

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.015

聚碳酸酯挤压变形后力学性能强化的温度相关性

王博伦^{1,2}, 王韬^{1,2}, 葛勇^{1,2,3}, 孙琦伟^{1,2}, 郎建林^{1,2}, 颜悦^{1,2}

(1.北京航空材料研究院股份有限公司,北京 100095; 2.北京市先进运载系统结构透明件工程技术研究中心,北京 100095;
3.华东理工大学材料科学与工程学院,上海 200237)

摘要: 基于聚合物自增强原理,采用挤压变形-快速冷却工艺,研究了聚碳酸酯挤压变形后力学性能强化的温度相关性。设定不同初始温度,并使聚碳酸酯变形后从高温迅速冷却至低温,获得了温度对聚碳酸酯宏观力学性能和微观结构的影响规律。力学性能测试结果显示,初始温度为 120 °C 时,挤压变形后聚碳酸酯的拉伸屈服强度、拉伸弹性模量、断裂韧度较未挤压时分别提升 28%, 57% 和 64%。随着初始温度的升高,力学性能强化效果显著下降。二维广角 X 射线衍射结果表明,不同温度下挤压后样件的分子链段取向程度具有明显差异,当初始温度从 120 °C 升高至 160 °C 时,挤压后样件的平均取向度由 0.05 降至 0.005。这是由于初始温度升高,快速挤压形成的有序分子链段更多地发生解取向。应力双折射结果进一步表明,初始温度升高引发的分子链段解取向使样件挤压变形后产生的各向异性逐步恢复成各向同性,并与力学性能强化效果减弱相对应,反映出聚碳酸酯挤压形变力学性能强化与温度的强相关性。在聚碳酸酯挤压变形-快速冷却工艺中,选用 120 °C 为初始温度可获得最佳力学强化效果。

关键词: 挤压形变;聚碳酸酯;自增强;取向;温度

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0115-07

Temperature correlation of mechanical properties strengthening of polycarbonate after extrusion deformation

WANG Bolun^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, GE Yong^{1,2,3}, SUN Qiwei^{1,2}, LANG Jianlin^{1,2}, YAN Yue^{1,2}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparency for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China; 3. School of Material Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : Based on principle of polymeric self-reinforcement, temperature correlation of mechanical strengthening in polycarbonate by press-induced deformation was studied in process of press-induced deformation and rapid-cooling. Different initial temperatures were set and the deformed polycarbonate was rapidly cooled from high temperature to low temperature, and influence law of temperature on macromechanical properties and microstructure of polycarbonate was obtained. Mechanical test results show that tensile yield strength, tensile elastic modulus, and fracture toughness increase by 28%, 57% and 64% after experiment at the initial temperature of 120 °C, respectively compared with untreated sample. Mechanical strengthening effect decreases significantly as the initial temperature increases. The results of two-dimensional wide-angle X-ray diffraction show that the degree of molecular orientation at segments in sample after experiments of various temperature is significantly different. The average orientation degree in sample after experiments drops from 0.05 to 0.005 when initial temperature rises from 120 °C to 160 °C. Since initial temperature increases, the ordered molecular segments formed by rapid compression become more de-oriented. The stress birefringence results further show that de-orientation of molecular segments caused by initial temperature increases gradually restores anisotropy in sample generated by press-induced deformation to isotropy, and corresponds to the weakening of mechanical strengthening effect, which reflects a strong temperature correlation of mechanical strengthening in polycarbonate by press-induced deformation. 120 °C

基金项目: 国家自然科学基金项目(52575459)

通信作者: 王韬, 博士, 研究员, 研究方向为航空透明件制造技术及应用评价

收稿日期: 2025-10-13

引用格式: 王博伦, 王韬, 葛勇, 等. 聚碳酸酯挤压形变后力学性能强化的温度相关性[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 115-121.

WANG Bolun, WANG Tao, GE Yong, et al. Temperature correlation of mechanical properties strengthening of polycarbonate after extrusion deformation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 115-121.

ought to be selected as an initial temperature to obtain optimal mechanical strengthening effect of polycarbonate in process of press-induced deformation and rapid-cooling.

