

单丝复合体系界面力学行为的表征

杜善义¹, 王晓宏¹, 张博明¹, 刘长喜², 戴福洪¹, 孙新杨¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150008, wangxiaohong422@126.com;

2. 黑龙江工程学院 机电工程系, 哈尔滨 150030)

摘要: 界面是纤维增强树脂基复合材料的重要细观结构, 极大程度地影响着该材料的宏观性能以及破坏模式. 单丝复合体系是界面力学性能表征的主要研究对象. 从细观力学实验, 细观力学模型以及数值模拟3个方面出发, 全面地阐述了单丝复合体系界面力学行为表征的手段和方法. 细观力学实验是建立细观力学模型以及发展数值模拟方法的基础, 应充分利用三者的关系, 建立完善的界面性能表征体系, 以便更加准确的预报复合材料的力学性能, 满足各个行业的要求.

关键词: 复合材料; 界面; 细观力学实验; 细观力学模型; 数值模拟

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1095-05

Research progress in characterization of interface mechanical behavior of single fiber reinforced composites

DU Shan-yi¹, WANG Xiao-hong¹, ZHANG Bo-ming¹, LIU Chang-xi², DAI Fu-hong¹, SUN Xin-yang¹

(1. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, wangxiaohong422@126.com; 2. Dept. of Electrical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150030, China)

Abstract: In this paper, means and method used for characterizing the interface behavior of single fiber composite are elaborated comprehensively from three aspects: mesoscopic-mechanical test, mesoscopic-mechanical models and numerical simulation. Mesoscopic-mechanical test establishes the basis for mesoscopic-mechanical models and numerical simulation. The relationship between them should be fully utilized to establish a sound system of interface performance characterization to accurately forecast the mechanical properties of composite materials and meet the requirements of various industries.

Key words: composite; interface; mesoscopic-mechanical test; mesoscopic-mechanical models; numerical simulation

纤维增强树脂基复合材料是由增强纤维、树脂基体及“界面”组成的多相体材料. 因而, 其性能和损伤破坏规律既取决于组分材料的性质, 也取决于其细观结构的特征. 其中界面相是决定纤维增强树脂基复合材料性能的关键因素之一, 很多学者对其展开了深入的研究. 单丝复合体系是由单根纤维及树脂基体经固化而形成的体系, 主要用于复合材料界面性能的表征. 因此, 本文以单

丝复合体系为研究对象, 从细观力学实验、细观力学模型以及数值模拟3个方面分别阐述了界面力学行为的表征方法和手段.

1 细观力学实验的研究状况

细观力学模型的建立需要以实验观察及测量为基础. 同时, 模型正确与否需要实验的验证. 近年来, 随着复合材料细观力学研究的深入, 细观实验技术也得到了很大的发展, 尤其是针对界面性能的实验测试技术, 发展极其迅速. 根据实验是否采用了新型测试手段可以将复合材料界面性能表征实验分为传统实验和新型实验.

收稿日期: 2009-06-30.

作者简介: 杜善义(1938—), 男, 教授, 中国工程院院士;
张博明(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

1.1 传统实验

传统的复合材料界面性能表征实验主要有: Kelly, Tyson^[1]设计的纤维断裂实验, Broutman^[2]设计的纤维拔出实验, Mandell 等^[3]进行了纤维压入实验, 以及 Miller^[4]设计的微珠脱粘实验. 通过多年的对比研究发现, 上述实验各自具有一定的优缺点:

1) 纤维拔出实验与微珠脱粘实验^[5] (如图 1 所示)能直接测得界面脱粘的临界载荷, 适用于各种纤维与基体的组合体系. 但此实验又存在不足: ① 界面脱粘的临界载荷是纤维埋置长度的函数, 而纤维与基体结合处新月面的存在使纤维埋置长度测量的不准以及角度控制的不一致性, 将给实验结果带来很大的离散性; ② 小尺寸微滴使得脱粘过程难以观察到; ③ 只能使用实验室制作的复合材料试样, 具有一定局限性.

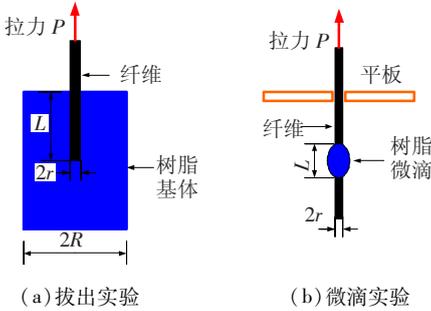


图 1 拔出与微滴实验

2) 纤维断裂实验 (如图 2 所示), 该实验是研究最多的实验, 由于该实验的外在影响因素少, 实验结果可以进行统计性分析. 但该实验的试件制作要求比其它实验的严格, 主要表现在: 该实验要求基体的极限应变至少是纤维的 3 倍, 并且要求基体具有很好的断裂韧性以免纤维断裂诱发基体断裂, 而导致实验失败.

