http://pmse.scu.edu.cn

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

孙琦伟[1,3]，王 韬[1,3]，许雪婷[2,3]，葛 勇[1,3]，王博伦[1,3]，郎建林[1,3]，陈宇宏[2,3]，颜 悦[1,3]

（1. 北京航空材料研究院股份有限公司，北京 100095；2. 中国航发北京航空材料研究院，北京 100095；
3. 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）

摘要：考察了退火和淬火2种热处理方法所用的不同热处理温度和时间对聚碳酸酯力学性能的影响，并采用正电子湮没谱分析经过不同热处理工艺后聚碳酸酯内部自由体积的含量。结果表明，在玻璃化转变温度附近及以上进行一定时间的淬火可通过增大内部自由体积含量和尺寸来显著改善聚碳酸酯的韧性，降低材料的屈服强度和弯曲强度，提高缺口冲击强度和拉伸强度。在玻璃化转变温度以下，淬火不能改变材料内部的自由体积，不能提高材料的韧性。退火只能降低材料内部自由体积的含量和尺寸，但不受温度和时间的影响，且材料的拉伸强度、断裂伸长率和缺口冲击强度大幅降低。

关键词：正电子湮没谱；退火；淬火；聚碳酸酯；力学性能

中图分类号：TQ323.4+1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-7555（2024）06-0077-08

聚碳酸酯作为五大工程塑料之一，具有优异的光学性能和力学性能，尤其是出色的延伸性和抗冲击性[1~3]，近年来逐渐应用在宇航员面窗、飞机座舱透明件等航空航天领域[4]。然而，影响聚碳酸酯延伸性和抗冲击性的因素有很多，如尺寸、环境温度、热处理工艺等[5~7]，这些因素会导致聚碳酸酯的缺口冲击强度大幅下降，断裂机制由“韧性”转变为“脆性”，使聚碳酸酯丧失了延伸性和抗冲击性的优势，限制了聚碳酸酯作为结构材料的应用。因此，有必要研究聚碳酸酯力学性能的影响因素及相关机理。

近年来，许多国内外学者开展了有关影响聚碳酸酯力学性能的因素和机理的研究。Nishitsuji等[8,9]分别研究了退火和相对分子质量对聚碳酸酯力学性能的影响，发现退火可提高聚碳酸酯的屈服强度，但却降低了拉伸强度和弹性模量，同时聚碳酸酯裂纹萌生需要的应力随相对分子质量的增加而增加。葛勇等[10]发现，退火消除的流动残余应力将降低聚碳酸酯的拉伸强度，而退火消除的热残余应力则会提高聚碳酸酯的拉伸强度。张勤星等[11]采用动态力学分析研究了退火与聚碳酸酯内应力间的影响规律，发现退火可使应力集中的分子链得到松弛，能提高制品的抗银纹和抗开裂性能。上述研究从残余应力和相对分子质量等角度仅解释了聚碳酸酯在经过退火后韧性下降的原因，但聚碳酸酯热处理工艺除了退火还有淬火，目前国内外学者尚未深入探究淬火对聚碳酸酯力学性能的影响与机理，无法解释聚碳酸酯在淬火状态下韧性恢复这一现象。

正电子湮没谱（PALS）被广泛用于分析材料内部空穴、缺陷或自由体积含量[12,13]。Schade等[14]采用正电子湮没技术分析了聚碳酸酯内部的自由体积含量。Sandreczki等[15]分析了较低退火温度下聚碳酸酯内部自由体积的变化。但是，研究聚碳酸酯内部自由体积与力学行为联系的文献较少。

本文针对不同热处理工艺时聚碳酸酯力学性能的变化和机理开展了研究，主要关注退火和淬火对聚碳酸酯拉伸力学、弯曲力学和冲击力学的影响规

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0110
收稿日期：2023-11-10
通讯联系人：王韬，主要从事航空透明材料与应用研究，E-mail: tao.wang@biam.ac.cn

