

# 疲劳裂纹扩展门槛值测试技术

刘青峰<sup>1</sup>,张治国<sup>2</sup>,邹 骅<sup>3</sup>,李晓阳<sup>4</sup>

(1. 92117 部队,北京 100072;2.中国铁道科学研究院 标准计量研究所,北京 100081;  
3.北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044;  
4.北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100022)

**摘 要:**针对裂纹扩展门槛值测量技术中存在的不足,应用数字化测量技术采集试样测点位移与试验载荷,采用柔度法计算裂纹长度,由测点位移波形的峰值记录循环次数,多线程软件设计实现试验控制和数据采集、监视与处理一体化,从而保证测试结果的准确性.根据不同载荷比下 40CrNiMo 钢疲劳裂纹扩展门槛值成组试验的结果,验证了上述测试技术的可靠性与可行性.

**关键词:**裂纹测试技术;柔度法;应力强度因子;疲劳裂纹扩展门槛值

**中图分类号:**U270.12      **文献标志码:**A

## Measuring and testing techniques of fatigue crack growth threshold

LIU Qingfeng<sup>1</sup>,ZHANG Zhiguo<sup>2</sup>,ZOU Hua<sup>3</sup>,LI Xiaoyang<sup>4</sup>

(1. 92117 Troops, Beijing 100072,China;  
2. Standards & Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081,China;  
3. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;  
4. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022,China)

**Abstract:** In view of insufficiency in crack growth threshold measurement technology, the survey-point displacement of specimen and test-load are collected through digital measurement technology, and the crack size is calculated through the compliance method, the cycle index is recorded according to the wave crest of survey-point displacement. Besides, the integrated objective of test control, data collection, monitoring and processing are implemented by the multi-thread software. The results of the fatigue crack growth thresholds of steel 40CrNiMo, which are obtained from group test method under different load-ratio, prove the reliability and feasibility of measuring and testing techniques.

**Keywords:** crack testing technology; compliance method; stress intensity factor; fatigue crack growth threshold

服役工程结构的疲劳破坏通常是由于疲劳裂纹扩展造成的,疲劳裂纹扩展是疲劳设计的重要研究内容,材料疲劳裂纹扩展门槛值对于结构疲劳设计尤为重要<sup>[1]</sup>.为准确获得材料的疲劳裂纹扩展门槛值,需要在试验中实时采集和同步显示裂纹长度、循环次数和试验载荷<sup>[2]</sup>,从而导致试验数据采集量大,

收稿日期:2015-03-23  
第一作者:刘青峰(1972—),男,山东莱阳人,高级工程师,博士.研究方向为车辆结构疲劳可靠性.email:liuqingfeng72@163.com.  
引用格式:刘青峰,张治国,邹骅,等.疲劳裂纹扩展门槛值测试技术[J].北京交通大学学报,2017,41(3): 109—113.  
LIU Qingfeng,ZHANG Zhiguo,ZOU Hua,et al. Measuring and testing techniques of fatigue crack growth threshold[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 109—113.(in Chinese)

传统的测试技术不能满足试验要求,目前裂纹长度测试方法有很多种,如目测法、柔度法<sup>[3]</sup>、电位法<sup>[4]</sup>、图像法<sup>[5]</sup>等,其中目测法劳动强度大、精度差,特别是当测量点较少时,试验结果会受到影响;电位法不需要观察裂纹,测量工作量小,但电位差测试仪器精度要求高,影响因素较多,获得的数据结果有时不太稳定;图像法是较新的裂纹长度测试技术,基于 CCD 图像处理获得裂纹长度,对于裂纹尖端的锐化与钝化的循环、裂纹扩展的连续与微跳的增长,图像法具有一定的优势,但该方法对测试仪器要求较高;柔度法容易实现数据的连续采集与实时同步,具有较高的测量精度,且操作简便,应用广泛<sup>[6-8]</sup>.为此,本文基于柔度法进行裂纹长度的测试和计算中,采用多线程的软件结构,将测试任务分成几个并行运行、完成不同功能的线程,实现试验控制和数据采集、监视与处理一体化.

