

测试技术

用于 Q235 低碳钢的数字图像相关法应变检测

张德海¹, 郭照灿¹, 何文斌¹, 陈保家²

(1. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 三峡大学 水电机设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为解决传统应变检测方法中存在的测量结果精度低、容易改变试样的力学性能、无法实现全场变形测量等问题, 采用数字图像相关法对 Q235 低碳钢的力学性能进行研究, 将拉伸试验结果与 ABAQUS 数值模拟结果进行对比分析, 通过引入差值系数来研判各力学参数模拟结果的精度。结果表明: 模拟所得应变分布数值与数字图像相关法所得结果吻合较好, 且最大主应变值的吻合度最高; 屈服强度和抗拉强度的差值系数均小于 1.000%, 且抗拉强度的差值系数最小, 为 0.011%; 伸长率和断面收缩率的差值系数较大, 其中伸长率的差值系数最大, 为 2.054%。对比结果表明: 数字图像相关法应用于 Q235 低碳钢的变形及应变的测量是真实有效的, 同时, 该方法为其他材料的变形测量提供了借鉴。

关键词: 数字图像相关法; Q235 低碳钢; 应变检测; 力学性能; 差值系数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.031

中图分类号: TG142.1⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0182-09

Strain detection by digital image correlation method on Q235 low carbon steel

Zhang Dehai¹, Guo Zhaocan¹, He Wenbin¹, Chen Baojia²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Hubei Key Laboratory of Construction and Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in traditional strain detection method, such as low accuracy of measurement results, easy to change the mechanical properties of samples, and inability to realize full-field deformation measurement, the mechanical properties of Q235 low carbon steel were studied by digital image correlation method. Then, the tensile test results were compared and analyzed with the numerical simulation results of ABAQUS, and the accuracy of simulation results for various mechanical parameters was evaluated by introducing the difference coefficient. The results show that the strain distribution values obtained by the simulation are in good agreement with those obtained by the digital image correlation method, and the maximum principal strain values have the highest agreement. The difference coefficients of yield strength and tensile strength are all less than 1.000%, and the difference coefficient of tensile strength is the smallest, which is 0.011%, the differences coefficients of elongation and area reduction are larger, and the difference coefficient of elongation is the biggest, which is 2.054%. The comparison results show that the digital image correlation method is really effective in the deformation and strain measurement of Q235 low carbon steel, which provides a reference for the deformation measurement of other materials.

Key words: digital image correlation method; Q235 low carbon steel; strain detection; mechanical property; difference coefficient

材料在抵抗外部载荷作用下表现出的特性被称为力学性能, 其主要由拉伸试验来测定, 可检测试样在拉伸变形过程中应力与应变的变化, 获得的基

本参数包括屈服强度、伸长率、断面收缩率和抗拉强度等。传统应变检测中常用的电阻应变片、引伸计、位移传感器等器件只能测量标距范围内的平均应变, 存在无法用于被测试样表面的全场变形测量、与被测试样表面直接接触的应变片和引伸计对被测材料有一定的强化作用的缺点。相比之下, 非接触式的变形测量方法可以克服接触式测量方法的缺点, 能够在不改变被测试样力学性能的情况下对试样的变形进行测量^[1]。

光学测量方法应用到变形测量已成为现在国内外学者关注的焦点。数字图像相关法 (Digital Image

收稿日期: 2021-02-10; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51975324); 2020 年度河南省高校科技创新团队 (20IRTSTHN015); 江苏省盐城市“515”创新领军人才项目 (盐委 [2020] 40 号); 河南省科技攻关项目 (202102210087); 郑州市科技局产学研项目 (郑科函 [2020] 3 号)

作者简介: 张德海 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: dhzhang@zzuli.edu.cn

Correlation, DIC) 是一种非接触式的用于全场形状、变形、运动的测量方法^[2], 具有精度高、光路简单、受环境影响小、自动化程度高等优点, 已逐渐成为试验力学领域一种非常重要的光学测量手段^[3]。Sutton M A 等^[4-5]对变形前后的散斑图进行灰度场相关运算, 实现了物体位移和应变的测量, 并通过改进搜索算法提高了测量精度。Avtaev V V 等^[6]采用数字图像相关法研究了 V-1167RDTV 铝合金薄板的断裂韧性。Ustinov A M 等^[7]利用数字图像相关方法对钢/钢胶粘剂接头进行了研究, 揭示了粘合剂接头表面变形区域分布的演变与变形曲线的阶段之间的相关性。Lin L X 等^[8]采用数字图像相关方法研究了设计的紧凑拉伸 (Compact Tension, CT) 试样的表面应变场。上述研究主要将 DIC 法应用到材料的变形和应变测量上, 将数字图像相关法与有限元仿真结合并应用到材料的拉伸力学与变形分析的报道还不多见。

本文旨在将数字图像相关法、拉伸试验和有限元方法相结合, 对 Q235 低碳钢的拉伸力学性能进

行研究, 通过将 3 种方法所得结果进行对比, 以验证基于 DIC 法所测位移、应变的有效性。

1 试验

1.1 数字图像相关法原理

通过对变形前后散斑图中某点周围的灰度特征进行相关性匹配, 可以追踪该点在变形过程中不同状态下的位置, 基本原理如图 1 所示, 其中, 点 (x'_i, y'_i) 和点 (x'_0, y'_0) 分别为参考图像中点 (x_i, y_i) 和点 (x_0, y_0) 在变形图像中的对应点, 其中 i 为图像子区域中像素点序号, 为正整数, Δx 、 Δy 分别为点 (x_i, y_i) 与点 (x_0, y_0) 在 X 、 Y 方向的距离。在参考图像中, 待测子区域中心点为 (x, y) , 大小为 $(2M+1)^2$, 其中 M 为任意像素。在变形图像中, 利用某一相关函数和相应的搜索算法比较参考图像和变形图像中子区域的相关性大小, 在变形图像中找到相关性最大的子区域, 该子区域以点 (x', y') 为中心, 则点 (x', y') 是参考图像中点 (x, y) 的对应点^[9]。

