

文章编号:1001-4888(2018)03-0410-09

# 基于三维数字图像相关的低周疲劳试验研究\*

魏良宝, 蒋明

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏苏州 215011)

**摘要:** 为研究三点弯曲试件在低周疲劳载荷作用下, 裂纹萌生、扩展与循环周期间的关系以及裂纹区域位移与应变场的变化规律, 由万能试验机及数字循环加载控制系统对三点弯曲试件施加循环周期载荷。两组 CCD 和试验机同步采集记录系列交变载荷作用下试件裂纹周边区域的数字散斑图像及载荷, 应用三维数字图像相关(Digital image correlation, DIC)技术计算裂纹尖端区域的位移及应变场。通过对裂尖区域位移、主应变等的分析, 获得裂纹扩展长度与扩展率等的变化规律。

**关键词:** 三维数字图像相关; 三点弯曲; 低周疲劳; 裂纹扩展; 裂纹尖端

**中图分类号:** TH113.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-021

## 0 引言

疲劳破坏在结构失效中占到 70% 左右, 结构在交变载荷的作用下, 首先在最薄弱的位置处萌生裂纹, 随着循环次数的增加, 裂纹持续扩展, 直至结构破坏。通常使用连续损伤力学以及断裂力学理论对不同材料及结构形式的构件进行疲劳寿命的研究, 丁智平等<sup>[1]</sup>基于连续介质损伤力学理论研究橡胶类材料疲劳寿命的预测方法, 提出了以等效应变范围为损伤参量的疲劳寿命预测模型; 张莉等<sup>[2]</sup>运用损伤累积理论建立了一种幂指数形式的损伤演化方程, 并由此估算疲劳寿命; 焦晋峰<sup>[3]</sup>基于累积损伤及断裂力学理论对高强螺栓的疲劳寿命进行了估算, 理论分析与试验结果基本吻合; 许忠勇<sup>[4]</sup>提出考虑惯性力作用下的裂纹扩展理论, 认为裂纹扩展之所以在远低于静态断裂临界值  $K_c$  时会发生缓慢的扩展, 是由于没有考虑到惯性效应的作用。任伟星等<sup>[5]</sup>通过试验研究了 35CrMo 合金钢三点弯曲试样疲劳短裂纹的扩展特性; 姚国文等<sup>[6]</sup>以碳纤维薄板(CFL)增强 RC 梁为研究对象, 通过对循环载荷作用下增强梁的三点弯曲疲劳试验研究, 获得了增强梁的线性对数疲劳寿命曲线和跨中挠度的演化规律, 外推得到极限疲劳强度和抗弯刚度的演化规律, 揭示了增强梁的疲劳破坏机理; 唐亮等<sup>[7]</sup>进行了正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验研究, 验证和确定了我国钢桥面板中几类典型细节的疲劳抗力。然而, 结构在疲劳载荷作用下裂纹的萌生与扩展过程机理, 构件在循环载荷作用下, 裂纹扩展区域周边的位移与应变场的变化规律等, 仍然有待进一步的研究。

构件裂纹通常在一个微小的局部区域内萌生和扩展, 常规测量方法(如电测)难以测量, 基于立体视觉的三维数字图像相关技术<sup>[8-10]</sup>, 具有非接触、可精确测量微小区域的位移和应变, 以及全程跟踪记录所测区域等优势, 为研究裂纹扩展的整个过程提供了有效的测量手段<sup>[11]</sup>。曾祥福等<sup>[12]</sup>用高速三维数字图像相关技术测量了动载荷下的三维变形。朱飞鹏等<sup>[13]</sup>基于三维数字图像相关方法, 研究了三种不同加载速率下玻璃纤维增强塑锚杆的拉伸力学性能, 得出螺旋状变截面锚杆的轴向应变呈非均匀分布。

\* 收稿日期: 2017-02-09; 修回日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172193)

通讯作者: 蒋明(1961-), 女, 教授, 博士。主要从事光测力学、振动疲劳研究。Email: jiangming@mail.usts.edu.cn

高红俐等<sup>[14]</sup>运用高速数字图像相关法对 CT 试件在高频正弦交变载荷作用下,裂纹尖端区域位移和应变场的变化进行研究;郝文峰等<sup>[15]</sup>通过数字图像相关方法对纤维-基体界面疲劳力学性能进行研究,表征了纤维-基体界面在压-压疲劳载荷和三点弯曲疲劳载荷作用下的界面残余变形。王骥骁等<sup>[16]</sup>探寻适用于扩展数字图像相关方法的裂纹尖端位移函数,获得了测试计算中影响裂尖位移场表征的主导项。本研究运用三维图像相关技术,对预制缺口的铝合金矩形三点弯曲梁进行全程跟踪低周疲劳试验,研究了裂纹的萌生、发展及快速扩展过程,分析了循环周期下裂纹扩展长度以及裂纹尖端点位移、应变的变化规律;测量了裂纹周边微小区域的位移场和应变场。

### 1 三维数字图像相关基本原理

三维数字图像相关技术是基于双目立体视觉原理和数字图像相关匹配技术的三维变形测量方法。如图 1 所示,由两个互成一定角度的相机同步记录制有人工散斑的试件表面,运用图像相关方法分析计算左右相机记录的散斑图像,获得以被测点为中心的图像子区在左右散斑图像中对应的位置,根据相机标定获得左右相机的内外参数,建立空间几何关系,从而实现试件表面的三维重建<sup>[17]</sup>。

