瓶级PET/纳米氧化锌复合材料非等温结晶动力学研究

赵海影,陈延明*,赵智慧,豆秀芳

(沈阳工业大学石油化工学院,辽宁 辽阳 111003)

摘　要:为改善瓶级聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的结晶性能,以自制的氧化锌纳米颗粒(ZnO NPs)为成核剂,采用溶液共混法制备PET/ZnO纳米复合材料,采用差示扫描量热仪(DSC)研究复合材料的非等温结晶动力学。结果表明:当ZnO NPs的质量分数从0增至3.0%时,PET/ZnO纳米复合材料的结晶温度显著提升,从172.3 ℃提高至190.6 ℃。用Jeziorny法修正的Avrami方程对复合材料的非等温结晶动力学进行分析,结果表明:随着降温速率的增大,PET/ZnO纳米复合材料的结晶半衰期缩短,经修正后的非等温结晶速率常数变大,表明随着降温速率的增大,聚合物的结晶速率增大。借助偏光显微镜(PLM)观察PET的结晶形态,可以看出PET的晶体成核能力较差,球晶密度小,尺寸大。随着ZnO NPs含量的增加,复合材料的球晶密度逐渐变大,尺寸逐渐变小。采用扫描电子显微镜(SEM)观察复合材料形貌,发现ZnO NPs可以在PET基体中较好地分散。

关键词:聚对苯二甲酸乙二醇酯;纳米氧化锌;复合材料;非等温结晶动力学

中图分类号:TQ327.8　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)08-0017-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.004

Study on Non-isothermal Crystallization Kinetics of Bottle-grade PET/Nano Zinc Oxide Composites

ZHAO Haiying, CHEN Yanming*, ZHAO Zhihui, DOU Xiufang

(School of Petrochemical Engineering, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, China)

Abstract: To improve the crystallization performance of bottle-grade poly(ethylene terephthalate) (PET), PET/ZnO nanocomposites were prepared via solution blending using self-synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) as a nucleating agent. The non-isothermal crystallization kinetics of the composites were investigated by differential scanning calorimetry (DSC). The results showed that when the mass fraction of ZnO NPs increased from 0 to 3.0%, the crystallization temperature of the PET/ZnO nanocomposites was significantly enhanced, rising from 172.3 ℃ to 190.6 ℃. The non-isothermal crystallization kinetics of the composites were analyzed using the Avrami equation modified by the Jeziorny method; the results indicated that as the cooling rate increased, the crystallization half-time of the PET/ZnO nanocomposites decreased and the modified non-isothermal crystallization rate constant increased, demonstrating that the crystallization rate of the polymer accelerated with increasing the cooling rate. The crystalline morphology of PET was observed by polarizing microscope (PLM), revealing that PET exhibited poor crystal nucleation ability, with low spherulite density and large spherulite size. As the ZnO NPs content increased, the spherulite density of the composites gradually increased while the spherulite size gradually decreased. Scanning electron microscope (SEM) observations of the composite morphology demonstrated that ZnO NPs could be well dispersed within the PET matrix.

Keywords: PET; Nano zinc oxide; Composites; Non-isothermal crystallization kinetics

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是一种重要的商业化热塑性聚酯,具有良好的机械性能、耐化学腐蚀性和光学性能。然而,PET作为一种半结晶聚合物,结晶速度缓慢且结晶度较低[1],严重限制其在工程塑料领域中的进一步应用。瓶级PET的分子量较大,更适合作为PET工程塑料的原料,但该种类PET是经过固相聚合工艺而得,经固相聚

收稿日期Submitted date 2025-08-28;修回日期Revised date 2025-09-26;录用日期Accepted date 2025-10-29

*联系人,yanmchen@sut.edu.cn

引用本文:赵海影,陈延明,赵智慧,等.瓶级PET/纳米氧化锌复合材料非等温结晶动力学研究[J].塑料科技,2026,54(8):17-22.

Citation: ZHAO H Y, CHEN Y M, ZHAO Z H, et al. Study on non-isothermal crystallization kinetics of bottle-grade PET/nano zinc oxide composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 17-22.

