

微型计算机在复合材料强度 准则研究中的应用*

李 实 谢仁华

(材料科学与应用化学系)

摘 要 文中论述了运用微型计算机(IBM-PC)进行复合材料强度准则研究的方法,包括强度包络线绘制、双向加载数据采集及实验数据处理等,同时还研究了如何确定双向试验中的破坏载荷值,并在分析实例中提供了较详细的数据。

关键词 微型计算机, 复合材料强度, 强度包络线, 联机应用, 数据采集, 双向加载试验
分类号 TP36, TP399

引 言

随着复合材料在尖端科技和国民经济各部门中用量的增加,对其行为规律准确描述的迫切性也越来越显著。复合材料强度准则(判据)的研究一直是最活跃的课题。从40年代复合材料诞生至今短短几十年内,各国学者先后提出的较有影响的强度准则就有20多个^{[1][2][3]}。实践表明,这20多个强度准则都只能在一定范围内和实际相符。但工程应用往往需要准确预测复合材料构件的承载能力,这就需要确定在什么情况下运用哪一种强度准则最合适。工程设计者常常为这一难题所困惑,这是因为:要对作为各向异性体典型代表的复合材料的强度准则进行验证,不仅计算量和实验量都很大,而且实验中还有许多技术问题难以解决;人们常常只得根据经验来确定自己使用哪个准则,但究竟是否最为合适,仍不得而知。因此,将这众多的强度准则进行系统整理,并摸索出较为简便易行的挑选强度准则的办法,将是一件有意义的工作。为了这一目的,我们运用微型计算机对复合材料强度准则进行了系统的整理和实验研究,取得了令人满意的效果。

1 绘制强度包络线^[3]

以数学形式表示的强度准则,一般物理意义不太直观。因此,在实验研究或工程应用中常用绘制包络线的方法,将强度准则由较为抽象的数学形式变为直观的曲线形式。

对于纤维增强复合材料单向板(层),以线弹性应力-应变理论和复合材料层合板

理论为基础的张量准则 (Tsai—Wu 准则) 具有如下形式 (仅考虑平面应力状态: 双向拉压):

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 = 1 \quad (1)$$

其中, F_{11} 、 F_{22} 、 F_{12} 、 F_1 、 F_2 为强度参数, 下标 1、2 分别表示正交异性的两个主方向。

由材料强度的有界性, 得到:

$$-\sqrt{F_{11}F_{22}} < F_{12} < \sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (2)$$

此时式 (1) 所对应的包络线为一椭圆。经过较复杂的数学推导, 我们得到包络线的有关特征量如下:

$$\text{椭圆中心} \quad \left(\frac{-F_{12}F_2 + F_{22}F_1}{2(F_{12}^2 - F_{11}F_{22})}, \frac{F_{12}F_1 - F_{11}F_2}{2(F_{12}^2 - F_{11}F_{22})} \right) \quad (3)$$

$$\text{椭圆长轴与 } \sigma_1 \text{ 轴的夹角 } \theta = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \left(\frac{2F_{12}}{F_{11} - F_{22}} \right)$$

椭圆的长短半轴

$$a_1 = \sqrt{\frac{4(F_{11}F_{22} - F_{12}^2) + F_1^2F_{22} - 2F_1F_2F_{12} + F_2^2F_{11}}{2(F_{11}F_{22} - F_{12}^2)(F_{11} + F_{22} - \sqrt{(F_{11} - F_{22})^2 + 4F_{12}^2})}}$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{4(F_{11}F_{22} - F_{12}^2) + F_1^2F_{22} - 2F_1F_2F_{12} + F_2^2F_{11}}{2(F_{11}F_{22} - F_{12}^2)(F_{11} + F_{22} + \sqrt{(F_{11} - F_{22})^2 + 4F_{12}^2})}} \quad (4)$$

以 T300/5208 石墨/环氧复合材料为例, 由计算机绘制的 Tsai—Wu 准则对 $[0/90]_s$ 层合板的包络线如图 1。

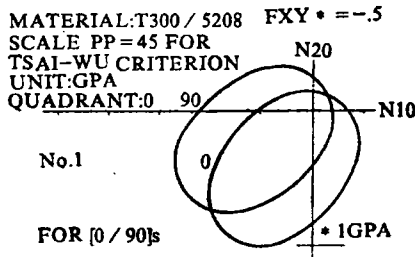


图 1 T300/5208 材料 $[0/90]_s$ 板在 0° 层和 90° 层的强度包络线

我们可以按照同样的办法绘出其他准则的强度包络线。给出包络线之后, 就可以直接将材料所受的应力状态标于相应的包络线上, 以判断材料是否安全, 安全程度有多大等, 也可以将材料在复杂应力状态下破坏的强度数据标于各种包络线图上, 以判断在该种应力状态下使用何种强度准则最为合适, 从而判定了强度准则的使用范围, 这将为强度准则的实验研究和工程应用带来极大的方便。

