

文章编号: 1001-4888(2024)01-0056-09

一种基于 DIC 测量单边缺口拉伸试件 CTOD 阻力曲线的简便方法^{*}

郑战光¹, 韦宗汗¹, 谢昌吉¹, 黄增^{1,2}

(1. 广西大学 机械工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西机电职业技术学院 机械工程学院, 广西南宁 530007)

摘要: 针对测量单边缺口拉伸 (SENT) 试样的裂纹尖端张口位移 (CTOD) 阻力曲线时, 延性裂纹扩展量的计算过于复杂的问题, 提出了一种由数字图像相关技术 (DIC) 计算的变形场来确定裂纹尖端位置, 并快速推算延性裂纹扩展量的方法。该方法首先在缺口和裂纹上下方的弹性区域设置两条平行横线; 然后通过两条横线间的位移差构建曲线, 曲线变化幅度的临界点即为裂纹端部的位置; 根据临界点位置计算裂纹扩展量, 最后测量 CTOD 并构建阻力曲线。将本文方法与另一种通过 DIC 测量 SENT 试样 CTOD 阻力曲线的方法进行对比, 结果表明本文方法经过简便的计算后拟合的阻力曲线效果更好。

关键词: 单边缺口拉伸 (SENT) 试样; 裂纹扩展阻力曲线; 裂纹尖端张口位移 (CTOD); 数字图像相关 (DIC)

中图分类号: O346.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-043

0 引言

近年来, 人们通过研究发现单边缺口拉伸 (SENT) 试样与管道中的缺口约束十分匹配, SENT 试样的裂纹尖端和管道及其焊缝的裂纹尖端具有相似的应力-应变场^[1]。由于使用 SENT 试样进行断裂韧性测试时可以得到保守性较小的结果, 能节省管道的设计和维修成本, 目前 SENT 试样已被应用于石油天然气行业的管线钢低约束断裂韧性测量^[2], 且通常使用由裂纹尖端张口位移 (CTOD) 构建的阻力曲线来表征断裂韧性, 因此, 对 SENT 试样的 CTOD 阻力曲线进行便捷且准确地测试显得尤为重要。

关于 SENT 试样的 CTOD 阻力曲线测量试验, 国外已开展了一些研究。2010 年, ExxonMobil 公司^[3]在不施加载荷的条件下通过双应变规测量了单个试件的 CTOD 阻力曲线; 2013 年, 比利时根特大学的 VERSTRAETE 等^[4]提出了一种单试样法来测量材料的 CTOD 阻力曲线。国内目前还没有发布关于 SENT 试样断裂韧性的测试标准, 国内的学者一般直接采用国外的研究方法进行试验^[5-6], 所以 SENT 试样的试验方法还需要进一步研究。

构建 CTOD 阻力曲线的关键在于测定 CTOD 和裂纹扩展量, 现如今数字图像相关技术 (DIC) 的非接触式全场变形测量方法已经分别在 CTOD 和裂纹扩展的测量中得到应用^[7-11], 因此通过对 DIC 的变形场进行推算可以同时得出 CTOD 和裂纹扩展量, 从而减少构建阻力曲线时的工作量。CTOD 可以通过 DIC 系统中的虚拟引伸计进行测量, 而裂纹扩展量则可以通过 DIC 确定裂纹尖端的位置后推算得

^{*} 收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52265018, 51675110); 广西自然科学基金资助项目 (2021GXNSFAA220119); 柳州市科技计划项目 (重大专项: 2022ABA0101)

通信作者: 郑战光 (1975—), 男, 博士, 教授。主要从事机械强度理论研究。Email: zhenglight@126.com

到。在以往的研究中^[12-15],根据 DIC 测量结果估计裂纹尖端的位置一般采用拟合或全场分析的方法,然而上述方法会因为裂纹尖端附近的塑性变形导致计算结果不准确,若要考虑塑性区的影响又会导致裂纹尖端位置的计算过程变得复杂。为此,SHUAI 等^[16]提出了一种基于 DIC 位移场确定裂纹尖端的方法,即在裂纹尖端后方的位移场中设置对称于裂纹的两条线,通过一个数值函数拟合两条线的位移差来估算裂纹尖端位置,他们利用该方法成功计算了应力强度因子。YI 等^[17]通过虚拟引伸计方法获取了裂纹张口位移随单边缺口弯曲试样表面高度变化的曲线,该曲线的最大曲率点对应的高度值就是裂尖位置。对于 SENT 试样的研究,FAGERHOLT 等^[18]基于节点分裂技术,讨论了使用 DIC 识别平面 SENT 焊接试件裂纹路径的可能性。VERSTRAETE 等^[19]探讨了使用 DIC 测量的全场变形来构建阻力曲线的可能性,他们通过 DIC 跟踪侧槽旁边位移曲线的最大曲率点来计算延性裂纹扩展,再根据 DIC 得到的变形场成功计算 CTOD 并构建了阻力曲线,该阻力曲线与通过直流电位降法测量得到的阻力曲线非常吻合,但该方法的计算较为复杂,需要拟合 16 阶的多项式以及进行二次求导,不便于实际工程使用。

