

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.010

高端再生聚碳酸酯与原生聚碳酸酯材料性能对比

付强, 席莺

[沙伯基础(中国)研发有限公司, 上海 201319]

摘要: 高附加值利用废弃塑料要求再生塑料具有良好的性能, 为此对比研究了高端再生聚碳酸酯(R-PC)材料(含有质量分数为 50% 的消费后物理回收的聚碳酸酯原材料)和原生聚碳酸酯(V-PC)材料化学结构、杂质元素、流变性能和介电性能, 并进一步分析了热老化(120 °C)和湿热老化(80 °C, 80% 湿度)对材料光学性能和力学性能的影响。结果表明, R-PC 材料化学结构保持良好, 未发现明显的降解。R-PC 材料中含有少量氯、铁、钙等杂质, 质量分数分别为 0.000 9%, 0.000 7% 和 0.001 1%。R-PC 材料与 V-PC 材料流变性能相近, 没有明显的支化和交联现象, 可采用类似的加工设备和相近的工艺条件对 R-PC 材料进行加工。R-PC 材料热老化和湿热老化的性能变化趋势与 V-PC 保持良好的一致性, 老化后两种材料的光学性能和力学性能整体相差不大, R-PC 的断裂伸长率更容易受热老化和湿热老化的影响。整体来讲, 高端 R-PC 材料具有良好的力学性能、光学性能以及良好的热老化和湿热老化稳定性。

关键词: 消费后再生; 聚碳酸酯; 热老化; 湿热老化; 力学性能; 光学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0063-07

Comparison on properties of high quality recycled polycarbonate and virgin polycarbonate materials

FU Qiang, XI Ying

[SABIC (China) Research & Development Co., Ltd., Shanghai 201319, China]

Abstract : The high value-added utilization of waste plastics requires regenerated plastics to possess excellent performance. Therefore, a comparative study was conducted on the chemical structure, impurity elements, rheological properties, and dielectric properties of high-valued recycled polycarbonate (R-PC) material (contains 50 % post-consumer physically recycled polycarbonate raw materials) and virgin polycarbonate (V-PC) material. Additionally, the effects of thermal aging (at 120 °C) and hydrothermal aging (at 80 °C and 80% humidity) on optical and mechanical properties of these materials were further analyzed. The results show that the chemical structure of R-PC remains intact, with no significant degradation observed. The R-PC material contains trace amounts of impurities of chlorine, iron, and calcium, with concentrations of 0.000 9 wt%, 0.000 7 wt%, and 0.001 1 wt%, respectively. Rheological properties of R-PC are similar to those of virgin V-PC material, indicating no significant branching or crosslinking phenomena for R-PC. Therefore, similar processing equipment and comparable processing conditions can be employed for the processing of the R-PC material. The performances changes of the high-valued R-PC material in terms of thermal and hydrothermal aging remain consistent with those of the virgin V-PC. After aging, the optical and mechanical properties of the two materials have little difference, and the elongation at break of R-PC is more susceptible to thermal aging and hydrothermal aging. Overall, the high-valued R-PC material exhibits excellent mechanical and optical properties as well as good thermal and hydrothermal aging stability.

Keywords : post-consumer recycling ; polycarbonate ; thermal aging ; hydrothermal aging ; mechanical property ; optical property

聚碳酸酯(PC)是一种综合性能优异的热塑性工程塑料, 广泛应用于电子电器、汽车、家电和建筑等领域。近年来, 我国 PC 塑料行业规模急剧扩大^[1],

2022 年我国 PC 塑料消费量达到 279 万 t。如此大的消费量必然也会产生庞大数量的废旧塑料。在“碳达峰、碳中和”发展大背景下, 利用好 PC 废旧塑料

通信作者: 付强, 博士, 研究方向为工程塑料产品设计与工业化应用

收稿日期: 2024-04-04

引用格式: 付强, 席莺. 高端再生聚碳酸酯与原生聚碳酸酯材料性能对比[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 63-69.

FU Qiang, XI Ying. Comparison on properties of high quality recycled polycarbonate and virgin polycarbonate materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 63-69.

