

文章编号: 1001-4888(2005)03-0381-07

低碳钢试件弹塑性边界的白光相关检测^{*}

潘 兵, 续伯钦, 张国峰

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 金属试件的弹塑性边界检测对判断该试件是否失效有着重要意义, 因此一直是研究人员较感兴趣的研究课题。利用激光和白光作为照明光源的方法都曾被提出以检测金属试件的弹塑性边界以及塑性变形。为避免激光测量的诸多缺点, 本文提出一种用白光作为照明光源并结合数字图像处理来检测低碳钢试件弹塑性边界的方法。该方法将数字图像相关和低碳钢试件表面弹塑性变形前后对照明光强的反射特性结合起来以判断试件是否进入塑性屈服。文中通过对加载过程中低碳钢试件表面序列图像的处理, 准确地判断了该试件是否进入塑性屈服, 验证了该方法的可行性。

关键词: 塑性变形; 光强相关系数; 数字图像相关; 无损检测

中图分类号: O348

文献标识码: A

1 引言

众所周知, 金属材料受力之后就会变形。从变形开始到破坏一般要经历两个阶段, 即弹性变形阶段和塑性变形阶段。由于塑性变形阶段金属内部微观结构会出现结晶面滑移、滑移带移动以及孪生变形等现象, 从而导致其表面粗糙度会发生可检测的显著变化。

已有研究表明金属薄板在单向拉压情况下, 试件表面的粗糙度会随着塑性变形的增加而相应增加。文献[1]的研究显示金属试件自由表面的粗糙度的增加与有效应变(Effective Strain)大小以及材料晶粒的大小成正比关系。文献[2]通过对不同应力状态下试件表面的研究进一步证实: 依据 Mises 屈服准则会得出试件自由表面的粗糙度与有效应变成线性关系的结论。此外, 研究人员^[3]也在实验中观察到初始表面粗糙度较低(较光洁)的试件在塑性阶段其表面粗糙度的增加与加载模式无关的现象。

根据这一现象, 国内外众多学者对测量变形试件弹塑性边界和塑性应变的方法进行了广泛的研究。续伯钦和伍小平^[10](1982 年)根据相干光被粗糙表面散射时, 变形物体的弹、塑性变形对激光衍射谱的影响, 最早提出了一种根据衍射谱强度分布变化来测量塑性变形的办法。F P Chiang 等^[4](1991 年)利用类似方法得到了变形前后的衍射谱互相关系数与剪应变的关系曲线, 得出当塑性应变为 10% 时, 相关系数接近于 0, 并据此来确定塑性区的边界。他们还用该方法对两边带小圆槽口的铝合金试件在单向拉伸时不同载荷下(1991 年)^[5]和疲劳载荷下(1998 年)^[6]的塑性区形状。文献[7](1995 年)也用该方法定量测量了聚丙烯试件在轴向载荷下的塑性应变。Akira Kato^[8,9]用同样方法对 SS330(JIS)结构钢在疲劳载荷下的疲劳寿命进行了估计研究。

但由于激光的高相干性, 在应用该方法时必须要保证在被检测区域的变形前后激光束的照明方式和照明区域是相同的, 这就对实验条件及实验环境提出了较高要求。并且这种测量方法是逐点进行的,

^{*} 收稿日期: 2004-11-15; 修订日期: 2005-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10232010)

通讯作者: 续伯钦(1943-)男, 中国科学技术大学力学与机械工程系教授。E-mail: bqxu@ustc.edu.cn

这便使之在实际应用中有诸多不便。有鉴于此, Sutton 等^[11](1989 年)提出了一种用白光作为照明光源并结合数字图像处理定量检测了带小槽口的 304 不锈钢试件在单向拉伸下的有效应变以及槽口边塑性区形状的方法。文献[12,13]发展了该方法并将其应用到带槽口的 304 不锈钢试件在低周疲劳载荷下槽口边塑性区形状以及塑性区扩展情况的定量检测上。与激光检测方法相比,白光方法检测具有光路简单、对环境要求低等特点,且通过数字图象处理方法可以获得全场的信息,有其无法替代的优点。

