

文章编号: 1001-4888(2010)04-0379-07

压缩剪切测试中载荷传递行为的数字光弹性研究

雷振坤*, 周降龙

(工业装备结构分析国家重点实验室 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 116024)

摘要: 结合光弹性四步彩色相移法, 提出改进的六步相移法来计算全场剪应力, 对径压缩圆盘实验证实了该方法的正确性, 并进一步研究了同质材料连接结构在压缩剪切测试中的层间剪切行为。实验结果表明: 全场等色线条纹级数和剪应力连续分布且随载荷而增加; 中线附近剪应力趋于零, 而条纹级数为峰谷。在连接界面上的条纹级数和剪应力出现峰值, 特别是在连接界面端部为最高, 在最大载荷下可分别达 3.5 级和 2.4 MPa, 是导致连接界面脱粘开裂的危险区域。连接结构通过层间剪应力进行应力传递, 在连接界面上剪应力与外载基本保持平衡。

关键词: 压缩剪切测试; 层间剪切; 应力传递; 数字光弹性

中图分类号: O348.1; O438

文献标识码: A

0 引言

在航空和机车工程中经常会遇到如螺栓连接、榫连接和焊接等各种连接结构, 设计有效的连接形式需要考虑这种连接的强度和载荷传递性。在这些常见的连接中主要的缺点是容易在连接位置出现高的应力集中区, 导致螺栓、榫头和焊缝等连接件受到剪切作用而发生失效破坏^[1-2]。剪断破坏模式是在航空结构中需要考虑的失效方式, 是由于不恰当的材料选择和连接方法所导致的, 需要工程师们能够在设计阶段预测这些连接的强度和失效载荷^[3-4]。

螺栓连接失效与螺栓孔附近的局部应力场有关, 受到作用面积和施加载荷的控制。通常使用单剪测试和双剪测试来评价连接件的抗剪能力, 如图 1 所示, 它们分别具有一个和两个剪切面。在这些剪切强度测试实验中, 通常假设剪应力在剪切面上均匀分布, 那么单位剪切面积上的剪切极限载荷就定义为剪切强度。可见, 剪切强度是一个平均值, 不能反映剪切面上的剪应力分布细节。因此, 为了保证整个连接的安全, 准确地强度预测要求得到剪切面上详细的载荷分布以及载荷传递机制。



图 1 连接件剪切强度的典型测试方法, (a) 单剪测试和 (b) 双剪测试

Fig. 1 Typical tests for shear strength of joint, (a) single shear and (b) double shear

通过数值分析可以得到连接的载荷分布, 但是目前还缺少能直接测量应力分布的实验技术。应用广泛的应变片测量是典型的逐点测试技术, 难以测量连接结构剪切面上的应力分布细节。更加吸引人

* 收稿日期: 2010-02-28; 修订日期: 2010-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972047)和工业装备结构分析国家重点实验室项目

通讯作者: 雷振坤(1973-), 副教授, 主要从事现代光测力学及图像处理等方面的研究。E-mail: leizk@163.com

的方法是能直接应力可视化光弹性方法,它是最直观的应力测量和观测手段^[5-6]。将光弹性原理与计算机图像处理技术相结合的数字光弹性方法,用来获取全场等色线和等倾线参数^[7-9]和自动化分离应力^[10-11],已经在力学问题中得到了应用。

然而,目前的自动化光弹性分析技术得到的等倾角属性具有“不一致性”。例如,基于白光平面偏振场的五步彩色相移法所确定的等倾角同时包含了第一和第二主应力方向区域^[12]。正是由于这种等倾角属性的“不一致性”,会造成等色线包裹相图出现“失真”,这会导致接下来的去包裹过程出现错误^[13-14]。更引人注目的工作,是基于白光平面偏振场的四步彩色相移法,只需 4 幅图像基本上完成了主应力方向的判断^[15]。

本文结合四步彩色相移法和六步相移法,提出一种全自动确定全场剪应力的方法,使用对径压缩圆盘实验来验证方法的可行性,并进一步测量了的同质结构在压缩剪切测试中的全场应力分布,探讨了这种压缩剪切测试中的载荷传递行为。

1 数字相移光弹性法

实现光弹性应力分析自动化有两个关键点,一是确定等色线的全局级数及各点的等倾角,二是判别等倾角的属性,即定出第一(或第二)主应力方向^[12]。本文里规定第一主应力方向与水平参考轴夹角作为第一主应力方向角,其范围在 $(-\pi/2, \pi/2]$ 。

