

梯形交变加载作用下聚碳酸酯的应变与寿命*

宋之敏¹ 黄婉霞² 刘民治²

(四川大学¹ 分析测试中心² 材料科学与工程学院 成都 610065)

摘 要 对聚碳酸酯在交变/持久载荷复合作用下应变与寿命研究表明,其疲劳/蠕变曲线与纯蠕变曲线十分相似.加载时间周期越短和交变载荷变化越频繁,普弹应变阶段的斜率和应变越小,进入延迟弹性变形的平台应变阶段越早.随每一次循环中的最大载荷加载保持时间延长,聚碳酸酯断裂寿命减小.以最大载荷为恒载荷一直加载的纯蠕变曲线,平台最高,断裂时间最早.而最大载荷加载作用时间为 0 的纯疲劳曲线,平台最低,断裂时间最迟.在交变/持久载荷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 N/N_i 和 $\sum t/t_i$, 比纯疲劳或纯蠕变的断裂寿命低;断裂寿命减小.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 疲劳,蠕变,断裂,应变,寿命,交互损伤

因许多性能上的特点,塑料正越来越多地成为现代工业和当代生活中的主要材料.在使用中,塑料不仅可能单独承受持久载荷(引起蠕变)或交变载荷(引起疲劳),也可能同时承受持久载荷和交变载荷的作用,即塑料承受疲劳和蠕变的复合作用.对金属构件在同时受到疲劳和蠕变复合作用的行为已进行了许多研究^[1,2].塑料因其独特的性能、良好的加工性和经济性,广泛应用于众多领域和大量被采用.例如美国波音 747 飞机有 2500 个零件用聚碳酸酯制造^[3].聚碳酸酯件使用时,承受的作用力多种多样.因此,对聚碳酸酯在梯形交变载荷作用下应变与寿命进行研究,可完善塑料的力学性能研究,有理论意义和实际意义.

1 实验部分

1.1 原材料

聚碳酸酯,牌号为 PC6709-3,密度 1.20 g/cm³,重庆长风化工厂生产.

1.2 试样

在 COSMT-80 型注塑机上,按照表 1 的工艺条件将聚碳酸酯注射成型为国标 GB/T1040-1992 的 I 型片状拉伸试样.

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

Table 1 The injection conditions of samples

Punner temperature (front)	Punner temperature (back)	Mould temperature	Injection pressure
260℃	290℃	80℃	59 MPa

1 s.采用梯形波加载方式.其中,最大应力保持时间 $t_{\max}$ 分别为 5 s、30 s、70 s 和 180 s 4 种条件,最小应力保持时间 6 s,每次加载或卸载时间 20 s,交变疲劳应力最小值 $\sigma_{\min} = 0.40$ MPa.交变疲劳应力最大值 $\sigma_{\max}$ 的确定主要考虑以下因素,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,本文试验中所用的 $\sigma_{\max}$ 分别为 14.7 MPa、17.2 MPa 和 19.6 MPa.

1.4 保温

由于塑料蠕变性能对温度十分敏感,为了使温度恒定、减少波动,本实验采用液体介质加热保温.聚碳酸酯的溶解度系数为 20.0 (J/cm³)^{1/2},异丙醇溶解度系数为 23.5 (J/cm³)^{1/2}^[4].选用异丙醇作溶剂,不会发生明显溶胀现象,同时,在试验温度范围内,异丙醇粘度不大,既容易流动,保证温度均匀,又不易挥发,不会对试验带来额外的影响.加热温度由 CS501 型超级恒温器控制,本文选择 40℃、50℃ 和 60℃ 3 种实验温度.温度波动 $\pm 1^\circ\text{C}$.

* 2003-01-13 收稿,2003-05-20 修稿;国家自然科学基金资助项目(基金号 5880116)

2 结果与讨论

2.1 疲劳/蠕变应变曲线

当处于最大应力保持时间段内若干时间点,记录试样当时的应变值,再由 3 件试样的实验点数据平均值画出应变-时间曲线.结果如图 1.图 1 为 $T=50^{\circ}\text{C}$ 条件下,聚碳酸酯在不同的交变疲劳应力下应变与时间曲线.当最大应力保持时间 $t_{\max}=0$,实际为以时间为横坐标的纯疲劳曲线.而一般纯疲劳曲线以交变次数为横坐标.当最大应力保持时间 $t_{\max}=\text{断裂时间}$,实际为纯蠕变曲线.