Keywords : press-induced deformation ; polycarbonate ; self-reinforcement ; orientation ; temperature

随着材料技术的发展,高分子聚合物得以广泛普及和应用,聚合物材料制品已在汽车、航空、航天、深海等工程领域中发挥重要作用^[1-6]。这些工程领域中通常具备复杂、严苛的应用场景,对高强度聚合物的市场需求日益增多。对此,研究人员采用多种方式实现了对聚合物材料的改性和强化以满足应用需要。依照强化过程中是否有第二相材料的加入,可以将强化途径分为填充增强和自增强两大类^[4-5]。其中,自增强是通过改变成型条件,使聚合物内部的大分子链沿应力方向定向排列,增加聚合物的结晶和取向程度,进而提高材料力学性能的一种有效手段^[7-10]。而挤压形变是一种基于固态挤压加工而引起聚合物塑性形变的高效自增强方式,其原理是:在较低温度下,对材料施加一定压力,使其发生固态流动,在未熔融状态下改变材料宏观形状与微观形貌,获得各向异性结构以及更高的力学性能。

近年来,针对挤压形变导致聚合物结构与性能变化的规律,Fu等^[10]开展了聚丙烯(PP)/聚酰胺6(PA6)共混物的挤压形变研究,发现挤压形变显著影响共混物的微观结构,形变后的共混物强度与未处理的样品相比有显著增加,达到有效的增强和增韧效果。Li等^[11]研究了挤压形变对PP/聚烯烃弹性体(POE)以及PP/热塑性聚氨酯(TPU)共混物形貌与力学性能的影响,发现挤压形变后PP/POE和PP/TPU的冲击强度得到了600%的提升,挤压形变使塑料内部形成定向结构,进而提高了共混物的强度和韧性。Wang等^[12]将聚乳酸(PLA)/乙烯-丙烯酸酯-甘油酸甲酯随机三元聚合物进行挤压,所获得PLA共混物的拉伸强度和冲击韧性均有所提高。Hua等^[13]开展了等规聚丙烯(iPP)/丙烯-乙烯共聚物(PEC)的挤压形变研究,在120℃下处理后的共混物最高冲击强度约为纯iPP的30倍,iPP晶体的取向以及PEC晶体尺寸对力学强度的影响显著。Yu等^[14]和Kuang等^[15]通过研究发现挤压形变可使聚丁二酸丁二酯(PBS)的强度、韧性和耐热性获得显著提升,显微分析显示,挤压形变后的晶体沿流动方向定向排列,取向度从0.25提升至0.73。这种高度有序的微观结构极大提高了PBS的结晶度和耐热温度。

目前,通过挤压形变实现聚合物自增强的研究主要集中在各种结晶态聚合物。然而,以聚碳酸酯、聚甲基丙烯酸甲酯等为代表的无定形透明聚合物在汽车、建筑、宇航等多领域中具有极高的普及与发展速度^[16-19],由这些聚合物制成的透明制品通常具备优异的光学性能,在推广应用过程中面临力学强化需求时,难以采用填充增强的方式,因此,沿用结晶态聚合物的挤压形变自增强思路,开展无定形透明聚合物挤压形变力学强化的探索研究具有重要意义。本文以聚碳酸酯材料为研究对象,聚焦其在挤压形变后制件力学强度的温度相关性,设计并实施挤压形变-快速冷却工艺实验,在挤压形变过程中赋予聚碳酸酯变形后从高温迅速冷却至低温的热历史,探究挤压初始温度对聚碳酸酯材料宏观力学性能和微观结构的影响规律,实现对聚碳酸酯挤压形变力学强化效果的有效控制,为无定形透明聚合物的挤压形变力学强化提供参考思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚碳酸酯平板:0703,密度1.2 g/cm³,玻璃化转变温度(T_g)为152℃,沙特基础工业公司。

1.2 主要仪器及设备

注射成型机:130-750CX,德国克劳斯玛菲股份有限公司;

鼓风烘箱:101-3AB,天津市泰斯特仪器有限公司;

冷水机:CHW-10-X,上海恩德克机械有限公司;

电加热温度控制器:LTCB-500,苏州贝斯特电热公司;

万能试验机:CMT4204,美特斯工业系统(中国)有限公司;

二维广角X射线衍射(2D-WAXD)仪:D8 discover,德国布鲁克公司;

