http://pmse.scu.edu.cn

聚碳酸酯型热塑性聚氨酯弹性体对聚碳酸环己撑酯的增韧改性

杨晨晨[1,2,3]，王 佼[1,2,3]，刘今乾[1,2,3]，李应平[1,2,3]，袁 聪[1,2,3]
王燕周[1,2,3]，吕博学[1,2,3]，王珊珊[4]

（1. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司，陕西 西安 710100；2. 国家能源煤炭分质清洁转化重点实验室，陕西 西安 710100；
3. 陕西省低阶煤分质利用创新中心，陕西 西安 710100；4. 长安大学 理学院，陕西 西安 710064）

摘要：聚碳酸环己撑酯（PCHC）是一种由二氧化碳和环氧环己烷制备得到的脂肪族聚合物，具有极大的应用潜力。为了扩大该聚合物的应用范围，提高其韧性非常关键。文中将聚碳酸酯型热塑性聚氨酯弹性体（PCDL-TPU）作为增韧剂，与PCHC进行共混改性，研究了PCHC/PCDL-TPU共混物的微观结构、结晶行为和热力学性能。结果表明，PCHC和PCDL/TPU都为非结晶型共聚物，PCHC/ PCDL-TPU二者相容性良好，共混物的玻璃化转变温度（T_g）单一，介于PCHC-TPU和PCDL-TPU之间。随着PCDL-TPU含量的增加，改性后的PCHC韧性显著增强，冲击强度高达82.92 kJ/m^2，断裂伸长率提升至348%，与未改性PCHC相比，分别提高了约82倍和200倍。

关键词：聚碳酸环己撑酯；韧性；聚氨酯弹性体；熔融共混
中图分类号：TQ317 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）07-0062-09

采用CO_2与环氧环己烷（CHO）共聚制备聚碳酸环己撑酯（PCHC），工艺简单，成本低廉[1]，可以减少CO_2的排放，产生更多的经济价值[2]，是目前研究的热点之一。尽管PCHC材料玻璃化转变温度（T_g）较高，拉伸强度较好，被认为是聚苯乙烯的绿色替代品[3]；但PCHC的物理性能类似于脆性聚合物，断裂伸长率仅为1%~2%[4]，使其应用受到限制，因此，增韧对PCHC的应用非常重要。

目前，提高聚合物韧性的方法有很多，包括共聚改性、共混改性等。Denk等[5]合成了PCHC-b-PDMS嵌段共聚物，该共聚物性能优异；当PDMS的掺入量仅为27%时，共聚物的断裂伸长率可达24%，同时，拉伸强度高达27.9 MPa，弹性模量高达1726 MPa，将软段PDMS与脆性PCHC进行共聚改性，提高了PCHC的力学性能。Kernbichl等[6]将β-丁内酯（BBL）与CHO，CO_2单体混合进行三元共聚，得到含有软段聚羟基丁酸（PHB）和硬段PCHC的三聚物；PHB的加入使得PCHC的弹性模量降低，且当三聚物相对分子质量超过1×10^5时，断裂伸长率增加，力学性能提高。Lin等[7]将PCHC和有机改性的层状苯基磷酸锌（m-PPZn）通过溶液混合工艺制备成PCHC/m-PPZn纳米复合材料，结果表明，层状材料在PCHC基体中部分分层并随机分散。在80 ℃，1% PCHC/m-PPZn纳米复合材料的动态力学性能比纯PCHC基体提高了约114%。

共混改性通过将2种或多种聚合物均匀混合以提高材料性能，比共聚改性更经济，更简便[8,9]。热塑性聚氨酯弹性体（TPU）作为常用的改性材料，因其优异的柔韧性和生物相容性，与其他聚合物共混可以提高聚合物的力学性能、韧性、热性能等，应用广泛[10,11]。Han等[12]在聚碳酸亚丙酯（PPC）中加入聚酯基TPU制备了PPC/TPU共混物；与纯PPC相比，共

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0075
收稿日期：2024-08-06
基金项目：陕西省重点研发项目(2021ZDLGY13-08)；陕西省重点研发项目(2023-LL-QY-10)；国家自然科学基金青年项目(22404008)；
陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-128)
通讯联系人：杨晨晨，主要从事聚氨酯相关材料研究，E-mail: yangcc@sxccti.com

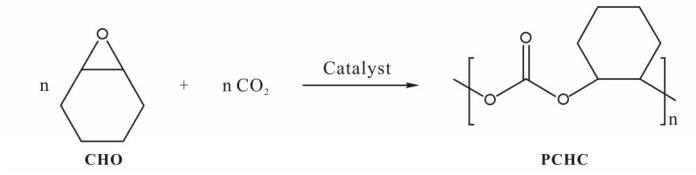


Fig. 1 Synthesis of PCHC by copolymerization of CHO and CO_2

混物的热稳定性和力学性能均显著提高。当TPU质量分数为20%时，韧性的增强导致PPC基体和TPU颗粒发生剪切屈服，PPC/TPU共混物表现出脆性-延展性转变。Hao等[13]采用熔融复合法制备了聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）/ TPU的共混物，结果表明，添加TPU后，PBT的韧性明显提高，70/30 PBT/TPU共混物的断裂伸长率和冲击强度分别可达410%和62.9 kJ/m^2。