不仅可以解决塑料污染问题^[2],同时可以减少对不可再生资源的依赖,减少碳排放,促进PC塑料行业可持续发展^[3-4]。除可采用生物基PC外^[5],实现PC塑料可持续发展的另一种重要方向为废旧PC的回收再生,包括机械回收、化学回收、能量回收等。其中机械回收因其技术壁垒低、工艺简单、投资少等特点,是现阶段PC回收再生的主要方式。然而,由于消费后废塑料天然的劣势,以及一些再生企业回收过程中筛选、破碎、清洗缺乏精细化管理,加之后续改性企业对再生PC原材料管控不足、配方及改性工艺优化不到位,导致机械回收再生PC材料性能显著低于原生PC材料,难以应用到高端领域。目前,市面上销售的绝大多数再生PC材料由于性能较差,只能降级使用。

PC材料热老化和湿热老化的研究已有报道^[6-7],然而,再生PC材料热老化和湿热老化方面的研究鲜有报道。高端再生PC材料性能,特别是光学方面的性能研究报道更为少有。笔者对比研究了高端再生PC材料和原生PC材料的流变、介电、力学、光学等性能,并着重分析了热老化和湿热老化对材料光学与颜色、力学性能的影响,以期对再生PC材料高端和高附加值应用提供基础支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

高端再生PC(简称R-PC):LEXAN T5R141RC,含有质量分数50%消费后回收PC,沙伯基础创新塑料(中国)有限公司;

原生PC(简称V-PC):LEXAN 141R,沙伯基础创新塑料(中国)有限公司。

1.2 主要仪器及设备

凝胶渗透色谱(GPC)仪:1260,美国安捷伦公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析仪:iS50,美国赛默飞世尔公司;

X射线荧光光谱(XRF)仪:QUANT'X,美国赛默飞世尔公司;

旋转流变仪:ARES-G2,美国TA公司;

毛细管流变仪:RHEOGRAPH,德国Gottfert公司;

熔体流动速率(MFR)仪:IM-2,日本东洋精机制作所公司;

网络分析仪:E8363B,美国安捷伦公司;

注塑机:S-2000i,日本发那科公司;

万能材料试验机:Z030,德国Zwick/Roell公司;

摆锤式冲击试验机:日本东洋精机制作所公司;

透射雾影仪:hazegard i,德国BYK公司;

色差仪:7000A,美国爱色丽公司;

热老化烘箱:GPR-2,爱斯佩克环境仪器(上海)有限公司;

恒温恒湿箱:PH-1-1,爱斯佩克环境仪器(上海)有限公司。

1.3 试样制备

将V-PC和R-PC粒子在80℃下干燥4h后,倒入注塑机中,注塑成样条和色板,1~3段温度设定为275,280,285℃,模具温度为70℃,注射压力为40~100 MPa。在研究热老化对材料性能影响时,将测试样条和色板放置于120℃热老化箱中老化一定时间;在研究湿热老化对材料性能影响时,将测试样条和色板放置于温度85℃和湿度85%环境中一定时间。老化后的样条和色板均需放置在恒温恒湿箱[温度(23±2)℃、湿度50%±10%]中48h,再进行分析测试。

1.4 测试与表征

FTIR分析:采用FTIR分析仪分析样品分子结构,测试模式为全反射模式,扫描范围400~4 000 cm⁻¹,扫描次数为32次,分辨率为4 cm⁻¹。

元素分析:采用XRF仪分析样品元素。

分子量分析:采用GPC仪分析样品分子量及分布,以二氯甲烷为流动相,聚苯乙烯作为内标。

流变测试:采用旋转流变仪平行板稳态模式,剪切速率为0.02~100 rad/s;毛细管流变仪测试时的剪切速率范围为100~5 000 s⁻¹。测试温度均为270℃。

MFR测试:MFR按照ASTM D1238-2014进行测试,试验温度为300℃,标称负荷为1.2 kg。

介电性能测试:采用网络分析仪测试样品的介电常数和介电损耗。

力学性能测试:拉伸性能按照ASTM D638-2014测试,采用I型样条,拉伸速率50 mm/min;弯曲性能按照ASTM D790-2014测试,测试速率为1.27 mm/min;冲击性能按照ASTM D256-2014测试,采用悬臂梁形式,摆锤能量为2.7 J,样条A型缺口。样条厚度均为3.2 mm。