上述各种 DIC 的测量方法,本质上都是通过观测裂纹上下方的位移变化来确定裂尖位置,借鉴于此,本文提出了一种通过跟踪裂纹尖端的位置推算延性裂纹扩展量从而获取阻力曲线的方法。首先采用 DIC 获取 SENT 试样的变形场和应变场,在变形场中缺口及裂纹上下方区域设置两条对称的平行线;然后把这两条线上各点的位移逐点相减得到位移差,将各点的位移差进行多项式拟合得到位移差曲线后,仅通过一次求导得到曲线上的临界点,该临界点的横坐标位置就是裂纹尖端的位置;再通过追踪临界点的移动来计算裂纹扩展量,利用 DIC 的虚拟引伸计测量 CTOD,最终得到 CTOD 阻力曲线,其中 CTOD 的测量采用 SCHWALBE 等^[20]提出的 $CTOD-\delta_0$ 方法进行。为了检验该方法的准确性,将构建的阻力曲线与 VERSTRAETE 等^[19]的方法进行了对比验证。

1 基于 DIC 测量 CTOD 阻力曲线的方法

1.1 DIC 位移测量原理

数字图像相关方法(简称 DIC)是一种方便快捷的非接触式测量方法,运用这种方法可以直接对试样表面的位移和应变进行观测计算,并通过计算软件输出各个方向上的位移和应变数据^[21-22]。其原理主要是根据空间和时序分别对双相机拍摄的图像及前后拍摄的图像进行相关性匹配,然后再利用双目视觉技术进行三维重建,最后根据重建结果计算位移和应变。该技术通过相机获取试样表面的随机散斑,对每一张图像的散斑变化进行追踪,使用笛卡尔坐标系 (x, y, z) 可测得位移场 (u, v, w) 。本文试验采用单轴拉伸,选取 SENT 试样缺口上下两条平行线上的节点进行研究。

1.2 裂纹尖端位置的确定方法

构建 CTOD 阻力曲线需要计算 CTOD 和裂纹扩展量 Δa ,由裂纹尖端的位置可以推算出上述参数,为此本文提出一种能获取裂纹尖端位置的简单估计方法,即在 DIC 计算的位移场中,于缺口及裂纹上下方弹性区域设置两条平行横线,通过两条横线上各点的位移差变化情况寻找裂尖位置,如图 1 所示,将图中的两条横线分别设为“线 1”和“线 2”。在通常情况下,存在缺口或裂纹的位置的上下位移差变化幅度会比还未开裂位置的大,因为未开裂的位置要受到剩余韧带的控制,而缺口或开裂的位置则没有这种约束。假定不受剩余韧带约束的区域和受剩余韧带约束的区域之间有一个临界点,且该点的位置与裂纹尖端的位置有关,因此追踪位移差变化幅度的临界点移动就可以确定裂纹扩展量。为了避免受到裂纹尖端附近的塑性区变形影响,两条线的间隔要足够远,

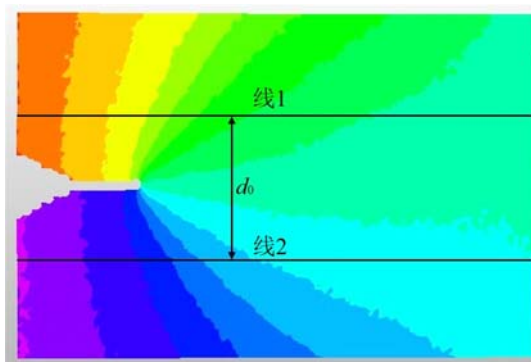


图 1 DIC 位移场中两条线的位置

Fig. 1 The position of two lines in the DIC displacement field

目前已有相关研究表明^[16],当两条线之间的距离超过 100 个像素单位(约 $300\mu\text{m}$)后,拟合方法估计的位置与显微镜观测的实际位置误差不超过 $6\mu\text{m}$ 。因此本研究选取的两条线分别位于缺口开口处的上下方,保证两条线之间的距离 d_0 大于 $300\mu\text{m}$,横线的长度与试样宽度相同,这样既能在水平方向完整地获取试样的位移差变化,又可避免塑性变形的影响。