宽量程2D双折射测定仪:WPA-100-L,日本LUCEO公司。

1.3 试样制备

将聚碳酸酯平板加工成尺寸为100 mm×60 mm×15 mm的样件,并置于鼓风烘箱中,在初始温度下预

先加热 3 h 以保证样件温度均匀。同时,将平面挤压模具装载于注射成型机的合模单元,并使用特氟龙管将模具的动模与定模分别与冷水机相接,启动温度控制器将模具加热至挤压温度。样件加热完成后,将其从烘箱中取出并转移至挤压模具的型腔内,开启注射成型机,控制模具至完全闭合,以实现样件的挤压形变。由于平面挤压模具的型腔宽度与平板样件宽度相等,聚碳酸酯受挤压后只在自身长度与厚度方向产生显著形变,形变后平板厚度减至 10 mm。完成挤压后,即刻关闭加热开关,开启冷水机,向挤压模具中通入冷循环水以对模具及样件进行快速冷却,待型腔温度降至 90 °C 时开模取件。所有取出的样件置于 23 °C 下自然冷却 24 h。

当初始挤压温度远低于聚碳酸酯的 T_g (如 20 °C) 时,材料处于玻璃态,此时若施加外力强迫其产生大变形,出现永久损伤的风险较高。将温度升至 90 °C,聚碳酸酯的软化程度增加,兼具塑性与变形能力;继续升温至 120 °C 及以上,材料弹性显著增加,发生大变形后不易损伤,因此,本文挤压初始温度选用 120, 130, 140, 150 °C 和 160 °C,设置冷却终点温度为 90 °C,以保证挤压形变过程中制件始终保持完整无损。同时,设定合模挤压压力为 1 300 kN,挤压速度为 5 mm/s。挤压形变-快速冷却过程如图 1 所示。

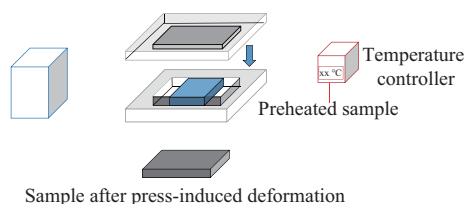


图 1 挤压形变-快速冷却过程示意图
Fig. 1 Schematic of press-induced deformation and rapid-cooling process

1.4 测试与表征

(1)拉伸性能。依据 GB/T 1040.2-2006 进行测试,在挤压后样件的形变方向裁取哑铃型拉伸试样,使用万能试验机进行室温单轴拉伸实验,测试模量时拉伸速度 1 mm/min,测试强度时拉伸速度 50 mm/min。

(2)断裂韧度。依据 ISO 13586-2000 进行测试,在挤压后样件的形变方向裁取标准单边缺口弯曲试样,缺口方向为样件宽度方向,并预制初始裂纹,使用万能试验机进行单边缺口梁实验,待试样完全断裂后,计算材料的断裂韧度。

(3)分子取向。图 2 为 2D-WAXD 样品及测试位置示意图。如图 2 所示,在挤压后样件的形变方向裁切出厚度为 2 mm 的条形试样,使用 2D-WAXD 仪测定样品的分子取向状态,测试中记录 2D-WAXD 图谱,利用 Fit 2D 软件处理原始衍射图像以获得衍射强度数据。

通过式(1)与式(2)计算 Hermans' 取向因子,定量反映试样的取向状态。

$$F = \frac{3\langle \cos^2\theta \rangle - 1}{2} \quad (1)$$

$$\langle \cos^2\theta \rangle = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \cos^2\theta \sin\theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (2)$$

式中: $I(\theta)$ 表示测试点在 θ 角处的散射强度; $\langle \cos^2\theta \rangle$ 代表取向因子的平均值; F 为 Hermans' 因子,表示试样中的分子取向程度,当聚合物分子链全部平行于参考方向时, $F=1$; 而当分子链完全不规则排列时, $F=0$ 。试样的测试位置为图 2 的点 1-点 4。

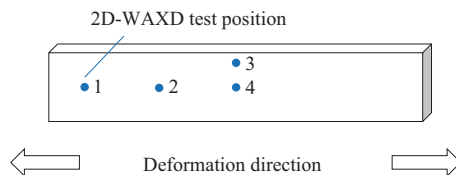


图 2 2D-WAXD 样品及测试位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 2D-WAXD sample and test positions

(4)应力双折射。按图 2 所示在挤压后样件的形变方向裁切出厚度为 2 mm 的条形试样,利用宽量程 2D 双折射测定仪测量样品的偏振光轴角度分布,以表征挤压形变后聚碳酸酯内部的各项异性。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