目前，通过TPU/PCHC共混对PCHC改性还没有相关报道。本文用聚碳酸酯多元醇（PCDL）合成聚碳酸酯型聚氨酯（PCDL-TPU），以PCDL-TPU为改性剂制备PCHC/PCDL-TPU共混材料，对PCHC进行共混改性。由于PCDL-TPU和PCHC链段中都含有碳酸酯结构，化学结构相似，因此可以不用额外添加增容剂就能很好地相容；同时，二者的混合提高了PCHC材料的韧性，能够拓宽新型PCHC材料的应用范围。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

环氧环己烷（CHO）：上海阿拉丁试剂有限公司；氢化钙（CaH_2）：上海阿拉丁试剂有限公司；CO_2：99.99%，泰达公司；有机硼催化剂：实验室自制；PCDL：$\overline{M}_n$=2000，日本宇部公司；二苯基甲烷二异氰酸酯（MDI）：万华化学集团股份有限公司；有机铋催化剂：BCAT-E16，广州优润合成材料有限公司；1,4-丁二醇（BDO）：上海阿拉丁试剂有限公司。

1 L高压反应釜：GSHK-1L，威海新元化工机械有限公司；单螺杆挤出机：TY-7003H，江苏天源试验设备有限公司；手套箱：Universal (1800/750/900)，上海米开罗那机电技术有限公司；傅里叶变换红外光谱仪（FT-IR）：Vertex 80，德国布鲁克；凝胶渗透色谱仪（GPC）：1515+2414，美国Waters；冲击试验机：JM-3，长春市智能仪器设备有限公司；拉力试验机：Instron 1121，英国Instron；扫描电子显微镜（SEM）：JSM-IT800，日本电子株式会社；差示扫描量热仪（DSC）：DSC 204F1，德国耐驰；X射线衍射仪（XRD）：D8 ADVANCE，德国布鲁克；动态力学热分析仪（DMA）：DMA 242E，德国耐驰。

1.2　实验过程

1.2.1　PCHC材料的合成：采用一锅法合成。1 L高压反应釜120 ℃烘干5 h，CHO通过氢化钙除水（$C(H_2O)$≤30 mg/L），在手套箱中将0.3 g有机硼催化剂溶于500 mL CHO中，常温将共混溶液加入高压反应釜中，通入纯度为99.99% 的CO_2至2 MPa, 60 ℃搅拌反应8 h。反应完全后，将产物置于100 ℃真空烘箱中干燥24 h，脱出未反应完单体，干燥后粉碎得到PCHC粉末，反应机理如Fig.1所示。

1.2.2　PCHC/PCDL-TPU共混材料的制备：将PCHC粉末在70 ℃真空烘箱中干燥8 h，将PCDL在120 ℃真空烘箱中干燥2 h，将计量好的PCHC，PCDL，BDO和BCAT-E16倒入烧杯中，升温至80 ℃搅拌均匀待用，MDI倒入烧杯中，升温至80 ℃搅拌待用，将二者加入单螺杆挤出机中进行挤出-注塑。通过设置单螺杆挤出机加料段140 ℃、熔化段195 ℃、均化段180 ℃，推进速度60 r/min来控制共混反应过程，当注塑得到的样条呈现颜色均一、表面平整光滑的状态且无液体残留时，说明各组分反应完全，得到PCHC/PCDL-TPU共混材料，如Fig. 2所示。在一定温度下，PCHC/PCDL-TPU共混物的表观黏度随着PCDL-TPU含量的变化而有所不同，但均低于纯PCHC的表观黏度，适量PCDL-TPU的加入可提高PCHC的加工流动性。PCHC/PCDL-TPU共混物的质量比按照100/0，90/10，80/20，70/30，60/40和50/50进行挤出-注塑，Tab. 1给出了不同PCHC/PCDL-TPU的共混比，挤出-注塑得到的样条在50%的相对