光学和颜色测试:采用透射雾影仪按照 ASTM D1003-2014 测试透光率和雾度,采用色差仪测试材料黄度指数。色板厚度均为 2.54 mm。

2 结果与讨论

2.1 MFR 与分子量分析

PC 分子量对材料的力学及加工等性能影响较大^[8]。选取了分子量相当的 V-PC 和 R-PC 材料,首先测试了 V-PC 和 R-PC 的 MFR、分子量及分布,测试结果见表 1。由表 1 可以看出,这两种材料分子量以及 MFR 相差较小。但也可以看出,R-PC 分子量分布略宽于 V-PC。主要原因是回收的 PC 废塑料来自于多种不同的合成技术和应用场景,不同应用场景 PC 分子量分布不同,使得 R-PC 分子量分布变宽。

表 1 V-PC 和 R-PC 的 MFR 和分子量

Tab. 1 MFR and molecular weight of V-PC and R-PC

Sample	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	M_w	M_n	PDI
V-PC	10.3	55 400	23 300	2.38
R-PC	10.8	54 100	20 700	2.61

Notes: M_w is weight-average molecular weight; M_n is number-average molecular weight; PDI is polymer dispersity index.

2.2 FTIR 分析

图 1 是 V-PC 和 R-PC 的 FTIR 谱图。结合文献报道^[9-10],对 V-PC 主要吸收峰进行分析,确定归属如下:3 028 cm⁻¹ 处为苯环上碳氢吸收峰,2 957,2 855 cm⁻¹ 处为甲基上碳氢吸收峰,1 772 cm⁻¹ 处为羰基吸收峰,1 503 cm⁻¹ 处为苯环碳碳吸收峰,1 221,1 186,1 158 cm⁻¹ 处为碳氧吸收峰,1 079,826,1 014 cm⁻¹ 处为苯环 1,4 取代碳氢键吸收峰。对比 V-PC 和 R-PC 的 FTIR 谱图发现,R-PC 主要吸收峰没有发生明显变化,并且没有新的吸收峰出现。说明 R-PC 化学结构与 V-PC 非常接近,采用 FTIR 谱图难以发现两者的区别。

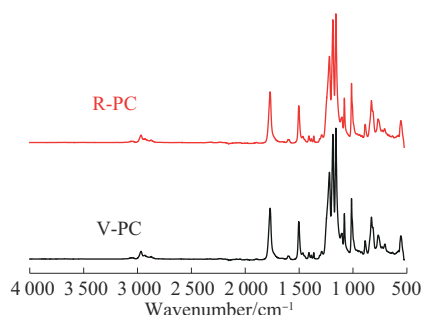


图 1 V-PC 和 R-PC 的 FTIR 谱图

Fig. 1 FTIR spectra of V-PC and R-PC

2.3 元素分析

杂质是再生塑料的痛点。杂质含量高不仅会影响材料的性能,有害物质甚至威胁下游使用者健康^[11]。高端再生塑料应严格控制原材料中杂质含量,以满足法规方面的要求。采用 XRF 方法着重对比了 V-PC 和 R-PC 中卤素和重金属元素的含量,结果见表 2。由表 2 可以看出,与 V-PC 相比,R-PC 仅含有微量的氯、铁和钙等杂质元素。

表 2 V-PC 和 R-PC XRF 元素主要分析结果

Tab. 2 XRF element analysis main results of V-PC and R-PC

Element	Mass fraction of element/%	
	V-PC	R-PC
Cl	n.d	0.000 9
Br	n.d	n.d
Pb	n.d	n.d
Hg	n.d	n.d
Cr	n.d	n.d
Cd	n.d	n.d
Fe	n.d	0.000 7
Ca	n.d	0.001 1

Note: n.d refers to not detected.

2.4 流变性能分析

V-PC 和 R-PC 在不同角频率下的复数黏度以及在不同剪切速率下的剪切黏度如图 2 所示。由图 2 看出,R-PC 复数黏度或剪切黏度在不同的角频率和剪切速率下表现出与 V-PC 良好的一致性。R-PC 流