1 理论背景

1.1 裂纹扩展理论

裂纹扩展是裂纹由初始尺寸扩展到临界尺寸的过程.裂纹扩展速率  $da/dN$  和应力强度因子范围  $\Delta K$  的关系采用 Paris 公式可写为<sup>[10]</sup>

$$da/dN = C (\Delta K)^m \tag{1}$$

式中:  $C$ 、 $m$  为与材料和试验条件有关的参数;  $a$  为裂纹长度, mm;  $N$  为载荷循环次数, cycle.

理论上  $\Delta K$  与  $da/dN$  的关系采用双对数曲线表示,如图 1 所示.当裂纹尖端的应力强度因子范围  $\Delta K$  小于裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  (一般取  $da/dN = 10^{-7}$  mm/cycle 对应的  $\Delta K$  值)时,裂纹不发生扩展;当  $\Delta K$  超过  $\Delta K_{th}$  后,裂纹开始扩展,随着裂纹长度的增加,裂纹进入稳定扩展区,即拐点 1 和拐点 2 对应的区间;当裂纹长度扩展超过拐点 2 后,裂纹快速扩展至断裂.

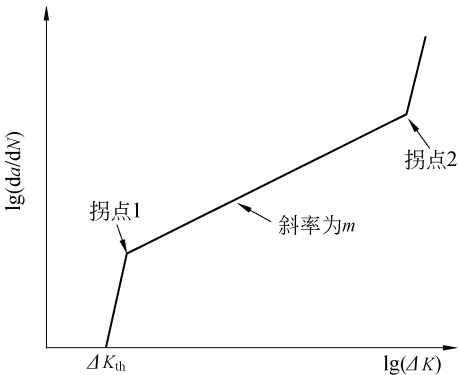


图 1  $\lg(da/dN) - \lg \Delta K$  曲线

Fig.1 Curve of  $\lg(da/dN) - \lg \Delta K$

1.2 柔度法原理

柔度用来表征构件抵抗变形的能力,当构件中裂纹萌生或扩展,构件柔度也会随着其抵抗变形的能力而相应变化.在其它条件不变时,柔度的变化可用来监测裂纹的变化.高同步性与线性度的载荷、位移信号和高速数据采集与处理组件是柔度法准确测试裂纹长度的保证.

CT 试样柔度与裂纹长度的关系用柔度  $(EV_X B)/P$  和归一化裂纹长度  $a/W$  表达为<sup>[9]</sup>

$$a/W = (C_0 + C_1 U_X + C_2 U_X^2 + \cdots + C_5 U_X^5) \tag{2}$$

式中:  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $\cdots$ 、 $C_5$  为柔度系数;  $W$  为加载线到试样远端的距离;  $U_X$  为柔度表达式,即

$$U_X = [(EV_X B/P)^{1/2} + 1]^{-1} \tag{3}$$

式中:  $B$  为试样厚度;  $E$  为弹性模量;  $V_X$  为试样测点  $X$  的位移;  $P$  为静载荷.

图 2 为试样位移测点位置示意图,试样测点位置对应的柔度系数值  $C_0 \sim C_5$  分别为: 1.001、 $-4.669\ 5$ 、18.46、 $-236.82$ 、1 214.9 与  $-2\ 143.6$ <sup>[9]</sup>.

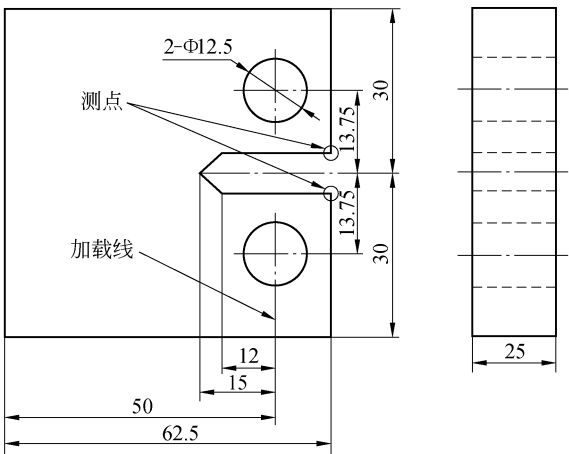


图 2 CT 试样位移测点位置(单位:mm)

