

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.10.018

# 基于力学机理的聚碳酸酯损伤识别方法研究<sup>\*</sup>

肖晨<sup>1</sup>, 陈金龙<sup>1,2</sup>, 张晓川<sup>3</sup>, 王宗涛<sup>1</sup>

(1. 天津大学力学系, 天津 300072; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072; 3. 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

**摘要:** 基于聚碳酸酯(PC)的力学机理,提出一种识别灰度变化剧烈区域的方法实现对其损伤区域的识别。该方法以数字图像相关方法为基础,将试样的变形信息与表面的灰度变化信息相结合,定量地获得试样图像中每个像素点在变形前后的灰度变化值。结果表明,该方法可以实现对剪切带形成时刻和位置的准确识别,识别结果与内部的变形规律一致,且对离面位移较大的颈缩部位依然适用。该方法可用于监测PC材料的变形演化过程,实现对材料损伤的实时识别。

**关键词:** 聚碳酸酯; 损伤; 剪切带; 数字图像相关方法; 灰度变化剧烈区域

**中图分类号:** TQ323.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2013)10-0074-05

## Study on Identification Method of Polycarbonate Damage Based on Mechanical Mechanism

Xiao Chen<sup>1</sup>, Chen Jinlong<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaochuan<sup>3</sup>, Wang Zongtao<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China; 3. School of mechanical engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**Abstract:** An effective method based on polycarbonate(PC)'s mechanical mechanism was proposed to prevent material from failure. Firstly, digital image correlation method was used to calculate the displacement field, then specimen's deformation was combined with its surface gray change information to quantitatively obtain the gray change information of each pixel point. The results show that the method can achieve accurate identification of time and location of the shear band formation. The identification result is consistent with its internal deformation, while it is also applied to the necking part which has large off-plane displacement. The method can describe the process of whole experiment of PC, achieve real-time identification of material damage.

**Keywords:** polycarbonate; damage; shear band; digital image correlation method; gray change sharply region

聚碳酸酯(PC)是一种性能优良的热塑性工程材料,现已广泛应用于航空航天领域,尤其是飞机座舱盖、挡风玻璃等部件<sup>[1-2]</sup>。飞机在服役过程中会受到多变工况的外载荷,其中座舱盖受力主要取决于座舱内外压力差,当飞机高度较高时,舱内外会形成较大压力差,此时座舱盖一旦有损伤部位,便极易产生爆炸现象<sup>[3]</sup>。因此亟需一种有效的方法准确判断出PC的损伤时间及位置,这对于预防飞机事故具有重大意义。

近年来,国内外许多学者针对PC性能进行了研究,如Zhou Huali等研究了动态压缩下PC的力学性能<sup>[4-6]</sup>,马新忠等<sup>[7]</sup>在冲击试验机上研究了PC在不同应变率下的拉伸性能。但对于PC的损伤判断多是结合应力应变场信息并借助观测仪器通过人眼观察。如胡文军等<sup>[8]</sup>利用电子散斑技术研究了PC在拉伸过程中的表面形变,并借助扫描电子显微镜(SEM)观察材料产生的剪切带并判断出PC的损

伤。然而通过人眼识别观察易受操作人员和环境影响,产生较大误差且无法定量描述。马新忠等<sup>[7]</sup>在文献中提到,其实验人员的观察结果有时与实验图像有一定差异,无法与理论结果完全匹配。

研究表明,PC在进入屈服之后会有一个局部化变形阶段,在此阶段内应变局部化汇集于一个较窄区域,此窄带在宏观上表现为剪切带,塑性变形由剪切带区域扩大至颈缩,当颈缩扩展到一定程度时,材料会形成裂纹导致断裂。可见剪切带的产生是材料破坏的先兆,其形成时会在材料的内部造成损伤。基于以上PC材料的力学机理,笔者通过对PC板材的拉伸实验研究,提出一种识别灰度变化剧烈区域的方法实现对PC损伤部位的准确识别。该方法以

