 主要作为 α 晶型成核剂(α -NA)使用; 另一类则以己二酸、庚二酸及其盐类为代表, 属于脂肪族二元羧酸盐类, 主要用作 β 晶型成核剂(β -NA)。笔者综述了近十几年来对于有机羧酸盐类成核剂的研究进展, 并针对目前制约有机羧酸盐类成核剂发展的问题, 提出解决建议与未来展望。

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX20240801)

通信作者: 张跃飞, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子材料改性研究

收稿日期: 2024-10-28

引用格式: 袁美娇, 卢翠红, 张跃飞. 聚丙烯用有机羧酸盐类成核剂的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 167-172.

YUAN Meijiao, LU Cuihong, ZHANG Yuefei. Research progress of organic carboxylate nucleating agents for polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 167-172.

1 有机羧酸盐类 α -NA

iPP是一种典型的半结晶聚合物,具有复杂的多晶型行为,性质可以随着晶体结构改变发生显著变化^[4]。iPP在结晶形态方面主要存在四种不同的晶系,即单斜晶系 α 、三方晶系 β 、正交晶系 γ 和介晶系^[5-6]。 α -NA是iPP树脂晶体形态中最常见且最稳定的晶型^[3], α -NA在iPP树脂中的作用是促进 α 结晶(α -iPP)的形成,能够显著加快iPP的结晶速度,提升结晶温度和结晶度。此外, α -NA还能有效细化晶体结构,从而提高制品的透明度、亮度和刚性,并增强其抗蠕变性能和热变形温度。这些特性使得iPP制品在多种应用中表现出更优异的性能。商品化的iPP主要以 α 晶型为主。

1.1 芳香族羧酸盐类

芳香族羧酸金属盐可大致分为单环和双环,单环芳香族羧酸盐的代表有苯甲酸碱金属盐、取代苯甲酸金属盐、六氢化邻苯二甲酸(HHPA)金属盐、邻苯二甲酸盐等;双环芳香族羧酸盐主要有双(对叔丁基苯甲酸)羟基铝(Al-PTBBA)等。其中苯甲酸钠(Be-Na)及Al-PTBBA已成为应用较好的商用 α -NA。

芳香族羧酸金属盐类成核剂可显著增强iPP的刚性,加速结晶过程,并在一定程度上改善透明性。由于该类成核剂具有较低的生产成本和相对简便的合成方法,通常采用中和反应或复分解反应,因此适用于工业大规模生产。然而,与二苳叉山梨醇类和芳基杂环磷酸盐类成核剂相比,这类成核剂的成核效率较低,主要原因在于芳香族羧酸金属盐类成核剂与iPP的相容性较差,这可能导致成核剂不溶,进而引发混浊现象;此外,成核剂还容易受到光散射等因素的影响,从而引起非同质化效应,进一步降低其在iPP中的分散性^[3],导致该类成核剂不能较好地发挥其成核效果。

有机羧酸盐类成核剂的化学结构呈现出以下几个显著特点。首先,芳香族酸在成核活性上通常优于脂肪族酸;其次,羧酸盐的成核效率普遍高于其对应的羧酸;在不同的金属盐中,钠盐通常表现出最优的成核性能;此外,芳香环上的取代基会抑制成核活性,但是对位取代要优于芳环上的其他位置;并且苯环与羧基之间的支链长度越长,成核效果往往越差。

Be-Na的化学结构表明其在改性iPP过程中具有较大优势,也是最早被研究和应用的单环羧酸盐类成核剂之一,合成工艺简单,但是成核效率较低,主要应用于低端产品中。有研究者提出将Be-Na进行二次开发以提升成核效率,主要途径包括提高纯度、降低Be-Na的粒度以及与其他高档成核剂复配等。尤其是将Be-Na与其他高档成核剂复配,可以有效提高iPP的成核效率,同时Be-Na的成本较低,有利于实现低成本下的高效改性。

