

用双悬臂夹层梁试样研究复合材料与橡胶粘接界面的断裂韧性

谢基龙 郑晓阳

(北方交通大学机电学院车辆研究室, 北京 100044)

摘 要 用 I 型加载下的双悬臂夹层梁试样, 借助于线弹性断裂力学和声发射技术研究橡胶/复合材料的粘接界面的断裂韧性 G_c 与裂纹扩展阻力 R 并探讨加载速率、试验温度及橡胶片厚度对它们的影响。结果表明, 在本试验范围内, 低速加载或高温将会降低界面的断裂韧性, 增大橡胶片厚度会使断裂韧性稍有提高。

关键词 双悬臂夹层梁试样, 粘接界面, 断裂韧性, 裂纹扩展阻力

中图分类号 TB 33, O 346 1, TQ 330 16

胶接是复合材料结构中普遍采用的一种连接方法。当复合材料胶接结构受外力作用时, 则易在胶接层间等结构缺陷处发生应力集中, 随之发生裂纹, 这种裂纹迅速沿层间传播, 导致破坏; 但是, 当复合材料之间粘接插入橡胶片时, 情况就不同了, 这时在橡胶片与复合材料胶接界面产生应力集中, 但借助于橡胶的粘弹性, 复合材料可以一面发生很大的位移变形, 一面吸收外来能量, 其结果是可以提高结构层间的断裂韧性, 减缓裂纹的扩展。

本文在双悬臂梁试样的基础上发展出以橡胶片作为夹层、以玻璃纤维/环氧树脂复合材料板作为悬臂的双悬臂夹层梁试样, 并用线弹性断裂力学的方法研究其在 I 型加载下粘接界面的断裂韧性和裂纹扩展阻力, 同时探讨加载速度、温度及橡胶片厚度对粘接界面断裂韧性的影响。

1 实验方法

1.1 试样及实验设备

双悬臂夹层梁试样 DCSB (Double Cantilever Sandwich Beam) (图 1) 由两块玻璃纤维/环氧树脂复合材料板与天然硫化橡胶片用 Thixon 530 胶粘接而制成, 试样的尺寸标示在图 1 中。橡胶片的厚度被选为 0.5、1.0 和 2.0 mm, 复合材料板沿试样长度方向的弹性模量为 30000 MPa。

DCSB 试样在配有 X-Y 记录仪的 Instron 1840 试验机上进行, 裂纹发展由摄相机录相并显示在电视屏幕上以便测量其长度, 声发射探头被固定在试样上表面以探测裂纹的起裂点及扩展方式。

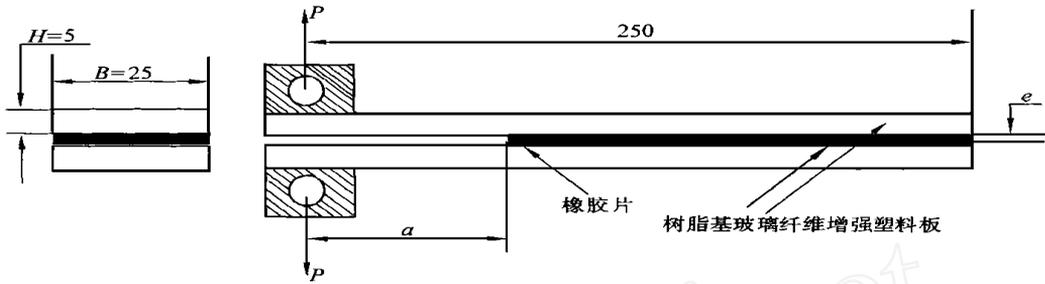


图 1 双悬臂夹层梁试样

Fig. 1 Test specimen (DCSB) geometry

1.2 断裂韧性测试方法

面积法-面积法^[1]是一种直接的方法,由裂纹产生及扩展的加载-卸载曲线的面积获得,这种方法适合测量裂纹稳定扩展的断裂韧性值。

柔度法-柔度法中用 Irwin-Kies 表达的弹性应变能释放率为: $G_I = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{\partial C}{\partial a}$ (1)