聚碳酸酯挤压形变-快速冷却后的单轴拉伸工程应力-应变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,初始温度为 120 °C 时,形变后样件的屈服强度最高,对应曲线的应变软化程度较低;提高初始温度,形变后样件的屈服强度逐渐减小,软化程度增加;当初始温度升至 160 °C,材料的屈服强度和应变软化水平与未挤压样件的应力-应变曲线十分接近。需要明确的是,样品制备过程采用的冷循环水快速冷却工艺,在实施过程中包含“低温通过一定厚度的金属模具传递到聚碳酸酯平板表面”以及“低温从 15 mm 厚平板表面传递至中心”两个阶段,且由于聚碳

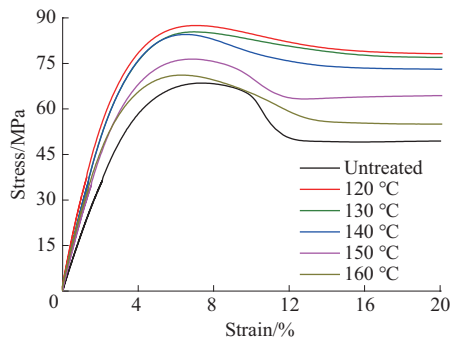
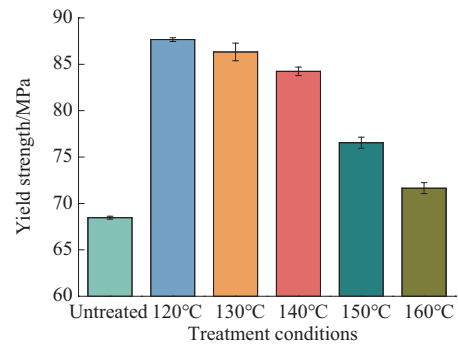


图3 不同温度挤压形变-快速冷却后聚碳酸酯的拉伸应力-应变曲线

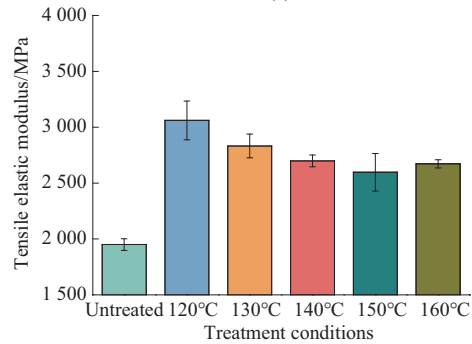
Fig. 3 Tensile stress-strain curves of polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

酸酯的热导率远低于金属,后一阶段所需时间较长,因此,尽管冷水与热平板制件有较大温差,快速冷却工艺使平板降至目标温度仍需耗费一定时间,并非瞬时完成。据此可以推断,各温度下聚碳酸酯分子链段活动性的差距造成了快速冷却对链段热松弛扼制程度的不同,进而导致应变软化的差异。不同于常温下的“冻结”状态,120 °C时的链段已具备一定活动性,在外力作用下容易受迫取向,且在样件形变后趋于恢复为混乱度更高的无规体系。此时对样件进行快速冷却、迅速降温,可在短时间内削弱已取向链段的活动性,链段未充分松弛而被“冻结”为热力学非平衡态,因此拉伸屈服后的应变软化不明显。然而,130 °C及以上的初始温度已接近聚碳酸酯的 T_g ,聚合物链活动性大幅提升,随温度提高,挤压形变后样件自身的高热状态使链段的松弛与解取向愈发剧烈,加快了从热力学非平衡态向平衡态的转变,因此,快速冷却过程对链段松弛的抑制作用逐渐减弱,形变后的样件应变软化程度逐渐增加,在160 °C时趋近未挤压样件的状态。

