

一种针对裂尖变形场测量的正则化全局 DIC 方法

杜鉴昕, 赵加清*, 王海涛, 孙立斌, 吴莘馨

清华大学核能与新能源技术研究院先进核能技术协同创新中心, 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 裂纹尖端变形场测量是定量研究材料断裂特性和行为的关键。基于子区的局部数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)目前应用较多,但跨裂纹子区计算出的数据并无意义,且在测量复杂裂纹变形场时会面临欠匹配的问题。为了克服这些缺点,提出一种基于 Hermite 单元的正则化全局 DIC(HRGDIC)方法。该方法采用高阶 Hermite 形函数构建全局 DIC 的有限元单元,建立同时考虑灰度误差与位移场光滑性的迭代方法。同时,在每次迭代求解的过程中使用广义交叉验证(GCV)方法来求解最优正则化参数。于是,HRGDIC 方法不仅能处理尖端复杂高梯度变形,还可在迭代结束时获得平滑的位移场和应变场。从裂纹尖端变形图像的模拟和真实测量结果可知,与传统的局部 DIC 方法相比,所提方法测量精度更高,是解决裂纹尖端变形场测量的有效方法。

关键词 测量; 数字图像相关; 裂纹尖端变形场; 正则化

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1112001

Regularized Global Digital Image Correlation Method for Crack Tip Deformation Field Measurement

Du Jianxin, Zhao Jiaqing*, Wang Haitao, Sun Libin, Wu Xinxin

The Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Collaborative Innovation

Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Institute of Nuclear and New Energy Technology,

Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Crack tip deformation field measurements are crucial for the quantitative study of material fracture characteristics and behavior. Subset-based digital image correlation (DIC) is commonly used for this purpose; however, results obtained across the crack are meaningless and are faced with under-match problems in measuring complex deformation fields around the crack. To solve these problems, we propose the Hermite-element based regularized global DIC (HRGDIC) method for deformation field measurements around the crack. HRGDIC uses the high order Hermite element function to construct each finite element in global DIC, and it establishes an iteration method that simultaneously considers the gray-scale error and the displacement field smoothness. During each iteration, the generalized cross-validation method is used to obtain the optimum regularization parameter. Therefore, the proposed HRGDIC method can not only handle the complex high-gradient deformation around the crack tips but also produce smoothed displacement and strain fields at the end of the iterations. Simulations and experimental results of crack tip deformation images show that compared with the traditional local DIC, the proposed HRGDIC has higher measurement accuracy, and it is an effective method for solving the high-gradient deformation field measurement problems around crack tips.

Key words measurement; digital image correlation; crack tip deformation field; regularization

OCIS codes 120.3940; 120.4290; 100.2000

1 引 言

数字图像相关(DIC)方法^[1-2]是一种非接触式全场变形的测量方法,已在航空航天^[3]、土木工程^[4-5]、生物力学^[6]、断裂力学^[7]等领域取得广泛的

应用。在断裂力学领域,由于断裂韧性对于结构材料的安全设计有着重要意义,DIC方法也被用于测量裂纹尖端变形场,进而计算出应力强度因子、裂纹张开位移(CTOD)、J积分等关键参数。其中,常见的方法为基于子区的局部 DIC 方法,已被用于功能梯度材

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-02-26; 录用日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51705279)、国家科技重大专项(ZX069)、清华大学自主科研计划

* E-mail: jqzhao@mail.tsinghua.edu.cn

料^[8]、爆炸加载的脆性材料^[9]、岩石材料^[10]等平面试样以及管状试样^[11]的裂纹变形场测量研究。

由于裂尖附近为典型的高梯度、不连续变形场,这对着重处理连续变形的传统局部 DIC 方法提出了挑战,至今,基于 DIC 的裂尖变形场的精确测量目前仍为学术界关注的热点问题之一。局部 DIC 方法的子区不允许跨裂纹计算^[12],其无法准确测得靠近裂纹边界处的变形场,但由于靠近裂纹周围的应力更加集中,是研究裂纹问题的关键,故必须解决这个问题。目前,解决这个问题的方法可以划分为改进的基于子区的局部 DIC 方法^[13-15]和基于有限元的全局 DIC 方法^[16-20]两类。