此后,以苯甲酸铝和六氢化邻苯二甲酸(HHPA)盐为代表的单环羧酸盐成核剂相继被推出。Zhang等^[7]制备了一系列高效的HHPA金属盐类iPP成核剂,其中HHPA-Na, HHPA-Ca, HHPA-Li都是高效的 α -NA,另外镁、镓盐都体现

出较好的 α 成核特性。六氢化邻苯二甲酸钠(HHPA-Na)表现出最佳的成核效果,当添加质量分数为0.3%时,与空白iPP相比,HHPA-Na成核iPP的结晶峰温度提高了11.8℃。与Be-Na相比,HHPA金属盐的吸湿性更低,更有利于长时间保存。Abreu等^[8]发现六氢化邻苯二甲酸钙(HPN-20E)的加入能够显著改善iPP的拉伸、弯曲和光学性能,大大提高了iPP的结晶速率,减小了球晶尺寸。当HPN-20E的质量分数为0.2%时,改性iPP的结晶峰温度提高了11.2℃,且拉伸弹性模量、拉伸强度、弯曲模量和弯曲强度比空白iPP分别提高了8.65%,10.81%,16.67%和11.96%;雾度值降低了42.44%。这表明六氢化邻苯二甲酸盐在提升iPP应用性能方面具有较好的前景。

Al-PTBBA可以有效提高iPP的刚性和表面硬度,但是与iPP的相容性较差,应用效果受到限制。通过研磨减小成核剂的粒径大小,有助于成核剂在iPP中分散,增强成核活性。Guo等^[9]以异丙醇钛和对叔丁基苯甲酸为原料,引入硅烷醇基团(Si—OH),合成了一种结构类似于Al-PTBBA的成核剂TSD。Si—OH的引入避免了iPP样品产生黄变,且TSD的水解产物SiO₂可视为掺杂的无机成核剂,对iPP具有异相成核作用,使得iPP的结晶温度提高16℃,耐热性、结晶行为和力学性能得到了明显改善。

1.2 脂肪族羧酸盐类

近年来,脂肪族双环羧酸盐作为一种新兴成核剂在聚合物领域逐渐得到发展。相较于传统羧酸盐,双环羧酸盐不仅具备更高的成核效率,还能显著缩短结晶半衰期。此外,这类成核剂还能促进成型聚合物发生各向同性收缩,是特殊性要求聚合物制备的理想选择;其中双环[2,2,1]庚烷二羧酸钠(HPN-68)、双环[2,2,1]-5-庚烯-2,3-二羧酸盐(PA-01, PA-02)已成为目前主流的商用产品。

HPN-68是iPP优良的增刚成核剂,能够细化iPP球晶,提升力学性能。Zhang等^[10]对比了HPN-68,Be-Na和HHPA-Na成核iPP的等温结晶行为。三种成核剂的加入均明显缩短了iPP的半结晶时间($t_{1/2}$),具有良好的成核效果。其中HPN-68的效果最好,结晶半衰期更短,成核密度更高。这体现出HPN-68相较于其他羧酸盐类成核剂,在工业应用中拥有更大优势。Zhang等^[11]采用Lamberti方法,利用等温条件过程中的结晶曲线相关数据计算出核密度,并通过差示扫描量热(DSC)分析研究了HPN-68成核iPP的等温结晶行为。结果表明,HPN-68的加入大大缩短了iPP的 $t_{1/2}$,降低了iPP的结晶速率,使得HPN-68成核的iPP能在较高的结晶温度下完成结晶,且核密度增加。这有利于探索HPN-68改性iPP过程的成核机理。

张泽文等^[12]合成了两种化学结构相似的成核剂,分别为二环[2,2,1]庚-5-烯-2,3-二羧酸钠(NA_1)和二环[2,2,1]庚烷-2,3-二羧酸钠(NA_2)。当添加质量分数0.3%的成核剂时, NA_1 和 NA_2 分别能够使iPP的结晶峰温度提高14.5℃和16.0℃,并显著提升iPP的力学性能;两者都诱导iPP产生 α

