

文章编号:1001-4888(2018)01-0049-10

基于数字图像相关的裂纹端部 全场三维变形实验研究^{*}

刘强, 周轶昊, 孙晨, 陈巨兵

(上海交通大学 工程力学系, 上海 200240)

摘要: 基于三维数字图像相关技术(3D-DIC), 结合裂尖定位、链式匹配、相关系数阈值化算法, 测量金属焊接件裂纹端部的全场三维变形, 分析焊接对材料断裂力学行为的影响。实验中采用预制疲劳裂纹的紧凑拉伸试件, 以 Q235 钢为母材, 通过改变焊缝位置制备四种不同试件: 无焊缝母材试件、焊缝位于中央试件、焊缝偏离中央 5mm 试件、焊缝偏离中央 8mm 试件。实验结果显示, 3D-DIC 既能获得裂纹张开导致的面内变形, 提取裂纹尖端张开位移, 还能测量裂尖材料屈服导致的局部离面凹陷。对比不同焊接件的裂纹端部场发现, 裂纹与焊缝的相对位置对试件断裂力学行为有很大影响。当裂纹位于焊缝处, 裂尖张开位移与局部凹陷最为显著, 热影响区内裂纹端部的变形也明显大于母材, 因此都具有比母材更高的断裂韧性。随着载荷增加, 裂纹周围的焊缝边界处容易产生应力集中和局部损伤, 最终影响材料的破坏行为。上述结果表明, 3D-DIC 可用来分析非均匀材料的断裂力学行为, 有望为实际断裂问题的解决和断裂力学理论的验证与完善提供有效的实验依据。

关键词: 数字图像相关; 裂纹端部; 全场三维变形; 焊接

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-259

0 引言

研究载荷作用下裂纹尖端附近应力应变的分布及其演化过程, 对深入分析裂纹扩展规律和材料破坏机理具有十分重要的意义^[1], 在实际工程中也有广泛的应用价值^[2]。针对裂纹尖端附近发生小范围屈服的情况, 目前已发展出较完备的断裂力学理论^[3]。然而, 实际情况中裂纹端部场可能比理论分析所假设的情况要复杂得多。例如在金属焊接件中, 宏观裂纹往往由焊接过程中产生的缺陷发展形成^[4], 裂纹周边区域内包含焊缝、热影响区以及母材, 其材料力学特性的分布不均匀, 并且在外加载荷下裂纹尖端容易产生较大范围的塑性变形^[5]。此时通过理论分析来准确描述裂纹端部场是非常困难的^[1]。

目前研究复杂裂纹端部场的方法主要分为有限元模拟和实验分析。有限元模拟需要在裂纹尖端划分足够细的网格, 可能会导致收敛性问题^[6], 同时它无法模拟晶格位错滑移等微观过程^[7], 使得裂纹端部发生较大范围屈服时有限元模拟结果与实际情况之间产生很大的差异。在实验分析方面, 针对金属材料的断裂实验已有相关标准^[8], 在紧凑拉伸试件的测试过程中采用夹式引伸计测量试件缺口张开位移, 再计算裂纹尖端张开位移(CTOD)等断裂力学参量^[9,10]。该方法用于表征均匀材料的宏观断裂力

^{*} 收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(11502143, 11372182)资助

通讯作者: 周轶昊(1982—), 男, 博士, 助理研究员。主要从事实验固体力学及光学测量技术研究。Email: zhouyihao@sjtu.edu.cn

学特性,对非均匀材料并不适用,同时它不能得到裂纹端部场及其演化过程,无法进一步分析材料断裂破坏的机理。

近年来,学者们运用云纹干涉^[11-13]、电子散斑干涉^[14,15]、数字图像相关(DIC)^[16-25]等光学测量方法来分析裂纹端部场,并研究材料的断裂力学行为。云纹干涉法和电子散斑干涉法运用激光干涉原理,测量灵敏度高。但云纹干涉法需要在试件表面制作光栅,并搭建精密的光路;电子散斑干涉法也同样需要复杂的光路以及严格的暗室和隔振条件。相比之下,数字图像相关法受实验环境干扰小,测量过程更简便^[26]。它根据变形前、后拍摄的试件表面散斑图案,运用图像配准技术提取全场变形。目前,基于 DIC 的实验方法不仅用于测量含裂纹区域的变形场^[16-19],还应用于材料应力强度因子(SIF)的表征,通过将理论推导的位移表达式与实验测得的位移场进行匹配,拟合得到表达式中参数 SIF 的数值^[20-25]。这类方法适用于线弹性和小范围屈服的情况,参数拟合过程中所选取的实验位移场通常不包含裂纹尖端的大变形区域。当裂纹周围材料力学特性分布不均匀,以及裂纹前缘发生较大范围塑性变形时,基于线弹性断裂力学的方法很难适用。

本文采用双相机三维数字图像相关方法(3D-DIC),结合裂尖定位、链式匹配、相关系数阈值化算法,测量金属焊接件中裂纹尖端附近的全场三维变形,提取裂纹尖端张开位移以及裂尖材料屈服导致的面内和离面变形。实验中以 Q235 钢为母材,通过改变焊缝的位置制备四种不同的紧凑拉伸试件:(A)无焊缝的母材,(B)焊缝位于试件中央,(C)焊缝偏离试件中央 5mm;(D)焊缝偏离试件中央 8mm。通过对比焊缝、热影响区、母材三种不同区域内裂纹的端部场,研究焊接对材料断裂力学特性的影响。

