熔融共混改性耐水解老化PET的研究

孟继承，金一帆，雷乔榕

（绍兴大学 浙江省清洁染整技术研究重点实验室，浙江 绍兴 312000）

摘　要：聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）薄膜是晶硅太阳能电池背板的基本组成，其主要功能是水蒸气阻隔和电气绝缘。由于PET的分子链中含有酯键，在高温高湿的环境下易发生水解老化，因此需要对其进行改性，以提高耐水解老化的性能。研究以碳化二亚胺为改性试剂，将其与PET进行熔融共混，进而模拟高温高湿环境下的水解实验。结果表明：随着碳化二亚胺含量的增加，熔融共混PET熔融温度（t_m）下降，结晶温度（t_c）先降后升，热失重温度明显先上升后有所下降。添加碳化二亚胺后，PET的耐水解老化性能增强，但是熔融流动性能下降。碳化二亚胺质量分数为2.0%时综合性能最佳，熔融共混PET的t_m为253.0 ℃，t_c为192.0 ℃，特性黏度为0.507 7 dL/g，端羧基含量为9.3 mmol/kg。

关键词：太阳能电池背板；PET水解老化；碳化二亚胺

中图分类号：TQ323.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-3360（2026）08-0023-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.005

Research on Hydrolysis and Aging-resistant PET Modified by Melt Blending

MENG Jicheng, JIN Yifan, LEI Qiaorong

(Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Polyethylene terephthalate (PET) film is a basic component of crystalline silicon solar cell backsheet, and its main functions are moisture barrier and electrical insulation. Since the molecular chain of PET contains ester bonds, it is susceptible to hydrolytic aging under high-temperature and high-humidity environments. Therefore, it needs to be modified to improve its hydrolysis and aging resistance. In this study, carbodiimide was used as a modification reagent and melt-blended with PET, followed by hydrolysis experiments under simulated high-temperature and high-humidity conditions. The results showed that with increasing carbodiimide content, the melting temperature (t_m) of melt-blended PET decreased, the crystallization temperature (t_c) first decreased and then increased, and the thermal decomposition temperature initially rised significantly and then declined somewhat. After the addition of carbodiimide, the hydrolysis and aging resistance of PET was enhanced, but its melt flowability deteriorated. The optimal overall performance was achieved at a carbodiimide mass fraction of 2.0%, where the melt-blended PET exhibited a t_m of 253.0 ℃, a t_c of 192.0 ℃, an intrinsic viscosity of 0.507 7 dL/g, and a carboxyl end-group content of 9.3 mmol/kg.

Keywords: Solar cells backsheet; Hydrolysis and aging of PET; Carbodiimide

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)材料因具备优异的力学性能和印刷性能，常作为多层复合膜的最外层使用。若能通过共聚改性提高PET的拉伸性能、阻隔性能及热黏合性能，则使其替代传统聚烯烃作为多层复合膜的内层成为可能，进而有望实现包装膜用双向拉伸聚酯薄膜(BOPET)的单质化和可循环利用[1]。与此同时，随着人类对传统能源需求的增加，目前可以利用的新能源主要有太阳能、地热能、风能、海洋能及核能等。相较于其他能源，太阳能具有资源丰富、能量转化直接和清洁环保等优势。晶硅太阳能电池背板是光伏组件的重要封装材料，对电池片起到良好的支撑和保护作用[2]。复合膜在电池背板中具有重要作用，背板中间层为PET薄膜，其具有良好的绝缘性能、机械强度和水蒸气阻隔性，同时具有尺寸稳定、易加工及耐撕裂等优点。然而，复杂的背板结构不仅会使太阳能电池组件的制备流程更为烦琐，还会增加被水或其他化合物侵蚀的风险，从而使其使用寿命下降[3]。此外，光伏设施长期暴露于

收稿日期Submitted date 2025-08-25；修回日期Revised date 2025-09-21；录用日期Accepted date 2025-10-10

基金项目：2025年绍兴市产业关键技术攻关专项（2025B11028）

联系人，2206630409@qq.com

引用本文：孟继承，金一帆，雷乔榕．熔融共混改性耐水解老化PET的研究[J]．塑料科技，2026，54(8)：23-27.

