

纤维增强复合板中裂纹的动态扩展

刘凯欣 刘维甫 张晋香 李荣 张国华 傅缤

(湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京大学力学与工程科学系, 北京 100871. 联系人, E-mail: kliu@mail.mech.pku.edu.cn)

摘要 报道了环氧基玻璃纤维单向增强复合材料制成的带预制裂纹的平板在三点弯曲冲击载荷下的破坏实验. 实验中利用透射光路进行了高速摄影, 拍摄到裂纹扩展的全过程, 并观察到一种新的动态断裂现象. 在此基础上, 对裂纹扩展速度和路径以及破坏方式进行了初步分析和研究.

关键词 正交各向异性 纤维增强复合材料 高速摄影 动态断裂

冲击载荷下纤维增强复合材料的动态断裂过程是非常复杂的力学现象. 众多的研究者从理论、实验和数值模拟各个方面进行了较为深入的研究^[1,2]. 但是, 他们的研究主要集中于两类问题: 裂纹动态扩展平行于纤维方向, 或沿两种纤维增强复合材料的界面. 其力学模型可简单地将纤维增强复合材料板视为正交各向异性板, 其裂纹的扩展也是连续的. 迄今为止, 尚未发现关于研究裂纹在纤维增强复合材料板的内沿任意方向动态扩展过程的实验报告.

本文采用玻璃纤维增强复合材料为研究对象, 对该材料制成的带预制裂纹的平板在三点弯曲冲击载荷作用下的裂纹扩展过程进行了实验研究. 实验中使载荷的加载方向和复合材料的纤维的铺设方向分别呈 0° , 45° 和 90° 角. 通过利用和透射焦散线方法相似的光路进行高速摄影, 拍摄到裂纹扩展的全过程, 并观察到一种以裂纹的不连续扩展为特征的新的动态断裂现象. 在此基础上, 对裂纹扩展速度和路径以及破坏方式进行了初步分析和研究.

1 冲击实验及高速摄影

实验在Cranz-Schardin动态光弹性仪上进行, 该仪器主要由高速摄影仪、加载以及控制同步、延迟及时间记录 3 个系统组成, 可以一次连续获取 16 个时刻的照片, 照片的间隔时间可以在 $1 \mu\text{s}$ ~ 1ms 之间连续调节. 本研究中采用的复合材料内的防辐射玻璃纤维的体积含量为 5%, 纤维的弹性模量 $E = 72.4 \text{ GPa}$; 基体为常温固化环氧树脂, 即树脂胶液的重量配比为 618#环氧树脂: 593#固化剂=100: 25~28, 其弹性模量 $E = 3.60 \text{ GPa}$. 本实验的纤维增强复合材料的参数均由实测所得: $E_1 = 7.66 \text{ GPa}$, $E_2 = 4.27 \text{ GPa}$, $G_{12} = 1.60 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.20$, $\nu_{21} = 0.36$, $\rho = 1.18 \text{ g/cm}^3$.

实验中试件的加载形式如图 1 所示, 加载方向

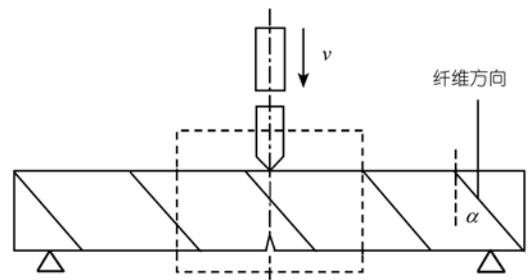


图 1 试件加载示意图

(预制裂纹方向)和材料的纤维方向成 α 角. 试件的尺寸为 $120 \text{ mm} \times 22.5 \text{ mm} \times 5.52 \text{ mm}$. 裂纹位于试件的中间位置, 长度为 3.5 mm . 两支撑点间的距离为 91 mm . 本实验采用落锤装置实现冲击加载, 落锤高度 350 mm , 质量为 0.9 kg . 其中虚线所示部分为高速摄影实际的拍摄区. 实验采用的透射摄影光路进行拍摄.

2 实验结果

加载方向(裂纹方向)与材料的纤维方向角 α 为 45° 时的实验结果如图 2 所示. 该图由 8 张照片组成, 摄影时间分别在每张照片下面标出, 取落锤刚刚接触到试件的时刻为 $t = 0 \mu\text{s}$.

