

界面剪切实验研究¹⁾

韩金虎 毛天祥 王自强

(LNM, 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 用云纹干涉法测量了带边裂纹的双材料四点简支梁在剪切作用下界面表面的剪应变分布及界面两侧局部表面的位移场 (U 、 V 场), 试件是由弹性模量相差悬殊的铝合金和环氧塑料两种材料制成. 文中给出了试件制备、实验方法和测试结果.

关键词 云纹干涉法, 界面, 剪应变, 位移场

引 言

两种材料的部分表面相互结合形成了一种称为“界面”的结构, 含界面结构的材料受载后的变形状态是可以在一定的假设条件下通过力学分析和计算得到解答的; 然而得到答案的直接的方法, 同时可以验证计算结果的方法是进行实验研究. 实验力学方法中的一般方法例如电测法和光弹性法等难以满足界面表面变形测量的要求. 近年新发展起来的云纹干涉法由于具有位移测量灵敏度高、条纹反差好, 可以实时全场观测等优点, 因此本文采用云纹干涉法进行界面表面变形的实验研究.

1 实 验

1.1 实验方法

实验力学领域中的新方法——云纹干涉法有十多年历史了, 国内外学者在理论和方法研究方面, 在科研和工程实际应用方面都取得了很大进展^[1,2], 详细原理和实验操作可参阅有关文献^[3,4], 下面仅叙述与本文相关的部分. 本文的实验光路与文献^[5]的光路基本相同, 只是试件和加载形式不同, 实验光路的细节参阅文献^[5].

云纹干涉法得到的 N_x 、 N_y 条纹图分别表示 x 、 y 方向条纹级数的分布, 它们与 x 、 y 方向的位移场 U 和 V 有以下关系

$$U = \frac{1}{f} N_x \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{f} N_y \quad (2)$$

(1)、(2) 两式说明了试件表面的任一点位移 U 、 V 均可以用相应的条纹级数 N_x 、 N_y 来描述, (1)、(2) 等式两边只相差一个常数因子 $1/f$. 因此条纹图 N_x 、 N_y 即

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目.

1994-02-01 收到第一稿, 1994-03-21 收到修改稿.

可代表位移场 U 、 V 。 f 为所用光路的空间频率。 $1/f = p$ ， p 称为节距，本文中 $f = 2400 \text{ line/mm}$ ， $p = 0.417 \mu\text{m}$ 。 从几何云纹法知道，节距 p 表示每级条纹具有 $0.417 \mu\text{m}$ 的灵敏度。

通常，应变值可从位移场用小应变的关系计算，如果 N_x 、 N_y 条纹图上的条纹是密集的，那末偏导数可用有限增量的形式逼近，此时有

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial N_x}{\partial x} \doteq \frac{1}{f} \cdot \frac{\Delta N_x}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial N_y}{\partial y} \doteq \frac{1}{f} \cdot \frac{\Delta N_y}{\Delta y} \quad (4)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{f} \cdot \left(\frac{\partial N_x}{\partial y} + \frac{\partial N_y}{\partial x} \right) \doteq \frac{1}{f} \cdot \left(\frac{\Delta N_x}{\Delta y} + \frac{\Delta N_y}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

1.2 试件的制作

试件是由金属和非金属两种材料制成的矩形截面梁，金属和非金属之间构成了界面层，并且界面层的下方有一段界面用脱膜剂隔离形成了预制裂纹，制作过程主要有以下三个步骤：

1.2.1 预制裂纹

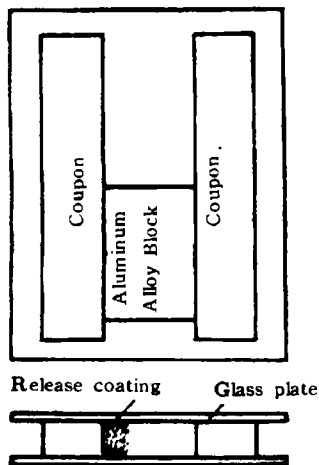


图 1
Fig.1

用胶带纸遮盖住金属试块端面的一部分，然后向金属试块端面喷涂脱膜剂，待脱膜剂干燥后撕下胶带纸，金属试块端面附着了脱膜剂的部分作为预制裂纹；未附着脱膜剂的部分即形成界面。

