

# 基于数字图像和声发射技术的 4130X 钢 拉伸断裂损伤状态监测

王恩和<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>, 李彩瑞<sup>2</sup>, 蒋 鹏<sup>2</sup>

(1. 安徽省特种设备检测院, 合肥 230061; 2. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 大庆 163318)

**摘 要:** 4130X 钢是压缩天然气高压气瓶组的主要材料, 为得到其受载作用下的损伤演化规律, 采用数字图像相关技术(DIC)与声发射技术相结合, 开展了 4130X 钢拉伸断裂损伤状态监测试验。采用拉伸试件表面应变标准差(SD)表征其损伤演化规律, 并与损伤过程声发射信号特征参数经历分析相结合, 得到了 4130X 钢在弹性微损伤、塑性损伤、裂纹扩展状态下的声发射信号强度分布规律。试验结果表明, 采用 DIC 和声发射技术相结合的分析方法, 能够得到 4130X 钢拉伸断裂过程的损伤演化规律, 可为其服役状态下的损伤状态监测提供参考。

**关键词:** 4130X 钢; 数字图像相关技术; 声发射; 拉伸断裂损伤

中图分类号: TB31; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)06-0019-05

## Monitoring of tensile fracture damage state of 4130X steel based on DIC and acoustic emission technology

WANG Enhe<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, LI Cairui<sup>2</sup>, JIANG Peng<sup>2</sup>

(1. Anhui Special Equipment Inspection Institute, Hefei 230061, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** 4130X steel is the main material of compressed natural gas high-pressure gas cylinders. In order to obtain the damage evolution law under load, digital image correlation technology (DIC) and acoustic emission technology are combined to monitor the tensile fracture damage state of 4130X steel. The surface strain standard deviation (SD) of the tensile specimen was used to characterize the damage evolution law, and combined with the experience analysis of the acoustic emission signal characteristic parameters of the damage process, the acoustic micro-damage, plastic damage, and crack growth of 4130X steel were obtained. The distribution of the intensity of the transmitted signal. The test results show that the analysis method combining DIC and acoustic emission technology can obtain the damage evolution law of 4130X steel during tensile fracture process, which can provide a reference for the damage state monitoring in service state.

**Key words:** 4130X steel; DIC; acoustic emission; tensile fracture damage

近几年,我国的压缩天然气(CNG)加气站网络正在逐步形成,存储和运输压缩天然气的主要设备多为 CNG 高压气瓶组。CNG 高压气瓶组主要采用 4130X 结构钢制成,受 CNG 介质中所含的硫、硫化氢和水分等杂质的影响,4130X 钢易产生应力腐蚀失效,在交变应力作用下容易出现疲劳裂纹,进而引发失效,甚

至造成严重的后果。因此,采用无损检测技术进行损伤特性监测是材料损伤识别领域的研究重点。

声发射(AE)技术是一种能够实现现有裂纹状态监测及评价的无损检测技术,是承压设备在线监测领域的重要技术手段<sup>[1]</sup>。4130X 钢属于合金钢,其应力强度因子阈值变化较明显,裂纹开裂的敏感性较高,只采用声发射技术对其进行损伤特性分析有所不足,还需结合其他无损检测手段来提高损伤特征的提取和识别能力。数字图像相关技术(DIC)是一种非接触式的应变测量技术,已广泛应用于材料应变测量和裂纹扩展监测等方面<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期:2021-04-20

作者简介:王恩和(1964—),男,本科,高级工程师,主要从事特种设备检验检测及无损检测技术的研究与应用工作

通信作者:刘 鹏,974049986@qq.com

20 世纪 80 年代, YAMAGUCHI 等<sup>[4]</sup>最先提出 DIC 技术。近些年逐渐有学者将 AE 技术和 DIC 技术结合起来对不同材料的损伤演化规律进行研究, LU 等<sup>[5-6]</sup>使用 AE 技术和 DIC 技术对岩石材料进行了研究, 通过对有预裂纹的砂岩梁试件的一系列弯曲试验, 达到了实时监测裂纹尖端的开裂过程和采集变形特征的目的; FARHIDZADEH 等<sup>[7-8]</sup>使用 AE 技术和 DIC 技术对复合材料进行了研究, 发现了接收到的 AE 信号与 DIC 数据之间有很好的相关性。可以看出, DIC 技术主要用于试件表面的应变表征, AE 则可以利用声发射信号的变化规律来分析材料内部的损伤演化规律<sup>[9-10]</sup>。将两者结合使用, 发挥各自的优点是材料损伤无损检测领域研究的热点之一。

