

# 疲劳/蠕变复合作用下聚碳酸酯的交互损伤研究

宋之敏<sup>1</sup>, 黄婉霞<sup>1</sup>, 倪海鹰<sup>1</sup>, 刘民治<sup>1</sup>, 向海<sup>2</sup>

(1. 四川大学, 四川 成都 610065; 2. 成都飞机工业公司, 四川 成都 610091)

**摘要:** 探讨了在疲劳/蠕变复合作用下聚碳酸酯的损伤交互作用。结果表明, 在疲劳/蠕变复合作用下聚碳酸酯存在疲劳和蠕变的交互损伤, 其断裂寿命比纯疲劳或纯蠕变的断裂寿命低; 断裂机制是由于疲劳循环载荷周期变化导致分子链和链段伸长/收缩往复运动, 使在蠕变单向外力作用中受阻的分子链和链段松动和活化, 从而促进蠕变运动和断裂。并且, 疲劳/蠕变的交互损伤程度与温度密切相关。聚碳酸酯在较低温度的疲劳/蠕变交互损伤作用大于较高温度的交互损伤作用。随温度升高, 疲劳/蠕变断裂寿命下降是疲劳和蠕变各自的单独损伤增加所致。

**关键词:** 聚碳酸酯; 疲劳; 蠕变; 交互损伤作用

**中图分类号:** 0631.2<sup>+</sup> 1; 0632.13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2003)04-0044-04

对金属构件同时受到疲劳和蠕变复合作用的研究结果<sup>[1,2]</sup>发现, 实际寿命有时高于按疲劳和蠕变损伤分别计算损伤分数后迭加的预估寿命, 而多数时候实际寿命则低于预估寿命, 导致提前损坏, 其原因是疲劳与蠕变发生交互损伤作用。

塑料因其独特的性能、良好的加工性和经济性, 广泛应用于包括航空领域的众多领域。例如: 美国波音 747 飞机有 2500 个零件用聚碳酸酯制造<sup>[3]</sup>。塑料件使用时, 承受的作用力多种多样。人们对各种单一作用条件下(如拉伸、疲劳、蠕变等)材料的性能进行了大量研究, 但疲劳/蠕变复合作用下, 对塑料件的性能缺乏研究。因此, 本文对在疲劳/蠕变复合作用下聚碳酸酯的损伤交互作用进行探讨, 以认识疲劳/蠕变之间交互作用及其对断裂寿命的影响。

## 1 实验

### 1.1 原材料

聚碳酸酯, 牌号: PC6709-3, 密度  $1.20\text{g}/\text{cm}^3$ , 生产厂: 重庆长风化工厂。

收稿日期: 2003-01-13; 修订日期: 2003-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号 5880116)

作者简介: 宋之敏(1957-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 材料强度。

### 1.2 试样

在 COSMT-80 型注塑机上, 将聚碳酸酯注射成型为国标 GB/T 040-1992 的 I 型片状拉伸试样。聚碳酸酯试样注射工艺条件: 机桶前端温度  $240^\circ\text{C}$ , 机桶后端温度  $290^\circ\text{C}$ , 模温  $80^\circ\text{C}$ , 注射压力  $59\text{MPa}$ 。

### 1.3 加载

在日本岛津 AG-10TA 型电子式万能试验机上进行实验, 载荷精度  $\pm 0.25\%$ , 时间精度优于  $1\text{s}$ 。采用梯形波加载方式。其中最大应力保持时间  $t$  分别为  $5\text{s}$ ,  $30\text{s}$ ,  $70\text{s}$  和  $180\text{s}$  四种条件, 最小应力保持时间  $6\text{s}$ , 每次加载或卸载时间  $20\text{s}$ , 疲劳应力最小值  $\sigma_{\min} = 0.40\text{MPa}$ 。疲劳应力最大值  $\sigma_{\max}$  的确定主要考虑即要明显小于断裂强度和屈服强度, 又要使实验时间不能太长。所以, 本研究试样  $\sigma_{\max}$  分别为  $14.7\text{MPa}$ ,  $17.2\text{MPa}$  和  $19.6\text{MPa}$ 。