1.2.2 拼装模具

取两条与金属试块厚度相等，长度略大于两倍金属试块的板条将金属试块夹在中间如图 1 所示，然后用两块适当尺寸的玻璃片把两条板条和金属试块夹持起来如图 1 下部所示。这样由板条、玻璃片和金属试块围成的空间即作为浇铸非金属材料——环氧塑料之用，在两板条和玻璃片内侧均需垫上硅油纸以便于脱膜。

1.2.3 浇铸环氧塑料

有关资料^[6]指出，环氧树脂本身是热塑性、线型高分子树脂，必须加入固化剂使线型环氧树脂分子交联成网状结构的大分子、成为不熔的环氧塑料才能显示其良好的机械性能。因此对于作为结构材料使用的环氧树脂应当称为环氧塑料。本文的试件制作取胺类固化剂加入环氧树脂中，固化后形成环氧塑料。其配方为：

环氧树脂：三乙烯四胺：邻苯二甲酸二丁脂 = 100：7：5

上述比例为重量比，环氧树脂的牌号为 618 或 6101，三乙烯四胺是固化剂，邻苯二甲酸二丁脂是增塑剂。具体工艺可参阅有关文献。

1.3 试件及其受力分析

图 2(a) 给出了试件及加载示意图, 图 3 是它们的照片. 试件左半部是环氧塑料、右半部是铝合金, 在环氧塑料和铝合金之间即为带预制裂纹长度为 a 的界面层, $(H - a)$ 为界面的长度, D 为实现四点加载所用的圆柱直径. 试件尺寸和加载点位置参数如下表所示.

	L	b	D	h	H	a	$H - a$
No.1	19	4	2.5	5.8	11.8	3.24	7.56
No.2	20	5	2.5	5.8	11.8	2.36	8.44

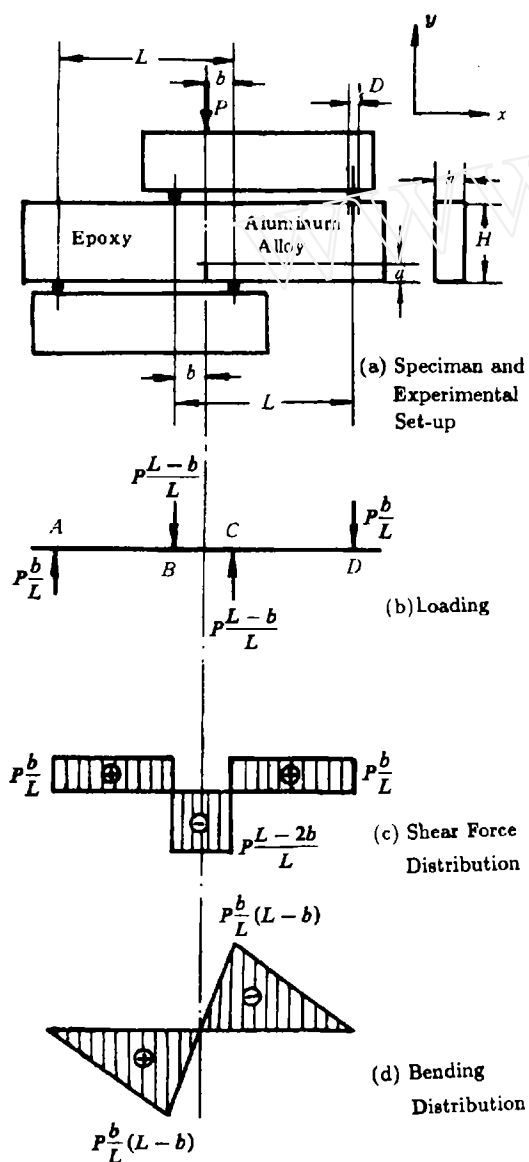


图 2
Fig.2

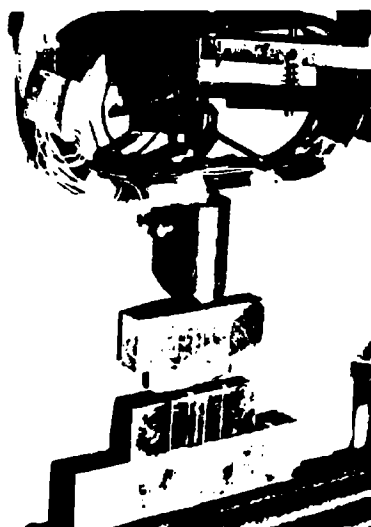


图 3
Fig.3

图 2 的 (b)、(c)、(d) 分别是试件的受力分析图、剪力图、弯矩图。从图 2 的 (c) 和 (d) 可知在四点简支梁的界面上, 理论分析只承受剪切力而不存在弯矩的作用。由此, 这项工作称为界面剪切实验。