对于局部 DIC 方法,其主要是通过对于子区进行特殊处理来测量裂纹边界的变形场。例如:Pan 等^[13]创造性地使用非正方形子区的方法,测得感兴趣区域(ROI)边界的变形场,即测得裂纹面两侧的变形场;Poissant 等^[14-15]使用子区分割的方法将裂纹经过的子区进行分割,以此测量了裂纹面两侧的不连续变形场。但是,对于子区的特殊处理,降低了子区内像素点的数量,使得由灰度噪声引起的随机误差显著增加,同时,基于平滑算法^[21-24]计算裂纹边界应变时,由于存在边界效应,引入了额外的应变测量误差。

对于全局 DIC 方法,Fagerholt 等^[16-17]先后提出基于节点分割的 4 节点矩形有限元单元以及单元重叠的 Q4 全局 DIC 方法来测量裂纹变形场,从像素级别定义裂纹位置,优化了节点分割方法。此外,

R  thor   等^[18]将扩展有限元的思想与 DIC 结合,提出了扩展数字图像相关(X-DIC)方法,在此基础上 Chen 等^[19]提出了两步扩展数字图像相关方法。无论是节点分割方法还是 X-DIC 方法,使用的形函数都为 Q4 单元形函数,较难拟合高梯度的变形场。

此外,无论是一阶形函数的局部 DIC 方法还是 Q4 单元的全局 DIC 方法,在处理高梯度变形时都需要较小的子区或单元大小,不可避免地存在对噪声敏感的问题,而二阶形函数的局部方法所需的较大子区又难以计算裂纹附近的变形。为了更准确地计算裂纹尖端的变形场,本文提出使用高阶 Hermite 单元的正则化全局 DIC(HRGDIC)方法,该方法使用高阶 Hermite 单元,可以较精确地拟合出裂纹尖端的高梯度变形,并通过调整较大的单元大小在一定程度上抵抗噪声,建立了同时考虑灰度误差与位移场光顺性的迭代方法,经过应变场计算后直接得到裂纹尖端的应变场。最后,HRGDIC 方法的有效性和可靠性将通过裂纹模拟图像和真实变形实验得以验证。

2 基本原理与实验

2.1 基于 Hermit 单元的正则化全局 DIC 方法的基本原理

对于全局 DIC 方法^[20],为了计算期望得到的变形场,使用零均值归一化平方根误差(ZNSSD)定量描述变形前和变形后计算区域(即有限单元覆盖的区域)的相似性,表达式为

$$C_{ZNSSD} = \sum_{e \in S} \sum_{S_p \in e} \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\Delta f} - \frac{g[x + u(x, y, \mathbf{q}^e), y + v(x, y, \mathbf{q}^e)] - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (1)$$

式中: f_m 和 g_m 分别为参考图像的灰度均值和变形图像的灰度均值; Δf 和 Δg 分别为参考图像的灰度标准差和变形图像的灰度标准差^[1]; e 是有限元划分的一个单元; S 是所有单元的集合; S_p 是所计算区域内(所有单元)的任意坐标为 (x, y) 的点; \mathbf{q}^e 为某一单元的节点位移向量。

在有限元方法中,单元内所有点 x 的坐标 (x, y) 的位移 $\mathbf{u}(x, y)$ 是单元节点位移 \mathbf{q}^e 的函数,即

$$\mathbf{u}(x, y) = \mathbf{N}^e(x, y)\mathbf{q}^e, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{N}^e(x, y)$ 为单元形函数。Q4 和 Q8^[25] 为最常用形函数,本研究采用 5 阶不完备多项式的 Hermite 形函数。对于 C^2 连续 Hermite 单元,一维 Hermite 单元的形函数为

$$\begin{cases} \bar{N}_1^0 = -(\xi - 1)^3(3\xi^2 + 9\xi + 8)/16 \\ \bar{N}_1^1 = -(\xi - 1)^3(3\xi + 5)(\xi + 1)/16 \\ \bar{N}_1^2 = -(\xi - 1)^3(\xi + 1)^2/16 \\ \bar{N}_2^0 = (\xi + 1)^3(3\xi^2 - 9\xi + 8)/16 \\ \bar{N}_2^1 = -(\xi + 1)^3(3\xi - 5)(\xi - 1)/16 \\ \bar{N}_2^2 = (\xi + 1)^3(\xi - 1)^2/16 \end{cases} \quad (3)$$

基于一维 Hermite 单元,二维 C^2 连续 Hermite 单元为含有 4 个节点的矩形单元,每个节点的 9 个自由度对应的形函数定义为

$$N_i^{(j,k)}(\xi, \eta) = \bar{N}_i^{j'}(\xi) \bar{N}_i^{k'}(\eta) \omega^j h^k, \quad (4)$$