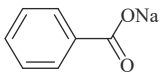
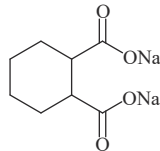
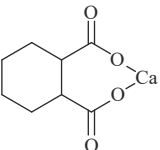
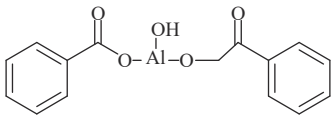
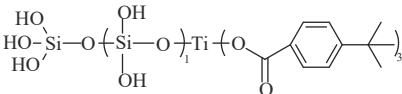
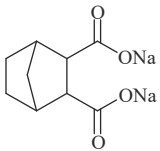
晶型,说明两者均为优良的 α -NA。同时发现,在低添加量下, NA_2 的成核效果仍旧优于 NA_1 。

Zhang等^[13]首次合成了双环[2,2,1]-庚烷-2,3-二羧酸锌双层硅氧烷 $[\text{Zn}_2(\text{DDSQ-ND})]$,并详细研究了0%~1%不同添

加量的 $\text{Zn}_2(\text{DDSQ-ND})$ 成核iPP的结晶行为。 $\text{Zn}_2(\text{DDSQ-ND})$ 的加入使 α -iPP的结晶速率大幅提高,结晶温度超过44℃时,表现出较为显著的成核效果。表1给出了部分典型 α 晶型有机羧酸盐类成核剂的分子结构及应用特点。

表1 部分 α 晶型羧酸盐类成核剂的分子结构

Tab. 1 Molecular structure of some α crystalline carboxylate nucleating agents

Representative varieties	Chemical structure	Application features	References
Be-Na		Cheap, non-toxic, easy to synthesize, and poor nucleation effect	
HHPA-Na		Simple synthesis with good transparency, and inferior nucleation effect compared to commercial nucleating agents	[7]
HPN-20E		Low synthesis cost, good transparency, and inferior nucleation effect compared to commercial nucleating agents	[8]
Al-PTBBA		Hardening nucleating agent, simple synthesis, average transparency, easy to scale in processing equipment	
TSD		Avoiding sample yellowing, significantly improving heat resistance, crystallization behavior, and mechanical properties	[9]
HPN-68		Improved tensile strength and toughness, better performance of composite inorganic fillers, and low cost	[10]

2 有机羧酸盐类 β -Na

β 晶型的iPP(β -iPP)结构较为疏松,结晶度较低,晶体内的径向层与轴向层交叉排列较少,主要以简单层状结构存在,且径向层和轴向层的厚度几乎相等^[14]。在 β -iPP的多孔结晶区域,存在大量由连续分子链连接形成的扩展型链段^[15],这使得其在破坏时能够吸收更多能量,因此具有较好的延展性和韧性^[16-17],成功应用于增韧、管材及微孔纤维等方面。 β 晶型的稳定性不如 α 晶型,且形成条件较为苛刻,需要特定的工艺才能实现^[18],如迅速冷却熔体至一定温度、振动诱导结晶、在结晶过程中施加剪切或拉伸力,或使用 β -NA等。

根据是否含有苯环,二元羧酸金属盐可主要分为芳香族二元羧酸盐和脂肪族二元羧酸盐。二元羧酸金属盐类成核剂具有原料易得、成核效率优异、生产成本低廉以及制备工艺简便等特点,成为工业化生产 β -iPP的重要途径。在实际

应用中,成核剂的添加方式和金属阳离子的来源会影响结晶效率,因此应根据成核剂的性质选择合适的 β -NA制备方法^[19]。

2.1 芳香族二元羧酸盐类

Qin等^[20]通过原位合成法合成了自分散型邻苯二甲酸锌(ZnPht),其对 β -iPP的选择性较高,ZnPht/iPP体系中的 β 晶型相对含量(K_β 值)从74%提高至97%。当ZnPht的质量分数为0.2%时,冲击强度比空白iPP提高了约2.9倍。这一成果将有助于解决其他添加剂在聚合物中分散性差和团聚的问题。李丽等^[21]采用氧化锌与邻苯二甲酸酐,分别通过半固态法和固态法合成了邻苯二甲酸锌,记为ZnPht和ZnPht(S)。当添加质量分数0.2%的ZnPht(S)时,iPP的球晶尺寸较空白iPP减小了81%,并生成了 β 晶。添加成核剂后,iPP的拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率较空白iPP均有显著提高。这体现出自分散体系在同等条件下要优于传统合成的成核