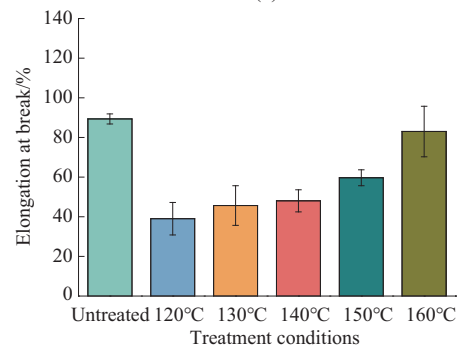
不同初始温度下,聚碳酸酯挤压形变-快速冷却后的拉伸屈服强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率如图4所示。从图4a可以看出,初始温度为120 °C时,屈服强度达到87.7 MPa,比未挤压样件提升28%,表明链段此时的长程有序排列使其具备较高的抗拉伸能力。随初始温度升高,屈服强度逐步减小,在160 °C时降低到71.75 MPa,仅比未挤压样件提高4.6%。升高初始温度引起屈服强度的下降,体现出快速冷却时聚碳酸酯分子链段取向态的“冻结”与自由松弛的竞争关系,在此过程中,形变后链段的最终状态存在从有序取向到无序解取向的演变规律。对比图4b中各初始温度下的拉伸弹性模量可明显看出,120 °C挤压形变-快速冷却后,聚碳酸酯



(a)



(b)



(c)

图4 不同温度下挤压形变-快速冷却后的聚碳酸酯拉伸屈服强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率

Fig. 4 Curves of yield strength, tensile elastic modulus and elongation at break of polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

的拉伸弹性模量可达到3 061 MPa,比未挤压的样件高1 111 MPa,增幅为57%。同时,图4c显示此时的断裂伸长率降至39%,是因为材料受压后的致密性增加,以及分子链段取向与堆叠赋予其较高的刚度;而随实验温度升高,聚碳酸酯的拉伸弹性模量降低、断裂伸长率增加,这一变化过程代表了链段发生迁移后堆积紧密度的下降,引起取向度乃至材料刚度的衰减。

由此可见,在挤压形变-快速冷却工艺中,尽管聚碳酸酯在高温下的流动性强,更容易产生大形变及分子链段取向,同时快速冷却可在一定程度上减缓聚碳酸酯内部分子链段的热松弛,达到预期的力

学强化效果,但若初始温度过高,尤其是接近或高于 T_g 时,循环水快速冷却的方式已难以快速且完全阻断样件分子剧烈热运动,分子链段有序排列后无法维持状态稳定而发生解取向,并且随着温度的提高愈发明显,最终恢复至近于未挤压时的无规状态,力学强化效果大幅下降,反映出聚碳酸酯挤压形变过程对温度的高敏感性。

2.2 断裂韧度

不同初始温度下,挤压形变-快速冷却后聚碳酸酯断裂韧度的变化情况如图5所示。由图5可以看出,承受静载荷时,经过挤压后的样件断裂韧度均明显高于未挤压样件:在120 °C下形变后可达到 $6.09 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 左右,较未挤压样件提高64%;初始温度在130~150 °C时,断裂韧度略有降低,并基本保持在同一水平;在160 °C时仅降低至 $5.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$,仍比未挤压样件提高45%。因此,即使初始温度较高,经过挤压形变-快速冷却后,发生形变的聚碳酸酯在静载荷下的抗裂纹扩展能力仍有较好表现,采用快速冷却工艺对挤压形变力学强化有积极作用。

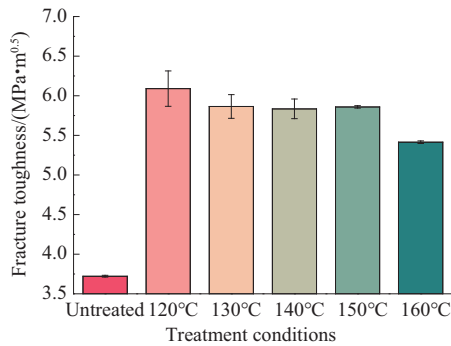


图5 不同温度下挤压形变-快速冷却后的聚碳酸酯的断裂韧度
Fig. 5 Fracture toughness of polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

2.3 分子取向

图6为样件在不同初始温度下挤压形变-快速冷却后的截面2D-WAXD衍射图样,Position 1~Position 4分别对应图2中样品横截面上的测试点1~点4。对比各衍射图样,可以发现图6a~图6c中衍射环的赤道附近均呈现集中发亮的衍射圆弧,表明聚碳酸酯在120~140 °C下形变后,内部分子链段的非晶取向程度较大。然而,图6d~图6f中,赤道位置的亮圆弧基本消失,显示为无定形衍射圆环,这说明在150~160 °C下形变后的样件分子链段取向程度减小,材料表现为与未挤压样件相近的各向同性。此外,基于对衍射图像的定性观察,同一初始温度下,