式中: $\xi, \eta \in [-1, 1]$ 为归一化的单元内部点的局部

坐标值; $N_i^{(j,k)}(\xi, \eta)$ 对应矩形 Hermit 单元的节点 i 的自由度 $\left(\frac{\partial^{i+k} u}{\partial x^j \partial y^k}\right)_i$; w 和 h 分别是单元宽度和高度的一半; i', i'' 为一维单元的节点编号。当节点坐标取 -1 和 1 时, i', i'' 值取 1 和 2。

对于连续的多个单元, 将(4)式中的单元形函数矩阵进行组装得到全局形函数矩阵, 并得到单元覆盖区域所有点的 x 方向位移 u^c , 表达式为

$$u^c = \sum_{e \in S} N^e(x) q^e = Nq, \quad (5)$$

式中: q 和 N 分别为全局节点位移向量和全局形函数矩阵; 上角标 c 表示为计算值。关于 C^1 连续单元形函数参见文献[26]。

定义全局 DIC 的有限元单元后即可求解相关系数 C_{ZNSSD} 的最小值, 即

$$\frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial q} = 0. \quad (6)$$

采用牛顿-拉弗森法可得

$$q^{(k+1)} = q^{(k)} - [H(q^{(k)})]^{-1} \times \frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial q^{(k)}},$$

式中: $H(q)$ 为 Hessian 矩阵, $q^{(k)}$ 为第 k 次迭代结果。而正则化解法为每次迭代过程中求解含平滑项的误差函数的最小值, 即

$$\min \|\delta b - A \times \delta q\|_2^2 + \lambda \|Lq^{(k)}\|_2^2, \quad (7)$$

其中,

$$A = - [H(q^{(k)})]^{-1},$$

$$\delta q = q^{(k+1)} - q^{(k)}, \delta b = \frac{\partial C_{ZNSSD}}{\partial q^{(k)}}. \quad (8)$$

平滑算子 L 定义为

$$\|Lq\|_2^2 = \int \left\| f^{(k)} u^c(x) \right\|_2^2 d\Omega, \quad (9)$$

式中: Ω 为所要平滑的平面区域。当 $k=3$ 时, 位移场的光顺性可以表示为^[21]

$$\|f^{(3)} u^c(x)\|_2^2 = \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)^2 + 3 \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y}\right)^2 + 3 \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial y^3}\right)^2. \quad (10)$$

为了求得误差函数的最小值, 将 δb 和 $A \times \delta q$ 项分别加上 $A \times q^{(k)}$ ^[27] 变形为

$$\|b - A \times q\|_2^2 + \lambda \|Lq\|_2^2, \quad (11)$$

其中,

$$b = \delta b + A \times q^{(k)}. \quad (12)$$

统一误差函数两项的自变量后, 可先通过广义交叉验证(GCV)方法^[21]确定最优正则化参数 λ , 再代入(7)式求解误差函数极值得到 q 。同时利用

$$\begin{cases} u^s = Nq \\ \frac{\partial u^s}{\partial x} = \frac{\partial N}{\partial x} q \end{cases}, \quad (13)$$

可得平滑后的位移场与应变场。

若求解 y 方向的位移场与应变场, 计算方法同理。可见, 所提方法可以通过迭代自然获得平滑后的位移场和应变场, 无需利用逐点最小二乘等方法进行位移场后处理, 避免了逐点最小二乘引入的边界效应。

2.2 实验验证

以下分别通过裂纹尖端变形图像测量的模拟实验和真实实验来验证所提方法的有效性。

2.2.1 模拟裂纹图像实验

首先利用 I 型裂纹的模拟图像来验证所提方法的有效性。产生的裂纹图像可表示为^[28]

$$U(x, y) = \frac{K_1}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \nu) \times \left[(2\kappa - 1) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right], \quad (14)$$

$$V(x, y) = \frac{K_1}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \nu) \times \left[(2\kappa + 1) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right], \quad (15)$$

式中: 应力强度因子 $K_1 = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; 弹性模量 $E = 70 \text{ GPa}$; 泊松比 $\nu = 0.3$; $\kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}$; θ 为以裂纹尖端为原点, 沿裂纹方向为 x 轴的极坐标系中的极角。

利用(14)式和(15)式, 基于图 1(a)中的参考图像, 利用 7 阶 B 样条插值产生图 1(b)中的变形图像(588 pixel \times 588 pixel, 8 位深度), 并在两幅图像上分别添加 1% (方差等于 2.55 灰度) 的高斯白噪声。裂纹平行于 y 轴, x 方向坐标为 294 pixel。

