

数字图像方法在钢断裂韧性测量中的应用研究

刘俊晨 李晓星 王魁奎

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)



摘要: 在对管道钢断裂韧性各种测试方法系统分析的基础上, 研究了基于数字图像方法的断裂韧性测量方法, 搭建了一套基于 CCD 数字相机的测量硬件系统, 并开发了软件处理系统。实际应用证明了所开发系统的先进性和可靠性。

关键词: 管道钢; 数字图像方法; 断裂韧性

Application of Digital Image Method in Steel Fracture Toughness Measurement

Liu Junchen Li Xiaoxing Wang Kuikui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: Research on the measurement method of fracture toughness using-digital image method based on the analysis on various measurement methods of pipeline steel fracture toughness. A hardware system to measure fracture toughness is built and a software processing system is developed. The industrial application has proved the advanced features and the reliability of this system.

Key words: pipeline steel; digital image method; fracture toughness

1 引言

近年来由于大口径高内压输气管线的广泛应用, 对于管道钢可靠性设计、检查和维护的要求也极大的提高。许多灾难性的破坏事故都起源于裂纹在管道上的迅速扩展。对于管道断裂的研究工作大都集中在延性断裂上, 尤其是关于断裂的止裂问题一直都是研究热点^[1]。在裂纹扩展的过程中管道内的高压气体提供了裂纹扩展所需要的驱动力, 当该驱动力大于材料的阻力时, 裂纹就会继续扩展。裂纹尖端张开角(CTOA)与裂纹尖端张开位移(CTOD)是裂纹扩展中非常重要的断裂力学参数, 在裂纹稳态扩展时, CTOA 将达到临界值而保持稳定不变^[2]。大多数研究者认为对于管道钢, CTOD 和 CTOA 是最符合实际情况的表征断裂韧性的参量, 并成为应用非常广泛的裂纹扩展判

据, 同时也是相当有发展前景的止裂研究方向, 其部分研究成果已经在工程实际中得到应用。

2 管道钢断裂韧性测试方法

2.1 V型缺口夏比冲击试验(CVN试验)

CVN试验也称为三点弯曲夏比冲击试验, 它是利用冲击试验机对含有V型缺口试件的冲击破坏试验, 通过测量冲击过程中的耗散功来评定材料的断裂韧性。

2.2 落锤撕裂试验(DWTT)

DWTT试验同样也是根据耗散功来评定材料的断裂韧性。但是同CVN试验相比, 它的试样的尺寸更大, 因而要求试验机具备更高的冲击能量。但是由于管道钢韧性的提高, 以能量作为断裂韧性判据已经不

作者简介: 刘俊晨(1986-), 硕士, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 非接触式测量。

收稿日期: 2012-12-03

再适用。

2.3 CTOD试验与CTOA试验

CTOD即裂纹尖端张开位移如GBT24522—2009中定义所述,指在预制疲劳裂纹尖端,裂纹两表面相对于原始未变形的裂纹平面的垂直位移。CTOD值的大小反映了材料抵抗开裂的能力高低,CTOD值越大,表示材料的抗开裂性能越好,即韧性越好;反之,CTOD值越小,表示材料的抗开裂性能越差,即韧性越差。

CTOA定义如GBT24522—2009中所述,为相距现有裂纹尖端1mm处测量的(或计算的)裂纹两表面形成的相对角度。CTOA=2arctan($\delta/2x$),式中, δ 为裂纹尖端一定距离 x 处的裂尖张开位移。CTOA与CTOD定义如图1所示。

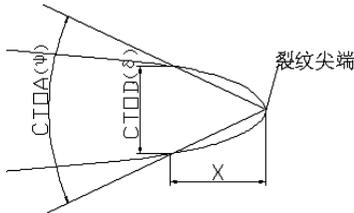


图1 CTOA与CTOD示意图

CTOA判据是通过计算裂纹扩展过程中每一时刻的最大裂纹尖端张开角 ψ_{max} 值,并与材料的临界裂纹尖端张开角 ψ_c 进行比较来判断管道裂纹是继续扩展还是停止。如果 $\psi_{max} \geq \psi_c$,则裂纹继续扩展,否则裂纹停滞。