由 XTDIC 分析软件输出 DIC 位移场中线 1 和线 2 的垂直位移 v_1 、 v_2 ,以此类推,第 j 个时刻输出的垂直位移为 v_1^j 、 v_2^j ,则第 j 个时刻对应的垂直位移差 Δv^j 为

$$\Delta v^j = |v_2^j - v_1^j| \quad (1)$$

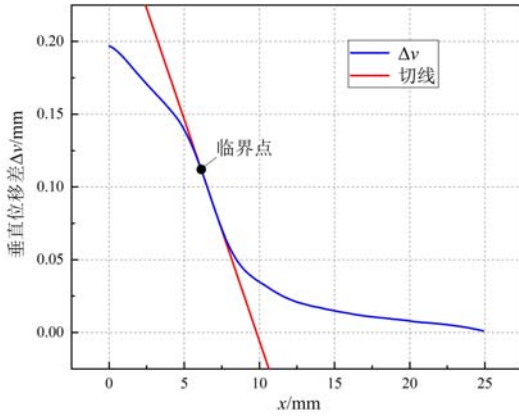


图 2 垂直位移差分布曲线

Fig. 2 Vertical displacement difference distribution curve

然而,仅仅通过切线的方法确定这个临界点是不准确的,不同的研究人员可能会选择不同的临界点,因此需要使用定量的方法获取临界点。首先,对垂直位移差曲线进行多项式拟合得到垂直位移差函数,见式(2):

$$v(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (2)$$

式中 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 为多项式系数。

在拟合过程中发现 $n=9$ 时, R 的平方值高达 0.998,此时多项式足以描述垂直位移差的变化趋势,最终得到多项式拟合曲线如图 3 所示。然后对位移差函数进行一阶求导得到

$$v'(x) = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + \cdots + 9a_9 x^8 \quad (3)$$

求导后得到的函数值就是曲线上各位置的切线斜率。接着将求导得到的函数与原垂直位移差函数在同一横坐标系下分别绘制两条曲线,如图 4 所示。在求导得到的函数曲线上找到最小值点,并在同一横坐标下找到垂直位移差曲线上的点,该点就是垂直位移差变化幅度的临界点,这是因为该点的垂直位移差下降最快。在图 4 中可以看到,该临界点位置对应的横坐标约为 6.06234mm,与试样缺口的深度位置几乎一致,因此该点的位置就是试样上已开口和未开口之间的临界位置。基于此临界位置预测延性裂纹扩展,设第 j 个时刻临界点的横坐标为 x^j ,将开裂后临界点的移动视为裂纹扩展,移动的距离视为裂纹扩展量 Δa ,即

$$\Delta a = x^j - a_0 \quad (4)$$

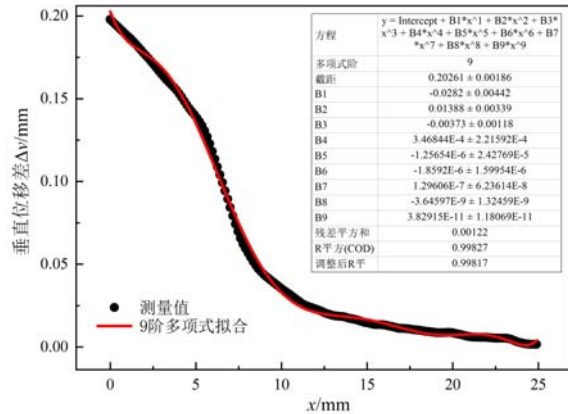


图 3 多项式拟合曲线

Fig. 3 Polynomial fitting curve

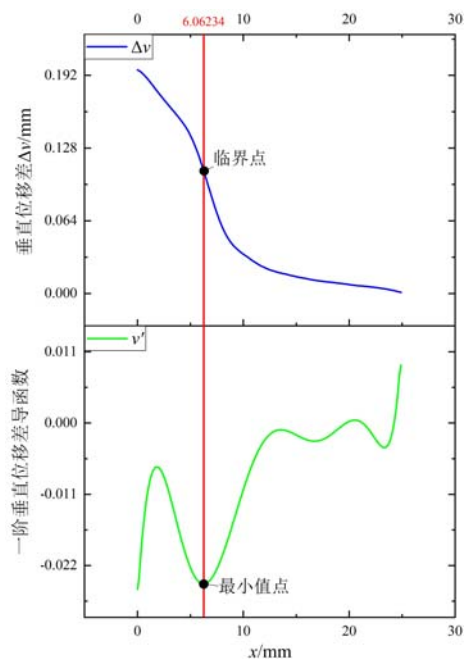
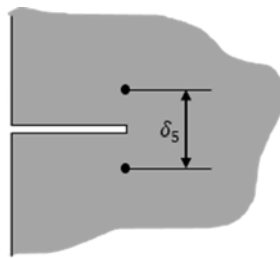