Citation：MENG J C, JIN Y F, LEI Q R. Research on hydrolysis and aging-resistant PET modified by melt blending[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 23-27.

自然环境，白天受高温辐照，夜间遭遇高湿空气，易导致PET制品水解老化而性能劣化。究其原因，PET分子链中的酯键在高温高湿条件下易发生水解，分解为醇和羧酸[4]。因此，使PET或聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)等通用型聚酯类材料在高温高湿条件下具有出色的耐水解性能[5]，已成为材料改性的关键方向。

行业内多以PET为基体材料，向其中添加二氧化硅、硫酸钡、碳酸钙、二氧化钛等无机添加剂，从而赋予PET各种功能，使其应用于开口母料、高速拉膜料、光伏背板基料等[6]。但目前能够生产电工绝缘PET厚型薄膜的企业不多，能够生产光伏用PET基膜的企业更少，因为PET薄膜耐水解老化的性能相对较差。针对PET基膜在光伏电池领域应用时表现的某些性能特点，可以通过共聚、填充、共混或制备纳米复合材料等改性方式使PET具有优良的耐水解抗老化性能，从而满足其在太阳能光伏等领域的要求，使PET薄膜在高端材料的领域得到应用。研究发现，分子中某些特定官能团的化合物加入酯类油中能够起到一定的抑制水解的作用，如含有—N═C═N—官能团的碳化二亚胺及带有双键的含氮杂环等[7]。本研究采用不同添加量的碳化二亚胺与薄膜级PET进行熔融共混，制备耐水解改性PET，对样品的化学结构、热性能和水解性能进行分析和评估。

1 实验部分

1.1 主要原料

薄膜级PET切片，特性黏度0.680~0.685 dL/g (溶剂为质量比为1∶1的苯酚-四氯乙烷溶液)，熔融温度(t_m)为259.0~261.0 ℃，辽阳石油化工有限公司；碳化二亚胺，N,N'-二(2,6-二异丙基苯基)碳化二亚胺，分子式为$C_{25}H_{34}N_2$，t_m为51.0 ℃，沸点为477.0 ℃ (760 mmHg)，安徽泽升科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平，AL104，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司；黏度分析仪，NCY-3，上海思尔达科学仪器有限公司；真空干燥箱，XMTD-8222，上海精宏实验设备有限公司；微量流变仪，PolyLab，美国赛默飞世尔科技公司；傅里叶变换红外光谱仪，IRPrestige-21，岛津仪器(苏州)有限公司；差示扫描量热仪(DSC)，DSC1，瑞士Mettler-Toledo公司；综合热性能分析仪，TG/DTA6300，日本精工仪器有限公司；高速多功能粉碎机，JP-500C，永康市久品工贸有限公司；加热型测温棒搅拌仪，MS400，上海般特仪器有限公司；显微热分析仪，WRX-2S，上海仪电物理光学仪器有限公司。

1.3 样品制备

碳化二亚胺与PET的熔融共混实验涉及PET预干燥、熔融混合及性能检测前的样品粉碎处理等步骤。首先，将PET样品放置在100 ℃真空干燥箱内干燥8 h。碳化二亚胺在使用前保持密封状态，以避免称量误差影响实验数据。表1为熔融共混PET的配方。碳化二亚胺按不同添加量将实验分成6组，每组称量100.0 g聚合物混合物。将混合物加入微量流变仪，设定温度为270~280 ℃，通过内循环使聚合物均匀混合，根据样品性状(切断面光滑，微孔或裂痕极少且分布均匀)得到优化后的最佳实验温度。熔融物经过微量流变仪挤出口实施拉条，转速50 r/min，时间10 min，得到混合均匀的复合材料样条。实验中观察到，PET-1的熔融状态挤出时流动性能良好，呈淡黄色，空气中自然冷却后结晶变为乳白色。添加碳化二亚胺后，熔融状态挤出时流动性能下降，冷却后结晶变为淡黄色。最后，将制备的6组固体样品使用高速多功能粉碎机研磨成小颗粒状，以提高样品的比表面积，使其在后续水解性能检测中可以与水充分接触，缩短实验用时。