2.2.1.1 裂纹尖端区域的测量

为了验证 HRGDIC 方法在高梯度变形位置处的精度, 在裂纹尖端选择大小为 100 pixel \times 100 pixel 的计算区域, 计算区域的底边距离裂纹尖端 15 pixel, 如图 1(a)中所示。

首先, 采用 2×2 的 C^2 连续单元的 HRGDIC 方法, 同时作为对比, 使用一阶形函数的基于子区的 DIC 方法(1-local)^[29]、二阶形函数的基于子区的 DIC 方法(2-local)^[30], 通过使用逐点最小二乘平滑(PLS)方法进行平滑得到应变场, 平滑窗口大小为 5×5 。三种方法采用的单元或子区大小如表 1 所示。由于跨裂纹子区的计算结果无意义, 若选择的

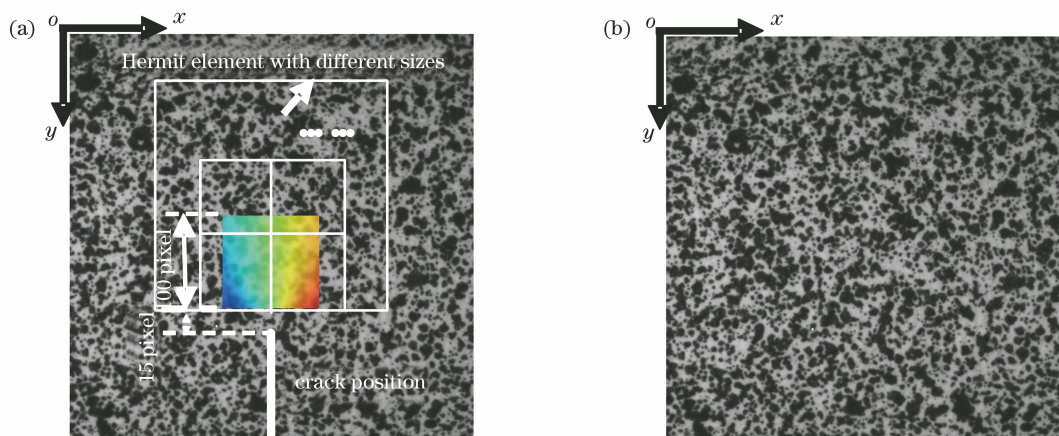


图 1 参考和变形图像。(a)参考图像;(b)变形图像

Fig. 1 Reference and deformed images. (a) Reference image; (b) deformed image

表 1 所用三种方法测量裂纹前端区域所采用的单元/子区大小

Table 1 Element/subset sizes used by three methods for the measurement of deformation at crack front region

Number of element/subset size	1	2	3	4	5
Subset size of 1-local /pixel	11	15	21	25	31
Subset size of 2-local /pixel	11	15	21	25	31
Element size of HRGDIC /pixel	60	70	80	90	100

子区大小大于 31 pixel 时便不能计算距离裂纹尖端 15 pixel 位置处的变形场,故这里为了计算离裂纹更近的变形,选择子区大小小于 31 pixel。

三种方法针对所取区域计算获得的 x 方向的位移场 U 和应变场 U_x 的均方根误差 (RMSE) 如图 2 和 3 所示。从图中可以看出,HRGDIC 方法计算得到的 U 场 RMSE 与 1-local 和 2-local 方法相差很小,但 U_x 场 RMSE 均小于 1-local 和 2-local 方法,且 U 和 U_x 场的 RMSE 均对单元大小的变化不敏感。

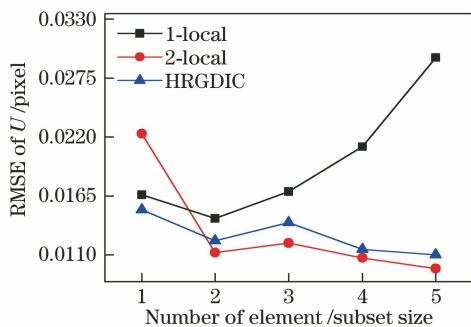


图 2 裂纹前端区域位移场 U 的 RMSE 随单元/子区大小的关系

Fig. 2 RMSE of displacement field U versus element/subset size at crack front region