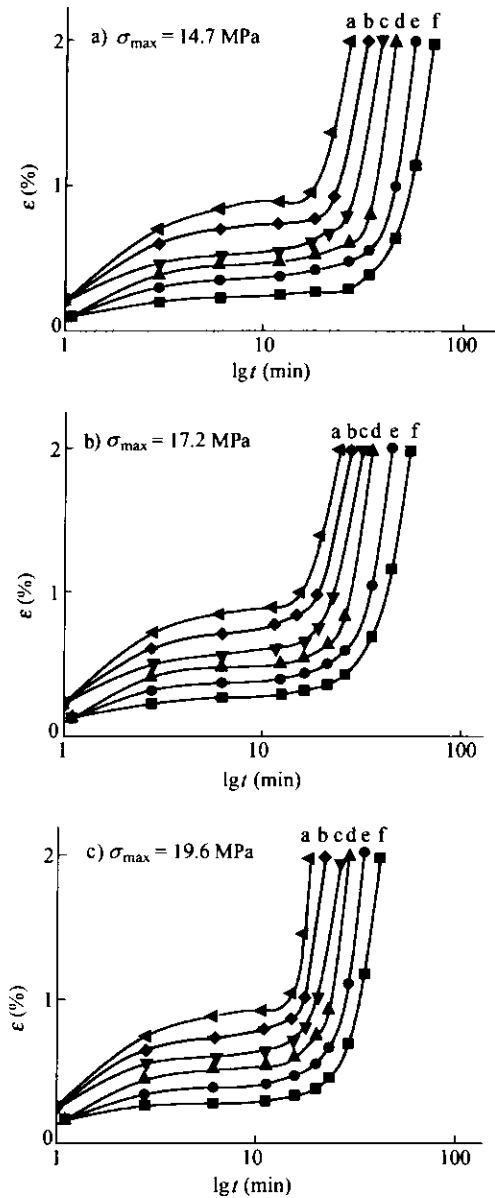


Fig. 1 The relationship of test time t and strain ϵ
 t : (a) Pure creep; (b) 180 s; (c) 70 s; (d) 30 s; (e) 5 s;
(f) Pure fatigue; 50°C

图 1 中不同保持时间 $t_{\max}$ 下的疲劳/蠕变曲线与纯蠕变曲线十分相似.与典型纯蠕变曲线一样^[5],可分为 3 个阶段.第 1 阶段为快速小形变阶段,应力与应变成正比,实际上是瞬时普弹应变,属可逆变形.第 2 阶段为应变平台阶段,应变几乎恒定,为延迟弹性变形.第 3 阶段为加速断裂阶段,应变快速增长,直到断裂.

由图 1 可发现载荷时间周期越短和交变载荷变化越频繁,普弹应变阶段斜率和结束时应变越小,进入延迟弹性变形的平台应变阶段越早,延迟弹性变形的平台应变减小.这是因为加载保持时间减短,意味着加载与卸载频繁,疲劳交变频繁导致材料更易产生塑性应变,在较小的应变下结束普弹应变阶段.

2.2 疲劳/蠕变交互作用与断裂寿命

图 1 能直接地反应不同时间阶段的应变情况,但不能准确直接地反应交变/持久载荷复合作用的寿命损伤状况,尤其不能说明交变/持久载荷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,Lagnelorg 和 Attermo 提出了适于一种循环应力水平和持久应力的疲劳/蠕变损伤规律公式^[1]:

$$\frac{N}{N_t} + B\left(\frac{N}{N_t} \times \sum \frac{t}{t_r}\right)^{1/2} + \sum \frac{t}{t_r} = 1 \tag{1}$$

公式(1)中, N_t 为当最大应力保持时间 $t_{\max}=0$ (锯齿形交变载荷)的疲劳寿命,即纯疲劳寿命; N 为当最大应力保持时间 $t_{\max}>0$ (梯形交变载荷)的疲劳寿命; N_t 和 N 的单位为循环交变次数. t_r 为当最大应力保持时间 $t_{\max}=\text{断裂时间}$ (持久载荷)的寿命,即纯蠕变寿命; t 为当最大应力保持时间 $t_{\max}<\text{断裂时间}$ (梯形交变载荷)的蠕变寿命; t_r 和 t 的单位为时间.通常认为梯形交变载荷作为循环载荷导致疲劳,而对其中引起的蠕变严重认识不足.将梯形交变载荷分解为锯齿形,以深入研究前者导致疲劳、后者引起蠕变和二者交互作用的危害性.公式(1)中第一项代表疲劳单独损伤程度,第 3 项代表蠕变单独损伤程度,第 2 项为疲劳/蠕变损伤是交互作用项,反映疲劳/蠕变损伤交互作用强弱.

本文试验数据按照公式(1)计算,并作出疲劳/蠕变累积损伤图 $\sum t/t_r \sim N/N_t$ (见图 2).图 2 的

直线为 $N/N_f + \sum t/t_f = 1$, 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, 表明交互/持久载荷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℃ 的累积损伤曲线和 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℃. 40℃ 下的累积损伤寿命都高于 50℃ 和 60℃ 时的寿命. 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 2 发现在不同的加载条件下, 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中聚碳酸酯的键长、键角变化和分子间距变小^[6]. 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. 交变载荷作用下的链断裂能促进相邻分子链的滑移. 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. 即交变外力促进了持久外力产生的蠕变. 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, 纯持久外力产生的分子链或链段运动受阻程度较小. 因此, 交变外力促进持久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, 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.