2 实验研究

检验某个强度准则是否正确, 最有说服力的方法是通过实验让复合材料在复杂应力状态下的破坏结果与准则的理论预测值作出比较。单向板的偏轴试验可以产生复杂的双

向应力状态，但其双向应力值不能任意调节，这就限制了用偏轴试验检验强度准则的范围，为了能够通过实验得到任意比例的应力组合，国防科技大学复合材料教研室成功地研制出了双向加载夹具，它可以对平板试体产生任意比例的拉一压、拉一剪及压一剪的复杂应力状态，还可以对管状试件进行轴一内压和轴一外压试验，即实现在正轴应力状态下四个象限内的任意比例的应力状态。但是，以往的研究中，由于没有应用计算机测试以调节控制，以至出现两大弊端：一是当压力较小时，表盘不能准确显示液压数值；二是试验机仪表盘不能准确标出试验破坏瞬时的载荷值。

我们将微型计算机与双向应力试验装置联机，初步解决了上述问题。联机系统示意图见图 2。

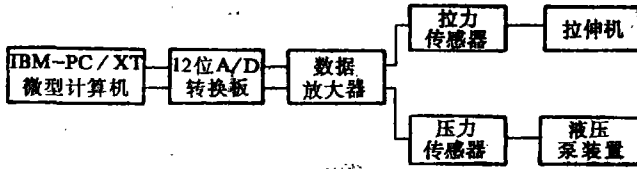


图 2 联机装置示意图

双向载荷大小分别由两个传感器转变为电信号，输送至数据通道放大器，放大到模/数(A/D)转换板所能接受的范围后，由计算机记录载荷的读数值。在整个系统中，当传感器、放大器和转换板都具有较好的线性时，整个系统的精度将是令人满意的。通过试验前的标定找出这个比值，经适当换算，就可以在屏幕上显示或由打印机打印出载荷大小，且能够记录载荷变化的过程。

在实验中，我们所编程序初步实现了下列功能：

- 1) 在屏幕上显示加载路径；
- 2) 根据需要随时打印双向载荷的采集值；
- 3) 判断试件的破坏而自动停止数据采集，也可由外界键入命令方式停止采集；
- 4) 贮存加载路径的图形，并可重新显示或打印。

关于通过软件对破坏进行自动判断，在实验中我们发现，对管状件的轴一内压试验，以轴载在相邻两个采集值之间突然下降2000N为判据，和实验符合很好。

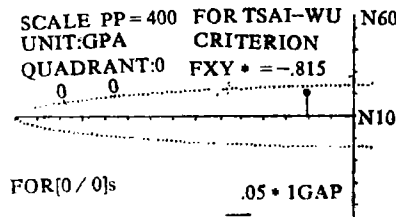


图 3 计算机数据采集结果
包络线；——加载路径；· 破坏点

数据采集的停止，在我们的实验中是通过软件对出现破坏状态的自行判断和外部键入命令相结合的方式而完成的。数据采集停止后，计算机分别计算出双向载荷中出现的最

大值, 并打印出各最大值出现前后的载荷变化情况。我们发现, 通常最大值在双向并不是同时出现的, 有时会有冲击现象, 这些都由计算机记录与显示, 用肉眼是难以观察到的。如我们对 $[0_4]$ 玻璃纤维/环氧复合材料板进行加载(拉剪)试验, 直至材料失效, 计算机将采集到的数据进行整理, 分别打印出拉伸试验机和液压泵装置施加最大载荷前后的载荷变化情况, 据此可分析加载过程是否平稳, 双向载荷最大值是否同时出现等情况。为了便于与相应的表头读数比较, 我们让计算机的输出单位与表头单位相同。表1中左栏为拉伸机加载值, 单位为 Kgf/cm^2 ; 右栏为液压泵载荷值, 单位为大气压。前者对平板试件产生压缩载荷, 后者产生平面剪切。试件大小及加载装置详见文献[4]。