低碳钢试件是实际工程中广泛应用的一种金属材料,该材料在单向拉伸时有明显的屈服阶段,在实际应用中发生断裂之前就先已出现明显的塑性变形,由于不能保持原有的形状和尺寸构件已不能正常工作,因而导致该构件失效。因此检测出低碳钢构件何时出现塑性变形(即弹塑性边界)有着重要的实际应用意义。本文提出一种利用白光作为照明光源的光学无损检测方法用来检测低碳钢金属试件在单向拉伸时的弹塑性边界,以判断低碳钢试件是否进入塑性屈服阶段。该方法利用表面经过简单处理的低碳钢试件在进入塑性屈服后,由表面粗糙度的显著变化而对照明光的反射特性的影响。首先定义一个图像子区的变形前后的光强相关系数,然后得出标准试件在单向拉伸下的此光强相关系数与实验机拉伸过程中负荷的关系曲线。观察到低碳钢试件在刚进入塑性屈服时其光强相关系数有显著的陡然下降,随后随着塑性应变的增加光强相关系数持续减小。因此可以定义某一光强相关系数 C_{σ} 作为该材料的弹塑性边界,认为该子区的光强相关系数下降到 C_{σ} 时,该子区中心点便开始进入塑性屈服。

2 实验技术

2.1 试件尺寸及材料特性

试件材料为工程上广泛使用的 A3 钢,其几何尺寸如图 1 所示。为保证材料特性的一致性,试件沿同一钢板的轧制方向剪裁。材料的屈服极限 $\sigma_s=270\text{MPa}$,弹性模量 $E=210\text{GPa}$ 。试件表面分别用 200 目、600 目、1200 目的砂纸打磨后,表面的算术平均粗糙度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,经上述处理过后的试件表面图像见图 2。

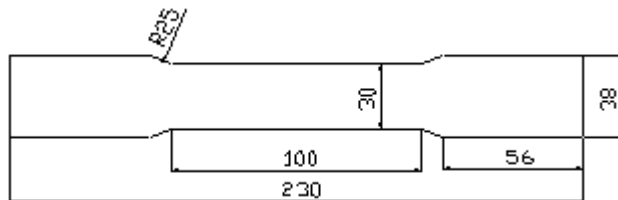


图 1 试件的几何尺寸(厚度:4, 单位:mm)

Fig. 1 Geometry of specimen (Thickness: 4, unit:mm)

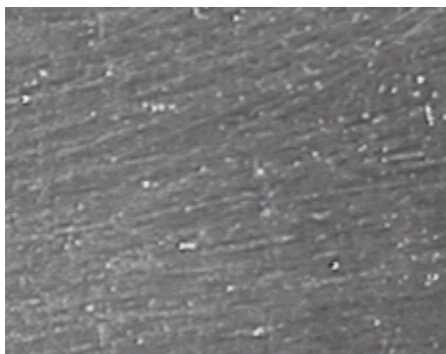


图 2 经砂纸打磨处理后的试件表面图像

Fig. 2 Specimen Surface after polishing

2.2 实验装置

图 3 为实验装置示意图。试件夹持在 WD4050 型万能电子材料试验机上, CCD(Panasonic Wv-Bp330 型)的光轴与试件表面近似垂直以对待测物体准确成像,图像的放大率为 43pixels/mm 。试件表

