第9卷 第4期 复合材料学报 Vol.9 No.4
1992年 10月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1992

微机模拟法研究纤维增强金属基复合材料拉伸断裂过程

李道明 赵占国 姚 枚

哈尔滨工业大学(哈尔滨150006)

摘要 本研究在统计分析及材料断裂力学分析的基础上，建立了长纤维增强金属基复合材料板材拉伸断裂过程的微计算机模拟方法。用该方法得到的模拟结果与已有实测结果吻合良好，从而初步证实了分析模型及其模拟程序系统的有效性。

关键词 单向长纤维，金属基，断裂，统计分析，计算机模拟

1 前言

考察金属基复合材料（以下简称MMC）研究中力学性能测试现状可以发现，由于复合材料制品在我国基本上还处于实验室水平，尚未商品化，因此制样成本昂贵，导致实际力性测试中要么试样很少，数据缺乏统计性；要么大幅度增加研究投资。而MMC的结构特点决定了它至少在细观上（而不是微观上）已不具备统计均匀性，这就要求其力性测试重复度高，密集性强。因此迫切需要寻求一种成本低、效率高特别是数据统计性强的辅助研究方法。计算机模拟方法就是其中之一。由于MMC结构与金属材料有较大差异，沿用金属材料的分析方法，如“等代法”等，来研究MMC力学行为就显得很不适应[1]。近年来的研究表明，统计分析方法对MMC力性分析极其有效，且其相关理论正在形成[2]。而现代计算机技术则为统计方法所涉及的巨大计算量的实施开辟了方便途径。用计算机模拟MMC断裂行为的研究目前正在个别发达国家开始起步[3]，其分析模型还处于初级阶段，有待深化。鉴于此，本研究立足于统计理论与断裂力学的相互作用，建立相应的分析模型，在此基础上设计模拟程序，对某一典型MMC板材拉伸断裂过程进行了上机模拟试验，并用已有实测结果对照验证。

2 分析模型概述

2.1 纤维强度分布律

本文1990年5月收到，国家自然科学基金助项目

MMC中的增强纤维，如硼、碳纤维等，具有很高的强度，其断裂形式一般为脆断，且其极限强度具有显著分散性特征，因此存在一个按概率分布的问题。事实证明，表征这类纤维极限强度分散性以韦布尔（Weibull）分布函数较为理想，通常采用简化的二参数Weibull概率密度f(x)表达式：

$$f(x)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \tag{1}$$

其中α为形状参数，β为尺寸参数；使用时纤维极限强度值可用自变量x代替。按这种概率分布，长纤维的极限强度应是其长度l的函数，故为应用Weibull理论，并考虑到数值分析的方便，可将一根纤维分成若干单元来研究。这就是说，在模拟之前，先从拉伸试样中取出一块，将其分成$M_1\times M_2$（行数×列数）个单元（图1），每个单元由一段纤维和其周围的基体构成。这样，各单元的极限强度值就由Weibull分布函数来确定，而式（1）中的参数α、β值可由实验值用最小二乘法确定。图2示出一种实测的硼纤维强度概率分布图[4]和按Weibull分布函数作出的曲线的对比，可见实验值与分析结果较好地吻合。

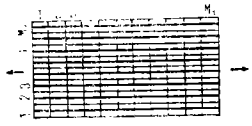


图1 MMC模拟试样单元分割示意(粗线为纤维)

