

连续碳纤维增强的聚芳醚酮在 I 型 循环载荷下的层间破坏*

周 江 何天白 刘维莲 陈天禄 李滨耀

(中国科学院长春应用化学研究所, 长春, 邮政编码: 130022)

摘 要

用双悬臂梁 (DCB) 试件研究了连续碳纤维增强的聚芳醚酮复合材料(CF/PEK-C), 在 I 型循环载荷作用下的层间裂纹扩展行为。循环载荷采用载荷控制模式, 最小载荷与最大载荷之比为 0.5。在疲劳试验中, 仍然发现有“阻力曲线”现象存在。层间裂纹扩展速率用指数定律与相应的应变能释放速率联系起来, 并对结果进行了讨论。

关键词 聚芳醚酮、复合材料、层间破坏、I 型循环载荷

复合材料通常是作为结构材料来使用, 而层间破坏是连续纤维增强的聚合物基复合材料最常见的破坏形式, 它可以大幅度地降低结构的强度和刚度。因此, 层间破坏问题一直是近年来人们研究的热点之一。目前, 断裂力学已被广泛地用来表征复合材料中层间裂纹的启裂和扩展^[1-9]。但是, 这些研究绝大多数都集中在静态载荷下复合材料的断裂行为, 而对复合材料在循环载荷作用下的断裂行为却研究的很少^[10-12]。

在结构设计中, 复合材料的耐久性是人们关心的问题。在正常的使用条件下, 材料所承受的载荷都小于使其发生破坏的临界载荷。但是, 这些载荷往往是重复性的, 这就涉及到研究复合材料在重复加载情况下的疲劳特性及破坏行为。这对于复合材料在结构设计中的应用是必不可少的。

我们曾经报道了连续碳纤维增强的聚芳醚酮复合材料的常规力学性能^[13]和静态载荷下的层间破坏行为^[14]。本文继续介绍这种复合材料在循环载荷下的层间破坏及疲劳特性。

实 验 部 分

实验中所用的试件与测量 I 型断裂韧性 G_{Ic} 的双悬臂梁 (DCB) 试件相同^[14]。DCB 试件的疲劳试验在日本岛津 AG-10T 电子拉力机上进行。试验采用载荷控制模式, 循环频率为 0.4Hz, 载荷比 R (即在一个循环过程中最小载荷与最大载荷之比) 为 0.5。在正式试验开始之前, 需对初始裂纹进行预裂, 以期产生一个自然的裂纹尖端。因此, 首先给试件施加 I 型静态载荷, 直至初始裂纹扩展约 10mm, 记录此时的载荷, 然后卸载。接

* 1991 年 3 月 5 日收到; 国家自然科学基金资助的项目

下来对试件施加 I 型循环载荷, 最大载荷取使裂纹发生扩展的临界静态载荷的百分之七十。记录疲劳循环次数, 并定期用读数显微镜测量裂纹的长度, 同时记录与之对应的最大载荷与最大位移以及最小载荷与最小位移。

数据处理方法

由于 DCB 试件中的柔度与裂纹长度, 可以用下面的指数关系联系起来^[4]

$$C = \delta/P = Aa^n \quad (1)$$

式(1)中 P 是对试件施加的载荷, δ 是加载点之间的位移, a 是裂纹的长度, A 和 n 是可以由实验确定的常数。在根据梁的弯曲理论得到的 DCB 试件的柔度表达式中, n 的值为 3。但是, 由于梁弯曲理论中的几个假定, 在实验中不能完全满足, 所以, n 的实验值和理论值是不同的。应变能释放速率由 Irwin-Kies 公式得到

$$G_I = (P^2/2B) dC/da \quad (2)$$

式(2)中 B 是试件的宽度。由式(1)和式(2)可以得到在疲劳循环过程中, 最大应变能释放速率和最小应变能释放速率分别为

$$G_{I\max} = nP_{\max}\delta_{\max}/2Ba \quad (3)$$

$$G_{I\min} = nP_{\min}\delta_{\min}/2Ba \quad (4)$$

结果与讨论

测量到的 CF/PEK-C 双悬臂梁试件中裂纹长度与循环次数的关系如图 1 所示。图 2 则给出了裂纹扩展速率与循环次数的关系。在初始阶段, 裂纹扩展速率是很小的。随着