笔者提出了基于 DIC 和声发射技术的材料变形应变状态表征, 开展了 4130X 钢加载过程中的 DIC 和声发射监测, 研究了应变非均匀变化参量与受载过程中损伤变化的对应关系, 同时进行了损伤过程产生的声发射特征信号的识别与表征。

## 1 试验原理及方法

### 1.1 变形不均匀程度表征

DIC 的基本原理是使用 CCD(电荷耦合器件)摄像机对试验过程中的试件表面形变进行拍摄, 通过应变分析预设计算区域, 将目标图像与参考图片最相关的点定义为同一点, 并在试验中计算同一点在目标图像与参考图片中坐标的偏移量, 得到该点的位移, 再利用位移变化表征材料表面的应变变化。DIC 测量原理如图 1 所示。

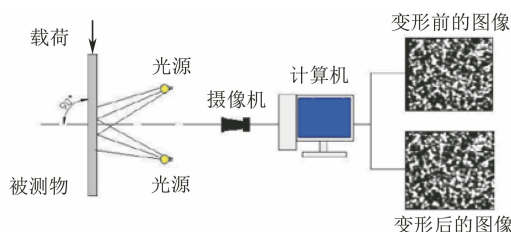


图 1 DIC 测量原理示意

为量化试样表面变形不均匀程度, 引入应变标准差作为材料损伤过程表面应变及损伤的表征参量, 能够较好地反映数据离散程度[见式(1)]。设  $\bar{\epsilon}$  为各像素点应变分布的平均值, 其计算方法如式(2)所示。

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (2)$$

式中:  $S_D$  为应变标准差;  $\epsilon_i$  为第  $i$  个像素点的应变值;  $n$  为像素点的个数。

### 1.2 试验材料及尺寸

试验材料为 4130X 钢, 其力学性能为: 抗拉强度不小于 930 MPa; 剪切强度不小于 785 MPa; 标距长度 5 倍直径的伸长率不小于 12%; 断面收缩率不小于 50%; 深 2 mm U 型缺口试件的冲击吸收功不小于 63 J; 布氏硬度不大于 229 HB。试件为板状, 具体尺寸如图 2 所示。试件分为两种, 一种无预制缺陷, 一种在试件中心处预制规格为 0.4 mm × 0.4 mm × 2 mm(长 × 宽 × 深), 沿试件厚度方向贯穿的缺陷。

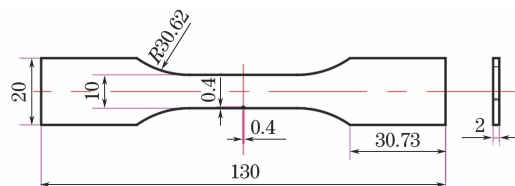


图 2 试件结构示意图

### 1.3 试验系统及流程

拉伸断裂试验采用岛津 AG-X 型电子万能试验机, 拉伸速率为 0.5 mm · min<sup>-1</sup>。在拉伸试件两端分别固定两个声发射传感器, 试验分为 2 组, 对有无预置裂纹的情况进行对比分析, 每组各 2 个, 将试件在拉伸机上进行单向拉伸直至最终拉断, 对整个过程中进行 DIC 及声发射监测。

声发射监测系统采用 PAC 公司产的 PCI-8 系统, 门槛为 35 dB, 前置放大器增益为 40 dB, 峰值定义时间(PDH)为 300 μs, 撞击定义时间(HDT)为 600 μs, 撞击闭锁时间(HLT)为 1 000 μs, 模拟滤波器上限为 20 kHz, 下限为 400 kHz, 采样率为 200 万次/s。Nano30 型传感器的频率为 150 kHz~400 kHz, 两传感器沿着试件中心线对称放置, 彼此相距 60 mm, 试验装置及传感器布置如图 3 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 4130X 钢拉伸损伤 DIC 分析