表1 双向载荷最大值出现前后载荷情况

拉伸机载荷(Kgf/cm^2)	液压泵载荷(atm)
ADS 1 (778) = 692.1053	ADS 7 (778) = 6.282051
ADS 1 (777) = 694.7368	ADS 7 (777) = 6.282051
ADS 1 (776) = 702.6316	ADS 7 (776) = 6.410257
ADS 1 (765) = 707.8948	ADS 7 (775) = 6.410257
ADS 1 (764) = 715.7895	ADS 7 (774) = 6.410257
ADS 1 (763) = 715.7895	ADS 7 (773) = 6.282051
ADS 1 (762) = 705.2632	ADS 7 (772) = 6.410257
ADS 1 (771) = 700	ADS 7 (771) = 6.282051
ADS 1 (770) = 705.2632	ADS 7 (770) = 6.282051
ADS 1 (769) = 713.1579	ADS 7 (769) = 6.410257
ADS 1 (768) = 723.6842	ADS 7 (768) = 6.410257
ADS 1 (767) = 721.0526	ADS 7 (767) = 6.410257
ADS 1 (766) = 707.8948	ADS 7 (766) = 6.410257
ADS 1 (765) = 705.2632	ADS 7 (765) = 6.282051
ADS 1 (764) = 710.5263	ADS 7 (764) = 6.282051
ADS 1 (763) = 710.5263	ADS 7 (763) = 6.282051
ADS 1 (762) = 718.4211	ADS 7 (762) = 6.282051
ADS 1 (761) = 718.4211	ADS 7 (761) = 6.282051
ADS 1 (760) = 707.8948	ADS 7 (760) = 6.282051
ADS 1 (759) = 705.2632	ADS 7 (759) = 6.282051
ADS 1 (758) = 707.8948	ADS 7 (758) = 6.282051
ADS 1 (1111) = 505.2532	ADS 7 (1111) = 6.538461
ADS 1 (1110) = 505.2632	ADS 7 (1110) = 6.410257
ADS 1 (1109) = 507.8948	ADS 7 (1109) = 6.538461
ADS 1 (1108) = 513.1579	ADS 7 (1108) = 6.410257
ADS 1 (1107) = 515.7895	ADS 7 (1107) = 6.538461
ADS 1 (1106) = 521.0527	ADS 7 (1106) = 6.538461
ADS 1 (1105) = 518.4211	ADS 7 (1105) = 6.538461
ADS 1 (1104) = 510.5263	ADS 7 (1104) = 6.538461
ADS 1 (1103) = 507.8948	ADS 7 (1103) = 6.538461
ADS 1 (1102) = 510.5263	ADS 7 (1102) = 6.538461
ADS 1 (1101) = 515.7895	ADS 7 (1101) = 6.666667
ADS 1 (1100) = 518.4211	ADS 7 (1100) = 6.666667
ADS 1 (1099) = 526.3158	ADS 7 (1099) = 6.538461
ADS 1 (1098) = 531.579	ADS 7 (1098) = 6.538461
ADS 1 (1097) = 523.5842	ADS 7 (1097) = 6.666667
ADS 1 (1096) = 518.4211	ADS 7 (1096) = 6.538461
ADS 1 (1095) = 521.0527	ADS 7 (1095) = 6.538461
ADS 1 (1094) = 526.3158	ADS 7 (1094) = 6.538461
ADS 1 (1093) = 534.2105	ADS 7 (1093) = 6.538461
ADS 1 (1092) = 542.1053	ADS 7 (1092) = 6.538461
ADS 1 (1091) = 531.579	ADS 7 (1091) = 6.538461

表中括号内的数码为依次采集到的数据序号。

若不是通过计算机采集而是由拉伸机和液压泵表头读数来判断破坏载荷, 则只能同时取双向载荷的最大值作为破坏点(因为, 拉伸试验机表头指针总是停留在加载过程中的最大值处)。而我们表1看到, 两个最大值并不同时出现, 以“*”号标明各向载荷最大值出现时双向载荷的情况。实验结果表明, 方框内的一组数据才为实际破坏点。

这说明,同时取双向的最大载荷作为破坏载荷值是不准确的,如果不是用计算机进行数据采集,将难以发现这种不合理性。计算机帮助我们提高了试验读数的准确性,可见,它对复合材料强度理论的研究具有很大的现实意义。

3 强度准则的挑选与验证

要在众多的强度准则中挑选出适合所研究的某一类型材料及载荷状态的准则,必须将各准则的预测值与实验值作比较,才能得出结论;同时,要提出新的准则也必须以实验数据为基础,由大量的试验来验证。