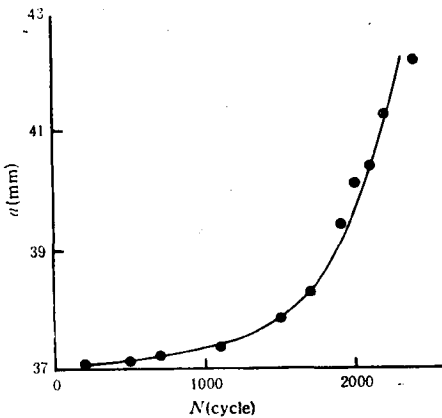


Fig. 1 Relation between crack length and number of cycles

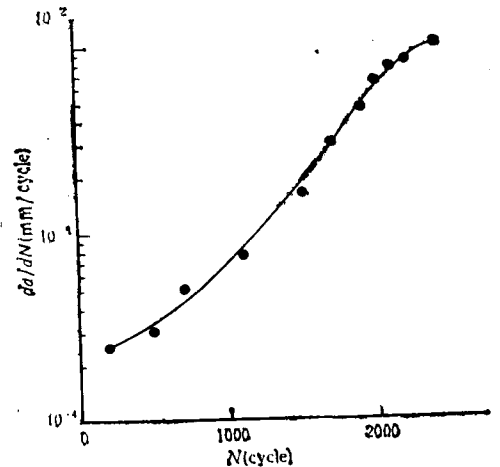


Fig. 2 Variation of delamination growth rate with number of cycles

循环次数的增加, 裂纹扩展速率逐渐变大。裂纹扩展速率与所施加的加载系数(即 P_{\max} 与发生破坏的静载荷之比)有着密切的关系。如前所述, 循环过程中设定的最大载荷是使初始裂纹发生扩展的临界静态载荷的百分之七十, 但是, 使裂纹发生扩展的临界静界载荷是

随裂纹增长而降低的。由于在循环过程中,设定的最大载荷不变,所以随着循环次数和裂纹长度的增加,试件实际承受的载荷系数不断增加,裂纹扩展速率就不断增加。当裂纹长度达到某一数值时,设定的循环最大载荷与使该长度的裂纹发生扩展的临界静态载荷相等,循环终止,试件发生静态载荷下的层间破坏。

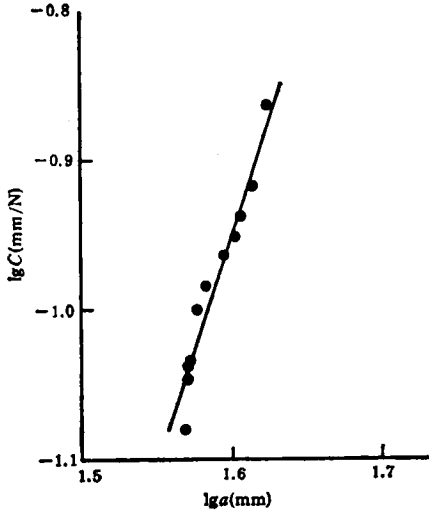


Fig. 3 Relation between compliance and crack length in DCB specimen

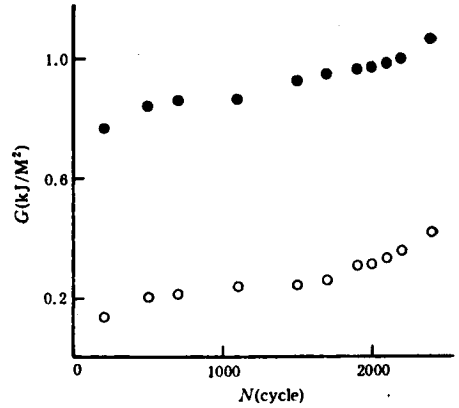


Fig. 4 Minimum and maximum cyclic strain energy release rates during the fatigue test
—●— $G_{I_{max}}$; —○— $G_{I_{min}}$

图 3 是试验中测得的试件在循环过程中柔度与裂纹长度的关系。由线性回归分析求得式(1)中的指数 n 为 3.12, 略大于由梁理论得到的指数。至此, 根据式(3)和式(4)可以确定 CF/PEK-C 复合材料在 $R = 0.5$ 的循环载荷下, 疲劳裂纹扩展的最大和最小应变能释放速率。图 4 给出了它们随循环次数的变化。 $G_{I_{max}}$ 和 $G_{I_{min}}$ 代表了载荷控制模式中, 层间疲劳裂纹扩展的驱动力范围。图 5 给出了最大应变能释放速率与疲劳裂纹长度的关系。值得注意的是, $G_{I_{max}}$ 随裂纹长度的变化也存在所谓的“阻力曲线”现象^[8,9]。这说明在循环载荷的作用下, 疲劳裂纹的扩展过程中仍有纤维桥结发生。

