

· 研究简报 ·

韧性聚合物材料断面分维与断裂韧性 *

吕素平 漆宗能 **

(中国科学院化学研究所工程塑料国家重点实验室, 北京, 100080)

关键词 分维、断裂韧性、聚合物、微裂纹、剪切带

利用分形几何定量描述材料断面的粗糙特征^[1-4]为建立断面形貌与材料韧性间的定量关系提供了可能性. 已有的实验结果表明, 对于脆性材料如岩石、陶瓷等, 其断裂韧性与断面分维成相同的变化趋势, 但是韧性材料如金属、聚合物等则正好相反^[2, 4, 8], 对于后者尚未有满意的解释. 目前研究工作中又出现了利用统计方法研究材料损伤演化, 如微裂纹的发展与连通和断面分维间关系的倾向^[6]. 本文建立了断裂的微裂纹-剪切带交替链模型, 从断裂力学出发对韧性聚合物材料断面分维与断裂韧性进行了讨论.

微裂纹-剪切带交替链模型

聚合物材料受外力作用时, 内部会产生大量的与轴应力方向近似垂直的微裂纹, 并且在微裂纹尖端可引发剪切带. 当微裂纹发展到一定程度而发生连通形成主裂纹时, 试样就发生断裂, 断面即是主裂纹面.^[7]

假设微裂纹连通的临界条件是相邻微裂纹间的剪切带将两个微裂纹连通(图1), 形成微裂纹与剪切带的交替链. 因为形成交替链后材料的承载能力将不可能再有较大的增加, 于是就发生微裂纹的连通与试样的断裂. 令所有微裂纹的尺寸都为 c , 剪切带都为 s , 二者间方向的夹角为 45° , 即最大剪应力与轴应力方向间的夹角. 微裂纹连通的临界条件可表述为:

$$\lambda_c = \left(\frac{s}{c} \right)_c \quad (1)$$

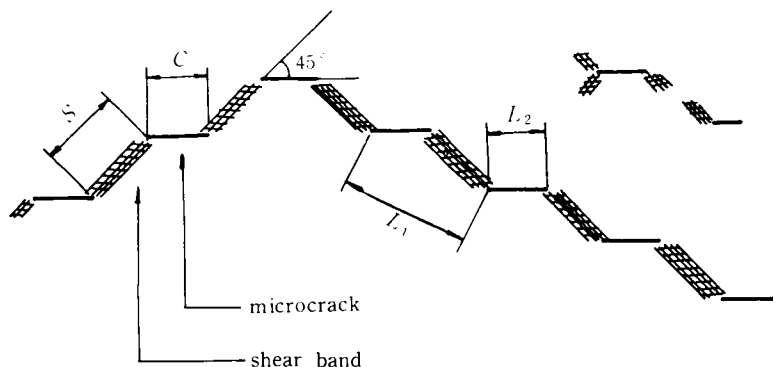


Fig. 1 The schematic model of alternative microcrack-shear band chain

* 1993年6月23日收到; 国家自然科学基金资助项目; ** 通讯联系人

下标 c 表示临界条件. 断面分维由如下方法计算, 将测量尺的长度 l_1 缩短为 l_2 对交替链长度的测量值由 N_1 变为 N_2 , 由图1可以知道:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\left(c^2 + s^2 - 2 \cdot c \cdot s \cdot \cos \frac{3\pi}{4}\right)^{\frac{1}{2}}}{c} \\ = (1 + \lambda_c^2 + \sqrt{2} \lambda_c)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{N_2}{N_1} \cong \frac{N_1 \left(1 + \frac{s}{c}\right)}{N_1} = 1 + \lambda_c \quad (3)$$

根据分维的定义有^[5]:

$$D = - \frac{\ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right)}{\ln \left(\frac{l_2}{l_1} \right)} \quad (4)$$

由(2)、(3)及(4)式得:

$$D = \frac{\ln (1 + \lambda_c^2 + 2\lambda_c)}{\ln (1 + \lambda_c^2 + \sqrt{2} \lambda_c)} \quad (5)$$

那么由(1)式和(5)式就可以计算材料的断面分维. 不难证明 D 随 λ_c 的增加而单调地减小. 其最大值为:

$$D_{\max} = \lim_{\lambda_c \rightarrow 0} D = \lim_{\lambda_c \rightarrow 0} \frac{\ln (1 + \lambda_c^2 + 2\lambda_c)}{\ln (1 + \lambda_c^2 + \sqrt{2} \lambda_c)} = \sqrt{2}$$

其最小值为:

$$D_{\min} = \lim_{\lambda_c \rightarrow \infty} D = \lim_{\lambda_c \rightarrow \infty} \frac{\ln \lambda_c^2}{\ln \lambda_c^2} = 1$$

它与欧氏空间的值相同.