图 4 为拉伸过程中试件表面应变云图最大应变、最小应变以及平均应变响应曲线, 根据曲线增长速度, 结合拉伸过程中力学曲线大体划分为 I、II、III 三个阶段, 即弹性阶段(无明显屈服阶段)、强化阶段和缩颈阶段。其中红色曲线对应图中红色集中区域, 即局部最大应力处; 黑色曲线对应图中紫色集中区域, 即局部最小应力处。随着拉伸机行程不断增加, 最大应变不断增加, 且各阶段最大应变增长速率排序为 I>II>III。这是由于试件不断拉伸, 试件内

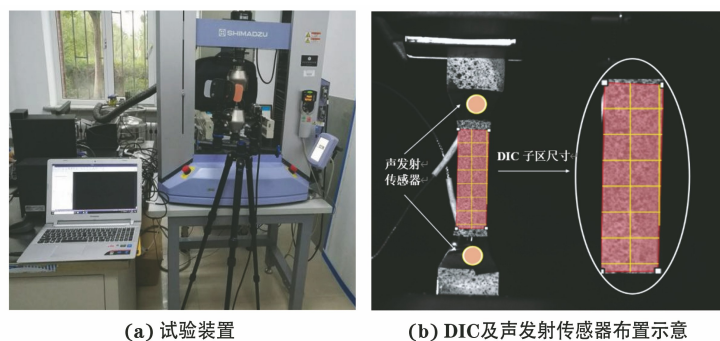


图 3 试验装置及传感器布置示意

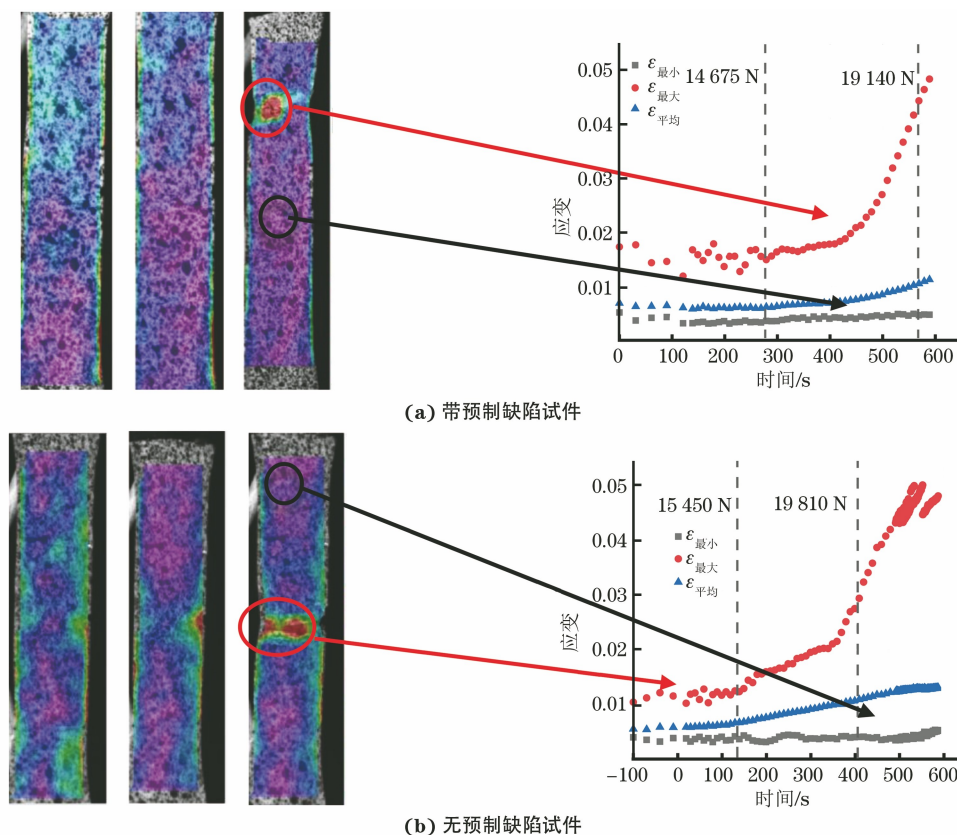


图 4 试件表面应变云图及最大、最小、平均应变响应曲线

部微损伤不断积聚,逐渐形成微裂纹直至断裂。

图 5 为拉伸过程中试件表面变形不均匀程度 ( $S_D$ ) 演化曲线,从图中可以明显看到阶段 III 的  $S_D$  明显大于 I, II 的。图 6(a)~(f) 进一步展现了曲线细节,观察不同阶段  $S_D$  曲线在相同时间间隔 (即  $\Delta T_{A-c} = 20$  s) 内的  $S_D$  增量,带预制缺陷试件的 I, II, III 阶段  $\Delta S_D$  分别为 0.000 245, 0.000 903, 0.00 445 4。无预制缺陷试件的 I, II, III 阶段的  $\Delta S_D$  分别为 0.000 022, 0.000 90, 0.011 23。3 个阶段的数据呈现倍率关系, III 阶段的  $S_D$  增量近似为 II 阶段的 10 倍。同时提取 3 个阶段局部细节 (见图 6), 带预制缺陷试件 III 阶段的  $S_D$  数值变化呈近似线性的增长趋势,表明此时损伤在匀速形成,

预制缺陷处的裂纹线性扩展至失效,而无预制缺陷试件的 III 阶段  $S_D$  数值则呈现指数增长的趋势,表明损伤加速累计,试件处于塑性变形状态直至失效。由此可见,以  $S_D$  作为评价参量的 DIC 分析方法能够较为准确地表征材料损伤的变化趋势。

## 2.2 4130X 钢拉伸断口扫描电镜分析

采用 S-3400N 型扫描电镜 (SEM) 进行断口扫描,图 7 为试件断口的微观形貌。从图 7 中可以看出无预制缺陷试件断口明显有大量韧窝,表明该断口以塑性断裂特征为主。带预制缺陷试件的韧窝较浅,试件塑性相对较差,同时可以观察到断口处的微裂纹,呈现局部脆性断裂特征。