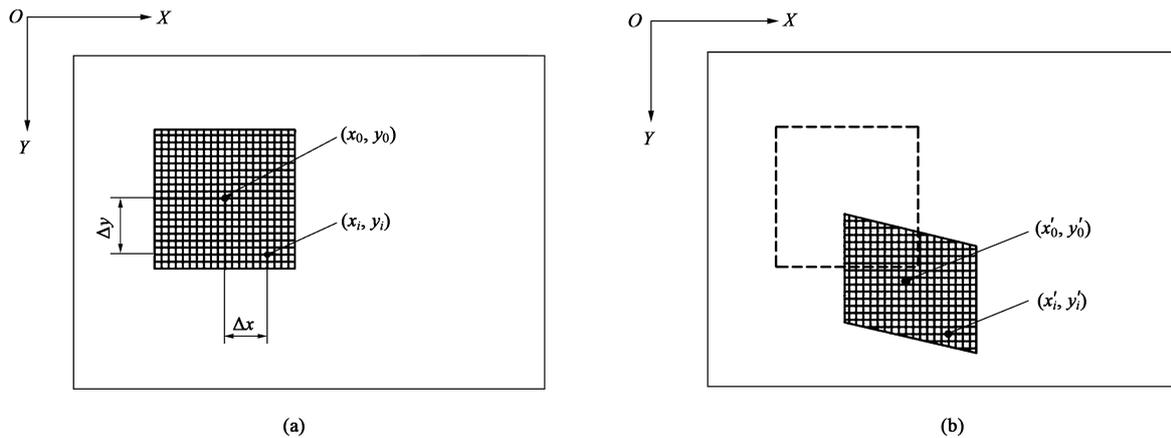


图 1 数字图像相关法原理图
(a) 参考图像 (b) 变形图像
Fig. 1 Principle diagram of DIC
(a) Reference image (b) Deformed image

变形前后图像子区域中点的映射关系一般通过一阶位移函数表示。测量过程中, 如果物体未发生塑性变形, 则待测点坐标满足式 (1) 的映射关系^[10]。

$$\begin{cases} x'_i = x_0 + \Delta x + u \\ y'_i = y_0 + \Delta y + v \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 、 v 分别为点 (x_0, y_0) 与点 (x'_0, y'_0) 在 X 、 Y 方向的位移分量。

Q235 低碳钢试样在拉伸过程中发生了塑性变形, 除了考虑刚体位移, 还有弯曲、扭转等复杂变

形, 因此, 需引入塑性位移。则待测点的坐标满足式 (2) 所示的映射关系:

$$\begin{cases} x'_i = x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_i = y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_x 、 u_y 、 v_x 、 v_y 为参考图像子区域的一阶位移梯度。

变形前后图像子区域中点 (x_i, y_i) 和点 (x'_i, y'_i) 的灰度值分别为 $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x'_i, y'_i)$, 且两点的灰度值存在如下关系:

$$f(x_i, y_i) - e(x_i, y_i) = r_0 + r_1 g(x'_i, y'_i) \quad (3)$$

式中： $e(x_i, y_i)$ 为噪声部分； r_0 、 r_1 为用于补偿灰度差异的参数。

在进行相关匹配时，参考图像子区域与待匹配图像子区域的相似程度可通过式 (4) 来衡量：

$$C_{SSD}(p) = \sum_{i=1}^N [f(x_i, y_i) - r_0 - r_1 g(x'_i, y'_i)]^2 \quad (4)$$

式中： $C_{SSD}()$ 为图像目标相关性检测函数； $i = 1, 2, \dots, N$ ， N 为图像子区域中像素点的个数； $p = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1)$ ，表示相关参数矢量。

对式 (4) 求解时，需给出未知数的初值。通常， u 、 v 通过粗匹配获得，其他未知数的初值为：

$$\begin{cases} u_x = u_y = v_x = v_y = r_0 = 0 \\ r_1 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

通过式 (1) ~ 式 (5) 可以对物体变形过程中每个状态的参考图像和变形图像进行相关匹配，匹配完成后，利用相机的标定参数按照三角测量原理可以得到每个状态下参考图像与变形图像中点的三维坐标，通过将变形前后图像中对应点的三维坐标相减就可以得到每个状态的三维位移。

如图 2 所示，在参考图像中，以 P 点为中心创建 4 个三角形，当物体在外部载荷作用下发生形变时，4 个三角形的形状也会发生相应的变化，通过对三角形边长的变化进行相关计算可以得出对应三角形的应变，将 4 个三角形的应变求取均值即可得出 P 点的应变大小^[11]。