这里, P 为外加载荷, B 为试样宽度, C 是试样的柔度, a 是裂纹头到加载线的距离。

另外,用Berry^[2]法柔度也可表示为: $C = \delta/P = a^n/h$

那么 $\partial C/\partial a = nC/a$

这样 $G_I = \frac{nP\delta}{2Ba}$ (2)

其中, n 和 h 是常数,由 $C-a$ 曲线取对数得到, δ 是夹头位移。

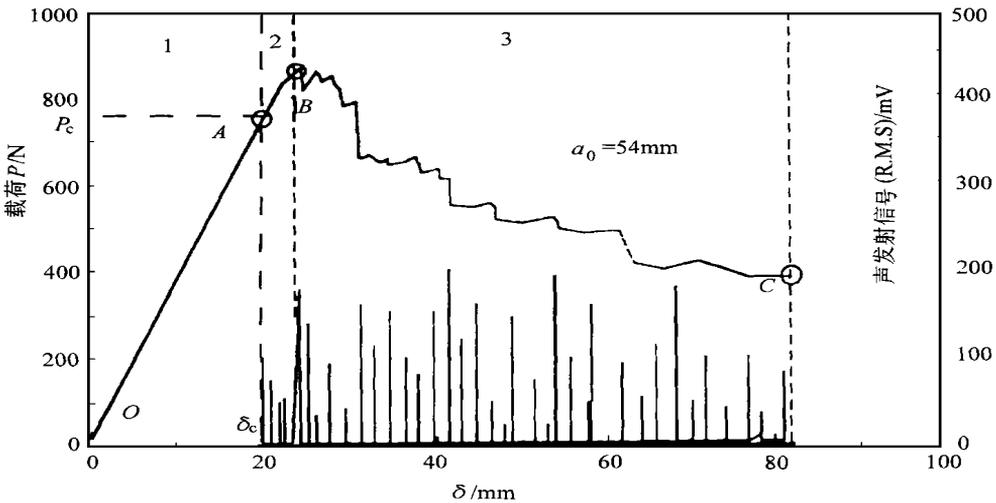


图 2 单向拉伸下 DCSB 试样的载荷/位移曲线及声发射信号,加载速率= 30mm/m in, 20 , e= 1.0 mm

Fig. 2 Typical load/displacement curve and acoustic emission from DCSB tensile test, loading rate= 30 mm/m in

载荷达到起裂点 P_c 时所对应的弹性应变能释放率 G_c 为界面的断裂韧性,式(2)也可用于描述裂纹扩展阻力 R 曲线。

2 实验结果

2.1 用声发射方法探测损伤的发展

试样在位移加载控制下, 随着裂纹张开的加大而开始出现裂纹起裂及裂纹扩展。图 2 显示载荷与声发射有效值随张开位移而变化的情况, 有三个区可辨别:

区一(从 0 到 A 段): 没有声发射, 处于准线弹性区, 无损伤。

区二(从 A 到 B 段): 显出界面损伤开始, A 点对应微观损伤裂纹起始开裂点并由第一个声发射峰决定; 在 B 点出现第二个峰, 标志着界面裂纹开始宏观扩展。

区三(从 B 到 C 段): 处于界面裂纹宏观扩展阶段。

2.2 试样柔度及断裂韧性

对于一个给定长度的裂纹, 由第一个声发射峰可确定起始开裂的载荷 P_0 、夹头位移 δ 并由此得出试样柔度 $C = \delta/P_0$ 。由一系列含不同长度裂纹的试样可以确定并描绘 $C-a$ 曲线(图 3), 其斜率给出 $\partial C/\partial a$ 多值, 由 $C-a$ 曲线取对数得到常数 n 和 h , 再用公式(1)或(2)可得到粘接界面的断裂韧性。表 1 显示用柔度法与面积法得到的断裂韧性值, 可见二者非常接近。

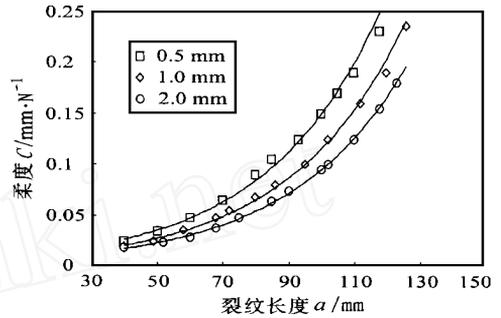


图 3 橡胶片在不同厚度下, 试样柔度随裂纹长度的变化, 加载速率= 30 mm/m in, 20

Fig 3 Change in specimen compliance with crack length from three kinds of rubber thickness, loading rate= 30 mm/m in, 20