试件界面两侧材料的弹性模量相差很大, 铝合金的弹性模量为 70GPa, 而环氧塑料的弹性模量分散度较大, 一般在 3GPa 以下。

实验是在暗室中具有隔振性能的光测实验平台上进行的, 加载装置是一个螺旋丝杠加力架。载荷值由加力架上应力环的百分表读取。

2 实验现象及其分析

本文给出了两种界面裂纹形式的实验结果。对于 No.2 试件进行的是带界面下边裂纹长 2.36mm 的单边裂纹剪切实验。图 4 是 No.2 试件载荷 $P=712\text{N}$ 时界面附近区域的 N_x 、 N_y 条纹图 (即 U 场和 V 场) 从界面附近区域的条纹分布可以看出: N_x 条纹基本上是水平的, N_y 条纹基本上是竖直的, 界面上呈现出受剪切作用的特征。界面下部由于有预制裂纹存在, 因此条纹走向稍有差别, 在界面上部, 环氧塑料一侧的 N_x 条纹密度较高, 但与铝合金的 N_x 条纹仍是连续的, 说明尚未产生裂纹; 试件下部的界面两侧 N_x 条纹连续, 说明虽有预制裂纹但尚未张开, 对于 No.1 试件的实验是分两次进行的, 第一次实验加至 498N ($P/P_f=64\%$, P_f 为断裂载荷), 这时界面上部发生了 N_x 条纹的不连续现象, 经测量出现了 0.84mm 的裂纹, 当载荷低于 498N、界面上部未出现裂纹以前, 其 N_x 、 N_y 条纹分布与图 4 是很类似的, No.1 试件第一次实验加至 498N 后部至零, 放置两天又对其进行界面剪切实验, 由此可知, 对于 No.1 试件进行的是带双边裂纹的界面剪切实验, 而对 No.2 试件进行的是带单边裂纹的界面剪切实验。

由图 4 表示 V 场的 N_y 条纹图可以看出, 界面左侧比右侧的条纹密很多, 这说明两种材料在 y 方向的位移值相差很大; 而在界面上两种材料没有张开的部位, 其条纹均是连续的、位移值是相等的。造成界面左侧条纹密的原因是由于界面左侧的材料是环氧塑料制成的, 弹性模量很低, 大约只有界面右侧铝合金材料弹性模量的 5%。在图 4 中 N_y 条纹图的右下方还可看到加点处的 N_y 条纹分布没有任何异样, 与远离加点处的 N_y 条纹分布基本相同, 这说明界面右侧出现的 N_y 条纹基本上是铝合金的刚体位移, 而铝合金本身变形很小。 N_y 条纹图左上和右下的阴影是入射光被图 2(b) 的 B 、 C 点加载圆棒遮挡造成的。

为了根据式 (5) 和图 4 得到界面层表面的剪应变分布, 首先在图 4 的 N_x 条纹图上找到零级条纹, 零级条纹以上的条纹级数为负值表示受压, 零级条纹以下的条纹级数为正值表示受拉。 N_x 条纹级数沿 y 方向是递减的, 所以 $\Delta N_x/\Delta y$ 为负值; 对 N_y 条纹图的分析可知, 图 2(b) 的 A 点是固定的, 此处对应的必定是零级条纹, 图 2(a) 的 B 点向下位移最大, 形成的条纹级数是最低的 (负值最大), 对于界面附近区域 (图 2(a) 的 B 、 C 点之间), N_y 沿 x 方向是递增的, 因此 $\Delta N_y/\Delta x$ 是正值。在上述分析的基础上对 No.1 和 No.2 试件的 N_x 、 N_y 条纹图进行了人工图像处理得到了两种试件界面表面的 γ_{xy} 分布见图 5。图 5 中 No.2 试件的 γ_{xy} 沿界面分布曲线与