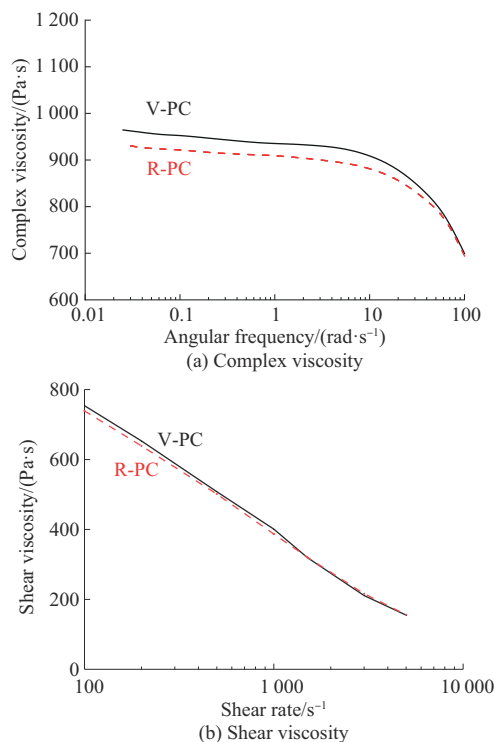


图 2 V-PC 和 R-PC 的黏度(270 °C)

Fig. 2 Viscosity of V-PC and R-PC at 270 °C

变行为表明其没有明显的支化或交联现象^[12]。在相同的角频率或剪切速率下,R-PC复数黏度或剪切黏度略低于V-PC,这主要是由于R-PC分子量略低导致的。R-PC材料流变性能与V-PC非常接近,这有助于采用与V-PC一致的设备和工艺参数加工再生材料,降低了重新开模等因素带来的额外成本。

2.5 介电性能分析

介电常数代表材料作为绝缘体储存电能的能力。介电常数大,材料传输信号性能好;介电常数小,材料的绝缘性能好。介电损耗越小越好,可以降低能量的损失。对比研究了V-PC和R-PC材料介电常数和介电损耗,如图3所示。由图3可以看出,在1~10 GHz测试条件下,随着频率增加,V-PC和R-PC介电常数总体呈增加的趋势,两者之间没有显著的区别。介电损耗表现有所不同,在1~5 GHz测试条件下,V-PC和R-PC介电损耗差异较小;而在5~10 GHz测试条件下,R-PC的介电损耗比V-PC大,且随着频率增加,差异呈扩大的趋势。10 GHz时,V-PC介电损耗为0.009,R-PC介电损耗为0.013。整体来说,在1~10 GHz条件下,V-PC和R-PC材料介电常数和介电损耗相差不大。

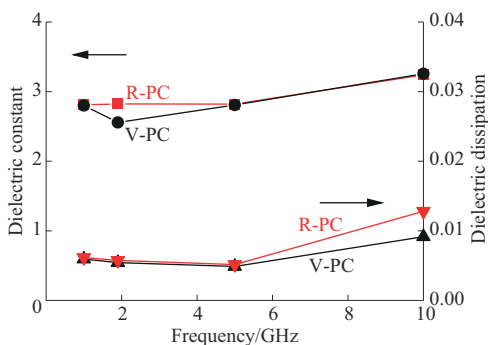


图3 V-PC和R-PC的介电常数和介电损耗

Fig. 3 Dielectric constant and dielectric dissipation of V-PC and R-PC

2.6 光学性能及老化分析

光学应用是PC材料非常重要的应用领域。PC材料颜色关系到最终产品的配色与外观,是重要的考察参数。由于加工、使用及回收过程中热历史、老化降解、引入杂质等原因,回收塑料光学及颜色一般显著差于原生塑料。对比了V-PC和R-PC初始光学性能和颜色,并进一步研究了不同老化方式和老化时长对材料光学性能及颜色的影响。光学性能方面主要考察了透光率和雾度。颜色方面主要考察黄度指数。热老化对比结果如图4所示。由图4可以看出,初始状态(老化时间为0 h)时,R-PC材

料透过率为85.5%(V-PC 88.5%),雾度为1.5%(V-PC 0.7%),黄度指数为0.38(V-PC 0.11)。V-PC材料在透过率、雾度和黄度上均表现出比R-PC更好的指标,说明R-PC材料光学和颜色比V-PC略差。随着热老化时间的延长,V-PC和R-PC光学性能和颜色变化呈现相同的趋势,透过率略微下降,雾度缓慢增加,黄度指数增大,热老化1 000 h时,R-PC透过率为84.9%(V-PC 88.1%),雾度为2.4%(V-PC 1.1%),黄度指数为2.33(V-PC 1.84)。热老化导致材料光学性能变差、颜色变黄。值得注意的是,随着热老化时间的增加,R-PC材料和V-PC材料在光学和颜色方面的差异始终保持相对的稳定,说明R-PC材料的光学性能和颜色具有较好的稳定性。

