

复合材料界面剪切强度试验方法评定

嵇醒 戴瑛

(同济大学固体力学教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 复合材料界面剪切强度的试验方法主要有纤维拔出、纤维压入、纤维段裂和微珠脱粘等四种, 但由这四种试验得到的界面剪切强度存在很大的分散性。虽然对试验技术进行了许多改进, 分散性仍未能消除。为研究分散性产生的原因, 本文以双材料轴对称界面端应力奇异性分析为基础, 并给出了奇异性指数随 Dundurs 常数的变化情况, 求出四种试件界面端的奇异性指数。由此看出: 相同的纤维和基体制作的四种试件, 其界面端应力场的奇异性指数是各不相同的。从而阐明了四种界面剪切强度试验结果巨大分散性的原因, 在于试件界面端处的应力奇异性。

关键词: 界面剪切强度试验方法, 轴对称界面端, 应力奇异性。

0 引言

复合材料的界面剪切强度 (IFSS) 直接影响到复合材料的强度和韧性, 界面剪切强度的研究和测定也成为复合材料界面研究中的一个重点。

测定 IFSS 的试验方法主要有四种 (见图 1): 纤维段裂 (Fragmentation)[1]、纤维拔出 (Pull-out)[2]、纤维压入 (Micro-indentation)[3]、微珠脱粘 (Micro-debond)[4]。

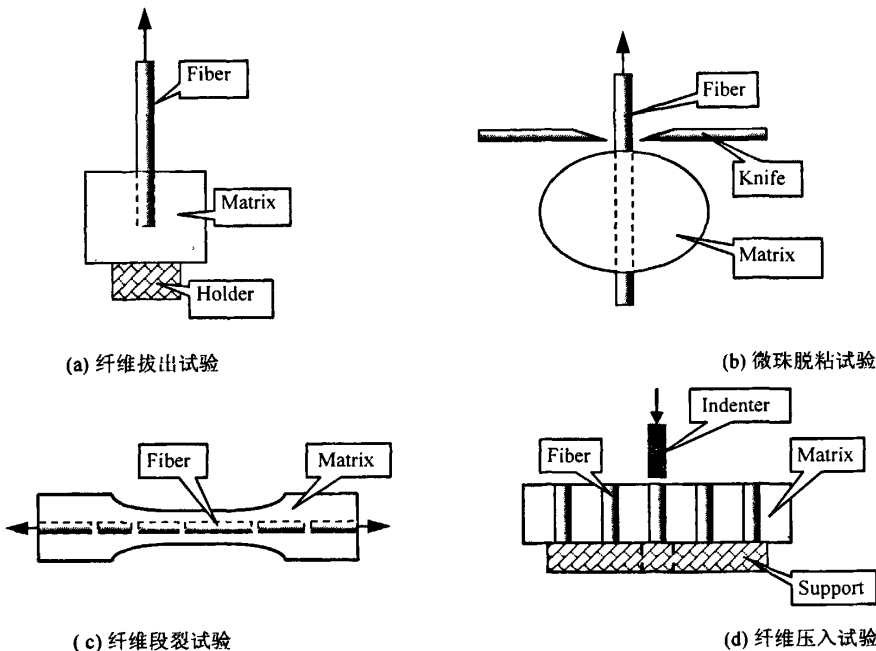


图 1 测定界面剪切强度细观试验方法示意图

这四种试验方法都是让单纤维界面承受剪力，根据界面脱粘荷载计算得出界面剪切强度。其差别在于所用试件的外形和加载方式（见图 1）。原以为：只要纤维，基体和界面相同，这四种方法应能给出相同的界面剪切强度。然而情况并非如此。

1 界面剪切强度的试验研究

1993 年，国际上 12 个实验室组织了一次 Round Robin Program [5]，意欲通过试验来评估这四种试验方法的优劣，但从图 2 显示的一组数据结果可知，不能用这些试验结果来判定哪种试验方法更可靠。