1.2 试验材料及试验装置

1.2.1 试验材料

试验所用材料为 Q235 低碳钢，含碳量通常在 0.3% 以下，其抗拉压强度、韧性、塑性和焊接性能

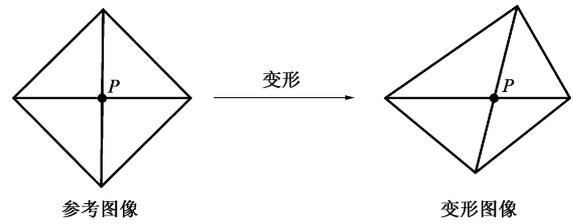


图 2 三维应变计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation for three dimensional strain

较好。材料的化学成分和物理性能见表 1 和表 2。

表 1 Q235 低碳钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of Q235 low carbon steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	S	P
0.14~0.22	0.30	0.30~0.65	0.050	0.045

表 2 Q235 低碳钢的物理性能

Table 2 Physical properties of Q235 low carbon steel

参数	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	比热容 $c/(\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1})$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$
数值	200	0.3	469	7800	1522

试验所用的低碳钢拉伸试样由武汉先导时代科技有限公司提供，参照金属拉伸试验方法国家标准 (GB/T 228.1—2010^[12]) 制备拉伸试样尺寸，如图 3a 所示。利用 DIC 法对 Q235 低碳钢进行位移、应变测量时，试样表面需要有随机分布的散斑图案，这些散斑可以通过黑白哑光喷漆喷制而成，其主要作用是为了便于灰度特征的相关性匹配，图 3b 为喷涂散斑后的试样。

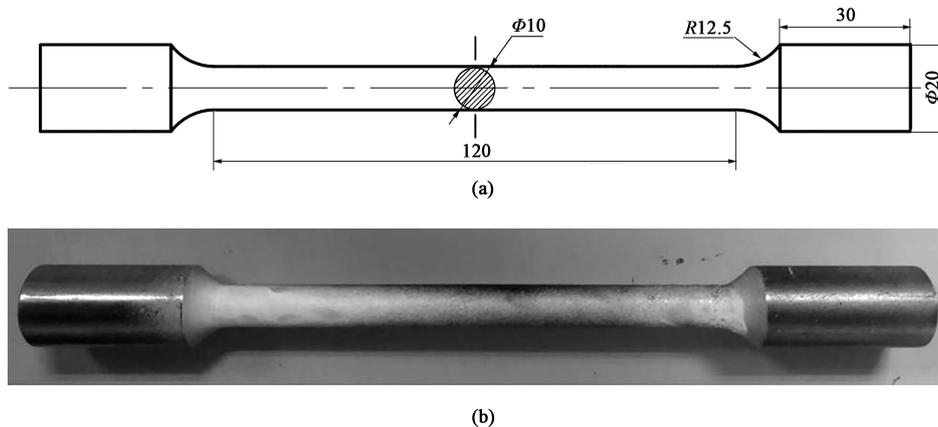


图 3 Q235 低碳钢拉伸试样

(a) 拉伸试样尺寸 (b) 拉伸试样实物

Fig. 3 Tensile sample of Q235 low carbon steel

(a) Dimensions of tensile sample (b) Actual tensile sample

1.2.2 试验装置

本次使用 NCM-2D 光学全场变形检测系统进行数字散斑拉伸试验, 试验装置主要有 WAW-600 万能材料试验机及其配套计算机、软件等, 2 个德国 AVT Stingray F-504B 工业 CCD 相机、2 个 Mytron 镜头、2 个 LED 光源、1 块标定板、1 个控制器 (控制相机和光源的开关)、三脚架及其他辅助器件等, 如图 4 所示。所用相机的分辨率为 2452 像素×2056 像素, 配置的镜头为超低畸变定焦镜头 HF5018V, 2 个相机的位置处于同一水平面, 且其之间的角度为 30°。

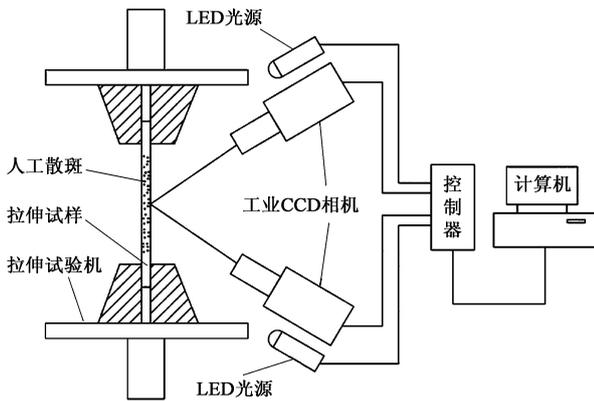


图 4 数字图像相关法试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test device for DIC

数字图像相关法的基本思想就是通过一定的方法 (高速相机) 采集物体表面在变形前后的散斑图像, 根据物体表面的散斑分布特征, 对变形前后的图像用概率统计的相关性确定物体表面的位移及应变情况^[13], 以实现物体变形方面的测量。试验的技术路线见图 5。

2 结果与分析

2.1 试验结果

为了准确地将试验结果与仿真结果进行对比, 本文对拉伸过程及仿真过程中的坐标进行了统一, 定义拉伸试样的轴向为 Y 轴, 与轴向垂直的方向 (径向) 为 X 轴, 与 X-Y 平面垂直的方向为 Z 轴, 然后, 对 Q235 低碳钢进行整体应变分析和有限元建模。如图 6 所示, 为了更好地观察拉伸过程中试样表面的变形情况, 定义参考图像 (未变形散斑图像) 的左上角为坐标原点, 水平 (宽度方向) 向右为 X 轴正方向, 竖直 (长度方向) 向下为 Y 轴正方向, 并随机地在散斑图像的上端选取第 1 个点, 在