Fig.2 Measuring point position of CT specimen(unit:mm)

2 系统设计

2.1 硬件设计

测点位移采集硬件系统由引伸计、桥源、放大器、A/D 板、抑零漂电路和计算机组成<sup>[11]</sup>.选用 IN-STRON 高频引伸计,见图 3,其能在不大于 500 Hz 的试验频域下正常工作,裂纹长度测量精度达到 0.5  $\mu$ m. A/D 板的采集速度和精度决定了系统的采样速度和精度,系统所用 A/D 板的分辨率为 1/4 096,采集频率大于 2 kHz.在高频疲劳试验机载荷标定系统的基础上,通过 I/O 板直接采集记录载荷值.

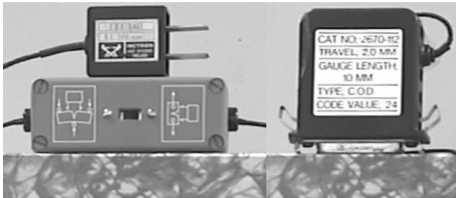


图 3 INSTRON 高频引伸计

Fig.3 INSTRON high frequency extensometer

2.2 软件设计

Windows 操作系统可同时运行多个进程(程序实例),每个进程可同时运行多个线程(子任务),所有线程可访问进程的全部资源和变量,易实现线程间的通信,即一个线程生成的数据可立即提供给其他线程.多线程程序可以同时完成不同的工作,使得结构既可提高 CPU 的利用率和程序的响应、运行速度,又可减少系统的等待时间和资源浪费,这样程序采样的速度快、可靠性高.

软件系统采用 VC++ 编程,系统多线程程序结构见图 4.主线程用于用户接口,作用是响应用户事件,并显示图形与数据;线程 1 用于采集测点位移,线程 2 用于记录循环次数,由于数据量大、频率高,所以设定线程 1 和线程 2 拥有较高的优先级;线程 3 用于采集载荷和数据处理,鉴于频繁存盘消耗大量系统资源,会使采集测点位移和循环次数滞后,因此程序设计时,先把数据存储到缓存,停止采集时再存盘,即进行数据的分步存盘.

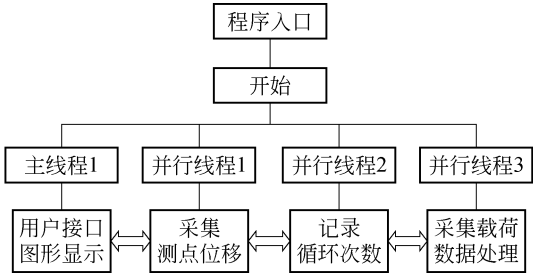


图 4 多线程程序结构

Fig.4 Multithread program structure

3 数据测试与处理

3.1 数据测试

3.1.1 裂纹扩展长度

通过 INSTRON 高频引伸计测试试样测点位移,然后通过柔度法计算裂纹长度.

1)测点位移数据格式.

A/D 板的地址、数据及数据存放的格式见图 5,将 3 位 16 进制数从左至右拆分并移位:第 1 位、第 2 位分别右移 1 位,存放到高端地址的高 4 位和低 4 位;第 3 位左移 1 位存放到低端地址的高 4 位,低 4

位存放数据有效性控制码.

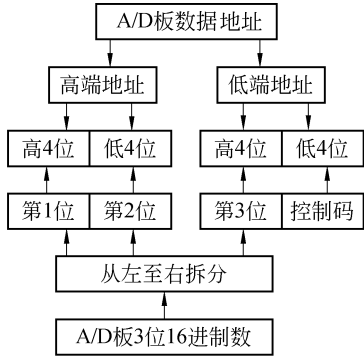


图 5 地址和数据格式

Fig.5 Address and data format

2)测点位移的采集协议.

计算机与 A/D 板的通信流程见图 6.A/D 板收到控制码,进行模数转换,处于数据被读状态,计算机读入 A/D 板地址里的数据,存放在低端地址低 4 位的控制码用于数据的有效性校验,数据无效,计算机重新读;数据有效,进行数据还原,存放在高端地址高 4 位和低 4 位的数(第 1 位、第 2 位)左移 1 位,存放在低端地址高 4 位数(第 3 位)右移 1 位,记录下测点位移信息.