表 1 和表 2 给出了文献[5]的试验数据。从表 1 可见：每一种试验方法在各白的实验室测得的 IFSS 结果分散性不超过 37%。从表 2 可见：每一试验方法在不同试验室之间测得的 IFSS 结果分散性不

* 国家自然科学基金资助项目。作者简介：嵇醒（1966.6），男，江苏常熟，教授，固体力学。

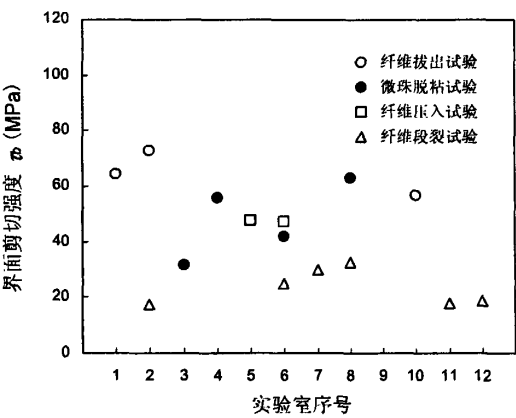


图 2 试验测得的未经表面处理的碳纤维/环氧树脂复合材料的界面剪切强度 [5]

超过 29%。但不同试验方法测得的 IFSS 的最大值（纤维拔出试验）和最小值（纤维段裂试验）之比竟高达 270%。

为找出造成试验方法间如此之大的偏差的原因，[7]和[8]建立了如图 3 所示的轴对称界面端模型；从弹性力学轴对称基本方程出发，采用渐近展开法，得到了任意楔形角界面端的特征方程；根据四种试验所用试件的楔形角，得到了相应的的特征方程，并得出了界面端应力奇异性指数与 Dundurs 常数的曲线图。根据文献[5]给出的纤维/基体的性能数据，计算出四种试件的界面端应力奇异性指数，发现文献[5]中四种试验所用的试件，

其界面端应力场奇异性指数是各不相同的，从而看出这四种试验方法并不具有可比性，所测得的 IFSS 受到应力奇异性的严重干扰。

表 1 四种试验方法测得的未经表面处理碳纤维复合材料界面剪切强度[5]

实验室序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
纤维拔出试验	IFSS (MPa)	64.3	73.0								56.7		
	差异系数(%)		4								15		
微珠脱粘试验	IFSS (MPa)			31.6	55.9		42.3		63.2				
	差异系数(%)			7	11		5		32				
纤维压入试验	IFSS (MPa)					48.1	47.4						
	差异系数(%)					13	14						
纤维段裂试验	IFSS (MPa)		17.6				25.2	30.0	32.8			18.0	19.0
	差异系数(%)		9				19		13				37

表 2 不同实验室测得的界面剪切强度平均值 [5]

试验方法	IFSS 平均值 (MPa)	差异系数 (%)
纤维拔出试验	64.6	13
微珠脱粘试验	48.3	29
纤维压入试验	47.8	1
纤维段裂试验	23.8	28

2 四种试件的界面端应力奇异性

2.1 纤维拔出试验： $a = \pi$, $b = \pi/2$

纤维拔出试件的二个楔形角 a 和 b 分别等于 π 和 $\pi/2$ ，相应的特征方程可以简化为：

$$(1 - 2\lambda^2 - \cos \lambda\pi)(4\beta^2 \sin^2 \lambda\pi + \alpha^2) + 8\lambda^2(\alpha - 1)\beta \sin^2 \lambda\pi + (1 - 2\lambda^2)(2\alpha \cos 2\lambda\pi + 1) - 2\alpha \cos \lambda\pi - \cos 3\lambda\pi = 0 \tag{20}$$

