

颗粒填充高分子复合材料拉伸断口的分形模型

Fractal Model of Tensile Fracture for Grain Filled Polymer Composites

梁基照, 吴成宝

(华南理工大学 工业装备与控制工程学院, 广州 510640)

LIANG Ji-zhao, WU Cheng-bao

(School of Industrial Equipment and Control Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

摘要: 基于分形理论构建了颗粒填充高分子复合材料拉伸断口的分形模型, 进而提出了分形维数计算公式。应用公式计算了体积分数为 2% ~ 30% 颗粒填充高分子材料拉伸断口的分形维数, 并分别与相关文献报道的碳酸钙和二氧化钛填充的 ABS 复合材料(CaCO_3/ABS 和 TiO_2/ABS)实测值进行了对比分析。结果表明理论值与实测值较为符合。

关键词: 颗粒填充; 高分子复合材料; 拉伸断口; 分形模型

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)01-0018-03

Abstract: A tensile fracture fractal model of grain filled polymer composites on the base of the fractal theory was established, and an equation of the tensile fracture fractal dimension was proposed. The tensile fracture fractal dimensions of grain filled polymer composites at volume fraction of the grains from 2% to 30% were calculated and the calculations were compared respectively with measuring values of CaCO_3/ABS and TiO_2/ABS composites reported in references. The results showed that the theoretic values and the measuring values were roughly close to each other.

Key words: grain filled; polymer composite; tensile fracture; fractal model

颗粒填充是制备高分子复合材料的常用方法之一。目前, 有关颗粒填充高分子复合材料的流变性能、力学性能的研究已经成为高分子复合材料科学及其成型加工的重要内容^[1-4]。高分子复合材料的力学性能在相当程度上取决于填料与树脂基体之间的界面形态。通过测算断裂面的分形维数来定量描述其断裂面形貌及材料的断裂机理的研究是最近国内外较为活跃

的领域。本工作拟基于分形理论建立颗粒填充高分子复合材料拉伸断口的分形模型, 提出测算其分形维数的理论计算公式, 以便更深入地研究颗粒填充高分子复合材料拉伸断裂机理及其相关性能的表征。

1 分形模型构建

在一定的加工工艺条件下, 填充颗粒有可能随机均匀地分散在基体材料中, 即填充颗粒在基体的存在层次具有统计均匀性^[5]。为此, 本研究假设填

充颗粒在基体材料中的分布是均匀的。同时, 不同的填充颗粒具有不同的形状, 即使是同一种类颗粒, 也可能具有不同的形状, 如: 球状、立方体状、片状、针状等。在工程应用中, 球状颗粒应用较多, 本工作中假设颗粒呈球状, 较接近现实应用。

颗粒填充复合材料在拉伸过程中, 颗粒与基体材料之间的粘合强度通常低于基体材料的抗拉伸强度。因此, 颗粒填充高分子复合材料拉伸载荷下的失效首先表现为基体与颗粒之间的脱粘, 且颗粒与基体之间的脱粘最终发展到颗粒的“赤道圈”; 又因不同颗粒与基体的抗拉伸强度存在一定的差异, 因此, 颗粒填充高分子复合材料拉伸断口凹凸不平、光滑程度很低, 拉伸断口的粗糙度随填充颗粒含量的增加而变化, 断口的形貌存在层次性^[6,7]。

利用迭代法及分形曲面生成方法^[8]构建具有有限层次的颗粒填充高分子复合材料拉伸断口的分形模型。生成方法如下: 它的第 1 个层次结构是将正方形平面(初始层次)分成 $10^2 = 100$ 等分, 即将一定面积的

颗粒填充高分子材料拉伸断口 100 等分, 每个等分的边长为 1 单位, 如图 1 所示。将中间的 $(2k)^2$ (由于 $0 \leq (2k)^2 \leq 100$), 所以 $0 \leq k \leq 5$) 个小正方形改成向上凸起的 $(2k)^2 + 4 \cdot 2k \cdot k$ 个小正方形, 和原来的小正方形形成一个立方体, 根据填充颗粒为球状的假设, 位于初始层次上方的小正方形将被一个小正方形平面和一个以赤道面与之相截的半球体所取代, 如图 2 所示; 第 2 个结构层次是对剩下的 $100 - (2k)^2$ 个小正方形再分别进行上述操作, 如此 n 次操作以后, 原来的平面就形成了具有有限层次相似结构的不均匀地向上凸起