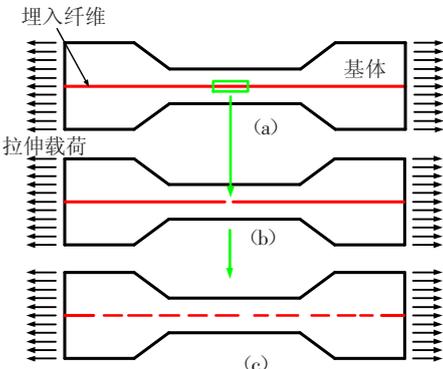


图 2 断裂实验

3) 纤维顶出实验 (如图 3 所示), 该实验适用于实际复合材料界面强度的测试, 能够得到近乎实际受载状态的界面参数, 并且数据采集方便. 但该实验存在不足表现在: ① 不能准确判断界面脱

粘时的临界载荷; ② 不易观察界面脱粘后的破坏模式; ③ 实验前对试件的表面处理可能引起界面损伤.

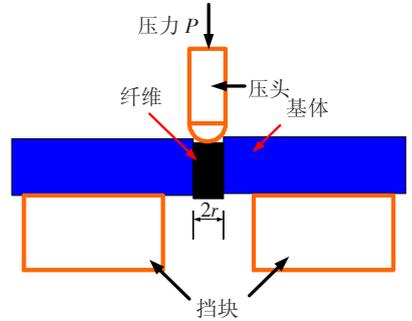


图 3 顶出实验

1.2 新型实验

随着测量手段的发展, 拉曼光谱测量技术, X 射线衍射条纹分析, 偏振光显微镜观测系统等被用于界面力学性能测试的实验中, 建立了传统实验方法与新的测量手段相组合的新型实验系统.

1) 结合拉曼光谱的微珠实验^[6-8]. 在微珠实验中结合拉曼光谱的测量技术 (如图 4 所示), 可以观测轴向应力传递的长度与径向影响区域的半径, 可用于分析具有不同界面性能的单丝复合体系的应力传递效率.

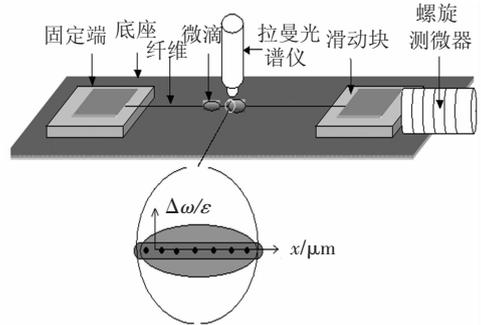


图 4 结合拉曼光谱的微滴实验

2) 结合拉曼光谱的拔出实验^[9-10]. 拔出实验的一个最为典型的问题是界面应力状态非常不均匀, 纤维埋入基体的入口处与基体中纤维的末端均存在高度的应力集中. 拉曼光谱技术在拔出实验中的应用 (如图 5 所示) 很好地解决了这一问题, 能够准确测量单纤维拔出实验过程中沿着纤维方向的应力分布和界面端部的应力集中现象.

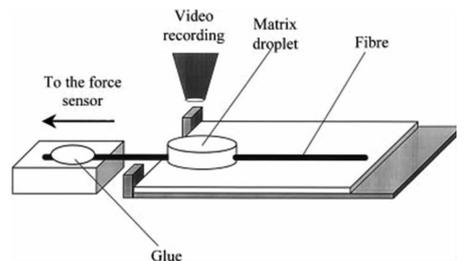


图 5 结合拉曼光谱的拔出实验

3) 结合偏振光显微镜的断裂实验^[11-13]. 应

用偏振光显微镜的观测和成像系统可以获得实验中纤维断口处应力影响区域的分布,包括轴向传递距离和径向的影响深度,二维断口脱粘损伤的长度以及近似的损伤模式(如图6所示)。