用来比较图像变形前后子区域相似程度的相关函数为<sup>[18]</sup>

$$C_{f,g} = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - \bar{f}] \times [g(x',y') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - \bar{g}]^2}}$$

其中,  $f(x,y)$ ,  $g(x',y')$  分别为图像子区变形前后的灰度值;  $\bar{f} = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y)]^2$ ,  $\bar{g} = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y')]^2$  分别为参考图像子区和目标图像子区的灰度平均值。

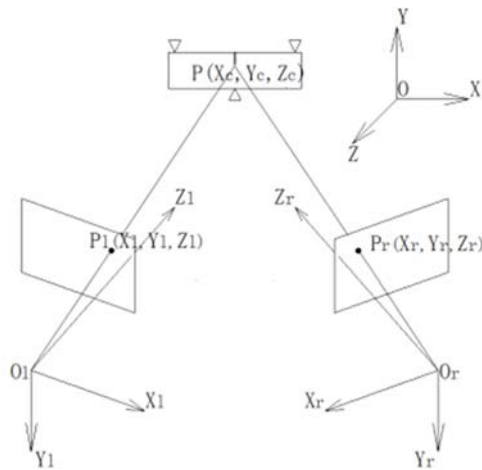


图 1 三维数字图像相关测量原理图  
Fig. 1 3DIC measurement schematic

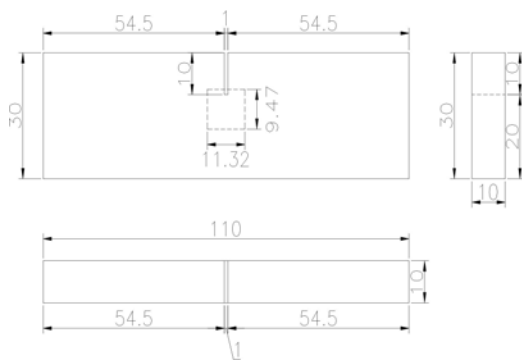


图 2 试件几何尺寸  
Fig. 2 Specimen geometry

### 2 试验概况

如图 2 所示,试件由 6061 铝合金材料制作,尺寸为 110mm×10mm×30mm,试件中部预制一贯穿缺口,尺寸为 10mm×1mm×10mm。在试件一侧测量区域表面制作人工散斑。

试验装置主要包括载荷加载控制系统和三维图像相关测量系统(图 3)。其中加载控制系统由万能试验机、数字循环加载控制器、三点弯曲加载装置及试件构成;三维图像相关测量系统由两组分辨率为 2045×2045 像素的 CCD 和 75mm 镜头(配套 60mm 接圈)、同步采集控制器及测量分析软件等组成。

由万能试验机和加载控制系统给试件加载,并在循环加载过程中同步采集两组 CCD 图像与试验机力值<sup>[19]</sup>。力控制的加载制度如图 4 所示,力值范围为 3~13kN,此范围高限由三点弯曲试验的 90% 极限载荷(14.5kN)确定,加载速度为 400N/s。CCD 图像采样频率为 1 对/秒,视场范围为 11.32mm×9.47mm;图像相关计算子区大小设定为 21×21 像素,计算网格步长为 11×11 像素,计算精度为 50 $\mu\epsilon$ 。