表 1 断裂韧性 G_{IC} , 比较柔度法与面积法的结果, 试验条件: 20 , 加载速率 30mm/m in

Table 1 Fracture toughness G_{IC} , comparison between method of compliance and method of area

橡胶片厚度 0.5 mm			橡胶片厚度 1.0 mm			橡胶片厚度 2.0 mm		
裂纹长 a/mm	断裂韧性/ $kJ \cdot m^{-2}$		裂纹长 a/mm	断裂韧性/ $kJ \cdot m^{-2}$		裂纹长 a/mm	断裂韧性/ $kJ \cdot m^{-2}$	
	柔度法	面积法		柔度法	面积法		柔度法	面积法
40.0	9.6		57.0	11.8		67.5	14.8	
		9.4			13.2			14.1
52.0	10.5		66.0	12.4		72.5	15.2	
		10.7			14.3			16.2
66.0	9.1		79.0	10.9		80.0	12.5	
		9.8			10.1			11.8
84.0	8.0		86.0	10.8		85.0	12.3	
		8.9			8.9			13.7
101.0	7.8		95.0	10.8		87.5	11.2	
		7.6			11.8			10.9
102.5	7.7		104.0	10.8		99.0	11.1	
		8.2			7.9			11.0
115.0	7.9		114.0	10.7		103.0	10.0	
		8.0			8.6			8.8
123.0	8.1		121.0	10.8		110.0	9.6	
					12.7			8.1
			129.0	9.8		120.0	10.0	
G_{IC} 平均值	8.6	9.0	G_{IC} 平均值	11.0	10.9	G_{IC} 平均值	11.9	11.8

2.3 裂纹起始长度及橡胶片厚度的影响

图 4 给出粘接插入不同厚度橡胶片时, G_{IC} 值与裂纹长度的关系, 结果反映出两方面的问题。一方面是当橡胶片厚度增加时, G_{IC} 值也稍有提高, 说明橡胶片厚度增加时, 试样所吸收的能量或者说橡胶片的粘弹性损耗也增加; 橡胶片厚度的影响反映出橡胶片与复合材料板之间的互相作用, 可以认为在较薄的橡胶片下, 裂纹尖端的约束更大, 因此变形较小, 使得裂纹的扩展阻力要小些。另一方面表明 G_{IC} 值随裂纹起始长度的增长而减小, 但在 $80\text{ mm} < a < 140\text{ mm}$ 时, G_{IC} 值基本上与初始裂纹长度无关, 这个区别可能是由于不同的断裂机理所造成的, 从扫描电镜中观察到在橡胶片厚度 $e = 2.0\text{ mm}$ 和 $a < 60\text{ mm}$ 时, 破损主要发生在橡胶体平行于界面的平面上, 断裂呈延性(图 5 a), 断裂韧性较高, 约为 $15\text{ kJ/m}^2 \sim 30\text{ kJ/m}^2$, 接近纯橡胶的断裂韧性 35 kJ/m^2 ^[31]; 但在 $a > 60\text{ mm}$ 时, 则以界面开断为主, 断裂呈脆性(图 5 b), 断裂韧性较低, 约为 $10\text{ kJ/m}^2 \sim 15\text{ kJ/m}^2$ 。

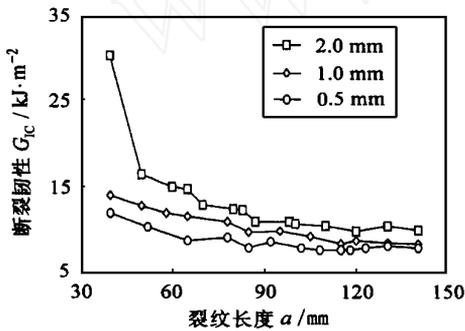


图 4 断裂韧性 G_{IC} 与裂纹长度及橡胶片厚度的关系, 加载速率 = 30 mm/m in , 20

Fig 4 Fracture toughness versus crack lengths and rubber thickness, loading rate = 30 mm/m in , 20