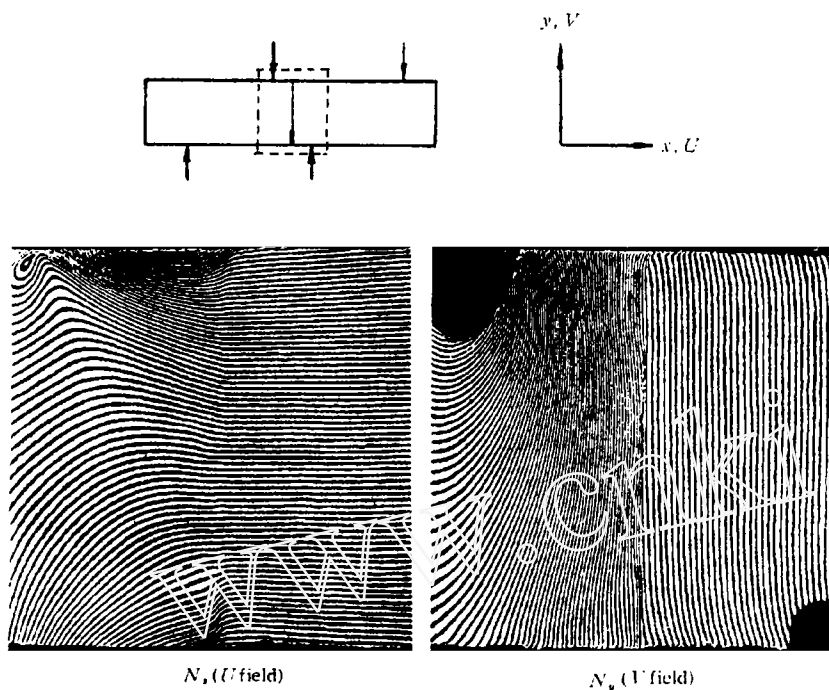


图 4. No.2 试件的 N_x 、 N_y 条纹图, $P = 712\text{N}$ ($P/P_f = 89\%$, P_f 为断裂载荷), $p = 0.417\mu\text{m}$, 照片为图示虚线框内条纹分布

Fig.4 N_x and N_y fringe patterns for specimen No.2 at load $P = 712\text{N}$ ($P/P_f = 89\%$) $p = 0.417\mu\text{m}$, pictures show the area within the dashed lines

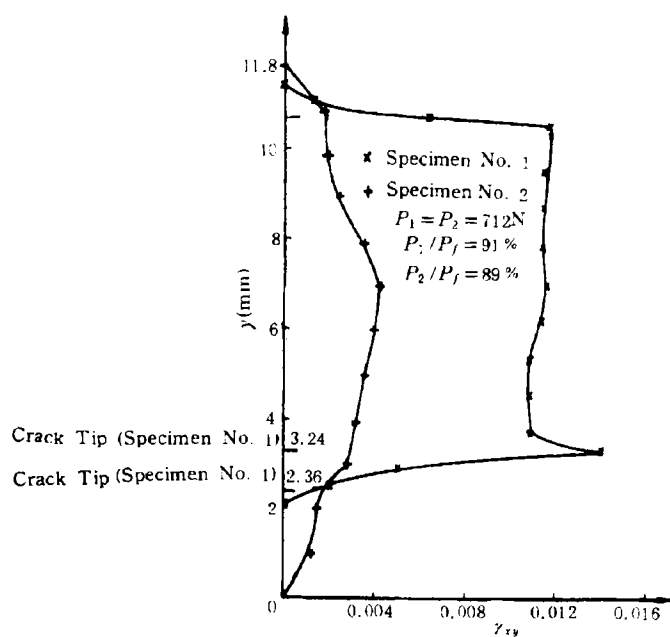


图 5 No.1、No.2 试件的 γ_{xy} 分布
Fig.5 Shear strain distribution along the interface

均质或复合材料无边界裂纹试件的剪切试验结果相似, 这是因为 No.2 试件进行剪切试验时下部预制裂纹没有张开的原因. No.1 试件的 γ_{xy} 沿界面分布曲线显示了双边裂纹界面剪切的实验结果. 界面受剪比较均匀, 只是在下部裂尖处 γ_{xy} 值较大, 形成奇异点.

判断界面上预制裂纹是否扩展, 界面上是否有新裂纹萌发, 这从 N_x 条纹的变化是比较容易看清楚. 若试件受载后两种材料的界面结合完好时, 界面上的 N_x 条纹是连续的, 例如图 4 的 N_x 条纹图, 若试件受载后产生了裂纹或由于预制裂纹两侧材料的张开而位移不连续, 则会产生 N_x 条纹的间断现象, 图 6 给出了 No.1 试件在 6 级载荷下试件上边缘附近区域裂纹萌发和扩展的情况, 图 7 给出了试件界面下部预制裂纹随载荷增加而变化的情况, 裂纹在最边缘处根本就未张开, 裂尖至裂纹最边缘 (界面最下部的边缘) 的区域, 裂纹张开位移随载荷的增加而增加, 也就是说裂纹面接触区随载荷增加而减小, 这说明有弯矩存在. 图 8 给出了 No.1 试件界面上部裂纹扩展随载荷变化的曲线, 图 9 为 No.1 试件界面上边缘张开位移随载荷变化的曲线.