剂,为成核剂成核效果的提升开辟了新思路。

Sun等^[22]合成六氢邻苯二甲酸锌(HHPA-Zn),并证实其在iPP中的 β 晶成核能力。添加HHPA-Zn后,iPP的结晶温度大幅提升,提高了约11.2℃,计算得 K_{β} 值接近0.66,测量其力学性能,发现冲击强度提高了193%。通过晶格匹配理论,成功揭示了HHPA-Zn与iPP之间的结构匹配机制,并进一步探究其成核机理。

Zhao等^[23]发现六氢邻苯二甲酸钡(HHPA-Ba)为新型高效的 β -iPP成核剂,并对改性后iPP的力学性能、 β 晶含量、结晶和熔融行为等进行研究。发现当HHPA-Ba质量分数为0.4%时,成核iPP的 K_{β} 值可达0.80。与空白iPP相比,成核iPP的冲击强度提高了2.4倍。

HHPA金属盐类成核剂是iPP高效的 α -NA或 β -NA, α -NA(如HHPA-Na,HHPA-Ca)可为iPP提供极好的结晶峰温度、刚性和相容性; β -NA(如HHPA-Zn,HHPA-Ba)具有较好的 β 晶成核活性,可显著改善iPP的韧性,提升其应用性能。同时憎水性好,储存稳定性高,制造成本也较低,可成为与有机磷酸盐相媲美的iPP增刚成核剂。探究HHPA金属盐类成核剂的复合成核方法,提高应用效能将具有重要的现实意义。

2.2 脂肪族二元羧酸盐类

丙二酸、戊二酸、庚二酸和辛二酸等及其盐类都可用作 β -iPP成核剂,但是目前辛二酸、庚二酸及其盐类的研究应用最为广泛^[3]。

Wu等^[24]发现脂肪族二元羧酸金属盐类成核剂的成核效率与其碳原子数相关。对于碳链长度位于5~8个碳原子内的脂肪族二元羧酸,其钙、锌、钡盐均为成核效果较好的 β -NA,但己二酸钙和庚二酸锌除外。

Ren等^[25]以己二酸及相应的金属氧化物或氯化物为原料,合成了一系列己二酸金属盐类成核剂。结果表明,己二酸锌(Adi-Zn)和己二酸钡(Adi-Ba)均能有效促进iPP中 β 晶的成核。在这两种成核剂的作用下, β 晶的相对含量均可超过90%。特别是在添加质量分数0.05%的Adi-Zn时, β 晶的相对含量高达94%。Qin等^[26]以己二酸和ZnO为原料,通过原位反应合成了自分散型的己二酸锌[ZnAA(IS)]。通过减小其粒径和避免聚集来提高 β -NA的成核效率。ZnAA(IS)成核iPP的 K_{β} 值达到0.99,显著高于普通ZnAA。相较于空白iPP,添加质量分数0.1%的ZnAA(IS)成核iPP的冲击强度提高近5.3倍,与相同添加量的普通ZnAA相比,净增强率提高了157%。这表明通过原位反应法合成的ZnAA具有更高的成核效率和诱导形成 β 晶的能力。Shen等^[27]采用溶液法制备了ZnAA,通过将其与水滑石(HT)复合对iPP进行改性。当无规抗冲共聚物聚丙烯粉末(SP179)质量分数增加到50%时,iPP的缺口冲击强度和熔体流动速率最大值分别为26.01 kJ·m⁻¹及9.88 g/10 min。且ZnAA,HT和SP179对iPP的改性具有协同效应。这些研究表明,改性iPP可应用于更广泛的领域,如挡泥板、保险杠和内饰部件,发挥更大的性价比。