图4 定位临界点的方法图

Fig. 4 The method for locating critical points

图5 测量 δ_5 的示意图Fig. 5 Schematic diagram of measuring δ_5

1.3 CTOD 的测量方法

本文采用 GKSS 开发的 CTOD- δ_5 方法^[20]测量 CTOD,即测量两个相距 5.0mm 且对称于原裂纹尖端的节点的位移,如图 5 所示。通过 DIC 分析摄像机采集的试样图像,获取整个试样表面的位移场后,寻找这两个节点的位移并计算差值即可。也可以直接在原裂纹尖端上设置虚拟引伸计,获取试样起裂时虚拟引伸计所测量的位移。两种方法都可以实时测量得到 δ_5 ,本文将采用第二种方法进行测量。

2 试样材料、试验设备和试验过程

2.1 材料

根据《压力容器用铝及铝合金管材》(GB/T 38512—2020)的标准^[23],本研究的 SENT 试样材料采用 6061(T6)铝合金,主要尺寸如图 6 所示,厚度为 1mm。按照尺寸从 6061 铝材切割出试样后,通过低速电火花线切割(WEDM)加工了 3mm 单边缺口,即 $a_0=6\text{mm}$,这种加工方式可以避免加工过程中引入残余应力,加工出来的初始缺口根部半径为 0.1mm。此外 ExxonMobil 公司^[3]对 SENT 的测试以及 AKOURRI 等^[24]对单边缺口弯曲试样的研究表明,高韧性金属可以不进行疲劳预裂,6061 铝合金属于一种高韧性金属,因此本文的 SENT 试样不进行疲劳预裂,这样也有利于控制初始裂纹深度。

2.2 试验设备与试验过程

拉伸试验采用岛津 SHIMADZU 万能试验机,以恒定 1mm/min 的拉伸速度进行加载,通过 TRAPEZIUM X 软件记录万能试验机的时间(T)、载荷(P)、位移(V)等数据。数字图像相关设备测量试样表面的位移场和应变场,通过 XTDIC 软件输出相应数值。两种设备的组合摆放如图 7 所示,数字图像相关设备的相机型号为 Basler aca2440-35,拍摄的像素大小为 2448pixel×2048pixel,焦距为 25mm,两个镜头的夹角为 25°,相机拍照频率最高为 35Hz。

试验过程如下:首先,将试样裂纹周围区域用砂纸打磨到露出新鲜金属表层,用无水乙醇洗去试样表面的打磨碎屑后,再使用黑白哑光漆对试样表面喷漆以制作散斑。将 DIC 的设备标定调整好后,通过万能试验机对试样施加载荷,为了确保试验数据的准确性,两种设备的启动和停止需

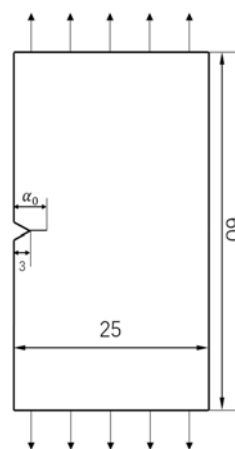


图6 SENT 试样尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Size of SENT specimen (unit: mm)

保持一致。拉伸试验过程中相机全程拍摄,照片采集频率为 10Hz。拉伸试验结束后,在 XTDIC 软件上选定 SENT 试样的分析区域,子区步长大小为 $10\text{pixel} \times 10\text{pixel}$,调整云图参数直至获取合适的位移云图,并按照图 1 所示在应变云图中设置两条对称于缺口裂纹的平行线,线的长度与试样宽度一致,并以试样左端为零点建立直角坐标系,输出线上节点的纵向位移数据,将这些位移数据按式(1)处理后即可获得垂直位移差分布曲线,再按照 1.3 中的计算方法确定裂纹尖端位置,并计算 CTOD- δ_0 和裂纹扩展量 Δa 。