为了进一步对比裂纹尖端的应变的计算精度,使用三种方法分别计算图 4 中箭头所示位置处的应变,并将三种方法的最优解(与理论解应变场 U_x 曲

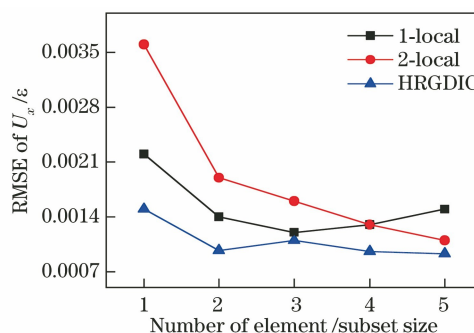


图 3 裂纹前端区域应变场 U_x 的 RMSE 随单元/子区大小的关系

Fig. 3 RMSE of strain field U_x versus element/subset size at crack front region

线之间 RMSE 最小的单元或子区大小;HRGDIC 方法单元大小 60,1-local 子区大小 11,2-local 子区大小 21)与理论解作对比,如图 4 所示。从图 4 中曲线可以看出,与 1-local 和 2-local 相比,对于裂纹尖端附近的高梯度应变,HRGDIC 法的精度最高。

此外,为了研究正则化对 HRGDIC 精度的影响,令 HRGDIC 中的 $\lambda=0$,即可得到未使用正则化的 Hermite 单元全局 DIC 方法(HGDIC)所得的应变场最优解。从图 4 可见,在波峰及波谷处,HGDIC 的应变误差明显大于 HRGDIC,这说明正则化对于应变计算精度有明显的改善,同时也证明了 HRGDIC 方法的有效性。

最后,为了研究噪声水平对 HRGDIC 精度的影

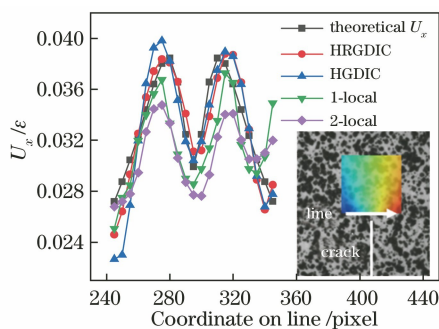


图 4 不同方法下裂纹前端直线处应变场 U_x 最优解和理论解曲线对比

Fig. 4 Comparison between the theoretical curve and optimum curves by different methods of strain U_x with optimum element/subset size at a straight line at crack front region

响,分别使用 1-local、2-local 和 HRGDIC 方法的最优子区或单元大小计算 0.1%、0.5%、1%、2%、3% 和 4% 这 6 种噪声水平(高斯噪声方差)下的应变场 RMSE,如图 5 所示。可见 HRGDIC 方法在噪声水平低于 3% 时精度均高于 1-local 和 2-local 方法,噪声大于 3% 时,低阶的 1-local 精度较高。

表 2 所用三种方法测量裂纹面一侧区域所采用的单元/子区大小

Table 2 Element/subset sizes used by three methods for the measurement of deformation on one side of crack face

Number of element/subset size	1	2	3	4	5
Subset size of 1-local /pixel	11	15	21	25	31
Subset size of 2-local /pixel	11	15	21	25	31
Element size of HRGDIC /pixel	60	70	80	90	100

图 6 和图 7 给出裂纹面一侧位移场 U 和应变场 U_x 的 RMSE 与单元/子区大小关系。从图 6 和图 7 中可以看出,HRGDIC 方法对于裂纹面一侧的应变场具有最高的计算精度,且对单元大小变化不敏感。

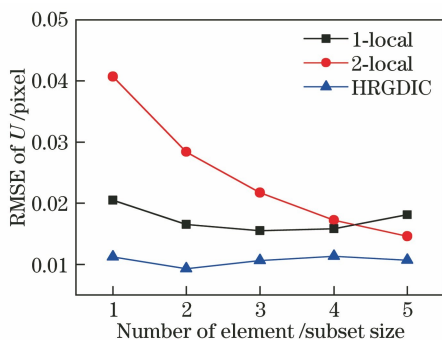


图 6 裂纹面一侧位移场 U 的 RMSE 与单元/子区大小关系
Fig. 6 Relationship between RMSE of displacement field U and element/subset size for measurement on one side of crack face

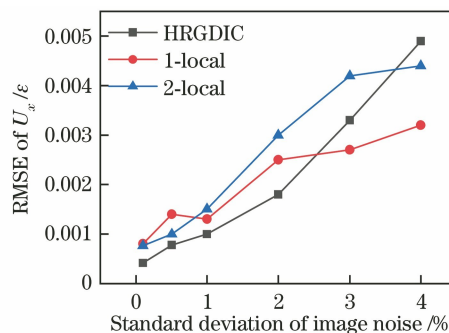


图 5 三种方法裂纹前端区域的应变场 U_x 的 RMSE 与噪声水平的关系

Fig. 5 Relationship between RMSE of strain field U_x and Gaussian noise at crack front region by three methods