表1 熔融共混PET的配方

Tab.1 Formula of melt blending PET

样品	m_{PET}/g	$m_{碳化二亚胺}$/g	$w_{碳化二亚胺}$/%
PET-1	100.0	0	0
PET-2	99.5	0.5	0.5
PET-3	99.0	1.0	1.0
PET-4	98.0	2.0	2.0
PET-5	97.0	3.0	3.0
PET-6	95.0	5.0	5.0

1.4 性能测试与表征

物理化学性能指标测试：使用黏度分析仪检测PET的特性黏度，使用显微热分析仪检测其t_m，初步分析聚合物的流动和熔融特性。采用酸值滴定法检测PET的端羧基含量，初步分析聚合物的分子链端基状态。

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪分析PET切片的化学结构，扫描范围为4 000~550 cm^{-1}，分辨率为4 cm^{-1}，扫描32次。

结晶性能测试：称取PET样品5 mg，在惰性气体高纯氮气保护下进行测试，升温速度为10 ℃/min，从25 ℃升至300 ℃，保温2 min，以消除热历史。随后以10 ℃/min降温至25 ℃，淬冷，保温2 min，再以10 ℃/min升温至300 ℃，得到升温曲线。300 ℃下保温2 min，然后以10 ℃/min降温至25 ℃，得到降温曲线。

热稳定性能测试：采用综合热性能分析仪对PET样品在高温下进行热分解测试。称取PET样品5~8 mg，以空坩埚作为参比，在100 mL/min的高纯氮气保护下进行测试，升温速率控制在10 ℃/min，升温范围30~800 ℃，扫描间隔为0.5 s。

水解性能测试：评价PET基膜的耐水解老化性能，除了传统的双85实验(温度85 ℃、相对湿度85%条件下的耐老化性能测试)外，进一步开展加速湿热老化测试。PET薄膜的抗水解性能采用压力锅蒸煮实验，将样品于121 ℃、相对湿度100%、压力0.2 MPa条件下湿热老化48 h，然后测试薄膜的断裂伸长率[8]。参照以上要求，本实

验模拟太阳能背板的极端工况，采用加热型测温棒搅拌仪、1 L烧杯和50目不锈钢筛网组合成一套模拟湿热老化实验的装置，在常压、100 ℃条件下水解老化10 h，并用特性黏度及端羧基的过程变化分别表征PET的耐水解老化性能。特性黏度采用乌式黏度计检测，溶剂为苯酚-四氯乙烷溶液，质量比为1∶1。

2 结果与讨论

2.1 PET的物理化学性能

表2为PET切片的主要物理化学性能。从表2可以看出，PET切片的特性黏度、t_m及端羧基含量均与常规PET产品接近。PET合成过程中不可避免地会残留端羧基，而端羧基的存在会加速后续PET在加工和使用过程中的降解，影响产品的使用寿命[9]。因此，与碳化二亚胺熔融共混后，PET的特性黏度、t_m及端羧基含量均会发生变化。为了有效对比添加碳化二亚胺前后的PET各项性能，在后续水解性能实验后，重点检测特性黏度、t_m及端羧基含量的变化。

表2 PET切片的主要物理化学性能

Tab.2 Main physicochemical properties of PET chips

特性黏度/(dL·g^{-1})	t_m/℃	端羧基含量/(mmol·kg^{-1})
0.682 7	259.8	27.2

2.2 熔融共混PET的FTIR分析

选取碳化二亚胺质量分数1.0%的样品PET-3与未添加碳化二亚胺的PET-1样品进行FTIR对比分析。图1为熔融共混PET的FTIR谱图。从图1可以看出，1 712 cm^{-1}处为酯基上羰基伸缩振动峰，且吸收峰很强。719 cm^{-1}处为苯环—CH—的面外变形峰，吸收峰强度中等。1 242 cm^{-1}处为酯基的—O—的伸缩振动峰[10]。经过对比分析发现，PET-3在1 537 cm^{-1}处出现弱峰，该峰是N═C═N官能团的不对称伸缩振动峰，说明经过熔融共混，碳化二亚胺与PET切片中的端羧基发生化学反应，从而使来自碳化二亚胺的N═C═N官能团参与PET的分子结构的组成。