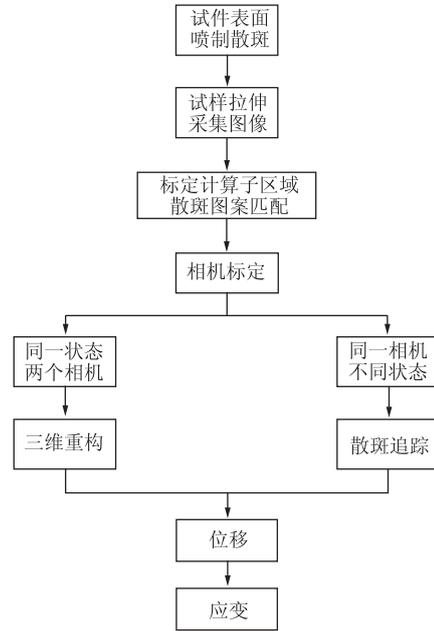


图 5 数字图像相关法技术路线图

Fig. 5 Technical roadmap of DIC

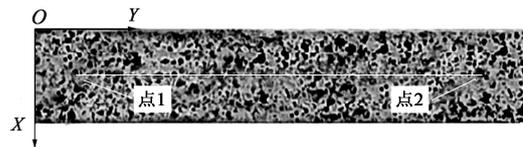


图 6 未变形散斑图像

Fig. 6 Undeformed speckle image

下端选取第 2 个点, 将其作为观测点。

由图 7 可以看出, 在早期弹性变形阶段, 拉伸试样在 X、Y 方向上点 1 和点 2 的位移变化曲线基本重合, 随着拉力的不断增大, 由于试样发生塑性变形和缩颈现象, 两条曲线不再重合, 并出现了波动。由图 7a 可得, 试样拉断后, 点 1 和点 2 在 X 方向上的位移值分别为 0.0017 和 -0.2626 mm, 两位移值相差较大, 其原因主要为: 点 1 位于试样固定区域, 点 2 位于试样拉断区域, 因此, 点 2 的位移变化量比点 1 要大。由图 7b 可得, 试样拉断后, 点 1 和点 2 在 Y 方向上的位移值分别为 -28.2996 和 -27.9219 mm, 两数值基本相同, 其差值仅为 0.3777 mm, 表明在拉伸过程中, 试样沿拉伸方向的变形比较均匀。

图 8 和图 9 分别为 Q235 低碳钢试样的位移图和应变图, 其中图 8a、图 8b 和图 8c 分别为 X 方向总位移图、Y 方向总位移图以及试样的合位移图。由图 8 可得, 试样拉断后, X 方向的总位移 DU 为 -0.1052 mm, Y 方向的总位移 DV 为 14.4587 mm,

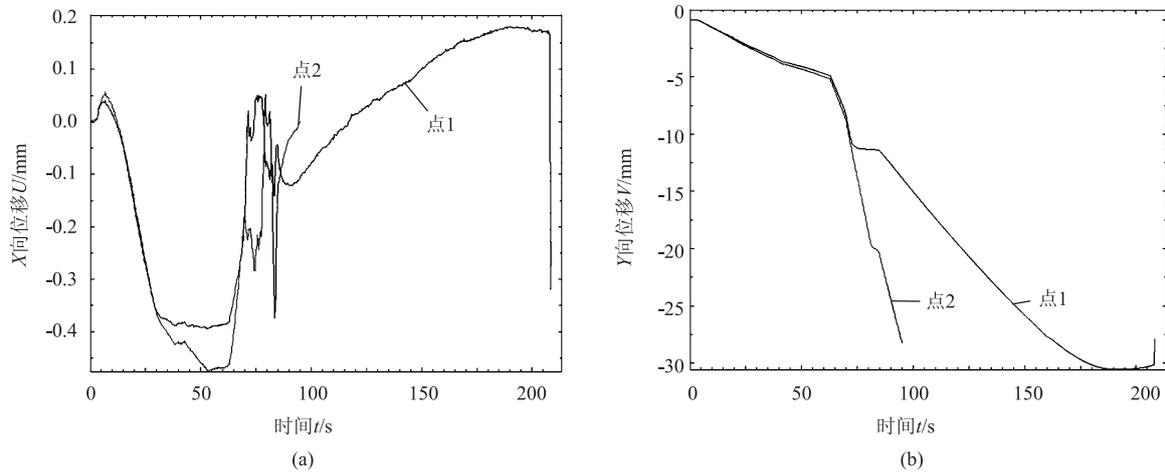


图 7 拉伸试样上点 1 和点 2 的位移曲线

(a) X 方向 (b) Y 方向

Fig. 7 Displacement curves of point 1 and point 2 on tensile sample

(a) X-direction (b) Y-direction

表明在试样拉伸过程中,沿 X 方向(径向)的收缩量较小,沿 Y 方向(轴向)的伸长量较大。将图 8 与图 9 比较可得, Y 方向的总位移曲线、试样的合位移曲线和试样的应变曲线的变化趋势一致:在弹性阶段,试样的位移和应变基本为 0;随着应力的增加,在屈服阶段,其数值有少量的增加;在强化阶段,伴随着缩颈现象的发生,试样的位移和应变迅速增加。其中,由图 8b 和图 8c 可以看出, Y 方向的总位移值 DV 和试样的合位移值 S 基本相同,其值分别为 $DV=14.4587$ mm、 $S=14.4591$ mm,两者差值仅为 0.0004 mm,这也表明:在试样拉伸过程中, Y 方向的伸长位移起主要作用, X 方向的收缩位移对试样的合位移的影响很小。