2.2.1.2 裂纹面两侧区域变形测量

由于裂纹面两侧变形场反对称,本文只取裂纹面右侧大小为 $120 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 的区域进行计算。由于变形梯度较小,这里的 HRGDIC 方法选择 2×2 的 C^1 连续的 Hermite 单元。作为对比,同时采用 1-local 和 2-local 方法进行计算。三种方法采用的单元或子区大小如表 2 所示。

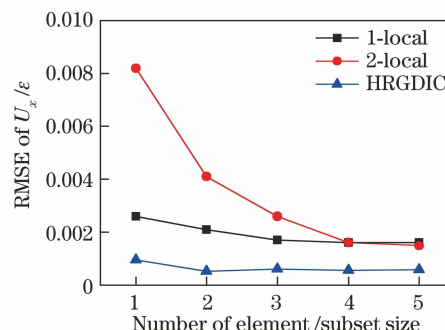


图 7 裂纹面一侧应变场 U_x 的 RMSE 与单元/子区大小关系
Fig. 7 Relationship between RMSE of strain field U_x and element/subset size for measurement on one side of crack face

为了进一步研究裂纹面右侧靠近裂纹处的应变的计算精度,使用三种方法的最优单元或子区大小(HRGDIC 方法单元大小 60, 1-local 子区大小 21, 2-local 子区大小 31)分别计算图 8 中箭头所示位置的应变,并将三种方法的最优解与理论解进行对

比。从图中 8 可以看出,在裂纹面右侧的应变较为平缓处 HRGDIC 方法也能够有最高的精度。

此外,同样,对于右侧平缓处的应变,与 HRGDIC 的结果相比,使用正则化的 HRGDIC 的结果更加平滑且更接近理论解,再次证明正则化对提高应变精

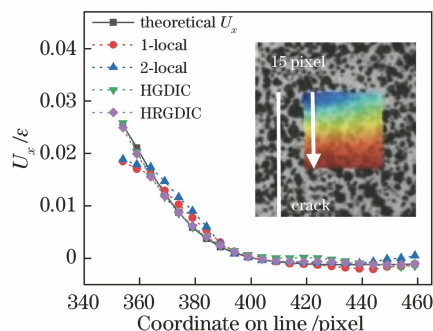


图 8 不同方法下裂纹面右侧直线处应变场 U_x 最优解和理论解曲线对比

Fig. 8 Comparison between the theoretical curve and simulated curves by HRGDIC, HGDIC, 1-local, 2-local of strain field U_x with optimum element/subset size at a straight line on one side of crack face

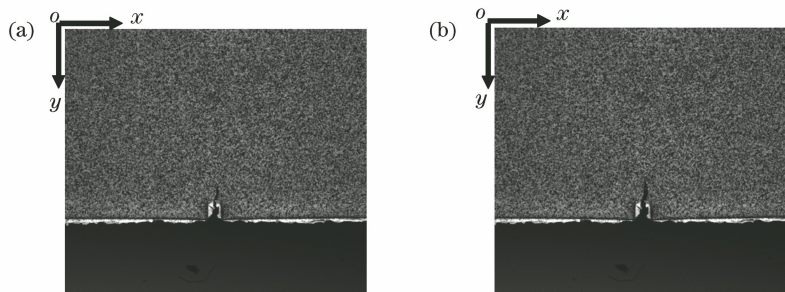


图 9 参考和变形图像。(a)参考图像;(b)变形图像

Fig. 9 Reference and deformed images. (a) Reference image; (b) deformed image

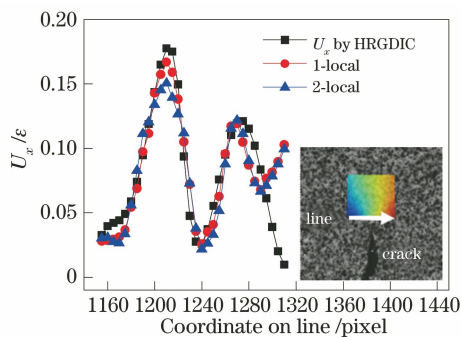


图 10 裂纹前端直线处三种方法的应变场 U_x 曲线的对比
Fig. 10 Comparison between strains U_x by three methods with optimum element/subset size at a straight line at crack front