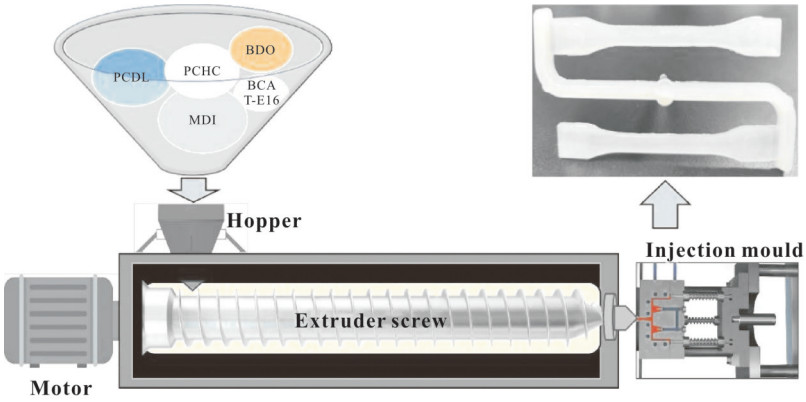


Fig. 2 Synthesis of PCHC/PCDL-TPU blends

Tab. 1 Blending ratio of different PCHC/PCDL-TPU blends

Sample name	*m*(PCHC)/g	*m*(PCDL)/g	*m*(BDO)/g	*m*(MDI)/g	*m*(BCAT-E16)/g
PCHC	100				
PCDL-TPU		114.75	10.68	45.35	0.10
PCHC/PCDL-TPU 90/10	100	7.46	0.69	2.95	0.02
PCHC/PCDL-TPU 80/20	100	16.80	1.56	6.64	0.03
PCHC/PCDL-TPU 70/30	100	28.80	2.68	11.38	0.05
PCHC/PCDL-TPU 60/40	100	44.79	4.17	17.70	0.05
PCHC/PCDL-TPU 50/50	100	67.19	6.25	26.56	0.10

湿度和60 ℃放置72 h备用。

1.3 测试与表征

1.3.1 结构分析：采用FT-IR分析PCHC和PCDL-TPU的化学结构，波数范围为400~4000 cm^{-1}。

采用GPC测定PCHC和PCDL-TPU的相对分子质量及分子量分布，洗脱液为四氢呋喃，流速为1.25 μL/min。

1.3.2 力学性能测试：悬臂梁缺口冲击试验根据ASTM D256-2010标准进行。样品从模压成型试样中获得，尺寸为 $L\times W\times H$= 80 mm×10 mm×3 mm。铣削槽口深度为2.54 mm，角度为45°，缺口半径为0.25 mm。

单轴拉伸试验根据ASTM D638-2008标准进行。试样为哑铃型，尺寸为 $L\times W\times H$ = 75 mm×5 mm×2 mm，拉伸速率为50 mm/min。每个样品至少测试5次，结果取平均值。

1.3.3 微观结构表征：通过SEM对PCHC及共混物拉伸试验的断裂面进行表征。在SEM观察之前，在断裂表面均匀地溅射镀金。

1.3.4 热性能分析：通过差示扫描量热仪（DSC）研究注塑样品的玻璃化转变温度。测试温度范围在－50~150 ℃，首先将样品以10 °C/min从室温升温到150 °C，恒温3 min以消除样品热历史，然后以10 °C/min降温到－50 °C，再以10 °C/min升温至150 °C。样品质量在5~10 mg，氮气吹扫，吹扫速率为40 mL/min。

1.3.5 结晶行为分析：通过X射线衍射仪进行广角X射线衍射实验。室温，衍射仪在40 kV和30 mA条件下，以1.2 (°)/min的扫描速率和5°~90°的扫描范围记录X射线衍射曲线。

1.3.6 动态力学性能分析：通过DMA分析PCHC/PCD-TPU样品损耗角正切（tan δ）与储能模量（E'）的关系图。样品尺寸为 $L\times W\times H$= 20 mm× 10 mm× 1 mm，张力模式下，恒定加热速率为3 ℃/min，频率为

1 Hz，温度范围为－50~150 ℃。

2　结果与讨论

2.1　结构分析

PCHC 和 PCDL-TPU 的 FT-IR 光谱图如 Fig.3 所示。由光谱图可以看出，在 Fig.3(a)中，1749 cm^{-1} 处特征峰对应 PCHC 末端的 C=O 吸收峰；在 Fig.3(b)中，1738 cm^{-1} 和 3336 cm^{-1} 对应 PCDL-TPU 的 C=O 和 N—H 振动峰；同时，3420 cm^{-1} 对应的 PCDL 末端羟基键的特征峰消失，说明 PCDL 全部参与了反应。

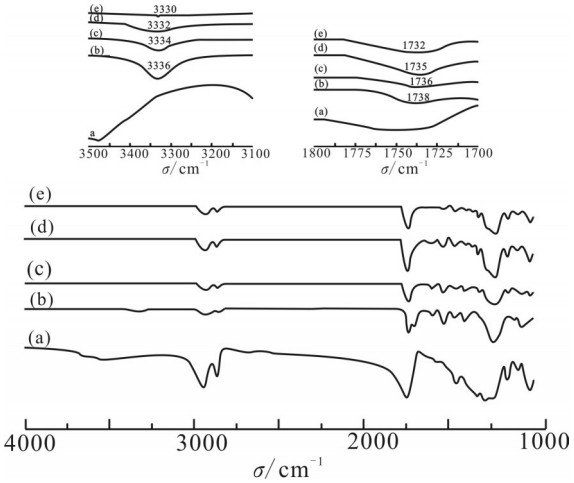


Fig. 3　FT-IR spectra of (a) pure PCHC, (b) pure PCDL-TPU, (c) PCHC/PCDL-TPU 80/20, (d) 70/30 and (e) 60/40