合后分子量得到大幅提高，同时其结晶速度和结晶度均有所下降，如何改善结晶性能成为亟待解决的问题[2-5]。近年来，添加成核剂或纳米填料与PET制备复合材料来提升其结晶性能，已成为PET改性研究的热点之一[6-11]。ZHANG等[4]以笼型聚倍半硅氧烷(POSS)作为填料，证实适量POSS可有效提高PET的结晶度，增强其成核效率。WANG等[5]研究苯甲酸钠盐作为成核剂对再生PET结晶度的影响。结果表明：添加苯甲酸钠盐后，复合材料的结晶度均有不同程度提升，其机械性能得到改善。ZHAO等[6]合成石墨烯量子点(GQDs)，将其用作为成核剂以改善PET的结晶度，发现当GQDs的质量分数为0.5%时，改善效果最好。

氧化锌纳米颗粒(ZnO NPs)作为一种典型的无机纳米材料，因其独特的物理化学性质，如比表面积大、光学性能好、抗菌性能优良等，引起材料领域的广泛关注[12-19]。RAJALAKSHMI等[14]采用绿色途径合成一种ZnO NPs，发现这些纳米粒子对革兰氏阳性菌及革兰氏阴性菌等病原体均表现出显著的抗菌效果。WANG等[18]采用湿法工艺将氧化锌负载于海泡石制备天然橡胶复合材料，材料表现出明显增强的交联密度和力学性能。崔晓鹏等[19]发现，ZnO可以作为成核剂，降低聚(1-丁烯)结晶的成核位垒，提高其结晶速率和结晶度，使晶粒细化。将ZnO NPs与PET进行复合，可利用纳米尺度的界面相互作用改善PET的结晶性能。一方面，ZnO NPs作为成核剂，可为PET分子链结晶提供更多成核位点，从而提高结晶速率和结晶度；另一方面，ZnO NPs与PET基体间的相互作用还可能影响PET分子链的运动和取向，进一步优化结晶结构。

本研究采用溶液化学方法，以二水合乙酸锌为前驱体、月桂酸钠为表面活性剂[20-22]，在乙醇-水溶剂体系中制备ZnO NPs。采用溶液共混法制备PET/ZnO纳米复合材料，表征其结晶行为，利用Jeziorny法研究其非等温结晶动力学，分析复合材料的结晶形态和ZnO NPs在PET基体中的分散状态。

1 实验部分

1.1 主要原料

二水合乙酸锌、月桂酸钠、乙醇、苯酚、1,1,2,2-四氯乙烷，分析纯，山东科源生化科技有限公司；PET，工业级，油瓶片83Y，特性黏度0.83 dL/g，中国石油天然气股份有限公司辽阳石化分公司；去离子水，实验室自制。

1.2 仪器与设备

透射电子显微镜(TEM)，JEM-F200，日本电子株式会社；差示扫描量热分析仪(DSC)，DSC-822e，瑞士Mettler Toledo公司；偏光显微镜(PLM)，BK-POL系列，重庆奥特光学仪器有限责任公司；扫描电子显微镜(SEM)，GeminiSEM 300，德国ZEISS集团；X射线衍射(XRD)，Bruker D8 Advance，德国布鲁克公司。

1.3 样品制备

1.3.1 ZnO NPs的制备

ZnO NPs为实验室自制，以月桂酸钠为表面活性剂，二水合乙酸锌为前驱体。将10.98 g二水合乙酸锌溶于适量蒸馏水中，转移至100 mL容量瓶中定容，配制成0.5 mol/L的乙酸锌前驱体溶液。将490 mL乙醇和2.22 g月桂酸钠加入1 000 mL的三口圆底烧瓶中，在80 ℃下充分搅拌，使月桂酸钠完全溶解于乙醇中，形成均匀溶液体系。维持体系温度恒定，通过蠕动泵注入10 mL前驱体溶液，反应30 min，经常温干燥后收集ZnO NPs沉淀。所得样品经XRD确证为ZnO，采用TEM测定其平均粒径为9.90 nm[21]。

1.3.2 PET/ZnO纳米复合材料的制备

表1为PET/ZnO纳米复合材料的配方。从表1可以看出，将5 g的PET和定量ZnO NPs溶于20 mL苯酚和1,1,2,2-四氯乙烷质量比为1∶1的混合溶剂中，在80 ℃下持续搅拌12 h，使ZnO NPs在溶液中分散均匀并与PET充分混合。搅拌结束后，将混合液平铺于玻璃表面皿上，置于通风橱中室温挥发除去溶剂。样品均于120 ℃真空烘箱中干燥24 h。

表1 PET/ZnO纳米复合材料的配方

Tab.1 Formula of PET/ZnO nanocomposites

样品	$V_{溶剂}$/mL	m_{PET}/g	$w_{ZnO\ NPs}$/%	$m_{ZnO\ NPs}$/g
PET	20	5	0	0
PET/ZnO-0.5%	20	5	0.5	0.025
PET/ZnO-1.0%	20	5	1.0	0.050
PET/ZnO-3.0%	20	5	3.0	0.150