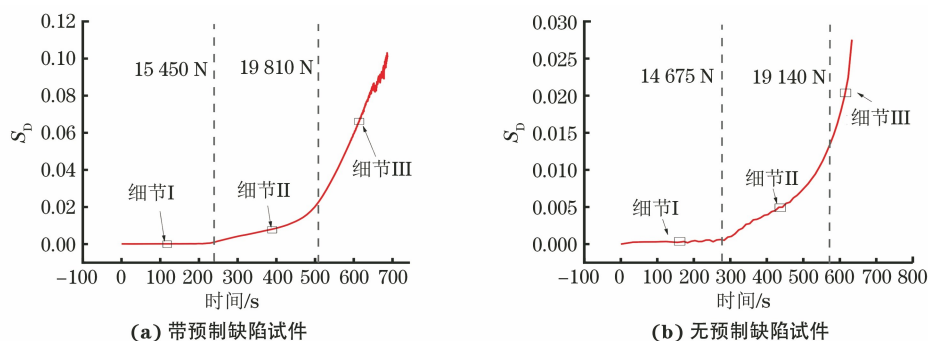


图 5 试件表面应变标准差( $S_D$ )响应曲线

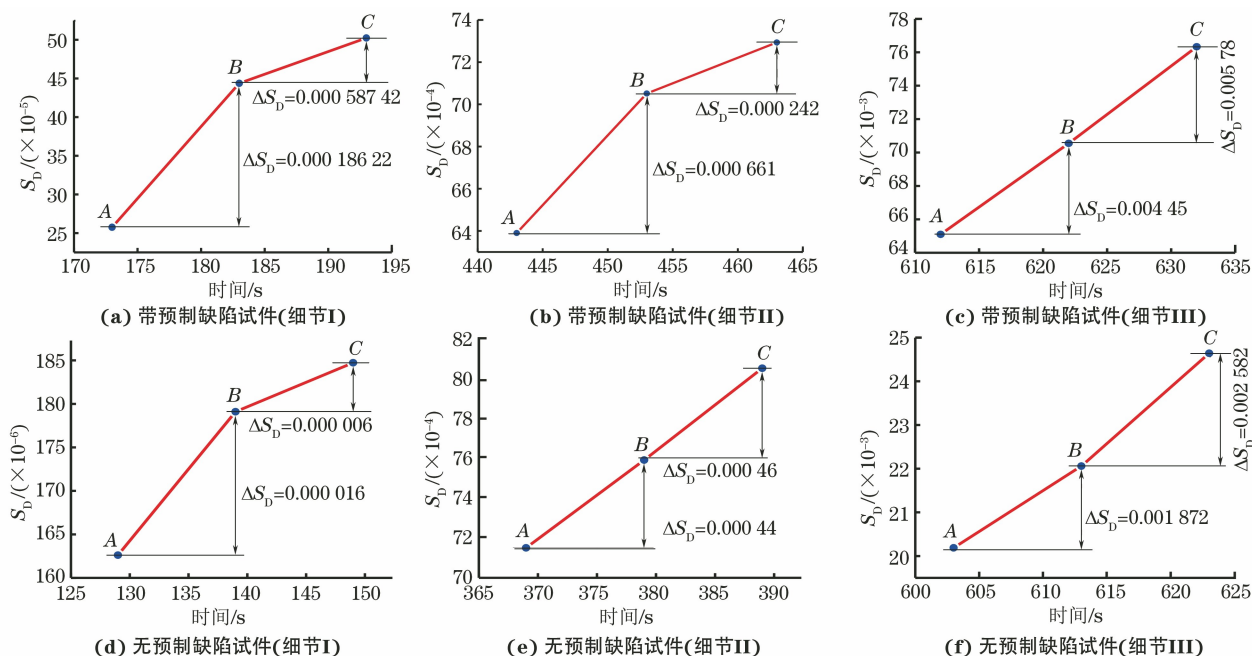


图 6 试件表面应变标准差( $S_D$ )响应曲线细节

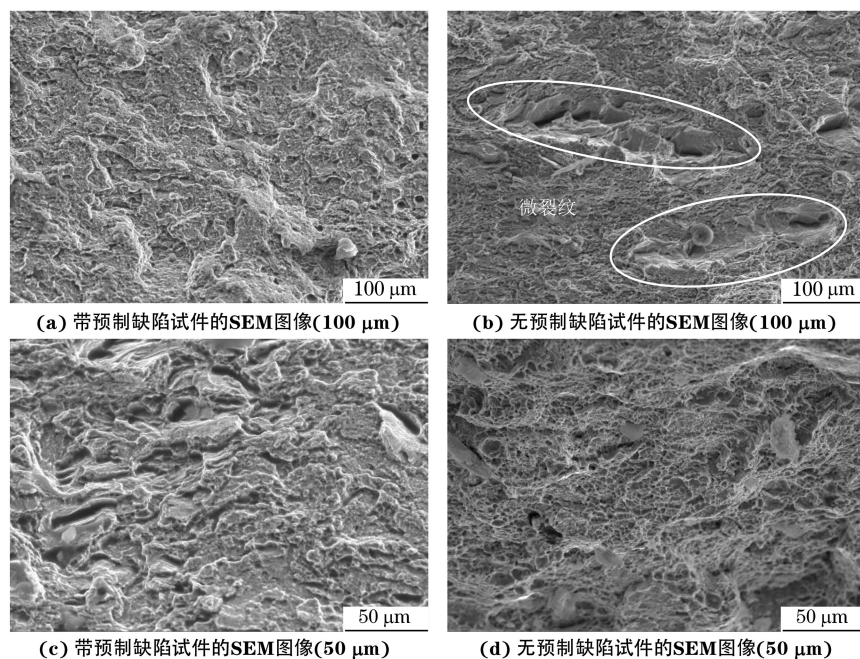


图 7 断口微观形貌

## 2.3 4130X 钢拉伸损伤声发射分析

针对上述两种试件的拉伸断裂过程,进行声发射(AE)参量经历分析,并引入载荷外参数进行实时关联,AE 参量经历图如图 8 所示。由图 8(a),(b)可以看出无预制缺陷试件在弹性及塑性的变形阶段(阶段 I, II)均有声发射信号出现,这说明弹性变形阶段,材料在内部变形中仍存在少量不均匀变形,且随着载荷增加,微损伤不断累积<sup>[10]</sup>。观察振铃计数的累计,发现塑性变形阶段计数呈现加

速增大趋势,这与  $S_D$  参量分析一致。观察带预制缺陷的 AE 信号[见图 8(c),(d)],发现弹性及塑性阶段的声发射信号分布与无预制缺陷试件类似,但信号强度明显增大,失效过程中也呈现出了明显的裂纹扩展的失效特点,并伴有中高幅值的声发射信号<sup>[11]</sup>。从累积振铃计数来看,3 个阶段的累计增大曲线较一致,这说明损伤的累计增大趋势可近似为线性关系,这也与  $S_D$  参量变化的结论相吻合。