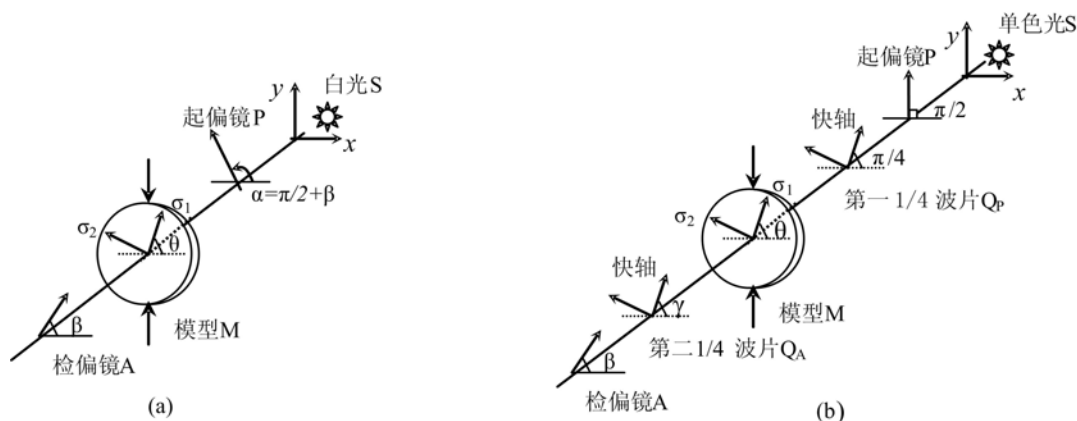


图 2 (a) 旋转 β 角的正交平面偏振光场和 (b) 检偏镜和第二 1/4 波片为任意角的一般圆偏振场

Fig. 2 (a) Normal plane polariscope at rotation with angles of β and

(b) general circle polariscope with arbitrary analyzer and second quarter waveplate

1.1 四步彩色相移法

如图 2(a) 所示为旋转 β 角的正交平面偏振光场, α, β 分别为起偏镜和检偏镜与参考轴 x 夹角, 且 $\alpha = \pi/2 + \beta$, δ 和 θ 分别为模型任一点相位差和第一主应力 σ_1 与参考轴 x 夹角。当同步旋转角度 β 分别为 $0, \pi/8, \pi/4$ 和 $3\pi/8$ 时对应的相移公式为^[15]:

$$\theta = \pi/8 - 0.25 \tan \left[\frac{J_1 - J_3}{J_2 - J_4} \right], \quad \sin \delta \neq 0 \quad (1)$$

在白光入射下, 上式各光强分别为 RGB 颜色模型中的红、绿、蓝灰度的平均值, 即 $J_i = (J_{ir} + J_{ig} + J_{ib})/3, i=1, 2, 3$ 。

上述相移公式可得到 $[0, \pi/4]$ 范围内的等倾角, 并且可以扩展成 $[0, \pi/2]$ 或 $(-\pi/4, \pi/4]$ 范围。等倾角属性自动判别实际上是一个去包裹过程, 即将上述范围的等倾角扩展到 $(-\pi/2, \pi/2]$ 范围的角度 θ_u 。基本思路是先得到 $(-\pi/4, \pi/4]$ 范围等倾角中 $(-\pi/8, \pi/8]$ 区域, 剔除各向同性点区和应力集中区后, 找到“非各向同性区”面积最大者的边界各点并按平均偏差从小到大排列作为“种子点”; 接着以“种子点”为中心, 使用 3×3 检测窗口按一定判断条件进行去包裹; 最后处理各向同性点和应力集中区^[15]。执行上述过程之后, 最终得到 $(-\pi/2, \pi/2]$ 范围 θ_u 分布是其中一个主应力方向的去包裹结果。

