

聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）结晶行为调控及其对力学性能的影响

熊 磊

欧绿保龙一新材料（江西）有限公司 江西鹰潭

【摘要】聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）结晶行为对其力学性能具有关键影响。探究结晶行为调控手段与力学性能变化规律，有助于拓展 PET 应用领域。研究发现，温度、成核剂添加等因素显著影响 PET 结晶行为。高温促进结晶完善度提升，但过高温度会导致分子链降解；成核剂可加快结晶速率，细化晶粒。结晶度提高能增强 PET 拉伸强度与模量，然而过高结晶度会降低材料韧性。深入理解二者关系，为 PET 性能优化提供理论依据。

【关键词】聚对苯二甲酸乙二醇酯；结晶行为；力学性能；调控因素；晶粒结构

【收稿日期】2025 年 3 月 9 日

【出刊日期】2025 年 4 月 9 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250195

Regulation of crystallization behavior of polyethylene terephthalate (PET) and its effect on mechanical properties

Lei Xiong

ALBA RORR New Material (Jiangxi)Co., Ltd., Yingtan, Jiangxi

【Abstract】The crystallization behavior of polyethylene terephthalate (PET) significantly influences its mechanical properties. Investigating the methods to control crystallization and the patterns of mechanical property changes can help expand the application areas of PET. Research has found that factors such as temperature and the addition of nucleating agents significantly affect PET crystallization behavior. High temperatures enhance crystallization perfection, but excessively high temperatures can lead to molecular chain degradation; nucleating agents can accelerate crystallization rates and refine grains. Increased crystallinity enhances the tensile strength and modulus of PET, yet excessive crystallinity reduces material toughness. A deeper understanding of these relationships provides a theoretical basis for optimizing PET performance.

【Keywords】Polyethylene terephthalate; Crystallization behavior; Mechanical properties; Regulation factors; Grain structure

引言

聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）作为应用广泛的热塑性聚酯，其结晶行为直接决定制品的物理化学性能与使用价值。在包装、纺织、工程塑料等领域，对 PET 制品力学性能的要求日益严苛。但 PET 结晶速率慢、结晶度与形态不易控制等问题，制约其高性能化发展。明晰结晶行为调控与力学性能间的内在联系，对提升 PET 材料综合性能意义重大，亟待深入研究二者相互作用机制与优化策略。

1 结晶行为影响因素

在聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）的成型过程中，温度对其结晶行为的影响犹如无形的指挥棒，主导着分子链段的运动轨迹。当环境温度较低时，分子链段的热运动能量不足，它们如同被束缚在狭小空间内的舞者，难以自由舒展和迁移。这种受限状态使得分子链段

难以找到合适的位置进行有序排列，晶核形成与生长的过程变得极为缓慢，结晶速率自然处于较低水平。随着温度逐渐升高，分子链段获得更多的能量，运动变得活跃起来，它们开始频繁地相互碰撞、缠绕和重组，结晶过程的“原料输送”变得顺畅，结晶速率随之加快。

成核剂的引入为 PET 的结晶过程开辟了新的路径。从微观层面来看，成核剂就像是散布在 PET 基体中的“种子培育站”，为晶核的形成提供了大量的活性位点。在没有成核剂时，PET 分子链需要凭借自身的随机碰撞和排列，在合适的条件下缓慢形成晶核，这一过程不仅耗时，而且形成的晶核数量有限^[1]。而成核剂的存在大大降低了成核所需的自由能，使得 PET 分子链能够在相对较低的温度下，迅速在成核剂表面聚集并排列成晶核。

加工工艺参数同样在 PET 的结晶行为调控中扮演

着不可或缺的角色。以冷却速率为例,快速冷却时,分子链段的运动被迅速“冻结”,它们来不及进行充分的有序排列,只能在有限的时间内形成数量众多但尺寸较小的晶粒;而缓慢冷却则给予分子链段充足的时间进行调整和排列,更易形成较大尺寸、规则的晶体^[2]。压力的变化也会对PET结晶行为产生影响,压力的施加能够改变分子链间的距离和相互作用力,促使分子链更紧密地排列,影响分子链的取向和结晶形态。加工过程中的剪切力等因素,也会通过改变分子链的排列方式和运动状态,对PET的结晶行为产生复杂而微妙的影响。