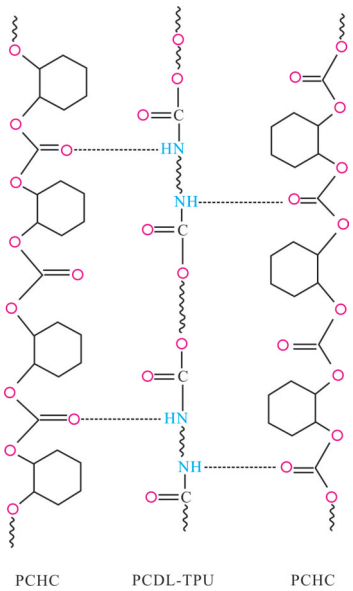


Fig. 4　Schematic illustration of hydrogen- bonding between the molecules of PCHC and PCDL-TPU

通过 FT-IR 表征，可以识别共混物中 2 种成分之间的化学相互作用，当 2 种聚合物混合时，光谱的吸收峰会发生位移或者拓宽。因此，通过 FT-IR 表征，可以明确共混物中 PCHC 和 PCDL-TPU 之间存在的化学相互作用。从 Fig.3(c~e)可以看出，随着共混物中 PCDL-TPU 含量的增加，3336 cm^{-1} 处的 N—H 吸收峰和 1749 cm^{-1} 处的 C=O 吸收峰都向低波数偏移，这表明 PCDL-TPU 中的氨基甲酸酯基与 PCHC 中的碳酸酯键形成了氢键，如 Fig.4 所示，从而增强了 PCDL-TPU 与 PCHC 分子链的相互作用。

Fig.5 给出了 PCHC 和 PCDL-TPU 的分子量分布图，从图中可以看出，PCHC 的重均分子量为 $\overline{M}_w$ = 1.46×10^5，多分散度为 1.19。PCDL-TPU 的重均分子量为 $\overline{M}_w$= 7.82×10^4，多分散度为 2.09。

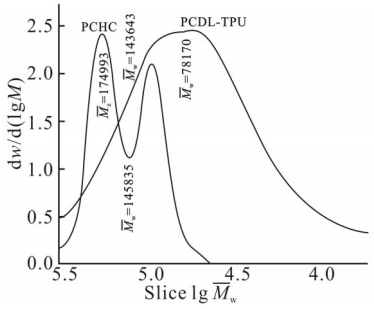


Fig. 5　Molecular weight distribution of PCHC and PCDL-TPU

2.2　力学性能分析

从 Fig.6 中可以看出，纯 PCHC 的缺口冲击强度约为 1 kJ/m^2。加入 10% PCDL-TPU 后，共混物的冲击强度没有明显提高。然而，随着 PCHC/PCDL-TPU 共混物中 PCDL-TPU 质量分数从 10%提高到 50%，共混物的缺口冲击强度从 2.3 kJ/m^2 显著提高至 82.92 kJ/m^2，提高了约 35 倍；与纯 PCHC 相比，共混物的缺口冲击强度提高了约 82 倍。

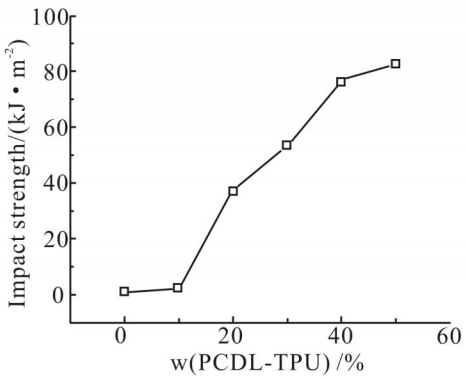


Fig. 6　Impact strength of PCHC/PCDL-TPU blends

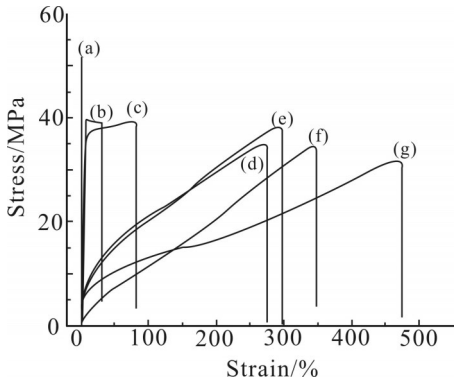


Fig. 7 Tensile stress-strain curves of PCHC/PCDL-TPU blends:(a) pure PCHC; (b) PCHC/PCDL-TPU 90/10; (c) 80/20; (d) 70/30; (e) 60/40; (f) 50/50; (g) PCDL-TPU