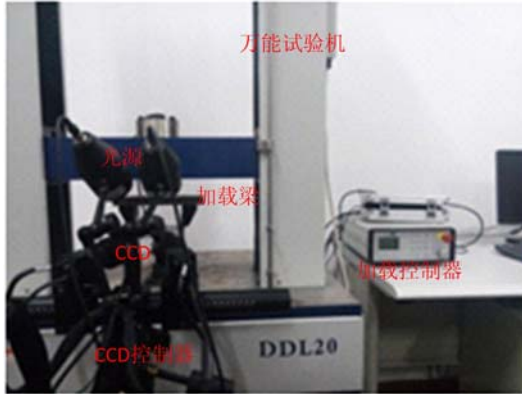


图 3 试验装置  
Fig. 3 Test setup

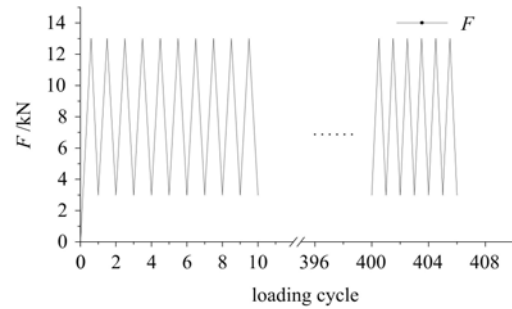


图 4 加载制度  
Fig. 4 Loading protocol

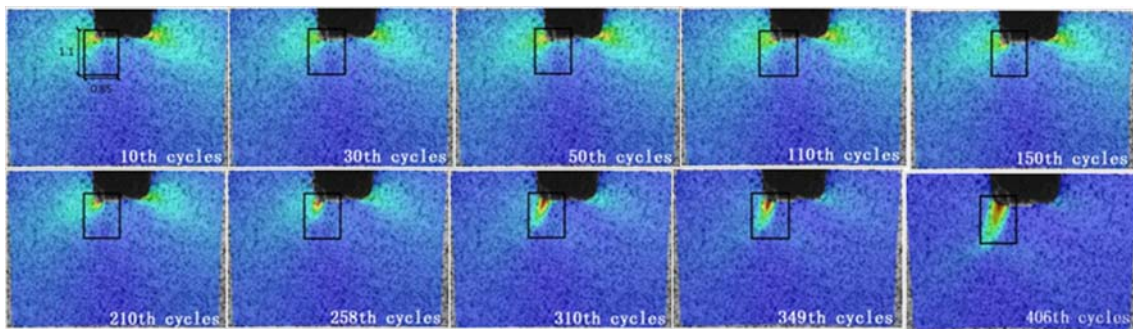


图 5 疲劳加载周期段对应的最大加载力时裂纹区域主应变云图

Fig. 5 The main strain cloud of the crack region at the maximum loading force during the fatigue loading period

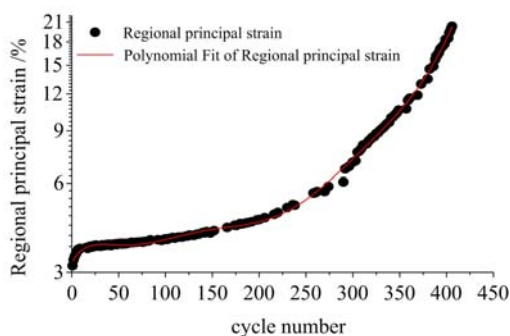


图 6 平均主应变与循环周期间的关系曲线  
Fig. 6 The relationship between the average principal strain and the number of cycles

### 3 试验结果分析

图 5 为疲劳试验全过程在不同循环周次最大加载力时裂纹区域的主应变场云图。在试件循环加载前 30 周期,无明显裂纹,从主应变分布可以预测到裂纹可能的位置以及扩展方向;随着循环加载的继续,大约循环加载到第 30 个周期时,试件预制缺口处出现一条斜向的细裂纹;继续循环加载,裂纹越来越明显,由细裂纹逐渐演变成开口的短裂纹,裂纹周边应变明显增加,从图 5 中第 310 个周期主应变云图中,可看到一条明显的开口短裂纹;随后由于裂纹开口位移角的出现,应变集中区域越来越大;在加载

的情况下,裂纹扩展迅速加快,直到试件沿 135° 裂纹扩展方向形成剪切唇断口破坏,当循环加载到 406 个周期时,裂纹扩展达到 0.5mm。

#### 3.1 裂纹区域平均主应变的变化规律

根据试件最终裂纹扩展的长度与宽度,在裂纹周边选取大小为 0.85mm×1.1mm(图 5)的区域,计算此区域在整个循环过程的平均主应变值,图 6 为计算结果。由主应变曲线的变化规律,将整个疲劳试



验分为三个阶段：第一阶段(约 15 个循环周期数)，疲劳加载初期，在裂纹未出现之前，曲线呈快速上升趋势，为裂纹萌生阶段；第二阶段，裂纹缓慢扩展阶段，整个阶段约 250 个循环周期，主应变曲线呈缓慢上升趋势，此阶段由于裂纹的出现，导致区域应变能增速下降，从而使得塑性应变累加减缓；第三阶段，将主应变曲线快速上升的最后 140 个循环周期定义为裂纹快速扩展阶段，此时随着裂纹的扩展，开口位移角增大，裂纹区域应变集中更加明显，导致塑性应变累加增速。

### 3.2 单个循环周期内试件裂纹尖端区域位移、应变场

在裂纹萌生、裂纹缓慢扩展以及裂纹快速扩展阶段，分别选取四个周期段(第 10、110、310 及 403 个周期)，每一个加载周期段共采集 11 对图像，图 7 为每个循环周期段对应的最大、最小加载力时主应变云图，比较第 10、110 两个周期段，预制缺口处主应变的变化区域较小；在第 310 个周期段最大加载力时，裂尖处最大主应变为 46%，主应变沿裂尖方向逐渐减小；而在最小加载力时裂尖处最大主应变值为 29%，裂尖塑性残余应变较大；在第 403 个周期段最大加载力时，裂尖处最大主应变为 123%，相对第 310 个周期段的主应变增大了 167%；最小加载力时，主应变最大值为 93%，相对第 310 个周期段的主应变增大了 221%；随着裂纹的扩展以及开口位移的出现，裂纹的完全闭合效应减弱，裂尖区域主应变与位移的变化也越来越大。