由于各拉伸试样的力学性能不可能完全相同,所以,为保证试验结果的准确性,本文从 1 组拉伸试样中随机选取 3 个试样进行拉伸试验,具体的试验数据如表 3 所示。

由表 3 可得,塑性变形阶段 3 个试样的屈服强度 R_{eL} 和抗拉强度 R_m 的差异比较大,且抗拉强度的差异与屈服强度相比较,其中,抗拉强度的变化最大值为 29 MPa,屈服强度的变化最大值为 11 MPa。与之相比,作为衡量材料塑性性能指标的伸长率 A 与断面收缩率 Z 的差异却比较小,其中,伸长率的变化最大值仅为 1.000%,断面收缩率的变化最大值为 3.780%。力学性能参数出现差异的原因可能与 Q235 低碳钢拉伸试样的制造工艺有关,从制品上切取样坯时,由于部位和方向的不同会导致试样性能的差异。在机加工试样的过程中,由于

进行切削、磨削工艺,使得试样表面发生塑性变形,形成冷硬层,提高了表面层的强度,影响了金属的力学性能。

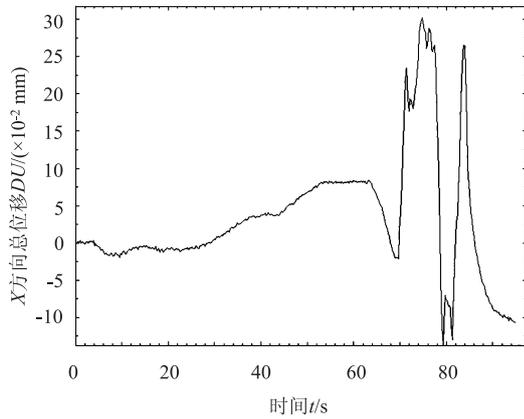
2.2 有限元模拟

利用 ABAQUS 有限元软件获得试样拉伸过程中的应力、应变变化,并将其与试验结果进行对比。本次拉伸试验中 Q235 低碳钢属于非线性材料,试样在拉伸过程中出现弹性变形、塑性屈服、颈部失稳、颈部生长,最终,由于承载能力下降而导致断裂^[14]。

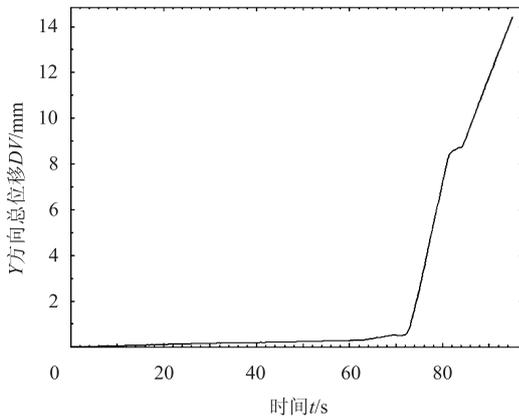
在前处理中建立拉伸试样的有限元模型,Property 模块定义材料的密度、弹性、塑性、损伤及演化等相关力学参数。在定义弹性参数时,需输入材料的弹性模量 E 和泊松比 μ ;在定义塑性参数时,需输入材料的 Johnson-Cook 模型参数^[15]。分析运算阶段采用动态显示分析,在 Load 模块定义试样模型的拉伸,将试样模型一端固定,另一端施加位移载荷。用 Mesh 模块对拉伸模型进行网格划分,对其网格单元选择仿真分析中常用的 C3D8R 单元类型。拉伸试样的网格模型如图 10 所示。其中,试样中部为大变形区域,进行了网格细化;两端区域变形较小,采用稀疏网格。在后处理中显示试样的应力、应变云图以及应力-应变曲线图。

2.3 模拟结果

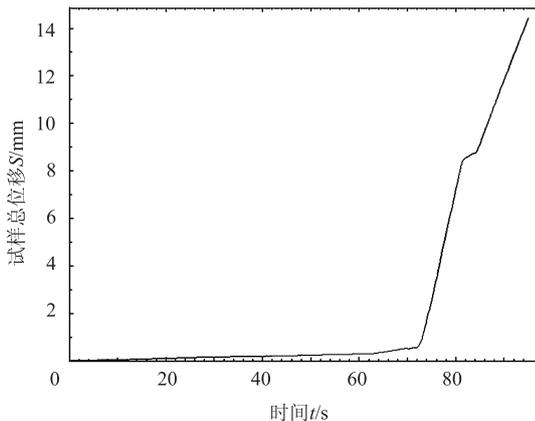
由三维数字散斑应变测量分析系统可以得到试样拉伸过程中的最大主应变分布图,在有限元分析结果中,最大主应变对应的是对数应变的最大值。图 11a、图 11b 和图 11c 分别为试样在弹性阶段、塑



(a)



(b)



(c)

图 8 Q235 低碳钢试样的位移图

(a) X 方向总位移 (b) Y 方向总位移 (c) 试样合位移

Fig. 8 Displacement diagrams of Q235 low carbon steel sample

(a) Total displacement in X-direction (b) Total displacement in Y-direction (c) Combined displacement of sample