Fig.7 为 PCHC 和 PCDL-TPU 及 PCHC/PCDL-TPU共混物的拉伸应力-应变曲线。很显然，PCHC/PCDL-TPU 共混物和 PCDL-TPU 都表现出产率特性，然而，纯的 PCHC 断裂伸长率最低，并且表现出脆性断裂行为。不同 PCDL-TPU 含量的 PCHC/PCDL-TPU 共混物的断裂伸长率对共混物的组成有很强的依赖性。从 Fig.7 可以看出，与纯 PCHC 相比，PCHC/PCDL-TPU 共混物的断裂伸长率随着 PCDL-TPU 添加量的增加而变大。纯 PCHC 的断裂伸长率约为 1.7%，纯 PCDL-TPU 的断裂伸长率约为 467%；随着 PCDL-TPU 含量的提高，共混物的断裂伸长率不断增加，当 PCHC/PCDL-TPU 共混比为 50/50 时，共混物的断裂伸长率增加至约 348%，与纯 PCHC 相比，提高了约 200 倍。

Tab.2 总结了 PCHC，PCDL-TPU 及 PCHC/PCDL-TPU 共混物的冲击强度、拉伸强度和断裂伸长率数据。结果表明，添加 PCDL-TPU 可以改善 PCHC 的脆性，同时，添加 PCDL-TPU 可以显著提高 PCHC 的断裂伸长率和冲击强度。然而，随着 PCDL-TPU 含量的增加，共混物的拉伸强度有所下降，后续可以添加增容剂，如多元环氧扩链剂 ADR 等，通过提高 PCHC 和 PCDL-TPU 相界面的反应增容效果，增强两相界面间黏附力，使分散相更加细化，从而提高共混物的力学强度。综合来看，PCDL-TPU 可以显著提高 PCHC 的韧性性能。

2.3 SEM 分析

拉伸和冲击试验结果表明，使用 PCDL-TPU 可以提高 PCHC 的韧性。采用 SEM 对拉伸试样断裂表面区域进行了研究。利用扫描电镜观察 PCHC/PCDL-TPU 共混物的拉伸断裂面，相应的 SEM 图像如 Fig.8 所示。在橡胶/聚合物共混物增韧机理中，银纹和剪切屈服是 2 种主要的增韧方式[14-16]。从 Fig.8 (a)可以看出，纯 PCHC 的拉伸断裂表面相对光滑，表

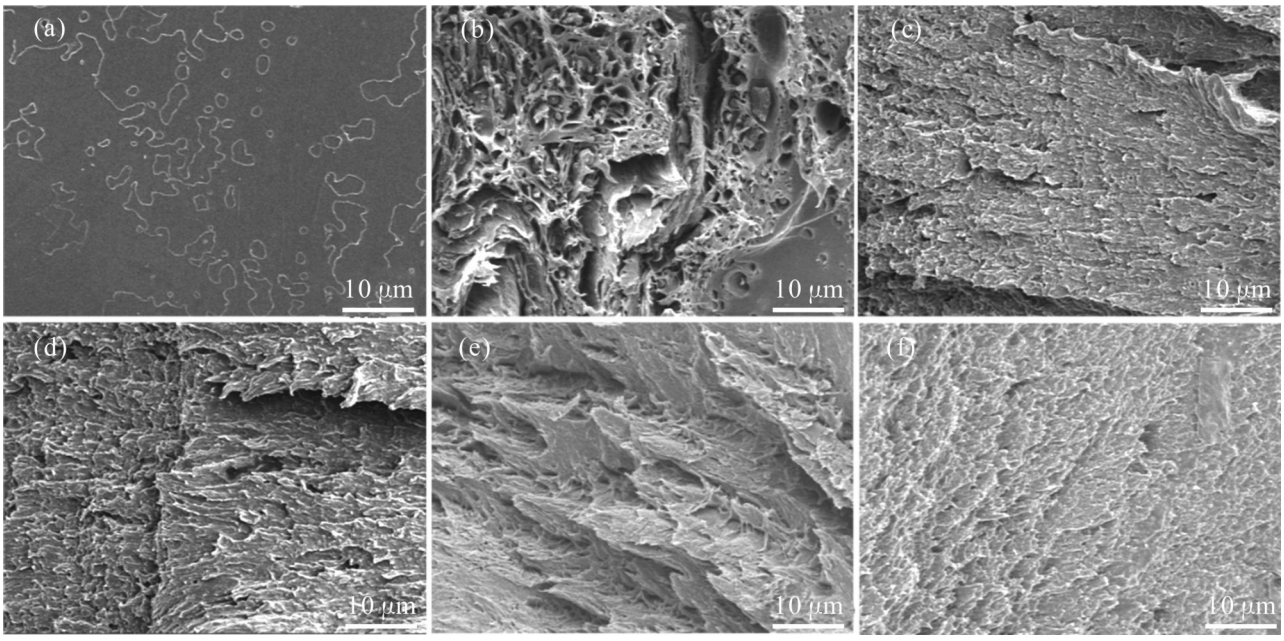


Fig. 8 SEM photographs of the impact fracture surface of PCHC/PCDL-TPU blends: (a) pure PCHC; (b) PCHC/PCDL-TPU 90/10; (c) 80/20; (d) 70/30; (e) 60/40; (f) 50/50