1 方法

1.1 三维数字图像相关的基本原理

三维数字图像相关(3D-DIC)采用双相机从两个不同视角同步拍摄试件的变形过程,运用 DIC 方法匹配各幅图像之间的对应坐标,再根据立体视觉原理将图像平面坐标转换为对应的三维空间坐标,计算坐标变化量获得试件表面的三维位移场^[27]。

在使用 DIC 方法匹配两幅图像对应坐标时,对于参考图中任意采样点,选取其周围 $M \times M$ 子区内的像素,运用形函数得到目标图中的对应坐标,再计算子区像素在两幅图像中的灰度值相关系数,通过迭代算法优化该系数,求解最优的形函数参数^[26]。一般情况下,以变形前左相机图像为参考图,选取一系列采样点,运用上述方法求解它们在变形后左相机图像以及变形前、后右相机图像中的对应坐标。

立体视觉是根据同一采样点在两个不同视角图像中的对应坐标求解其三维空间坐标。在双相机系统固定之后,首先通过标定得到相机的几何参数,表征三维坐标与图像坐标的关系;然后根据 DIC 方法得到的左、右相机图像对应坐标,计算各采样点在不同时刻的三维坐标,通过差分得到各个加载状态对应的三维位移场。

1.2 裂纹端部全场三维变形的获取

断裂实验中试件的变形主要集中在裂纹尖端附近的局部区域内,裂尖的准确定位对端部场分析十分重要。然而,3D-DIC 实验时必须对试件表面制作高对比度的随机散斑图案,因此在变形前拍摄的图像中直接通过肉眼准确定位试件上的预制疲劳裂纹十分困难。实验中综合采用以下两种方法进行裂尖定位:(1)经过若干级加载后裂纹略微张开,使得裂尖的定位更容易,然后根据周围散斑图案找到参考图中对应的裂尖位置;(2)在参考图中的裂尖大致位置附近选取一定大小的区域,通过 DIC 方法计算该区域内的面内位移场,根据位移梯度信息判断裂尖的位置。完成裂纹尖端定位后,以裂尖为原点,试件缺口方向为 X 轴方向,缺口的垂直方向为 Y 轴方向,试件表面法向量为 Z 轴方向建立三维坐标系,并选取 3D-DIC 的计算区域,如图 1 所示。

由于裂纹张开、材料破坏、视角变化等因素,变形后的右相机图像与参考图(即变形前左相机图像)之间的灰度相关性较低,为了使 DIC 能得到可靠的计算结果,实验中采取链式匹配的方法,即先计算采样点在变形后左相机图像中的对应位置,再根据变形后左、右相机之间的匹配,获得变形后右相机图像中的对应坐标。在相同视角变形前、后图像的坐标匹配时,裂纹尖端附近采用二阶形函数,其他区域使

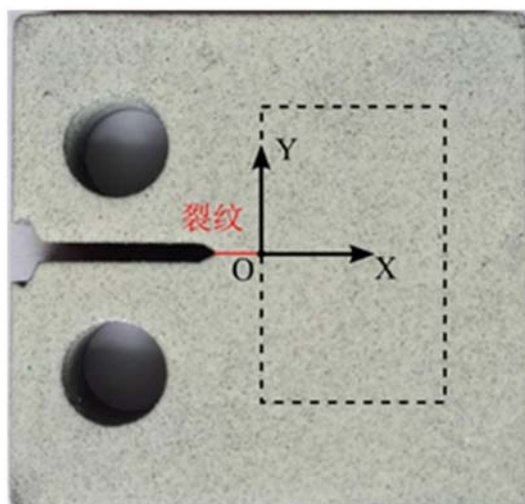


图 1 试件坐标系及计算区域

Fig. 1 Coordinate system and region of interest

用一阶形函数。在相同加载状态下左、右相机图像的坐标匹配时,均采用二阶形函数。

实验过程中试件表面的变形与损伤,可能会破坏个别采样点附近的散斑图案,影响采样点坐标匹配的可靠性。实验中对 DIC 得到的最优相关系数 $ZNCC^{[26]}$ 进行阈值筛选,剔除可靠性较差的结果。然后运用局部最小二乘拟合方法^[28],降低位移场和应变场中的噪声。

2 实验

2.1 试件制备

实验选择 Q235 钢作为母材,其含碳量适中,强度、塑性和焊接等性能配合良好,用途广泛。具体的力学性能参数如下^[29]:弹性模量 $E=205\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,屈服强度 $\sigma_s=235\text{MPa}$,密度 $\rho=7.85\text{g/cm}^3$ 。试件采用紧凑拉伸试件,尺寸采用国家标准^[8],如图 2 所示。