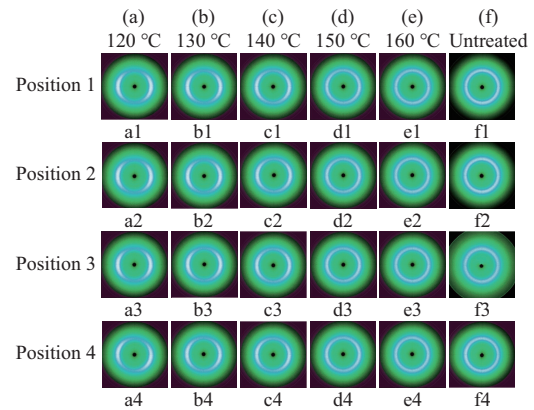


图6 不同温度下挤压形变-快速冷却后聚碳酸酯的2D-WAXD衍射图
Fig. 6 2D-WAXD patterns of polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

样件四个测试点的衍射图样区别不大,表明受挤压后各区域的取向程度存在一定的相似性。

对聚碳酸酯挤压形变-快速冷却后的链段取向进行定量计算。利用衍射强度数据,通过式(1)和式(2)在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 范围内的积分,获得图7所示样件在1~4号测试点的Hermans'取向因子计算结果。从图7可见,120 °C下挤压后的样件,各测试点平均取向度约为0.05,形变后的显著取向对应了自身较高的力学强度。130 °C与140 °C挤压后的样件平均取向度分别为0.046和0.034,尽管存在一定的解取向,取向度仍可达到未挤压样件的30倍以上。而当初始温度达到150~160 °C时,取向度进一步衰减至0.017与0.005,最终与未挤压试样达到同一水平。由此可见,选用120 °C作为挤压形变-快速冷却的初始温度,可以使形变后的聚碳酸酯分子链段保持最多的非晶取向,以达到最优力学强化结果。此外,在各初始温度下挤压后,样件在1~4号测试点的取向度总体接近,但在120~140 °C下完成形变后,4号位置

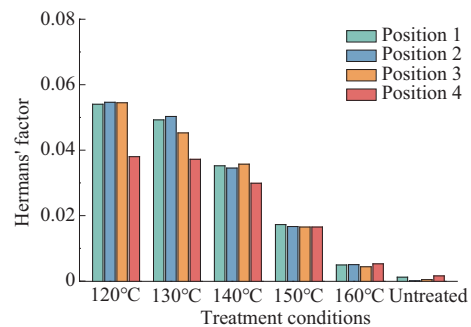


图7 不同温度挤压形变-快速冷却后的聚碳酸酯各测试点的Hermans'取向因子
Fig. 7 Hermans' factor of all test positions on polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

的取向度低于其他位置,说明材料形变后,各区域的链段取向状态仍然存在一定差异。

2.4 应力双折射

作为透明材料,聚碳酸酯在成型过程中产生的残余应力和各向异性可以通过应力双折射法进行有效测量。当平面偏振光垂直入射到样件某一点时,在样件上沿该点的主应力方向 X 和 Y 可分解为两束不同的平面偏振光 F_x 和 F_y ,其中, X 方向代表快轴,在此方向上的偏振光 F_x 传播速度较快; Y 方向代表慢轴,在此方向上的偏振光 F_y 传播速度较慢,这种形成两束有相位差的偏振光的现象即为应力双折射^[20]。因此,快轴与慢轴方向由被测试点的主应力所确定,而主应力的形成在微观上取决于聚合物分子链的排列状态,因此,通过对偏振光分解后的快轴角度(快轴与参比方向的夹角)进行分析,可获得挤压形变后聚碳酸酯各区域分子链段状态分布与各向异性的变化特征。

利用双折射测定仪表征了聚碳酸酯在各工艺下挤压形变-快速冷却后的各向异性。各初始温度下,形变后的聚碳酸酯截面样片的快轴角度分布如图8所示,在此基础上,绘制各样片中心圆形区域的快轴角度分布如图9所示。可以看到,图8a中未挤压的样片折射偏振光后,各区域快轴角度均为 50° 左右,代表材料分子链的无规分布;而在图8b-图8f及图9中可见, 120°C 下挤压形变-快速冷却后,样片偏振光快轴角度变化明显,角度值集中分布于 $100^\circ\sim 110^\circ$,对应样片多数区域分子链段产生的明显取向及整体的各向异性;但在 130°C 下形变后,样片中心局部区域的快轴角度在 $90^\circ\sim 120^\circ$ 之间,样片多个区域快轴角度分布趋于离散;当初始温度从 140°C 升至 160°C ,样片各区域快轴角度分布已显著分散,快轴角度恢复至 50° 的区域不断增多, 160°C 下实验后的样片多数区域的快轴角度已恢复至未挤压状态。