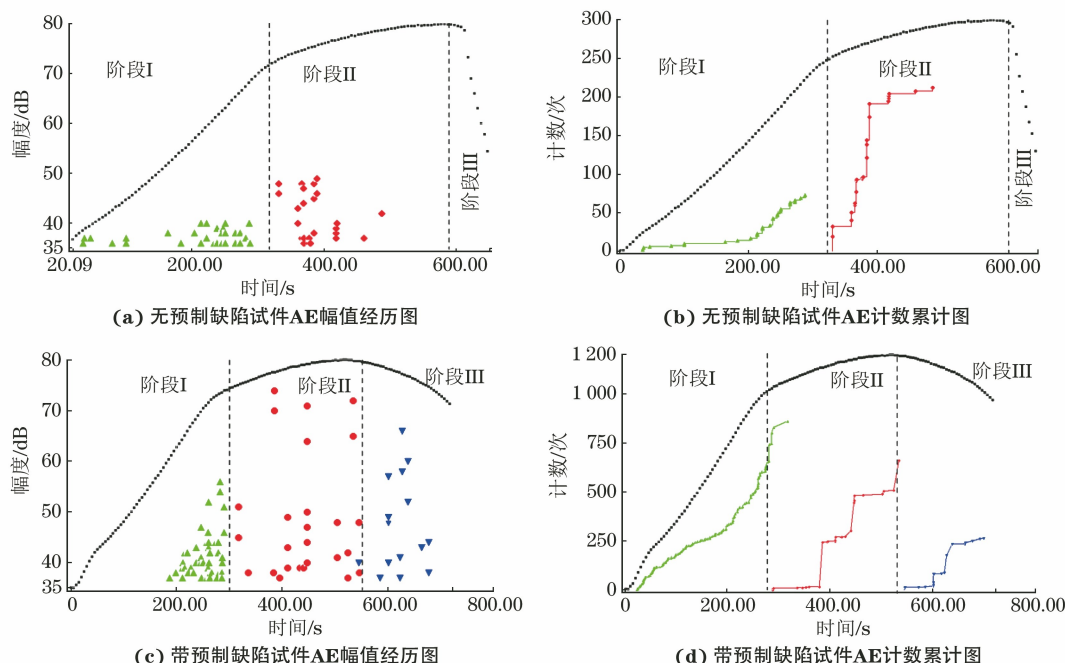


图 8 试件的 AE 参量经历图

由此对声发射信号经历趋势及幅值进行分析,无预制缺陷试件在弹性阶段试件内部因变形不均匀而产生的微损伤信号幅值为 35 dB~40 dB,塑性变形阶段的信号幅值有所增大,为 40 dB~50 dB。带预制缺陷试件裂纹扩展时的声发射信号幅值则明显高于前两类型,其幅值范围基本分布于 65 dB~75 dB。由此可以看出,声发射技术对于 4130X 钢拉伸断裂失效过程的损伤演化具有较高的敏感性,能够得到裂纹扩展时的特征信号,结合 DIC 的  $S_D$  参量可以提高对损伤阶段的表征准确度,也能够进一步使不同损伤阶段声发射信号的特征提取更加精确,因此综合使用声发射特征参数变化和应变标准差  $S_D$  来表征 4130X 钢拉伸断裂过程的损伤演化规律,具有较好的实际应用效果<sup>[12]</sup>。

## 3 结语

开展了两种试件的 4130X 钢拉伸加载 DIC 和

声发射监测试验,提出了基于 DIC 技术的表面应变不均匀状态表征参量  $S_D$ ,该参量能够有效表征 4130X 钢的拉伸损伤状态, $S_D$  数值越大,试件表面的局部应变集中度越高,损伤程度越高。同时结合声发射监测技术得到了两种类型试件拉伸断裂过程不同损伤阶段的声发射信号分布及强度变化规律,与  $S_D$  分析结果相联立,得到了弹性变形阶段、塑性变形阶段、裂纹扩展阶段的信号幅值。

由此可以看出,以  $S_D$  参量为依据的材料拉伸断裂过程损伤 DIC 监测,能准确反映试件的损伤变化规律,再结合声发射的时域经历特征参数分析,可以较好地识别和评价 4130X 钢拉伸断裂的损伤演化规律。

## 参考文献:

- [1] 戴光. 声发射检测技术在中国——庆祝中国机械工程师学会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测, 2008,30(7):389-396.