Tab. 2 Mechanical properties of PCHC/PCDL-TPU blends

m(PCHC)/*m*(PCDL-TPU)	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Impact strength/(kJ·m^{-2})
100/0	51.78±3.55	1.72±0.50	1.00±0.05
90/10	39.79±2.25	30.65±2.80	2.30±0.20
80/20	39.20±1.62	83.11±10.20	37.24±2.45
70/30	35.21±1.50	275.70±22.50	53.44±4.27
60/40	38.22±2.10	297.79±18.45	76.65±6.37
50/50	34.12±3.80	348.40±25.20	82.92±6.55
0/100	31.64±1.25	466.98±30.45	

明在拉伸试验过程中几乎没有发生剪切屈服,表现为脆性断裂,这与纯PCHC的低韧性相吻合。从Fig.8(b)可以看出,当PCHC/PCDL-TPU中PCDL-TPU质量分数达到10%时,共混物的断裂面出现了粗糙的表面和剪切带。从Fig.8(c)可以看出,随着PCDL-TPU质量分数继续增加到20%,二者共混均匀,拉伸断裂面出现较多的根状胡须和长韧带结构。从Fig.8(d~f)可以看出,当PCDL-TPU质量分数继续从30%提高到50%后,PCHC/PCDL-TPU共混物的断裂面呈现出更密集的剪切带。结果表明,PCDL-TPU在PCHC基体中相容性良好,在外力作用下,PCDL-TPU产生形变,发生了剪切屈服,出现大量的剪切带,吸收了大量能量,这是主要的增韧机理。

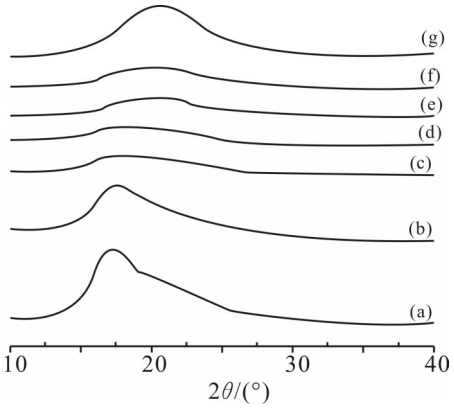


Fig. 9 WAXD patterns of (a) PCHC, (b) PCHC/PCDL-TPU 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50 and (g) PCDL-TPU

2.4 XRD分析

PCHC的等规性对其结晶度有重要影响,只有等规度大于90%的共聚物才可结晶,等规PCHC是一种典型的半结晶热塑性塑料,而无规PCHC则是非结晶聚合物[17]。Fig.9(a)和Fig.9 (g)显示,纯PCHC和PCDL-TPU分别在2θ为18°和20°处显示出宽峰,表明所制备的PCHC和PCDL-TPU属于非结晶型。随着PCHC/PCDL-TPU中PCDL-TPU含量增加,PCHC的宽峰向PCDL-TPU的宽峰偏移,并且峰的强度也随之下降。说明PCHC和PCDL-TPU二者相容性良好,并且共混物为非结晶性聚合物,共混体系的非结晶性使得材料韧性上升,宏观表现为断裂伸长率及耐冲击强度的提高,这与力学测试结果相符。

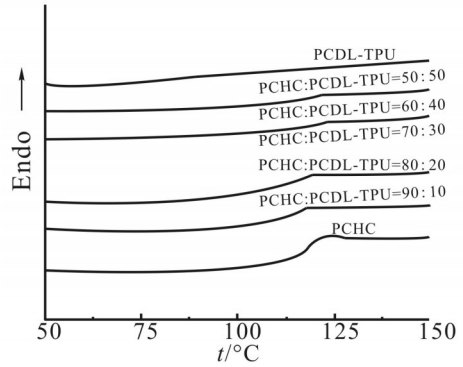


Fig. 10 DSC thermograms recorded during the second heating run for pure PCHC, pure PCDL-TPU and PCHC/ PCDL-TPU blends

2.5 DSC分析

Fig.10显示了纯PCHC、纯PCDL-TPU和PCHC/PCDL-TPU共混物的DSC曲线。PCDL-TPU的软段玻璃化转变温度(T_g)为−6.6 ℃,而PCDL-TPU的硬段则没有明显的玻璃化转变。PCHC的T_g为124.2 ℃。通过共混物的T_g可表征组分相容性[18],总结了不同组分PCHC/ PCDL-TPU共混物的T_g,如

Tab.3所示。结果显示，当PCHC中加入PCDL-TPU后，共混物只有1个T_g，大小介于纯聚合物之间，这说明共混物中不存在明显的两相结构，二者相容性好。随着PCDL-TPU含量的增加，T_g随之上升，当PCDL-TPU质量分数为50%时，T_g=117.9 ℃。推测这可能是由于PCDL-TPU含量增加，TPU的硬段与PCHC之间形成的氢键数量增多，相互作用增强，限制了PCHC基体的分子链运动，导致T_g升高。