断面分维和断裂韧性的关系

令单位长度的微裂纹对断裂能的贡献为 r_c (微裂纹表面能), 单位长度的剪切带对断裂能的贡献为 r_s (塑性耗散能), 则断裂能 G_c 为:

$$G_c = n \cdot (s \cdot r_s + c \cdot r_c) \quad (6)$$

n 为单位长度的断面上微裂纹—剪切带对的个数. 对于(2)式, 取 l_1 为断口长度 l_0 , l_2 为 c , 则有 $N_1=1$, 而 $N_2=(l_0/c)^D$, 于是有:

$$n = N_2 \cdot \frac{c}{c+s} \cdot \frac{1}{l_0} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{l_0} \cdot \left(\frac{l_0}{c} \right)^D \cdot \frac{c}{c+s}$$

代入(6)式:

$$G_c = \frac{r_c + \lambda_c \cdot r_s}{1 + \lambda_c} \cdot \left(\frac{l_0}{c} \right)^{D-1} \tag{8}$$

一般情况下，聚合物材料的 D 较小，约为 1.1 左右^[4]，于是 $(l_0/c)^{D-1} \cong (l_0/c)^{\frac{1}{10}}$ 因 $(l_0/c)^{\frac{1}{10}}$ ，随 l_0/c 的变化率较小，可以近似取 $(l_0/c)^{\frac{1}{10}}$ 为一常数 θ ，它与材料性能有关。作一近似估计， $l_0 \cong 10^{-2}\text{m}$ ， $c \cong 10^{-6} - 10^{-5}\text{m}$ ，则 $\theta = 2 - 2.5$ 。将 $(l_0/c)^{\frac{1}{10}} = \theta$ 代入(8)式，并重排得：

$$\lambda_c = \frac{\theta \cdot r_c - G_c}{G_c - \theta \cdot r_s} \tag{9}$$

对于韧性聚合物材料，一般有 $r_c \ll G_c$ ，于是上式可简化为：

$$\lambda_c = \frac{G_c}{\theta \cdot r_s - G_c} \tag{10}$$

γ_s 是材料常数，由(5) 和(10)式就可以计算断面分维与断裂能的关系。根据线弹性断裂力学可得材料的断裂韧性 K_{Ic} 为：

$$K_{Ic}^2 = \beta \cdot G_c \cdot E \tag{11}$$

E 为材料的杨氏模量， β 为常数，将此代入(10)式就可以得到：

$$\lambda_c = \frac{K_{Ic}^2}{\theta \cdot \beta \cdot \gamma_s \cdot E - K_{Ic}^2} \tag{12}$$

令 $\theta \cdot \beta \cdot \gamma_s \cdot E = K_{10}^2$ ，它是材料常数，对于韧性聚合物材料，一般有 $K_{10} \geq K_{Ic}$ ，将其代入(12)式得：

$$\lambda_c = \frac{K_{Ic}^2}{K_{10}^2 - K_{Ic}^2} \tag{13}$$

容易证明 λ_c 随 K_{Ic} 的增大而增大，而前面已说明 D 随 λ_c 的增大而减小，那么断面分维 D 将随断裂韧性 K_{Ic} 的增大而单调减小，这一结论与实验结果定性地一致。

图 2 是聚芳醚酮树脂(PEK-C)和聚醚砜树脂(PES)的实验结果^[4] 与计算结果的比较，可以看到两者能够较好地符合，这证明了本文的微裂纹 - 剪切带交替链模型的合理性。根据这一模型，韧性材料其断面分维随韧性的增加而减小，其主要原因是：韧性材料内部有两种损伤形式，即脆性损伤

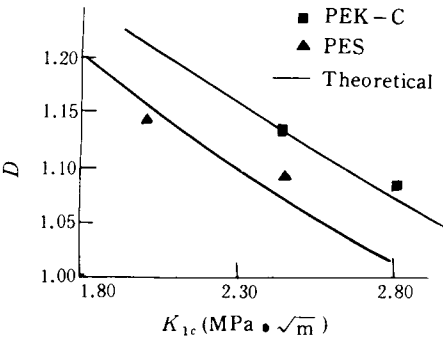


Fig. 2 The experimental and theoretical results of the relationship between the D and K_{Ic} for PEK-C and PES

(如微裂纹等)和韧性损伤(如剪切带等),材料的断裂能主要来自于韧性损伤。材料韧性越高,则韧性损伤的尺度越长,因而断面越光滑,断面分维就越小。

参 考 文 献

- [1] Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., Paullay, A. J., *Nature*, **1984**, 308, 721
- [2] Williford, R. E., *Scripta Metall.*, **1988**, 22, 197
- [3] Pande, C. S., Richards, L. E., Louat, N., Dempsey, B. D., Schwoeble, A. J., *Acta Metall.*, **1987**, 35, 1633
- [4] He, T., Proceedings of the Second National Symposium on Deformation, Damage and Fracture of Polymers, editor, Zhang, G., Ningbo, China, **1992**, 223
- [5] Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, **1982**
- [6] Bai, Y., Xia, M., Ke, F., Lu, C., Ling, Z., *Chinese Phys. Lett.*, **1993**, 10, 155
- [7] Ward, I. M., *Mechanical Properties of Solid Polymers*, 2nd Ed., Wiley Interscience, **1983**
- [8] Mu, Z. Q., Lung, C. W., *J. Phys.*, **1988**, D21, 848

CORRELATION BETWEEN THE FRACTAL DIMENSION OF FRACTURE SURFACES AND FRACTURE TOUGHNESS FOR DUCTILE POLYMER MATERIALS

LYU Suping, QI Zongneng

(State Key Laboratory of Engineering Plastics, Institute of Chemistry, Academia Sinica, Beijing, 100080)

ABSTRACT

An alternative microcrack-shear band chain model for the fracture of polymer materials was proposed. The fractal dimension of the fracture surfaces was derived and correlated with the fracture toughness of the materials. It was demonstrated through this model that the fractal dimension of the fracture surfaces would have an inverse trend with the fracture toughness, which was coincident with the experimental results of some polymer materials.

Key words Fractal, Fracture toughness, Polymer, Alternative chain model