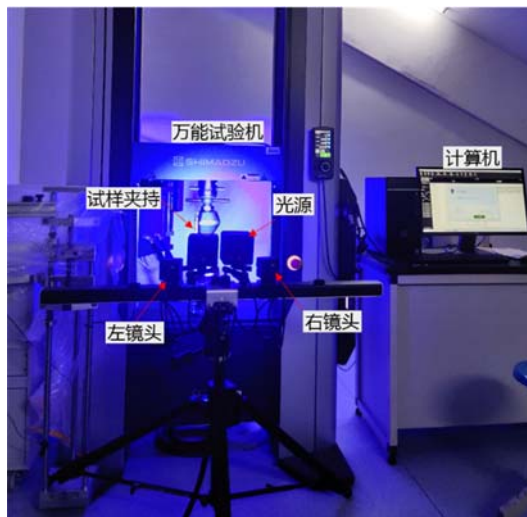


图 7 万能试验机和 XTDIC 组合的试验装置

Fig. 7 Universal testing machine and XTDIC combination test device

3 结果与讨论

根据本文方法开展试验后,由万能试验机获得初始缺口深度 $a_0 = 6\text{mm}$ 的 SENT 试样伴随裂纹扩展的载荷-位移(P-V)曲线如图 8 所示。对试样刚刚加载到峰值载荷后,通过 DIC 获取了稳定裂纹扩展中 6 个不同位置的数据 (P_i, V_i) ,并计算裂纹扩展中两条线之间的垂直位移差,然后按照 1.2 节的方法确定 (P_i, V_i) 的位移差变化幅度临界点,临界点的横坐标即为裂纹尖端的横向位置。以 (P_1, V_1) 为例,图 9 表示稳定裂纹扩展中第一个位置点 (P_1, V_1) 的 DIC 垂直位移场计算结果,并根据 1.2 节的方法测定其裂纹尖端位置如图 10 所示,其中临界点的横坐标约为 6.657mm,此时裂纹相比初始裂纹长度扩展了 0.657mm。

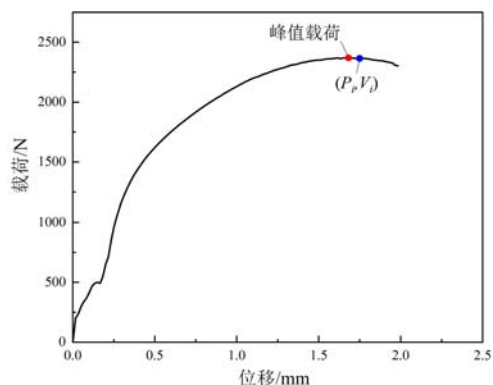


图 8 载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve

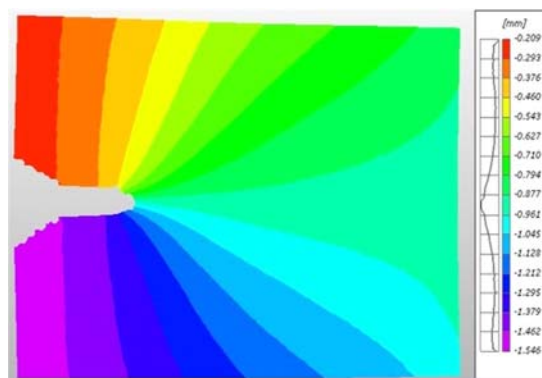


图 9 由 DIC 计算的 (P_1, V_1) 垂直位移场

Fig. 9 Vertical displacement field of (P_1, V_1) calculated by DIC

为了验证 (P_1, V_1) 裂尖位置的准确性,首先使用单反相机对裂纹扩展至 (P_1, V_1) 时的裂纹尖端区域进行拍照,相机拍摄的照片分辨率为 $6000\text{pixel} \times 4000\text{pixel}$,试验前对相机进行标定,确认单位像素对

应的长度为 0.0149mm,然后测量试样左端至裂纹端部的直线像素长度即可大致获得裂纹尖端的位置参数。以开始试验时的图像作为参考图像,分别对参考图像和试样开裂至 (P_1, V_1) 时的图像进行测量,如图 11 所示,照片中从试样左端至裂纹尖端处约为 446pixel,即长度为 6.6454mm,与前者得出的结果相差约 0.01mm,表明本文方法的误差约为 0.0249mm。

将其余各位置的裂纹扩展量按照本文方法测量好后,再根据 1.3 节的方法获取 δ_0 ,将每个位置点的裂纹扩展量与对应的 δ_0 组合,然后以裂纹扩展量 Δa 为横坐标, δ_0 为纵坐标绘制曲线,并根据式(5)拟合曲线如图 12(a)所示。

$$\delta = \alpha \Delta a^\beta \quad (5)$$

式中: δ 为 CTOD 的拟合函数; α 和 $\beta \geq 0$, $0 \leq \beta \leq 1$ 。

为了确保阻力曲线的准确性,本文使用 VERSTRAETE 等^[19]提出的方法,即通过追踪位移差曲线最大曲率点的位移以获取裂纹扩展量 $\Delta a'$,最大曲率点表示曲线弯曲程度最大的位置点,曲线的曲率 K 可由式(6)计

