

T300/Al 复合丝中纤维就位强度的测试与表征

Testing and Characterization on *In-situ* Strength of
Fiber in T300/Al Wires

周元鑫, 江大志, 夏源明

(中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

ZHOU Yuan-xin, JIANG Da-zhi, XIA Yuan-ming

(Dept. of Modern Mechanics, Univ. of Sci. and Tech. of China, Hefei 230027, China)

摘要: 以萃取法、纤维束拉伸试验技术以及纤维强度的应变率和温度相关的统计本构理论为基础, 形成了纤维增强金属基复合材料中纤维就位强度的测试与表征方法, 利用该方法获得了T300/Al复合丝中纤维的就位强度的所有确定性参数和统计参数。结果表明, 在经过与铝基体的高温复合以后, T300纤维的模量、强度均有不同程度的降低, 工艺过程中纤维表面损伤加剧是造成纤维就位强度降低的主要原因。

关键词: 就位强度; T300; 统计分析

中图分类号: TB301 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 09-0018-04

Abstract: Based on extraction method, tensile experimental technique of fiber bundles and statistical theory of fiber strength, a new method has been developed to test and characterize the *in-situ* strength of fiber in unidirectional fiber reinforced metal matrix composite. Experimental results show that the modulus and strength of *in-situ* fiber bundles are quite lower than that of original fiber bundles. It is mainly because some damage occurs during manufacture process. According to the statistical constitutive theory of fiber strength, the statistical parameters of original fiber and *in-situ* fiber are obtained.

Key words: T300 fiber; *in-situ* strength; statistical analysis

连续纤维增强金属基复合材料普遍存在低应力破坏现象^[1-3], 高温复合工艺过程中纤维性能的改变可能是造成上述现象的主要原因^[4]。如何准确测试与表征金属基复合材料中纤维的实际性能(就位性能)是困扰金属基复合材料发展的一个难题, 这种状态使得纤维增强金属基复合材料力学的发展缺乏更深层次的理论指导。

由于金属基体能为某些溶剂溶解, 因此国内、外学者通常采用萃取法将复合丝或条形复合材料的金属基体溶解掉, 然后对留下的纤维进行单丝试验^[4-5], 从而得到纤维单丝的平均就位强度, 这样所获得的结果往往偏高, 原因在于选取单丝时难免“选好”, 且不可能选取因工艺过程新断裂的纤维, 同时还由于单丝试验的纤维根数有限(通常为50~500根), 难于获得纤维就位强度的准确的统计参数。事实上, 纤维强度应变率和温度相关统计理论不仅给出了纤维强度的表征和测试方法, 还给出了纤维强度和纤维束强度之间的关系以及用纤维束试验来确定纤维强度及其统计参数的方法^[6-9]。由于绝大部分连续纤维增强复合材料都是用纤维束制备而不是用单丝制备, 因此无论

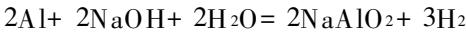
是纤维的原丝强度还是纤维的就位强度(包括统计参数), 用纤维束试验来确定更为合理。

本文试图将化学萃取法、纤维束拉伸试验技术与纤维强度的统计分布理论相结合, 建立单向金属基复合材料中纤维就位强度的测试与表征方法, 准确给出纤维就位性能参数, 为从细观上模拟单向金属基复合材料的变形损伤破坏过程提供必要的组份参数。

1 纤维就位强度的测试

选取的复合丝为超声液相浸渍法制备的T300/Al复合丝, 其制备的主要工艺参数为: 纤维预热温度为700~800, 铝液温度为680~720, 收丝速度1~3m/min。增强纤维为每束3000根单丝的T300纤维束, 基体为L2工业纯铝, 杂质含量低于0.4%(质量分数)。每根复合丝的平均直径约为0.55mm, 内含一束T300纤维, 其纤维体积百分含量为50%。对于超声液相浸渍法制备的用作拉伸用的试件, 首先将两个带有单边凹槽的衬块用502胶垂直地粘接在辅助板上(图1), 然后将复合丝束平行密排一层于衬块凹

槽内, 再将盖板覆于复合丝上面, 用 SA103 胶粘接固化, 做成预制件。然后将预制件浸入 15% NaOH 溶液中, 利用化学反应



萃取出铝基体, 保留复合丝中的纤维束, 此时暴露在外面的复合丝已变成平行排列的纤维束。若进行静态拉伸试验, 则将预制件与带叉口的金属短杆连接, 固化后将金属短杆安装在试件机的夹头上, 待准备就绪后, 除去辅助板即可进行拉伸试验。若要进行冲击拉伸试验, 则将预制件用 SA102 胶与带叉口的输入杆和输出杆粘接, 其它同准静态试验。