性阶段和拉伸断裂后的应变分布图，其中，左图由 DIC 法所得，右图由仿真模拟所得。

由图 11 可以看出，在试样的整个拉伸过程中，利用 ABAQUS 仿真软件所得的模拟应变结果与通过 DIC 法得到的应变结果具有较高的一致性，且两者

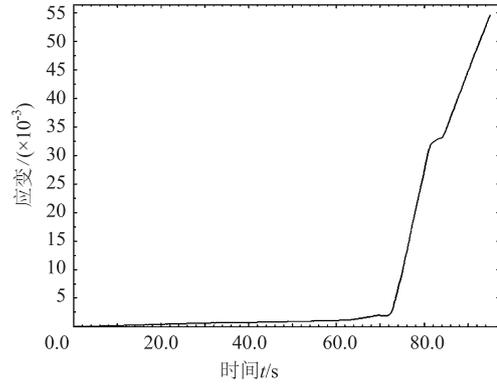


图 9 Q235 低碳钢试样的应变图

Fig. 9 Strain diagram of Q235 low carbon steel sample

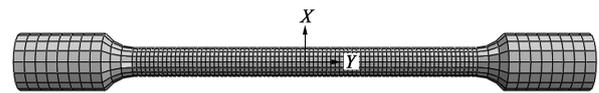


图 10 Q235 低碳钢拉伸试样网格模型

Fig. 10 Mesh model of Q235 low carbon steel tensile sample

表 3 Q235 低碳钢的拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of Q235 low carbon steel

试样 编号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$
1	319.157	449.173	29.200	68.970
2	324.533	474.278	30.200	65.190
3	312.733	444.691	29.500	67.510
均值	318.807	456.047	29.600	67.220

的最大主应变值基本相同。这表明：采用 DIC 法对 Q235 低碳钢进行拉伸应变分析是可行的。

由拉伸试验可以得出 Q235 低碳钢的拉伸图或 $F-\Delta l$ 曲线，由于 $F-\Delta l$ 曲线与试样的尺寸有关，所以，为消除试样尺寸的影响，利用式 (6) 计算得到名义应力-名义应变曲线。但由于在进行应变计算时，并未考虑试样的长度伸长或截面缩小等非线性因素的影响，因此，名义应力-名义应变曲线并不能真实地反映试样在拉伸过程中真实应力、真实应变的变化情况。真实应力、真实应变可通过式 (7) 得到。

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = \Delta l/l_0 \\ \sigma_0 = F/A_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \\ \sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中： ε_0 和 σ_0 分别为名义应变和名义应力； Δl 为