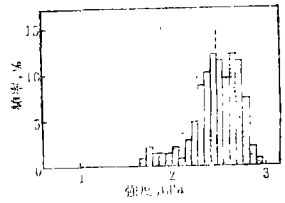


图2 一种硼纤维[4]强度分布(直方图)与Weibull分布(点线)拟合情况

2.2 统计试验的实现

模拟试验时，对图1所示试样中的每一个单元需赋以具体的强度值，并且这一过程是随机的，因此需要找到一种随机模拟或统计试验方法。蒙特卡罗（Monte Carlo）方法[5]就提供了这样一种模拟技术，它不是象通常的数理统计方法那样通过真实的试验来完成的，而是根据事物的概率，利用数学方法来进行的一种数字模拟试验。当这种试验次数充分大时，即可得到欲求参量的统计信息。当然，电子计算机技术可以保证这种大试验量的实施。为了得到上述随机的且符合Weibull分布的强度值，首先用乘同余法[5]产生〔0，1〕上的伪随机数，这是因为伪随机数可以重复实现，以便于对结果进行校验；而〔0，1〕上的分布值是最重要的随机数，有了它即可经变换得到其它区间上的随机数。这种伪随机数产生后，即可通过求Weibull分布函数的反函数来得到符合要求的随机变量——各单元上的强度值。最后应用Monte Carlo模拟技术将符合Weibull分布的强度值随机地赋给图1所示试样的每一单元，在材料原始参数确定的条件下，即可用计算机模拟拉伸过程（模拟过程见后述），直至试样断裂，得到断裂形貌及断裂强度。然后按上述方法重新给每一单元赋强度值，模拟拉伸过程。这一过程重复多次，即可得到该条件下断裂形貌及拉伸强度的统计信息。

3 模拟程序设计思想

通过分析复合材料实际断裂过程并结合以上统计分析，即可进行计算机模拟程序的设计。图3给出程序框图的主体部分，该程序设计的主要思路可概述如下。

首先，输入MMC的基本力学参量，如弹性模量、纤维直径等等；其次，划分单元大小，

取单元长度δ为l/M_1，其中l为模拟试样长度。接着，按Monte Carlo方法将符合Weibull分布的强度值$S(i, j)$随机地赋给位置为(i, j)的单元，对每个单元赋值完毕后，即可加载拉伸。在某一拉伸载荷（通常用输入应变ε表示）下，比较名义应力与单元强度值，若外力达到某单元强度$S(i, j)$，则认为该单元断裂，并取其强度值为零。实际纤维上的强度值只在断裂点为零，尔后随距断裂点距离的增大，其上承受的正应力逐渐增大到平均应力$\bar{\sigma}$；而模拟试验时只能按离散模型进行，即一个单元取一个强度值。若设距断裂点x_n处正应力值达到$\bar{\sigma}$，则定x_n为无效长度：

$$x_n=\left(n-\frac{1}{2}\right)l_c/(2n) \tag{2}$$

式中l_c为纤维能起增强作用的临界长度[6]；n的意义为$n=l/l_c$。作为离散模型，可近似地认为处于无效长度x_n范围内的单元不承担载荷，称为无效单元。检查某行i的断裂单元总数n_i'时应包括无效单元。同时，由剪切滞后分析法[7]（其计算过程较繁，此处从略）可估算某断裂单元附近的应力集中系数K_1；另一方面，外载较大时，n_i'值较大，由统计分析可知，在一模截面上只有(M_2-n_i)个单元承载时，应力集中系数$K_2=M_2/(M_2-n_i')$，其中M_2为试样横截面承载单元数的最大值。比较K_1，K_2，取较大者为有效应力集中系数K_k，这就是说，发现某一单元断裂后，不仅需按式(2)计算无效长度并相应确定无效单元数目及位置，而且还需计算断裂纤维附近的的应力集中，并随之确定出受应力集中影响的单元数目及位置，同时将应力集中引起的增值迭加到所波及单元的应力值上；然后在同一外应力水平下重复上述"搜寻"断裂单元的过程，直到在该应力水平下未再发现断裂单元为止，接着进行判断：试样是否整体断裂？若未产生整体断裂，则继续加载重复以上模拟拉伸过程。试样整体断裂判据为：断裂单元以及拔出纤维之单元相互连接，总数达到M_2。其中i值可以不同，纤维拔出或界面开裂长度应处于纤维临界长度l_c一半的范围内。

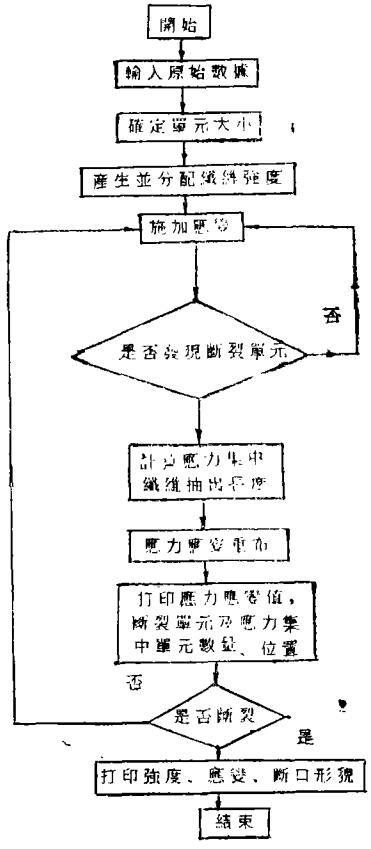


图3　MMC拉伸断裂过程模拟程序（主体）框图

4　模拟结果与验证

如前所述，在模拟程序运行起始就需要输入材料的基本力学参量，也就是说首先须确定具体试验材料。Herring等人[4]通过实测试验详细地研究了某种硼纤维增强铝基复合材料的拉伸断裂过程，且实测了纤维的强度分布。因其数据系统详尽，故本研究中采用了其实测结果作为验证素材。于是，取其原始数据：硼纤维正弹

```
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000*000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
```