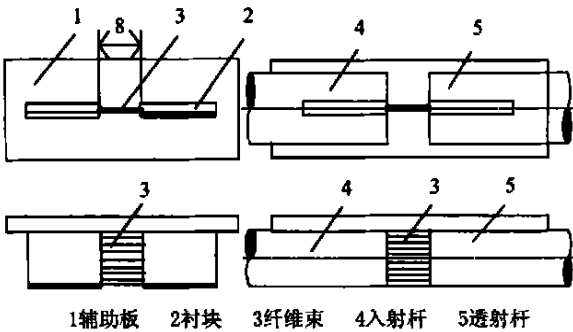


图 1 试件形状及与装置连接
Fig. 1 Specimen and its connecting

利用 MTS810 试验机和自行研制的冲击拉伸试验机^[10], 对就位的 T300 纤维束实施了静、动态的拉伸试验 (应变率分别为 0.001s^{-1} , 100s^{-1} , 500s^{-1} 和 1300s^{-1}), 还对 T300 原丝纤维束实施了相同应变率下的静、动态的拉伸试验^[6-9]。就位纤维束与原丝纤维

束的完整的拉伸应力应变曲线分别如图 2a, b 所示, 从图中可以看出, 每种纤维束在不同的应变率下的应力应变曲线几乎重合, 无论是原位纤维还是就位纤维, 均未表现出应变率敏感现象, 具体数值列于表 1 和表 2。

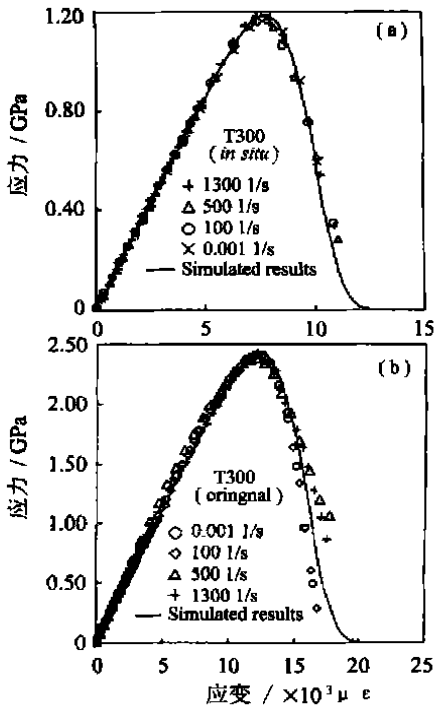


图 2 就位 T300 纤维束 (a)
和原位 T300 纤维束 (b) 的应力应变曲线
Fig. 2 Stress strain curves of *in-situ* T300 fiber
(a) and original T300 fiber bundles (b)

表 1 就位 T300 纤维束和原位 T300 纤维束的拉伸试验结果
Table 1 Test results of *in-situ* and original T300 fiber bundles

	ϵ / s^{-1}	E / GPa	E / E	$\epsilon_b / \%$	ϵ_b / ϵ_b	σ_b / GPa	σ_b / σ_b
就位 标距 $l = 8\text{mm}$	0.001	169	4.2%	0.73	3.2%	1.18	3.6%
	100	169	4.7%	0.74	4.1%	1.17	3.2%
	500	170	3.6%	0.74	3.8%	1.18	2.8%
	1300	172	4.1%	0.75	3.2%	1.19	3.4%
	平均值	170	—	0.74	—	1.18	—
原位 标距 $l = 8\text{mm}$	0.001	223	4.5%	1.20	4.1%	2.387	3.6%
	100	227	3.7%	1.22	4.0%	2.415	3.2%
	500	223	3.4%	1.20	3.6%	2.404	2.8%
	1300	225	4.1%	1.22	3.7%	2.418	3.4%
	平均值	225	—	1.21	—	2.406	—

注: σ_b 为纤维束的强度, ϵ_b 为与 σ_b 对应的失稳应变

从表 1 和表 2 可看出, 经过与高温铝液复合以后, 纤维的模量、强度以及失稳应变均有不同程度的

降低。为了进一步研究纤维就位强度对复合材料强度的影响, 本文将就位纤维束、原位纤维束和复合丝的

应力应变曲线进行了比较,如图3所示,可以看出,高温复合前后,T300纤维束的力学性能发生了明显的改变;同时,图3中三角形点为纤维就位应力按纤维束合力除以复合丝束面积得到的假想应力应变曲线,由于缺少了基体对拉伸强度贡献,其强度要低于复合丝的强度,但其等效模量与准静态时复合丝束几乎相同,表明铝基体的弹性模量对复合丝束的弹性模量贡献很小,原因在于纤维与基体热膨胀系数差异较大,加之复合过程中存在高温,使得复合材料中存在较大的热残余应力,其中纤维处于初始压应力状态,而基体处于初始拉应力状态,加之基体屈服强度很低,热残余应力已使基体在未经任何加载状态已经屈服进入塑性变形阶段,加之铝基体屈服后的塑性变形阶段硬化模量很低,最终导致铝基体的模量对复合材料的模量几乎没有贡献。