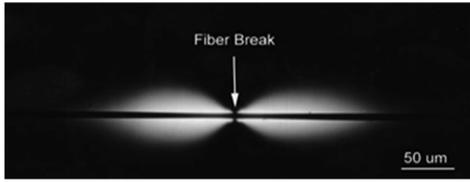


图6 结合偏振光显微镜的断裂实验

上述实验可以看出:传统实验方法与新的测量手段的结合,大大促进了单丝复合体系界面性能表征细观力学实验的发展,为细观力学模型的建立奠定了很好的实验基础。

2 细观力学模型的发展

针对单纤维断裂实验, Kelly-Tyson 提出了一个简单的理论模型(常剪应力模型),该模型假设纤维与基体之间界面上的剪应力均匀分布。但是,通过对实验过程的观察,发现了许多的微观现象:界面脱粘、横向基体裂纹、基体屈服等。此时,上述的简单模型无法解释这些现象,所以需要开发更加复杂的、综合的理论模型,以便全面地描述上述的实验现象,最终获得准确的应力分析。

单丝复合体系界面细观力学模型大致分为两类:1)基于剪滞理论的一维理论模型。2)基于轴对称理论的二维理论模型。

2.1 基于剪滞理论的一维理论模型

Cox^[14]最早提出了弹性载荷传递一维剪滞模型(Shear-lag模型)。模型表明:有限纤维长度内,纤维中的轴向应力在中部最大,两端最小,且趋近零;纤维末端附近区域几乎不承受载荷;界面的剪应力在纤维的末端最大,中间最小,且趋近零。

针对Cox模型的结论, Tyson, Davies^[15]利用光弹性分析表明, Cox的剪滞模型只适用于较低的应力状态,当应力较大时,纤维末端的剪应力超过了Cox模型的预报值;同时, Carrara, McGarry^[16]利用有限元分析进一步表明, Cox模型低估了纤维末端的剪应力值。可见,纤维末端具有较高的剪应力,因此可能出现界面脱粘现象。于是 Piggott^[17]利用 Outwater 的摩擦理论和 Cox^[18]的剪滞模型提出了部分脱粘模型。该模型描述了纤维与基体之间的弹性应力传递和摩擦应力传递共存时的界面应力状态,定量地解释了界面的应力传递现象。

随后,人们进一步改进Cox的剪滞模型,建立

了基于断裂力学和剪切强度的界面脱粘准则。详细地描述实验过程中的不同阶段:完好粘结、部分脱粘和完全脱粘状态。

改进模型仍存在一定的不足,忽略了基体屈服或部分脱粘与基体屈服共存的状态。对于树脂基复合材料,基体的非线性行为也是非常重要的特征,因此 Lacroix 等^[19]在Cox模型的基础上,利用割线模量的方法引入了基体的塑性行为。Kim^[20]在前人的基础上,将脱粘和基体屈服引入Cox的剪滞模型,研究脱粘与基体屈服共存时界面的性能。

综上所述,基于剪滞理论的一维理论模型的特点是:纤维和基体中的轴向应力在径向上是均匀分布的。它的发展经历了从简单到复杂,逐步体现真实的材料性能,反应真实的实验现象。

2.2 基于轴对称理论的二维理论模型的发展

Whitney, Drzal^[21]利用经典的弹性理论提出了一个相对较早的二维理论模型。该模型基于精确的远场解与近似的局部瞬时解重合的理论,认为最大的界面剪应力并不出现在纤维的末端,相反,认为纤维末端的剪应力为零,该模型有严重的缺陷,故没有得到广泛的应用。

McCartney^[22]提出一个相对复杂的轴对称二维理论模型。该模型认为纤维与基体中轴向应力分量在径向上均匀分布,但是在单纤维断裂试验中,基体中必定存在应力集中现象,所以,该模型也没有得到较好的结果。

在McCartney模型的基础上, Nairn^[23]在纤维附近引入一个半径为 R 的近场基体区域,该区域内存在应力集中的现象,提出了变分模型。该模型假设纤维与基体均为弹性材料,界面完好粘结,基于变分理论求得所有的应力分量,获得纤维与基体中轴对称的应力场。在较低的应力状态,模型的预报结果与有限元分析的结果具有较好的一致性,但是在较高的应力状态下,基体表现为塑性,变分模型无法预报该结果,这是变分模型的严重的局限性,而且变分模型不能预报摩擦剪应力的传递,即不能解释非完好的界面状态。

Tripathi 等利用有限元分析, Feillard 等基于对断裂实验的数值模拟,对Nairn的变分模型进行进一步的研究,一致认为尽管Nairn的变分模型存在一定的局限性,但是该模型较之Shear-lag模型更具有优越性。