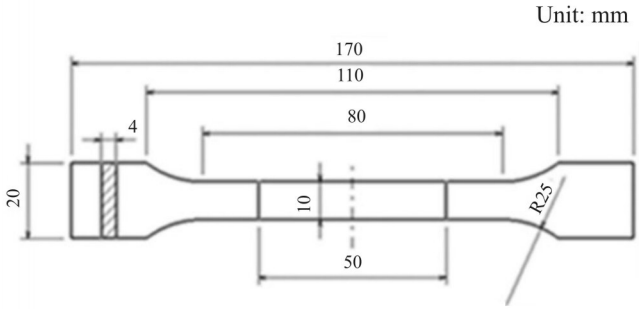


Fig. 1 Figure of the PC tensile testing specimen

Tab. 1 Factors and levels studied in the experiment

Factor	Level				
	1	2	3	4	5
Annealing temperature/℃	95	120	135	147	153
Annealing time/h	1	3	6	12	24

律，同时采用正电子湮没谱技术分析经过热处理后聚碳酸酯内部的自由体积含量和大小的变化，揭示热处理工艺对聚碳酸酯力学性能的影响机理，建立微观自由体积与宏观力学行为的联系，为聚碳酸酯性能调控和工艺优化提供数据支撑和理论基础。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚碳酸酯：牌号为A，熔融指数为10 g/10 min，重均分子量为55756，玻璃化转变温度（T_g）为145 ℃，日本帝人公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 聚碳酸酯力学试样制备：注射成型设备采用德国克劳斯玛菲生产的CX130-750型注射成型机。将聚碳酸酯粒料在120 ℃干燥4 h，通过注射成型，制备出力学测试和正电子湮没谱试样，注射成型工艺为熔体温度285 ℃、注射速率10 mm/s、模具温度100 ℃、保压压力80 MPa、保压时间5 s、冷却时间40 s。弯曲性能和冲击性能测试试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，拉伸性能测试的试样尺寸分别如Fig.1所示。

1.2.2 聚碳酸酯正电子湮没谱试样制备：正电子湮没谱试样由注塑方片试样经过机加工得到。采用的成型设备是德国克劳斯玛菲生产的CX130-750型注射成型机，其成型工艺与力学测试试样相同。注塑方片试样尺寸为65 mm×65 mm×2 mm，经机加工获得的正电子湮没谱试样尺寸为12 mm×12 mm×2 mm。

1.2.3 聚碳酸酯热处理：热处理实验设备为上海爱斯佩克环境设备有限公司制造的PV-212M型鼓风烘箱。实验分为退火实验与淬火实验。实验工艺如Tab.1所示，采用单因素多水平的实验方法，考察因素包含温度和时间，每个因素设5个水平，其中温度135 ℃和153 ℃、时间6 h是基准点，在考察其中一个因素时，另一个参数保持在基准点。淬火实验的方法和工艺表与退火实验相同，区别在于当到规定时间时，立即将烘箱中的试样取出放入盛满常温水（23 ℃）的水槽中。

1.3 测试与表征

1.3.1 聚碳酸酯试样力学性能测试：拉伸性能和弯曲性能测试采用美特斯工业生产的型号CMT4204万能试验机。拉伸性能按国标GB/T 1040.2进行测试，模量段试验速率1 mm/min，强度段试验速率50 mm/min，实验温度23 ℃。弯曲性能按国标GB/T 9341进行测试，试验速率为2 mm/min。冲击性能测试采用美特斯ZBC7501-C型冲击试验机，按国标GB/T 1043进行测试，缺口类型为A型。

1.3.2 正电子湮没谱分析：正电子湮没谱测试选择

安徽核芯电子科技有限公司生产的型号DPLS4000正电子湮没谱仪，分析寿命谱软件采用Lifetime9。放射源为源强20μCi的^{22}Na，时间分辨率185 ps。

正电子湮没谱测试方法是一种无损测试。其原理是，向样品发射一束正电子束，正电子在完整晶格中会与电子相碰从而产生自湮没，但样品介质中若存在缺陷（空穴等），则正电子易形成捕获态，即正电子素，根据与电子形成电子素的自旋状态，可分为仲正电子素（P-PS）和正正电子素（O-PS）。P-PS与O-PS再与电子发生湮没从而产生γ射线，被仪器捕捉到，根据正电子素存在时间长短可分为第一寿命（τ_1）、第二寿命（τ_2）和第三寿命（τ_3）。第一寿命是指P-PS湮没，第二寿命是指正电子的自湮没，第三寿命是指O-PS在自由体积内湮没[13]。τ_3与自由体积孔半径（R）可用经验公式(1)计算[15]

$$\tau_3 = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{R}{R+\Delta R} + \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi R}{R+\Delta R}\right)\right]^{-1} \quad (1)$$