1.2 改进的六步相移法

如图2(b)所示为一般圆偏振场光学系统,起偏镜和第一 $1/4$ 波片与参考轴 x 夹角分别为 $\pi/2$ 和 $\pi/4$,检偏镜和第二 $1/4$ 波片与参考轴 x 夹角分别为 γ 和 β 。采用单色光入射时,分别采集特定 γ 和 β 角度配置下的六幅图像可得六步相移公式为^[16]:

$$\theta = 0.5 \tan^{-1} \left[\frac{I_5 - I_3}{I_4 - I_6} \right], \text{ 且 } \sin \delta \neq 0 \quad (2)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{(I_5 - I_3) \sin 2\theta + (I_4 - I_6) \cos 2\theta}{I_1 - I_2} \right] \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} I_5 - I_3 = -I_a \sin \delta \sin 2\theta \\ I_4 - I_6 = -I_a \sin \delta \cos 2\theta \\ I_1 - I_2 = -I_a \cos \delta \end{cases} \quad (4)$$

且 I_a 为调制光强。由式(2)可得到 $(-\pi/4, \pi/4]$ 范围内的等倾角,由式(3)能得到 $[-\pi, \pi]$ 等色线包裹相图。

由于等倾线属性的“不一致”会造成等色线包裹相图出现“失真”。为了避免这个问题,使用四步相移法经过等倾角属性判别后的 $(-\pi/2, \pi/2]$ 范围主应力方向角 θ_u ,来代替六步相移法公式(3)中存在的“不一致性”的等倾角 θ ,即公式(3)改进为:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{(I_5 - I_3) \sin 2\theta_u + (I_4 - I_6) \cos 2\theta_u}{I_1 - I_2} \right] \quad (5)$$

经过改进的六步相移法可完全避免等色线包裹相图出现“失真”,有利于接下来的去包裹处理。

1.3 自动确定全场剪应力

使用四步相移法和等倾线属性判别后得到全场 $(-\pi/2, \pi/2]$ 范围主应力方向角 θ_u 分布,再使用改进的六步相移法得到等色线包裹相图和去包裹相位 δ_u 后,就可以方便地计算全场的剪应力 τ ,即^[17]:

$$\tau = \frac{\delta_u f_\sigma}{4\pi t} \sin 2\theta_u \quad (6)$$

其中, f_σ 为材料的条纹值, $\text{N}/(\text{mm} \cdot \text{条})$; t 是模型的厚度, mm 。

1.4 方法的精度及限制

数字相移光弹性技术不同于经典的光弹性法,通过数字相机拍摄10幅图像,使用4步和6步相移法可获得相应的全场光弹性参数。这种方法还适合研究广泛的光弹性材料在弹性荷载范围内的界面力学问题,其精度依赖于数字相机硬件的分辨率,以及等色线和等倾线的去包裹算法等。本方法仅限于准静态光弹性实验,而将高速记录设备与积分相移法结合^[18],可为动态数字光弹性法解决实时数据测量问题提供了可能的手段。

2 实验验证

使用具有理论解的对径压缩圆盘实验来检验本方法的正确性,环氧树脂圆盘半径 $R=60\text{mm}$,厚度 $t=8\text{mm}$,对径压力为 $P=784\text{N}$,材料条纹值为 $f_\sigma=13.0\text{N}/(\text{mm} \cdot \text{条})$ 。四步相移法和六步相移法计算所用的对径压缩圆盘光弹性图像,以及四步相移法得到的 $(-\pi/4, \pi/4]$ 、 $[0, \pi/4]$ 和 $[0, \pi/2]$ 范围的等倾角相图因篇幅所限没有列出。

图3(a)为经过等倾角属性判别之后得到 $(-\pi/2, \pi/2]$ 范围的等倾角相图,经过改进六步相移法得到 $[0, 2\pi]$ 范围的等色线包裹相图(图3(b))。等色线相图经去包裹处理后,结合公式(6)计算得到全场剪应力结果(图3(c)),圆盘上半部 $y=R/2$ 水平线上的剪应力分布与理论比较结果(图3(d))。除了初应力影响区域之外,实验大部分数据与理论值吻合的很好,表明全场剪应力计算方案的正确性。