Zhang等^[28]通过将羧基化石墨烯与庚二酸钙进行化学键

结合,成功合成新型复合成核剂羧基化石墨烯/庚二酸钙(Gra/CaPi)。当向iPP中添加质量分数0.3%的Gra/CaPi时, K_{β} 值显著提升至0.87,同时结晶温度升高了8℃。Gra/CaPi复合成核剂不仅等诱导iPP形成 β 晶,还能通过调节浓度平衡 α 晶和 β 晶的含量,为获得刚性和韧性均优异的iPP提供了可能。He等^[29]利用DSC分析研究了三种 β -NA[芳香族二酰胺(TMB-5)、稀土配合物(WBG-II)和庚二酸钙(CaPi)]在不同条件下对iPP中 K_{β} 值的影响。在最佳添加量和足够低冷却速率的共同作用下,三种成核iPP均能生成丰富的 β 晶。冷却速率为2.5℃/min时,添加质量分数0.15% TMB-5,0.20%WBG-II和0.20% CaPi,改性iPP的 K_{β} 均可达到0.90以上。Zhang等^[30]研究了氧化石墨烯(GO)和CaPi在iPP中的成核作用。经多次热循环后,成核iPP的 K_{β} 值均降低,成核效果变差。从异质形核效应和外延晶化两个方面分析原因,是由于界面张力的作用,成核剂颗粒向表面迁移,再结晶成核剂的形态变化影响晶格匹配。以上结果为 β -iPP制品的加工提供了重要的指导。

Qin等^[31]发现庚二酸锌(ZnPA)对iPP具有高活性和选择性。加入质量分数0.1%的ZnPA, K_{β} 值达到99%,冲击强度较空白iPP提高了2.8倍。在DSC测试中,氮气气氛的液压作用可以促进iPP的结晶,而氮气气氛压力作用很小,两者对ZnPA/iPP样品中 β 晶体的形成几乎没有影响,这体现了使用ZnPA用于工业加工的适用性。

赵文林等^[32]合成了一种新型高效的 β -iPP成核剂, K_{β} 可达87%以上,成核iPP的冲击强度相较于空白iPP可提升2~4倍,同时显著提升了热变形温度。聂莹等^[33]用羧酸金属盐成核剂(PA-03)与纳米蒙脱土(MMT)复合改性iPP,当添加质量分数0.2%的PA-03,3%的MMT时,iPP的冲击强度、拉伸强度和弯曲模量分别提高140%,5.2%和14%, K_{β} 达到35.4%,改性iPP的断裂方式由脆性转变为韧性断裂。这有利于扩大iPP的应用范围。

环状羧酸盐类成核剂所具有的准平面结构,能够与iPP分子链中的特定结构进行配位作用。这一相互作用可能是其能够有效诱导 β -iPP形成的重要因素。脂环族羧酸盐类成核剂不仅具有羧酸盐类成核剂合成过程简便、成核效率优异等特点,还兼具了稠环芳烃类成核剂的优势^[19]。

降冰片烯二羧酸盐作为成核剂能够提升iPP的结晶温度,该羧酸盐的钠盐(BCHE11)和钙盐(BCHE20)在系列金属盐成核剂中具有较为显著的成核效果。其中钠盐为 α -NA,钙盐、锌盐等为 β -NA。

环状二羧酸盐类成核剂在较低的添加量下就可以诱导iPP产生大量 β 晶,显著提升iPP的韧性及热变形温度。此类成核剂还具有如下特点:(1) β -NA的成核效率高,添加质量分数处于0.08%~0.1%之间, K_{β} 值就能够达到0.90以上;(2)低温韧性改善效果明显,在现有 β -NA中处于领先地位;(3)成核剂热稳定性好,分解温度超过300℃,在多次热历程后仍旧能够保持较高的 β 晶成核能力;(4)与硬脂酸钙具有较好