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(11072172)资助项目

联系人: 陈金龙,教授,主要从事现代实验力学测试技术及无损检测技术研究

收稿日期: 2013-08-06

数字图像相关方法为基础,将试样的内部变形信息与表面灰度变化信息相结合,定量地得到变形过程中图像每个像素点的灰度变化值,并以此精确识别出 PC 剪切带的形成时刻与位置,可较好地实现对材料失效的提前预防。该方法亦可用于实时监测材料的变形演化过程,实现对材料损伤的实时识别。

## 1 方法原理

### 1.1 数字图像相关方法 (DICM)

数字图像相关方法是一种具有全场测量、测试精度高、对环境要求低等突出优点的非接触式光学测量方法<sup>[9-10]</sup>。DICM 的基本原理是从参考图像中待测点的周围选择一个矩形参考子区,利用相关系数在变形后图像中寻找与参考子区最匹配的目标子区,以得到待测点的变形信息,如图 1 所示。

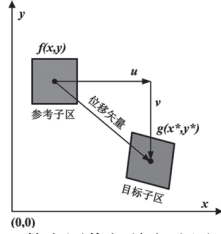


图 1 数字图像相关方法原理示意图

在参考图像中选择一参考子区,参考子区灰度分布函数设为  $f(x, y)$ ,目标子区灰度分布函数设为  $g(x^*, y^*)$ 。试样变形前任意像素点的位置坐标  $(x, y)$  和变形后的位置坐标为  $(x^*, y^*)$  的关系如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} x^* = x + u(x, y) \\ y^* = y + v(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u(x, y)$  和  $v(x, y)$  分别为水平位移分量和竖直位移分量。

根据位移场的连续性假设,  $u(x, y)$  和  $v(x, y)$  可表示为式 (2):

$$\begin{cases} u(x, y) = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ v(x, y) = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_0, v_0$  表示子区中心点的位移,  $(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y})$  表示位移的一阶导数,为点与子区中心点的坐标差。

选择相关函数  $C$ 。

$$C = \frac{\sum f(x, y) \cdot g[x + u(x, y), y + v(x, y)]}{\sqrt{\sum f^2(x, y) \cdot \sum g^2[x + u(x, y), y + v(x, y)]}} \quad (3)$$

当  $C$  取得最大值即  $\frac{\partial C}{\partial u_i} = 0$  时,变形前后两个子区最为匹配,利用牛顿迭代法求解即可得到子区中心点变形信息:

$$(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y})$$

### 1.2 灰度变化剧烈区域的识别方法

本方法是利用 DICM 在变形后图像中找到与参考图像中对应像素点匹配的位置,读出每个像素点在变形前后的灰度值,通过二者的差值大小来判断试样表面灰度变化情况。图 2 中以图像中任意点 P 点为例,详细介绍了本方法的基本原理。

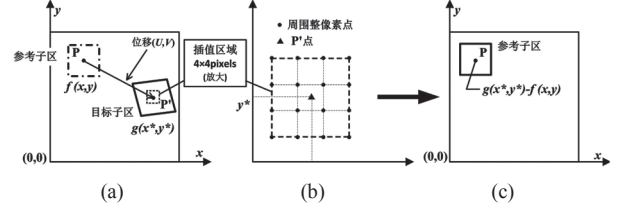


图 2 识别灰度变化剧烈区域方法原理示意图

图中  $(x, y)$  为 P 点在参考图像中的坐标,  $(U, V)$  为 DICM 计算得到变形中 P 点的位移,  $f(x, y)$  为 P 点在变形前的灰度值,  $g(x^*, y^*)$  为变形后 P 对应点 P' 的灰度值。