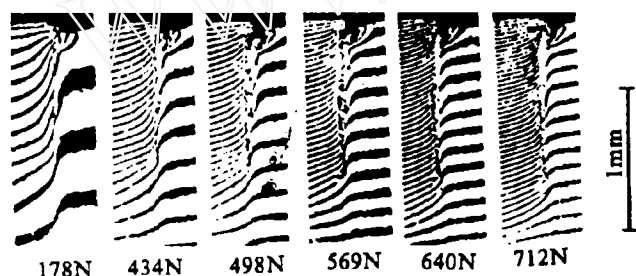


图 6 No.1 试件上边缘附近区域裂纹扩展的 N_x 条纹放大照片
Fig.6 Sequence of N_x fringe patterns at different loads shown the crack propagation near upper boundary of specimen No.1

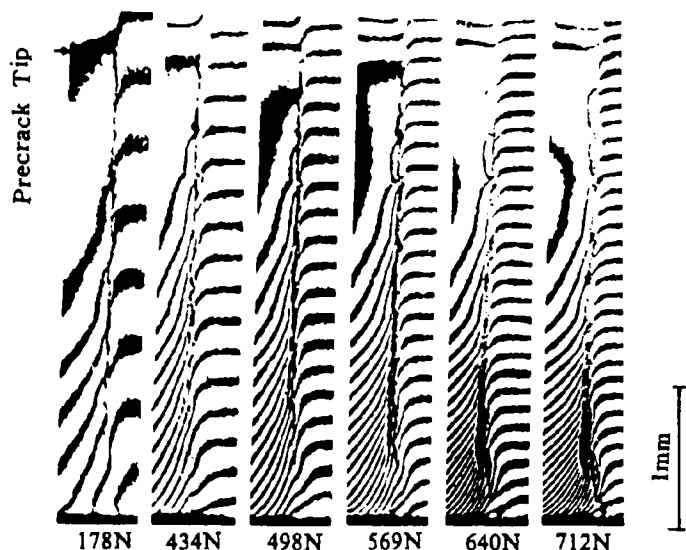


图 7 No.1 试件界面下部预制裂纹附近区域的 N_x 条纹放大照片
Fig.7 Sequence of N_x fringe patterns at different loads in the vicinity of precrack near lower boundary of specimen No.1

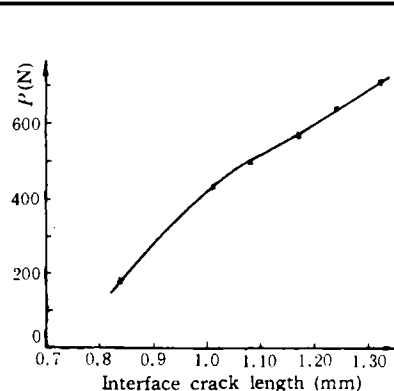


图 8 No.1 试件界面上边缘扩展
裂纹长度变化曲线

Fig.8 Interface crack propagation curve
near upper boundary of specimen No.1

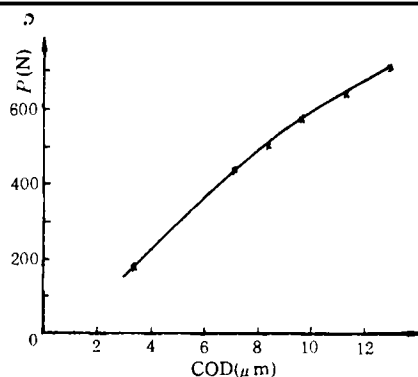


图 9 No.1 试件界面上边缘
张开位移曲线

Fig.9 Interface crack opening displacement
curve near upper boundary of specimen No.1

若以 No.1 试件界面下部预制裂纹的裂尖为零位移参考点, 则可以测量出预制裂纹区域内环氧塑料相对于铝合金材料在 y 方向的相对位移分布曲线, 如图 10 所示.