1.4 性能测试与表征

DSC测试：采用差示扫描量热分析仪测试PET/ZnO纳米复合材料的热性能。测试前，样品在100 ℃的真空干燥箱中干燥12 h，测试在N_2保护下进行。将60~100 mg样品置于铝制坩埚中，以20 ℃/min的升温速率加热至280 ℃，恒温5 min以消除热历史。随后，以20 ℃/min的降温速率降至50 ℃。在非等温结晶测试中，分别以2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 ℃/min的降温速率将样品从280 ℃降至50 ℃，记录热流随时间和温度变化的放热曲线。

PLM测试：采用偏光显微镜对PET和PET/ZnO纳米复合材料的晶体形貌进行观察。将样品置于热台上，升温至270 ℃以消除热历史，然后降至170 ℃，恒温结晶30 min，观察其晶体形貌。

SEM测试：采用扫描电子显微镜对PET/ZnO纳米复合材料进行形貌分析，对样品进行喷金处理，加速电压为5 kV。

2 结果与讨论

2.1 ZnO NPs对PET结晶性能的影响

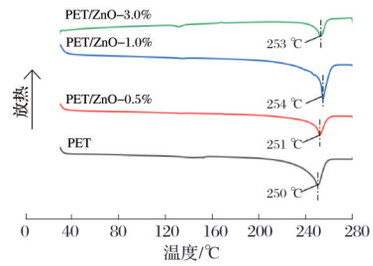
聚合物的结晶性能与其分子链的规整度密切相关，规

整度越高，结晶性能越好。ZnO NPs的加入可显著影响PET基体的结晶行为。结晶峰温度(t_p)反映材料从熔体冷却时的结晶难易程度与结晶速率，t_p越高，表明材料在较高温度下能完成有效的结晶过程。

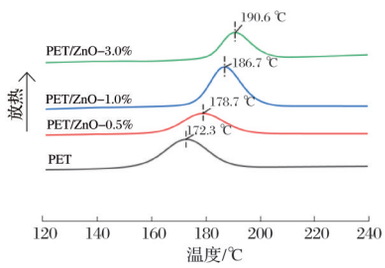
图1为PET/ZnO纳米复合材料在20 ℃/min降温速率下的DSC曲线。从图1可以看出，熔融峰形无明显变化，但熔融温度(t_m)随ZnO NPs含量的增加显著提高。当添加质量分数分别为0、0.5%、1.0%、3.0%的ZnO NPs时，PET的t_p分别为172.3、178.7、186.7、190.6 ℃。当ZnO NPs质量分数为3.0%时，复合材料的t_p比PET高18.3 ℃，表明加入ZnO NPs可促使PET在较高温度下结晶。这是因为ZnO NPs在PET结晶过程中起到成核作用，可提供高度分散、丰富的成核位点，有效降低PET结晶的临界成核自由能垒，PET分子链得以在更高温度下获得足够的结晶驱动力，迅速形成稳定晶核并加速结晶过程，从而表现为复合材料的结晶温度(t_c)明显提升[23]。

2.2 PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶行为分析

通常情况下，PET的实际加工过程是在非等温结晶条件下进行的，因此对该条件下的结晶行为进行评价具有重要意义。适量ZnO NPs可作为有效的成核剂，加速PET的成核与结晶过程。为此，系统探究在不同ZnO NPs含量下PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶行为。图2为不同降温速率下PET/ZnO纳米复合材料的DSC曲线。表2为PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶行为参数。从图2和表2可以看出，PET及其纳米复合材料的结晶行为受降温速率的影响很大。随着降温速率的增加，放热峰向较低温度偏移，t_c下降。