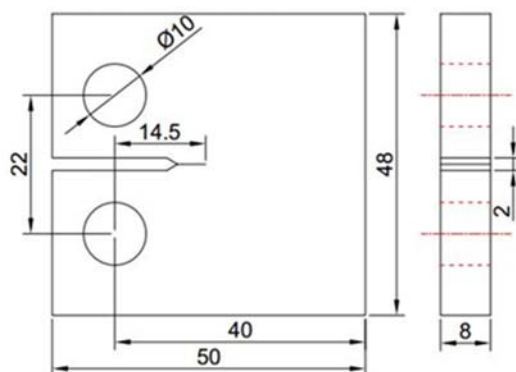


图 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Specimen geometry (unit: mm)

为了研究焊接对材料断裂力学行为的影响,共制备了四种不同的焊接件:(A)母材,无焊缝,(B)焊缝位于试件中央,(C)焊缝偏离试件中心线 5mm,(D)焊缝偏离试件中心线 8mm。每个试件都通过疲劳加载预制长度约 4mm 的裂纹,其中试件 B 的预制裂纹位于焊缝,试件 C 和 D 的预制裂纹位于焊接热影响区,如图 3 所示。在预制裂纹后,先用哑光白漆在试件表面喷涂均匀底色,待干燥后再用哑光黑漆喷涂散斑图案。

2.2 实验过程

实验采用 Zwick/Roell Z050 万能试验机对每个试件进行加载,首先施加 300N 的预加载荷作为初始状态;然后采用力控制的方式,以 2kN 为载荷步长逐级加载,直至材料破坏,每个状态保持 30s,以便

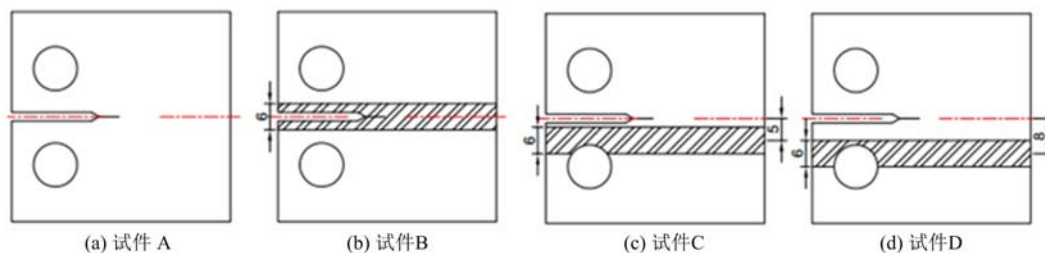


图 3 四种不同焊接件的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four different welded specimens

3D-DIC 系统获取稳定的图像。实验采用的双相机系统包含两台 Baumer TXG12 工业 CCD,分辨率为 1296 像素×966 像素。在综合考虑计算区域大小、相机靶面尺寸、加载过程中的试件平动、允许工作距离等因素后,选取了焦距为 75mm 的 Myutron 定焦镜头。双相机系统距离试件约 0.8m,与试件基本等高,相机光心之间的距离约 0.6m,光轴夹角约 30°,该设置下获取的图像如图 4 所示。图像中每个像素对应的实际尺寸约为 $39 \times 39 \mu\text{m}^2$ 。

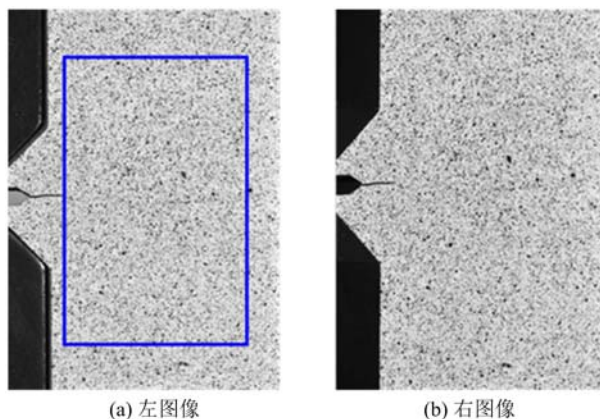


图 4 载荷为 14kN 时左、右相机拍摄的试件 B 图像

Fig. 4 Stereo images of specimen B at the load of 14kN

在双相机系统固定之后,需要求解其几何参数。调整标定板位置,使其与试件测试位置基本一致,然后变化标定板姿态,用双相机同步获取 20 个不同姿态下的标定图案,运用平面棋盘格标定算法^[30]求得系统的几何参数。

在 DIC 计算中,以初始状态下左相机图像为参考图,计算区域如图 4(a)所示,尺寸为 500 像素×800 像素,以 10 像素为间隔均匀采样,获得 4131 个采样点。子区大小设为 25×25 ,迭代优化采用 Levenberg-Marquardt 算法,最大迭代次数为 20 次,迭代终止条件为相关系数或参数的相对变化量小于 10^{-4} 。亚像素位置的灰度值采用五阶 B 样条插值重建^[31]。DIC 计算的起始点的初始变形参数根据预匹配特征点估算,然后使用变形关联函数对其他采样点进行参数初始化^[32]。

3 实验结果与分析

3.1 裂纹尖端张开位移(CTOD)

标准实验中的 CTOD 测量方法适用于均匀的各向同性材料^[8],因此实验中仅对试件 A(无焊缝母材)适用。在试件缺口处夹持 COD 规(型号为三晶 YC10/4),根据预先标定得到的比例系数,将应变系数转换为试件缺口张开位移,再通过公式(1)计算 CTOD^[8]。

$$\delta = \left[\frac{F}{B \sqrt{W}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \frac{(1-\nu)^2}{2R_{p0.2} E} + \frac{0.46(W-a_0)V_p}{0.54a_0 + 0.71W} \quad (1)$$