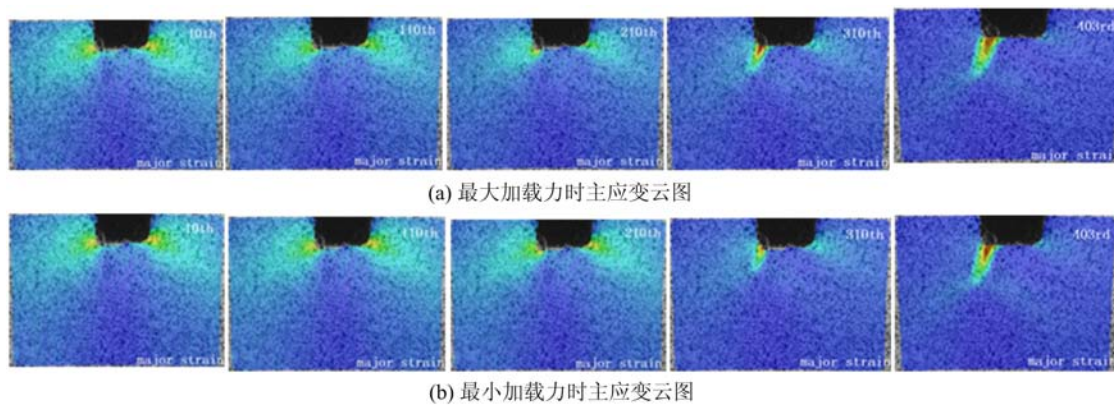


图 7 单个循环周期段对应的最大、最小加载力时主应变云图

Fig. 7 The main strain cloud of a single cycle period corresponding to the maximum and minimum loading forces

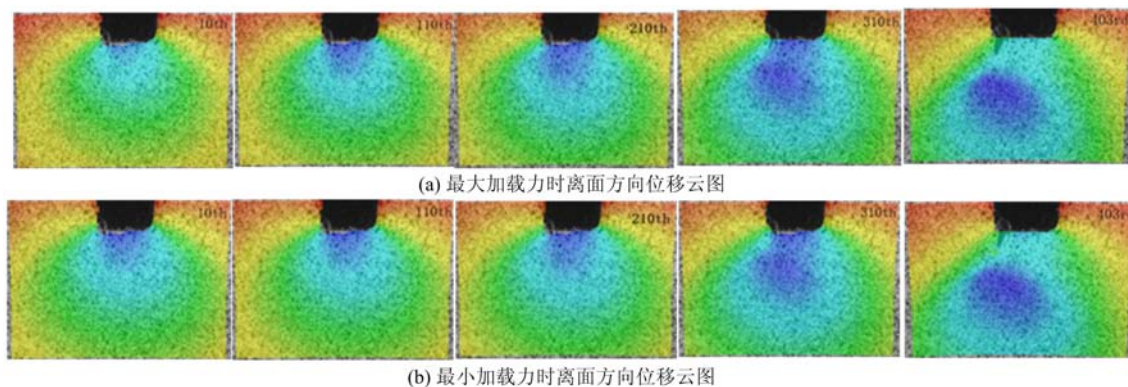


图 8 单个循环周期段对应的最大、最小加载力时离面方向位移云图

Fig. 8 Out of plane displacement cloud of the maximum and minimum loading force corresponding to the single cycle period

图 8 为单个循环周期段对应的最大、最小加载力时离面位移云图，在最大加载力时，预制缺口下方离面位移(图 1,  $z$  方向)较大而沿缺口两侧变化较小；在第 10、110、310 个循环周期段最小加载力下，裂纹处于闭合状态，裂尖位移没有明显变化；在第 403 个循环周期段最小加载力下，离面位移在裂尖一段距离处变化较小，之后变化相对较大。

图 9 为单个循环周期段对应的最大、最小加载力时离面方向应变云图，在第 10、110 个周期段时，预

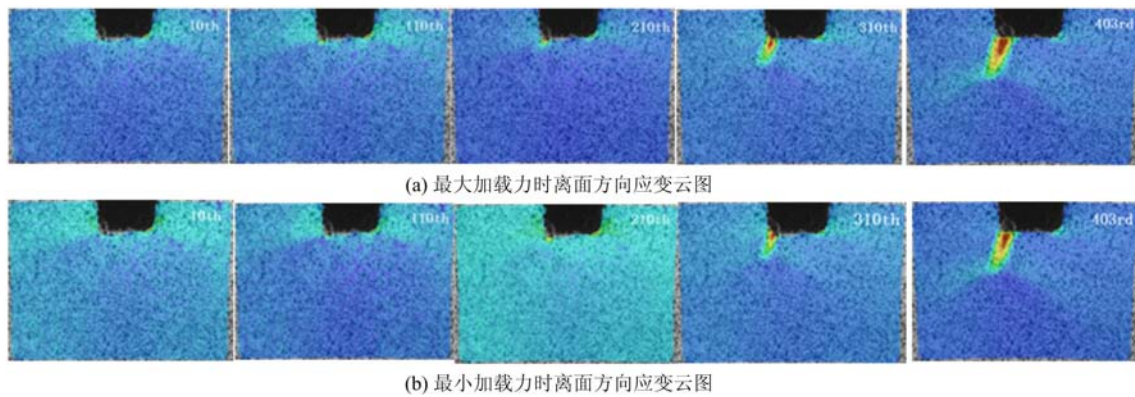


图9 单个循环周期段对应的最大、最小加载力时离面方向应变云图

Fig. 9 Out of plane strain cloud of the maximum and minimum loading force corresponding to the single cycle period. 制缺口处没有明显的离面方向应变;第310、403个周期段,在最大加载力时,离面方向上的应变沿裂纹方向的变化区域逐渐减小;在最小加载力时,虽然也有应变变化区域,但范围很小,基本可以忽略。与图7主应变云图相比,离面方向上应变的变化趋势与主应变的变化趋势一致。