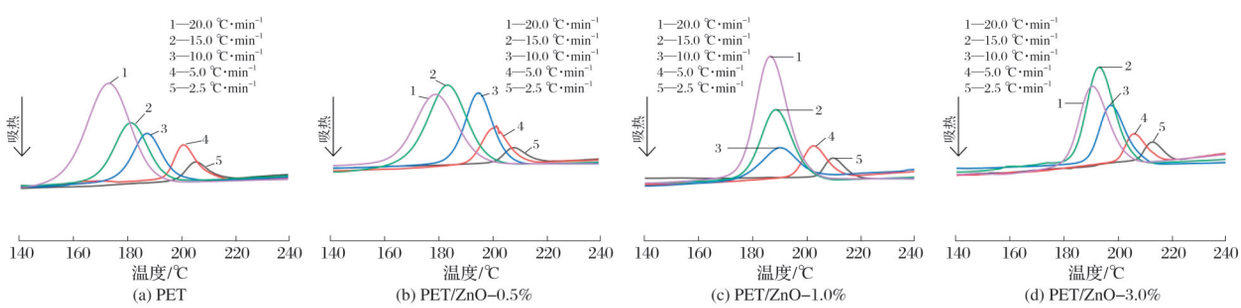
(a) 升温曲线



(b) 降温曲线

图1 PET/ZnO纳米复合材料在20 ℃/min降温速率下的DSC曲线

Fig.1 DSC curves of PET/ZnO nanocomposites at a cooling rate of 20 ℃/min



(a) PET (b) PET/ZnO-0.5% (c) PET/ZnO-1.0% (d) PET/ZnO-3.0%

图2 不同降温速率下PET/ZnO纳米复合材料的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of PET/ZnO nanocomposites at different cooling rates

相对结晶度(X_t)作为温度的函数，其计算公式为：

$$X_t=\frac{\int_{t_0}^{t}(\mathrm{d}H_c/\mathrm{d}t)\,\mathrm{d}t}{\int_{t_0}^{\infty}(\mathrm{d}H_c/\mathrm{d}t)\,\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式(1)中：X_t为t时刻的相对结晶度，%；dt为无限小的时间间隔，min；dH_c为dt内测量的结晶焓，J/g。

当X_t=0.5时，时间记为$t_{1/2}$，即结晶半衰期。由于热滞后，PET和PET/ZnO纳米复合材料的$t_{1/2}$随着降温速率的增加而减小，这归因于体系中ZnO NPs较强的非均相成核效应。

图3为PET/ZnO纳米复合材料的X_t与t的关系。图4为PET/ZnO纳米复合材料的X_t与温度的关系。从图3可以看出，X_t-t曲线呈现S形。这表明复合材料的结晶过程遵循典型的成核与生长机理，主要包括3个阶段：(1)诱导期，主要是分子链段重排形成稳定的晶核，过程相对缓慢，X_t无明显变化；(2)主结晶期，一旦晶核数量达到一定规模，就会迅速生长，X_t-t曲线急剧上升，呈现近似线性的陡峭部分，结晶速率达到最大值并保持恒定；(3)次结晶期，生长的球晶空间受阻后，分子链的运动能力显著下降，此过程非常缓慢。X_t-温度曲线呈现出反向的“S”形，同样说明其结晶过程经历了结晶前期的晶核生成、中期的晶粒快速生长和结晶后期空间受阻后的缓慢生长3个阶段。

2.3 PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶动力学分析

图5为PET/ZnO纳米复合材料ln[-ln(1-X_t)]与ln t的关系。从图5可以看出，结晶前期，数据点呈现良好的线性

关系。通过对该阶段数据进行线性回归拟合，获得斜率(n)和截距($\ln Z_t$)。但在结晶后期线性关系发生偏移，这是由于PET结晶的初始成核依赖于时间，均相成核和异相成核同时进行，二维和三维晶粒同时生长，这是晶体线性生长速率波动的不稳定以及二次结晶所致[24]。