式中：ΔR ——拟合的经验电子层厚度，数值为0.166 nm。

自由体积分数（Fv，%）表示为经验拟合方程[15]

$$F_v = AV_fI_3 \quad (2)$$

式中：A——常数，数值为0.0018；I_3——与 τ_3 相关的指数项的强度（单位%）；V_f——使用式(1)的球体半径（R）计算的自由体积孔的体积（单位nm^3），假设自由体积为球形[13]，则体积公式为

$$V_f = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (3)$$

1.3.3 *表面形貌表征*：冲击试样的断口形貌观测采用蔡司SCOPE5型号光学显微镜，分别观察未经过热处理、退火和淬火后试样的断口。

2　结果与讨论

2.1　聚碳酸酯在不同热处理方法和温度时的力学性能

Fig.2表示的是聚碳酸酯试样在不同热处理温度和热处理方法时的拉伸性能变化。其中Fig.2(a)和Fig.2(b)分别示出拉伸屈服强度和断裂强度的变化规律。退火温度从较低温度（低于100 ℃）逐渐升高至玻璃化转变温度左右（147 ℃），最后升高至153 ℃，高于玻璃化转变温度，聚碳酸酯试样的屈服强度在低于玻璃化转变温度时，无论是退火还是淬火方法均呈现随着退火温度升高逐渐增加的趋势，而断裂强度的变化趋势是随着退火温度的升高而逐渐降低。这个现象反映出在低于玻璃化转变温度下退火会导致聚碳酸酯材料的韧性下降，刚性增加，并且淬火方法无法改变这一规律。

当热处理温度在玻璃化转变温度附近及以上时，退火或淬火后聚碳酸酯试样的拉伸行为出现差异。聚碳酸酯在135 ℃退火后，拉伸屈服强度是72.3 MPa，断裂强度是58.4 MPa，而在147 ℃退火后，拉伸屈服强度是71.7 MPa，断裂强度是60.1 MPa，屈服强度下降了0.8%，断裂强度增加了2.9%，变化程度很小；聚碳酸酯在135 ℃淬火后，屈服强度是71 MPa，断裂强度是59.2 MPa，在147 ℃淬火后，屈服强度是67 MPa，断裂强度是61.2 MPa，屈服强度下降了5.6%、断裂强度增加3.4%。可以看出，在玻璃化转变温度附近，淬火聚碳酸酯屈服强度开始出现一定程度的下降，断裂强度开始有所上升。当温度继续升高，在153 ℃时，淬火后聚碳酸酯试样的拉伸屈服强度是64.8 MPa，下降了8.7%，断裂强度是

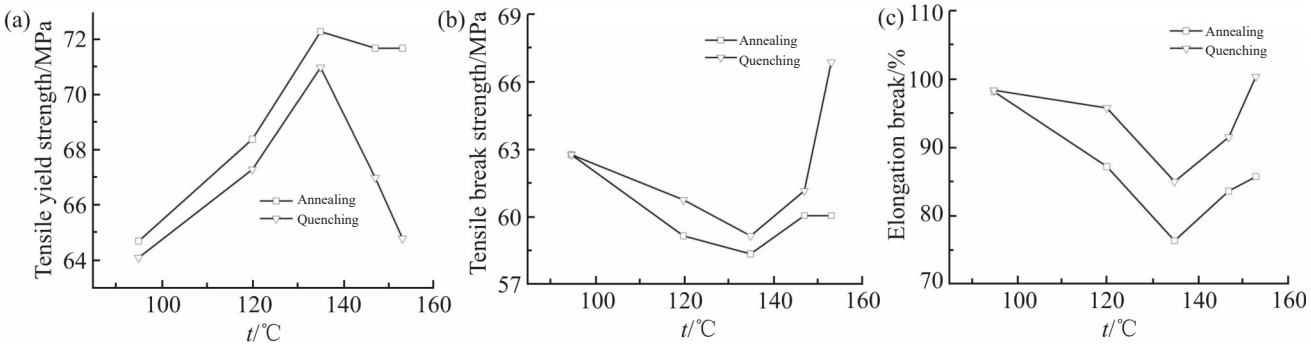


Fig. 2 Effect of tensile properties of polycarbonate with heat treatment temperature and methods
(a): tensile yield strength; (b): tensile break strength; (c): elongation at break