目前应用比较广的测CTOA和CTOD方法有直接法和间接法。

2.3.1 直接法

试验后测量法(显微形貌法)即使用长焦距显微镜直接在裂纹边缘上取点测量,原理如图2所示。

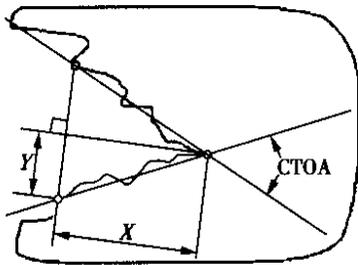


图2 直接法测量

直接法首先需要确定裂纹尖端位置,然后在两个裂纹边缘上距离为 x 处的位置找点,再将所找到的点

与确定的裂纹尖端连线,最后测量这两条连线的夹角,就是CTOA的值。

2.3.2 间接法

直接法测量CTOA中首先遇到的一个问题就是裂纹尖端的确定非常困难;其次因为裂纹边缘可能会出现锯齿状,测出的CTOA值可能非常发散。这时使用间接法就会比较好,间接法测CTOA不是直接在裂纹轮廓上找点,而是先在试件上画1mm×1mm的方格线,通过测量裂纹扩展后靠近裂纹边缘的两侧线条的角度来确定CTOA的值。但是测量精度不如试验后测量而且对于画线要求严格,操作起来费时麻烦。如图3所示。

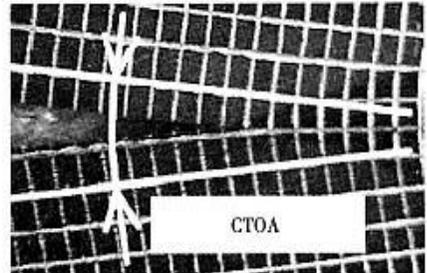


图3 间接法测量CTOA

M

目前测量CTOA和CTOD应用比较广泛的方法为实验后测量法,即显微形貌法,但是这种方法只能记录裂纹扩展结束时的数据,但根据GBT24522—2009中要求得出裂纹稳定扩展时的数据,该方法准确度就不高而且更费时费力。所以本文提出了另外一种方法即数字图像相关法。

3 数字图像相关法测CTOA和CTOD

数字图像处理技术在管道钢断裂韧性测量中的核心就是边缘检测,确定裂纹的边缘。

在数字图像的处理中边缘检测技术非常重要,边缘实际就是区分目标与背景的分界线,目标和背景可以通过图像分割中的边缘提取区分开来。通过利用背景和目标在某些图像属性例如灰度、颜色或纹理特征上的差异可以实现对边缘的检测。边缘检测实际上就是检测图像特性产生变化的位置。提取反映特征变化的边缘点,并将这些边缘点连接成完整的线^[3]。

针对裂纹边缘检测使用灰度边缘检测算子,首先要二值化图像,需要将图像上的点的灰度值变为0或255,使整个图像有非常明显的黑白效果。即通过处理将灰色图像转变为能够表征所需图像部位局部特

征的二值图像。一般采用阈值分割技术也称灰度门限法来得到理想的二值图像，当图像目标区域和背景区域的灰度不同且各自区域内部灰度相关性很强时，可以将灰度的均一性作为根据来进行分割，大于某一个特定灰度的像素划分到一个区域，小于这一特定灰度的像素划分到另一个区域，这个特定灰度就是阈值。因此阈值的选取将直接影响边缘检测的精度，本文使用了最大类间方差法即大津法来确定阈值。

