

超声红外热像检测中疲劳裂纹的检出概率模型研究

冯辅周¹, 张超省¹, 宋爱斌², 闵庆旭¹, 朱俊臻¹

(1. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072; 2. 装甲兵工程学院 基础部, 北京 100072)

摘要: 超声红外热像检测技术的可靠性研究具有重要意义, 特定检测条件下不同缺陷的检出概率是衡量检测可靠性的根本方法。文中制作了一系列含疲劳裂纹的 45 钢试件, 实验结果表明: 当检测条件确定时, 裂纹区域响应热信号随着裂纹尺寸的增大而增强, 响应热信号的对数与裂纹尺寸大体上呈线性关系。基于超声红外热像检测数据的统计特征, 确定了回归分析模型中变量的形式, 采用极大似然估计和 Wald 法分别给出了检出概率曲线的参数及其置信区间。研究成果能够为评价超声红外热像技术中检测可靠性提供量化依据。

关键词: 超声红外热像; 裂纹生热; 裂纹尺寸; 检出概率

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304005

Probability of detection model for fatigue crack in ultrasonic infrared imaging

Feng Fuzhou¹, Zhang Chaosheng¹, Song Aibin², Min Qingxu¹, Zhu Junzhen¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

2. Department of Fundamental Courses, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Research on the detection reliability of ultrasonic infrared imaging is of great importance. Probability of detection for different defects under given test conditions is workhorse statistical technique for the detection reliability assessment. In this paper, a series of 45 steel containing fatigue cracks were tested. Experimental results show that the increase of the crack size will enhance the crack heating response, and the relationship between the logarithmic form of measured response and the crack size appears to be linear. Based on the above statistic characteristics, the linear regression analysis and Delta method were adopted to estimate the probability of detection and its confidence interval. The research conclusion will provide a quantitative basis for detection reliability in ultrasonic infrared imaging.

Key words: ultrasonic IR imaging; crack heating; crack size; probability of detection

收稿日期: 2015-07-10; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 军队科研计划项目

作者简介: 冯辅周(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事故障诊断及无损检测技术方面的研究。Email: fengfuzhou@tsinghua.org.cn

0 引言

超声红外热像技术(又称振动热像技术,或热超声技术)是一种新型无损检测技术,其利用高强度超声脉冲激起被测对象内部产生高频振动,引起缺陷及不均匀区域产生热量并传导至表面,通过热像仪捕捉到由此引起的温度差异以实现缺陷检测^[1-3]。为了尽可能地找到细微的缺陷,总是使检测条件达到最优化从而使超声红外热像检测系统达到其极限能力。然而,当检测系统达到极限状态时,并非相同尺寸的所有缺陷均会被检出,即便是同一缺陷的重复测量也会产生不同的响应结果,上述检测的或然特征可以采用检出概率(Probability of Detection, POD)来表征,从而达到评估超声红外热像检测中缺陷可检测性的目的^[4]。

目前,仅仅能够在包含已知尺寸缺陷的试件上通过可靠性试验来估算检出概率,而且也一定要通过统计方法才能估算检出概率函数的参数并量化在此过程中产生的试验误差。2007年,Stephen Holland 等人在简单梁结构上施加共振激励以剔除其他因素的影响,建立了描述激励振幅、裂纹尺寸、裂纹热信号之间关系的理论模型,并给出了应力和生热的计算方法^[5-6];2011年,Ming Li 等人引入噪声干扰模型,进一步提高了检出概率曲线的准确性,而且由此得到的检出概率在不同单位的不同检测系统上具有普适性^[7]。2012年,Duan Yuxia 等人研究了脉冲红外热像技术的缺陷检测的可靠性问题,并对比了不同图像处理方法对缺陷检出概率的影响^[8]。2013年,Ben Weeks 等人采用电磁感应线圈激励被测对象,以缺陷区域与非缺陷区域的信噪比为响应信号以计算缺陷检出概率,对比分析了感应红外热像技术对不同金属材料的缺陷检测能力^[9]。2015年,Liu Junyan 等人采用经过调制的激光束激励碳纤维复合材料,提取缺陷区域与非缺陷的相位差,建立了基于连续信号和基于检出/漏检数据的 POD 模型^[10]。然而,典型超声红外热像检测需要利用被测对象的声混沌效应,很难也不需要达到共振条件^[11],且其缺陷响应信号特征亦有别于其它红外热像检测技术^[12],因此上述研究成果难以直接推广到典型超声红外热像的应用场合。

为了揭示特定检测条件下检出概率随裂纹尺寸

的变化规律,制作了一系列含疲劳裂纹的 45 钢平板试件,提取裂纹区域与背景区域的最大温差作为响应信号,分析了裂纹尺寸对裂纹区域响应信号的影响,在此基础上确定回归模型中响应变量和解释变量的形式,最后通过极大似然估计和 Delta 方法求得了裂纹检出概率模型中的参数和置信区间。