Tab. 3 Glass transition temperature of PCHC/ PCDL-TPU blends obtained from the second heating run

m(PCHC)/*m*(PCDL-TPU)	T_g/℃
100/0	124.2
90/10	118.8
80/20	119.4
70/30	120.5
60/40	122.9
50/50	123.7
0/100	−6.6

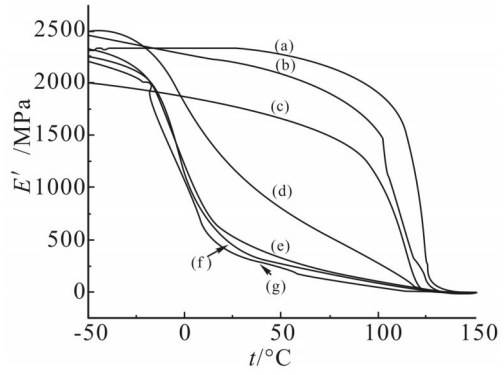


Fig. 11 DMA curves of (a) PCHC, (b) PCHC/PCDL-TPU 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50 and (g) PCDL-TPU

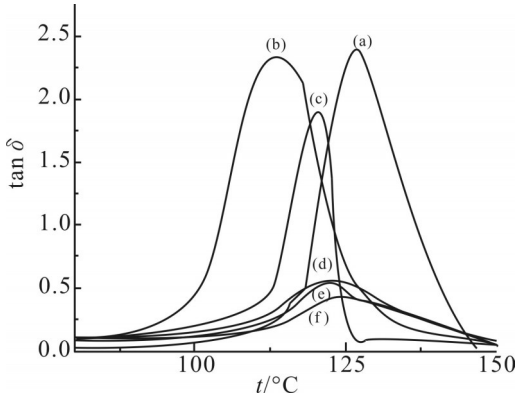


Fig. 12 tan *δ*-*t* curves of (a) PCHC, (b) PCHC/PCDL-TPU 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50 and (g) PCDL-TPU

2.6 DMA分析

采用动态力学热分析研究了纯PCHC，PCDL-TPU和PCHC/PCDL-TPU共混物的模量变化。纯PCHC，PCDL-TPU和PCHC/PCDL-TPU共混物的储能模量（*E′*）-*t*曲线如Fig. 11所示。从图中可以看出，在−50~125 ℃范围内，PCHC/PCDL-TPU共混物的储能模量低于纯PCHC的储能模量，表明PCDL-TPU使PCHC的韧性增加。

纯PCHC，PCDL-TPU及PCHC/PCDL-TPU共混物的损耗因数tan *δ*-*t*曲线如Fig.12所示。损耗因数tan $\delta = E''/E'$，从Fig.12中可以看出，tan *δ*随着PCDL-TPU含量的增加而不断降低，这表明PCDL-TPU的加入提高了共混物的弹性，韧性显著提高。通过Fig.12也能看出，PCHC/PCDL-TPU共混物的玻璃化转变温度只有1个，并且位于纯PCHC和PCDL-TPU的玻璃化转变温度之间，这与DSC分析结果一致，表明共混物相容性较好。

3 结论

本文通过将PCDL-TPU与PCHC进行熔融共混来提高PCHC的韧性。对不同比例的PCHC/PCDL-TPU共混物进行表征分析，结果表明，PCHC中的羰基与PCDL-TPU的氨基甲酸酯基之间存在分子间氢键，从而增强了PCHC与PCDL-TPU分子链的相互作用，这一结果通过FT-IR图谱得到了证实。其力学性能表明，通过添加PCDL-TPU，共混物的韧性得到显著提高。另外，当PCDL-TPU的质量分数为20%时，共混物会发生脆性-韧性转变。SEM、热分析和XRD等分析结果表明，PCHC和PCDL-TPU之间相容性较好。PCHC/PCDL-TPU间发生了剪切屈服，这是PCHC的韧性提高的原因。研究表明，PCHC/PCDL-TPU共混可以提高PCHC的韧性，从而拓宽PCHC材料的使用范围，具有重要的现实意义。

参考文献：

[1] Kothandaraman J, Zhang J, Glezakou V A, *et al*. Chemical transformations of captured CO_2 into cyclic and polymeric carbonates[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2019, 32: 196-201.

[2] Huang C H, Tan C S. A review CO_2 utilization. aerosol and air

quality research[J]. 2014, 14: 480-499.

[3] Cao H, Wang X. Carbon dioxide copolymers: emerging sustainable materials for versatile applications[J]. SusMat, 2021, 1: 88-104.

[4] Koning C, Wildeson J, Parton R, *et al*. Synthesis and physical characterization of poly (cyclohexane carbonate), synthesized from CO_2 and cyclohexene oxide[J]. Polymer, 2001, 42: 3995-4004.

[5] Denk A, Großmann P, Rieger B. Soft side of aliphatic polycarbonates: with PCHC-b-PDMS copolymers toward ductile materials[J]. Macromolecules, 2023, 56: 4318-4324.