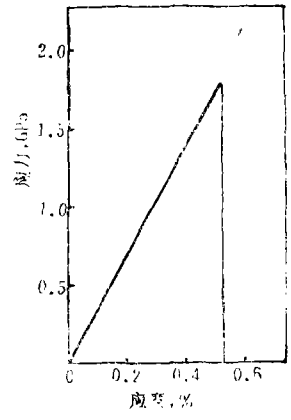
(a)

```
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
```

(b)

```
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
00000000*0*0*****00000000
000000000*000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
000000000000000000000000
```

(c)



(d)

图 4 某一MMC板材试样模拟拉伸断裂过程形貌部分打印结果：(a)ε=0.46%，(b)－(c)ε=0.52%；以及纤维应力应变曲线(d)

性模量$E_f=380$ GPa，基体铝剪切弹性模量$G_m=26.5$GPa,其剪切屈服强度$\tau_{ym}=150$MPa，纤维直径$d_f=1.42\times10^{-4}$m，间距$S_p=1.27\times10^{-4}$m；并设定模拟试样长$l=1.25\times10^{-2}$m，试样中纤维（列数）$M_2=25$，每根纤维所分单元数（行数）$M_1=25$。以这些初始值为输入数据按前述程序（主体框图见图3）在IBM-PC微机上进行了模拟拉伸试验。图4给出一模拟试样拉伸断裂过程最后阶段的一组断裂形貌打印结果及纤维的应力应变曲线。在该形貌图中，每个单元用一个打印符表示，其中圆角方块代表完整（未断）单元，星号代表断裂单元。由图可见，在某一输入应变值（$\varepsilon=0.46\%$）下开始出现断裂单元（图4a），尔后输入一个很小的应变增量（$\Delta\varepsilon=0.06\%$）便使断裂单元数目猛增，并形成主裂缝，在同一应变值下连续扩展直至试样整体断裂（图4b-c），断口平整，即发生所谓的非累积型断裂。从Herring等人[4]拍摄的断口形貌x射线照片（从略）可计算出其断口上断裂纤维的凸凹度(峰谷间距最大值表示）为0.23mm，约为本研究中单元长度（0.5mm）的一半，同时，未观察到纤维拔出现象。这说明模拟试验中以单元长度为基本单位得出的断裂形貌与实测结果是一致的。其次，由模拟结果还可看出，最终断裂位置并不一定发生在首批断裂单元即裂缝最初萌生处，但随着外载的增大，在主裂缝扩展的同时，起初形成的次裂缝也有所扩展，这可能是其周围应力场改变的结果。模拟试验中试样断裂时纤维的平均强度值（图4d,$\bar{\sigma}_{cf}=1.73$ GPa）也与实测值[4]（$\bar{\sigma}_{cf}=1.68$GPa）很接近。

5 结　论

上述模拟试验结果与实测结果的吻合，初步证实了本研究中所建立的理论分析模型及其模拟程序软件是可行的。同时，鉴于此处所涉及研究对象的典型性，用计算机模拟MMC断裂过程的研究还有待拓宽。

参 考 文 献

1 李家驹.机械工程材料.1983，7(1)：19

2 Zhu Y T.J Composite Materials. 1983，23：280

3 Ochiai S et al. Metall Trans. 1988，19A：1491

4 Herring H W et al. Metall Trans. 1973.4：807

5 徐钟济编.蒙特卡罗方法.上海科技出版社，1985

6 赵占国.硕士学位论文，哈尔滨工业大学，1990

7 Zweben C. Eng Fract Mech.1974. 6：1

A COMPUTER-SIMULATION STUDY ON TENSILE FRACTURE PROCESS IN A UNIDIRECTIONAL FILAMENTARY METAL-MATRIX COMPOSITE

Li Daoming Zhao Zhanguo Yao Mei

(Dept.of Metals and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, P.R.China)

Abstract The mechanical property test on a metal-matrix composite (MMC) requires a high degree of statistical reliability in its experimental data due to the structural peculiarity of the material, hence a great number of specimens. This requirement, on the other hand, implies a high cost for the test considering the cmplexity in fabricating the material. It is, consequently, desirable that an economical method should be found to analyse and evaluate the mechanical properties, especially the fracture behavior, of MMC.