式中, F 为拉伸载荷大小; B 为试件厚度; W 为加载中心到试件右边缘的距离; a_0 为裂纹长度; g_2 为依赖于 a_0/W 的系数; $R_{p0.2}$ 为名义屈服强度; V_p 为缺口张开位移的塑性分量。

根据 3D-DIC 获取的裂纹尖端位移场,以裂纹为对称轴在 Y 轴上选取一对采样点计算 CTOD,并与传统方法的测量结果进行比较,如表 1 所示。

表 1 母材的 CTOD 实验结果对比(单位: μm)

Tab. 1 Comparison of CTOD results of the base material (unit: μm)

载荷	8kN	10kN	12kN
COD 规	10.2	15.9	22.8
3D-DIC	9.8	14.5	19.4
二维有限元模型	9.0	13.9	19.2
三维有限元模型	9.9	15.1	21.4

同时,实验测得的 CTOD 与有限元模拟结果也进行了对比,在有限元分析中采用 ANSYS 软件分别建立试件的二维和三维模型,再模拟加载过程计算 CTOD。二维模型采用 Plane 183 单元,三维模型采用 Plane 183 和 Solid 186 单元,为适应裂纹尖端区域应力、应变的奇异性,生成一圈围绕裂尖点的二次奇异单元,在 1/4 点生成中间节点^[33]。裂纹延长线区域采取细致网格划分,网格尺寸依次向外增大。模拟加载时固定试件下方圆孔,并在上方圆孔施加向上的载荷。模拟计算结果如表 1 所示。

从表 1 可见,3D-DIC 与传统方法的测量结果基本保持一致,验证了 3D-DIC 测量的有效性。产生误差的主要原因是裂纹尖端的定位偏差,在初始状态下(载荷为 300N)预制裂纹无法在图像中辨析,经过若干级加载后裂纹可肉眼识别,而此时裂纹已经过扩展,所以根据加载后的图像反推得到的初始裂纹尖端与实际位置存在一定偏差,使得 3D-DIC 的 CTOD 测量结果略微偏小。其次,对比两种有限元模型的计算结果发现,三维模型更接近实际情况。在载荷达到 8kN 时,裂尖附近开始发生塑性变形,其中除了裂纹张开导致的面内变形外,还包含离面变形,二维模型忽略了离面变形的影响,因此产生误差,并随着载荷增加逐渐增大。

表 2 焊接件的 CTOD 实验结果(单位: μm)

Tab. 2 CTOD results of the welded specimens (unit: μm)

载荷	8kN	10kN	12kN	14kN	16kN	18kN
试件 B	9.9	18.4	41.1	92.7	203.8	570.8
试件 C	8.3	14.3	24.9	42.3	81.8	200.2
试件 D	9.8	15.6	23.3	37.1	56.9	102.4

运用 3D-DIC 得到的焊接件 CTOD 如表 2 所示。结合表 1 和表 2,对比四种试件的实验结果发现,无焊缝的试件 A 破坏前载荷为 12kN,含有焊缝的试件 B、C、D 破坏前载荷为 18kN,明显高于前者。随着载荷增加,各试件的 CTOD 逐渐增大。当载荷大于 10kN 时,焊接件的 CTOD 明显增大,相同载荷下试件 B、C、D 的 CTOD 依次递减,试件 B 中裂纹位于焊缝,其 CTOD 明显大于试件 C 和 D。试件 C 与试件 D 相比,裂纹更接近焊缝,CTOD 更大。可见,焊接件中不同区域内的断裂力学特性有着显著的区别。

3.2 裂纹端部三维变形场

运用 3D-DIC 方法能够进一步对比不同试件中裂纹尖端的变形分布。四种试件破坏前最终状态的位移场如图 5~图 7 所示。

实验中试件下方圆孔固定,上方圆孔向上拉伸,因此在 X 方向位移较小,其在 Y 方向上的位移梯度表明裂纹张开后试件整体发生了顺时针转动,并且裂纹上方部分的转动较大。裂纹张开使得 Y 方向位移在裂尖附近出现明显的跳变,当载荷达到 18kN 时,含有焊缝的试件在局部区域已经出现了开裂,相应地在 Y 方向位移场中出现较大梯度,在焊缝位于中央的试件 B 中尤为明显。

Z 方向位移场反映了试件的离面位移,四种试件之间有显著的区别。在无焊缝的试件 A 中,裂纹前端的位移略小于周围其他区域,即试件在该区域出现了凹陷,最大凹陷小于 0.01mm,其主要原因是