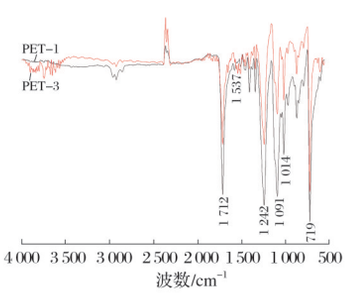


图1 熔融共混PET的FTIR谱图

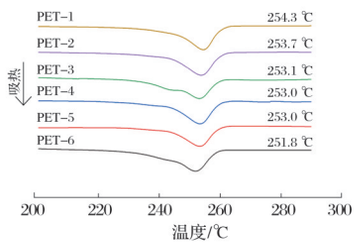
Fig.1 FTIR spectra of melt blending PET

2.3 熔融共混PET的结晶性能分析

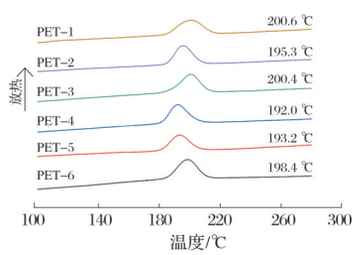
通过DSC检测对比分析经过熔融共混后各样品的t_m、冷结晶温度(t_c)、结晶焓(ΔH_m)和结晶度(X_c)。图2为熔融共混PET的DSC曲线。表3为熔融共混PET的热性能参数。其中，X_c的计算公式为：

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{\Delta H_0}\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中：ΔH_0为PET结晶的标准熔融焓，取140 J/g[11]。



(a) DSC升温曲线



(b) DSC降温曲线

图2 熔融共混PET的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of melt blending PET

表3 熔融共混PET的热性能参数

Tab.3 Thermal property parameters of melt blending PET

样品	t_m/℃	t_c/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	X_c/%	端羧基含量/(mmol·kg^{-1})
PET-1	254.3	200.6	28.94	20.67	73.0
PET-2	253.7	195.3	33.94	24.24	51.0
PET-3	253.1	200.4	30.83	22.02	38.8
PET-4	253.0	192.0	31.73	22.66	9.3
PET-5	253.0	193.2	27.41	19.58	0
PET-6	251.8	198.4	30.47	21.76	0

从图2和表3可以看出，添加碳化二亚胺后，熔融共混PET的t_m随着碳化二亚胺含量的增加不断下降，在碳化二亚胺质量分数达到5.0%时，t_m明显降低。t_m不断下降，其主要原因是交联物理网络限制了分子链段的运动，破坏了PET分子的规整性[12]。碳化二亚胺与PET的端羧基发生化学反应，使来自碳化二亚胺的苯环以支链的形式结合进入PET的分子链，破坏了PET原有的规整性分子链结构，使其t_m下降。继续提高碳化二亚胺的添加量，由于PET中极其有限的端羧基与碳化二亚胺发生反应，剩余没有参与反应的碳化二亚胺以游离态的形式与PET共混，显现出其t_m明显降低的作用。

随着碳化二亚胺含量的增加，t_c先降后升，在碳化二亚胺质量分数为1.0%及5.0%时出现不同程度的反复。其主要原因是碳化二亚胺分子能够将断链形成的端羧基聚合物重新连接起来，从而起到修链的作用[13]。碳化二亚胺与

PET的端羧基发生化学反应，来自碳化二亚胺的部分苯环参与PET中分子链的规整排序，从而有利于PET在熔融状态下降温过程的结晶行为。但是，碳化二亚胺具有2,6-二异丙基苯官能团，因此具有一定的空间位阻[14]。与PET比较，碳化二亚胺的苯环之间的距离比PET短，相对增加了PET中苯环的含量，分子结构的空间位阻增加，不利于分子链的规整排列，导致熔融状态向结晶状态转变的过程比较困难，需要更低的温度及延长时间促其结晶，因此t_c明显下降。由于结晶过程延长，X_c反而得到一定程度的提高。PET-2较PET-1的端羧基含量明显下降，但是仍比较高，说明添加进入PET的碳化二亚胺基本上参与了反应，但是碳化二亚胺的苯环起到比较明显的位阻作用，超过修链对结晶的支持作用，因此需要强化结晶条件，即降低温度促进结晶。

继续增加碳化二亚胺在PET中的质量分数至1.0%时，不断增加的修链量继续支持PET的结晶作用，且作用超过碳化二亚胺的苯环起到的位阻作用。因此t_c明显回升，结晶速度明显提高。PET-3较PET-2的端羧基含量继续下降，已经降低至未添加碳化二亚胺的PET-1的一半，也进一步说明修链量体现出一定的优势。