由式 (20) 可解出纤维拔出试验的特征值 λ 和 Dundurs 常数的关系，见图 4。

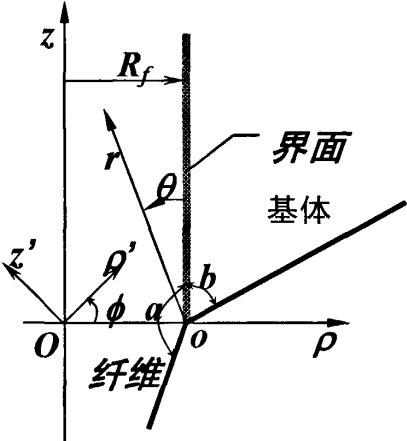


图 3 界面端轴对称模型

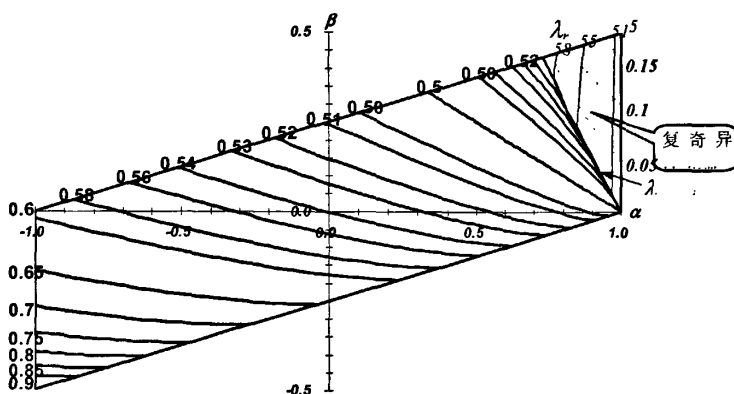


图 4 纤维拔出试验特征值

3.2 纤维压入试验: $a = \pi/2$, $b = \pi/2$

纤维压入试件的二个楔形角 a 和 b 都等于 $\pi/2$, 相应的特征方程可以简化为

$$\left(\sin^2 \frac{\lambda\pi}{2} - \lambda^2 \right)^2 \beta^2 + 2\lambda^2 \left(\sin^2 \frac{\lambda\pi}{2} - \lambda^2 \right) \alpha\beta + \lambda^2 (\lambda^2 - 1) \alpha^2 + \sin^2 \frac{\lambda\pi}{2} \cos^2 \frac{\lambda\pi}{2} = 0 \quad (21)$$

由式 (21) 可解出纤维压入试验的特征值 λ 和 Dundurs 常数的关系, 见图 5。

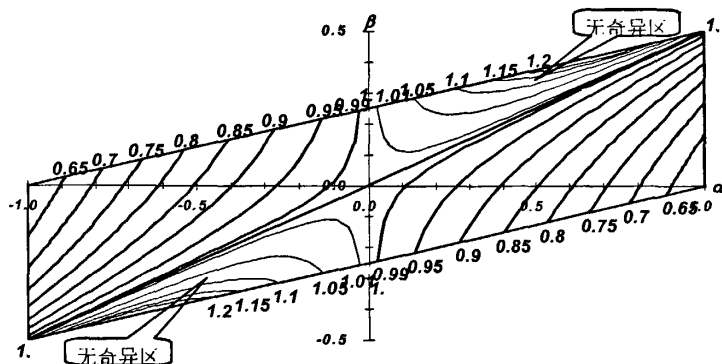


图 5 纤维压入试验特征值

2.3 微珠脱粘试验: $a = \pi$, $b < \pi/2$

微珠脱粘试件的楔形角 a 等于 π , 楔形角 b 为小于 $\pi/2$ 的值, 视具体试件而定, 特征方程可写为:

$$\begin{aligned} & 4\beta^2 \sin^2 \lambda\pi (\sin^2 \lambda b - \lambda^2 \sin^2 b) + 4\alpha\beta \lambda^2 \sin^2 \lambda\pi \sin^2 b \\ & + \alpha^2 [\sin^2 \lambda(\pi - b) - \lambda^2 \sin^2 b] - 4\beta \lambda^2 \sin^2 \lambda\pi \sin^2 b \\ & + 2\alpha [\sin^2 \lambda b - \lambda^2 \cos 2\lambda\pi \sin^2 b - \sin^2 \lambda\pi] \\ & + \sin^2 \lambda(\pi + b) - \lambda^2 \sin^2 b = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