设一副图像的灰度值有 $1 \sim m$ 级，灰度值 i 的像素数为 n_i ，此时得到总像素数为

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \quad (1)$$

$$\text{各灰度值的概率 } p_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

用 k 将灰度值 $1 \sim m$ 分成两组 $C_0 = \{1 \sim k\}$ 和 $C_1 = \{k+1 \sim m\}$ 各组产生的概率为

$$C_0 \text{ 产生的概率 } \omega_0 = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (3)$$

$$C_1 \text{ 产生的概率 } \omega_1 = \sum_{i=k+1}^m p_i \quad (4)$$

$$C_0 \text{ 的平均值 } u_0 = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{u(k)}{\omega(k)} \quad (5)$$

$$C_1 \text{ 的平均值 } u_1 = \sum_{i=k+1}^m \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{u - u(k)}{1 - \omega(k)} \quad (6)$$

式中， u ——整体图像的灰度平均值； $u(k)$ ——阈值为 k 时的灰度平均值。

$$u = \sum_{i=1}^m ip_i \quad (7)$$

$$u(k) = \sum_{i=1}^k ip_i \quad (8)$$

定义全部采样的灰度平均值为：

$$u = \omega_0 u_0 + \omega_1 u_1 \quad (9)$$

两组间的方差 $\sigma^2(k)$ 为

$$\begin{aligned} \sigma^2(k) &= \omega_0(u_0 - u)^2 + \omega_1(u_1 - u)^2 = \omega_0 \omega_1 (u_1 - u_0)^2 \\ &= \frac{[u \times \omega(k) - u(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \end{aligned} \quad (10)$$