由 (1) 式可知,将计算所得位移场与参考图像中对应像素点的坐标相加即得到变形后图像中对应点的坐标。则 P' 点的坐标为:

$$\begin{cases} x^* = x + u \\ y^* = y + v \end{cases} \quad (4)$$

DICM 在计算位移场时运用了 N-R 插值,得到的  $(x^*, y^*)$  一般为亚像素,无法直接读出灰度值。因此,以  $(x^*, y^*)$  周围的  $4 \times 4$  像素灰度矩阵为单元构造二元三次插值函数,对灰度值进行插值,如图 2b 所示,插值后可得  $(x^*, y^*)$  的准确灰度信息  $g(x^*, y^*)$ 。则 P 点变形前后的灰度变化值为:

$$\Delta F = g(x^*, y^*) - f(x, y) \quad (5)$$

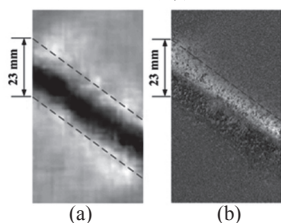
同理,计算出参考图像中每个像素点的灰度变化值,即可得出整幅图像的灰度变化信息。

对于离面位移较大的颈缩部位,无法直接利用二维 DICM 进行位移场求解。因此本方法首先通过对相关函数  $C$  进行阈值分割,预估出变形剧烈的大致区域,并在区域外围选取节点进行位移计算,然后将节点位移进行双线性插值以准确得到区域的二维位移场。

### 1.3 剪切带识别的可行性分析

研究表明,试样表面灰度变化信息可以成为一种描述试件变形的参量<sup>[11-12]</sup>。据此,本方法认为在变形过程中 PC 表面灰度变化剧烈区域即为剪切带产生部位。为验证其可行性,首先对受载下的某图像进行分析计算,得到计算区域内的剪应变场如

图 3a 所示,可以看到剪应变明显汇集为带状区域,此即为剪切带产生部位。同时利用本方法进行灰度变化识别,识别结果如图 3b 所示,与图 3a 进行对比,发现灰度变化剧烈区域与剪切带产生部位的位置和宽度一致,可知此方法可行,具有较好的一致性。



a—剪切应变场; b—灰度变化识别结果

图 3 剪切应变场与灰度变化识别结果比较

## 2 实验部分

### 2.1 主要原材料

PC 板材: 韩国 IS-OPTICS 株式会社;

黑 / 白热塑性丙烯酸树脂漆: 广州保赐利化工有限公司。

### 2.2 主要仪器与设备

电子万能实验机: CSS 44001 型, 长春试验机厂研究所;

采集相机: UP 1830CL 型, 美国 UNIQ 公司。

### 2.3 试样制备

按照 GB/T 1040-1992, 将 PC 加工为标准拉伸试样。由于试样为透明材料, 为了便于试样变形前后位移场的精确测试, 在表面喷涂一层黑白漆膜作为人工散斑场, 加工、喷漆后的试样形状与拍摄区域如图 4 所示。

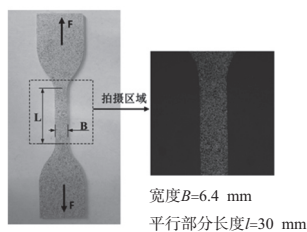


图 4 试样形状与拍摄区域

### 2.4 实验过程

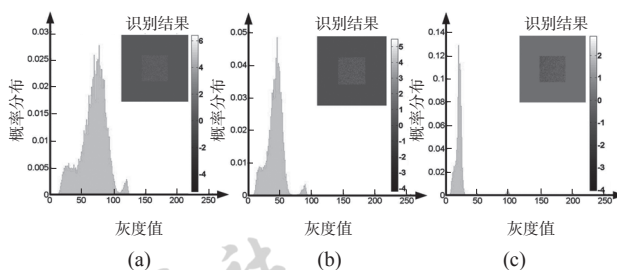
采用试验机对试样进行全程拉伸加载实验, 实验过程中试样垂直放置, 底端固定, 上端牵引形式为位移控制, 加载速率为  $0.5 \text{ mm/min}$ , 同时使用 CCD 相机进行全程监测图像采集, 采集帧速 2 fps, 图像尺寸为  $1024 \times 1024$  像素, 分辨率为 28.9。