形维数:

$$D_s = \frac{\lg N}{\lg \left(\frac{1}{r} \right)} = 2 + \lg \left(1 + \frac{2 \cdot k^2}{25} \right) \quad (0 \leq k \leq 5) \tag{4}$$

式中: D_s 为拉伸断裂面的分形维数; k 为颗粒体积分数的函数, 反映了填充颗粒的体积含量对拉伸断口形貌及其分形维数的影响。由图 2 可知, 颗粒的体积分数可以表示为:

$$V_g = \frac{(2 \cdot k)^2 \cdot k \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^3}{10^2 \cdot 5 \cdot (1)^3} = \frac{\pi \cdot k^3}{750} \quad (0 \leq k \leq 5) \tag{5}$$

亦即,

$$k = \sqrt[3]{\frac{750 \cdot V_g}{\pi}} \quad (0 \leq k \leq 5) \tag{6}$$

联合式(4)与式(6)且取 π 值为 3.14159, 则可求出不同 k 值时的拉伸断口的分形维数和颗粒体积分数, 如表 1 所示。

表 1 不同 k 值时的 D_s 与 V_g

Table 1 The values of D_s and V_g under different k values						
k	0	1	2	3	4	5
D_s	2.0000	2.0334	2.1205	2.2355	2.3385	2.4771
$V_g / \%$	0.00	0.42	3.35	11.31	26.81	52.36

由表 1 可知, 在本工作假设条件下, 颗粒的最大填充体积分数为 52.36%, 且随颗粒体积分数的增加, 复合材料拉伸断口分形维数相应增加。

为了求出任一颗粒体积分数下, 颗粒填充高分子复合材料的拉伸断口分形维数, 将式(6)代入式(4), 可以得到:

$$D_s = 2 + \lg \left(1 + \frac{2}{25} \left[\frac{750 \cdot V_g}{\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \right) \tag{7}$$

同样, 取 π 值为 3.14159, 则有,

$$D_s = 2 + \lg(1 + 3.07868(V_g)^{\frac{2}{3}}) \tag{8}$$

式(8)即为在假设条件下, 颗粒体积分数与复合材料拉伸断口分形维数的理论关系式, 式中 $0\% \leq V_g \leq 52.36\%$ 。

3 初步验证

刘一华^[5]应用改进的二维变差法测定了 CaCO₃/ABS 颗粒复合材料拉伸断口的分形维数。刘安中等^[11]应用二维变差法测定了 TiO₂/ABS 颗粒复合材料拉伸断口的分形维数, 并研究其静摩擦系数与分形

图 1 所建分形模型初始层次
Fig. 1 Original arrangement of the established fractal model

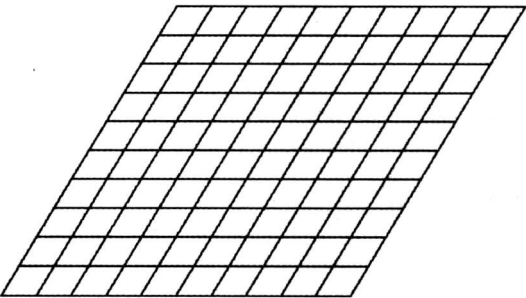
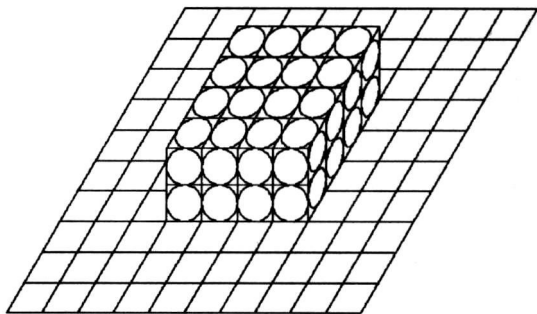


图 2 第 1 结构层次($k=2$)
Fig. 2 The first arrangement($k=2$)