### 1.4 保温

由于塑料蠕变性能对温度十分敏感, 为使温度恒定, 减少波动, 本实验采用液体介质加热保温。聚碳酸酯溶解度系数为  $20.0(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$ , 乙二醇溶解度系数  $23.5(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$ <sup>[4]</sup>。选用乙二醇作溶剂, 不会发生明显溶胀现象, 同时在试验温度范围内, 乙二醇粘度不大, 既容易流动, 保证温度均匀, 又不易挥发, 不会带来额外的影响。加热温度由 CS501 型超级恒温器控制, 选择  $40^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  三种实验温度。温度波动  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

在累积加载时间  $\Sigma t$ -断裂寿命  $N_f$  关系图中, 疲劳交变最大应力加载时间  $t$  趋于很长时为纯蠕变, 其断裂数据(断裂时间)在横轴上。当  $t = 0$  时, 则为纯疲劳, 其断裂数据(循环寿命)在纵轴上。疲劳/蠕变复合作用试验结果如图 1 所示。与纯疲劳相比, 疲劳/蠕变复合作用下的循环寿命  $N_f$  更低, 说明蠕变加剧了断裂损伤; 与纯蠕变相比, 疲劳/蠕变复合作用下的累积时间寿命  $\Sigma t$  更短, 说明疲劳也加剧了断裂损伤。然而, 若以累积最大应力时间  $\Sigma t$  作为寿命指标, 疲劳/蠕变复

合作用下的寿命似乎又高于纯疲劳; 若以循环寿命  $N_f$  作为寿命指标, 疲劳/蠕变复合作用下的寿命似乎好于纯蠕变。同样, 对于不同  $t$  的疲劳/蠕变复合作用, 若以循环寿命  $N_f$  为寿命指标, 则随  $t$  的减小, 寿命依次增加。而以累积最大应力加载时间  $\Sigma t$  为寿命指标, 则刚好相反。因此, 图 1 不能准确直接地反应疲劳/蠕变复合作用的寿命损伤状况, 尤其不能说明疲劳/蠕变复合作用时是否有交互影响, 以及若有交互影响, 是促进还是减缓断裂损伤。