在金属材料中, 疲劳裂纹扩展的表征是通过将裂纹扩展速率与循环应力强度因子用指数定律联系起来进行的。对复合材料来说, 疲劳层间裂纹的扩展也可以用应变能释放速率以同样的方法来表征。即认为^[15]

$$da/dN = K(G_I)^m \tag{5}$$

式(5)中系数 K 和指数 m 是由材料、频率、环境和应力状态等条件决定的常数。

图 6 给出了 CF/PEK-C 的疲劳裂纹扩展速率与对应的最大应变能释放速率的关系由线性回归分析得到的指数 m 为 14、24。

在一些文献中, 用应变能释放速率范围 ΔG_I 来表征复合材料中疲劳裂纹的扩展^[16], 即

$$da/dN = K(\Delta G_I)^m \tag{6}$$

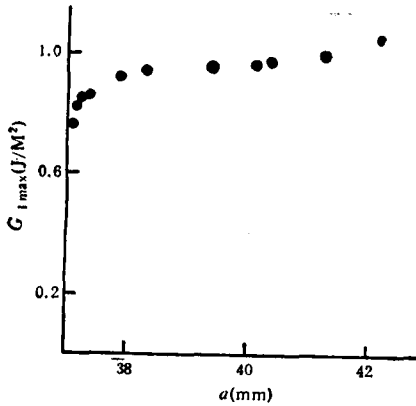


Fig. 5 Variation of maximum strain energy release rate with delamination length

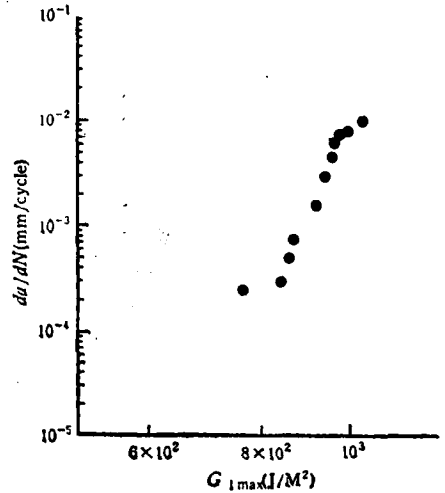


Fig. 6 Relation between maximum strain energy release rate and delamination growth rate

式(6)中 $\Delta G_I = G_{I,max} - G_{I,min}$ 。需要指出的是,在载荷控制的情况下,从理论上讲式(5)和式(6)是等价的。由式(3)、式(4)和式(1)不难得到, $\Delta G_I = (1 - R^2)G_{I,max}$ 。但是,由于试验过程中,加载速度很快,传感器及数据采集系统有一定的滞后效应,加上由于纤维的桥结和剥离而在裂尖后部造成的挤压,使得实际的循环载荷比 R 既不严格地为 0.5 也不等于常数。图 7 是裂纹扩展速率对应变能释放率范围作图得到的曲线。

在大多数金属材料中,疲劳裂纹扩展指数定律中的指数 m 一般在 1—2 之间。与此相比,复合材料的 m 值是相当高的^[10,17]。这是由于在我们的实验中,裂纹是在复合材料层间扩展的,而层间是复合材料最薄弱的部位。因此,复合材料具有较高的 m 值就不足为奇了。由式(5)和式(6)不难看出,高的 m 值意味着,所加载荷的一个小的变化,也将引起复合材料中层间裂纹扩展速率的大的变化。也就是说,复合材料中疲劳层间裂纹扩展速率比金属材料的对载荷的变化更敏感。

由于层间是复合材料最薄弱的环节,因此,目前对复合材料疲劳及断裂的研究都集中在层间。提高复合材料的层间断裂韧性及抗疲劳特性是复合材料研究的重要课题。研究表明:复合材料的层间断裂韧性及抗疲劳特性都与基体树脂的韧性有着密切的关系。一般说来,韧性好的树脂,其抵抗疲劳裂纹扩展的能力也好^[18],而热塑性树脂基复合材