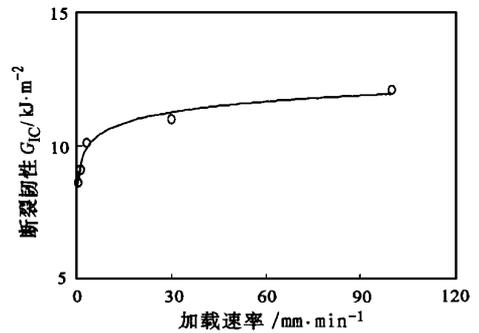


图 6 G_{IC} 与加载速率的关系, $e = 1\text{ mm}$, 20

Fig 6 Fracture toughness versus loading rate, 20 , $e = 1\text{ mm}$

图 5 断裂表面扫描电镜照片, $e = 2.0\text{ mm}$, 加载速率 = 30 mm/m in , 20 。(a) $a < 60\text{ mm}$; (b) $a > 60\text{ mm}$

Fig 5 SEM photography, loading rate = 30 mm/m in , 20 , $e = 2\text{ mm}$ 。(a) $a < 60\text{ mm}$; (b) $a > 60\text{ mm}$

2.4 加载速率的影响

加载速率对断裂性能的影响用下列不同加载速率进行: 即 0.3 mm/m in 、 1 mm/m in 、 3 mm/m in 、 30 mm/m in 和 100 mm/m in 。对每一个加载速率, 至少作 3 个试件的试验, 所得到的

断裂韧性取 $80 \text{ mm} < a < 140 \text{ mm}$ 下不少于 15 个点的平均值。图 6 表明断裂韧性随着加载速度的提高而增大, 说明橡胶的粘弹效应使得复合材料与橡胶粘接界面的断裂韧性很大程度上受到时间的影响。从 3 根具有相同起始裂纹长度而加载速率不同的试样所得出的粘接界面阻力曲线(图 7)表明: 当裂纹扩展时, 材料的抗力 R 随着加载速度的增加而提高且裂纹扩展趋向不稳定。

2.5 温度的影响

试样在控温室中加热到给定温度并保温, 由于橡胶片在温度提高时变软导致试样柔度随温度增加而提高, 相应的断裂韧性随温度的变化如图 8 所示, 每个温度下所得到的断裂韧性为不少于 15 个点的平均值并取 $80 \text{ mm} < a < 140 \text{ mm}$ 。温度升高时, 一方面使得界面联接键退化^[4], 降低了界面抗拉强度, 另一方面则由于橡胶与基体热胀系数不同, 在界面产生三向应力状态, 当达到临界时, 微裂纹将出现, 从而降低了材料的断裂韧性。

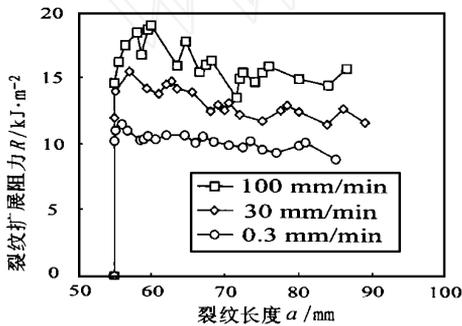


图 7 不同加载速率下裂纹扩展阻力 R 与裂纹长度的关系, $e = 1 \text{ mm}$, 20

Fig 7 Resistance crack growth R versus loading rate and crack lengths, 20 , $e = 1 \text{ mm}$

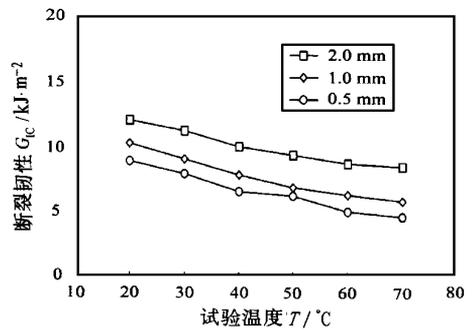


图 8 G_c 与试验温度 T 的关系, 加载速率 = 30 mm/m in

Fig 8 Fracture toughness versus testing temperature, loading rate = 30 mm/m in

3 讨 论

DCSB 试样提供了测试橡胶/复合材料粘接界面断裂韧性的可能性。由于橡胶片很薄, 它的变形也受到强烈约束, 从而使粘弹性损耗减至最小, 相较于其它种类试样更容易用弹性基础法分析其变形。