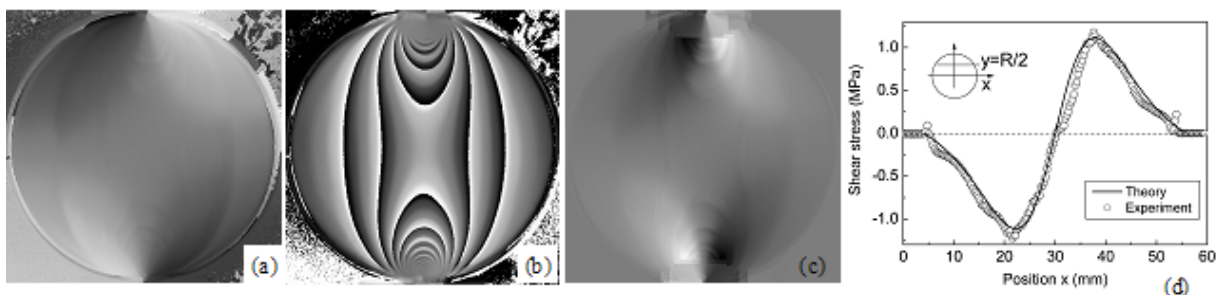


图 3 对径压缩圆盘剪应力计算, (a)等倾线主应力方向相图, (b)等色线包裹相图, (c)全场剪应力和(d)上半部 $y=R/2$ 水平线上剪应力分布与理论比较

Fig. 3 Shear stress calculation of a disk under diametral compression, (a) phase map of isoclinic principal stress direction, (b) isochromatic wrapped phase, (c) whole-field shear stress and (d) comparisons of theoretical solution to the calculated shear stress on horizontal line ($y=R/2$) at upper half disk

3 压缩剪切测试

3.1 光弹性条纹

用环氧树脂制成如图 4(a)所示几何形状的结构试样,当施加垂直压力时,将会在剪切面(AB 和 CD 线)附近区产生剪切作用,即为双剪测试。结构试样厚度为 8mm,材料条纹值同上,施加压力大小分别为 176.4N、352.8N、529.2N 和 705.6N,对应的光弹性条纹如图 4(b-e)所示。

除了加载应力集中外,剪切面上的条纹随载荷逐渐增密,由于偏压导致左右剪切面附近的条纹级数并不对称(右侧大于左侧)。在剪切面的 4 个端部(A、B、C、D)条纹较密,都是可能导致开裂的危险区域。

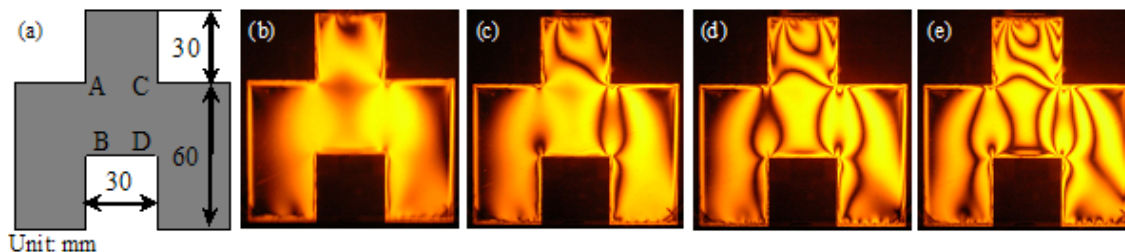


图 4 (a)试样几何形状,不同载荷下等色线条纹图, (b) 176.4N, (c) 352.8N, (d) 529.2N 和(e)705.6N

Fig. 4 (a) Geometric shape of specimen, and isochromatic patterns under different load levels of (b) 176.4N, (c) 352.8N, (d) 529.2N and (e) 705.6N

对于细节分析,使用改进六步相移法得到的去包裹后全场等色线级数分布。图 5(a)为穿过剪切面中部水平线 OX 上的条纹级数随载荷而增加,在剪切面处级数出现峰值,由于偏压导致右侧剪切面附近的级数大于左侧的。以最大载荷为例,由于偏压导致右侧剪切面 CD 附近的级数(约 2.4 级)大于左侧 AB 界面的(约 1.5 级),说明右侧剪切面 CD 容易出现开裂。

图 5(b)进一步给出了右侧剪切面上的条纹级数分布曲线,条纹级数连续分布且随载荷而增加,在端部 C 和 D 处级数最高,对于最大载荷时可达 3.5 级附近,是最容易出现开裂的位置。由于剪切面端部条纹较密而无法成功去包裹,因此无法得到端部的最大级数。

3.2 全场剪应力

结合四步彩色相移法和等倾角属性判别方法后,可得到不同载荷下试样的全场剪应力分布,如图 6 显示。在中线附近剪应力趋于零,在两侧符号相反;在剪切面 AB 和 CD 附近出现了剪应力山谷和山峰,表明这里的剪应力达到极值。