66.9 MPa，大幅增涨了13%。而同样温度的退火试样，其屈服强度和断裂强度与147 ℃的基本一致。测试了未经过任何热处理的聚碳酸酯的拉伸性能，其屈服强度为62.4 MPa，断裂强度为69.8 MPa，断裂伸长率为112%。对比未经过热处理的聚碳酸酯的屈服强度和断裂强度，可以看出，在高于玻璃化转变温度进行退火时，试样的屈服强度仍远高于断裂强度，而在同样温度下的淬火，断裂强度值增加幅度很大，超过了屈服强度，聚碳酸酯的拉伸行为与未经过热处理的聚碳酸酯材料的力学响应基本一致，逐渐恢复聚碳酸酯的韧性，而退火的试样仍保持较大刚性特征。

从断裂伸长率的变化也能看出这一现象（Fig.2（c）），在玻璃化转变温度以下对聚碳酸酯进行热处理，断裂伸长率开始降低，温度继续升高时退火试样的断裂伸长率略有提高，而淬火试样的断裂伸长率则大幅提高，在153 ℃时达到100%以上，与未热处理的聚碳酸酯的断裂伸长率接近，进一步说明在高于玻璃化转变温度淬火会恢复热处理过程中损失的韧性。

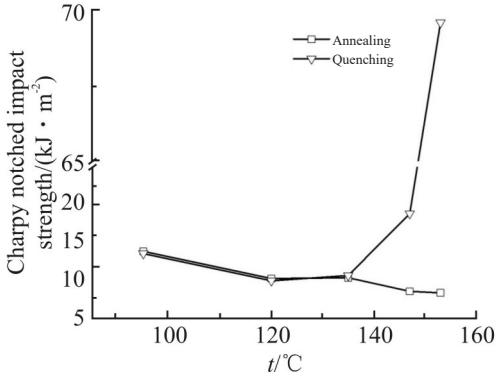


Fig. 3 Effect of impact properties of polycarbonate with heat treatment temperature and methods



Fig. 4 Fracture photos of polycarbonate impact specimens after heat treatment methods
(a): untreated; (b): quenching; (c): annealing

Fig.3表示的是聚碳酸酯在不同热处理温度下经过退火和淬火处理后的缺口冲击强度变化。可以看出，在较低温度下（低于100 ℃）对聚碳酸酯试样进行热处理后，缺口冲击强度出现剧烈下降，下降至13 kJ/m²左右，未经过任何热处理的聚碳酸酯缺口冲击强度为70.2 kJ/m²。对比发现，此时聚碳酸酯冲击行为已经从韧性转变为脆性。随着退火温度继续升高，聚碳酸酯试样的缺口冲击强度持续降低，然而当退火温度达到147 ℃时，不同热处理方法对聚碳酸酯缺口冲击强度的影响出现变化，退火试样的缺口冲击强度继续下降，而淬火试样则出现提高。当退火温度在153 ℃，即玻璃化转变温度以上时，淬火试样的缺口冲击强度达到69.6 kJ/m²，与未经过处理的聚碳酸酯缺口冲击强度接近，而退火试样的缺口冲击强度则只有8.3 kJ/m²。Fig.4为光学显微镜拍摄的冲击试样断口，可以看出，153 ℃淬火试样断口粗糙，呈现“撕裂状”，与未经过热处理聚碳酸酯缺口冲击形貌一致；而153 ℃退火试样断口平整，符合脆性断裂的形貌特征。

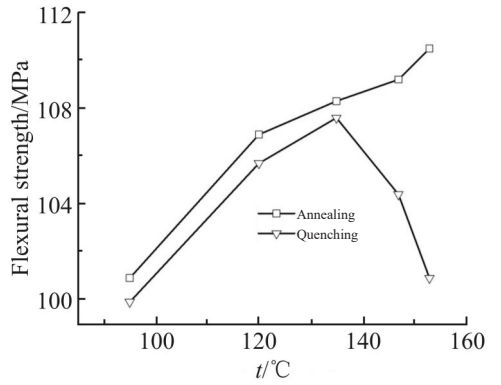


Fig. 5 Effect of flexural strength of polycarbonate with heat treatment temperature and methods