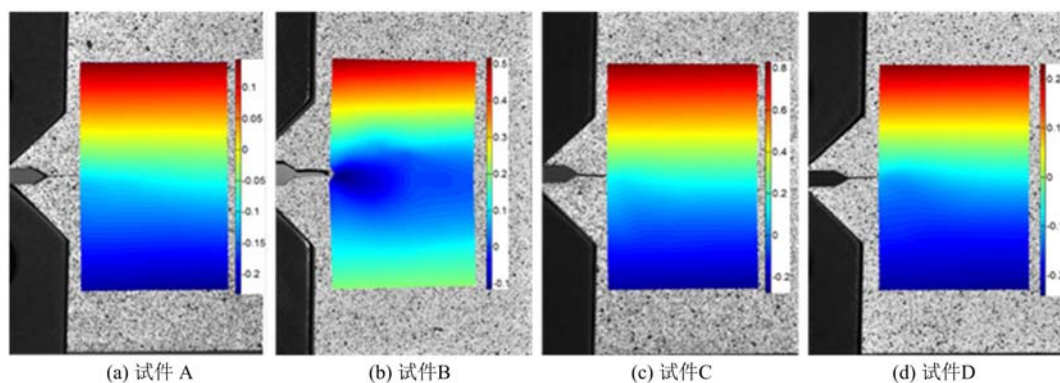


图 5 四种试件破坏前最终状态的 X 方向位移场(单位:mm)

Fig. 5 Displacement fields in X-direction at the final stage of the four specimens (unit: mm)

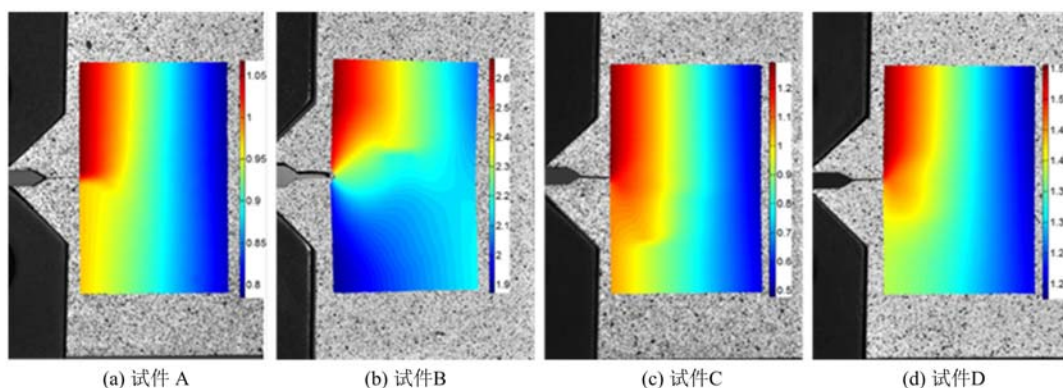


图 6 四种试件破坏前最终状态的 Y 方向位移场(单位:mm)

Fig. 6 Displacement fields in Y-direction at the final stage of the four specimens (unit: mm)

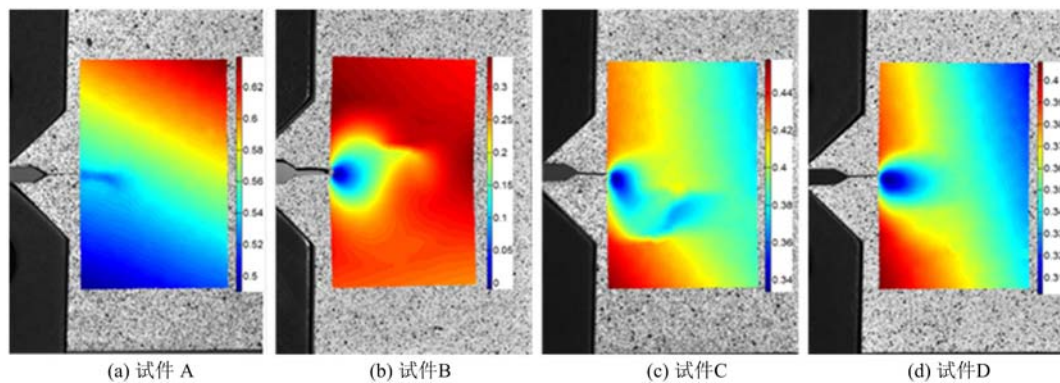


图 7 四种试件破坏前最终状态的 Z 方向位移场(单位:mm)

Fig. 7 Displacement fields in Z-direction at the final stage of the four specimens (unit: mm)

载荷较大时裂纹尖端附近的应力集中使材料发生塑性变形。裂尖局部凹陷现象在含焊缝的试件中更为显著。在试件 B 中裂尖附近为焊接材料,塑性变形最为突出,最大凹陷大于 0.3mm。相比之下,试件 C 和 D 中裂纹位于焊接热影响区内,最大凹陷约为 0.1mm,小于试件 B,但仍远大于母材(试件 A),表明焊接过程使热影响区内的材料力学特性发生了显著变化。

图 8 显示了 3D-DIC 获得的裂纹端部应变场。在材料破坏前,母材裂纹端部的变形小于焊接件。在焊接件中,除了裂尖的局部变形外,裂纹附近的焊缝边界处也产生了较大的变形,成为材料中容易产生损伤破坏的位置。在试件 C 中,焊缝略微偏离试件中心,裂纹距焊缝边界 2mm,试件的变形分布呈现出明显的非对称性,表明焊缝对裂纹端部场的影响很大。当焊缝进一步远离裂纹时(如试件 D,裂纹距焊缝边界 5mm),焊缝对裂纹端部变形分布的影响逐渐减小。