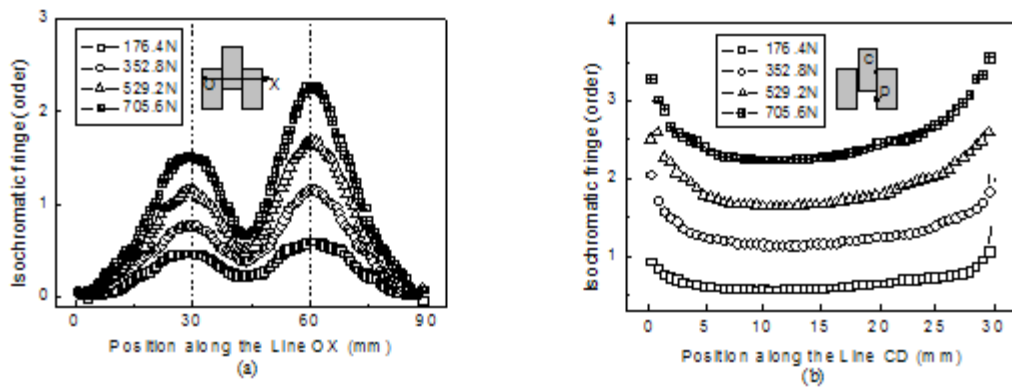


图5 不同载荷下的等色线级数分布,(a) 水平线和(b) 右侧剪切面

Fig. 5 Isochromatic fringe distributions under different load levels along (a) horizontal line and (b) right-side shear plane

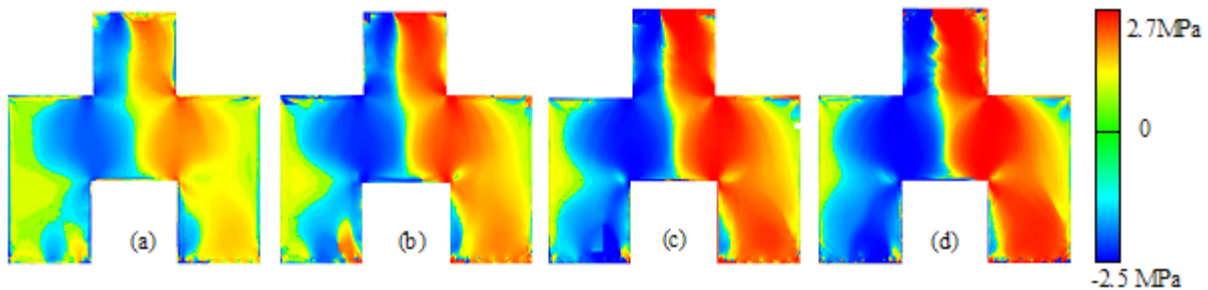


图6 不同载荷下结构的全场剪应力,(a) 176.4N,(b) 352.8N,(c) 529.2N和(d)705.6N

Fig. 6 Whole-field shear stress under different load levels, (a) 176.4N, (b) 352.8N, (c) 529.2N and (d)705.6N

对于细节分析,图7(a)为穿过剪切面中部水平线 OX 上的剪应力分布,它随载荷而增加且呈反对称分布,在结构中心线附近剪应力为零,表明只有正应力存在。从等式(6)可以看出,剪应力与第一主应力方向角 θ_1 的符号保持一致,即任意截面上的剪应力以逆时针旋转为正。

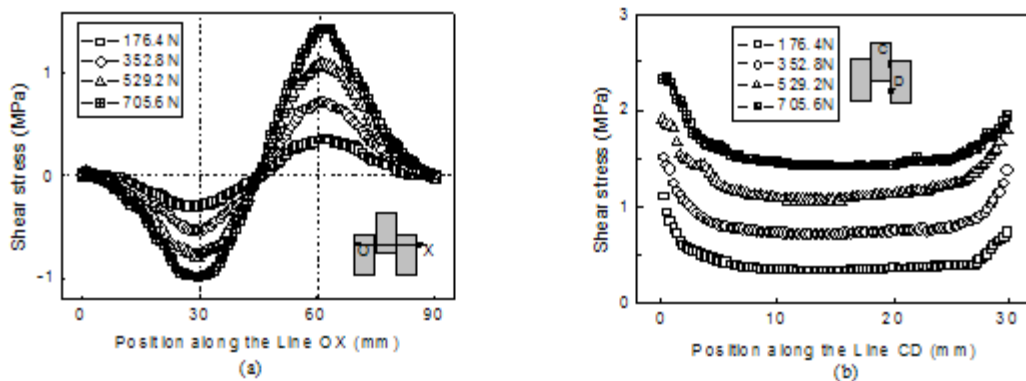


图7 不同载荷下结构的(a) 水平线和(b) 右侧界面上的剪应力分布

Fig. 7 Shear stress distributions under different load levels along (a) horizontal line and (b) right-side bonding interface