综上所述, 聚碳酸酯的疲劳-蠕变曲线与纯蠕变曲线十分相似.

聚碳酸酯在交互/持久载荷复合作用下, 随施加最大载荷的保持时间缩短, 即持久载荷比例减小, 交变载荷比例增加, 导致以较小的斜率和较小的应变结束普弹应变阶段, 延迟弹性变形的平台应变减小.

随每一次循环中的最大载荷加载保持时间延长, 聚碳酸酯断裂寿命时间减小.

交互/持久载荷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.

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.

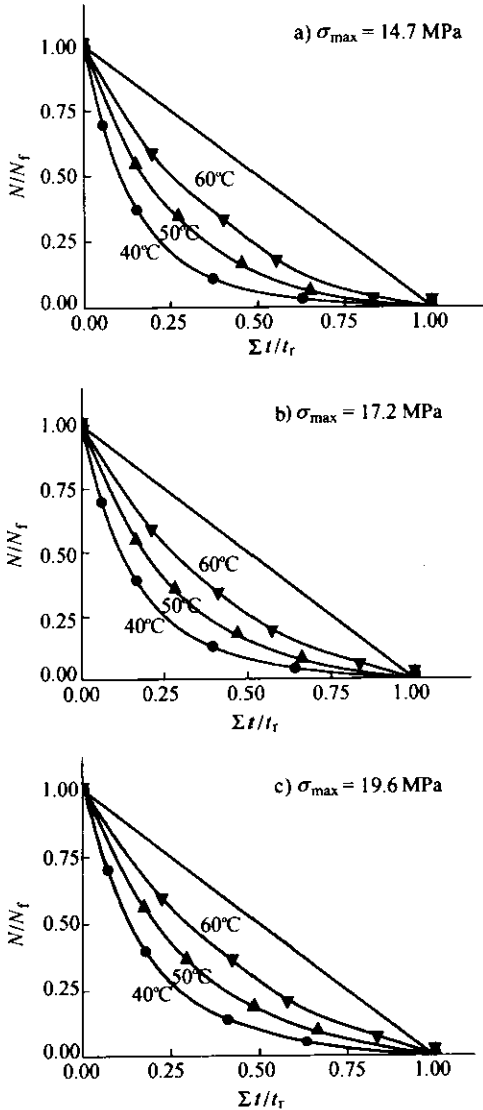


Fig. 2 Accumulate damage figure

REFERENCES

- 1 Lagneborg R, Attermo R. *Met Trans*, 1971, 2: 1821
- 2 Batte A D. *Creep-Fatigue Life Predictions, Fatigue at High Temperature*, Edited by Skelton R P. New York: Applied Science Publishers, 1983. 365 ~ 370
- 3 Zhang Yunlan(张运兰), Liu Jianhua(刘建华). *Nonmetal Engineering Materials(非金属工程材料)*. Beijing(北京): Light Industry Press(轻工业出版社), 1987. 53 ~ 54
- 4 The Polymer Staff Room of Chemical Department in Peking University. *Polymeric Physical Test(高分子物理实验)*. Beijing(北京): Peking University Press(北京大学出版社), 1983. 421 ~ 422
- 5 Xu Peixian(徐佩弦). *Plastics Failure(塑料件的失效)*. Beijing(北京): National Defence Industry Press(国防工业出版社), 1998. 62 ~ 63
- 6 Lv Xici(吕锡慈). *Polymeric Materials Strength and Breakdown(高分子材料强度与破坏)*. Chengdu(成都): Sichuan Education Press(四川教育出版社), 1988. 356 ~ 357

STUDY ON THE STRAIN AND BREAKING LIFE OF POLYCARBONTE UNDER TRAPEZOIDAL WAVE LOAD

SONG Zhimin¹, HUANG Wanxia², LIU Minzhi²

(¹ Analytical Testing Center, ² College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract The strain and breaking life of polycarbonate under loading of trapezoidal wave shape were investigated for analysing the behavior of polymers under the co-action of cyclic and constant loadings. It was found that the fatigue/creep curves under trapezoidal loading are similar to the pure creep curves under constant loading. A strain platform was observed before the break of the samples. With increasing the time length of maximum load in each cycle the platform strain value increases, and the break life decreases. Under trapezoidal loading the break life of polycarbonate was not simply determined by the contributions of pure creep and pure fatigue, and a term reflecting the co-action of the two damage types should be considered. The co-action term is more evident at low temperature. A decrease of breaking life of the samples was observed with raising temperature and was explained as the result of increase of individual effects of pure creep or pure fatigue.

Key words Polycarbonate, Fatigue, Creep, Strain, Life, Mutual damage