为了更准确地表达工程实际中变载疲劳的损伤状况, Miner M. A. 和 Palmgren 等提出线性累积

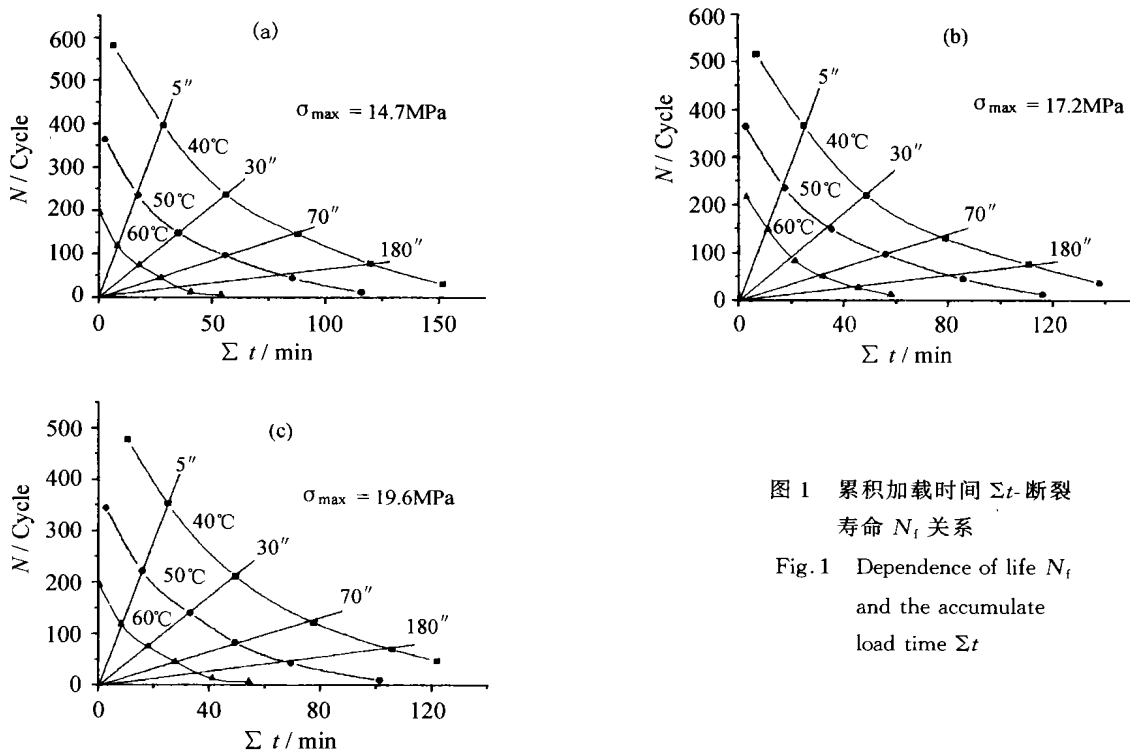


图 1 累积加载时间  $\Sigma t$ -断裂寿命  $N_f$  关系

Fig. 1 Dependence of life  $N_f$  and the accumulate load time  $\Sigma t$

损伤法则, 简称 Miner 法则:

$$\sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} = 1, \dots \dots \quad (1)$$

$l$ —应力水平个数;  $n_i$ —各级应力水平下的循环数;  $N_i$ —单纯在各级应力水平下的疲劳寿命。同理, 为了描述和预估疲劳/蠕变复合作用产生的累积损伤, 产生了疲劳/蠕变线性累积损伤法则:

$$N/N_f + t/t_r = 1 \dots \dots \quad (2)$$

$N$ —疲劳循环数;  $N_f$ —纯疲劳时的疲劳寿命;  $t$ —蠕变时间;  $t_r$ —纯蠕变时的蠕变寿命。

经美国的 ASME 发展为:

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N_{fi}} + \sum_{j=1}^n \frac{t_j}{t_{rj}} = D \dots \dots \quad (3)$$

如疲劳/蠕变损伤临界值  $D = 1$ , 表示为线性累积损伤, 疲劳/蠕变之间无交互作用。若  $D > 1$ , 则为非线性累积损伤。若  $D < 1$ , 则为疲劳/蠕变彼此加剧损伤。Lagnelorg 和 Attermo 进一步提出了适于一种循环应力水平和蠕变应力的疲劳/蠕变损伤规律公式<sup>[2,5]</sup>:

$$N/N_f + B(N/N_f * t/t_r)^{1/2} + \Sigma t/t_r = 1 \dots \dots (4)$$

第一项代表疲劳单独损伤程度, 第三项代表蠕变单独损伤程度, 第二项为疲劳/蠕变损伤是交

相互作用项。疲劳/蠕变损伤交互作用系数  $B$  值的大小,反映疲劳/蠕变交互作用强弱。本文试验数据按照公式(4)计算,并作出疲劳/蠕变累积损伤图  $\Sigma t/t_r - N/N_f$  (图2)。图2的直线为  $N/N_f + \Sigma t/t_r = 1$ ,表示疲劳/蠕变无交互作用。试验数据曲线都在其左下部呈曲线,表明疲劳/蠕变复合作用聚碳酸酯时,疲劳/蠕变互相加剧损伤。此外,在同一种疲劳/蠕变条件下,试验温度40的累积损伤曲线比50的和60的累积损伤曲线更远离直线,说明在40疲劳/蠕变损伤的交互作用强于50和60时。而在累积加载时间  $\Sigma t$ -断裂