在剪切面处剪应力出现峰值,以最大载荷为例,由于偏压导致右侧连接界面 CD 附近的剪应力(约 1.5MPa)大于左侧的(约 1MPa),进一步说明右侧界面 CD 容易出现开裂。图7(b)进一步给出了右侧剪切面上的应力分布曲线,剪应力连续分布且随载荷而增加,在端部(尤其是 C 处)是最容易出现开裂的位置,对于最大载荷时可达 2.4MPa 附近。因篇幅所限,本文没有给出左侧剪切面上的剪应力分布。

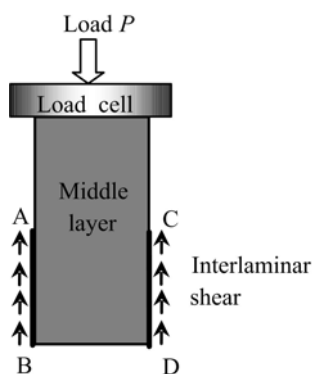


图 8 结构中间层受力图

Fig. 8 Force equilibrium in the middle layer

平均值约为 95.7%。可见,上述结构主要通过层间剪应力进行应力传递,在剪切界面上剪应力与外载基本保持平衡。影响载荷传递效率的主要因素可能有:

(1) 边界条件影响:根据本文结构试样的几何形状和加载条件可知,在剪切面上不仅要承担剪切作用,还要有弯矩作用;此外,偏心加载、载荷分散性和残余应力都会改变应力场分布形式,因此从理论上讲载荷不可能完全由剪应力来传递。

(2) 几何和载荷误差:试样几何形状误差和加载载荷误差都是在实验中无法避免的。

(3) 材料条纹值测量误差:因为等色线条纹具有一定的宽度,一般凭视觉难以准确判断整数级或半整数级条纹是否通过圆盘中心,而且圆盘中心位置的确定也不可避免地存在人为误差,最好采用计算机自动化确定材料条纹常数^[19]。最后,结构模型因厚度引起的三维效应以及加载引起的塑性变形,也在一定程度上影响最后结果。

4 结论

使用改进的数字相移光弹性方法可以计算全场剪应力,对径压缩圆盘实验证实了该方法的正确性,进一步得到压缩剪切测试中完整的条纹级数和剪应力场,其分布连续且随载荷而增加;中线附近剪应力趋于零,而条纹级数为峰谷。在剪切面上的条纹级数和剪应力出现峰值,特别是在剪切面端部为最高,是导致开裂的危险区域。压缩剪切测试结构是通过层间剪应力进行应力传递,在剪切面上剪应力与外载基本保持平衡。

致谢:感谢国家自然科学基金项目(10972047)和工业装备结构分析国家重点实验室项目的支持。

参考文献:

- [1] Barnes R A, Baglin P S, Mays G C, Subedi N K. External steel plate systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structure*, 2001, 23(9): 1162—1176.
- [2] Khashaba U A, Sallam H E M, Al-Shorbagy A E, Seif M A. Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures [J]. *Composites Structure*, 2006, 73(3): 310—317.
- [3] Loh H Y, Uy B, Bradford M A. The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints, Part I — experimental study [J]. *J. of Constructional Steel Research*, 2006, 62(4): 378—390.
- [4] Loh H Y, Uy B, Bradford M A. The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints, Part II — Analytical study and design appraisal [J]. *J. of Constructional Steel Research*, 2006, 62(4): 391—412.
- [5] Patterson E A. Digital Photoelasticity: principals, practice and potential [J]. *Strain*, 2002, 38(1): 27—39.
- [6] Remesh K. Digital photoelasticity: advance techniques and applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 2000.
- [7] Ajovalasit A, Petrucci G, Scafidi M. RGB photoelasticity: review and improvements [J]. *Strain*, 2010, 46(2): 137—147.
- [8] Kasimayan T, Ramesh K. Adaptive smoothing for isoclinic parameter evaluation in digital photoelasticity [J].