众多的强度准则都是在一定的实验基础上提出的,它们分别适用于不同材料在特定受力状态下的破坏判断。从实用意义来说,有必要对于某种材料及受力状态,挑选恰当的准则描述材料破坏。为此,我们搜集整理了有关复合材料强度准则的文献资料^[5],在计算机上绘出了对应的包络线图(见附录图1~图4),贮存起来,形成“图形文件”;同时,我们也将实验得到的破坏点数据存起来,建立一个“数据文件”。至此,可以让计算机这样工作:先从“图形文件”中取出某个准则的包络线图,然后从“数据文件”中取出相应的破坏实测值,描绘于包络线上,再根据实际要求的精确程度,及对实际物体的安全性考虑,给出对该强度准则的评价,并决定这个强度准则是否能够采用。

比如,由 $[0_x]$ 玻璃纤维/环氧层合板的双向实验结果,得到图4(圆点);对 $[0/90]_s$ 层合板进行双向试验,得到图5(圆点)。

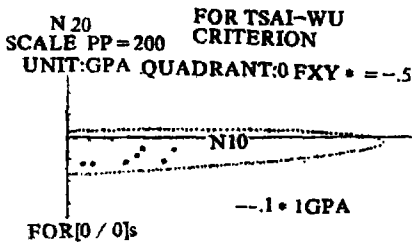


图4 玻璃纤维/环氧单向板的Tsai-Wu准则强度包络线与双向破坏应力的实测值对比

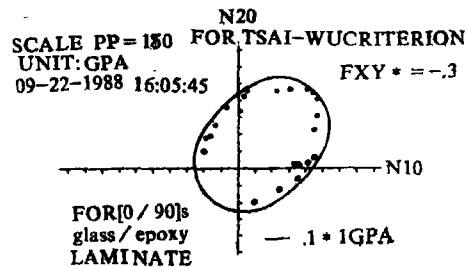


图5 将 $[0/90]_s$ 视为一整体时Tsai-Wu强度准则包络线与实验值

很明显,我们将试验点与强度准则包络线比较,从图中可以得到这样的结论:对于单向板, Tsai-Wu准则在第一象限与实际符合较好(对应于拉-拉载荷);而在第四象限(对应于拉-压载荷), Tsai-Wu准则预测结果偏高,需进行适当修正;而对 $[0/90]_s$ 层合板,将该板视为一个整体运用 Tsai-Wu 准则是适用的,理论和实际符合较好。

4 结论

计算机对于复合材料力学的研究是一个有力的工具,这不仅是因为数据多,计算复杂,而且重复计算部分占相当大的比重,即使使用最高级的计算器也较费事且易出错。Stephen W. Tsai (蔡为仑)在他的新著《Composites Design 1986》^[6]中曾多次强

调复合材料力学研究中计算机应用的迫切性和重要性。我们通过自己的研究也体会到, 运用微型计算机进行复合材料强度研究, 实用性强, 且得到的数据可靠, 值得采用和推广。

感谢唐羽章副教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] Rowlands R E. Strength(Failure)Theories and Their Experimental Correlation, Handbook of Composites, NORTH-HOLLAND-AMSTERDAM·NEW YORK·OXFORD, 1985,3: 85~105
- [2] 王兴业. 关于CM在双轴应力状态下的强度准则的研究. 玻璃钢/复合材料, 1985,1:35~40
- [3] 李实. 复合材料强度理论研究. 国防科技大学学士论文, 1987,1~20
- [4] 王兴业. 复合材料张量多项式准则的实验研究. 复合材料学报, 1986,3(2):54~63
- [5] 李实, 王兴业. 复合材料强度理论研究最新进展. 国防科技大学研究生学报, 1988, 1: 61~68
- [6] Tsai S W. Composites Design-1986. United States Air Force Materials Laboratory, Preface to the 1986: 1~6

Personal Computers in Study of Composite Material Strength

Li Shi Xie Renhua

Abstract

A microcomputer was used as an advanced tool in the study of composite material strength criterion, including the drawing of the strength enveloping lines, data acquisition in bilateral loading tests and test data processing. It also studied how to decide the cracking loads of the bilateral test. A detailed data table is provided for an analytic example.

key words: micro computer, composite materials strength, strength enveloping line, on-line application, data acquisition, bilateral loading