Nairn^[24]利用 Bessel-Fourier(贝塞耳——傅立叶)级数应力函数加之一些额外的多项式项,提出了一个改进的模型,该模型包含了脱粘界面

的摩擦应力。

W. Wu^[25-28]建立了基于最小余能原理的改进变分模型。该模型假设纤维中的轴向拉伸应力在径向上均匀分布,基体中的拉伸应力在径向上非均匀分布,利用最小余能原理获得基体中应力的分布形式。该模型对应力状态的预报结果与有限元分析的结果具有很好的一致性。

Tripathi 等^[29]提出塑性效应模型(plasticity effect model)。该模型是在 Nairn 的变分模型的扩展模型,无脱粘的情况下,在变分模型的基础上引入基体的塑性行为,得到纤维拉伸应力和界面剪切应力与有限元计算和激光拉曼光谱的测试结果具有较好的一致性;出现脱粘的情况下,进一步引入 Coulomb 摩擦定律,用于摩擦应力传递的分析,该模型的最大缺点是:缺少界面脱粘开始和进一步扩展的准则。

A. C. Johnson^[30]的塑性模型(plasticity model)。是一个简单的数值方法,用于预报单根纤维在无限基体中的应力,该模型包含了基体和界面相的非线性行为,以及完全粘结,部分脱粘的界面状态,是一个较全面的数值模型。

综上所述,单丝复合材料的细观力学模型从一维的情况逐步发展到二维的应力状态分析,确立界面失效的准则,更加真实的预报失效过程。

随着新的测量手段不断的出现,人们对界面的研究也逐渐深入,纤维与基体之间的界面已经不是原来设想的两相互接触而没有厚度的单分子层界面,它实质上是具有纳米级以上的厚度的界面相或界面层,该界面层具有不同于纤维和基体性能的特殊力学性能,但是当前的理论模型很少考虑界面相的力学性能。

3 数值模拟的发展

单丝复合体系界面的失效过程极其复杂,理论与实验的方法不能充分表征界面的性能,所以人们借助数值的方法进一步研究界面的力学行为:例如失效模式、随机性、界面相性能等。

最初,研究人员利用自行编制的软件进行数值模拟计算,这种方法效率较低。随着计算机技术的迅猛发展,近年来,许多学者应用大型的通用有限元软件 abaqus 等^[31],对界面的失效过程进行数值模拟。利用接触单元模拟界面的脱粘失效,利用“单元生死”功能模拟纤维的断裂失效,模拟结果与实验吻合较好,反映了基本失效模式。

纤维强度分布以及界面粘接强度具有非均匀性,纤维表面的细观形貌具有凸凹不平性,为了更

加真实的反映单丝复合体系的组分材料的几何因素和物理因素,在模拟过程中人们逐步的引入了统计的方法(Monte Carlo 方法),模拟结果与实验吻合很好^[32]。

复合材料的界面是一个具有一定厚度的区域,该区域材料的性能不同于纤维与基体的性能,在数值模拟中假设该区域材料性能为均质^[33],非均质、呈梯度分布^[34-35],初步探索了界面层材料性能对单丝复合材料力学性能的影响。

随着机械工程软件(CAD)与有限元软件的无缝结合技术的发展,人们利用 CAD 软件建立了形象直观的三维单丝复合材料模型,对弹性范围内的界面传载进行数值模拟,提供了较好的三维应力分布结果,在三维数值模拟中进行初步的尝试^[36]。

综上所述,单丝复合体系数值模拟的发展过程中,逐步引入研究体系的几何以及材料物理特性的真实性,对界面相的物理特性进行了大胆的尝试,对于建立更加完善的数值模拟方法奠定了良好的基础。

4 结 论

1) 界面性能表征的细观力学实验是建立细观力学模型以及发展数值模拟方法的基础。因此,实验应建立统一的试件标准,尽量反映真实的客观现象,获得准确的表征参数。

2) 细观力学实验,细观力学模型以及数值模拟方法是复合材料界面性能表征的 3 个手段,应充分利用三者的关系,建立完善的界面性能表征体系。以便更加准确的预报复合材料的力学性能,满足各个行业的要求。

参考文献:

- [1] KELLY A, TYSON W R. Tensile properties of fiber-reinforced metals copper/tougsten and copper/molybdenum[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1965,13(6):329-338.
- [2] BROUTMAN L J. Measurement of the fiber-polymer matrix interfacial strength in interfaces in composites[J]. ASTM STP, 1996, 452: 27-41.
- [3] MANDELL J F, CHEN J H, MCGARRY F J. A microdebonding test for in situ assessment of fiber/matrix bond strength in composite materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1980,1(1):40-44.
- [4] MILLER B, MURI P, REBENFELD L. A microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface[J]. Composites Science and Technology,