由图 2 可清楚观察到: 当 $t = 300 \mu\text{s}$ 时, 预制裂纹尚未扩展, 尖端区域也无任何局部破坏现象. 当 $t = 550 \mu\text{s}$ 时, 距离裂纹尖端 0.46 mm 处的应力达到了极限值, 开始形成核, 破坏沿预制裂纹方向发展. 当 $t = 630 \mu\text{s}$ 时, 成核区已发展成局部破坏, 并在距离此局部破坏区前端 6.32 mm 处也出现新的破坏区, 同时在距离此破坏区前端约 7.12 mm 处也形成新的核. 在 $t = 630 \sim 700 \mu\text{s}$ 的这段时间内, 新成核的区域开始破坏, 原有的局部破坏区各自顺着纤维方向扩展. 当 $t = 780 \mu\text{s}$ 时, 预制裂纹尖端和 $t = 630 \mu\text{s}$ 时的成核区形成的裂纹基本上已经连通, 形成了连续的裂纹

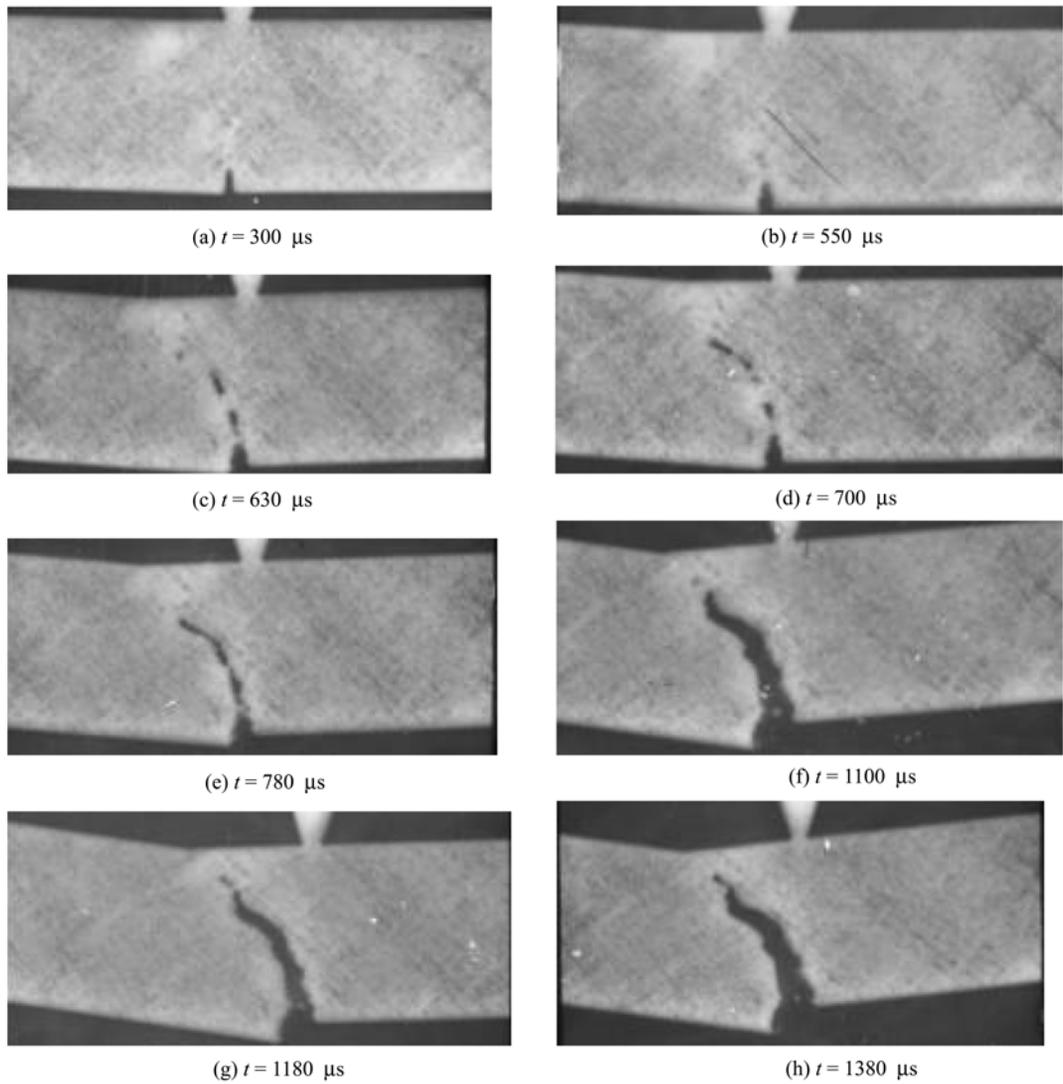


图2 裂纹扩展过程的高速摄影图像($\alpha=45^\circ$)

(这时在裂纹中间仍然有少许纤维未完全拉断), 同时新裂纹的尖端区又开始成核. 因为面内剪切力在这类材料的裂纹扩展和破坏中占主导地位, 而此模型中平行纤维方向承受剪切的能力最弱, 所以裂纹扩展改变了方向, 和增强纤维的铺设方向相平行. 分析这一阶段的实验数据可知, 一旦预制裂纹附近的纤维被拉断, 在后一段裂纹扩展的过程中裂纹扩展速度为最大. 