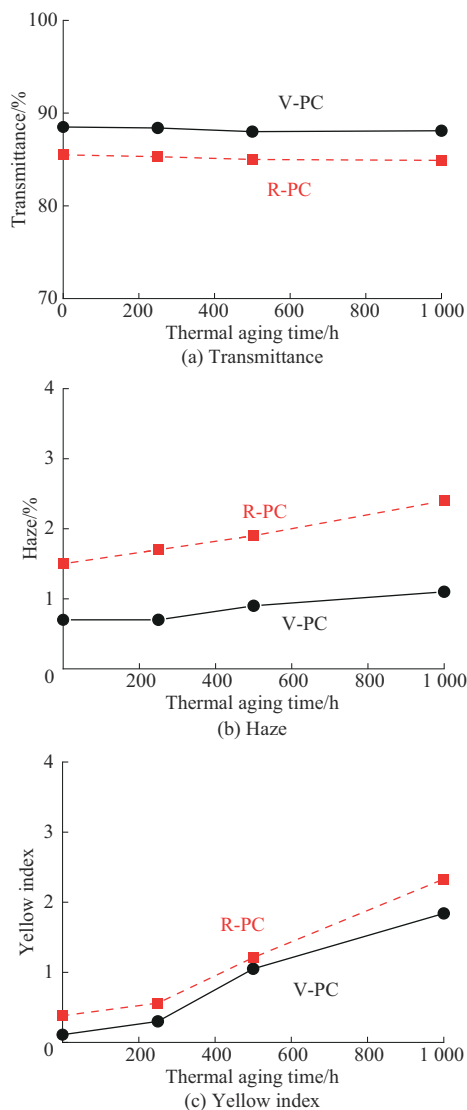


图4 热老化(120 °C)对V-PC和R-PC材料光学性能及颜色的影响

Fig. 4 Effects of thermal aging (120 °C) on optical performances and color of V-PC and R-PC

湿热老化研究结果如图5所示。与热老化类似,随着湿热老化时间的增加,两种材料光学性能有所降低,黄度增大。湿热老化1 000 h时,R-PC材料透过率为84.4% (V-PC 87.6%),雾度为2.6% (V-PC 1.5%),黄度指数为1.32 (V-PC 1.01)。R-PC光学性能和颜色相较于V-PC始终保持在一定的差异范围内,说明R-PC材料在湿热条件下仍有较好的稳定性。

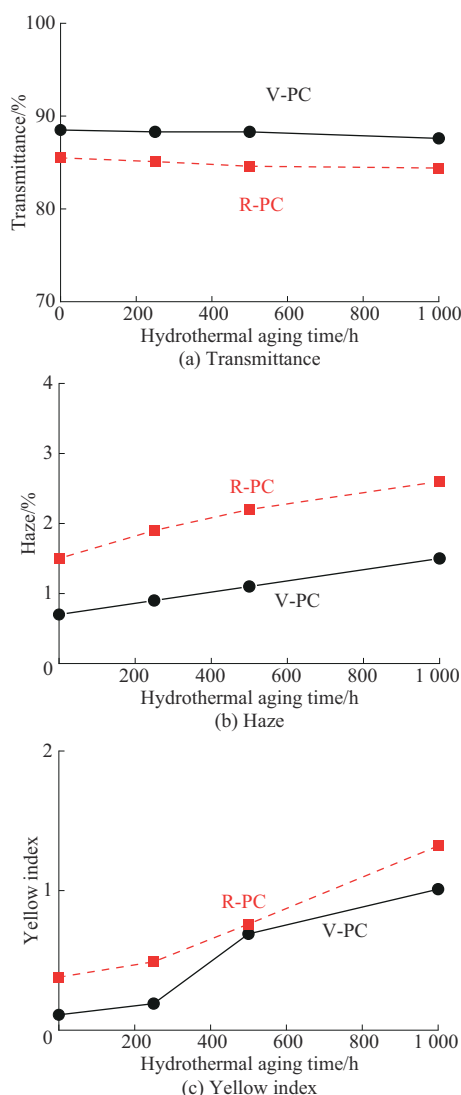


图5 湿热(80 °C,80%湿度)老化对V-PC和R-PC材料光学性能及颜色的影响

Fig. 5 Effects of hydrothermal aging (80 °C, 80% humidity) on optical performances and color of V-PC and R-PC