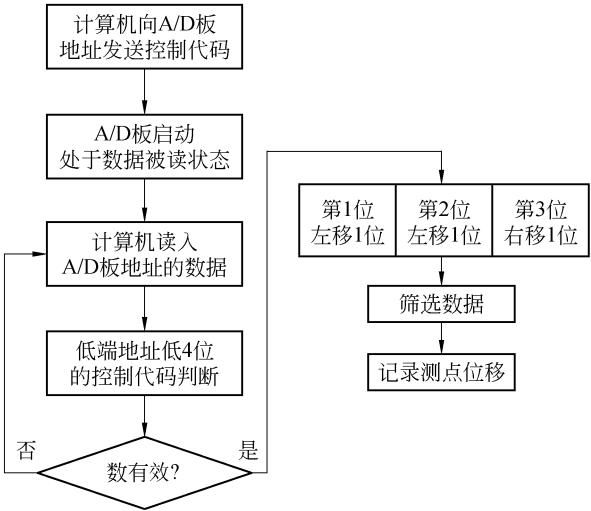


图 6 通信协议

Fig.6 Communications protocol

3)采样频率分析.

对于通常 70~170 Hz 的高频试验,在每个循环中,系统可采集至少 11 个点信息,采样间隔相等,但采集点数是变化的.通过等幅正弦波采样将每个循环采集的极值来替代其真实的极值造成的误差,其与采集点数的关系曲线见图 7,假设循环只采集了 10 个点,误差小于 5%.每个循环采集的点数不小于 11 个,误差在 2% 左右,如果频率在 100 Hz 左右,每个循环可采集 20 个点,误差仅在 1% 左右,测点位

移的测试具有较高的精度,通过测点位移均值计算的裂纹扩展长度同样具有较高的精度.

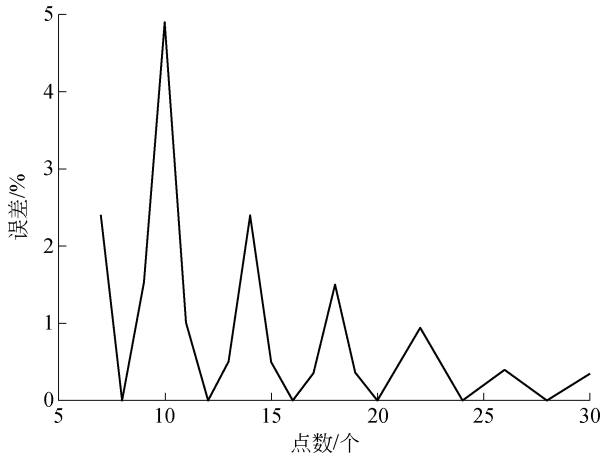


图 7 采集点数与误差曲线

Fig.7 Curve between acquisition point number and the error

3.1.2 循环计数

试样承受等幅正弦波循环载荷,其测点同步产生循环位移.由采集测点位移线程记录的全部位移信息,通过记录循环次数线程统计位移波形的峰值,由峰值法记录循环次数<sup>[12]</sup>.测点位移的高精度测试有效保证了循环计数的高精度.

3.1.3 试验载荷

100 kN 的试验系统的载荷采集协议见图 8,精度是 0.01 kN,将 5 位 10 进制数,从左至右拆分并给 5 位数标识 1000、0100、0010、0001 和 0000,等于给这 5 位数分别多加了 128、64、32、16 和 0,标识与相应的载荷数值分别存放在 I/O 板口地址的前 4 位和后 4 位,I/O 板随机存放一组标识和数,计算机采