继续增加碳化二亚胺在PET中的质量分数至2.0%时，PET-4的端羧基含量已经下降至9.3 mmol/kg，为PET-1的12.7%。此时，大部分来自碳化二亚胺的苯环占据修链的PET分子链空间位置，位阻效应显著提升，对PET分子链的规整性起到明显的负面作用，从而不利于结晶行为的发生。因此，需要强化结晶条件，即继续降低温度促进结晶。

继续增加碳化二亚胺在PET中的质量分数至3.0%时，PET-5的端羧基含量已经下降至0 mmol/kg。这说明添加的碳化二亚胺在系统中以两种形式存在，其中大多数与PET中含有的全部端羧基进行反应，极少量的碳化二亚胺没有参与反应。没有参与反应的碳化二亚胺以游离态的形式与PET共混，从而以小分子量有机化合物的形式在PET分子链的规整排列中起到结晶晶核的作用，因此反而有利于PET在熔融状态下降温过程的结晶行为。因此，t_c较PET-4略有提升。这种晶核的作用使PET的结晶相对改善。

继续增加碳化二亚胺在PET中的质量分数至5.0%时，PET-6的端羧基含量仍为0 mmol/kg，从前述t_m的明显下降可以得出，剩余未参与反应的碳化二亚胺在熔融共混系统中发挥较为明显的作用。因此，从t_c较PET-5明显提升可以看出，这种晶核的作用使PET的结晶明显改善。

由此可见，参与PET分子链的规整排序、自身官能团空间位阻及小分子有机化合物的结晶晶核等作用出现交替，任何一种作用的强化对于熔融共混PET的结晶行为均会产生影响，因此t_c的数据呈现无规律的变化，这对于后续材料成型加工过程的稳定控制不利。这种不稳定的过程也体现出X_c数据的无规律变化。

在PET薄膜加工时，PET薄膜的X_c随拉伸温度的提高而减小，但晶粒尺寸变大明显，同时薄膜雾度升高明显[15]。因此，碳化二亚胺质量分数不超过2.0%有利于薄膜加工时的结晶，可以有效控制薄膜雾度。

2.4 熔融共混PET的热稳定性能分析

表4为熔融共混PET的热降解参数。从表4可以看出，碳化二亚胺质量分数达到0.5%时，各热失重温度上升明显。分析原因，添加碳化二亚胺后，其与PET中的端羧基进行反应，降低了PET分子结构体系中的端羧基含量，热稳定性能有所提高，这也为耐老化性能提升创造了基本的条件。但随着碳化二亚胺含量的继续增加，热失重温度有所下降，在碳化二亚胺质量分数为5.0%时非常明显。分析原因：随着碳化二亚胺含量的增加，没有参与反应的碳化二亚胺以共混的形式分布在PET中，对熔融共混样品的热降解起到促进的作用。因此，碳化二亚胺质量分数不应超过2.0%。湿热老化和热氧老化相对比，热氧老化对阻燃增强PBT的性能影响小于湿热老化对阻燃增强PBT材料的性能影响[16]。因此，与PBT属于同一类型的PET，也应该通过水解性能的检测来判断分析湿热老化对材料性能的影响。

表4 熔融共混PET的热降解参数

Tab.4 Thermal degradation parameters of melt blending PET

单位：℃

样品	$t_{2\%}$	$t_{4\%}$	$t_{6\%}$	$t_{8\%}$	$t_{10\%}$	$t_{30\%}$	$t_{50\%}$	$t_{70\%}$	$t_{80\%}$
PET-1	389	399	405	409	413	430	440	450	460
PET-2	404	408	412	415	417	434	444	453	463
PET-3	393	402	407	411	414	432	442	452	460
PET-4	378	397	404	408	412	431	441	451	460
PET-5	386	400	406	410	413	431	441	451	462
PET-6	303	385	398	404	408	428	439	450	459

2.5 熔融共混PET的水解性能分析

模拟太阳能背板的极端工况，在常压、100 ℃条件下水解老化10 h，对熔融共混PET样品的特性黏度、端羧基含量及t_m进行测定。表5为熔融共混PET水解前后的特性黏度、端羧基含量及t_m。