在裂纹尖端附近选取一个点,该点单个周期内加载力、裂纹尖端附近点主应变与时间的变化曲线如图10、图11所示。在一个载荷循环周期内,随着载荷增加到波峰位置,裂纹尖端附近处主应变以及离面位移也达到相应最大值,但由于塑性应变的存在,主应变的变化是非线性的。

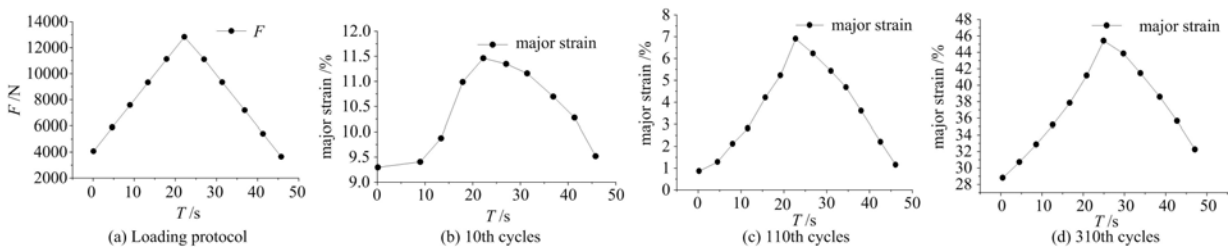


图10 加载力、裂纹尖端附近点主应变与时间的变化曲线

Fig. 10 Curves of the loading force, main strain near the crack tip and time

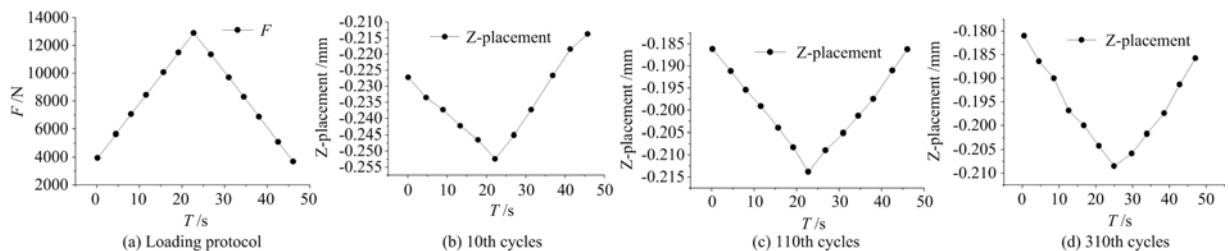


图11 离面方向位移与时间的变化曲线

Fig. 11 Curves of the loading force, out of plane displacement near the crack tip and time

### 3.3 裂纹快速扩展阶段裂纹扩展长度、主应变与离面应变的变化规律

试件在301~406个循环周期即后106个循环周期出现比较明显的裂纹且裂纹扩展较快,选取这106个周期计算了裂纹扩展长度及裂纹扩展速率与循环周期的关系、循环加载过程中裂纹断裂点的主应变变化、裂纹边缘两侧主应变与循环周期期间的变化关系以及单个循环周期段最大加载力时离裂纹尖端不同位置处的应变变化。

图12为裂纹扩展长度与循环周期的关系曲线,裂纹的扩展首先是近似斜直线上升,此段裂纹扩展长度范围为0.285~0.350mm,然后进入曲线式上升阶段,两个阶段的临界循环周期约在第360个周期;图13为裂纹扩展速率与循环周期的关系曲线,前期循环加载中裂纹扩展速率缓慢增加,之后速率加快。



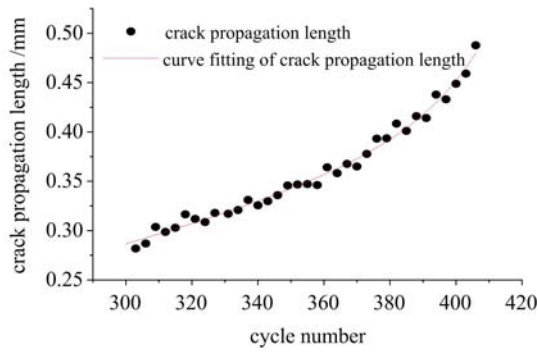


图 12 裂纹扩展长度与循环周期关系曲线  
Fig. 12 Relationship between crack growth length and cycles