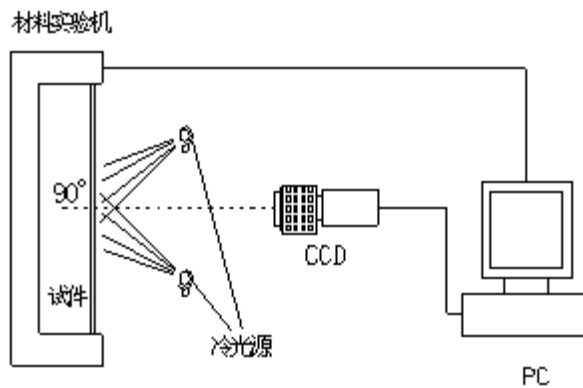


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental Setup

面图像经图像板数字化为分辨率为 768×576 pixels 的数字图像并存入计算机硬盘。试件加载过程中 CCD 实时采集试件表面图像,图像的灰度变化范围为 $0 \sim 255$ 。为保证照明试件的光强稳定,实验过程用由直流稳压电源控制的冷光源引出的两束出射光对称照明试件。在实验中我们用自编的程序将实验机的载荷数据实时送入计算机并作为该时刻所采集图像的文件名的一部分,这样来实现实验机载荷数据和图像实时采样的同步。

2.3 实验步骤

在实验机加载前,计算机首先采入一幅未变形前的试件图像作为参考图。随后实验机在位移控制下以 2 mm/min 的速度以准静态方式加载。试件加载的同时 CCD 以 3 帧/秒 的采样速率实时采集试件表面图像,经图像板数字化后的图像存储计算机中,然后用自编的数字图像处理程序进行数据处理。

3 光强相关系数和弹塑性边界的确定

3.1 相关搜索

将标准试件在实验机上按上述实验步骤做单向拉伸实验,对采集的序列图像做数据处理。由于选定的未变形试件表面图像上以某点为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 计算窗口 $f(x, y)$ 在拉伸过程中会有面内位移,所以在变形后的序列图像中首先用数字图像相关(Digital image correlation)方法找到与变形前模板子区 $f(x, y)$ 相关系数为最大值的以 (x', y') 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 矩形区域以确定目标的位置。本文选用最常用的标准化协方差相关系数,它的取值范围为 $[-1, 1]$:

$$C(u, v) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m][g(x+u, y+v) - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x+u, y+v) - g_m]^2}} \quad (1)$$

其中: $f(x, y)$, $g(x+u, y+v)$ 为计算窗口内各像素点灰度; f_m , g_m 为计算窗口的平均灰度值, u , v 为模板中心的整像素位移。在相关搜索过程中作了灰度连续和在小应变下窗口子区形状没有变化的假设。为了提高位移定位精度,本文利用对整像素位移搜索得到的相关系数矩阵进行二次曲面拟合^[14]的方法来获得亚像素位移,并通过对离散灰度的双线性插值来获得亚像素位置的灰度值。

3.2 光强相关系数

为判断试件上各点的塑性变形程度,引入了光强相关系数(Intensity correlation coefficient—ICC)。令 $I_{b(\text{before})}$ 为变形前以某像素 (x, y) 为中心的子区的各像素点灰度值之和的平均值, $I_{a(\text{after})}$ 为以该像素变形后位置 (x', y') 为中心的子区的各像素点灰度值之和的平均值。设子区宽度、高度都为 $2M+1$ (pixels), 所以有:

$$I_b(x, y) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x+i, y+j) \quad (2)$$

$$I_a(x, y) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x+i, y+j) \quad (3)$$

其中: $f(x+i, y+j)$ 为变形前模板窗口中各像素点灰度值, $g(x+i, y+j)$ 为变形后子区窗口内各像素点灰度值。于是, 定义以像素 (x, y) 为中心的子区变形前后的光强相关系数

$$C(x, y) = \left[\frac{I_b(x, y)}{I_a(x, y)} \right]^2 \quad (4)$$

3.3 低碳钢试件弹塑性边界的确定

图 4 为低碳钢试件做刚体平移(平移速率 0.1 mm/min)时, 试件上某点的光强相关系数—时间曲线。由于试件仅刚体平移故其表面粗糙度不会发生任何变化, 因此其对照明光强的反射特性也不会发生任何变化, 由图 4 可见光强相关系数由于各种噪声的影响而在 1 附近波动, 但要远大于后面得到的该试件的弹塑性边界 C_{σ} (图 4 中的虚线所示)。