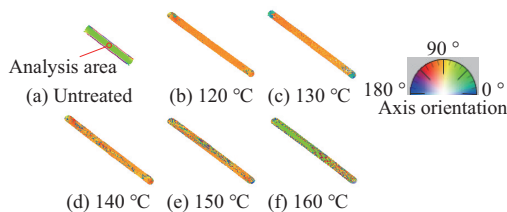


图8 不同温度下挤压形变-快速冷却后的聚碳酸酯样片截面快轴角度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fast axis angle of cross sections in polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

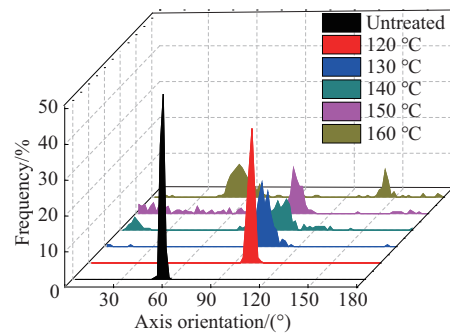


图9 不同温度挤压形变-快速冷却后的聚碳酸酯样片截面中心位置快轴角度分布

Fig. 9 Distribution of fast axis angle at center of cross sections in polycarbonate plates after press-induced deformation and rapid-cooling at different temperatures

因此,快轴角度随实验温度的改变,进一步体现了挤压形变-快速冷却工艺下,聚碳酸酯内部链段取向状态的局部与整体变化特征:温度较低,快速冷却对阻止链段热松弛的效果较好,各个位置链段显著取向且一致性高;温度逐渐提高,链段活性增强,链段松弛取向逐渐占据主导地位,直至超过 T_g 时,快速冷却工艺已经难以阻止松弛过程,解取向的分子链段所在位置从部分区域扩展至整个样件,并在温度足够高时,使整个样件完全恢复为原始的各向同性。

3 结论

(1)在挤压形变-快速冷却工艺中,初始温度升高使聚碳酸酯力学性能强化效果降低。温度为 120°C 时,挤压后聚碳酸酯的拉伸屈服强度、拉伸弹性模量、断裂韧度最高,较未挤压分别提升28%,57%,64%。

(2)2D-WAXD结果反映出不同初始温度下实验后的样件分子链段取向程度的明显差异,随初始温度升高,取向度逐渐降低。应力双折射结果可见形变后各区域的链段取向状态并非完全一致,在 120°C 下,实验后的样片多数区域显示取向引起的各向异性,随温度升高至 160°C ,链段松弛愈发显著,样片逐步恢复成原始的各向同性。

(3)宏观力学性能与微观结构表征结果共同反映出聚碳酸酯挤压形变力学强化与温度的强相关性。热力历史是影响强化的关键因素,选用 120°C 为挤压形变初始温度,可获得最佳力学强化效果。

参考文献

- [1] 赵军,李安帮.聚碳酸酯生产工艺及市场前景研究[J].石化技术,2020,27(2):227-231.