1 超声红外热像检测系统

典型的超声红外热像系统包括超声枪、红外热像仪、加载单元、固定夹具等,如图 1 所示,其中超声枪由 Branson CJ20 换能器+调幅器+工具杆构成,相应的超声电源(图 1 中没有显示)为 Branson DCX-S 超声塑料焊接系统,工作频率为 20 kHz,最大电功率为 1.25 kW;红外热像仪选用 FLIR T640,热灵敏度为 0.035 °C,像素为 640 pixel×480 pixel,采样频率为 30 Hz;旋转加载单元的螺纹丝杠推动超声枪轴向运动,迫使其前端工具杆压紧被测对象,压力传感器实时测量工具杆与被测平板之间的预紧力;固定夹具通过螺栓夹持被测平板短边实现固定,螺栓拧紧时扭转力矩设定为 15 N·m;另外,采用双层遮光布料构建一个红外暗室以屏蔽外界辐射源和空气流动造成的影响。

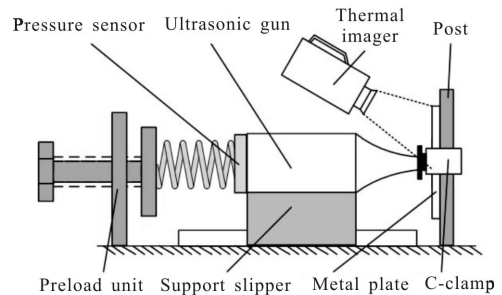


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2 疲劳裂纹试件

预制疲劳裂纹试样采用如图 2 所示的金属平板,材料为 45 钢,其抗拉强度和屈服强度分别为 620 MPa 和 451 MPa,其中两侧大圆孔用于试验机夹具夹持,中心小圆孔用于制备切口以萌发裂纹,两侧小圆孔用于安装测量裂纹开口位移的 COD 规,预制裂纹过程中采用柔度法监测和控制裂纹长度^[13],裂纹尺寸范围控制在 0.4~9.5 mm 之间。

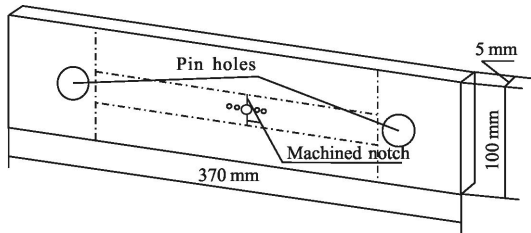


图 2 预制疲劳裂纹的标准中心拉伸 M(T) 试样

Fig.2 Standard middle-tension specimen for fatigue crack

将上述 10 个预裂纹试件按图 2 所示的虚线采用电火花线切割的方式得到 20 个如图 3 所示的被测试件, 激励位置偏离中心 50 mm。为减少振动能量沿夹具向外传播, 选择尺寸为 50 mm×20 mm×2 mm 的硬纸板作为隔振材料。

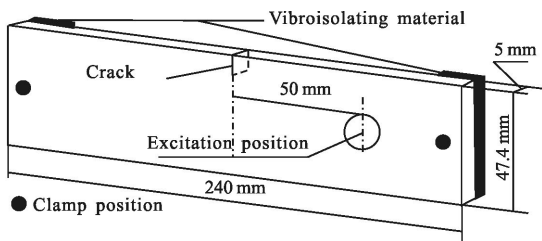


图 3 被测试件示意图

Fig.3 Schematic diagram of tested plate

通过光学显微镜获取裂纹区域的表面形貌, 提取被测试件前后表面上裂纹可见部分的平均值作为裂纹尺寸表征, 表 1 给出了文中 20 个被测试件的裂纹尺寸。待完成裂纹尺寸测量后, 在被测平板的待测表面喷涂黑色哑光漆以提高表面发射率。

表 1 裂纹长度

Tab.1 Crack size

No.	Size/ μm	No.	Size/ μm
1a	419.91	1b	1 707.41
2a	1 986.66	2b	2 181.48
3a	3 454.42	3b	3 474.50
4a	3 898.49	4b	2 338.08
5a	5 374.71	5b	5 582.16
6a	6 559.11	6b	6 577.41
7a	8 014.54	7b	8 014.54
8a	7 948.20	8b	7 507.79
9a	9 301.36	9b	7 948.20
10a	9 453.00	10b	8 280.19

3 实验结果分析

图 4 给出了编号为 5a 的裂纹在典型检测条件下的裂纹区域温度分布, 颜色越亮代表温度越高, 图 4(a) 为激励结束时刻, 图 4(b) 为激励开始时刻。可以看到: 相比于激励开始时刻, 激励结束时刻裂纹区域存在明显的温度升高。在实际超声红外热像检测中, 通常采用感兴趣区域在激励结束时刻与激励开始时刻 (背景区域) 温差的最大值作为响应信号, 用以判定缺陷的信息。