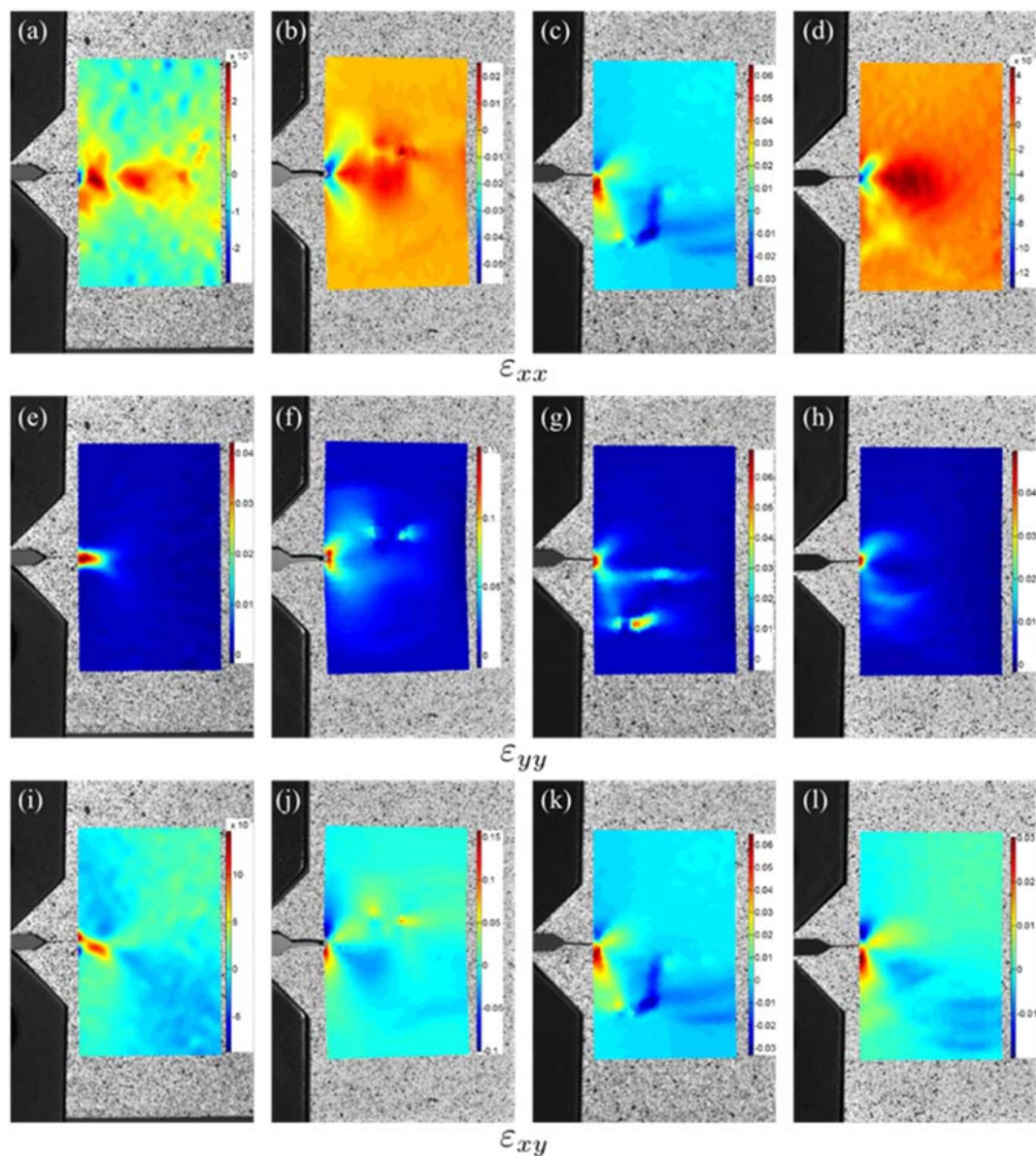


图 8 四种试件破坏前最终状态的应变场,从左到右:试件 A、B、C、D

Fig. 8 Strain fields at the final stage of the four specimens. From left to right: specimen A, B, C, D

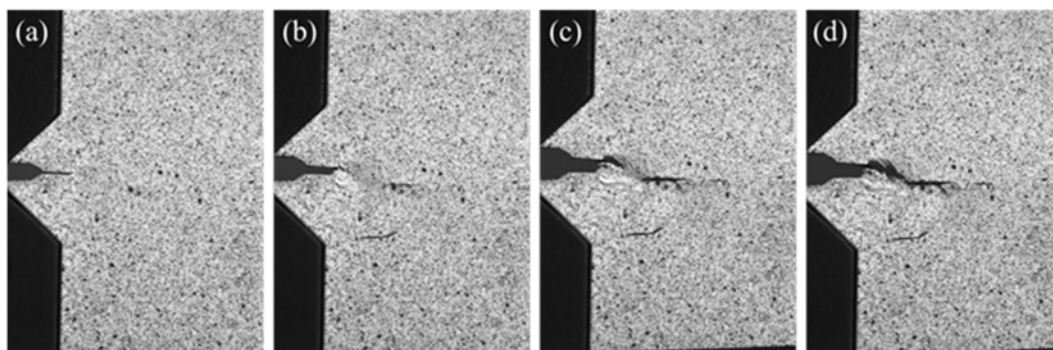


图 9 试件 C 的破坏过程

Fig. 9 Fracture process of specimen C

在发生损伤破坏的位置方面,无焊缝的试件 A 随着载荷增加,裂纹扩展,最终试件沿裂纹方向断裂。试件 B 在最终断裂前,先在焊缝与热影响区的边界处出现局部损伤。在试件 C 中,当载荷增加时