- ZHAO Jun, LI Anbang. Research on production process and market prospects of polycarbonate[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(2):227–231.
- [2] 高挺,彭强,马秀清.聚碳酸酯增韧改性研究进展[J]. *中国塑料*, 2025, 39(1):37–43.
GAO Ting, PENG Qiang, MA Xiuqing. Research progress in modification of polycarbonate[J]. *China Plastics*, 2025, 39(1):37–43.
- [3] 窦立岩,汪丽梅.聚碳酸酯在现代塑料工业的应用及研究进展[J]. *山东化工*, 2019, 48(23):84–85.
DOU Liyan, WANG Limei. Application and research advancement of polycarbonate in modern plastics industry[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(23):84–85.
- [4] 王苏炜,张文鑫,薛平,等.基于固态成型工艺聚合物基复合材料自增强技术研究进展[J]. *中国塑料*, 2021, 35(12):166–173.
WANG Suwei, ZHANG Wenxin, XUE Ping, et al. An overview in self-reinforced polymer-based composites prepared using solid-state molding technology[J]. *China Plastics*, 2021, 35(12):166–173.
- [5] BABU N K, MENSAH R A, SHANMUGAM V, et al. Self-reinforced polymer composites: An opportunity to recycle plastic wastes and their future trends[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(46). DOI:org/10.1002/app.53143.
- [6] 孙琦伟,王韬,许雪婷,等.正电子湮没谱表征热处理工艺对聚碳酸酯力学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(6):77–84.
SUN Qiwei, WANG Tao, XU Xueting, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of polycarbonate exposed by positron annihilation spectroscopy[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(6):77–84.
- [7] 苑晓洁,蔡焯梦,陈旭,等.加工温度对PP无纺布自增强复合材料性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(8):84–91.
YUAN Xiaojie, CAI Yemeng, CHEN Xu, et al. Effect of processing temperatures on the properties of nonwoven self-reinforced polypropylene composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(8):84–91.
- [8] KIM D W, KIM Y S, JUNG Y C, et al. Development of a continuous manufacturing process for self-reinforced composites using multi-step highly drawn polypropylene tapes[J]. *Polymer*, 2020, 191. DOI:10.1016/j.polymer.2020.122267.
- [9] WANG B, WANG T, GE Y, et al. Mechanical behavior and molecular orientation of polycarbonate plates prepared by press-induced deformation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(13). DOI:org/10.1002/app.50125.
- [10] FU D, CHEN F, PENG X, et al. Polyamide 6 modified polypropylene with remarkably enhanced mechanical performance, thermal properties, and foaming ability via pressure-induced-flow processing approach[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(8):2 721–2 729.
- [11] LI P, FEI Y, RUAN S, et al. The Influence of pressure-induced-flow processing on the morphology, thermal and mechanical properties of polypropylene blends[J]. *Journal of Composites Science*, 2021, 5(3). DOI:org/10.3390/jcs5030064.
- [12] WANG W, WANG X, WANG Z. Ultrahigh strength and toughness of polylactide added with EGMA elastomer of a small amount processed via pressure-induced flow above the glass transition temperature[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 665. DOI:org/10.1016/j.apsusc.2024.160389.
- [13] HUA C, WANG W, LI N, et al. An application of pressure-induced flow with no constraint direction on improvement of mechanical properties for isotactic polypropylene/propylene-ethylene copolymer blends[J]. *Polymer*, 2025, 333. DOI:org/10.1016/j.polymer.2025.128663.
- [14] YU P, LI S, WEI Z, et al. In-situ generation of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) nanofibrillar composites via a facile and cost-effective strategy of pressure-induced flow processing[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2023, 34(6):1 868–1 880.
- [15] KUANG T, ZENG R, HEJNA A, et al. Pressure-induced flow processing behind the superior mechanical properties and heat-resistance performance of poly(butylene succinate) [J]. *e-Polymers*, 2022, 22(1):156–164.
- [16] 王韬,许雪婷,王博伦,等.注射成型方法对客舱观察窗残余应力的影响[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(5):85–94.
WANG Tao, XU Xueting, WANG Bolun, et al. Effect of injection molding methods on residual stress of cabin window[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(5):85–94.
- [17] 朱爱华.聚碳酸酯的改性与应用研究[J]. *产业创新研究*, 2020(14):114–115.
ZHU Aihua. Research on modification and application of polycarbonate[J]. *Industrial Innovation*, 2020(14):114–115.
- [18] GOHIL M, JOSHI G. Perspective of polycarbonate composites and blends properties, applications, and future development: A review[J]. *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*, 2022:393–424.
- [19] 王博伦,王韬,霍钟祺,等.聚碳酸酯挤压形变力学行为有限元模拟[J]. *材料工程*, 2024, 52(3):90–99.
WANG Bolun, WANG Tao, HUO Zhongqi, et al. Finite element simulation on mechanical behavior of press-induced deformation of polycarbonate[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(3):90–99.
- [20] 佟景伟.光力学原理及测试技术[M].北京:科学出版社,2009.
TONG Jingwei. Principles and testing technologies of optomechanics[M]. Beijing:Science Press, 2009.