- 1987, 28(1): 17-32.
- [5] 李学梅,王继辉. 复合材料界面的实验技术现状 [C]//第十五届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文. 北京:中国硅酸盐学会玻璃钢复合材料专业委员会, 2003:320-326.
- [6] PISANOVA E, ZHANDAROV S, MÄDER E, *et al.* Three techniques of interfacial bond strength estimation from direct observation of crack initiation and propagation in polymer-fibre systems[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(3/4): 435-443.
- [7] LEI Zhenkun, QIU Wei, KANG Yilan, *et al.* Stress transfer of single fiber/microdroplet tensile test studied by micro-Raman spectroscopy[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(1): 113-118.
- [8] CEN Hao, KANG Yilan, LEI Zhenkun, *et al.* Micromechanics analysis of Kevlar-29 aramid fiber and epoxy resin microdroplet composite by Micro-Raman spectroscopy[J]. *Composite Structures*, 2006, 75(1/4): 532-538.
- [9] BANNISTER D J, ANDREWS M C, CERVENKA A J, *et al.* Analysis of the single-fiber pull-out test by means of raman spectroscopy: Part II. Micromechanics of deformation for an aramid/epoxy system[J]. *Composites Science and Technology*, 1995, 53(4): 411-421.
- [10] 杨序纲,袁象恺,潘鼎. 复合材料界面的微观力学行为研究-单纤维拉出试验[J]. *宇航材料工艺*, 1999, 29(1): 56-60.
- [11] ZHAO Fangming, OKABE T, TAKEDA N. The estimation of statistical fiber strength by fragmentation tests of single-fiber composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(10): 1965-1974.
- [12] NISHIKAWA M, OKABEB T, TAKEDA N. Determination of interface properties from experiments on the fragmentation process in single-fiber composites [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 480(1/2): 549-557.
- [13] van den HEUVEL P W J, HOGEWEG B, PEIJS T. An experimental and numerical investigation into the single-fibre fragmentation test: Stress transfer by a locally yielding matrix [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(3): 237-249.
- [14] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1952, 3(3): 72-79.
- [15] TYSON W R, DAVIES G J. A photoelastic study of the shear stresses associated with the transfer of stress during fibre reinforcement [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1965, 16(2): 199-205.
- [16] CARRARA A S, MCGARRY F J. Matrix and interface stresses in a discontinuous fibre composite model [J]. *Journal of Composite Materials*, 1968, 2(2): 222-243.
- [17] OUTWATER J O. The mechanics of plastics reinforcement in tension [J]. *Modern Plastics*, 1956(56): 156-162.
- [18] PIGGOTT M R. *Load Bearing Fibre Composites* [M]. New York: Pergamon Press, 1980.
- [19] LACROIX T, KEUNINGS R, DESAEGER M, *et al.* A new data reduction technique for the fragmentation testing of polymer composites [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(3): 683-692.
- [20] KIM J K. Stress transfer in the fibre fragmentation test: Part III. Effects of interface debonding and matrix yielding. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(3): 701-711.
- [21] WHITNEY J M, DRZAL L T. Axisymmetric stress distribution around an isolated fiber fragment [C]//*Toughened Composites*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1987: 179-196.
- [22] MCCARTNEY L N. New theoretical model of stress transfer between fibre and matrix in a uniaxially fibre-reinforced composite [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1989, 425: 215-244.
- [23] NAIRN J A. A variational mechanics analysis of the stresses around breaks in embedded fibers [J]. *Mechanics Materials*, 1992, 13(2): 131-154.
- [24] NAIRN J, LIU Y C. Stress transfer into a fragmented, anisotropic fibre through an imperfect interface [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34(10): 1255-1281.
- [25] WU W, JACOBS E, VERPOEST I, *et al.* Variational approach to the stress-transfer problem through partially debonded interfaces in a three-phase composite [J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(4): 519-535.
- [26] WU W, DESAEGER M, VERPOEST I, *et al.* An improved analysis of the stress in a single-fibre fragmentation test: I two phase model [J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57(7): 809-819.
- [27] WU W, VERPOEST I, VARNA J. An improved analysis of the stress in a single-fibre fragmentation test—II. 3-phase model [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(1): 41-50.
- [28] WU W, VERPOEST I, VARNA J. A novel axisymmetric variational analysis of stress transfer into fibres through a partially debonded interface [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(12): 1863-1877.
- [29] TRIPATHI D, CHEN F, JONES F R. A comprehensive model to predict the stress fields in a single fibre composite [J]. *Journal of Composite Materials*, 1996, 30(14): 1514-1538.