2 结晶行为与结构关系

PET的结晶行为与晶体结构之间存在着千丝万缕的联系,结晶速率的变化堪称晶体结构演变的“风向标”。当PET处于快速结晶状态时,分子链段在较短时间内迅速聚集形成晶核并生长,由于时间紧迫,分子链段无法进行充分的调整和优化排列,形成的晶粒往往尺寸细小且形态不规则。这些细小晶粒如同匆忙搭建的积木,虽然数量众多,但缺乏规整性。与之相反,在缓慢结晶条件下,分子链段如同精心规划的建筑师,有足够的时间寻找最佳的排列位置,逐步构建出较大尺寸、形态规则的晶体结构,这些晶体结构更加有序和稳定,为PET的性能奠定了坚实基础。

成核剂的添加犹如在PET结晶的“舞台”上投下一颗“催化剂”,深刻改变着晶体结构的面貌。大量成核剂引入后,PET体系中晶核数量呈爆发式增长,这些晶核在生长过程中相互竞争、相互制约,使得每个晶粒的生长空间受限,最终导致晶粒尺寸显著减小。原本可能形成的粗大球晶结构,在成核剂的作用下,转变为细小的多晶结构。这种结构的转变不仅体现在晶粒尺寸的变化上,还影响着晶体内部的分子链排列方式和相互作用^[3]。细小的多晶结构增加了晶界数量,晶界处的分子链排列相对无序,这些无序区域与有序的晶粒共同构成了PET复杂而独特的晶体结构,对其性能产生多方面的影响。

结晶度的变化更是直接反映了PET晶体结构的演变。结晶度的提升意味着更多的无定形区域逐渐转化为结晶区域,分子链从杂乱无章的状态转变为高度有序的排列。在这个过程中,分子链间的距离更加均匀,相互作用力增强,晶体的有序性得到显著提高。结晶行为的调控还会对分子链的取向产生重要影响。在加工过程中,无论是拉伸、挤出还是注射成型,外部作用力都会促使分子链沿受力方向取向排列^[4]。这些取向的分

子链在晶体结构中相互交织,形成一种类似于“钢筋骨架”的增强结构,进一步增强了晶体结构的有序性与稳定性,使得PET材料在某些方向上展现出独特的性能优势。

3 结构对力学性能作用

PET的晶体结构与力学性能之间存在着紧密的内在联系,这种联系贯穿于材料的微观和宏观层面。结晶度作为晶体结构的重要参数,对PET的力学性能有着决定性的影响。随着结晶度的提高,材料内部形成了更多的分子间作用力,这些作用力如同无形的“纽带”,将分子链紧密地束缚在一起。当材料受到外力拉伸时,这些强大的分子间作用力能够有效抵抗分子链的相对滑移,从而显著提升材料的拉伸强度。分子链间的相互束缚也使得材料在受力时不易发生形变,弹性模量得到提高,材料表现出更强的刚性。可以说,结晶度的提升为PET赋予了更强的“筋骨”,使其在承受外力时更加坚韧。

晶粒结构的差异如同不同的“防御阵型”,对PET的韧性产生截然不同的影响。细小的晶粒结构犹如“密集的防御网”,当材料受到外力作用产生应力时,这些细小的晶粒能够将应力均匀地分散到各个晶粒之间,避免应力在局部区域过度集中。即使某个晶粒出现微小的裂纹,由于周围众多晶粒的支撑和分散作用,裂纹也难以迅速扩展,从而在一定程度上提高了材料的韧性^[5]。相反,粗大的晶粒则像是“脆弱的堡垒”,它们之间的晶界相对较少且较为薄弱,当应力作用于材料时,粗大的晶粒容易成为应力集中的焦点,微小的裂纹一旦在晶界处产生,就如同找到了“突破口”,能够迅速沿着晶界扩展,导致材料的韧性大幅降低,更容易发生脆性断裂。

分子链取向赋予了PET独特的各向异性力学性能,使其在不同方向上展现出不同的“性格”。在沿分子链取向方向,分子链紧密排列且相互作用增强,就像整齐排列的士兵手拉手形成坚固的防线,当外力沿此方向施加时,材料能够承受较大的拉伸力,拉伸强度显著提高。而在垂直于取向方向,分子链间的相互作用相对较弱,如同松散的队伍,在受到外力时更容易发生分子链的滑移和分离,力学性能明显低于取向方向。晶体结构的变化还会对材料的冲击性能产生重要影响^[6]。良好的晶体结构,如细小均匀的晶粒分布和合理的分子链取向,能够在材料受到冲击时,通过晶界的摩擦、分子链的变形等多种方式吸收大量的冲击能量,从而有效提高材料的抗冲击能力,使PET在实际应用中能够更