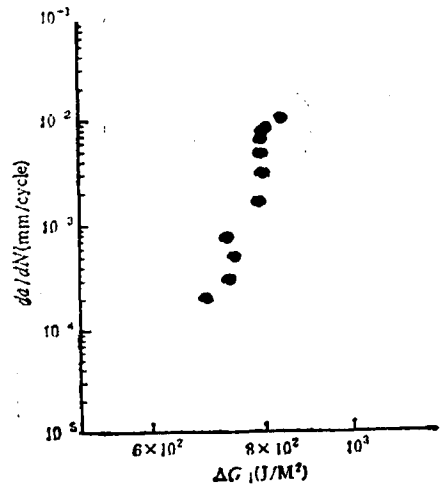


Fig. 7 Relation between strain energy release rate range and delamination growth rate

料与热固性复合材料相比,也显示出较好的抗裂纹增长的特性^[19]。因此,用高性能热塑性树脂改性热固性基体树脂,或用热塑性树脂作为基体,已成为提高复合材料层间断裂韧性及改善抗疲劳性能的重要途径。

参 考 文 献

- [1] Whitney, J. H., Browning, C. E., Hoogstedcn, W. H., *J. Reinj. Plast. Comp.*, 1982, 1, 297
- [2] Keary, P. E., Ilcewicz, L. B., Shaar, C., Trostle, J., *J. Comp. Mater.*, 1985, 19, 154
- [3] Street, K. N., Russell, A. J., Bonsang, F., *Comp. Sci. Technol.*, 1988, 32, 1
- [4] Huang, X. N., Hull, D., *Comp. Sci. Technol.*, 1989, 35, 283
- [5] Davies, P., Cantwell, W., Moulin, C., Kausch, H. H., *Comp. Sci. Technol.*, 1989, 36, 153
- [6] Hine, P. J., Brew, B., Duckett, R. A., Ward, I. M., *Comp. Sci. Technol.*, 1988, 33, 35
- [7] Hashemi, S., Kinloch, A. J., Williams, J. G., *Proc. Royal Soc.*, 1990 A, 427, 173
- [8] Davies, P., Moulin, C., Kausch, H. H., *Comp. Sci. Technol.*, 1990, 39, 193
- [9] Hashemi, S., Kinloch, A. J., Williams, J. G., *Comp. Sci. Technol.*, 1990, 37, 429
- [10] Hwang, W., Han, K. S., *J. Comp. Mater.*, 1989, 23, 396
- [11] Newaz, G. M., Mall, S., *J. Comp. Mater.*, 1989, 23, 133
- [12] Lustiger, A., Newaz, G. M., *J. Comp. Mater.*, 1990, 24, 175
- [13] He, T., Li, B., Zhang, Y., Qu, G., Zluang, Y., Chen, T., Yuan, Y., Qu, X., Ding, M., Liu, K., Proceedings of 7th Int. Conf. Comp. Mater., Int. Academic Pub., Beijing, 1989, 4, pp. 40—42
- [14] 何天白、周江、曲桂杰、陈天禄、李滨耀, *高分子学报*, 1990, 6, 734
- [15] Donaldson, S. L., Mall, S., *J. Reinj. Plast. Comp.*, 1989, 8, 91
- [16] Wang, S. S., Miyase, A., *J. Copm. Mater.*, 1986, 20, 439
- [17] Hojo, M., Tanaka, K., Guslafson, C. G., Hayashi, R., *Comp. Sci. Technol.*, 1987, 29, 273
- [18] Hertzberg, R. W., Manson, J. A., *Fatigue of Engineering Plastics*, Academic Press, Inc., Orlando, Fla., 1980
- [19] Trethewey, B. R. Jr., Gillespie, J. W. Jr., Carlsson, L. A., *J. Comp. Mater.*, 1988, 22, 459

DELAMINATION OF CONTINUOUS CARBON FIBER REINFORCED POLY (PHENYLENE ETHER KETONE) UNDER MODE I CYCLIC LOADING

ZHOU Jiang, HE Tianbai, LIU Weilian, CHEN Tianlu, LI Binyao

(Changchun Institute of Applied Chemistry, Academia Sinica, Changchun Post code: 130022)

ABSTRACT

The interlaminar fatigue crack growth behavior in a continuous carbon fiber reinforced poly(phenylene ether ketone) composite is studied. Experiments are conducted on double cantilever beam(DCB) specimens under mode I load controlled cyclic loading with a ratio of maximum to minimum load of 0.5. The delamination growth rate data are correlated with the corresponding maximum strain energy release rate by a power law. The resistance curve phenomenon is also found in the fatigue tests. The results of present study are discussed.

Key words Poly (phenylene ether ketone), Composite, Delamination, Mode I cyclic loading