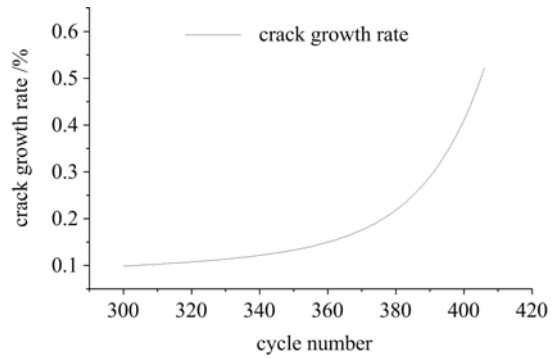


图 13 裂纹扩展速率与循环周期关系曲线  
Fig. 13 Relationship between crack growth rate and cycles

选取裂纹断裂点及边缘左/右侧点(图 14(a)),计算裂纹断裂点周边在 301~406 循环周期内的主应变值,提取其中每个循环周期的最大、最小力值对应的应变值,其变化关系如图 14(b)所示。从图中可知,主应变值随循环周期数的增加呈抛物线式地增长,在前 50 个循环周期(300~350)内,主应变变化幅值基本保持在 7.5% 不变;350 循环周期后,主应变幅值从 7.5% 增长到 20%,由此推论,随着循环加载的继续,最大加载力时裂纹区域对裂纹断裂点的主应变影响较大,主应变增长速度高于塑性主应变累积速度,从而导致主应变幅值变化增大。裂纹边缘左位置处主应变与循环周期数的变化关系见图 14(c),在最大加载力与最小加载力时,裂纹左侧点应变值都随着循环周期数呈曲线式的上升。由最小加载力时应变值的变化可知,在循环加载过程中存在残余应变,并且最大与最小加载力时应变变化幅值保持在一个定值。裂纹边缘右位置处主应变与循环周期数的变化关系见图 14(d),在循环加载前期最大与最小加载力右侧点主应变值随加载次数的变化趋势基本相同,但在 70 个循环周期后主应变值发生变化,变得平缓且波动性较大,在 100 个循环周期之后有快速上升的趋势;主应变幅值在前 70 个循环周期时基本保持在一个定值,但在变化波动较大的时期,应变幅范围有所减小。比较左/右侧点的两个变化关系幅值,可知在相同循环周期数里,左侧点应变值整体比右侧点要小,故右侧剪切唇位置处变形要比左侧大。

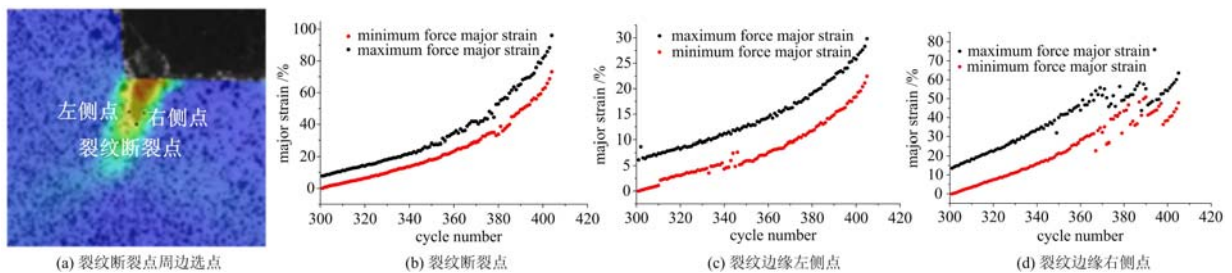


图 14 裂纹断裂点周边主应变与循环周期的变化关系曲线

Fig. 14 Curves of the relation between the main strain and the cyclic period at the crack breaking point

分别取裂纹快速扩展阶段的三个周期段(第 300、366 及 405 个周期段)最大加载力时的主应变云图,沿着裂缝扩展方向做一直线(图 15(a)中 L 方向),图 15 为最大加载力时 L 方向各点主应变与离裂尖点距离的关系曲线,结果表明沿 L 方向离裂缝尖端点越近,点的主应变值越大;离尖端越远,主应变值越小。整个曲线呈三个阶段:第一个阶段,主应变值随离尖端点的距离呈快速下降,此段离裂纹尖端点的距离范围在 0.1mm 内。第 300 个周期,主应变值变化范围为 9%;第 366 个周期,主应变值变化范围为 2.5%;而在第 405 个周期,主应变值变化范围为 2%;随着循环加载周期的增加,距离裂纹尖端点不同位置处的主应变值比较接近,应变集中现象更加明显。第二个阶段,曲线变化变得缓和,主应变值随离裂纹尖端点距离的增加而缓慢地减小,距离尖端点的范围在 0.1~0.3mm。第三个阶段,曲线呈快

速下降趋势。

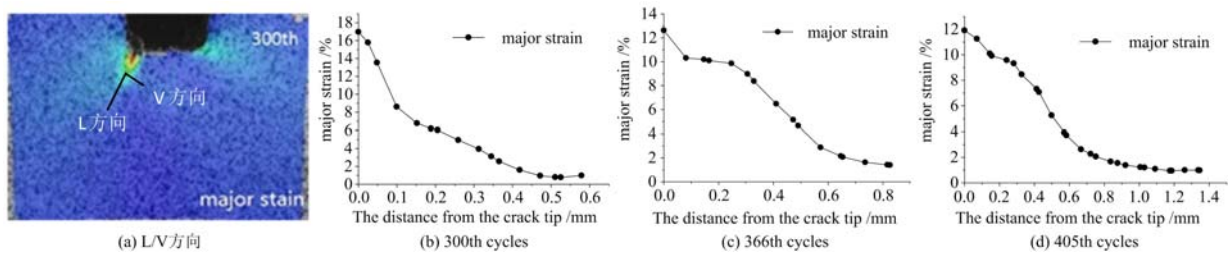


图 15 单个循环周期内最大加载力时 L 方向主应变与离裂尖点距离的关系曲线

Fig. 15 The relationship between the principal strain and the distance of the crack in the L direction during the maximum loading force in the cycle