焊缝边界处先出现局部破坏,并使得裂纹最终沿着焊缝边界扩展,如图 9 所示。在试件 D 中,裂纹距离焊缝边界 5mm,焊缝对裂纹扩展路径的影响较小,裂纹沿着原来方向扩展直至试件破坏。

4 结 论

本文采用三维数字图像相关方法(3D-DIC),结合裂尖定位、链式匹配和相关系数阈值化,测量了 Q235 钢焊接件裂纹端部的全场三维变形。实验中共测试了四种试件:无焊缝母材、焊缝位于中央、焊缝偏离中央 5mm、焊缝偏离中央 8mm。实验结果表明,根据 3D-DIC 得到的裂纹端部场,能够直接提取出裂纹尖端张开位移(CTOD)、裂纹前缘的面内变形以及裂尖材料屈服产生的局部离面凹陷。CTOD 和裂尖变形的大小与裂纹在焊接件中所处的区域密切相关。当裂纹处于母材中,裂纹扩展前裂尖塑性变形较小,最大离面凹陷小于 $10\mu\text{m}$,基本满足小范围屈服假设;当裂纹位于热影响区内,最大凹陷超过 0.1mm,裂纹扩展前裂尖张开位移和塑性变形明显大于母材;当裂纹靠近焊缝时,在焊缝边界处容易引起应力集中,产生局部损伤破坏,并最终影响裂纹的扩展路径;当裂纹位于焊缝处,裂尖最大凹陷超过 0.3mm,CTOD 也明显大于其他试件。可见,焊接件中不同区域内的断裂力学行为有着显著的差异,焊缝和热影响区内材料的断裂韧性比母材明显提高。同时,实验表明 3D-DIC 能用于表征非均匀材料的断裂力学行为,所测得的裂纹端部场有望为实际断裂问题的解决和断裂力学理论的验证和完善提供可靠的实验依据。

参考文献:

- [1] 匡震邦,马法尚. 裂纹端部场[M]. 西安交通大学出版社,2002 (KUANG Zhenbang, MA Fashang. Crack tip fields[M]. Xi'an Jiaotong University Press, 2002 (in Chinese))
- [2] 郭万林,于培师. 构件三维断裂与疲劳力学及其在航空工程中的应用[J]. 固体力学学报,2010,31(5):553—571 (GUO Wanlin, YU Peishi. Three dimensional fracture and fatigue mechanics of structures and its application in aeronautical engineering[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 31(5):553—571 (in Chinese))
- [3] 王自强,陈少华. 高等断裂力学[M]. 科学出版社,2009 (WANG Ziqiang, CHEN Shaohua. Advanced fracture mechanics[M]. Science Press, 2009 (in Chinese))
- [4] 任德亮. 基于数字图像相关的焊接件断裂性能研究[D]. 大连理工大学,2014 (REN Deliang. Weldments fracture properties study by digital image correlation[D]. Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese))
- [5] Ueda Y, Yamakawa T. Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method[J]. Japan Welding Society Transactions, 1971, 2:186—196.
- [6] 杨庆生,杨卫. 断裂过程的有限元模拟[J]. 计算力学学报,1997(4):407—412 (YANG Qingsheng, YANG Wei. Finite element simulation of fracture process[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997(4):407—412 (in Chinese))
- [7] 张贺佳,赵争喜. 碳钢断裂及位错增殖过程的研究[J]. 钢铁研究,2011,39(5):15—18 (ZHANG Hejia, ZHAO Zhengxi. Growing process of dislocation and fracture of carbon steel[J]. Research on Iron and Steel, 2011, 39(5): 15—18 (in Chinese))
- [8] GB/T 21143—2007. 金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法[S]. 中国标准出版社,2007 (GB/T 21143—2007. Metallic materials unified method of test for determination of quasistatic fracture toughness[S]. Standards Press of China, 2007 (in Chinese))
- [9] Zhu X K, Joyce J A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 85:1—46.
- [10] 王万桢. 结构钢开裂准则及断裂试验分析[J]. 工程力学,2008,25(5):27—31 (WANG Wanzhen. Crack criterion and fracture tests of structural steel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5):27—31 (in Chinese))
- [11] 陆桦. 云纹干涉法及其在非均质低抗拉强度材料断裂研究中的应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),1983(3):31—40 (LU Hua. Moire interferometry and its application to the research of fracture behaviour of nonhomogeneous materials with low resistance to tension [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1983(3):31—40(in Chinese))