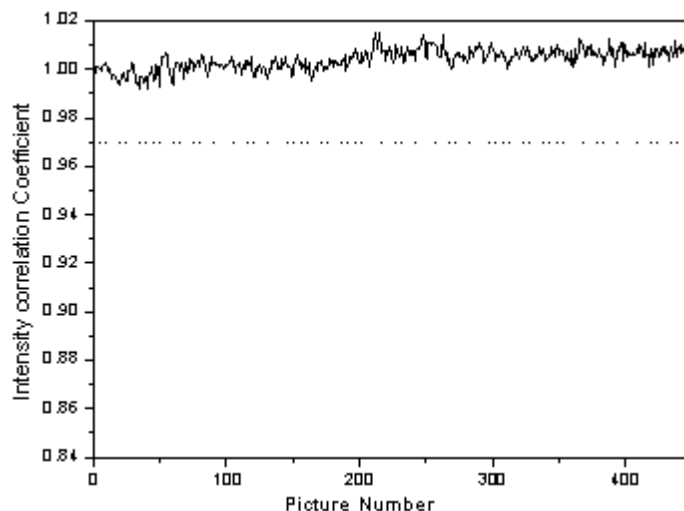


图 4 刚体平移试件的光强相关系数—时间曲线

Fig. 4 ICC-time curve under rigid body translation of specimen

试件在单向拉伸实验的弹性阶段, 由于无塑性变形的出现其表面粗糙度没有变化, 各子区对照明光强的反射特性也应近似不变(见示意图 5(a)), 故 I_b 与 I_a 很接近, 光强相关系数接近 1(如图 6、图 7 中虚线段的上部)。

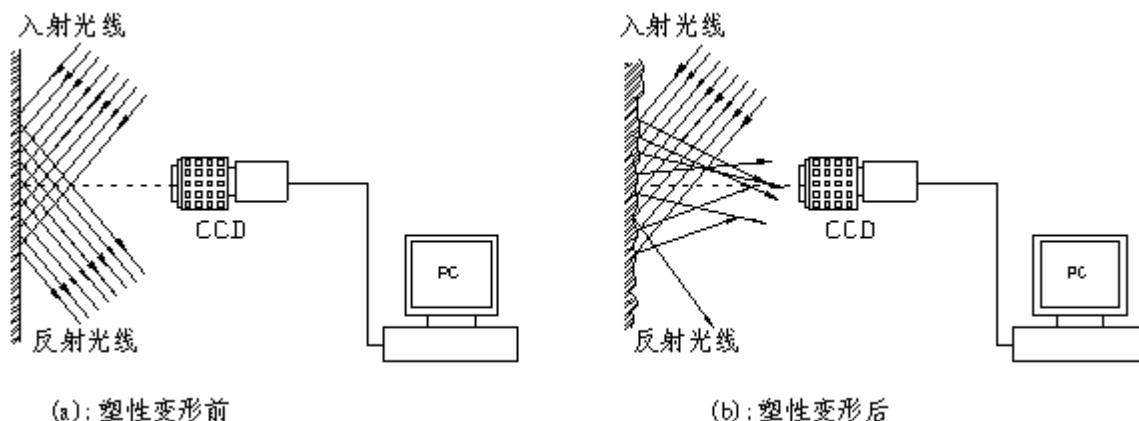


图 5 低碳钢试件塑性变形前后对照明光的反射特性示意图

Fig. 5 Schematic diagram of specimen surface reflective character before and after plastic deformation

当试件进入塑性变形后, 由于塑性变形导致滑移、位错等现象的产生, 会引起试件表面粗糙度的显著变化。使试件表面散射光增加, 从而 CCD 靶面接收到的散射光强会相应增加(见示意图 5(b)), 并由