[6] Kernbichl S, Reiter M, Mock J, *et al*. Terpolymerization of β-butyrolactone, epoxides, and CO_2: chemoselective CO_2- switch and its impact on kinetics and material properties[J]. Macromolecules, 2019, 52: 8476-8483.

[7] Lin H C, Ko B T, Wu T M. Thermal and mechanical properties of CO_2- based biodegradable poly (cyclohexene carbonate)/ organically modified layered zinc phenylphosphonate nanocomposites[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27: 1065-1070.

[8] Zhang K Y, Ran X H, Wang X M, *et al*. Improvement in toughness and crystallization of poly(L-lactic acid) by melt blending with poly(epichlorohydrin-co-ethylene oxide)[J]. Polymer Engineering & Science, 2011,51: 2370-2380.

[9] Imre B, Pukánszky B. Compatibilization in bio- based and biodegradable polymer blends[J]. European Polymer Journal, 2013, 49: 491215-1233.

[10] Zhang H C, Kang B H; Chen L S, *et al*. Enhancing toughness of poly (lactic acid)/thermoplastic polyurethane blends via increasing interface compatibility by polyurethane elastomer prepolymer and its toughening mechanism[J]. Polymer Testing, 2020, 87:106521.

[11] Ahad N A. A Recent blend of thermoplastic polyurethane (TPU) [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 957: 012045.

[12] Han D M, Chen G J, Xiao M, *et al*. Biodegradable and toughened composite of poly (propylene carbonate)/thermoplastic polyurethane (PPC/TPU): effect of hydrogen bonding[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19: 2032.

[13] Hao Y P, Yang H L, Zhang H L, *et al*. Miscibility, crystallization behaviors and toughening mechanism of poly(butylene terephthalate)/thermoplastic polyurethane blends[J]. Fibers and Polymers, 2018, 19: 1-10.

[14] Huang J R, Fan J F, Cao L M, *et al*. A novel strategy to construct co- continuous PLA/NBR thermoplastic vulcanizates: metal-ligand coordination- induced dynamic vulcanization, balanced stiffness- toughness and shape memory effect[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123828.

[15] He Y, Yang Z T, Qu J P. Super- toughened poly(lactic acid)/ thermoplastic poly (ether)urethane nanofiber composites with in-situ formation of aligned nanofibers prepared by an innovative eccentric rotor extruder[J]. Composites Science and Technology, 2019, 169: 135-141.

[16] Ma M, Zheng H M, Chen S, *et al*. Super-toughened poly(llactic acid) fabricated via reactive blending and interfacial compatibilization[J]. Polymer International, 2016, 65: 1187-1194.

[17] Wu G P, Jiang S D, Lu X B, *et al*. Stereoregular poly(cyclohexene carbonate)s: unique crystallization behavior[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2012, 30: 487-492.

[18] Chang F L, Hu B, Huang W T, *et al*. Improvement of rheology and mechanical properties of PLA/PBS blends by in- situ UV-induced reactive extrusion[J]. Polymer, 2022, 259: 125336.

Toughness Enhancement of Poly (cyclohexene carbonate) with Polycarbonate-Based Thermoplastic Polyurethane Elastomers

Chenchen Yang[1,2,3], Jiao Wang[1,2,3], Jinqian Liu[1,2,3], Yingping Li[1,2,3], Cong Yuan[1,2,3]
Yanzhou Wang[1,2,3], Boxue Lü[1,2,3], Shanshan Wang[4]
(*1. Shaanxi Coal Chemical Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Xi 'an 710100, China; 2. State Energy Key Lab of Clean Coal Grading Conversion, Xi'an 710100, China; 3. Shaanxi Province Innovation Center of Low-Rank Coal Grading Utilization, Xi'an 710100, China; 4. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

ABSTRACT: Poly (cyclohexene carbonate) (PCHC), an aliphatic polymer synthesized by the copolymerization of carbon dioxide and cyclohexane oxide, which is a promising polymer material due to the utilization of carbon dioxide (CO_2). In order to increase the attractiveness of this polymer, it is crucial to enhance its toughness. Herein, thermoplastic polyurethane elastomers based on polycarbonate diol (PCDL-TPU) was used as toughening agent to blend with PCHC by melt blending. The microstructure, crystallization behavior, thermal and mechanical properties of PCHC/PCDL-TPU blends were investigated. The results show that both PCHC and PCDL-TPU are amorphous polymers that exhibit good compatibility when blended together. The blend material shows a single glass transition temperature (T_g), which is between the T_g of the pure polymers. As the composition ratio of PCDL-TPU increases in the blend materials, the toughness of PCHC is significantly enhanced and superior to that of pure PCHC. The impact strength of the blend impressively reaches to 82.92 kJ/m^2, the elongation at break is enhanced to 348%, which increase nearly 82 times and 200 times than those of pure PCHC, respectively.

Keywords: poly (cyclohexene carbonate); toughness; polyurethane elastomer; melt blending