Fig.5表示的是聚碳酸酯试样在不同热处理温度和不同热处理方法下的弯曲性能变化。材料的弯曲

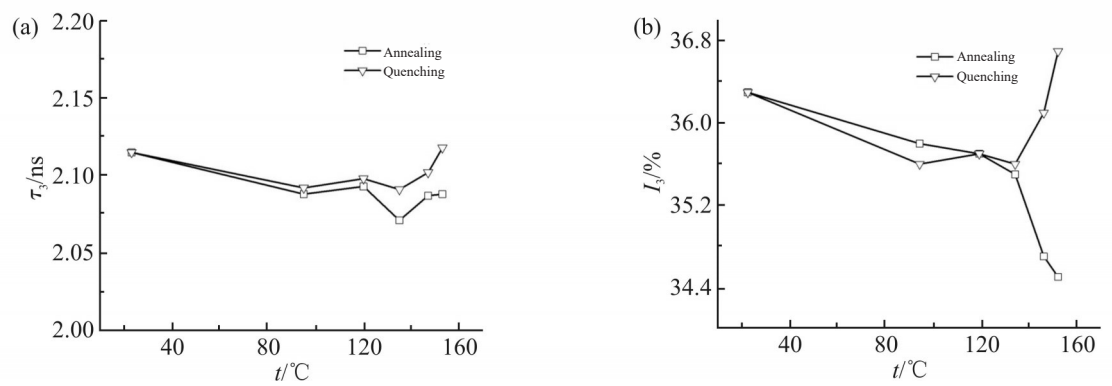


Fig. 6 Variation of the positrons lifetime (τ_3) and intensity (I_3) with heat treatment
(a): positrons lifetime; (b): positrons intensity

性能可反映刚性大小。从图中可以看出，随着热处理温度逐渐升高，退火试样的弯曲强度呈现单调递增的趋势，而淬火试样的弯曲强度呈现“先升高后降低”的趋势，拐点出现在135 ℃。在147 ℃和153 ℃，淬火试样的弯曲强度持续下降。153 ℃时，淬火试样弯曲强度为100.9 MPa，退火试样弯曲强度为110.5 MPa，未经过任何热处理的聚碳酸酯的弯曲强度为97.7 MPa。对比说明在高于玻璃化转变温度时进行淬火，降低了聚碳酸酯的刚性，同时逐渐恢复了聚碳酸酯的韧性。

从拉伸性能、冲击性能和弯曲性能的测试结果来看，在高于玻璃化转变温度进行淬火可有效改善聚碳酸酯因热处理降低的韧性。本文采用正电子湮没谱测试了不同热处理条件下试样内部的自由体积大小和含量，可以解释出现该现象的原因。Fig.6表示的是聚碳酸酯试样在不同热处理温度和不同热处理方法下的第三寿命（τ_3）和第三强度（I_3）变化，其中Fig.6(a)表示的是第三寿命随退火温度的变化，Fig.6(b)表示的是第三强度随退火温度的变化。可以看出，在进行热处理后，无论是退火方法还是淬火方法，第三寿命和第三强度均发生下降，根据式(1)和(3)可知，第三寿命与材料内部自由体积的大小相关，内部自由体积尺寸越大，与分子电子的重叠越少，因此第三寿命越长[16]，反之亦然。随着温度升高，退火试样的第三寿命变化不明显，而淬火试样的第三寿命在玻璃化转变温度以上时则有所增加，数值与未退火的试样相当。退火试样的第三强度随着退火温度的升高逐渐减小，而淬火试样则是先减小后增大，拐点出现在玻璃化转变温度点附近，第三强度反映的是O-PS被自由体积等空穴拾取的概率[17]，第三强度越大代表材料体系内自由体积含量越多，此外，根据式(2)可判断材料内自由体积分数与第三强度正相关。