使用修正的Avrami方程进行解析，其公式为：

$$1-X_t=e^{-Z_t t^n} \tag{2}$$

式(2)中：Z_t为动力学结晶速率常数；n为Avrami指数，与成核机理和晶体生长方式有关。

两边同时取对数，可得：

$$\ln[-\ln(1-X_t)]=n\ln t+\ln Z_t \tag{3}$$

其结晶过程中的Z_t需要排除降温速率的影响，采用Jeziorny法，以降温速率(φ)对其进行修正。

$$\ln Z_c=\frac{\ln Z_t}{\varphi} \tag{4}$$

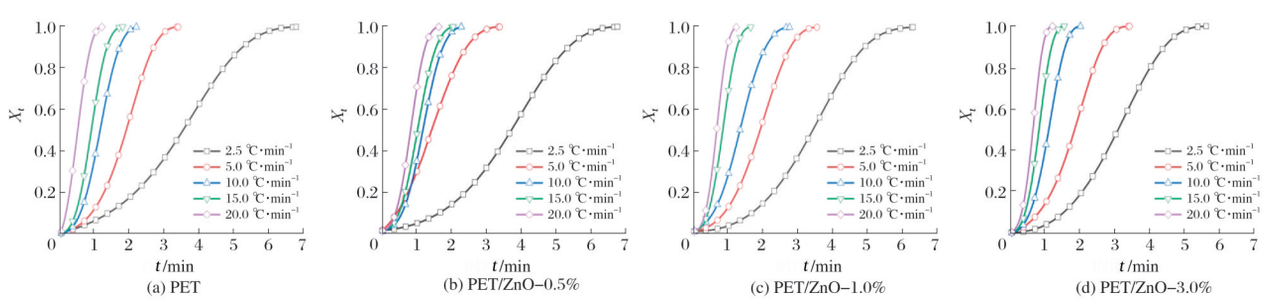
式(4)中：Z_c为非等温结晶速率常数；φ为降温速率，℃/min。

表3为PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶动力学参数。从表3可以看出，经Jeziorny法修正后的Z_c与n，随降温速率和ZnO NPs含量的变化而变化。如表2所示，对于同一种样品，随着降温速率的增大，$t_{1/2}$缩短，Z_c增大，表明降温速率的增大有助于加快聚合物的结晶速率。对于不同的样品，ZnO NPs的加入显著提高聚合物的t_c和结晶速率，且随着ZnO NPs含量的增加，PET/ZnO纳米复合材料的球晶尺寸逐渐变小，密度逐渐变大。n与聚合物结晶过程中的成核机理及生长方式有关，PET的n为1.80~2.46；而在PET中加入1.0% ZnO NPs后，聚合物的n增大。随着ZnO NPs质量分数增大至3%，n又出现明显的下降。

表2 PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶行为参数

Tab.2 Non-isothermal crystallization behavior parameters of PET/ZnO nanocomposites

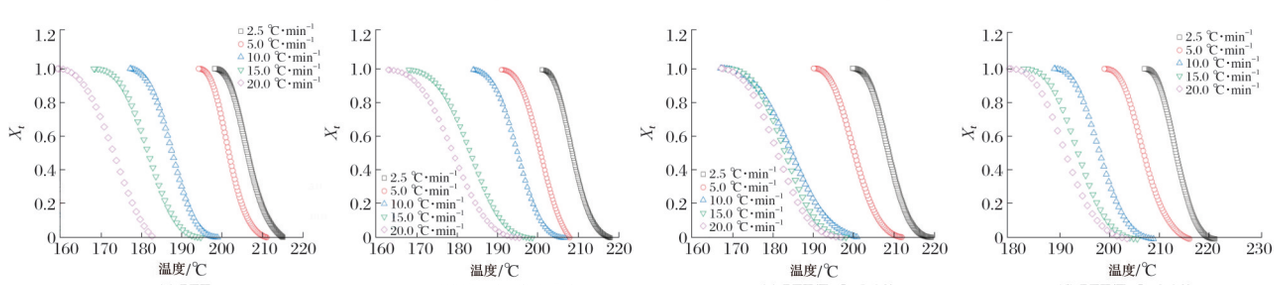
样品	φ/(℃·min^{-1})	t_p/℃	ΔH_c/(J·g^{-1})	$t_{1/2}$/s
PET	2.5	205.28	36.32	3.54
	5.0	200.74	31.41	1.90
	10.0	187.32	36.91	1.14
	15.0	181.41	34.39	0.89
	20.0	172.23	35.03	0.49
PET/ZnO-0.5%	2.5	208.07	35.63	3.75
	5.0	201.56	36.70	1.44
	10.0	194.94	53.92	1.18
	15.0	183.61	58.40	1.04
	20.0	178.94	42.38	0.83
PET/ZnO-1.0%	2.5	209.73	43.24	3.48
	5.0	202.74	42.16	1.93
	10.0	190.01	29.74	1.34
	15.0	189.04	43.07	0.84
	20.0	187.20	45.80	0.67
PET/ZnO-3.0%	2.5	212.64	31.41	3.06
	5.0	205.96	32.71	1.82
	10.0	197.59	47.36	1.08
	15.0	193.34	41.89	0.80
	20.0	190.40	45.91	0.62