表2 原丝纤维束与就位纤维束力学性能的比较
Table 2 Comparision between mechanical properties of coated fiber bundles and uncoated fiber bundles

	E / GPa	σ_b / GPa	$\epsilon_b / \%$
T 300 (原位/就位)	225/ 170	2. 41/ 1. 18	1. 21/ 0. 74
降低因子 $\bar{w} \%$	24. 4	51. 0	44. 8

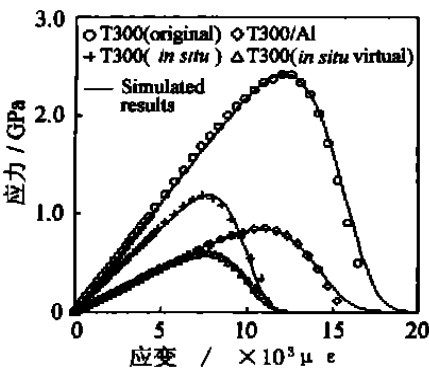


图3 T300原位纤维束、就位纤维束以及复合丝束的应力应变曲线
Fig. 3 Stress strain curces of original T 300 fiber bundles, in-situ T 300 fiber bundles and T300/ Al

对T300原丝纤维束和就位纤维束进行了称重,发现重量几乎没有变化,由此可见,可以排除高温界面反应导致纤维横截面积降低的因素,故本文又对T300原丝纤维和就位纤维实施了SEM细观察(如图4所示)。电镜观察表明,对于未经高温复合的原丝纤维,其直径均匀,表面光滑,无明显的损伤和缺陷分布;对于经过与铝基体的高温复合后的就位纤维,其表面可以发现明显的缺陷和损伤,局部出现较深的裂纹,甚至少数纤维在复合的工程中发生破坏。这些相

当于用一个带诸多缺陷的试件代替表观截面积相同的光滑试件来进行拉伸试验,直接导致了就位纤维强度的降低;同时导致模量的降低,且就位强度下降比就位模量下降相对严重(见表2)。

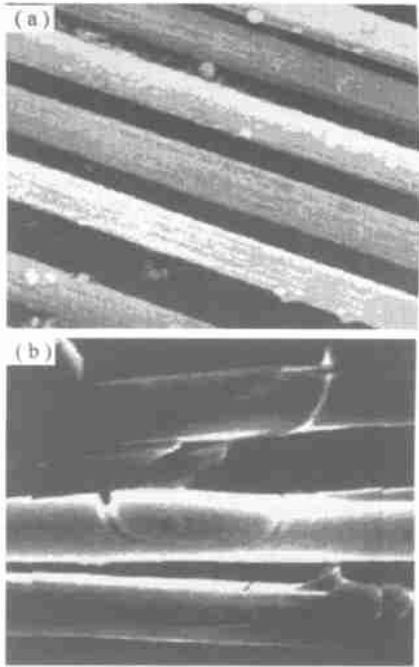


图4 T300原丝纤维(a)和就位纤维(b)的SEM照片
Fig. 4 Micro-graph of original T 300 fiber (a) and in-situ T 300 fiber (b)

2 纤维束统计损伤本构模型

依据纤维束模型和纤维强度的统计理论来建立纤维束统计损伤本构模型,对纤维束的力学行为进行描述,该模型满足下列假设:

- (1) 纤维束由N根相互平行的纤维组成,每根纤维具有相同的长度L,横截面积A和弹性模量。
- (2) 每根纤维单丝在断裂之前,其应力应变关系都是线弹性的,且忽略纤维之间的相互作用,当n根纤维发生断裂时载荷仅由未发生断裂的N-n根纤维承担,发生纤维断裂的n根纤维不具有承载能力。在某一确定应变下,有n根纤维发生断裂,则纤维束的合力与平均应力就可以表述为:

$$P = E\epsilon A (N - n) \tag{1}$$

$$\sigma = E\epsilon (1 - \frac{n}{N}) \tag{2}$$

- (3) 纤维的强度服从一种确定的概率统计分布,纤维束应力应变曲线的非线性就是由纤维的累积破坏所造成的。由最弱链假设和纤维统计强度理论,纤维的强度服从单Weibull或双Weibull统计分布规

律:

$$G(\epsilon) = \frac{n}{N} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E\epsilon}{\sigma_0}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

其中 σ_0 和 β 分别为 Weibull 统计分布的尺度参数和形状参数。由此纤维束的统计损伤本构方程就可以表述为:

$$\sigma = E\epsilon \left[-\left(\frac{E\epsilon}{\sigma_0}\right)^\beta \right] \quad (4)$$