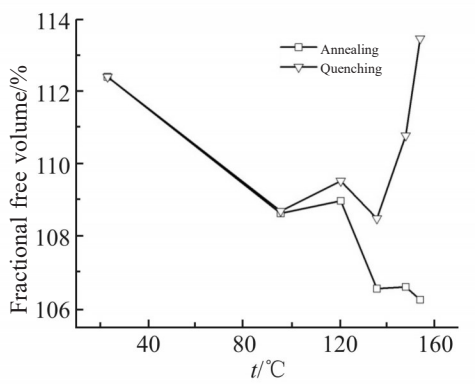


Fig. 7 Variation of the fractional free volume with heat treatment

根据式(2)可得出不同热处理状态下试样内部自由体积分数，见Fig.7。可以明显看出，退火试样在经历了热处理后，材料内部自由体积分数出现下降，而自由体积分数的减少会影响材料在塑性变形过程中的链旋转[17]，使得材料表现为刚性增大，导致材料产生塑性变形的门槛值——屈服应力增大，这就解释了热处理对聚碳酸酯材料拉伸屈服强度、断裂强度和弯曲强度影响的原因。对于冲击行为，载荷作用到材料表面瞬间，裂纹萌生起源于缺口尖端前面，若材料本身存在屈服行为，并且屈服应力小于断裂应力，当试样受到冲击载荷时，尖端前面裂纹增长应力先达到材料屈服应力，先发生屈服，再发生断裂，从而呈现韧性断裂；反之为脆性断裂[18]。退火降低了聚碳酸酯内部自由体积含量，使得屈服应力提高，高于断裂应力，所以材料受到冲击载荷时发生脆性断

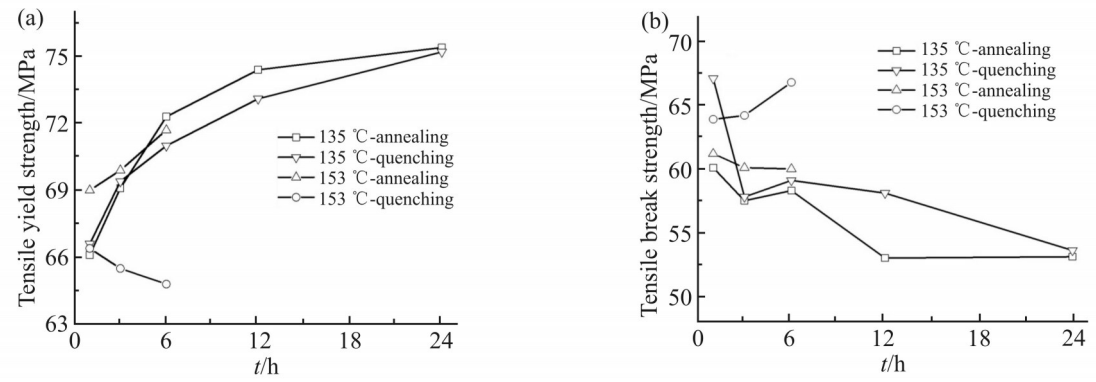


Fig. 8 Effect of tensile properties of PC with heat treatment time and methods
(a): tensile yield strength; (b): tensile break strength

裂。而在玻璃化转变温度以上淬火时，可恢复因热处理效应减少的自由体积分数，从而使得屈服强度下降，材料恢复韧性。

2.2 聚碳酸酯在不同热处理方法和时间的力学性能

Fig.8表示的是聚碳酸酯试样在135 ℃和153 ℃经历不同热处理时间和不同热处理方法的拉伸性能变化。其中Fig.8(a)和Fig.8(b)分别表示的是屈服强度和断裂强度的变化规律，可以看出，在低于玻璃化转变温度（135 ℃）时，退火时间最大至24 h，无论是退火试样还是淬火试样，屈服强度一直在升高，断裂强度持续下降；而在玻璃化转变温度以上（153 ℃），为防止试样变形退火时间最大至6 h，淬火试样的屈服强度开始下降，断裂强度开始增加，退火试样的规律与玻璃化转变温度以下时相同。在玻璃化转变温度以上时，较短时间下的材料屈服强度还是高于断裂强度，说明恢复韧性需要一定的时间。

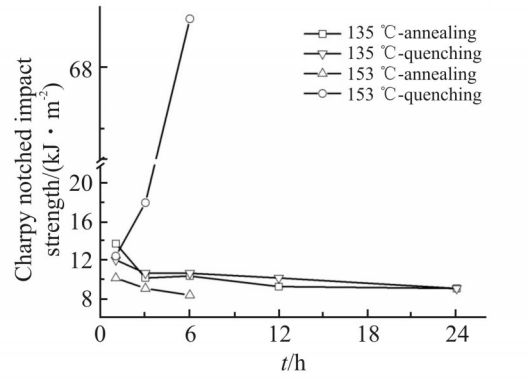


Fig. 9 Effect of impact properties of PC with heat treatment time and methods

Fig.9表示的是聚碳酸酯试样在不同热处理时间和不同热处理方法下的缺口冲击性能变化。可以看出，在低于玻璃化转变温度时，延长时间，退火和淬火试样的缺口冲击强度不断下降。在玻璃化转变温度以上时，延长热处理时间，淬火试样的冲击强度开始逐渐升高，退火试样的冲击强度则是4组试样中水平最低的。从冲击结果同样能够看出，153 ℃较短时间淬火只能有限恢复聚碳酸酯的韧性，完全恢复聚碳酸酯的韧性仍需要足够的热处理时间。