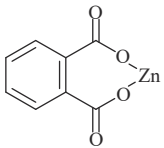
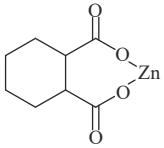
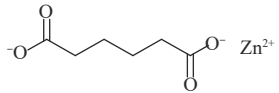
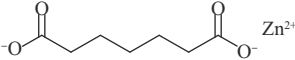
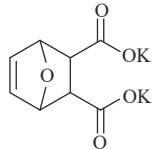
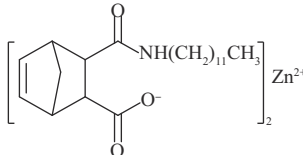
的相容性,硬脂酸钙的加入对其成核能力不构成影响。

Broda 等^[34]发现 7-氧杂双环[2,2,1]庚-5 烯-2,3-二羧酸钾(OBCHE 19)在低添加量的情况下,就可以提高 iPP 的力学性能。当添加质量分数为 0.1% 时,iPP 冲击强度相较空白 iPP 提升了 125%,成核 iPP 的 K_β 值达到 0.82。但 OBCHE 19 的浓度具有饱和值,当质量分数超过 0.1% 时,iPP 的力学性能和 K_β 值降低。这是因为 OBCHE 19 在高浓度时会团聚,从而影响成核效率。Liu 等^[35]发现自分散型的双环[2,2,1]

庚-5-烯-2-十二酰胺-3-羧酸锌盐成核剂(NBDA30),可高效诱导 iPP 产生 β 晶。当添加质量分数为 0.1% 时, K_β 值为 0.97,并初步探讨了 NBDA30 诱导 iPP 的成核机理。NBDA30 在原位热分解过程中生成了 ZnO 纳米颗粒,ROO—基团通过化学吸附作用与 ZnO 表面结合,有机羧酸的表面吸附显著增强了 ZnO 纳米颗粒与 iPP 的相容性,使得 ZnO 纳米颗粒的成核效率得到了显著提升。表 2 展示了部分 β 晶型有机羧酸盐类成核剂的分子结构及应用特点。

表 2 部分 β 晶型羧酸盐类成核剂的分子结构

Tab. 2 Molecular structure of some β crystalline carboxylate nucleating agents

Representative varieties	Chemical structure	Application features	References
ZnPht		Using in-situ synthesis method to synthesize the materials with good dispersibility, high nucleation efficiency, and good impact strength	[20]
HHPA-Zn		Efficient β nucleating agent, synthesized by double decomposition method, with good impact strength	[22]
ZnAA		Significant improvement in impact strength at low temperatures	[26]
ZnPA		High activity and selectivity, high content of β crystals, significant improvement in impact strength	[31]
OBCHE 19		High β nucleation efficiency, significantly improving impact strength	[34]
NBDA30		Efficient β nucleating agent with good compatibility with iPP	[35]

3 结语

有机羧酸盐成核剂因成本较低、合成路线简单、成核效率优异等优点而成为工业生产中广泛应用的选择。该类成核剂不仅能够显著提高 iPP 的使用性能,还能有效缩减企业的生产成本,尤其是在大规模生产过程中,具有显著的经济效益。

然而,该类成核剂面临的一个主要问题是透明性较差。在实际应用中,iPP 通常被要求具有较好的透明度,以满足某些高附加值产品的需求。为了克服这一问题,可以通过与其他具有较好透明性的成核剂进行复配,来提高产品的透明

性。通过选择与 iPP 相容性较好的透明性成核剂,可以减少因为成核剂透明性不佳对最终产品外观产生的负面影响。此外,开发超细化的成核剂颗粒也是一种有效的策略。超细化成核剂颗粒可以显著提高其在 iPP 基体中的分散性。良好的分散性有利于成核剂在聚合物基体中的均匀分布,进而促进 iPP 分子的有序排列。这种有序排列将有助于降低结晶缺陷的生成,使得聚合物的整体结晶结构更加致密和规整,因此使材料具有良好的透明性。