度的有效性。

2.2.2 真实裂纹图像实验

进一步利用真实 I 型裂纹的拉伸实验验证 HRGDIC 方法的有效性。首先在标准平面单拉试样中部加工出缺口(缺口长:0.6 mm,缺口宽度:0.2 mm),并在疲劳试验机上预制出裂纹,首先在实验表面制作散斑,随后对试样进行单向拉伸(拉伸方向平行与 x 轴)。图 9 (a)为裂纹萌生后某时刻的图像,图 9 (b)为裂纹张开后的图像。试样采用材料为 Incoloy800H 的平面试样。

最后,使用三种方法(HRGDIC 方法单元大小取 95,1-local 方法子区大小取 21,二阶 local 方法子区大小取 31,PLS 窗口大小为 6×6)分别计算图 10 和图 11 中箭头所示位置处的应变,如图 10 和 11 所示。可以看出,HRGDIC 方法对裂纹尖端附近的高梯度应变的计算(尤其左端高梯度峰值)数值明显高于 1-local 和 2-local 方法,而右侧变形梯度较小的峰值结果较 local 方法光滑,且 local 方法计算得到的左右边界由于 PLS 平滑方法的边界效应存在较大偏差。

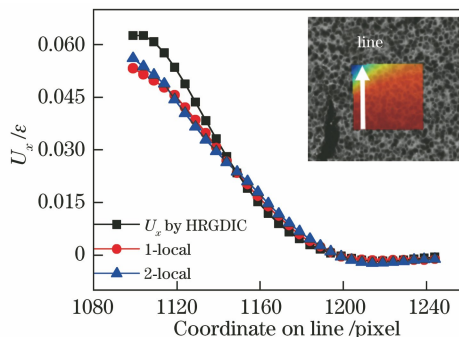


图 11 裂纹面一侧直线处三种方法的应变场 U_x 的对比
Fig. 11 Comparison between strains field U_x by three methods with optimum element/subset size at a straight line on one side of crack face

3 分析与讨论

从模拟和真实裂纹变形实验的结果中可以看出,对于裂纹前端直线的 x 方向应变曲线(图 4 和图 10),均有双峰特征,且存在有明显的高梯度变形。对于模拟图像实验,HRGDIC 方法由于使用了更高阶形函数,其较 1-local 和 2-local 方法更加逼近理论解裂纹前端的两个峰值。但对于裂纹尖端变形场测量这一特殊问题来说,仅通过提高 local 方法形函数的阶次并不适用,这是因为提高阶次势必随着增大子区大小,而过大的子区将会导致无法测量靠近裂纹附近的变形场。若使用过小的子区,结果噪声又会显著增加(如图 2、3、6 和 7 所示,1-local 方法子区大小为 11 时 RMSE 较大)。然而,使用基于有限元的全局 DIC 方法可以适当提高形函数的阶次且允许单元的边界适当靠近裂纹,解决了这一矛盾。

对于真实实验,由于左侧峰值的变形梯度更大,HRGDIC 方法对于左侧高梯度峰值的测量相对于 1-local 和 2-local 方法有更加显著的优势。同理,对于变形梯度较小的裂纹面两侧的变形,HRGDIC 方法相对于 1-local 和 2-local 方法的计算优势也体现在上端靠近裂纹尖端的高梯度变形区域。

4 结 论

本文基于高阶 Hermite 单元和正则化全局 DIC,提出了同时考虑灰度误差极小化和位移场平滑的 HRGDIC 方法,该方法对单元大小变化的敏感度不高,且适用于测量高梯度变形。通过模拟和真实裂纹变形测量实验表明,在图像噪声方差不高(如小于 3%)的情况下,可得以下结论:

1) 对于高梯度变形的区域(如裂纹尖端的应变峰值以及裂纹面右侧区域靠近裂纹尖端处),HRGDIC 方法的精度明显优于传统 1-local 和 2-local 方法。

2) 对于变形较为平缓的区域(如真实裂纹实验中裂纹尖端的右侧峰值、裂纹面两侧远离裂纹尖端的区域),HRGDIC 方法求解应变场的精度同样较高,且其显著优点是获得的应变场较 local 方法更加平滑。

3) 由于 HRGDIC 方法在高梯度变形处的位移场和应变场求解精度更高,基于该方法可进一步测量出更准确的断裂力学相关参数(如应力强度因子、裂纹张开位移、 J 积分等)。