PC材料热氧老化机理研究^[13-14]认为,老化过程中PC发生了热诱导氧化降解反应,导致端基和侧基等基团从主链上脱落,并产生一定的显色基团。顾华卿等^[15]报道高湿热老化对PC结构和性能的影响,认为PC在高湿热环境下发生分解,且分解原理

符合热氧老化机理,高湿条件的加入可以加速老化过程。热氧老化理论能够较好地解释该现象:端基和侧基脱落影响了材料的光学性能,随着老化时间的延长,显色基团增加,材料黄度指数增大。R-PC使用、回收等过程中脱落的端基、侧基以及显色基团仍保留在材料中,导致其光学性能和颜色比V-PC略差。

2.7 力学性能及老化分析

热老化对材料力学性能的影响如图6所示。未经热老化时,两种材料均具有良好的拉伸和冲击性能;V-PC的断裂伸长率(129%)比R-PC (118%)略大(118%)。随着热老化时间增加,材料性能发生显著变化。热老化时间为0~250 h时,V-PC和R-PC的材

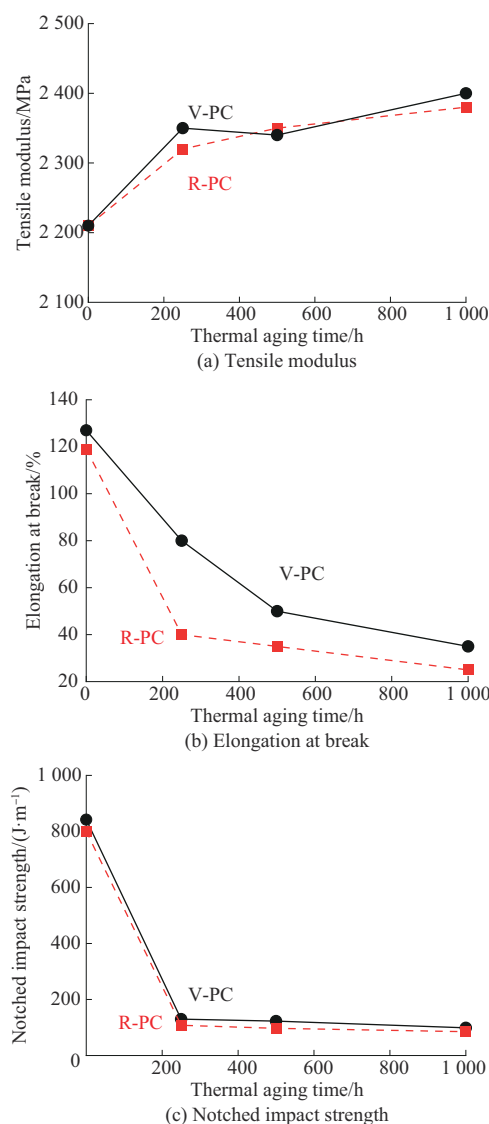


图6 热老化(120 °C)对V-PC和R-PC力学性能的影响

Fig. 6 Effects of thermal aging (120 °C) on mechanical properties of V-PC and R-PC

料拉伸弹性模量从 2 200 MPa 左右增加至 2 300 MPa 左右,V-PC 断裂伸长率则降低至 80%,R-PC 下降至 40%。热老化时间为 250~1 000 h 时,随着热老化时间增加,两种材料的拉伸弹性模量均有所增加,断裂伸长率进一步下降,但变化速率显著减小。R-PC 材料断裂伸长率更容易受到热老化的影响。未经热老化的 V-PC 和 R-PC 缺口冲击强度均大于 800 J/m,材料呈韧性断裂;热老化 250 h 时 V-PC 和 R-PC 缺口冲击强度均大幅下降至 200 J/m 以下,材料呈脆性断裂;随着热老化时间进一步增加到 1 000 h,材料的缺口冲击强度变化缓慢。

湿热老化对材料力学性能的影响如图 7 所示。湿热老化对两种材料力学性能的影响趋势与热老

化类似:在 0~250 h 内材料的拉伸弹性模量快速上升,断裂伸长率快速下降,缺口冲击强度迅速下降,材料由韧性转变为脆性;250~1 000 h 时,拉伸弹性模量则呈缓慢上升趋势,断裂伸长率进一步下降,缺口冲击强度保持在 100 J/m 上下。R-PC 断裂伸长率相比于 V-PC 更容易受湿热老化的影响,这一变化与热老化对材料的影响相同。