由表2可知，PET切片原料的特性黏度为0.682 7 dL/g。从表5可以看出，PET-1特性黏度降至0.401 9 dL/g，降幅高达41%，表明热降解的作用显著，PET相对分子质量这一关键性能指标出现明显下降，对材料的基本功能产生较为明显的影响。根据薄膜企业的生产经验，通常要求干燥后原料水分含量小于40 mg/kg，黏度降幅小于0.020 0 dL/g[17]。本实验水解温度虽然低于生产薄膜时的干燥工序，但时间显著延长，因此PET的黏度降幅明显偏高。

添加碳化二亚胺后，水解前后的PET的端羧基含量均较未添加时明显下降，表明碳化二亚胺可有效降低端羧基含量。当碳化二亚胺质量分数达到2.0%以上时，PET的端羧基含量急剧下降，直至检测不到，说明碳化二亚胺质量分数超过2.0%对PET的耐水解性能提升效果显著。分析原因是碳化二亚胺可以和羧基反应。一方面，可以消耗

PET树脂自身少量的羧基；另一方面，在高温高湿条件下，剩余碳化二亚胺消耗PET水解产生的羧基，聚合型碳化二亚胺进一步偶联羧基，阻止了羧基自催化效应，从而抑制聚合物进一步降解[18]。

表5 熔融共混PET水解前后的特性黏度、端羧基含量及t_m

Tab.5 Intrinsicviscosity, carboxyl end group content and t_m of melt blending PET before and after hydrolysis

样品	特性黏度/(dL·g^{-1})		端羧基含量/(mmol·kg^{-1})		t_m/℃	
	水解前	水解后	水解前	水解后	水解前	水解后
PET-1	0.401 9	0.402 7	73.0	102.1	254.3	253.7
PET-2	0.484 3	0.485 7	51.0	52.5	253.7	254.3
PET-3	0.483 6	0.483 4	38.8	38.1	253.1	254.0
PET-4	0.507 7	0.507 5	9.3	6.1	253.0	254.0
PET-5	0.468 1	0.467 5	0	0	253.0	253.2
PET-6	0.432 3	0.435 5	0	0	251.8	252.0

PET-1水解后t_m下降明显，这是由于水解后低分子量的PET含量增加，分子量分布变宽所致，端羧基含量的显著上升也可以佐证。添加碳化二亚胺后，PET水解后的t_m反而上升。分析原因：在碳化二亚胺与PET熔融共混及水解过程中持续消耗了PET中的端羧基，这些端羧基的组成来自合成工序、熔融共混热降解及高温高湿水解3个过程，从而抑制了PET的降解，减少了样品中的低分子量PET的含量，控制了分子量变宽的趋势。

随着碳化二亚胺含量的增加，PET样品的熔融流动性能下降，表现为水解前后特性黏度均较未添加时明显上升。一方面，碳化二亚胺与端羧基的化学反应，抑制了PET的降解，减小了相对分子质量的下降量；另一方面，碳化二亚胺与端羧基的化学反应，来自碳化二亚胺的两个苯环参加了PET的分子链组成，增加了分子链的支链，也就增加了分子链活动的阻力，宏观上表现为流动性能的下降。随着碳化二亚胺含量的继续增加，质量分数超过2.0%后，PET特性黏度呈现明显下降趋势，虽然仍高于没有添加碳化二亚胺的PET-1，但是可以看到在碳化二亚胺质量分数为2.0%时的特性黏度达到峰值。分析原因：由于碳化二亚胺的t_m仅为51 ℃，远低于共混温度270~275 ℃，其在PET尚未熔融时已完全熔融，添加量过高时，其自身的熔融流动性能改善了PET的流动，局部表现为含量高时特性黏度下降。然而，由于共混过程中存在分散均匀问题，不能确保PET整体流动性能得到改善。提升PET材料相对分子质量并降低端羧基含量，能够有效提升材料的耐湿热老化性能[19]。因此，添加碳化二亚胺能够提升PET的耐水解老化性能，综合加工过程PET特性黏度及t_m的变化情况，碳化二亚胺质量分数为2.0%比较适宜。