## 3 结果与讨论

### 3.1 误差分析

环境中光噪声的存在会引起试样表面的灰度

产生变化, 这会对本方法的识别精度产生影响, 因此需要在实验前对可能产生的误差进行预估。首先将试样静置于相同环境中, 然后分别设置三种不同的光照强度 (a, b, c 组光强逐渐降低), 并在每种光强下拍摄两幅图片。由于试样不受载, 同组光照中的两幅图像灰度变化值即为光噪声的影响。现利用本方法对每组图像中心处  $400 \times 400$  像素区域进行灰度变化识别, 不同光照下图像的灰度直方图与方法识别结果如图 5 所示。



a—光强最大; b—光强较强; c—光强较弱

图 5 不同光照下图像的灰度直方图和识别结果

由图 5 可以看出, 由于光照强度的不同, 三组图像的灰度直方图明显不同, 而本方法识别所得灰度变化范围仅为 6~10, 波动较小, 误差为 2.3%~3.9% (灰度为 256 阶), 可知该方法较为稳定。同时发现误差随着光强的降低而减小, 这表明试样图像整体越暗, 方法受光照影响较小。而根据文献 13 中的实验结果可知, 灰度直方图集成的散斑图, 其平均灰度梯度较小, 同时 DICM 计算误差也越大, 这与本方法对光强的要求相悖。综合考虑, 在下面进行的拉伸实验中, 实验所处的光照环境为 b 组。

### 3.2 实验整体过程分析

实验过程采集得到的力—时间曲线如图 6 所示。

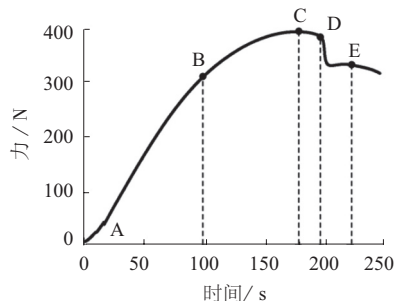


图 6 力—时间曲线

由于试样在拉伸过程中变形较大, 散斑变形较为剧烈, 因此在分析图像时将连续的每 10 幅图像分为一组, 进行分组处理。利用本方法对每组的第 1 幅图像与组内的第 10 幅图像进行灰度变化识别, 即

得到本组时间内的试样灰度变化信息,将每组试样灰度变化最大值进行排序并绘制曲线,得到实验过程的整体灰度变化曲线如图 7 所示。部分采集图像如图 8 所示。

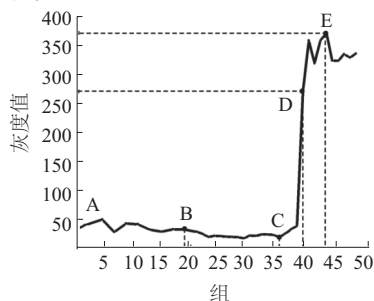


图 7 整体灰度变化曲线

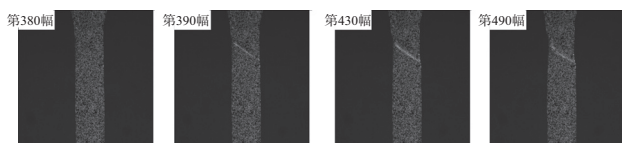


图 8 部分实时采集图像

将整体灰度变化曲线与力—时间曲线对比,并结合实时采集图像观察,可知试样在拉伸实验过程中灰度变化分为五个阶段:(1) AB 阶段(1~19 组),此阶段每组灰度变化值在 30~50 之间波动,此时试样处于拉伸初期的弹性变形阶段;(2) BC 阶段(20~35 组),其灰度变化范围在 18~30 之间,此阶段的灰度变化较小,表明此时试样变形速率较前阶段稍低,试样处于由弹性阶段向非线性弹性阶段转变过程;(3) CD 阶段(36~38 组),其灰度变化范围开始上升,试样处于屈服点附近,在应力超过屈服点后,此时试样内部产生微小应变局部化;(4) DE 阶段(39~43 组)开始,试样的灰度变化值明显增大,并持续升高,表明试样内部应变局部化开始汇集形成了剪切带,且剪切带扩展导致表面灰度变化剧烈,此阶段应力迅速卸载;(5) E 点即 44 组之后阶段,灰度变化范围基本保持不变,应力变化趋缓,为颈缩沿轴向扩展阶段,直至试样产生裂纹,导致断裂。