在 $t=1100 \mu\text{s}$ 之前的一段时间内, 裂纹的扩展经历了一个平台期, 尖端几乎无新裂纹的扩展, 在裂纹中间的纤维被完全拉断; 当 $t=1180 \mu\text{s}$ 后, 出现了新的断裂形式, 增强纤维不是被拉断, 而是被从基体中拔出, 基体断口也参差不齐. 最终裂纹的扩展

方向和纤维的铺设方向一致, 试件沿纤维方向断裂.

加载方向(裂纹方向)与材料的纤维方向呈 0° 角的实验结果如图3所示. 由于该实验结果的裂纹扩展

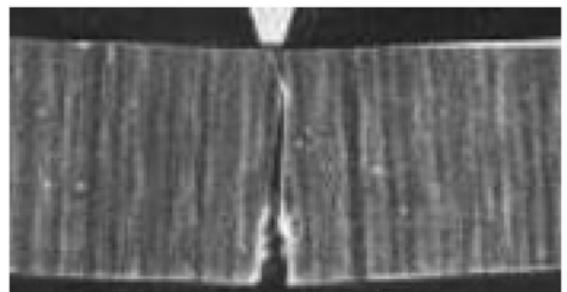


图3 裂纹扩展图像($\alpha=0^\circ$)

过程同 Coker 和 Rosakis 的实验结果完全相同, 这里仅展示其中的一张照片. 由于裂纹扩展方向与纤维方向相同, 裂纹扩展过程中并未出现图 2 中所示的远离预制裂纹的区域出现核, 成核区形成新的裂纹, 并与预制裂纹连通的特殊现象, 而是预制裂纹直接扩展, 直至彻底断裂. 角度 $\alpha=90^\circ$ 时的实验结果如图 4 所示. 应力波到达后, 预制裂纹尖端附近就出现了许多分叉, 这时纤维虽然未发生断裂, 但基体上已产生小裂纹. 进而纤维发生断裂, 基体已发生粉碎性破坏.

通过对断口进行分析, 可观察到三种典型的破坏模式. 第一种破坏模式: 断口同纤维方向相同, 断

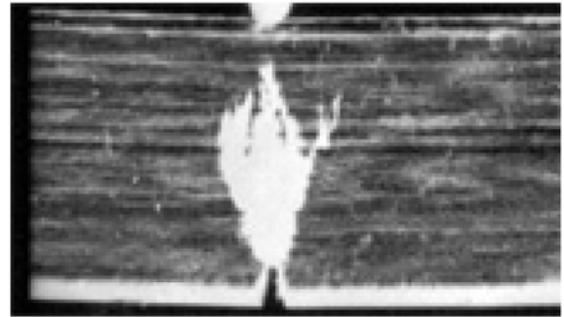


图 4 裂纹扩展图像($\alpha=90^\circ$)