(a) PET (b) PET/ZnO–0.5% (c) PET/ZnO–1.0% (d) PET/ZnO–3.0%

图3 PET/ZnO纳米复合材料的X_t与t的关系

Fig.3 Relationship between X_t and t of PET/ZnO nanocomposites



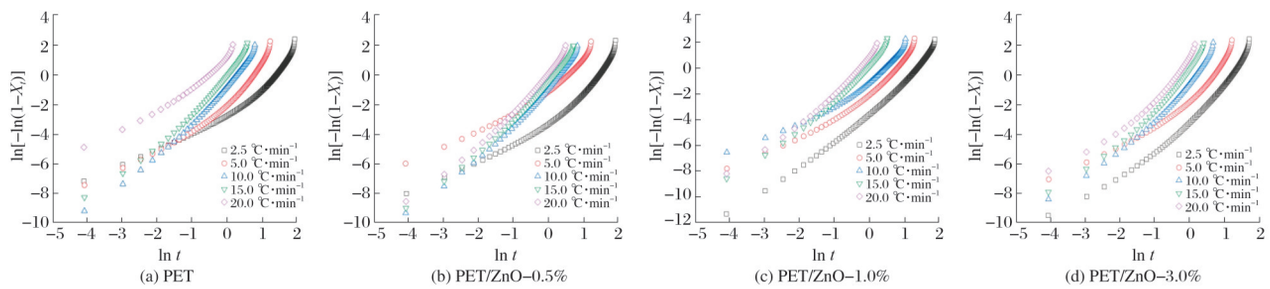
(a) PET (b) PET/ZnO–0.5% (c) PET/ZnO–1.0% (d) PET/ZnO–3.0%

图4 PET/ZnO纳米复合材料的X_t与温度的关系

Fig.4 Relationship between X_t and temperature of PET/ZnO Nanocomposites

OKADA等[25]提出PET球晶的生长演示过程。BIAN等[26]揭示n与结晶过程中成核位点的数量相关，n越大，成核位点越多。因此，加入0.5% ZnO NPs时，PET的成核位点明显增多，成核密度增大。随着ZnO NPs含量的进一步

增多，n减小，说明过多的ZnO NPs粒子会发生团聚现象，导致球晶成核位点减少；也可能是因为高分子结晶过程的复杂性促使了多种成核机制与生长维度并存，晶粒间的相互作用也会诱导结晶行为，最终形成结晶度欠佳的体系。



(a) PET (b) PET/ZnO−0.5% (c) PET/ZnO−1.0% (d) PET/ZnO−3.0%

图5 PET/ZnO纳米复合材料ln[-ln(1-X_t)]与ln t的关系

Fig.5 Relationship between ln[-ln(1-X_t)] and ln t of PET/ZnO nanocomposites

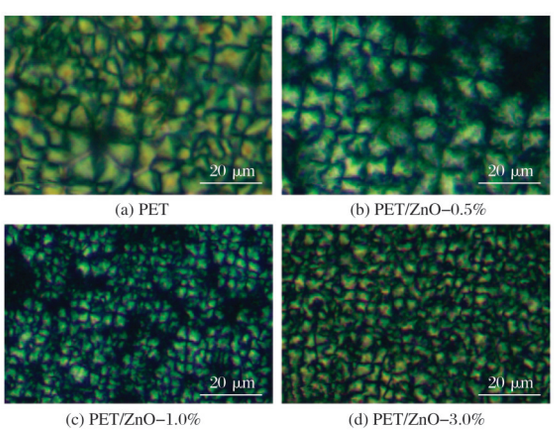
表3 PET/ZnO纳米复合材料的非等温结晶动力学参数

Tab.3 Non-isothermal crystallization kinetic parameters of PET/ZnO nanocomposites

样品	φ/(℃·min^{-1})	ln Z_t	ln Z_c	n
PET	2.5	-2.38	-0.95	1.80
	5.0	-1.50	-0.30	2.06
	10.0	-0.59	-0.06	2.46
	15.0	0.05	0.01	2.41
	20.0	1.05	0.05	1.69
PET/ZnO-0.5%	2.5	-2.87	-1.15	2.02
	5.0	-0.73	-0.15	1.69
	10.0	-0.70	-0.07	2.49
	15.0	-0.35	-0.02	2.46
	20.0	0.20	0.01	2.45
PET/ZnO-1.0%	2.5	-3.32	-1.33	2.49
	5.0	-1.60	-0.32	2.13
	10.0	-0.75	-0.07	1.93
	15.0	0.19	0.01	2.48
	20.0	0.76	0.04	2.49
PET/ZnO-3.0%	2.5	-2.84	-1.14	2.35
	5.0	-1.32	-0.26	1.98
	10.0	-0.40	-0.04	2.38
	15.0	0.32	0.02	2.41
	20.0	0.84	0.04	2.19