(下转第 49 页)

(3) 图像的灵敏度和分辨率影响观察和测量的位置,灵敏度和分辨率越高,观察和测量的位置越具有代表性,就能更加准确地反应细节位置穿透厚度的变化。

### 3.4 管道腐蚀点蚀深度计算的注意事项

(1) 数字射线成像检测系统的性能、透照工艺参数、图像质量等必须满足标准 NB/T 47013.11—2015 的要求。

(2) 测试图像的灰度范围为平板探测器量程的 20%~70%。

(3) 测试采用就近比较的原则,对于管件而言,比较的范围(厚度变化)越大,误差越大。

(4) 不同的透照电压,灰度-透照厚度对应关系的指数趋势范围不同。因此,实际检测以指数关系拟合时,应依据灰度计算穿透厚度,灰度-透照厚度对应关系在近似指数趋势范围内。

(5) 母材灰度测量和试件(与母材有厚度差)的灰度测量,均指局部范围内的平均灰度,这样可以避免平板探测器中坏像素点的影响;腐蚀和缺陷自身高度测量值均指其最大灰度。

(6) 该方法适用于碳钢、合金钢、不锈钢等材料,而玻璃钢及 PE(聚乙烯)类材料的管道损伤,可

参照笔者的试验方法,以实际试验数据为基础,分析误差范围,测量损伤深度。

## 4 结语

采用数字射线成像检测对管道腐蚀状况进行了检测,采集了图像的灰度,并进行两点拟合指数函数运算,依据灰度计算出穿透厚度,即可换算出管道的点蚀腐蚀深度;控制好计算穿透厚度的精度,也就控制了点蚀腐蚀深度的测量误差,缺陷的自身高度也可以使用这种对应关系来计算。

采用参照对比计算的方法对腐蚀深度进行计算,点蚀腐蚀深度在管壁厚度(基准厚度)的 40%以下时,测量误差可控制在基准厚度的 3%以内;采用处理图像的计算机拟合指数函数,方便易行;该方法为管道腐蚀的数字射线成像检测提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 郭文明,陈宇亮. X 射线图像灰度值与透照厚度的定量关系[J]. 无损检测,2016,38(2):14-17.
- [2] 巩德兴,姚力,陈晓辉,等. X 射线数字成像在压力管道检测中的应用[J]. 无损检测,2017,39(11):27-30.
- [3] 陈乐,强天鹏,盛佩军,等. 管电压对射线数字成像检测成像质量的影响[J]. 无损检测,2020,42(2):12-16.
- [4] 潘兵,吴大方,高镇同,等. 1 200 °C 高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J]. 强度与环境,2011,38(1):52-59.
- [5] 黄兴震. 基于 ESPI 和 DIC 技术的混凝土拉伸软化曲线试验研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [6] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(11):1270-1273.
- [7] LU Y L, LI W S, WANG L G, et al. In-situ microscale visualization experiments on microcracking and microdeformation behaviour around a pre-crack tip in a three-point bending sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 114:175-185.
- [8] ZHANG H, FU D H, SONG H P, et al. Damage and fracture investigation of three-point bending notched sandstone beams by DIC and AE techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3):1297-1303.
- [9] FARHIDZADEH A, MPALASKAS A C, MATIKAS T E, et al. Fracture mode identification in cementitious materials using supervised pattern recognition of acoustic emission features[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67:129-138.
- [10] WILDEMAN V E, SPASKOVA E V, SHILOVA A I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation [J]. Solid State Phenomena, 2015, 243:163-170.
- [11] DIAKHATE M, BASTIDAS-ARTEAGA E, MOUTOU PITT R, et al. Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material: towards a real-time monitoring of crack tip propagation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 180:254-267.
- [12] 纪洪广,张天森,张志勇,等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价[J]. 无损检测,2001,23(7):289-291,294.
- [13] 张昭,肖迎春,王倩,等. TC18 钛合金疲劳断裂过程声发射信号特征分析[J]. 航空工程进展,2015,6(4):502-506.
- [14] 司刚强,李伟,徐海丰,等. 基于 DIC 和声发射的 TC4 合金疲劳损伤状态监测方法[J]. 东北石油大学学报,2020,44(3):119-126,12.

(上接第 23 页)