寿命  $N$  关系(图1)中,40下的累积损伤寿命都高于50和60时的寿命。综合图1和图2的结果说明,随着温度减低,累积损伤寿命增大,虽然疲劳和蠕变二者交互产生的损伤作用增强,然而疲劳或蠕变各自损伤作用减轻。反之,随着温度升高,累积损伤寿命减小,即疲劳或蠕变各自损伤加强所致,而二者交互产生的损伤作用减轻。由图1和图2发现,在不同加载条件下都表现同样规律。

疲劳过程中往往产生链的滑移、断裂。通过红外光谱仪和X射线衍射仪已观察到疲劳过程

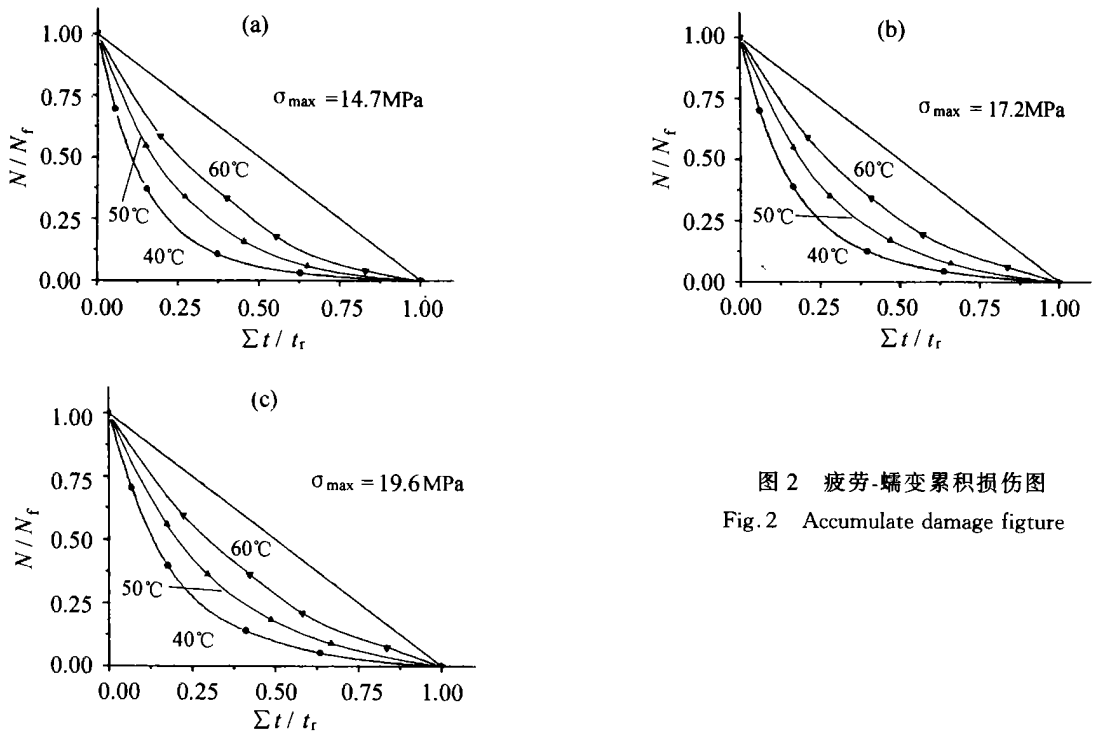


图2 疲劳-蠕变累积损伤图  
Fig.2 Accumulate damage figure

中聚碳酸酯的键长、键角变化和分子间距变小<sup>[6]</sup>。非晶态高分子是分子链段运动被冻结的热力学非平衡态,有向平衡态运动的趋势。而疲劳有利于促进此趋向。疲劳载荷作用下的链断裂能促进相邻分子链的滑移<sup>[6]</sup>。在温度较低的情况下,单向外力产生的分子链运动有限,蠕变较小,而疲劳/蠕变复合外力作用时,每次疲劳周期伴随的外力变化都将使分子链或链段在微观结构上产生键长、键角和分子间距变化。相应地,在宏观上伴随产生伸长-收缩往复运动。在这种往复运动过程中,原本受单向外力(纯蠕变外力)作用运动受阻的分子链或链段获得松动机会,为新的蠕变运动创造了条件,即疲劳外力促进了蠕变外力产生的蠕变。相对而言,在较高温度条件下分子链或链段活化程度