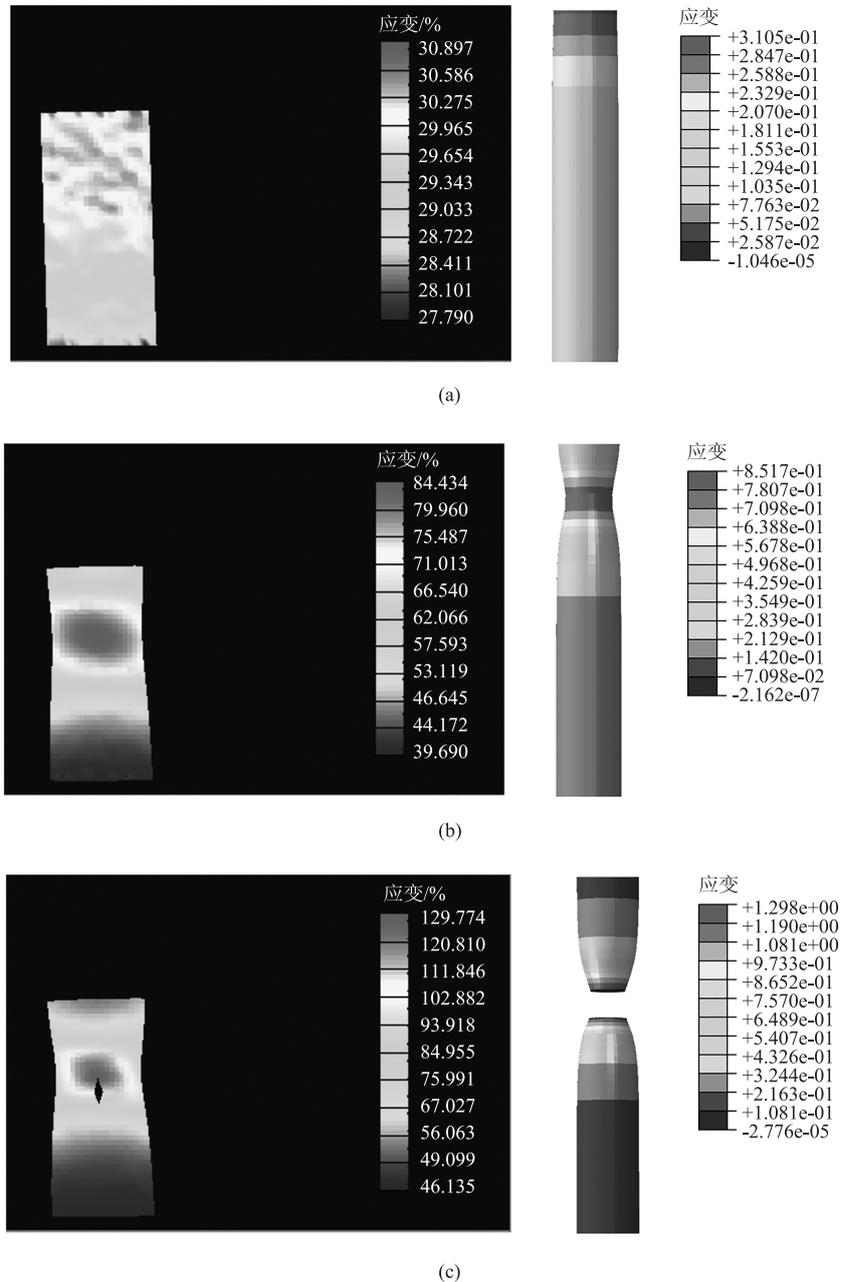


图 11 Q235 低碳钢试样的应变分布图

(a) 弹性阶段 (b) 塑性阶段 (c) 拉伸断裂后

Fig. 11 Strain distribution diagrams of Q235 low carbon steel sample

(a) Elastic stage (b) Plastic stage (c) After tensile fracture

试样的长度变化量； l_0 为试样的初始长度； F 为载荷； A_0 为试样的初始截面面积； σ 为真实应力； ε 为真实应变。

由式 (7) 可以得出试样在拉伸过程中的真实应力-真实应变曲线，在 ABAQUS 后处理结果中，真实应力 σ 对应的是等效应力，真实应变 ε 对应的是对数应变。将由拉伸试验和有限元仿真得到的真实应力-真实应变曲线绘制在同一图上，如图 12 所示。

由图 12 可以看出，屈服强度和抗拉强度的模拟

结果与试验结果基本一致，且模拟结果比试验结果更快地达到强度极限。在弹性阶段，模拟曲线与试验结果吻合很好；在屈服阶段，由于应力存在微小波动，所以，两曲线的吻合度不高，存在一定偏差；在强化阶段，模拟曲线与试验曲线的吻合程度较高，两曲线基本重合。这也进一步表明了本文方法的有效性。

根据图 12 中的真实应力-真实应变曲线和有限元后处理结果，通过计算可以得出 Q235 低碳钢的

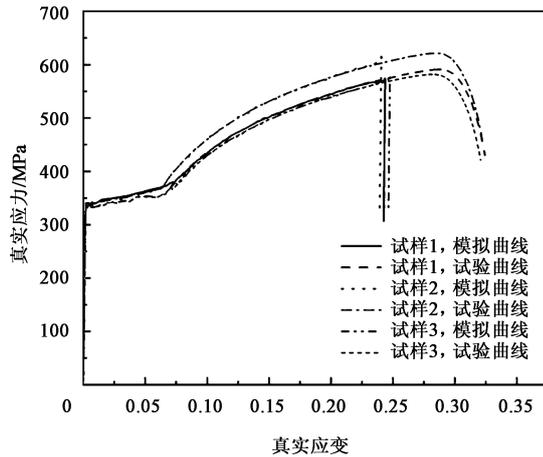


图 12 拉伸试验和有限元仿真得到的 3 个试样的真实应力-真实应变曲线

Fig. 12 Curves of true stress-true strain for three samples by tensile test and finite element simulation

屈服强度、抗拉强度、伸长率和断面收缩率，如表 4 所示。

由表 4 可得，屈服强度、伸长率的模拟结果均大于试验结果，抗拉强度的模拟结果小于试验结果，且伸长率、断面收缩率的相对误差大于屈服强度和抗拉强度。

为进一步计算各力学参数模拟结果的精确程度，引入了差值系数 I_d ，其值在一定程度上反映了模拟结果与试验结果的吻合程度，定义如下：

$$I_d = \left| \frac{P_e - P_s}{P_e} \right| \quad (8)$$

式中： P_e 为试验测得的力学参数结果； P_s 为有限元模拟所得的力学参数结果。

依据表 4，利用式 (8)，可以计算得出 Q235 低碳钢的差值系数，进而得到表 5 和图 13，其中 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{d3} 分别为 3 个试样的差值系数。

表 4 试验数据与模拟数据对比

Table 4 Comparison of test data and simulation data

试样编号	屈服强度 R_{eL}/MPa		抗拉强度 R_m/MPa		伸长率 $A/\%$		断面收缩率 $Z/\%$	
	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
1	319.157	322.231	449.173	449.122	29.200	29.800	68.970	67.602
2	324.533	326.866	474.278	472.244	30.200	30.627	65.190	66.449
3	312.733	314.490	444.691	443.596	29.500	29.595	67.510	67.876

表 5 各力学参数的差值系数 (%)

Table 5 Difference coefficients of each mechanical parameter (%)

差值系数	屈服强度	抗拉强度	伸长率	断面收缩率
I_{d1}	0.963	0.011	2.054	1.983
I_{d2}	0.718	0.428	1.413	1.931
I_{d3}	0.561	0.246	0.322	0.542
均值	0.747	0.228	1.263	1.485

由图 13 可以看出：3 个试样中试样 3 的力学性能的模拟数据与试验数据的偏差最小，与实际情况最为符合；试样 2 的差值系数与均值最为接近；试样 1 的模拟数据与试验数据的偏差最大，表明其模拟结果不能很好地反映真实情况。力学参数中，屈服强度与抗拉强度的差值系数较低，其值均小于 1.000%，其中，抗拉强度的差值系数的最小值仅为 0.011%，表明模拟结果与试验结果基本相同。伸长率与断面收缩率的差值系数较大，其中，伸长率的差值系数的最大值为 2.054%。屈服强度、抗拉强