当 $b=60^\circ$ 时, 由式 (22) 求得的微珠脱粘试验的特征值 λ 和 Dundurs 常数的关系表示在图 6 中。

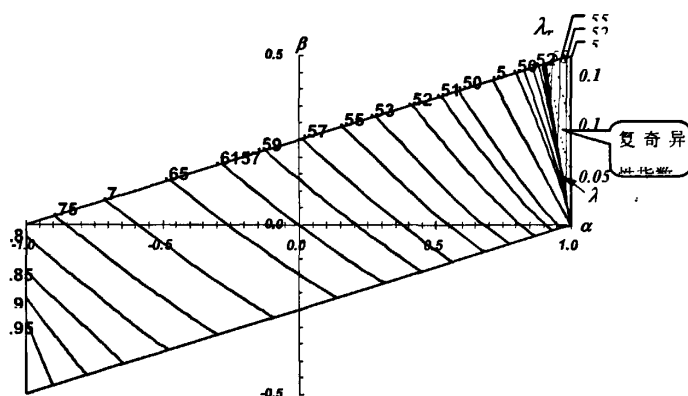


图 6 微珠脱粘试验特征值 (基体楔形角 $b=60^\circ$)

2.4 纤维段裂试验: $a \approx \pi/2$ (自由面边界条件), $b=\pi/2$ (对称面边界条件)

纤维段裂试验的基体边界条件是对称面条件, 与式 (14) 有差异, 其特征方程不包含在式 (16) 中, 需另行推导, 相关论文已投《力学季刊》, 在此只给出特征值 λ 的特征方程 (23) 以及特征值 λ 关于 Dundurs 常数的变化情况 (见图 7)

$$2(1-\beta) \left[(\alpha-\beta)\lambda^2 + (1+\beta)\sin^2 \frac{\lambda\pi}{2} \right] - (1+\alpha) = 0 \quad (23)$$

顺便指出, 本文式 (20) 和 (22) 与文献[7]中对应的公式稍有不同, 系文献[7]的推导中略有差错所致。

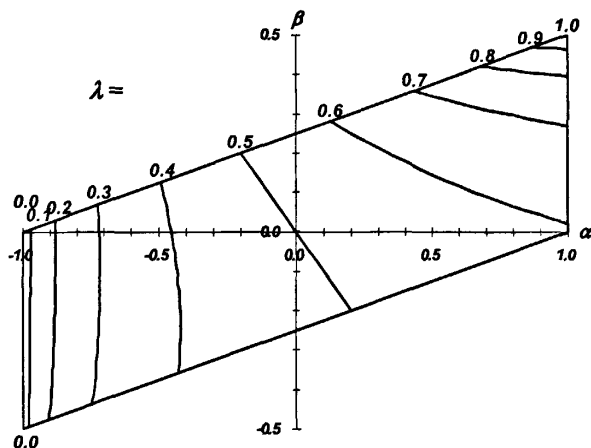


图 7 纤维段裂试验特征值

3 界面剪切强度试验结果分散性的讨论

从图 4、5、6 和 7 可见，纤维拔出、纤维压入、微珠脱粘和纤维段裂试验试件的界面端应力奇异性指数关于 Dundurs 常数的曲线图是不同的。由图 4—7 中可知，对于相同的纤维/基体组合（即相同 Dundurs 常数），四种试件的奇异性指数 λ_s 或特征值 λ 是各不相同的，表 3 给出了文献[5]所用的未经表面处理的碳纤维复合材料试件四种界面端的特征值和对应的应力奇异性指数。由表中所列计算结果可知四种试件的应力奇异性指数 λ_s 是各不相同的。因而其试验结果是不可比的。