本来已较高,运动能力较大,纯蠕变外力产生的分子链或链段运动受阻程度较小。因此,疲劳外力促进蠕变外力产生蠕变的作用降低,因而在较高温度下,疲劳/蠕变交互损伤作用减小。而因分子链、链段活性增加,分子链共价键断裂能下降,导致疲劳和蠕变各自单独损伤增加,因而总的疲劳/蠕变寿命更低。

### 3 结论

- (1) 疲劳/蠕变复合作用下聚碳酸酯存在交互损伤作用,使聚碳酸酯的疲劳/蠕变交互作用断裂寿命小于纯疲劳或纯蠕变的断裂寿命。
- (2) 疲劳/蠕变交互作用程度受温度影响大。

聚碳酸酯在较低温度( 40 ) 的疲劳/蠕变交互损伤作用大于较高温度( 50 和 60 ) 的交互损伤作用。随温度升高, 疲劳/蠕变断裂寿命下降是疲劳和蠕变各自的单独损伤增加所致。

(3) 疲劳/蠕变复合作用聚碳酸酯的断裂机制是由于疲劳循环载荷周期变化导致分子链和链段伸长/收缩往复运动, 使在蠕变单向外力作用中受阻的分子链和链段获得松动机会, 活化程度增加, 促进蠕变断裂, 导致疲劳/蠕变断裂寿命降低。

#### 参考文献:

[ 1 ] BATTE A D. Creep-fatigue life predictions, fatigue at high temperature[M]. SKELTON, R P, ed. New

York: Applied Science Publishers, 1983. 365.

- [ 2 ] 章安庆, 孔庆平, 师昌绪. 一种镍基合金的蠕变和低周疲劳的交互作用[J]. 金属学报, 1979, 15( 4): 518.
- [ 3 ] 张运兰, 刘建华. 非金属工程材料[ M ]. 轻工业出版社, 1987. 54.
- [ 4 ] 北京大学化学系高分子研究室. 高分子物理实验[ M ]. 北京大学出版社, 1983. 421- 422.
- [ 5 ] LAGNEBORG R, ATTERM O R. Effect of combined low-cycle fatigue and creep on the life of austenitic stainless steels [ J]. Met Trans, 1971, 2( 7): 1821 - 1827.
- [ 6 ] 吕锡慈. 高分子材料强度与破坏[ M ]. 成都: 四川教育出版社, 1988. 356.

## Study of the mutual damage of polycarbonate both in fatigue and creep

SONG Zhi-min<sup>1</sup>, HUANG Wan-xia<sup>1</sup>, NI Hai-ying<sup>1</sup>, LIU Min-zhi<sup>1</sup>, XIANG Hai<sup>2</sup>

( 1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Chengdu Aircraft Industrial Corp., Chengdu 610091, China)

**Abstract:** The mutual damage of polycarbonate both in fatigue and creep were studied. The results show that the mutual damage of polycarbonate existed both in fatigue and creep. The fracture life appeared less than any one of pure fatigue or creep. The fracture mechanism is that fatigue cycle load causes molecular chains or chain segments to be elongated and shortened cyclically ; and then the molecular chains or chain segments which movements were resisted in single directional external force are loosened and activated. Therefore it encourages creep movement and fracture. The degree of mutual damages both in fatigue and creep is closely related to temperature. The degree of mutual damages at lower temperature is greater than that at higher temperature. The fracture life is shorter at higher temperature because the individual damage of pure fatigue or creep increases.

**Key words:** polycarbonate; fatigue; creep; mutual damage