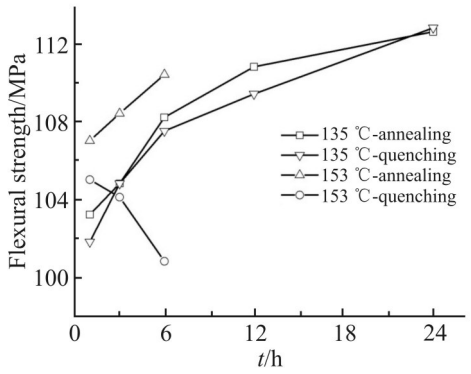


Fig. 10 Effect of flexural strength of PC with heat treatment time and methods

Fig.10表示的是聚碳酸酯试样在不同热处理时间和不同热处理方法下的弯曲性能变化。延长时间，135 ℃热处理试样和153 ℃退火试样的弯曲强度升高，153 ℃淬火试样弯曲强度降低。

Fig.11是聚碳酸酯试样在135 ℃和153 ℃经历不同热处理时间和不同热处理方法自由体积的变化。能够发现，135 ℃退火、135 ℃淬火和153 ℃退火试样内部的自由体积随着时间延长而逐渐下降，153 ℃淬火试样则是上升的趋势，并且在较短时间内材料内部自由体积增加量很少，说明在玻璃化转变温度以上淬火时，要有足够时间让材料内部产生

更多的“空穴”。

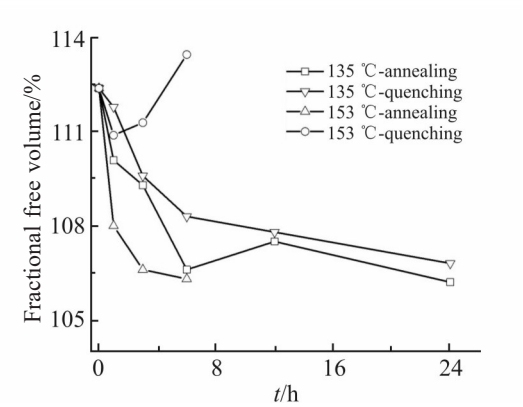


Fig. 11 Variation of the fractional free volume with heat treatment

3 结论

本文考察不同热处理工艺对聚碳酸酯力学性能的影响，得出以下结论。

（1）退火处理会导致聚碳酸酯的韧性下降，表现出脆性特征，主要体现在断裂强度和冲击强度下降，屈服强度增加，并且与处理温度相关性不大。

（2）淬火处理对聚碳酸酯韧性的影响与处理温度有较强的关联性，在玻璃化转变温度附近及以上进行淬火会降低聚碳酸酯材料的屈服强度，显著提高材料的断裂强度和冲击强度。在玻璃化转变温度进行淬火，影响规律与退火处理一致。

（3）自由体积含量在决定聚碳酸酯力学行为中起到关键作用，热处理过程会影响材料内部自由体积含量。在玻璃化转变温度以上保持足够时间的淬火会显著改变材料内部的自由体积含量和尺寸，退火只能降低材料内部自由体积含量和尺寸。

参考文献：

[1] Zhang Z, Zhang L, Jasa J, *et al*. Molecular sources of ratcheting in poly-dispersed polycarbonate[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 154: 106567.

[2] Krausz T, Serban D A, Negru R M, *et al*. The effect of strain rate and temperature on the mechanical properties of polycarbonate composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 4211-4215.

[3] Bian Y L, Liu Q, Feng Z D, *et al*. High-speed penetration dynamics of polycarbonate[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 223: 107250.

[4] Mishra V, Sharma R, Khatri N, *et al.* Processing of polycarbonate by ultra-precision machining for optical applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11): 25130-25138.

[5] 邵景昌,吴云,付俊祺, 等. 不同条件对聚碳酸酯缺口冲击强度测试结果的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2): 105-109.
Shao J C, Wu Y, Fu J Q, *et al.* Effects of different conditions on notched impact strength test results of polycarbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 105-109.