此将会导致光强相关系数 $C(x, y)$ 产生明显下降(见图 6、图 7 中虚线段的下部)。图 6 是同一试件上不同 9 点的光强相关系数—负荷曲线,由图可以看出当负荷达到 33.75kN 时,各点的光强相关系数都会陡然下降,从接近于 1 突然下降到低于 0.97。而从该试件的负荷位移曲线(图 8)清楚地看出,光强相关系数突然下降时的负荷值则对应负荷位移曲线上试件刚刚进入塑性屈服阶段的负荷。因此我们可以判断塑性变形阶段金属内部微观结构的结晶面滑移、滑移带移动以及孪生变形等现象,是在低碳钢试件刚进入塑性屈服阶段一开始就出现的。随着塑性应变的增加,试件表面的粗糙度也相应增加,与之对应的光强相关系数则相应持续下降(图 6、图 7)。

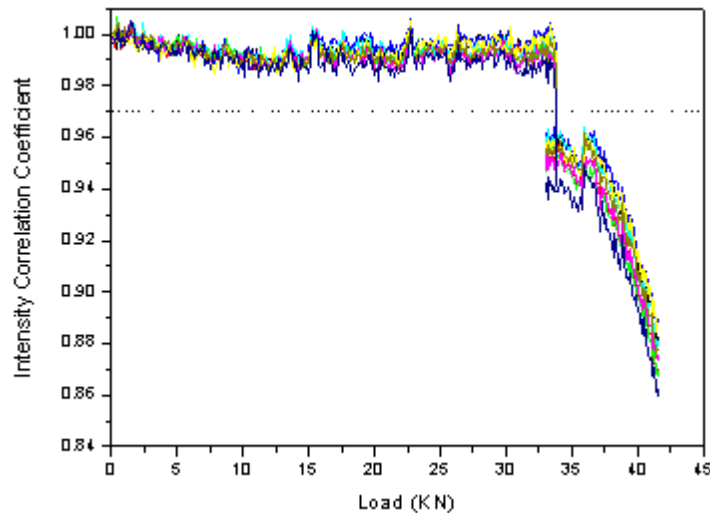


图 6 试件上不同 9 点的光强相关系数—负荷曲线(计算窗口: 31×31 pixels)

Fig. 6 Measured ICC -Load curve of nine different points (subset: 31×31 pixels)