PC 热氧老化降解机理研究认为,老化过程中 PC 因热诱导氧化降解,化学结构发生变化,导致内部产生缺陷,力学性能随之下降。PC 在热氧老化后缺口冲击强度降幅较大,该现象已有报道^[15-16],认为冲击强度下降主要是由于 PC 分子链自由体积减少导致的。同时,PC 分子链在注塑过程中被迫发生取向,样品内部分子聚集态不均匀,这种不均匀的聚集态结构在老化过程中发生分子构象重排,但此时自由体积分数和空隙尺寸均保持不变;当温度下降至室温后,自由体积分数和空隙尺寸减小,导致残余应力产生,残余应力导致冲击强度迅速下降。湿度的加入使该问题更复杂^[17-18]。水分一方面可以侵入到 PC 分子结构中,起到一定的增塑作用;另一方面,水分又可以加速 PC 水解,降低 PC 分子量。在本研究中,湿热老化温度为 80 ℃,该温度条件下分子构象重排的影响大于水分子的增塑作用。因此冲击强度下降较快;老化一定时间后,各种因素达到相对平衡,冲击强度变化不大。

3 结论

(1) 高端 R-PC 材料化学结构与 V-PC 材料保持良好的一致性,卤素等杂质含量少。

(2) 高端 R-PC 材料与 V-PC 材料具有相近的流变性能,没有明显的支化和交联现象,可采用相同的加工设备和工艺条件对高端 R-PC 材料进行加工。

(3) 高端 R-PC 材料具有良好的力学性能、介电性能、初始光学颜色以及良好热老化和湿热老化稳定性。

参考文献

- [1] 张雷. 我国聚碳酸酯发展新趋势[J]. 化学工业, 2021, 39(1): 35-44.
ZHANG Lei. New trend of polycarbonate development in China[J]. Chemical Industry, 2021, 39(1): 35-44.
- [2] 王琪, 翟金平, 石碧, 等. 我国废弃塑料污染防治战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 160-166.
WANG Qi, QU Jingping, SHI Bi, et al. Prevention and control of waste plastics pollution in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021,

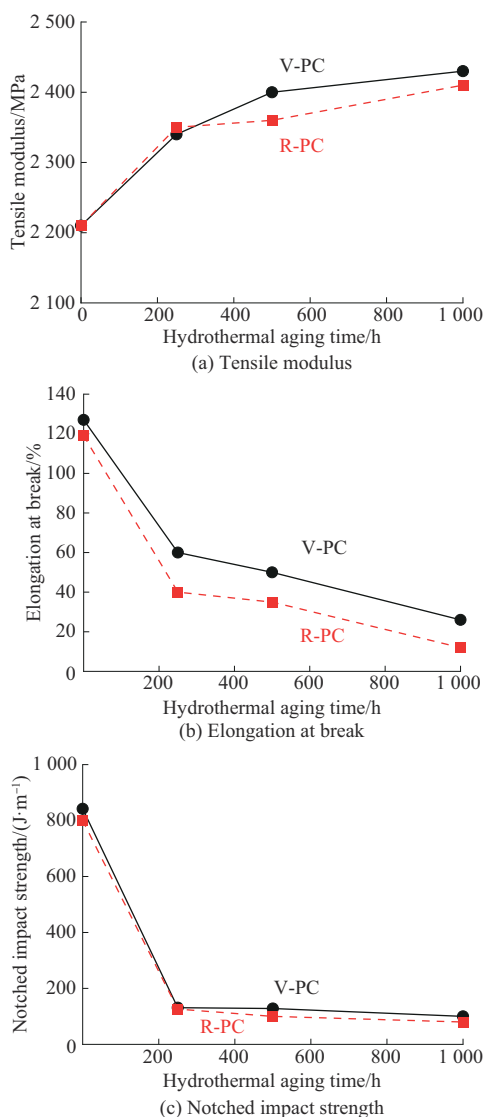


图7 湿热老化(80 ℃,80%湿度)对V-PC和R-PC力学性能的影响

Fig. 7 Effects of hydrothermal aging (80 °C, 80% humidity) on mechanical properties of V-PC and R-PC