口光滑, 无折断的纤维(如图 5(a)). 这种情况在 $\alpha=0^\circ$

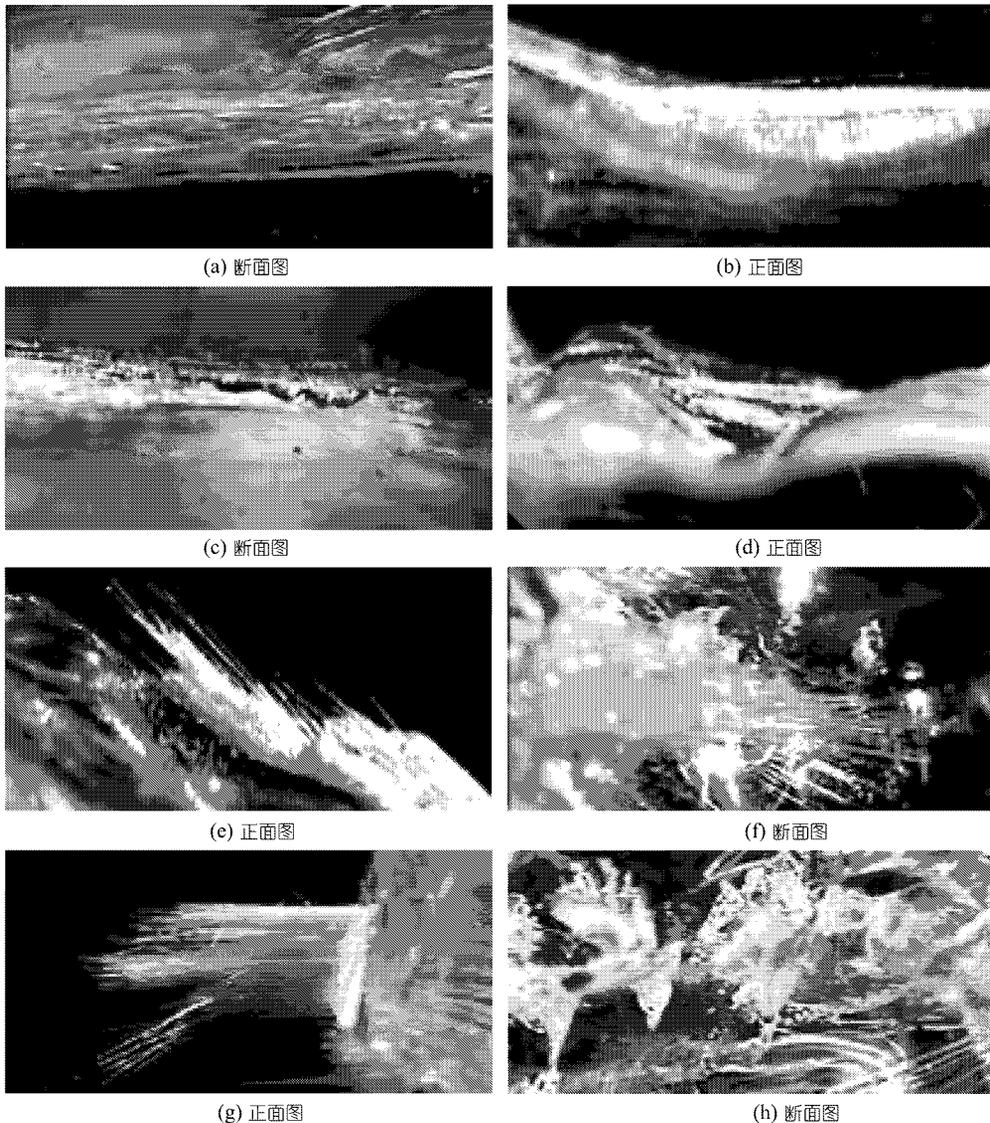


图 5 断口分析图像

和 $\alpha=45^\circ$ 角的实验结果中均有出现. 第二种破坏模式: 断口同纤维方向相同, 纤维虽然未断, 但有纤维从基体中脱粘拔出(如图 5(b)). 这种情况在 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$ 角的实验结果中均有出现. 稍有不同的是: 在 0° 角的实验中基体断口非常光滑(如图 5(c)); 在 45° 角的实验中基体断口参差不齐(如图 5(d)). 第三种破坏模式: 纤维完全拉断拔出, 基体有严重破坏, 断口粗糙. 这种情况在 $\alpha=45^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 角的实验结果中均有出现. 不同的是: 在 $\alpha=45^\circ$ 的实验中, 基体断口同纤维方向相同, 纤维是顺次拉断(如图 5(e)、(f)); 而在 $\alpha=90^\circ$ 的实验中纤维是整齐断裂, 基体粉碎和纤维拔出更为显著(如图 5(g)、(h)).