附录

几种典型的强度准则包络线图

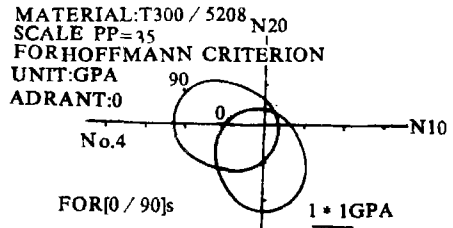
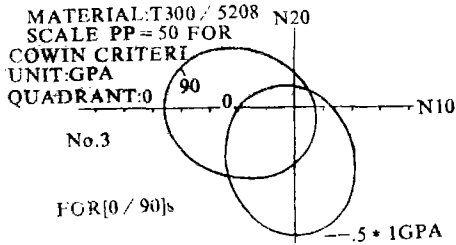
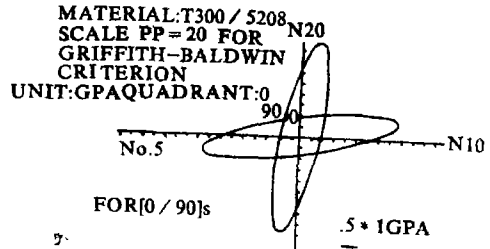
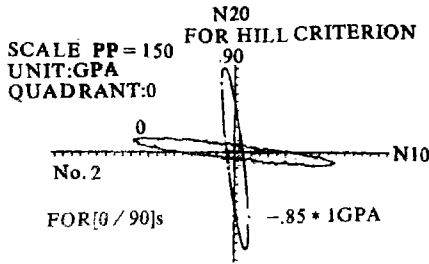
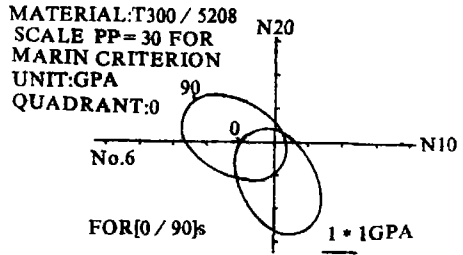
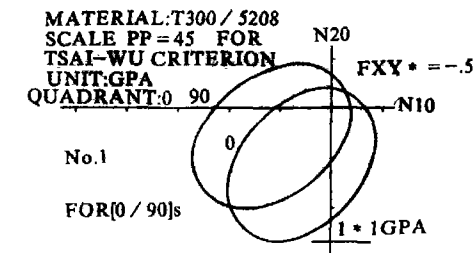


图 1

图 2

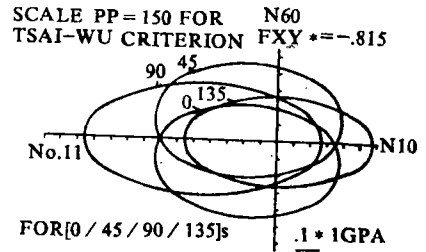
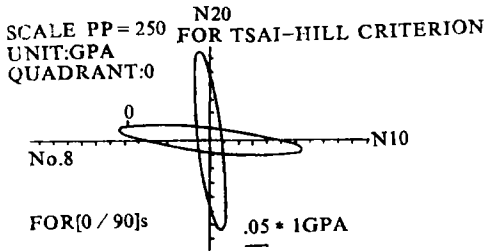
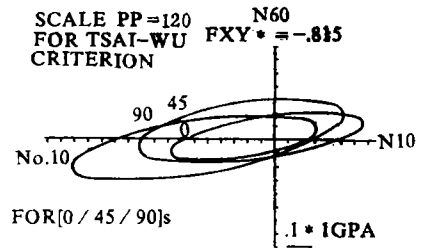
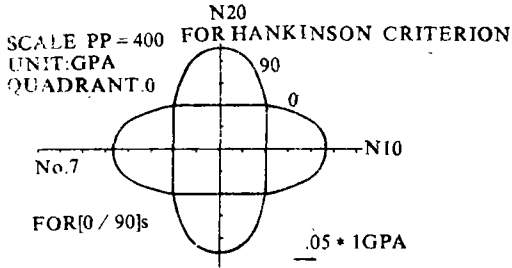


图 4

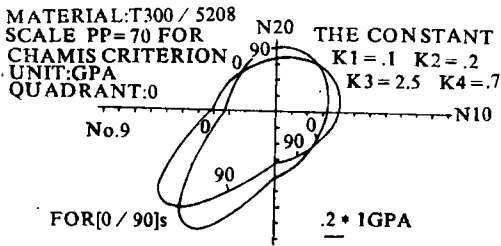


图 3