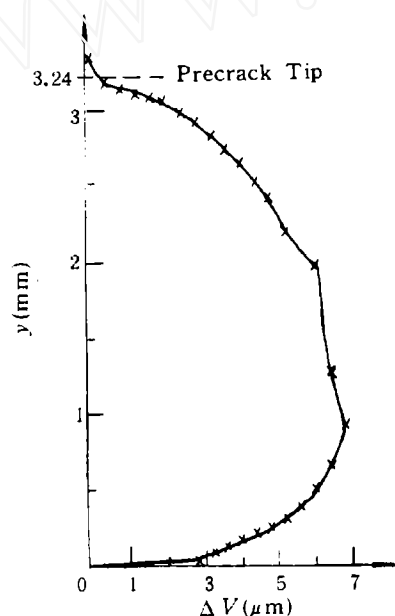


图 10 No.1 试件下边缘至裂尖界面层两边材料相对位移分布 ($P=712\text{N}$)

Fig.10 Interface crack sliding displacement along the precrack near lower boundary of specimen No.1

3 结果和讨论

(1) 通过两种含界面裂纹的剪切实验得到的 N_x 、 N_y 条纹图及对测量数据分析的结果表明, 本文给出的界面剪切实验装置对于测量界面剪应变分布是行之有效的.

(2) No.1 试件的实验表明: 试件界面含下部预制裂纹在进行界面剪切实验时, 界面下部除了受剪之外, 还受弯矩压缩作用, 预制裂纹不会完全张开, 也不会扩展. 载荷达到一定数值时, 界面上部产生新裂纹, 且随载荷增加而扩展, 直至在界面层发生断裂. 预制裂纹面存在着相当大的接触区, 而在裂尖附近, 裂纹面是张开的.

(3) 环氧塑料材料的性能除了与固化剂的种类和配比有关以外, 还与试件制成后存放时间的长短有关. No.1 试件存放了 1 个月, No.2 试件存放时间为 8 个月. 由于 No.1 试件存放时间相对较短, 固化不充分, 因此在 498N 载荷不算很高的情况下, 界面上部就产生了新裂纹, 卸载两天后重新实验时, 界面上部裂纹还稳态扩展; 而 No.2 试件在载荷为 712N 时, 界面上部才出现产生新裂纹的征兆, 继续加载至 800N 时只拍摄了 N_y 条纹图后试件就突然在界面层断裂了.

(4) 本文给出的两种试件的界面剪切实验其试件的破坏形式基本上是相同的. 本文作者也进行过界面上部含预制裂纹的剪切实验, 其结果仍是上部预制裂纹扩展而使试件在界面层发生断裂, 由此可以推断不含预制裂纹的界面剪切实验, 其试件破断过程亦是界面上边缘先产生裂纹后不断扩展而导致断裂.

(5) 由图 4 可以看到试件界面的上、下边缘附近区域, 界面略有弯曲, 这是铝合金材料表面磨光时造成的.

(6) 本文的实验装置虽不及文献 [2] 使用的 Losipesou 剪切实验装置考究, 但是本文的剪切装置具有简单、经济和实用的特点. 如果在图 3 所示的, 含有加载圆柱的上、下压块左、右两边各装置一条滑轨, 使上、下压块只能上下滑动而不左右转动, 则这套剪切实验装置就更完善了.

致谢: 清华大学戴福隆教授提供了光栅和多方面的帮助; 高振芝同志参加了实验及试件制备, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Post D, et al. *Experimental Mechanics*, March 1992: 38-41
- 2 Xing YM, et al. *Composites Science and Technology*, 1993, 47: 251-259
- 3 Dai Fulong, et al. *Optics and Laser in Engineering*, 1990, 12
- 4 Post D, et al. NASA Contractor Report No. 3844, 1984
- 5 Han Jinhu, et al. *Acta Mechanica Sinica*, 1991, 7(4): 376-382
- 6 欧阳国恩. 实用塑料材料学. 国防科技大学出版社. 1991

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON INTERFACE SHEAR

Han Jinhu Mao Tianxiang Wang Tzuchiang

(LNM, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper the Moire Interferometry was used to investigate the interface shear behavior of four point shearing beam of bi-material with edge crack in the interface. Bi-material beam is composed of aluminum and epoxy. The shear strain distribution along the interface and the U and V displacement field adjacent to the interface are obtained.

Key words Moire Interferometry, Interface, Shear Strain, Displacement Field