最后,真实实验中若出现任意角度的裂纹,需要旋转 Hermite 单元使得单元边线与裂纹面平行以获得更靠近裂纹面两侧的变形场,而本文仅处理了裂纹面竖直(或水平)的情形,其他情形将作为下一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [2] Jones E M C, Iadicola M A. A good practices guide for digital image correlation[EB/OL]. (2019-08-10) [2019-12-05]. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1.cn>.
Jones E M C, Iadicola M A. 数字图像相关可靠实践指南[EB/OL]. (2019-08-10) [2019-12-05]. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1.cn>.
- [3] Shao X X, Dai Y T, He X Y, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012003.
邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003.
- [4] Sun W, He X Y. Experimental studies on application of digital image correlation in measuring field of civil engineering [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(2): 271-275.
孙伟, 何小元. 数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(2): 271-275.
- [5] Sutton M A, McNeill S R, Helm J D, et al. Measurement of crack tip opening displacement and full-field deformations during fracture of aerospace materials using 2D and 3D image correlation methods [C] // Lagarde A. *IUTAM symposium on advanced optical methods and applications in solid mechanics*. Dordrecht: Springer, 2000, 82: 571-580.
- [6] Zhang D S, Arola D D. Applications of digital image correlation to biological tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(4): 691-700.
- [7] Yates J R, Zanganeh M, Tai Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(11): 2063-2076.
- [8] Abanto-Bueno J, Lambros J. Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(14/15/16): 1695-1711.
- [9] Sun Q, Li X D, Yao T F, et al. Experimental study on crack propagation of brittle materials based on DIC under explosive loading [J]. *Explosion and Shock*

- Waves, 2019, 39(10): 103102.
- 孙强, 李雪东, 姚腾飞, 等. 基于 DIC 的爆炸加载下脆性材料裂纹扩展规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 103102.
- [10] Dai S H, Ma S L, Pan Y S, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of rock utilizing digital speckle correlation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2501-2507.
- 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 数字散斑相关方法测定岩石 I 型应力强度因子[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2501-2507.
- [11] Vormwald M, Hos Y, Freire J L F, et al. Crack tip displacement fields measured by digital image correlation for evaluating variable mode-mixity during fatigue crack growth [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 115: 53-66.
- [12] Pan B, Xie H M, Xu B Q, et al. Full-field deformation measurement of specimen with discontinuity using digital image correlation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(3): 379-384.
- 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 应用数字图像相关方法测量含缺陷试样的全场变形[J]. 实验力学, 2007, 22(3): 379-384.
- [13] Pan B, Wang Z Y, Lu Z X. Genuine full-field deformation measurement of an object with complex shape using reliability-guided digital image correlation [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1011-1023.
- [14] 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.
- [15] Tang W Z, Xiao H B, Zou S. Application of discontinuous digital image correlation in crack reconstruction [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1101-1109.
- 汤文治, 肖汉斌, 邹晟. 非连续数字图像相关方法在裂纹重构中的应用[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1101-1109.
- [16] Fagerholt E, Østby E, Børvik 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Chen J L, Zhang X C, Zhan N, et al. Deformation measurement across crack using two-step extended digital image correlation method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(11): 1126-1131.
- [20] Besnard G, Hild F, Roux S. "finite-element" displacement fields analysis from digital images: application to portevin-Le chatelier bands [J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(6): 789-803.
- [21] Zhao J Q, Zeng P, Pan B, et al. Improved Hermite finite element smoothing method for full-field strain measurement over arbitrary region of interest in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1662-1671.
- [22] Zhao J Q, Song Y, Wu X X. Fast Hermite element method for smoothing and differentiating noisy displacement field in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 68: 25-34.
- [23] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. Local Hermite (LH) method: an accurate and robust smooth technique for high-gradient strain reconstruction in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 26-38.
- [24] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. A practical and effective regularized polynomial smoothing (RPS) method for high-gradient strain field measurement in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 215-226.
- [25] Pan B, Wang B, Lubineau G. Comparison of subset-based local and FE-based global digital image correlation: Theoretical error analysis and validation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 148-158.
- [26] Zeng P. Finite element analysis and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 252-253.
- 曾攀. 有限元分析及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 252-253.
- [27] Yang R C. A regularized finite-element digital image correlation for irregular displacement field [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 67-73.
- [28] Cheng J, Zhao S S. Fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 15-18.
- 程靳, 赵树山. 断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社. 2006: 15-18.
- [29] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications [M]. New York: Springer Science & Business Media, LLC, 2009: 88-89.
- [30] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4): 393-400.