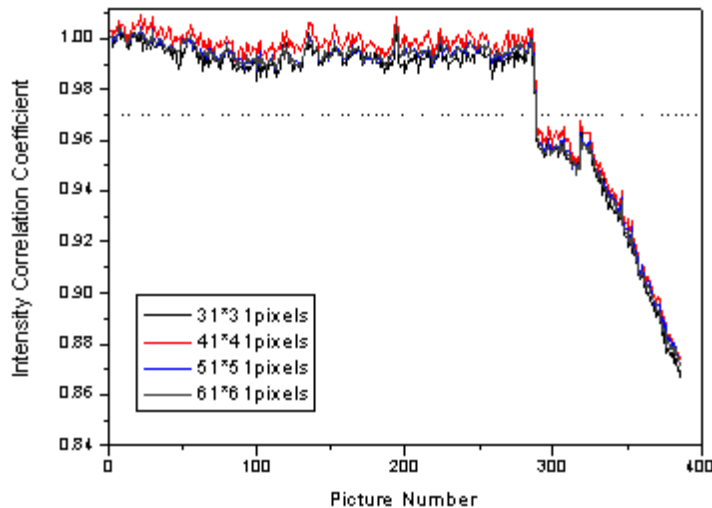


图 7 不同计算窗口的光强相关系数—时间曲线

Fig. 7 ICC-Time curve using different subset size

图 7 中某点选用不同大小的计算窗口得出的光强相关系数—时间曲线。由图可见,由不同的子区大小计算得出的光强相关系数在试件进入塑性屈服时都会产生陡然的下降。但是计算子区尺寸较大得出的光强相关系数—时间曲线则更加平滑,这是因为较大的计算窗口对噪声有一定的平滑作用。本文选用 31×31 pixels 子区的计算结果为标定曲线,因此定义该低碳钢试件的弹塑性边界为 $C_{cr} = 0.97$: 当光强相关系数下降到低于 C_{cr} 时,便认为该子区对应的中心点已进入了塑性屈服。

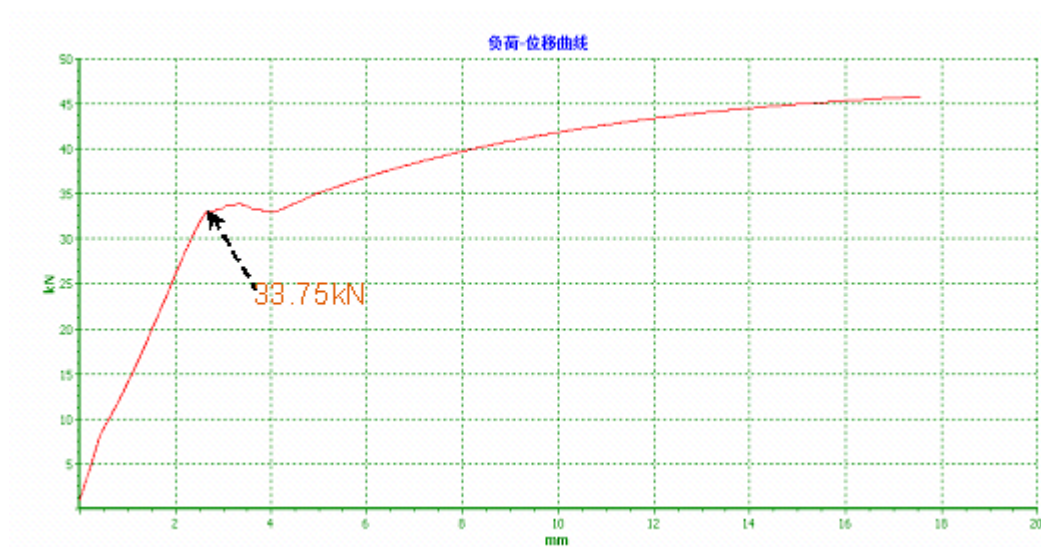


图 8 荷载—位移曲线

Fig. 8 Experimental load-displacement curve

4 结果及讨论

本文提出一种用白光作为照明光源来检测低碳钢试件弹塑性边界的无损检测方法,并定义一种光强相关系数作为判断试件各点是否进入塑性屈服的依据。该方法将数字图像相关和金属表面弹塑性变形前后对光强的反射特性结合起来以判断试件各点是否进入塑性变形。方法光路简单、对环境要求较低、且可以获得全场的信息,避免了用激光散斑测量的诸多缺点。研究表明试件表面的粗糙度随着塑性变形的增加而相应增加且与应力状态无关,因此该方法可望用在有复杂应力状态的实际金属构件的无损检测上。

由于本文的方法中应用了数字图像相关方法来寻找变形前后的相对应子区,这就要求试件表面可以看作广义散斑场。在本文的实验中我们用金刚砂纸来打磨试件以获得这种散斑场。而以前的以白光作为照明光源的方法^[11~13]由于光路的不同布置,试件表面均是通过磨削后再抛光获得,试件的表面近似为镜面,各点的灰度变化很小,此时相关搜索失效,本方法也不再适用。实际的金属构件表面经过怎样的处理,使数字图像相关方法的相关搜索有效并且发生塑性变形前后试件表面的粗糙度变化对光强的反射特性也会有显著变化,这仍需要继续深入研究。