- 23(1):160–166.
- [3] ZHOU X Y, ZHAI Y J, REN K, et al. Life cycle assessment of polycarbonate production: proposed optimization toward sustainability[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2023, 189: 106 765–106 774.
- [4] ANTONAKOU E V, ACHILIAS D S. Recent advances in polycarbonate recycling: A review of degradation methods and their mechanisms[J]. *Waste Biomass Valor*, 2013, 4:9–21.
- [5] HAUENSTEIN O, REITER M, AGARWAL S, et al. Bio-based polycarbonate from limonene oxide and CO₂ with high molecular weight, excellent thermal resistance, hardness and transparency[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(3):760–770.
- [6] 安平, 陈金彪, 郭开, 等. 聚碳酸酯材料耐热氧化性能的研究[J]. *塑料助剂*, 2019, 135(3):29–32.
AN Ping, CHEN Jinbiao, GUO Kai, et al. Research on polycarbonate anti-aging property[J]. *Plastics Additives*, 2019, 135(3):29–32.
- [7] 柳鑫龙, 朱晓明, 安江峰, 等. 聚碳酸酯老化研究进展[J]. *高分子通报*, 2014(1):72–75.
LIU Xinlong, ZHU Xiaoming, AN Jiangfeng, et al. Polycarbonate ageing research progress[J]. *Polymer Bulletin*, 2014(1):72–75.
- [8] 谢海生, 曾伟华, 吴芮, 等. 聚碳酸酯反复加工稳定性与结构的关系[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(4):42–48.
XIE Haisheng, ZENG Weihua, WU Rui, et al. Changes of structure and properties of different polycarbonate after repeated processing [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(4):42–48.
- [9] 张玉芳, 阙永婵, 刘志聪, 等. 饮用水罐回收料掺杂对食品级聚碳酸酯性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(7):15–19.
ZHANG Yufang, QUE Yongchan, LIU Zhicong, et al. Effect of recycled material from drinking water tank on the performance of food grade polycarbonate[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(7):15–19.
- [10] 郭燕芬, 陶友季, 马坚, 等. 聚碳酸酯自然老化的红外光谱研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(12):77–80.
GUO Yanfen, TAO Youji, MA Jian, et al. Study on the natural aging of polycarbonate by FTIR [J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(12):77–80.
- [11] 黄帅, 王彦萍, 刁大成, 等. 定量红外光谱法鉴定聚碳酸酯回收料的可行性分析[J]. *合成树脂及塑料*, 2023, 40(1):30–33.
HUANG Shuai, WANG Yanping, DIAO Dacheng, et al. Identification of PC reclaimed materials via quantitative infrared spectroscopy[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2023, 40(1):30–33.
- [12] 严谨, 苏莉莉, 张明, 等. 聚碳酸酯的高温剪切降解及其稳定化研究[J]. *高分子学报*, 2018(4):499–506.
YAN Jin, SU Lili, ZHANG Ming, et al. Degradation and stabilization of polycarbonate during high temperature shearing[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018(4):499–506.
- [13] JANG B N, WILKIE C A. Thermal degradation of bisphenol A polycarbonate in air[J]. *Thermochimica Acta*, 2005, 426(1): 73–84.
- [14] MONTAUDO G, CARROCCIO S, PUGLISI C. Thermal and thermoxidative degradation processes in poly(bisphenol A carbonate)[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002, 64(2): 229–247.
- [15] 顾华卿, 乔秀颖, 金辅伟, 等. 高温高湿加速老化聚碳酸酯结构和性能的影响研究[J]. *塑料工业*, 2017, 45(7):22–26.
GU Huaqing, QIAO Xiuying, JIN Fuwei, et al. Investigations of the effects of high temperature and humidity accelerated aging on the structure and properties of polycarbonate[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(7):22–26.
- [16] NARKIS M, NICOLAIS L, APICELLA A, et al. Hot water aging of polycarbonate[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1984, 24(3): 211–217.
- [17] HILL A J, HEATER K J, AGRAWAL C M. The effects of physical aging polycarbonate[J]. *Journal of Polymer and Science, Part B: Polymer Physics*, 1990, 28(5):387–405.
- [18] GAO W B, HAN S M, YANG M J, et al. The effects of hydrothermal aging on properties and structure of bisphenol A polycarbonate[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(1):13–17.