沿着与裂缝垂直方向做一条直线(图 16(a)中 V 方向),其上各点主应变值与离尖端点距离之间的关系如图 16 示,此时主应变值随着距离的增加快速下降,达到主应变最小值后保持不变。第 300 个周期的临界位置在 0.1mm 处,第 366 个周期的临界点位置在 0.2mm 处,第 405 个周期的临界点位置在 0.2mm 处。从两个方向主应变与离尖端点不同距离之间的关系可知,裂尖主应变值在不同方向上都存在应变集中影响的区域,在一定区域内,应变集中影响较大,在这之外影响较小,同时随着裂纹开口位移角的增大,应变集中影响的区域也相应变大。

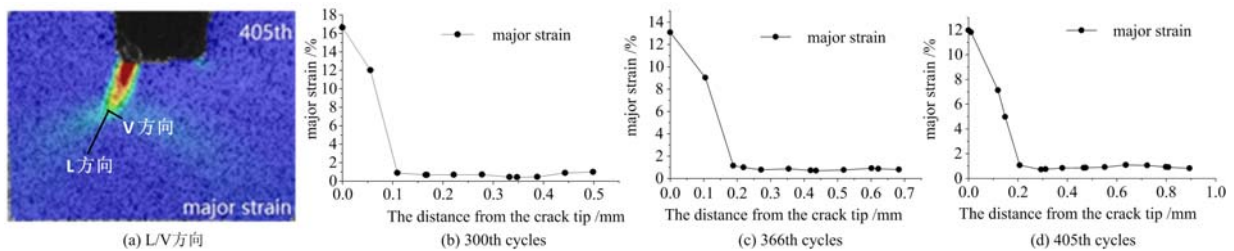


图 16 单个循环周期内最大加载力时 V 方向主应变与离裂尖点距离的关系曲线

Fig. 16 The relationship between the principal strain and the distance of the crack in the V direction during the maximum loading force in the cycle

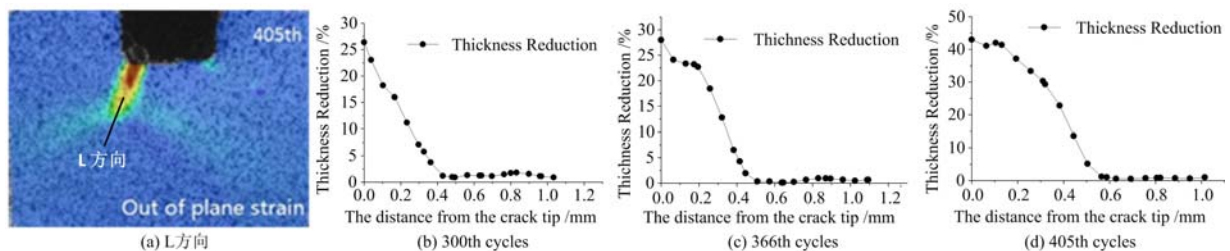


图 17 单个循环周期内最大加载力时离面方向应变与离裂尖点距离的关系曲线

Fig. 17 The relationship between the directional strain and the distance of the crack point in the maximum load force in the cyclic period

通过比较主应变与离面方向应变云图可知,裂纹区域应变变化趋势相同,因此仅选取裂纹扩展方向上应变变化来说明裂纹扩展过程中离面方向应变的变化规律。对于离面方向应变与离尖端点不同距离之间的关系,沿裂纹扩展方向做一截面,此截面长度方向上到裂纹尖端点距离与离面应变的关系如图 17 所示。从图中关系曲线可知,离面应变变化规律与主应变变化基本规律一致,平台段在循环后期相对明显。

#### 4 结论

试件在低周循环载荷作用下,疲劳裂纹首先从试件表面出现,之后扩展到试件内部,随着循环加载的持续,开口位移变大,即使在循环力最小值时裂纹端部也不再闭合。低周疲劳与静力加载下三点弯曲

裂纹扩展方向基本一致。从最终断裂的截面以及裂纹发展方向可以看出裂纹的扩展是由切应力导致的韧性断裂。

由裂纹区域平均主应变的变化关系,可以获得裂纹的萌生与扩展的临界循环周期数;前期裂纹扩展长度随着循环周期的增加保持较低速率的增长,当达到临界循环周期时裂纹扩展呈指数式增长;在三点弯曲低周疲劳试验中,单个循环次数内主应变以及沿离面方向的位移与力加载波形一致,在加载力最大值处,应变/位移也相应达到最大值,应变/位移与时间的关系呈现非线性。

在一定的循环周期内,裂纹断裂尖端点应变幅值保持在一个常值,当达到临界循环周期之后,应变幅值增大;在疲劳循环中裂纹左、右侧应变幅值保持在一定的数值,相对于裂纹左侧,右侧剪切唇位置处应变在后期循环疲劳中有上下波动;沿裂纹扩展方向主应变与离面方向应变在裂尖一段距离处应变值保持不变。