改变 k 的值，用阈值定位公式（10）求得 $\max \sigma^2(k_1)$ ，此时的 k_1 即为二值化的阈值^[4]。

确定阈值之后即可确定裂纹边缘点，连接这些点得出裂纹的轮廓线。

编写的软件系统界面如图4所示，可以自动记录裂纹扩展全过程计算每个时刻 CTOA 和 CTOD 值并保存数据。

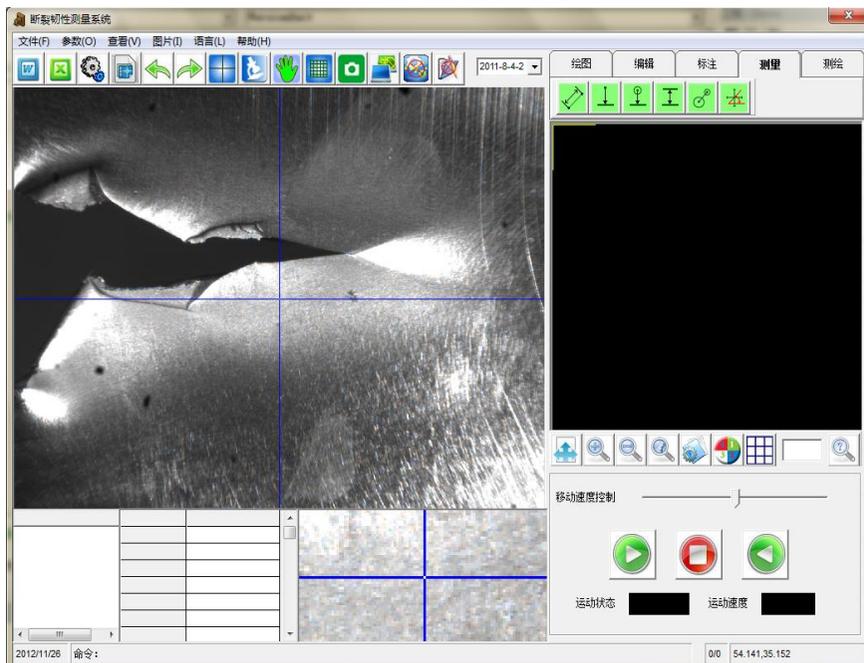


图4 CTOA 测量软件系统界面

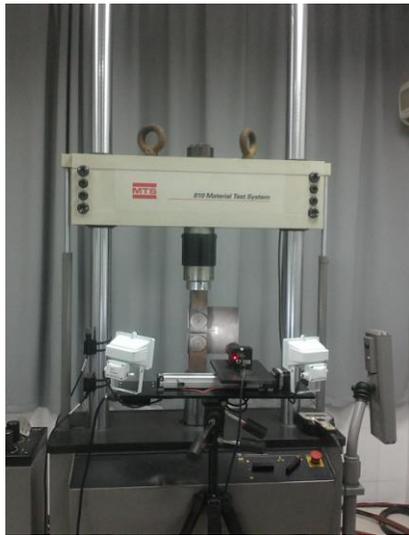


图5 CTOA 测量硬件系统

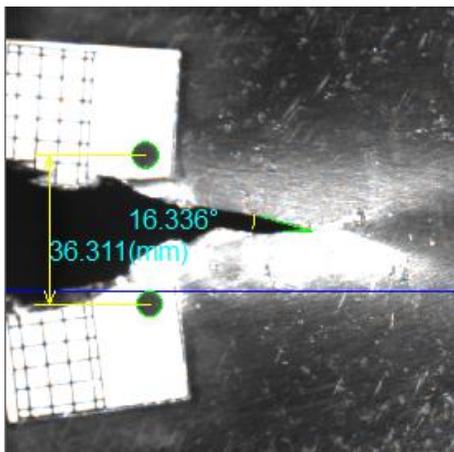


图6 实验结果

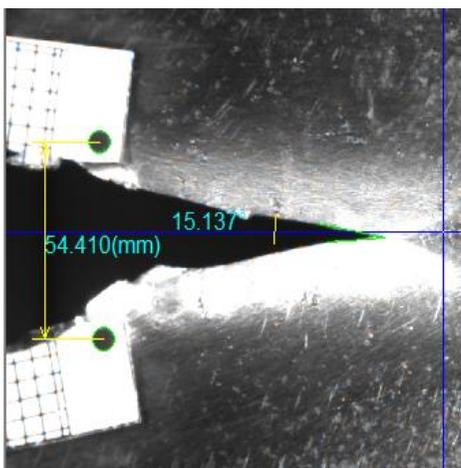


图7 裂纹稳定阶段实验结果

搭建一套测量硬件系统，使用 200W 像素 CCD 黑白相机来记录裂纹扩展全过程，步进电机导轨保证相机实时跟踪裂纹，以及支撑平台、三脚架、光源等装置。试验机与测量系统如图 5，按 GBT24522—2009 中试验方法进行试验得出结果分析，如图 6 和图 7 所示。

图 6 和图 7 中的 2 个黑色圆为按 GBT24522—2009 中要求在预制裂纹尖端相距 5mm 处的标记点，两圆之间的距离为对应阶段的 CTOD 值，CTOA 的值则为图中对应的 2 个角度值，软件能准确地找到裂纹边缘点并显示这些点，连接这些点得到的裂纹边缘线与真实裂纹边缘高度吻合，从而可以得到裂纹扩展过程中任何时间的 CTOD 和 CTOA 值。使用数字图像相关法测量比显微形貌法以及间接测量法更精确，操作更方便，能够记录整个裂纹扩展全过程，用时也更少。

4 结束语

对于各种测量CTOA的方法，显微形貌法费时费力，精确度也较低，只能测量裂纹扩展结束后的参数值，不能实时地记录裂纹扩展全过程，而且试件从试验机上取下过程中存在的各种变化都可能影响测量结果。而数字图像方法通过记录裂纹扩展的全过程，能精确的测量裂纹扩展稳定之后的CTOA以及CTOD的值，快速准确，可以记录所有数据，自动化程度高。但是目前数字图像方法只能得出裂纹表面的数据，对于裂纹内部数据暂时没有有效的办法测量，是以后研究中需要解决的难点。

参考文献

- 1 潘家华. 油气管道断裂力学分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989
- 2 白永强, 帅健等. 管线钢断裂韧度测试实验研究进展[J]. 压力容器, 2005(5): 35~39
- 3 孙即详. 图像分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 4 景晓军, 蔡安妮. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001(4): 71~76