好地抵御外界的冲击和碰撞。

4 性能调控优化策略

深入探究 PET 结晶行为与力学性能的内在关联,为实现材料性能的精准调控提供了理论依据。在实际应用中,可从多个维度制定性能调控优化策略。成核剂的选择与使用是优化 PET 性能的关键手段之一。不同种类的成核剂具有独特的化学结构和物理性质,对 PET 结晶行为的影响也各不相同。有机成核剂和无机成核剂在成核机理和效果上存在差异,通过合理选择成核剂种类,并精确控制其用量,能够在显著提升结晶速率的有效优化晶粒尺寸与形态。适量的成核剂可以使 PET 形成细小均匀的晶粒结构,在提高材料强度的避免因晶粒过度细化导致的韧性下降,实现强度与韧性的良好平衡。

加工温度与冷却速率的精确控制是调控 PET 性能的重要途径。加工温度直接影响分子链段的运动能力和结晶速率,在合适的温度区间内,既能保证分子链段具有足够的活性进行有序排列,又能避免因温度过高导致的结晶抑制。冷却速率的调整则决定了晶体的生长方式和最终结构,快速冷却适用于需要获得细小晶粒结构以提高韧性的场合,而缓慢冷却更适合追求较大晶粒尺寸以提升强度的需求^[7]。通过对加工温度和冷却速率的精准匹配和动态调整,可以实现对 PET 结晶度和分子链取向的有效控制,进而满足不同产品对材料性能的多样化要求。

创新加工工艺和复合改性技术为 PET 性能的提升开辟了新途径。采用双向拉伸、注射压缩成型等先进加工工艺,能够促使分子链在多个方向取向,打破传统加工方式下材料的各向异性局限,使 PET 在不同方向上的力学性能更加均衡,综合性能得到显著提升。将 PET 与其他聚合物共混或添加功能性填料,也是一种有效的性能调控策略^[8]。不同聚合物的加入可以改变 PET 的结晶行为和分子链间的相互作用,功能性填料则能够增强材料的刚性、硬度等性能,通过合理选择共混聚合物和填料的种类、配比,可实现对 PET 结晶行为和力学性能的协同调控,满足包装、电子、汽车等不同应用领域对材料性能的特殊需求。

5 结语

聚对苯二甲酸乙二醇酯结晶行为与力学性能间存

在复杂的相互作用关系。温度、成核剂等因素可有效调控 PET 结晶行为,进而改变晶体结构,最终影响力学性能。未来研究可聚焦于开发新型高效成核剂,探索更精准的加工工艺参数协同调控方法。借助先进表征技术深入研究结晶行为与力学性能的微观作用机制,为 PET 高性能化与功能化发展提供更坚实的理论支撑与技术指导。

参考文献

- [1] 王敬慧,孙海波,李博思.基于结晶器内宏观传输行为调控的铸坯皮下负偏析控制研究[J].黑龙江科学,2025,16(04):56-59+64.
- [2] 罗天,洪楚玲,申佳帆,等.结晶行为调控电纺纳米纤维物理性能研究进展[J].纺织高校基础科学学报,2025,38(01):39-52.
- [3] 沈赢洲,刘磊,种锦轩,等.超分子助剂对间规聚苯乙烯构象和结晶行为的调控[J].中国塑料,2024,38(12):1-7.
- [4] 林福华,荀慧霞,张秀芝.不同金属离子复配的有机磷酸盐成核剂调控 PP 结晶行为和应用性能[J].工程塑料应用,2024,52(10):151-158.
- [5] 龚宁,韩鑫,司晓雯,等.PE-g-PMMA 的结晶驱动溶液自组装行为——侧链对片晶形貌的调控[J].宁波大学学报(理工版),2024,37(03):113-120.
- [6] 缪璐璐,董正梅,谢国炎,等.PHBV 结晶行为调控与相变机理的研究进展[J].现代纺织技术,2023,31(04):119-129.
- [7] 吴晗,杨顺慈,蒋妮,等.聚苯乙烯嵌段对左旋聚乳酸/聚苯乙烯-b-右旋聚乳酸立构复合晶结晶行为的调控[J].高分子学报,2023,54(05):631-642.
- [8] 张露,张晴.油脂结晶改良剂对底物油脂结晶行为的调控及其作用机制的研究进展[J].中国油脂,2023,48(08):23-29+33.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