Computer-simulation, as such an answer, was used in the present investigation to probe the fracture process of a unidirectional fibre-reinforced MMC in tension of a two-dimensional sheet with tensile axis parallel to the fibres. The key stage of the simulation was to establish an analytical model on which the computer program was based. The model combined fracture mechanics with statistics. It mainly consisted of the distribution of a fibre's ultimate strength, the statistical sequence for simulation and the stress intensification ahead of a broken fibre. Weibull's Distribution Function of probability was found to be a valid function in demonstrating the scattering character of the fibre's ultimate strength. And, Monte Carlo's Statistical Testing Method was utilized and extended to generate a stochastic sequence for distributing the strength value and forming the simulation sequence.

On the basis of the above model, a microcomputer program was accomplished to simulate the fracture process. The underlying principle of the program can be outlined as follows: divide the specimen into MxN units, i. e. , N unidirectional fibres, each with M links; assuming the Weibull distribution, generate strength values; allot the values among the fibres following the Monte Carlo testing sequence; for a given load (strain), compare the load with a fibre's (unit's) strength to decide whether the fibre fractures; in the case of fracture of any fibre, calculate the stress intensification factor

around the fibre; regulate the stress field and check for fractured fibres again; increase load (strain) level and repeat the process "searching" for fracture of fibres until gross fracture of the specimen occurs. The gross fracture refers to a condition in which N fractured units can coalesce one another in that the longitudinal distance between any two adjacent units is within half of the critical length for reinforement.

The simulation test was conducted in an IBM-PC microcomputer. The result shows that both the stress at fracture and the fracture morphology (judged by roughness) were well in accordance with the practically measured data for a boron/aluminum composite. Therefore, the analytical model as well as the computer program built on it is effective in analysing the tensile fracture behavior of fibre-reinforced MMC under the condition of the present study. Further studies, however, is needed to extend the applicable field of the method.

Key words unidirectional fibre-reinforcement, metal-matrix, tensile fracture, statistical analysis, computer-simulation

（上接第38页）

而研制的，实用评价试验则装在以前已有的Conway发动机上进行。以CFRP叶片换下20台发动机的金属叶片，在BOAC公司的协助下进行飞行试验，并于1968年取得型式认可。随后在V10-机三台发动机中之一台上安装CFRP叶片，并就航于非洲航线。通过该试验得知，CFRP叶片受雨滴及砂尘的冲刷显著，在叶片前缘贴SUS薄板，很快解决了问题。其后发生的问题是，当风扇叶片在飞行中受到鸟那样大的物体的冲击时，比想象的要容易发生损伤。该问题与CFRP的本质密切相关，关系到下述脆性问题。

3. 脆性——CFRP的弱点

由应力-应变曲线可知，CFRP加上拉伸载荷并不屈服，而是在延伸率达到1%左右时发生脆性破坏。

对CFRP风扇叶片进行了冲击试验，从气炮中打出胶冻以代替鸟撞去撞击叶片。偶然有机会见到试验后的试件，受冲击载荷作用后的叶片尽管正面全无损伤，但背面的纤维则发生拉伸断裂，并发生劈裂。该现象与厚板落球冲击载荷的情况非常相似，这一直是个人们重视的问题。该叶片采取了防止层间剥离的措施，以大约30mm的间隔，贯通正反面打上钛制铆钉，进行三元增强。除金属铆钉以外，也曾试用"Kevlar"纤维进行缝合而进行层间强化，但据说三元增强对改善耐冲击性并无效果。Rolls Royce公司的J. Johnson提出，考虑到受冲击时背面面板的变形超过纤维的拉伸断裂延伸率，所以高延伸率碳纤维的开发是风扇叶片成功的关键。现在制造的RB211发动机的风扇叶片是钛合金制造的空心叶片，CFRP则改变当初的意图，用于发动机壳体，期望减轻重量。

4. 剪切强度——树脂的性质及碳纤维的表面处理

CFRP的基体树脂，自当初开发时起就一直采用环氧树脂。一般通过预浸进行成型，对