3.3 载荷传递行为

结构中间层受到来自两侧连接界面 AB 和 CD 剪应力作用,如图 8 所示。假设连接结构完全通过层间剪应力进行应力传递,那么在连接界面上的载荷传递效率 Ψ 可写为:

$$\Psi = \left[W \int_0^{L/2} (\tau_{AB} + \tau_{CD}) dx \right] / P \quad (7)$$

其中, τ_{AB} 和 τ_{CD} 是分别是剪切面左右侧的剪应力分布; x 是剪应力分布范围 $[0, L/2]$ 。

通过将左右侧剪切面的剪应力分别进行多项式拟合,结合公式(7)积分进行平衡校核,不同载荷下的载荷传递效率分别为 99.5%、97.8%、95.3% 和 90.3%,

- Strain. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00619.x.
- [9] Zhang D S, Han Y S, Zhang B, Arola D. Automatic determination of parameters in photoelasticity [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(8): 860—867.
- [10] Ashokan K, Ramesh K. An adaptive scanning scheme for effective whole field stress separation in digital photoelasticity [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(1): 25—31.
- [11] Fernandez M S B, Calderon J M A, Diez P M B, Segura II C. Stress-separation techniques in photoelasticity: a review [J]. *J. Strain Analysis*, 2010, 45(1): 1—17.
- [12] 雷振坤, 云大真, 亢一澜, 邵龙潭. 数字光弹性法综述[J]. *实验力学*, 2004, 19(4): 393—402 (Lei Z K, Yun D Z, Kang Y L and Shao L T 2004 A review of digital photoelasticity. *J. of Experimental Mechanics*, 2004, 19(4): 393—402 (in Chinese))
- [13] Lei Z K, Yun D Z, Yu W M. Whole field determination of isoclinic parameter by five-step color phase-shifting and error analysis [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2003, 40(3): 189—200.
- [14] Ramesh K, Tamrakar D K. Improved determination of retardation in digital photoelasticity by load stepping[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2000, 33(6): 387—400.
- [15] Pinit P, Umezaki E. Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four-step color phase-shifting technique [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2007, 45(7): 795—807.
- [16] Quiroga J A, Gonzalez-Cano A. Phase measuring algorithm for extraction of isochromatics of photoelastic fringe patterns [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(32): 8397—8402.
- [17] Frocht M M. *Photoelasticity (II)* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1948.
- [18] 雷振坤, 亢一澜, 云大真. 实时确定光弹性参数的积分相移法[J]. *光学技术*, 2004, 30(3): 280—283 (LEI Zhenkun, KANG Yilan, YUN Dazhen. Real-time determination of photoelasticity parameters by integrated phase-shifting method. *Optical Techniques*, 2004, 30(3): 280—283 (in Chinese))
- [19] 雷振坤, 云海. 数字光弹性中材料条纹常数的自动确定[J]. *工程力学*, 2009, 26(12): 40—45 (LEI Zhenkun, YUN Hai, ZHAO Yanru. Automatic determination of fringe constant in digital photoelasticity. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(12): 40—45 (in Chinese))

Study of Load Transfer in Compression Shear Test based on Digital Photoelasticity

LEI Zhen-kun, ZHOU Jiang-long

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An improved six-step phase-shifting method was proposed to calculate the full-field shear stress based on a four-step color phase-shifting method in digital photoelasticity. This method was verified by radial compression of a disk, then further study of interlaminar shear behavior in compressive shear test for connection structure made of homogeneity material was carried out. Experimental results reveal that isochromatic fringe order and shear stress are distributed continuously and increased with compression increasing. However, shear stress goes to zero and isochromatic fringe order decreases to valley-bottom at midline of the specimen. They reach peaks at two compressive shear sections, and especially the maximum values appear at four right-angle edges. It means that the cracking would be happened firstly at those edges. Under the load of 705.6N, the fringe peaks and shear stresses at right-angle edges reach to 3.5 orders and 2.4MPa, respectively. Stress transfer in a connection structure is mainly realized by interlaminar shear, while shear stress is basically balanced with the applied load at connection interface.

Keywords: compressive shear test; interlaminar shear; load transfer; digital photoelasticity