### 3.3 剪切带的识别

由上述分析可知,试样的灰度变化值在第 39 组产生了骤增,表明在本组时间内试样形变较大,导致表面灰度变化剧烈。现利用本方法对本组的每幅图像与组内第一幅图像进行灰度变化识别,得到灰度变化曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,本组图像的灰度变化范围远远超过了前面的 38 组,现将采集图像分别与剪应变场和方法识别结果进行对比,结果如图 10 所示。

从图 10 可以看到,(a)时刻试样的剪应变场内有着较为离散的应变局部化,但并未汇集,此时在人眼观察图像与本方法识别结果中均未发现剪切带;应变局部化在(b)时刻开始汇集为带状,理论上此时材料内部开始有微剪切带的形成,与此同时在方法识别结果中可以观察到剪切带开始自左上方萌生。而如用人眼直接观察,直至(e)时刻方能从图像中观察到剪切带的萌生,时间晚于应变局部化的汇集时刻。在(f)时刻,剪切带已经扩展为宏观可见,此时可以看到方法识别结果与采集图像形状位置均相符。由此可知,本方法对试样的识别结果与其内部变形过程相符,且较人眼直接观察更为精确,可以提前观察到隐蔽发展的微剪切带,较早地捕捉到材料的损伤,具有较好的预防性。

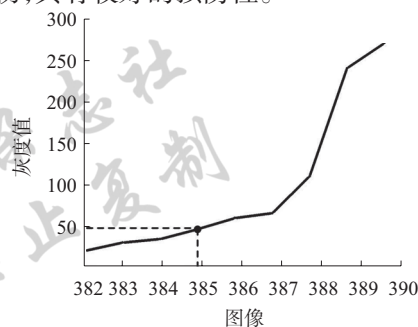
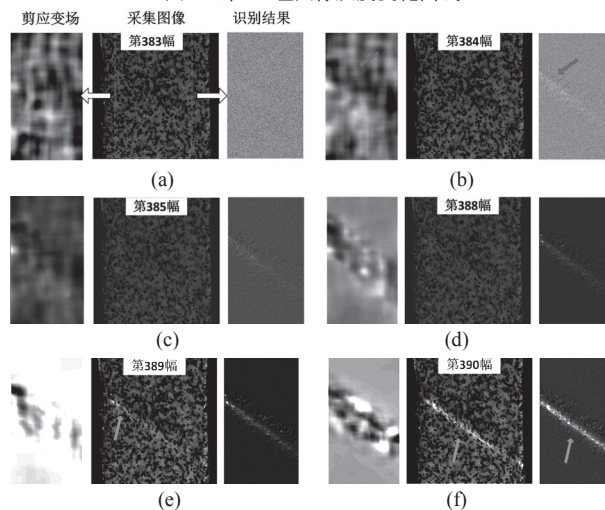


图 9 第 39 组图像灰度变化曲线

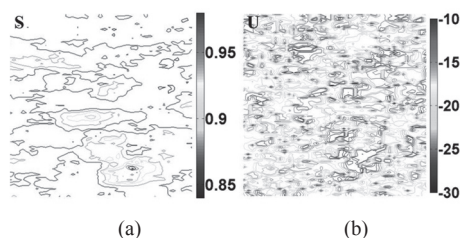


a—第 383 幅; b—第 384 幅; c—第 385 幅;  
d—第 388 幅; e—第 389 幅; f—第 390 幅

图 10 第 39 组采集图像的剪应变场与识别结果

随着剪切带的扩大,试样会产生局部颈缩。利用 DICM 对颈缩区域进行计算,得到相关系数  $C$  和位移场  $U$  如图 11 所示。由图中可发现,相关系数  $C$  在局部区域明显较低,同时测得位移场  $U$  具有严重不连续现象。表明离面位移导致 DICM 失效,实