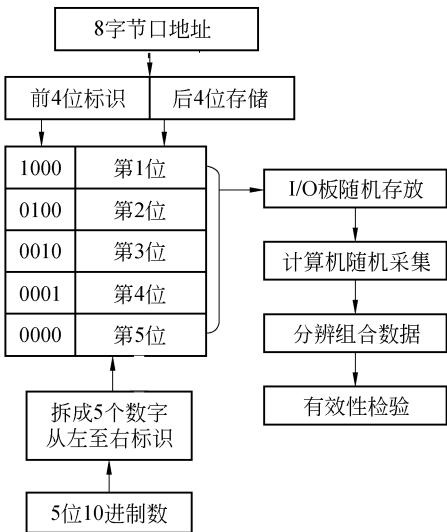


图 8 载荷采集协议

Fig.8 Loading acquisition protocols

集并分辨这 5 位数,有效性校验后,组合方法为:(第 1 位-128)×100+(第 2 位-64)×10+(第 3 位-32)×1+(第 4 位-16)/10+(第 5 位-0)/100.

有效采集的载荷不能超出系统的量程 100 kN.第 1 位只能等于 0 或 1,否则无效.第 1 位等于 0,数据有效.第 1 位等于 1 且其余位等于 0,数据有效;第 1 位数等于 1 且其余位不都等于 0,数据无效.试验载荷的约定采集协议,优化了采样的有效性.

3.2 数据处理

数据处理是通过软件的数据处理模块实现的,处理流程如下:

1) 设定  $j$  个循环算一次测点位移, $j$  为奇数,取值可从 1 到几百,共进行了  $k$  次测试,第  $i$  次测试的测点位移均值为  $V_i$ ,根据式(2)计算裂纹长度,得到第  $i$  次测试的裂纹长度  $a_i$  和循环次数  $N_i$ .第  $i$  次测试的测点位移均值  $V_i$  为

$$V_i = \frac{\sum_{i=1}^j (V_{i\max} + V_{i\min})_i}{2j} \tag{4}$$

式中:  $V_{i\max}$ 、 $V_{i\min}$  分别为第  $i$  个循环中位移的最大值和最小值.

2) 用递增多项式局部拟合求导,确定裂纹扩展速率和裂纹长度拟合值<sup>[9]</sup>.取  $(a_i, N_i)$  数据点前面和后面各  $n$  个点,共  $2n+1$  个连续点, $n$  值可取 2、3、4.采用二次多项式拟合求导:

$$\begin{aligned} \hat{a}_i &= b_0 + b_1 \left( \frac{N_i - f_1}{f_2} \right) + b_2 \left( \frac{N_i - f_1}{f_2} \right)^2 \tag{5} \\ \begin{cases} -1 \leq \frac{N_i - f_1}{f_2} \leq 1 \\ f_1 = \frac{1}{2}(N_{i-n} + N_{i+n}) \\ f_2 = \frac{1}{2}(N_{i+n} - N_{i-n}) \\ a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n} \end{cases} \tag{6} \end{aligned}$$

式中:系数  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  是按最小二乘法确定的拟合参数; $\hat{a}_i$  是对应于循环次数  $N_i$  的拟合裂纹长度;参数  $f_1$ 、 $f_2$  用于变换输入数据.

在  $N_i$  处的裂纹扩展速率  $(da/dN)_{a_i}$  由式(5)求导获得:

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_{a_i} = \frac{b_1}{f_2} + \frac{2b_2(N_i - f_1)}{f_2} \tag{7}$$

3) CT 试样  $\Delta K$  的计算表达式为<sup>[9]</sup>

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \sqrt{W}} \times \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \tag{8}$$

式中:  $\alpha$  为归一化裂纹长度,  $\alpha = a/W$ ;  $\Delta P$  为载荷



变程,为动载荷  $P_d$  的 2 倍,即  $\Delta P = 2P_d$  .

将  $(da/dN)_i$  对应的动载荷  $(P_d)_i$  代入式 (8),从而得到第  $i$  次循环中的裂纹应力强度因子  $\Delta K_i$  .

4) 由  $((da/dN)_i, \Delta K_i)$  数据的关系曲线,确定近门槛扩展区的拐点,采用最小二乘法分别拟合稳定扩展与近门槛扩展区数据,获得 Paris 公式参数  $C$ 、 $m$  和裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  .

## 4 试验设计与结果分析

采用抚顺钢厂冶炼的 40 CrNiMo 钢的 30 个 CT 试样,进行载荷比为 0.1、0.3 和 0.5 的 3 组试验,每组 10 个试样,测得的结果如表 1 所示.