表 3 四种试件界面端的特征值和应力奇异性指数

试验方法	α	β	λ	λ_s
纤维拔出试验	-0.9857	-0.1949	0.6613	-0.3387
微珠脱粘试验($b=60^\circ$)	-0.9857	-0.1949	0.8786	-0.1214
纤维压入试验	-0.9857	-0.1949	0.6717	-0.3283
纤维段裂试验	-0.9857	-0.1949	0.0710	-0.9290

特别要说明的是纤维段裂试验，这种试验方法不是根据脱粘剪力来计算界面剪切强度的，而是用段裂后的临界长度和纤维的拉伸强度来推算的[1]。存在的问题是：当试验到达临界长度时，界面脱粘是否恰好发生？[9]对纤维段裂试验的可信度作了进一步的讨论。

从以上分析可知，由于四种试验结果的分散性根源于试件界面端的应力奇异性，是无法通过试验技术的改进来消除的。另一方面，纤维拔出、纤维压入、和微珠脱粘这三种试验方法本身并没有什么不合理的地方，问题在于在根据试验结果计算界面剪切强度时，忽略了界面端的应力奇异性。

4 结论

本文从纤维拔出、纤维压入、纤维段裂和微珠脱粘试验的四种试件存在楔形角不同的界面端入手，建立了轴对称界面端模型。当我们仅关注于界面端的应力奇异性时，可以采用渐近展开法；对弹性轴对称基本方程进行简化；根据边界条件和齐次线性代数方程非零解条件，得到了求解任意楔形角界面端特征值的特征方程。根据四种试验所用试件的楔形角的值，推导出相应的特征方程，并给出了特征值关于 Dundurs 常数的曲线图。根据文献[5]给出的纤维/基体的性能参数，计算了四种试件的界面端应力奇异性指数，发现文献[5]中所用试件在界面端应力场的奇异性指数是各不相同的，从而得出四种试验方法不具可比性的结论。

另一方面，纤维拔出、纤维压入、和微珠脱粘这三种试验方法本身并没有什么不合理的地方，问题在于：当界面端存在应力奇异性时，在计算界面剪切强度的应力分析中，忽略了界面端存在的应力奇异性，所以现行的界面剪切强度是用名义应力来表征的。由此造成的后果，就是我们在文献[5]中所看到的试验结果的分散性。

不过，这三种试验可以单独用于复合材料界面剪切强度的相对比较。

参考文献

- [1]. Kelly, A. and Tyson, W.R., Tensile properties of fiber-reinforced metal: copper- tungsten and copper-molybdenum [J]. *J. Mech. Phys. Solids*. 1965, 13: 329-350.
- [2]. J.P. Favre and M.-C. Merrine, Characterisation of fibre/resin bonding in composites using a pull-out test [J]. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 1981, 1: 311-316.
- [3]. Mandell J F, Chen J H and McGarry F J, A microdebonding test for in situ assessment of fiber/matrix bond strength in composite materials [J]. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 1980, 1: 40-44.
- [4]. Miller B, Muri P and Rebenfeld L, A microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface [J], *Compo. Sci. Technol.*, 1987, 28, 17-32.
- [5]. Pitkethly, M.J. et al. A round robin programme on interfacial test methods [J], *Compo. Sci. Technol.*, 1993,48: 205-214.
- [6]. Bogy, D.B., Two edge-bonded elastic wedges of different materials and angles under surface tractions [J]. *J. Applied Mechanics*, 1971, 38: 377-386.
- [7]. Bai-Lin Zheng, Xing Ji, Stress singularity analyses of interface ends in micro-mechanics tests [J], *Composites Science and Technology*, 2002, 62: 355-365.
- [8]. 戴瑛, 嵇醒, 界面端应力奇异性与复合材料界面剪切强度细观试验分散性, 应用力学学报, 2004, 21. 90-95
- [9]. Ying Dai, Xing Ji, Lin Ye And Yiu-Wing Mai, The reliability of fragmentation test, Key Engineering Materials, Vol. 302 (2006) pp. 155-160