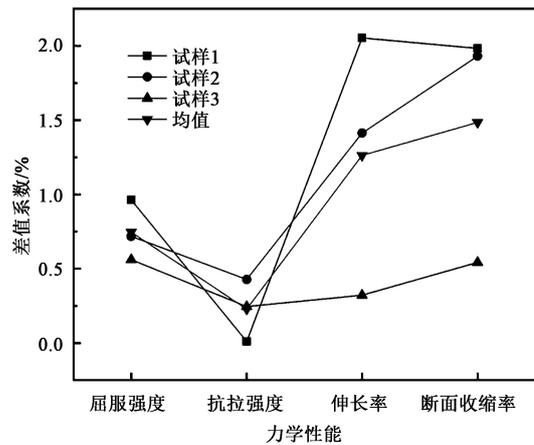


图 13 Q235 低碳钢的差值系数曲线

Fig. 13 Curves of difference coefficients for Q235 low carbon steel

度的差值系数与均值相比变化不大，其大小在均值上下波动，而伸长率、断面收缩率的差值系数与均值相比变化较大，表明其相对误差较大。

综合图 11~图 13、表 4 和表 5 可以得出，将数字图像相关法应用于 Q235 低碳钢的力学性能研究及变形、应变的测量是可行的。

3 结论

(1) 采用数字图像相关法对 Q235 低碳钢的力学性能进行了研究, 获取了试样拉伸过程中的三维变形数据, 通过对数据进行处理, 得到相应的位移、应变曲线以及材料的屈服强度、抗拉强度、伸长率和断面收缩率, 分析了不同方向的变形量对试样合位移、应变的影响。

(2) 在试样的整个拉伸过程中, 利用 ABAQUS 仿真软件所得的模拟应变结果与通过 DIC 法得到的应变结果具有较高的一致性, 且最大主应变值基本相同; 模拟得到的真实应力-真实应变曲线与试验所得的曲线基本重合, 屈服强度和抗拉强度的模拟结果与试验结果基本一致, 且模拟结果比试验结果更快地达到强度极限; 力学参数中, 屈服强度与抗拉强度的差值系数较低, 其值均小于 1.000%, 其中, 抗拉强度的差值系数的最小值仅为 0.011%。伸长率与断面收缩率的差值系数较大, 其中, 伸长率的差值系数的最大值为 2.054%。

(3) 通过将数字图像相关法与有限元仿真所得的数据进行对比分析, 证明了将数字图像相关法应用于 Q235 钢的力学性能研究及变形、应变的测量是可行的, 同时, 也表明了数字图像相关法的普遍适用性, 该方法也可以应用到其他材料的变形和应变的测量中, 并具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统 [J]. 航空学报, 2010, 31 (10): 1960-1967.
Pan B, Wu D F, Gao Z T. Non-contact high temperature thermal deformation measurement system based on digital image correlation method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31 (10): 1960-1967.
- [2] 叶雨寒, 袁艺宁, 刘庆涛, 等. 汽车车身铝合金连接构件的拉伸试验分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 189-194.
Ye Y H, Yuan Y N, Liu Q T, et al. Tensile test analysis of aluminum alloy connection part in automobile body [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 189-194.
- [3] 孙涛, 梁晋, 蔡勇, 等. 用数字散斑法测量铜/铝复层板拉伸变形 [J]. 光学精密工程, 2012, 20 (12): 2599-2606.
Sun T, Liang J, Cai Y, et al. Measurement of tensile deformation of copper/aluminum laminates by digital speckle method [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20 (12): 2599-2606.
- [4] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A, et al. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25 (3): 232-245.
- [5] Schreier H W, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation due to under matched subset shape functions [J]. Experimental Mechanics, 2002, 42 (3): 303-310.
- [6] Avtaev V V, Yakovlev N O. Digital image correlation method study of the static fracture toughness and the fracture strength of a thin-sheet aluminum alloy [J]. Russian Metallurgy, 2020, (10): 1207-1212.
- [7] Ustinov A M, Klopotov A A, Potekaev A I, et al. Study of the elasto-plastic deformation of the steel/steel adhesive joint using digital image correlation method [J]. Solid State Phenomena, 2020, 6115: 143-160.
- [8] Lin L X, Xu M J, Xu J J, et al. Measurement and evaluation of strain fields in T23 steel based on digital image correlation method [J]. J. Cent. South Univ., 2017, 24: 1977-1985.
- [9] 梁晋, 胡浩, 唐正宗, 等. 数字图像相关法测量板料成形应变 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (10): 77-83.
Liang J, Hu H, Tang Z Z, et al. Measurement of sheet metal forming strain by digital image correlation method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (10): 77-83.
- [10] 李耿, 殷成青, 牛靖, 等. 采用光学测量技术研究铝合金焊接变形 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (1): 92-97.
Li G, Yin X Q, Niu J, et al. The welding deformation of aluminum alloy was studied by optical measurement technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (1): 92-97.
- [11] 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, 18 (10): 2244-2253.
Tang Z Z, Liang J, Xiao Z Z, et al. Digital image correlation system for 3D deformation measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18 (10): 2244-2253.
- [12] GB/T 228. 1—2010, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228. 1—2010, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [13] Pan B, Xie H M. Full-strain field measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (11) 1980-1986.
- [14] Stamborska M, Lapin J, Bajana O. Effect of hydrogenation on deformation behaviour of ferritic-pearlitic steel studied by digital image correlation method [J]. Kovove Mater, 2016, 54: 397-406.
- [15] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (9): 153-158.
Ling L, Zhi X D, Fan F, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (9): 153-158.