通过这些技术手段,不仅可以改善成核剂对 iPP 结晶过程造成的不良影响,还能够有效提高产品的透明性和外观质

量,从而满足更高端市场对 iPP 产品的需求,使得有机羧酸盐类成核剂在工业生产中具有更加广泛的应用前景。

未来,有机羧酸盐类成核剂将会朝复合化、高性能化、多功能化、绿色化等方向发展,继续提升其成核效率,改善 iPP 制品的使用性能,助力聚丙烯行业朝着更高效、更绿色、更智能的方向发展。

参考文献

- [1] CHEN X U, et al. China Plastics, 2024, 38(7):79–85.
- [2] ZHANG D X, et al. Chinese Journal of Polymer Science, 2021(39): 620–631.
- [3] CHEN S, et al. Polymer International, 2024, 73(2):108–118.
- [4] GUO Y, et al. Polymer, 2024. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127723.
- [5] LIU L, et al. Macromolecules, 2021, 54(14):6 824–6 834.
- [6] ABUDUREZHAK A, et al. Polymer Engineering & Science, 2024. DOI:10.1002/pen.26982.
- [7] ZHANG Y F, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021(145):2 379–2 387.
- [8] ABREU A A, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(5):2 197–2 206.
- [9] GUO X, et al. Polymer Engineering & Science, 2023, 63(7):1 989–2 001.
- [10] ZHANG Y F, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 140:2 275–2 282.
- [11] ZHANG K, et al. Journal of Macromolecular Science Part B, 2021, 60(8):531–543.
- [12] 张泽文,等.中国塑料,2022,36(12):100–107.
ZHANG Zewen, et al. China Plastics, 2022, 36(12):100–107.
- [13] ZHANG X, et al. Polymer, 2021(220). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123574.
- [14] YUE Y, et al. Polymer, 2021(229). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124009.
- [15] CARMELI E, et al. Cryst Eng Comm, 2022, 24(10):1 966–1 978.
- [16] GAJZLEROVA L, et al. Express Polymer Letters, 2022, 16(5): 453–464.
- [17] FENNI S E, et al. Thermochimica Acta, 2023, 719. DOI:10.1016/j.tca.2022.179407.
- [18] 康文倩,等.合成树脂及塑料,2022,39(4):82–87.
KANG Wenqian, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(4):82–87.
- [19] 骆博飞,等.中国塑料,2024,38(8):81–87.
LUO Bofei, et al. China Plastics, 2024, 38(8):81–87.
- [20] QIN W, et al. Chemical Engineering Journal, 2019, 358:1 243–1 252.
- [21] 李丽,等.工程塑料应用,2022,50(12):131–135.
LI Li, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 131–135.
- [22] SUN Y, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(41):18 529–18 538.
- [23] ZHAO S, et al. Composites Part B: Engineering, 2022, 238: 108–117.
- [24] WU B, et al. RSC Advances, 2024, 14(16):11 584–11 593.
- [25] REN X Q, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135:3 321–3 328.
- [26] QIN W, et al. Polymer, 2021, 215. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.123374.
- [27] SHEN L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(14). DOI:10.1002/app.53704.
- [28] ZHANG Y F, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136:2 363–2 371.
- [29] HE Z, et al. Journal of Polymer Research, 2020, 27:1–9.
- [30] ZHANG Y F, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(10):2 301–2 311.
- [31] QIN W, et al. Polymer Crystallization, 2020, 3(3). DOI:10.1002/pcr2.10132.
- [32] 赵文林,等.化工学报,2019,70(z1):211–216.
ZHAO Wenlin, et al. CIESC Journal, 2019, 70(z1):211–216.
- [33] 聂莹,等.工程塑料应用,2018,46(11):43–47.
NIE Ying, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11): 43–47.
- [34] BRODA J, et al. Journal of Materials Science, 2020, 55(4):1 436–1 450.
- [35] LIU J, et al. Polymer Bulletin, 2022, 79(7):4 563–4 580