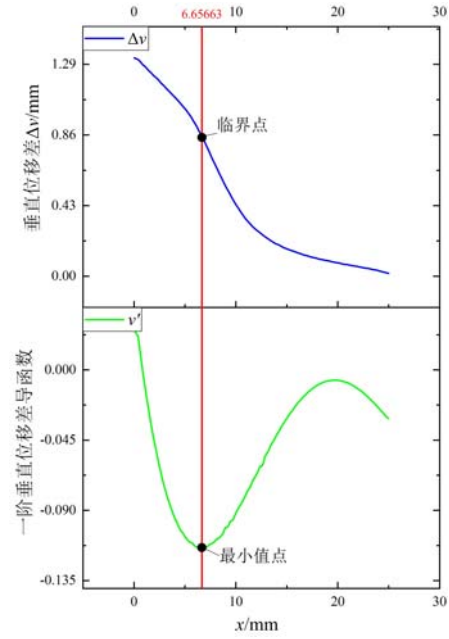


图 10 定位 (P_1, V_1) 的裂纹尖端

Fig. 10 Measure the crack tip of (P_1, V_1)

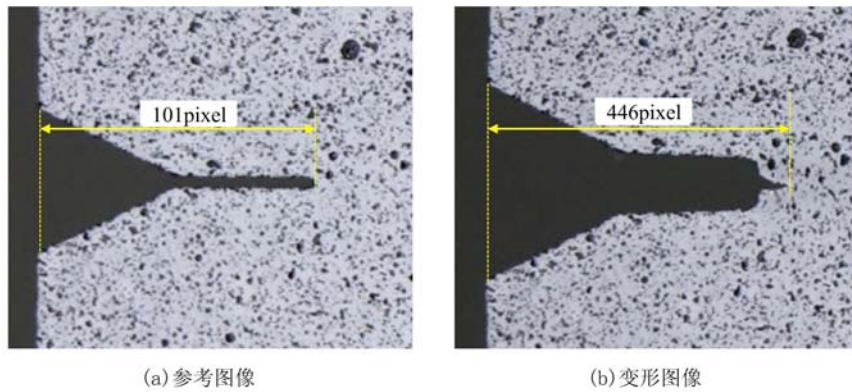


图 11 用单位像素测量法验证裂纹尖位置

Fig. 11 Unit pixel measurement verifies crack tip location

算而得, $\Delta a'$ 的计算原理与 Δa 相同, 计算出 $\Delta a'$ 后再次根据式(5)拟合阻力曲线如图 12(b)所示, 与本文提出的方法进行对比。表 1 为裂纹尖端张口位移的测量数据和通过两种方法计算后获得的裂纹扩展量。

$$K = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (6)$$

表 1 结果显示, 追踪临界点获得的 Δa 总体上小于追踪最大曲率点获得的 $\Delta a'$, 说明临界点在位移差曲线中的变化幅度比最大曲率点的小。图 12 中给出了两种方法获得的阻力曲线拟合方程分别为 $\delta = 1.10555 \Delta a^{0.62261}$, $\delta = 1.0301 \Delta a^{0.37202}$, 本文方法拟合的阻力曲线 R^2 达到了 0.99 以上, 而 VERSTRAETE 方法拟合的阻力曲线 R^2 只有 0.96, 表明本文方法计算的裂纹扩展量具有更好的拟合度。本文提出的通过追踪临界点位移的方法和 VERSTRAETE 等^[19]提出的追踪最大曲率点的方法获得的两条阻力曲线之间的总体趋势接近, 但在裂纹扩展的起始阶段存在一定差异, 这可能是由于本文低载荷下 DIC 测量的精度不够高造成的, 因此, 在使用 DIC 测量阻力曲线时, 应选取峰值载荷后的试验数据进行计算, 此时裂纹处于稳定扩展状态, 计算得到的结果会更好。