2 分形维数计算

根据分形的定义^[8-10]:

$$N = r^{-D_s} \tag{1}$$

式中: N 为测量值; r 为测量尺码; D_s 为分形维数。

对上述分形模型, 按相似维数的计算方法计算, 有:

$$r = \frac{1}{10} \tag{2}$$

$$N = 10^2 + 4 \cdot 2k \cdot k \tag{3}$$

式中: N 为第 1 结构层次中小正方形的个数。

根据式(1), 可得颗粒填充复合材料拉伸断口的分

维数的关系。

为了验证式(8)的可靠性和工程适用性,应用式(8)对当颗粒体积分数分别为 2%、5%、10%、11%、18%、20%、30% 共 7 种情况时 TiO₂/ABS 颗粒复合材料的拉伸断口分形维数进行了理论计算,并将数据与

文献[5]和[11]中发表的实测值进行了对比分析,结果如表 2 所示。其中,填料体积分数分别为 2%、11%、18% 条件下的拉伸断口分形维数实测值源自文献[5],填料体积分数分别为 5%、10%、20%、30% 条件下的实测值源自文献[11]。

表 2 CaCO₃/ABS 及 TiO₂/ABS 复合材料拉伸断口分形维数理论值与实测值
Table 2 Theoretical and measuring values of fractal dimensions of tensile fracture of
CaCO₃/ABS composites and TiO₂/ABS composites

$V_g / \%$	2	5	10	11	18	20	30
Theoretic value by Eq. (8)	2.089	2.152	2.222	2.232	2.296	2.312	2.376
Measuring value from reference[5] and [11]	2.217	2.295	2.348	2.327	2.446	2.421	2.532
Relative error/ %	5.77	6.23	5.36	4.08	6.13	4.50	6.16

由表 2 中可以发现:分形维数的理论值较实测值小,且最大误差为 6.23%,最小误差为 4.08%。误差主要是因为模型构建时,假设拉伸断裂是由于颗粒与基体材料的脱粘造成的,基体之间的脱粘为镜面脱粘。而实际上,任何基体材料的拉伸断口都存在一定层次的相似性,亦即其拉伸断口的分形维数不为 2,而是一个稍大于 2 的数。根据上述对比分析结果可以推断,本研究中构建的颗粒填充高分子复合材料的拉伸断口分形模型及其提出的理论计算公式是合理的,在工程应用中具有一定的实际意义。

4 结论

- (1) 按照分形表面生成模式,构建了颗粒填充高分子复合材料拉伸断口的分形模型,得出了拉伸断口的分形维数与颗粒体积分数的理论关系式。
- (2) 拉伸断口分形维数的理论值与相关文献的实测值的相对误差在 4.08% 之 6.23% 之间,故式(8)具有一定的实际意义。

参考文献

[1] LEE Y K, LEE B H, CHOE S. Tensile property and interfacial dewetting in the calcite filled HDPE, LDPE, and LLDPE composites [J]. Polymer, 2002, 43(25): 6901- 6909.
[2] LIANG J Z, LI R K Y. Brittle ductile transition in polypropylene filled with glass beads [J]. Polymer, 1999, 40(11): 3191- 3195.

[3] LIANG J Z. The melt elastic behaviour of polypropylene/ glass bead composites in capillary flow [J]. Polymer Testing, 2002, 21 (8): 927- 931.
[4] 徐涛,雷华,于杰,等.滑石粉填充 PP 材料中颗粒分布分形特征及其与冲击性能的关系[J].高分子材料科学与工程,2002,18(1): 135- 139.
[5] 刘一华,刘安中,吴国璋.颗粒复合材料拉伸断口表面的分形模型[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1995,18(1): 48- 51.
[6] LIANG J Z, LI R K Y. Mechanical properties and morphology of glass bead filled polypropylene composites [J]. Polymer Composites, 1998, 19(16): 698- 703.
[7] LIANG J Z, LI R K Y, TJONG S C. Tensile properties and morphology of PP/EPDM/ glass bead ternary composite [J]. Polymer Composites, 1999, 20(3): 413- 422.
[8] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W H Freeman, 1983.
[9] 褚武扬.材料科学中的分形[M].北京:化学工业出版社,2004.
[10] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995.
[11] 刘安中,刘一华,王炯华.TiO₂/ABS 颗粒复合材料拉伸断口的静摩擦系数与其分形维数关系的研究[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2003,11(1): 69- 71.

收稿日期: 2007-08-14; 修订日期: 2007-11-15
作者简介: 梁基照(1953—),男,博士,教授,主要从事聚合物材料及加工成型方面的研究,联系地址:广州市天河区五山路 381 号华南理工大学工控学院(510640)。E-mail: scutjzl@sohu.com