- [12] 吴增强, 王志文, 璩定一. 云纹技术在断裂分析中的应用[J]. 华东理工大学学报, 1987(5):61—69 (WU Zengqiang, WANG Zhiwen, QU Dingyi. Application of Moire technique in fracture analysis[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1987(5):61—69 (in Chinese))
- [13] 沙风焕, 陈绪. 云纹干涉法在压力容器断裂分析上的应用[J]. 太原理工大学学报, 1994(1):58—64 (SHA Fenghuan, CHEN Xu. The application of Moire interferometry to fracture analysis of pressure vessels[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1994(1):58—64 (in Chinese))
- [14] 米红林, 方如华. 电子散斑干涉法在研究双材料界面力学行为中的应用[J]. 力学季刊, 2005, 26(1):14—19 (MI Honglin, FANG Ruhua. Study of bimaterial interfacial mechanical behavior by electronic speckle pattern interferometry[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(1):14—19 (in Chinese))
- [15] 代祥俊, 蒲琪, 王利民, 等. 电子散斑干涉法研究铸铁的断裂特性[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8):1106—1108 (DAI Xiangjun, PU Qi, WANG Limin, et al. A study of the fracture properties of cast iron by electronic speckle pattern interferometry[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace, 2010, 29(8):1106—1108 (in Chinese))
- [16] Réthoré J, Hild F, Roux S. Extended digital image correlation with crack shape optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 73(2):248—272.
- [17] Poissant J, Barthelat F. A novel “subset splitting” procedure for digital image correlation on discontinuous displacement fields[J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(3):353—364.
- [18] Fagerholt E, Børvik T, Hopperstad O S. Measuring discontinuous displacement fields in cracked specimens using digital image correlation with mesh adaptation and crack-path optimization[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(3):299—310.
- [19] 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 Jinglong. 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))
- [20] Abanto-Bueno J, Lambros J. Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(14):1695—1711.
- [21] Rethore J, Gravouil A, Morestin F, et al. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral[J]. International Journal of Fracture, 2005, 132(1):65—79.
- [22] Roux S, Hild F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches[J]. International Journal of Fracture, 2006, 140(1-4):141—157.
- [23] Zhang R, He L. Measurement of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7):1001—1007.
- [24] 张珏, 方竞. 钢纤维增强混凝土的断裂破坏研究[J]. 实验力学, 2002, 17(增):1—7 (ZHANG Jue, FANG Jing. Fracture study of steel-fiber-reinforced cementitious composite[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(s):1—7(in Chinese))
- [25] 郝文峰, 陈新文, 邓立伟, 等. 数字图像相关方法测量芳纶纤维复合材料 I 型裂纹应力强度因子[J]. 航空材料学报, 2015, 35(2):90—95 (HAO Wenfeng, CHEN Xinwen, DENG Liwei, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of aramid fiber composite materials utilizing digital image correlation method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(2):90—95(in Chinese))
- [26] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(6):062001.
- [27] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [28] Pan B, Asundi A, Xie H, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7):865—874.
- [29] 张磊. Q235 钢拉伸性能的有限元仿真与试验[D]. 吉林大学, 2012(ZHANG Lei. Finite element simulation and experiment on tensile properties of Q235 steel[D]. Jilin University, 2012(in Chinese))
- [30] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000, 22

(11):1330—1334.

- [31] Zhou Y, Sun C, Song Y, et al. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:46—56.
- [32] Zhou Y, Pan B, Chen Y. Large deformation measurement using digital image correlation: a fully automated approach[J]. Applied Optics, 2012, 51(31):7674—7683.
- [33] Hussain M A, Lorensen W E, Pflegel G. The quarter-point quadratic isoparametric element as a singular element for crack problems[C]//In NASA. Ames Res. Center NASTRAN: User's Experiences, 1976:419—438.

Experimental investigation on full three-dimensional deformation near crack tip based on digital image correlation

LIU Qiang, ZHOU Yi-hao, SUN Chen, CHEN Ju-bing

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC), combining crack tip location, chain matching and correlation coefficient thresholding algorithm, the full three-dimensional deformation of metal weldment crack tip was measured to analyze the influence of welding on materials fracture behavior. In experiment, adopting the compact tension specimens with prefabricated fatigue cracks and taking Q235 steel as base material, four kinds of specimen were prepared, which have different welded joint distributions: non weld base metal specimen, weld is located at specimen central part, weld deviates from specimen central part 5mm, weld deviates from specimen central part 8mm, respectively. Experimental results show that 3D-DIC can not only obtain the in-plane deformation induced by crack opening, and extract the crack tip opening displacement, but also can measure the local out of plane depression caused by the yielding of crack tip material. Comparing crack tip field of different weldments, it is revealed that the relative position of crack and weld joint has a great influence on fracture mechanics behavior of specimen. When crack is located at the weld seam, the crack tip opening displacement and local depression are most significant, and crack tip deformation in heat affected zone is significantly higher than that of base metal, so the fracture toughness is higher than that of the base metal. With the increase of load, the stress concentration and local damage will occur at the boundary of the weld seam near the crack, which will ultimately affect the failure behavior of the material. Above results demonstrate that 3D-DIC can be applied to analyze the fracture behavior of heterogeneous material. It may provide effective experimental data for study of practical fracture problems and for validation and refinement of fracture mechanics theory.

Keywords: digital image correlation (DIC); crack tip; full three-dimensional deformation; welding