3 裂纹形成的初步计算与分析

我们采用有限元方法对图 2 所示的实验结果进行了初步的力学分析. 计算模型没有采用传统的正交各向异性替代模型, 而是将基体与含纤维基体作为两种独立的材料进行建模和分割单元, 以更加真实的反映实际材料. 数值计算所采用的冲击载荷的幅值远小于实际实验的载荷幅值, 但载荷幅值的时间变化与实验基本相同. 图 6 表示, 在冲击载荷作用下应力波传到裂纹尖端后($t=50 \mu\text{s}$)复合材料板内的最大拉应力分布状态. 如图 6 所示: 最大拉应力的分布具有明显的方向性, 基本是沿着纤维的方向; 出现最大拉应力极值区域的分布是不连续的, 除裂纹尖端附近的区域 A 外, 沿着纤维方向较远处的区域 B 也有极值出现.

图 6 的计算结果对我们分析图 2 所示的破坏过程很有帮助. 首先, 最大拉应力出现在裂纹尖端的左上

角, 因而裂纹将向左上角扩展. 其次, 由于纤维的抗拉强度要远远高于基体的抗拉强度, 而板中最大拉应力的方向与纤维方向基本相同, 因此板内的极值区域很容易产生基体发生破坏但纤维并未拉断的现象(脱粘破坏现象), 这种脱粘破坏已在断口分析中大量观察到(如图 5(b), (d)). 这种脱粘破坏可以形成新的裂纹, 并对原裂纹的扩展过程产生影响. 由此可以推断拉应力极值区域分布的间断和基体与纤维拉伸强度的差别, 是在冲击载荷作用下纤维增强复合材料板内裂纹扩展过程不连续的主要原因.

4 结论

本论文就纤维含量较高(5%)的正交各向异性复合材料的动态断裂问题进行了实验研究, 利用透射光路的高速摄影原理拍摄到一种新的裂纹断裂模式. 对于此类复合材料, 在动载荷的加载方向和增强纤维的方向不一致的情况下, 由于纤维的存在增加了材料的抗断裂性能, 使裂纹的每次扩展都伴随着较大的能量积聚, 因此裂纹的扩展过程是不连续的. 而且, 裂纹扩展方向最终和纤维的铺设方向相平行. 我们对纤维体积含量 10%的复合材料制成的模型也进行了同样的实验, 在加载方向与纤维方向呈 45° 时观察到了同样的以裂纹不连续扩展为特征的断裂现象. 但是, 动载荷的加载方向和增强纤维的方向一致时, 在裂纹的动态扩展过程中并没有出现局部破坏的情形. 我们对以裂纹不连续扩展为特征的断裂现象进行了初步的分析, 在以后的工作中, 我们拟开发新算法通过模拟整个断裂过程来进一步探索这种现象的形成机理.

致谢 本工作为国家杰出青年科学基金(批准号: 10025212)和国家自然科学基金(批准号: 10232040)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Yu H H, Suo Z. Intersonic growth on an interface. Proc Roy Soc Lond A, 2000, 456: 223~246
- 2 Coker D, Rosakis A J. Experimental observations of intersonic crack growth in asymmetrically loaded unidirectional composites plates. Philosophical Magazine A, 2001, 81: 571~595

(2004-04-27 收稿, 2005-01-07 收修改稿)

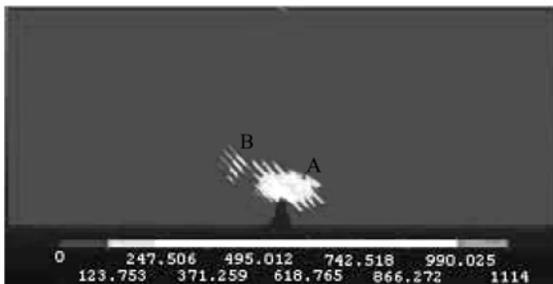


图 6 最大拉应力分布图