2.4 ZnO NPs对PET球晶形态的影响

为了进一步证实ZnO NPs对PET结晶行为的影响，借助PLM观察PET晶体形状和尺寸。图6为PET和PET/ZnO纳米复合材料在170 ℃下的PLM照片(400×)。从图6可以看出，PET在结晶过程中形成较大的球晶，加入ZnO NPs后，晶体尺寸显著减小，成核密度明显提高。当ZnO NPs质量分数为1%时，球晶尺寸明显减小，成核密度上升，表明PET晶体堆积更为紧密。这是因为ZnO NPs作为异相成核剂提供更多的成核位点，使球晶密度增大，球晶间更易发生碰撞而抑制进一步生长。当ZnO NPs质量分数从1%增至3%时，晶体形貌无明显变化，表明进一步提高ZnO NPs含量对结晶形态的改变不再显著。总体而言，PET/ZnO纳米复合材料晶体尺寸的变化与ZnO NPs的成核能力及结晶过程密切相关，与上述DSC测试结果一致。



(a) PET (b) PET/ZnO−0.5% (c) PET/ZnO−1.0% (d) PET/ZnO−3.0%

图6 PET和PET/ZnO纳米复合材料在170 ℃下的PLM照片(400×)

Fig.6 PLM images of PET and PET/ZnO nanocomposites at 170 ℃ (400×)

2.5 PET/ZnO纳米复合材料的SEM分析

图7为PET和PET/ZnO纳米复合材料的SEM照片(8 000×)。从图7a可以看出，PET基体表面相对光滑、致密且均匀，呈现出典型的聚合物本征形貌，未见任何颗粒或缺陷结构。从图7b可以看出，当ZnO NPs质量分数为0.5%时，可以观察到少量细小的白色亮点较为稀疏地分散在PET基体中。这些纳米颗粒分布相对均匀，无明显的大规模团聚现象，表明在此低含量下，纳米ZnO与PET基体具有较好的相容性。从图7c可以看出，当ZnO NPs质量分数为1.0%时，材料表面的白色颗粒状物质显著增多，但仍保持较好的分散状态，仅有轻微团聚迹象。从图7d可以看出，当ZnO NPs质量分数为3.0%时，纳米颗粒不再以单个粒子形式分散，而是形成了尺寸较大的、不规则的团聚体。这是由于纳米粒子极高的表面能随着含量的增加而急剧增大，使它们相互吸引而自发聚集。

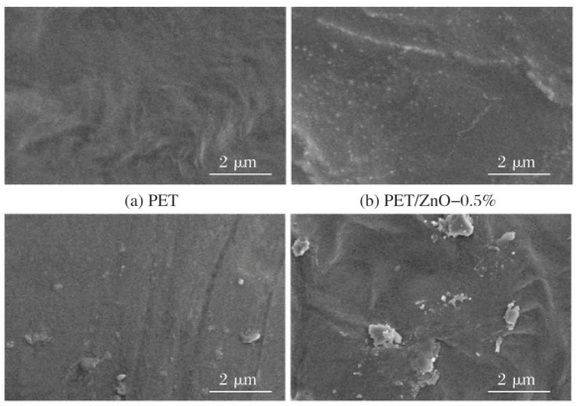


图7 PET和PET/ZnO纳米复合材料的SEM照片(8 000×)

Fig.7 SEM images of PET and PET/ZnO nanocomposites (8 000×)

3 结论

自制的ZnO NPs可作为瓶级PET的有效成核剂，显著改善PET的结晶性能。当ZnO NPs质量分数从0增至3.0%时，PET/ZnO纳米复合材料的t_p显著提高。在非等温结晶过程中，同一材料的$t_{1/2}$随降温速率的增大而缩短，对应的Z_c增大，表明提高降温速率可促进聚合物结晶。PLM和SEM观测结果表明，ZnO NPs的加入使复合材料的晶体尺寸和形貌发生明显变化。当ZnO NPs质量分数为1.0%时，复合材料具有较小的晶粒尺寸和较高的晶粒密度，表现出最佳的结晶性能，同时ZnO NPs在PET基体中分散良好。

参考文献

[1] DI LORENZO M L. Crystallization of poly(ethylene terephthalate): A Review[J]. Polymers, 2024, 16(14): 1975.

[2] 王照颖, 魏建斐, 王锐. 氧化石墨烯改性阻燃聚酯的非等温结晶动力学[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(1): 57-66.

[3] KANGO S, KALIA S, CELLI A, et al. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites: A review[J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38 (8): 1232-1261.

[4] ZHANG X, ZHAO S C, MOHAMED M G, et al. Crystallization behaviors of poly(ethylene terephthalate) (PET) with monosilane isobutyl-polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(29): 14642-14655.