[6] 汪建松, 余龙颖, 王燕枫. 成型工艺参数对聚碳酸酯零件残余应力的影响[J]. 家电科技, 2020(4):50-53.
Wang J S, Yu L Y, Wang Y F. Effect of molding process parameters on residual stress of polycarbonate parts[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2020(4): 50-53.

[7] Diawara B, Fatyeyeva K, Chappey C, *et al.* Evolution of mechanical and barrier properties of thermally aged polycarbonate films[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 607: 117630.

[8] Nishitsuji S, Watanabe Y, Ito H, *et al.* Molecular weight dependence of the physical aging of polycarbonate[J]. Polymer, 2019, 178: 121571.

[9] Nishitsuji S, Toshiki S, Masaru I, *et al.* Effects of molecular weight and annealing conditions on the essential work of fracture of polycarbonate[J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62: 3441-3449.

[10] 葛勇, 相宁, 王博伦, 等. 注射成型后期热处理对聚碳酸酯性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(9): 89-94.
Ge Y, Xiang N, Wang B L, *et al.* Effect of heat treatment after injection molding on the properties of polycarbonate[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(9): 89-94.

[11] 张勤星, 李倩, 张果, 等. 退火对聚碳酸酯注塑制品力学及动态力学性能的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1929-1933.
Zhang Q X, Li Q, Zhang G, *et al.* Effect of annealing on mechanical and dynamic mechanical properties of polycarbonate injection molding products[J]. CIESC Journal, 2012, 63(6): 1929-1933.

[12] 宁超峰, 何春清, 张明, 等. 用正电子湮没谱研究聚酯型聚氨酯的微观结构和自由体积特性[J]. 高分子学报, 2001(3): 299-305..
Ning C F, He C Q, Zhang M, *et al*. Micro-structure and free volume properties of linear polyurethanes measured[J]. Acta Polymerica Sinica, 2001(3): 299-305.

[13] 王波, 王少阶. 高聚物正电子谱学的研究进展[J]. 物理, 2000(4):7-12.
Wang B, Wang S J. Advances in the study of polymers by positron spectroscopy[J]. Physics, 2000(4):7-12.

[14] Günther S K, Castricum H L, Ziegler H J, *et al*. Free volume changes in mechanically milled PS and PC studied by positron

annihilation lifetime spectroscopy (PALS) [J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 44: 1351-1359.

[15] Sandreczki T C, Hong X, Jean Y C. Sub- glass- transition-temperature annealing of polycarbonate studied by positron annihilation spectroscopy[J]. Macromolecules, 1996, 29: 4015-4018.

[16] Hasan O A, Boyce M C, Li X S, *et al.* An investigation of the yield and postyield behavior and corresponding structure of poly (methyl methacrylate) [J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1993, 31: 185-197.

[17] Rouabah F, Dadache D, Haddaoui N. Thermophysical and mechanical properties of polystyrene: influence of free quenching [J]. ISRN Polymer Science, 2012, 2012: 1-8.

[18] So P, Broutman L J. Residual stresses in polymers and their effect on mechanical behavior[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 16: 785-791.

Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Polycarbonate Exposed by Positron Annihilation Spectroscopy

Qiwei Sun[1,3], Tao Wang[1,3]，Xueting Xu[2,3], Yong Ge[1,3], Bolun Wang[1,3], Jianlin Lang[1,3], Yuhong Chen[2,3], Yue Yan[1,3]

(*1.Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd, Beijing 100095, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparence for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China*)

ABSTRACT: The influence of different heat treatment temperatures and time used for annealing and quenching on the mechanical properties of polycarbonate (PC) was investigated. Positron annihilation spectroscopy (PALS) was used to analyze the free volume content of PC after different heat treatment processes. The results show that the toughness of PC, especially the notch impact strength and fracture strength can be improved significantly by quenching near or above glass transition temperature for a period of time, while the yield strength and bending strength can be reduced. The toughness of PC is affected by the internal free volume content and size which will be changed through quenching near or above glass transition temperature. By this way, the internal free volume content and size of PC which is quenched near or above glass transition temperature are similar with unheated PC. However, the toughness cannot be improved by extending quenching time below glass transition temperature because the free volume content and size have been reduced. The internal free volume content and size of PC can be only reduced by annealing, which is not affected by annealing temperature or time, resulting in a significant decrease in the tensile fracture strength, elongation at break, and notch impact strength of PC.

Keywords: positron annihilation spectroscopy; annealing; quenching; polycarbonate; mechanical property