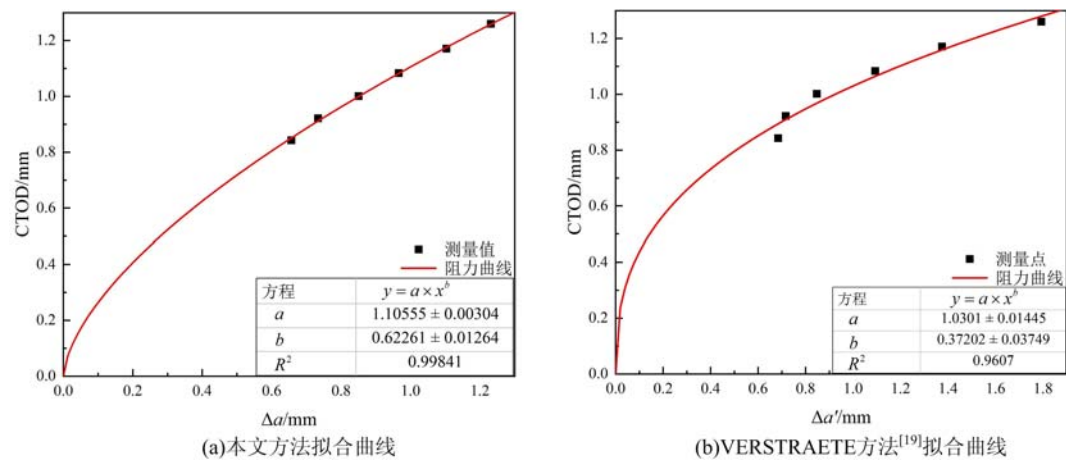


图 12 CTOD 裂纹扩展阻力曲线
Fig. 12 CTOD crack growth resistance curve

表 1 试验数据以及两种方法获取的裂纹扩展结果
Tab. 1 Experimental data and crack growth results obtained by the two methods

位置点 (P_i, V_i)	裂纹尖端张口位移 δ_0/mm	裂纹扩展量 $\Delta a/\text{mm}$	裂纹扩展量 $\Delta a'/\text{mm}$
(P_1, V_1)	0.805	0.657	0.685
(P_2, V_2)	0.908	0.734	0.717
(P_3, V_3)	0.965	0.851	0.848
(P_4, V_4)	1.082	0.966	1.093
(P_5, V_5)	1.177	1.103	1.375
(P_6, V_6)	1.258	1.231	1.793

4 结论

(1) 通过在基于 DIC 技术获取的位移场中布置两条对称于缺口和裂纹的平行线,获取了 SENT 试样在裂纹扩展方向上的垂直位移差,利用垂直位移差变化幅度的临界点确定了裂纹尖端的位置,并且对比了在试验中拍摄的裂纹尖端高像素图像,计算结果的误差约为 0.0249mm,表明本文方法的精度较高。

(2) 通过追踪临界点的位移计算了 SENT 试样的延性裂纹扩展量,结合 DIC 虚拟引伸计获取的 CTOD,拟合了 CTOD 裂纹扩展阻力曲线,相比前人的方法,本文方法不但降低了多项式的阶数,而且只需要计算一阶导数,更简单快捷,阻力曲线的拟合效果也更好。

(3) 本文的研究方法主要是通过 DIC 技术确定试样表面的裂纹尖端位置从而确定裂纹扩展量,因此该方法适用于测量贯穿试样厚度的裂纹。若裂纹在扩展中有偏折,可以通过类似本文的方法确定裂纹尖端的纵坐标位置,即在 DIC 位移场中的裂尖前端设置一条竖线,获取该竖线的垂直位移并绘制曲线,由于试样开裂,曲线中部位置同样会存在一个转折点,求出该点的位置就能获取裂纹尖端向上或向下偏折的位置。

参考文献:

[1] CRAVERO S, RUGGIERI C. Correlation of fracture behavior in high pressure pipelines with axial flaws using constraint designed test specimens-Part I: plane-strain analyses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72 (9):1344-1360.

[2] DNV-OS-F101, Submarine Pipelines Systems[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2000.