[5] WANG M Z, LIN F H, ZHAO T J, et al. The application of a sodium benzoate salt-nucleating agent in recycled polyethylene terephthalate: Crystallization behavior and mechanism[J]. Molecules, 2025, 30(1): 37.

[6] ZHAO L W, YIN Y, XIAO W B, et al. Rapid crystallization and fluorescence of poly(ethylene terephthalate) using graphene quantum dots as nucleating agents[J]. Polymers, 2023, 15(17): 3506.

[7] SAMIEIFAKHR M, SHOJAEI A. Improved crystallization behavior and enhanced impact strength of melt processed poly(ethylene terephthalate)/UiO-66 nanocomposites[J]. Polymer, 2024, 290: 126593.

[8] RIBA-MOLINER M, MIJAS G, ROIG D, et al. Obtaining of a PET/SiC hybrid multifilament: Non-isothermal crystallization studies[J]. The Journal of the Textile Institute, 2021, 112(11): 1779-1787.

[9] LIU S, GUO Z H, LIU H T, et al. Preparation of lignin-based nucleating agents and their effects on the crystallization behavior and properties of poly(ethylene terephthalate) esters[J]. Polymer, 2025, 324: 128272.

[10] ZAHARUDDIN I M, ZAID M H M, HARUN M H, et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: Gamma irradiation impact on crystallinity, chemical structure and thermal stability[J]. Applied Physics A, 2025, 131(3): 171.

[11] WU J B, LIN J H, XIAO W H, et al. Influence of functional group structures in nucleating agents on the crystallization behavior of poly (ethylene terephthalate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(3): e56365.

[12] HAMADA A M, RADI A A, AL-KAHTANY F A, et al. A review: Zinc oxide nanoparticles: Advantages and disadvantages[J]. Journal of Plant Nutrition, 2024, 47(4): 656-679.

[13] BASKOUTAS S. Special issue: Zinc oxide nanostructures: Synthesis and characterization[J]. Materials, 2018, 11(6): 873.

[14] RAJALAKSHMI R, DOSS A, KUMARI PUSHPA RANI T P, et al. Eco-friendly synthesized zinc oxide nanoparticles: An antibacterial agent[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(1): 1013-1026.

[15] WANG Y, LIU L Z, TIAN C C, et al. Crystallization, morphology, optical properties, tear properties and antibacterial properties of nano zinc oxide composites[J]. Journal of Polymer Research, 2023, 30 (9): 352.

[16] RAVI P, REDDY M C, CHANDRASEKHAR T, et al. Biogenic nano zinc oxide particle production and their antimicrobial potentials: A review[J]. Journal of Cluster Science, 2024, 36(1): 8.

[17] WANG Y, LIU J W, WANG T, et al. Antibacterial properties and mechanism of nanometer zinc oxide composites[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 40: 101167.

[18] WANG Z B, HOU Z F, JIANG C L, et al. Influence of zinc oxide loaded sepiolite wet process on the properties of natural rubber composites[J]. Polymer Composites, 2026, 47(2): 1581-1593.

[19] 崔晓鹏, 董小芳, 李闯, 等. 锌盐类成核剂对聚(1-丁烯)结晶性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(6): 65-70.

[20] WU Y Y, LI S, SONG J X, et al. Acetylated distarch phosphate/chitosan films reinforced with sodium laurate-modified nano-TiO_2: Effects of sodium laurate concentration[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(11): 2819-2826.

[21] 郭又晟, 陈延明, 王立岩, 等. 不同尺寸纳米氧化锌的制备及其抗菌性能研究[J]. 化学研究与应用, 2024, 36(1): 118-127.

[22] WU H, HAN L K, WANG N, et al. Sodium laurate-assisted CeO_2 nanoparticles as highly efficient and recyclable catalysts for cyanosilylation reaction[J]. Applied Catalysis A: General, 2021, 628: 118404.

[23] CRUZ FARIA ÉDA, DIAS M L, FERREIRA L M, et al. Crystallization behavior of zinc oxide/poly(lactic acid) nanocomposites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 146(4): 1483-1490.

[24] 郭又晟, 陈延明, 王海玥, 等. PET/ZnO纳米复合材料的制备及结晶性能[J]. 中国塑料, 2025, 39(4): 25-30.

[25] OKADA T, SAITO H, INOUE T. Time-resolved light scattering studies on the early stage of crystallization in isotactic polypropylene[J]. Macromolecules, 1992, 25(7): 1908-1911.

[26] BIAN J, YE S R, FENG L X. Heterogeneous nucleation on the crystallization poly(ethylene terephthalate) [J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2003, 41(18): 2135-2144.