为了判断线弹性断裂力学应用于 DCSB 试样的可行性, 需验证两方面的准则: (1) 力学性能是否线弹性; (2) 裂纹是否在缺陷平面上扩展。

研究结果表明, 关于线弹性, 测定的载荷-位移曲线直到开裂点都呈现准线性, 用考虑到材料非线性的面积法测得的 G_c 稳定扩展值也非常接近由柔度法得到的 G_c 值, 说明橡胶的粘弹性影响对整体试样而言是很小的; 观察结果也显出裂纹始终沿着缺陷平面在界面上扩展。因此, 可以确信用线弹性断裂力学方法测试橡胶/复合材料粘接界面的断裂韧性是可行的。

界面裂纹萌生于裂纹尖端未张开的损伤区并由能量准则所规范而且这个能量是独立于裂纹起始长度的, 这个临界能从断裂力学的观点而言就是被试验材料在 I 型载荷下的断裂韧性。用声发射法探测萌生点是很有效的, 可取得对应的载荷及张开位移, 用柔度法和面积法得到断裂韧性值。当显微裂纹萌生并发展到临界密度, 裂纹将随着损伤区的张开而扩展并导致分层开裂, 在分层过程中, 显微裂纹在裂纹尖端继续萌生并发展。BERRY 法适用于计算裂纹扩展的

断裂能与描绘扩展阻力曲线。

4 结 论

本工作选择 I 型加载下的双悬臂夹层梁试样,借助于线弹性断裂力学和声发射技术研究橡胶/复合材料的粘接界面的断裂韧性及裂纹扩展阻力,在本试验范围内,结论如下:

- (1) 当橡胶片较薄时,线弹性断裂力学可应用于DCSB 试样,用柔度法和面积法得到的断裂韧性值相近。
- (2) 低速加载或提高温度将会降低界面的断裂韧性和裂纹扩展阻力。
- (3) 增大橡胶片厚度会使断裂韧性稍有提高。

参 考 文 献

- 1 Han K S, Koutsky J. *Journal of Composite Materials*, 1981, 15: 371~ 388
- 2 Berry J P. *Journ of Appl Phys Solids*, 1963, 8: 62~ 68
- 3 Bartenev GM, Zuyev Y S. *Strength and Failure of Viscoelastic Materials*, 1968, 235
- 4 Briens G. *M ateriaux et Techniques*, 1987, 3~ 4: 107~ 116

APPL ICATDN OF SPEC MEN DOUBLE CANTLEVER SANDW ICH TO THE STUDY OF INTERFACIAL FRACTURE TOUGHNESS OF RUBBER/COM POSITES

Xie Jilong Zheng Xiaoyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Linear elastic fracture mechanics and acoustic emission were used to monitor the interfacial failure toughness G_{IC} and the resistance crack growth R of rubber/composites for specimen double cantilever sandwich in mode I. It was shown that G_{IC} decreased as the temperature increased. It was also shown that G_{IC} increased as rubber thickness and loading rate increased.

Key words specimen double cantilever sandwich, interfacial fracture toughness, resistance crack growth

(上接第 39 页)

- (17) 绝缘材料的寿命预测 (Michael K. McDurray, General Electric Co. and Shigeo Amagi, Hitachi Ltd)
- (18) 耐久性设计的软件开发 (Sangwook Sohn, Stephen W. Tsai, Stanford University and Yasushi Miyano, Masayuki Nakada, Kanazawa Institute of Technology)
- (19) 碳纤维片材的结构及对混凝土结构件的补强效果 (植村政彦, 东燃株式会社)
- (20) 海上采油用复合材料管的设计 (Stephen Nolet, Fiberspar Spoolable Products, USA)
- (21) PAN 系碳纤维扩大应用的课题 (松井醇一, 京都工艺纤维大学)
- (22) 沥青系碳纤维的现在与将来 (岩井作弥, 日本石墨纤维株式会社)