3 结论

在PET中添加碳化二亚胺，进行熔融共混，与未添加碳化二亚胺的PET进行对比分析。结果表明：碳化二亚胺与PET发生化学反应，使PET的分子结构发生变化；随着碳化二亚胺含量的增加，PET的t_m呈现下降趋势，t_c的变化出现反复，总体上对PET成型加工过程的稳定控制产生不利的作用；热失重温度先明显上升后有所下降；高温高湿水解后，PET的耐水解老化性能随着碳化二亚胺含量的增加而明显提升，但熔融流动性能下降。结合PET薄膜的加工性能特点分析，确定碳化二亚胺质量分数为2.0%时，PET综合性能最佳。此时，t_m为253.0 ℃，t_c为192.0 ℃，特性黏度为0.507 7 dL/g，端羧基含量为9.3 mmol/kg。碳化二亚胺的添加可以提高PET的耐水解老化性能，这对改善太阳能背板材料的使用性能及延长其使用寿命均十分有利。上述结论具有工业应用价值，后续需要进一步研究改性后的PET材料力学性能，为实现工业化生产创造条件。

参考文献

[1] 黄洛玮, 王树霞, 司虎, 等. PTA-IPA-AA三元共聚酯薄膜的制备及性能研究[J]. 合成纤维工业, 2023, 46(3): 45-48.
[2] 杨文涛. 光伏背板及聚酯薄膜背板市场研究[J]. 当代石油石化, 2024, 32(10): 21-25.
[3] 朱子轩, 刘海芬, 范家钊, 等. 光伏背板黏接材料和共挤黏接技术研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(7): 174-186.
[4] 唐晓峰, 黄婷, 朱旭, 等. 不同类型抗水解剂应用于PET材料的抗水解效果评价[J]. 精细化工, 2023(10): 21-25.
[5] 宁军. 2020—2021年世界塑料工业进展(II): 工程塑料和特种工程塑料[J]. 塑料工业, 2022, 50(5): 1-31.
[6] 陈颖, 陈忠钢, 张鑫, 等. BOPET膜用新型聚酯研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2023, 35(6): 52-55.
[7] 田莹, 吕涯. 两种抗水解剂作用于TMPTO的效果分析[J]. 现代化工, 2020, 40(4): 173-178.
[8] 唐荣芝, 何婵娟, 何航, 等. 聚合级碳化二亚胺的合成及湿热老化研究[J]. 塑料助剂, 2021(6): 21-25.
[9] 董建廷, 丁群, 唐晓峰. 脂环族聚合型碳化二亚胺的合成及其在PBAT中的应用[J]. 塑料助剂, 2018(5): 35-41.
[10] 朱寿进, 卫艳玲, 赵有中. 一种聚酯多元醇的合成与表征[J]. 塑料包装, 2023, 33(3): 1-5.
[11] WUNDERLICH B. Equilibrium melting of flexible linear macromolecules[J]. Polymer Engineering & Science, 1978, 18(6): 431-436.
[12] 王美珍, 张玉, 孟兵, 等. PBAT的加工性能与降解性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 68-74.
[13] 陈淑海, 宋小娜, 陈海良, 等. 聚酯型热塑性聚氨酯弹性体耐湿热性能的研究[J]. 聚氨酯工业, 2018, 33(1): 5-7.
[14] 郑哲, 王建华, 江泽琦, 等. 碳化二亚胺用作酯类液压油抗水解添加剂性能的研究[J]. 石油炼制与化工, 2016, 47(6): 90-93.
[15] 陈志明, 黄洛玮, 司虎, 等. 双向同步拉伸工艺对PET聚酯薄膜性能的影响[J]. 合成技术及应用, 2023, 38(1): 1-6.
[16] 陈锐, 殷年伟, 丁超, 等. 碳化二亚胺对PBT材料的湿热老化的影响研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(增刊1): 137-141.
[17] 彭超. 双向拉伸聚酯薄膜生产线干燥工序对薄膜生产及性能的影响[J]. 安徽化工, 2021, 47(1): 71-73.
[18] 於亚雷, 孙一童, 朱寿进. 耐高温高湿聚酯的合成与表征[J]. 塑料包装, 2024, 34(1): 9-12.
[19] 赵永冰. PET薄膜的抗水解性能研究[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(2): 53-55.