参考文献:

- [1] Yamaguchi K, Mellor P B. Thickness and grain size dependence of limit strains in sheet metal stretching[J]. Int. J. Mech. Sci., 1978, 18:85~90
- [2] Dautzenberg J H, Kals JA G. Stress state and surface roughness[J]. Advanced Technology of Plasticity, 1984, 1: 186~190
- [3] Thomson P F, Shafer B V. The roughening of free surface roughness[J]. Adv Technol Plasticity, Japan, 1984, 1: 18~26
- [4] Dai Yuzhong, Chiang F P. Scattering from plastically roughened surfaces and its applications to strain assessment [J]. Optical Engineering, 1991, 31(9):1269~1276
- [5] Du M L, Chiang F P. The effect of static tensile strain on fatigue failure—An experimental study using laser speckles[J]. Int. J. Fatigue, 1991, 20(5):331~338
- [6] Dai Y Z, Tay C J, Chiang F P. Determination of the plastic zone by laser speckle correlation[J]. Exp. Mech., 1991, 31:348~352
- [7] TAY C J, YAP C M, SHANG H M, TAY T E. Plastic strain measurement in polypropylene using laser speckle

- technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48 : 307~313
- [8] Akira Kato. Determination of fatigue damage in steel using laser speckle[J]. Optics & Lasers Engineering, 2000, 33:323~333
- [9] Akira Kato, Mitsue Hayashi. Fatigue life estimation of steel speckle sensor. NDT & E International, 1999, 32: 139~145
- [10] 续伯钦, 伍小平. 利用激光衍射谱的变化测量金属表面的塑性变形并确定其弹塑性边界[J]. 力学学报, 1984, 6(2): 175~184 (Xu Boqin, Wu Xiaoping. Measuring Plastic deformation on a metal surface and determining elastic-plastic boundary from the change of laser-produced diffraction pattern. ACTA MECHANICA SINICA, 1984, 6(2):175~184(in Chinese))
- [11] Lee C, Chao Y J, Sutton M A. Determination of plastic strains at notches by image-processing methods[J]. Exp. Mech., 1991, 29:214~220
- [12] Diaz F V, Kaufmann G H, Armas A F, Galizzi G E. Optical measurement of the plastic zone size in a notched metal specimen subjected to low-cycle fatigue[J]. Optics & Lasers Engineering, 2001, 35:325~333
- [13] Diaz F V, Armas A F, Kaufmann G H, Galizzi G E. Nondestructive evaluation of the fatigue damage accumulation process around a notch using a digital image measurement system[J]. Optics & Lasers Engineering, 2004, 41:477~487
- [14] 王琛影, 何小元. 相关识别中的曲面拟合法[J]. 实验力学, 2000, 15(9):281~285 (WANG Chenying, HE Xiaoyuan. Curved Surface Approximation in Correlation Recognition Method. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(9):281~285(in Chinese))

Determination of Low-carbon Steel Specimen Elastic-Plastic Boundary Using Improved White-light Correlation Method

PAN Bing, XU Bo-qin, ZHANG Guo-feng

(University of Science and Technology of China, Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials of CAS, Hefei, 230027, China)

Abstract: Determination of elastic-plastic boundary and plastic strains on the surface of metal specimen has long been an attracting and challenging research topic and also is meaningful in determining whether the specimen is in the failure state or not. Both laser speckle and white-light methods have been presented to measure the elastic-plastic boundary and plastic strains of the specimen. To avoid the shortcomings accompanying the laser method, an improved and simple optical method is proposed to determine the elastic-plastic boundary of low-carbon steel specimen in this paper, which using white-light scattering generated by plastically induced surface roughness on the metal specimen polished surface. By digital processing of consecutive images acquired during load, it is possible for us to accurately determine the initiation of the plastic strain.

Key words: plastic strain; intensity correlation coefficient; digital image correlation; nondestructive examination