验计算误差较大。而利用本方法对颈缩区域进行灰度变化识别,所得结果如图12所示,从图中可以看到识别结果与颈缩部位完全吻合,且边界识别清晰明显,可见本方法对离面位移较大部位依然适用。



a—相关系数  $C$ ; b—位移场  $U$

图11 相关系数  $C$  和位移场  $U$

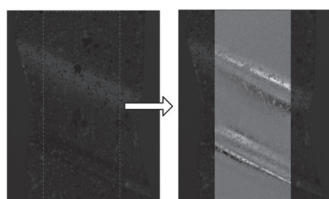


图12 颈缩区域识别结果

#### 4 结论

基于PC的力学机理,在DICM的基础上提出一种识别灰度变化剧烈区域的方法,实现对PC剪切带的形成时刻与位置的精确识别,以较早地捕捉到材料的损伤。对其可行性进行验证,得出以下结论:

(1) 本方法可以实现对PC剪切带的准确识别,识别结果与材料内部的变形规律完全吻合,且相比较人眼直接识别更为准确,方法对于离面位移较大的颈缩部位依然适用。同时,方法受环境影响较小,误差为2.3%~3.9%。

(2) 试样表面灰度的变化可以反映材料受载时的变形演化过程,本方法可用于监测材料的变形演化过程,实现对材料损伤的实时识别。

#### 参考文献

- [1] 史国力,李复生,田红兵.聚碳酸酯在汽车和航空透明材料领域应用的研究进展[J].材料导报,2006,5(20):404-407.  
Shi Guoli, Li Fusheng, Tian Hongbing. Advances and application of polycarbonate in automobile windows and aero glass[J]. Materials Review, 2006, 5(20):404-407.
- [2] 孙欲晓,关俊超,周占发.聚碳酸酯生产及市场分析[J].塑料工业,2010,38(8):1-4.  
Sun Yuxiao, Guan Junchao, Zhou Zhanfa. Manufacture and market analysis of polycarbonate[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(8):1-4.
- [3] 赵道文.飞机座舱盖爆破分析[J].机电产品开发与创新,2009,22(2):15-16.  
Zhao Daowen. The Analysis on the burst of aircraft canopy[J]. Development and Innovation of Machinery and Electrical Products, 2009, 22(2):15-16.
- [4] Zhou Huali, John Lambros. Strain rate effects on the thermomechanical behavior of polymers[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(20):3 549-3 562.
- [5] 胡文军,唐录成,张方举.聚碳酸酯冲击压缩的实验研究[J].高分子材料科学与工程,2006,22(6):165-168.  
Hu Wenjun, Tang Lucheng, Zhang Fangju. Experimental study of polycarbonate's impact compression [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2006, 22(6):165-168.
- [6] Siviour C R, Walley S M, Proud W G. The high strain rate compressive behavior of polycarbonate and polyvinylidene difluoride [J]. Polymer, 2005, 46(26):12 546-12 555.
- [7] 马新忠,汪洋,王宇.聚碳酸酯拉伸力学性能的应变率相关性实验[J].高分子材料科学与工程,2009,25(9):131-134.  
Ma Xinzhong, Wang Yang, Wang Yu. Experiment of the tensile properties of polycarbonate at different strain rates[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(9):131-134.
- [8] 胡文军,符春渝.聚碳酸酯拉伸应变局部化实验[J].高分子材料科学与工程,2011,27(3):112-116.  
Hu Wenjun, Fu Chunyu. Experiment of strain localization of polycarbonate[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(3):112-116.
- [9] Pan Bing. Recent Progress in Image Correlation[J]. Society for Experimental Mechanics, 2011, 51(7):1 223-1 235.
- [10] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental mechanics[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427-431.
- [11] 马少鹏,刘善军,赵永红.数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):590-595.  
Ma Shaopeng, Liu Shanjuan, Zhao Yonghong. Gray correlation of digital images from loaded rock specimen surface to evaluate its damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3):590-595.
- [12] 刘宇,李兆霞,黄跃平,等.基于漫反射法的钢构件塑性变形与损伤检测[J].力学与实践,2010,32(3):35-40.  
Liu Yu, Li Zhaoxia, Huang Yueping, et al. Quantitative research on plastic deformation and damage in steel member based on diffuse-reflectance method [J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(3):35-40.
- [13] 潘兵,吴大方,夏勇.数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J].实验力学,2010,25(2):120-129.  
Pan Bing, Wu Dafang, Xia Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2):120-129.