- [3] ExxonMobil. Measurements of crack-tip opening displacement (CTOD) fracture resistance curves using single-edge notched tension (SENT) specimens[R]. USA: Upstream Research Company, 2010.
- [4] VERSTRAETE M, VAN MINNEBRUGGEN K, HERTELÉ S, et al. Determination of tearing resistance in SENT and CWP specimens using direct current potential drop measurements[R]. Ostend, Belgium: The 6th International Pipeline Technology Conference, 2013.
- [5] 唐家睿, 陈宏远, 吉玲康, 等. 单试样卸载柔度法测定 X70 管线环焊缝断裂韧性阻力曲线[J]. 焊管, 2018, 41(1):21—27 (TANG Jiarui, CHEN Hongyuan, JI Lingfang, et al. Determination of fracture resistance curve of X70 pipeline girth weld by single sample unload compliance method[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(1):21—27 (in Chinese))
- [6] 武旭. 高钢级管道环焊缝局部本构关系与断裂韧性测试研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020 (WU Xu. The study of local constitutive relation and fracture toughness test of girth weld for high grade pipeline steels[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020 (in Chinese))
- [7] SAMADIAN K, HERTELÉ S, DE WAELE W. Measurement of CTOD along a surface crack by means of digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 205:470—485.
- [8] 田文煜, 杜伟, 左宏, 等. 基于数字图像相关的金属材料低温裂尖张开位移试验测量方法[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1014—1022 (TIAN Wenyu, DU Wei, ZUO Hong, et al. Experimental measurement method of low temperature crack tip opening displacement of metallic materials based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1014—1022 (in Chinese))
- [9] ZHAO Y, HU D, LIU Q, et al. High resolution and real-time measurement of 2D fatigue crack propagation using an advanced digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 268:108457.
- [10] 魏良宝, 蒋明. 基于三维数字图像相关的低周疲劳试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):410—418 (WEI Liangbao, JIANG Ming. Experimental study on low cycle fatigue based on 3-D digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):410—418 (in Chinese))
- [11] 刘强, 周铁昊, 孙晨, 等. 基于数字图像相关的裂纹端部全场三维变形实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1):49—58 (LIU Qiang, ZHOU Yihao, SUN Chen, et al. Experimental investigation on full three dimensional deformation near crack tip based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):49—58 (in Chinese))
- [12] ROUX S, HILD F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches[J]. International Journal of Fracture, 2006, 140:141—157.
- [13] ROUX S, RÉTHORÉ J, HILD F. Digital image correlation and fracture: an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(21):214004.
- [14] ZHU M L, LU Y W, TONG J, et al. In situ near-tip normal strain evolution of a growing fatigue crack[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2016, 39(8):950—955.
- [15] CHERNYATIN A S, LOPEZ-CRESPO P, MORENO B, et al. Multi-approach study of crack-tip mechanics on aluminium 2024 alloy[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, 98:38—47.
- [16] SHUAI J, ZHAO J, LEI L. Simple crack tip and stress intensity factor determination method for model I crack using digital image correlation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122:103621.
- [17] YI Y, LIU G, LIN G, et al. Evaluating the dynamic fracture toughness of graphite via accurate determination of the dynamic crack propagation length[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 543:152502.
- [18] FAGERHOLT E, STBY E, BRVIK T, et al. Investigation of fracture in small-scale SENT tests of a welded X80 pipeline steel using digital image correlation with node splitting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 96:276—293.
- [19] VERSTRAETE M A, DENYS R M, VAN MINNEBRUGGEN K, et al. Determination of CTOD resistance curves in side-grooved single-edge notched tensile specimens using full field deformation measurements [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 110:12—22.
- [20] SCHWALBE K H, NEALE B K, HEERENS J. The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials; EFAM GTP 94[M]. Hamburg: GKSS, 1994.
- [21] 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):62001.
- [22] GAO Y, CHENG T, SU Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:73–80.
- [23] GB/T 38512—2020, 压力容器用铝及铝合金管材[S]. 北京:中国标准出版社, 2020 (GB/T 38512—2020, Aluminum and aluminum alloy pipes for pressure vessels[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020 (in Chinese))
- [24] AKOURRI O, LOUAH M, KIFANI A, et al. The effect of notch radius on fracture toughness J_{Ic} [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65(4):491–505.

A simple method for measuring CTOD resistance curve of single edge notched tension specimen based on DIC

ZHENG Zhanguang¹, WEI Zonghan¹, XIE Changji¹, HUANG Zeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;

2. School of Mechanical Engineering, Guangxi Technological College of Machinery and Electricit, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that the calculation of the ductile crack growth is too complicated when measuring the CTOD resistance curve of SENT specimens, a new method was proposed to determine the crack tip location and calculate the ductile crack growth rapidly by using the deformation field calculated by digital image correlation technology (DIC). Firstly, two parallel horizontal lines were set up in the elastic region above and below the notch and crack, and then a curve was constructed according to the displacement difference between the two horizontal lines. The critical point of the curve variation amplitude was the position of the crack end, and the crack growth was calculated according to the critical point position. Finally, the crack tip opening displacement (CTOD) was measured and the resistance curve was constructed. The proposed method was compared with another method to measure the resistance curve of CTOD SENT samples by DIC, and the results showed that the proposed method had better fitting effect after simple calculation.

Keywords: single notch tensile (SENT) specimen; crack propagation resistance curve; crack tip opening displacement(CTOD); digital image correlation (DIC)