对方程 (4) 取双对数, 可得:

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{\sigma}{E\epsilon} \right) \right] = \beta \ln(E\epsilon) - \beta \ln(\sigma_0) \quad (5)$$

纤维束完整的试验应力应变曲线可由 (5) 式改写为 Weibull 概率纸上的一条直线, 由直线的斜率和截距可获得单 Weibull 的统计分布参数和。

根据纤维束统计损伤本构模型, 对就位 T300 纤维束和原位 T300 纤维束的拉伸应力应变曲线进行了分析。图 5 为就位纤维束、原位纤维束拉伸应力应变曲线按公式 (5) 改写后获得的纤维强度的分布曲线, 对于 T300 纤维而言, 其原丝强度和就位强度在 Weibull 坐标系中均呈线性分布的特征, 满足单 Weibull 统计分布形式, 且两条 Weibull 分布曲线近似平行, 由于直线的斜率反映的是纤维强度的离散分布尺度, 因此表明高温复合工艺虽然对纤维统计强度产生影响, 但对纤维统计强度的离散分布形式没有影响。通过对试验数据的拟合, 获得了经过复合后的 T300 纤维束的统计参数和统计本构方程:

对于就位的 T300 纤维束

$$\sigma = 170 \exp \left[-\left(\frac{170\epsilon}{1.71}\right)^{8.63} \right] \quad (6)$$

对于原位的 T300 纤维束

$$\sigma = 225 \exp \left[-\left(\frac{225\epsilon}{3.52}\right)^{8.26} \right] \quad (7)$$

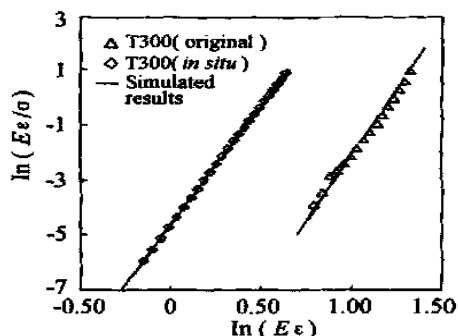


图 5 T300 纤维原丝强度、就位强度的 Weibull 分布

Fig. 5 The Weibull plots of in-situ strength of T300 in composites

图 2 中的曲线均为根据本构方程拟合出的结果, 与试验结果十分吻合。

3 结论

(1) 以萃取法、纤维束拉伸试验技术以及纤维强度应变率和温度相关的统计本构理论为基础, 形成了单向金属基复合材料中纤维就位强度的测试与表征方法, 这一方法是行之有效的。

(2) T300 纤维束的拉伸试验结果表明, 在应变率从 0.001 s^{-1} 至 1300 s^{-1} 的范围内, 无论是就位纤维还是原位纤维均为应变率不敏感材料。

(3) 在经过与铝基体的高温复合以后, 就位 T300 纤维束的性能与原丝纤维束相比明显降低, SEM 观察表明, 工艺工程中纤维缺陷的加剧是造成纤维模量、强度下降的主要原因, 统计分析结果还表明高温复合工艺虽然对纤维统计强度产生影响, 但对纤维统计强度的离散分布形式没有影响。

致谢: 国防科学技术大学金属基复合材料课题组提供了全部的复合丝样品, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Yuanxin Zhou, Yuanming Xia. Applied Composite Materials, 1999, 6 (6): 341—352.
- [2] C. C. Poteet, I. W. Hall. Material Science and Engineering, 1997, A222: 35—44.
- [3] 周元鑫, 夏源明, 材料工程, 2000, 9: 3—6.
- [4] J B Friler, A S Argon, J A Cornie. Material Science and Engineering, 1993, A162: 143—152.
- [5] S L Draper, P K Brindley, M V Nathal. Metal Trans, 1992, 23A: 2541—2548.
- [6] Z F Chi, T W Zhou, G. Shen. Journal of Materials Science, 1984, 19: 3319.
- [7] 董立民, 夏源明, 杨报昌. 复合材料学报, 1990, 7 (4): 9—12.
- [8] Zhen Wang, Yuanming Xia. Composite Science and Technology, 1997, 57: 1599—1607.
- [9] Yang Wang, Yuanming Xia. Composites Part A, 1998, 29A: 1411—1415.
- [10] Yuanming Xia, Yuanxin Zhou. Acta Mechanica Sinica, 1996, 12 (3): 243—250.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (“长纤维增强金属基复合材料损伤本构模型及其微观分析”, 19972065)

收稿日期: 2000-11-28

作者简介: 周元鑫 (1972-), 男, 汉, 安徽南安人, 博士, 联系地址: 安徽合肥中国科学技术大学材料力学行为和设计重点实验室 (230027)。