表 1 试验结果  
Tab.1 Test results

载荷比	$\Delta K_{th}$ 均值	$\Delta K_{th}$ 均方差	$m$ 均值	$m$ 均方差	$C$ 均值	$C$ 均方差
0.1	6.64	0.36	3.82	0.25	$3.20 \times 10^{-15}$	$2.58 \times 10^{-15}$
0.3	5.66	0.30	3.78	0.20	$3.66 \times 10^{-15}$	$2.12 \times 10^{-15}$
0.5	3.86	0.33	3.73	0.22	$1.43 \times 10^{-14}$	$1.33 \times 10^{-14}$

在不同的载荷比下,40 CrNiMo 钢疲劳裂纹稳定扩展阶段参数  $C$  的平均值分别为  $3.20e-15$ 、 $3.66e-15$  和  $1.43e-14$ ,对应每组中的 10 个试件算得参数  $C$  的平均值的均方差分别为  $2.58e-15$ 、 $2.12e-15$  和  $1.33e-14$ ,参数  $C$  的计算结果分散性相对较大,也符合参数  $C$  与材料的力学性能、试验条件等有关的情况.

## 5 结论

- 1) 基于 100 kN 高频疲劳试验机组建了一套测定疲劳裂纹扩展速率及其门槛值的自动化测试系统,实现了试验控制和数据采集、监视与处理一体化,由成组试验验证了测试系统具有较高的精度和稳定性,为疲劳试验系统的发展完善提供了新思路和方法.
- 2) 采用柔度法由测点位移均值计算裂纹扩展长度,由测点位移波形的峰值记录循环次数,试验载荷实时数字化测量,多线程软件设计实现试验控制和数据采集、监视与处理一体化,提高了测试效率和精度.
- 3) 由试验测得了 40 CrNiMo 钢的疲劳裂纹扩展门槛值,为疲劳设计提供了依据.

### 参考文献 (References):

[1] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986:191—198.  
GAO Zhentong. Applied statistics in fatigue [M].

从试验结果看,40 CrNiMo 钢裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  随试验载荷比的增大而减小,对应每组中的 10 个试件算得裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  平均值的均方差分别为 0.36、0.30 和 0.33,均方差的数值较小,能反映材料 40 CrNiMo 钢的疲劳裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  .

在不同的载荷比下,40 CrNiMo 钢疲劳裂纹稳定扩展阶参数  $m$  的平均值相当接近,分别为 3.82、3.78 和 3.73,符合  $m$  不随构件的形状和载荷性质而改变,多数金属材料的  $m$  值在 2~4 的范围内的规律.对应每组中的 10 个试件算得参数  $m$  平均值的均方差分别为 0.25、0.20 和 0.22,均方差较小,说明试验系统具有较高的稳定性.

Beijing: National Defense Industry Press, 1986: 191—198. (in Chinese)

[2] SAXENA A, HUDAK S. Review and extension of compliance information for common crack growth specimens [J]. International Journal of Fracture, 1978, 14(5): 453—468.

[3] 张利娟, 张亚军, 高灵清. 表面裂纹长度的测量方法[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(5): 75—78.  
ZHANG Lijuan, ZHANG Yajun, GAO Lingqing. Review on measurement methods of surface crack length[J]. Exploitation and Application of Material, 2009, 24(5): 75—78. (in Chinese)

[4] SCHWALBE K H, HELLMANN D. Application of the electrical potential method to crack length measurements using Johnson's formula[J]. JTEVA, 1981, 9(3): 218—221.

[5] KANCHANOMAI C, YAMAMOTO S, MIYASHITA Y. High cycle fatigue test for solders using non-contact digital image measurement system [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(1): 57—67.

[6] 张旦闻, 刘宏昭, 刘平. 裂纹柔度法在 7075 铝合金板残余应力检测中的应用[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(2): 127—131.  
ZHANG Danwen, LIU Hongzhao, LIU Ping. Application of residual stress measurement on 7075 Aluminum Alloy plate based on the cracking flexibility method[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(2): 127—131. (in Chinese)