#### 参考文献:

- [1] 丁智平, 杨荣华, 黄友剑, 等. 基于连续损伤模型橡胶弹性减振元件疲劳寿命分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10):80-86 (DING Zhiping, YANG Ronghua, HUANG Youjian, et al. Fatigue life analysis of rubber vibration damper based on continuum damage model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11):80-86 (in Chinese))
- [2] 张莉, 唐立强, 付德龙. 基于损伤累积理论的多轴疲劳寿命预测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009(4):123-125 (ZHANG Li, TANG Liqiang, FU Delong. An evaluation method of fatigue life under multi-axial loading based on damage accumulation theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009(4):123-125 (in Chinese))
- [3] 焦晋峰. 基于累积损伤及断裂力学理论的高强螺栓疲劳寿命估算[D]. 太原理工大学, 2005 (JIAO Jinfeng. Fatigue life estimation on high-strength bolt based on mechanics of fracture and accumulated damage theory[D]. Taiyuan University of Technology, 2005 (in Chinese))
- [4] 许忠勇. 疲劳裂纹扩展力学理论研究(I——基本理论)[C]. 第八届全国现代数学和力学学术会议论文集, 2000:306-310 (XU Zhongyong. Theoretical study on fatigue crack propagation(I)-fundamental theory[C]. Eighth National Symposium on Modern Mathematics and Mechanics, 2000:306-310 (in Chinese))
- [5] 任伟新. 35CrMo 合金钢疲劳短裂纹扩展规律的试验研究[J]. 实验力学, 1993, 8(2):174-179 (REN Weixin. The growth of short crack under fatigue test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1993, 8(2):174-179 (in Chinese))
- [6] 姚国文, 黄培彦, 牛鹏志, 等. 循环载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁的疲劳性能试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(3):349-353 (YAO Guowen, HUANG Peiyan, NIU Pengzhi, et al. Experimental study on fatigue behavior of RC beam strengthened with carbon fiber laminate under cycle loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3):349-353 (in Chinese))
- [7] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014(3):112-122 (TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model[J]. China Civil Engineering Journal, 2014(3):112-122 (in Chinese))
- [8] Chao Y J, Stutton M A, Peter W H. Measurement of three-dimensional displacements in deformable bodies by digital image processing[M]. SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, 1989.
- [9] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(2):23-132.
- [10] 高越. 三维数字图像相关法的关键技术及应用研究[D]. 中国科学技术大学, 2014 (GAO Yue. Research on key technologies and applications of three-dimensional Digital Image Correlation[D]. China University of Science and Technology, 2014 (in Chinese))
- [11] Yates J R, Zanganeh M, Tai Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010(77):2063-2076.
- [12] 曾祥福, 刘程林, 马少鹏. 高速三维数字图像相关系统及其动载三维变形测量[J]. 北京理工大学学报, 2012(4):364-369 (ZENG Xiangfu, LIU Chenlin, MA Shaopeng. Measurement of dynamic three-dimensional



- deformation of structures using high-speed 3-D digital image correlation system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012(4):364-369 (in Chinese))
- [13] 朱飞鹏, 王京荣, 雷冬, 等. 三维 DIC 在 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试中的应用[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 302-309 (ZHU Feipeng, WANG Jingrong, LEI Dong, et al. Application of 3D-DIC in tensile mechanical properties test for glass fiber reinforced plastic bolt[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3):302-309 (in Chinese))
- [14] 高红俐, 刘欢, 齐子诚, 等. 基于 DIC 谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 1(1):16-22 (GAO Hongli, LIU Huan, QI Zicheng, et al. Measurement of displacement and strain fields of fatigue crack tip under resonant loading based on DIC method[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 1(1):16-22 (in Chinese))
- [15] 郝文峰, 原亚南, 姚学锋, 等. 基于数字图像相关方法的纤维-基体界面疲劳力学性能实验研究[J]. 塑料工业, 2015, 43(3):123-126 (HAO Wenfeng, YUAN Yanan, YAO Xuefeng, et al. Experimental study on the fatigue property of fiber-matrix interface using digital image correlation method[J]. Plastics industry, 2015, 43(3): 123-126 (in Chinese))
- [16] 王骥骁, 陈金龙. 扩展数字图像相关方法中裂尖位移函数的表征研究[J]. 实验力学, 2015, 30(1):31-41 (WANG Jixiao, CHEN Jinlong. On the characterization of crack tip displacement function in X-digital image correlation method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(1):31-41 (in Chinese))
- [17] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010(10):2244-2253 (TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2010(10):2244-2253 (in Chinese))
- [18] 代坤. 数字图像相关测量方法及试验研究[D]. 长沙理工大学, 2014 (DAI Kun. Digital image correlation method and its experimental study[D]. Changsha University of Science and Technology, 2014 (in Chinese))
- [19] 蒋粉玲, 蒋明. 基于 Labview 的图像与力值同步采集系统[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2015(4):24-29 (JIANG Fenling, JIANG Ming. Synchronization acquisition system of image and force based on Labview[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2015(4):24-29 (in Chinese))

## Experimental study on low cycle fatigue based on 3-D digital image correlation

WEI Liang-bao, JIANG Ming

(School of Civil Engineering, SUST, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** In order to study the relationship among crack initiation, crack propagation and cyclic cycle and the variation of crack region displacement and strain field of three-point bending specimen under the low cycle fatigue loading, cyclic load is applied to three point bending specimen by universal testing machine and digital cyclic loading control system. Two groups of CCD and test machine synchronously collect and record the digital speckle image and the load of crack surrounding region of the specimen subjected to alternating loading. 3-d digital image correlation (DIC) technique was used to calculate the displacement and strain field at the crack tip region. By analyzing the displacement of crack tip region and the principal strain, the variation patterns of crack propagation length and propagation rate were obtained.

**Keywords:** three-dimensional digital image correlation; three-point bending; low cycle fatigue; crack propagation; crack tip