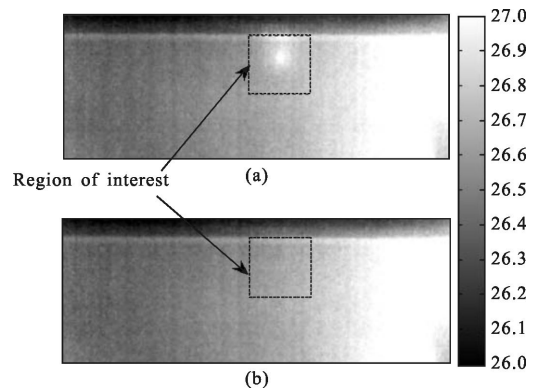


图 4 裂纹区域热像图

Fig.4 Temperature contour of crack region

假定裂纹尺寸采用 a 表示, 响应信号采用与裂纹尺寸 a 关联的特定参数 \hat{a} 来量化和记录。图 5 给出了预紧力为 20 kg、激励振幅为 25%、激励时间为 1 s 时, 响应信号 \hat{a} 随裂纹尺寸 a 四种形式的变化关系,

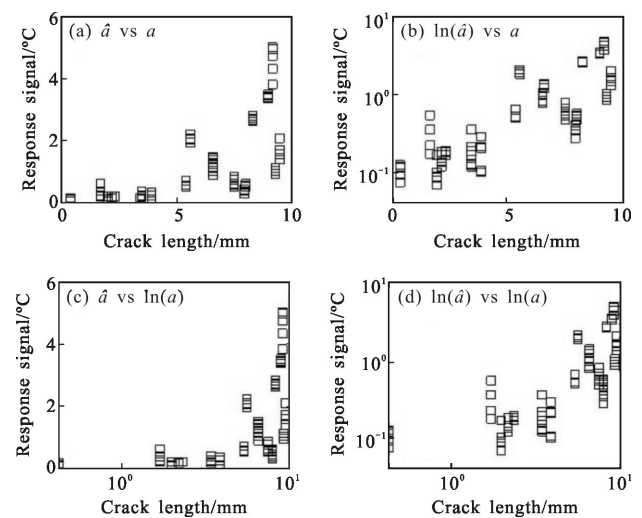


图 5 响应信号随裂纹尺寸的变化

Fig.5 Response signal vs crack size

可以看出,与其他几种形式相比,图 5(b)所示的响应信号的对数 $\ln(\hat{a})$ 和裂纹尺寸 a 整体上呈线性关系。对上述线性关系进行回归诊断分析表明:响应 $\ln(\hat{a})$ 与拟合直线的偏差满足同方差的正态分布,并且数据集中不存在强影响点。

4 计算模型

检出概率函数 $POD(a)$ 可以从响应信号 \hat{a} 和裂纹尺寸 a 之间的联系获得^[4]。如果函数 $g_a(\hat{a})$ 表示在特定尺寸 a 下响应 \hat{a} 的概率密度,那么:

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{dec}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a} \quad (1)$$

式中: \hat{a}_{dec} 为判定阈值,仅仅当响应信号 \hat{a} 超过判定阈值 \hat{a}_{dec} 时才能被判定为裂纹,这里设置为 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。一般来讲,响应信号 \hat{a} 和裂纹尺寸 a 之间的相关函数确定了函数 $g_a(\hat{a})$ 的均值,也就是:

$$\hat{a} = \mu(a) + \delta \quad (2)$$

式中: $\mu(a)$ 为函数 $g_a(\hat{a})$ 的均值; δ 为考虑响应 \hat{a} 和均值 $\mu(a)$ 差异的随机误差项。进一步,由于 $\ln(\hat{a})$ 和 a 之间存在带有正态分布误差的线性关系。这个模型可以如下表示:

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 a + \delta \quad (3)$$

随机误差 δ 的分布特性决定了关于 $\mu(a)$ 的概率密度函数 $g_a(\hat{a})$ 。由图 4 不难发现:可以认为误差 δ 服从均值为 0 和标准差为 τ 的正态分布。

进一步,公式(1)改写为:

$$POD(a) = \Phi \left\{ \frac{a - [\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0] / \beta_1}{\tau / \beta_1} \right\} \quad (4)$$

公式(4)是一个累积对数正态分布函数,其均值及标准差分别为:

$$\mu = \frac{\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0}{\beta_1} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\tau}{\beta_1} \quad (6)$$

5 参数估计

为简化标记,定义一个随机变量 Z :

$$Z = \frac{\ln(\hat{a}) - (\beta_0 + \beta_1 a)}{\tau} \quad (7)$$

服从均值为 0、方差为 1 的标准正态分布。其概率密度函数为:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (8)$$

那么,可以将 $1/\tau\phi(z_i)dz$ 视作第 i 次检测得到响应信号 $\ln(\hat{a}_i)$ 的概率,所以构造似然函数如下表示:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\tau} \phi(z_i) \quad (9)$$

式中: n 为检测次数。其对数形式为:

$$\ln[L(\beta_0, \beta_1, \tau)] = -n \ln(\tau) - \frac{1}{2\tau^2} \sum_n [\ln(\hat{a}_i) - (\beta_0 + \beta_1 a_i)]^2 \quad (10)$$

检出概率函数 $POD(a)$ 中各个参数的极大似然估计可以按下式求解:

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_0} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n Z_i \\ 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_1} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n a_i Z_i \\ 0 = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \sigma_\delta} = \frac{1}{\tau} \left(-n + \sum_{i=1}^n Z_i^2 \right) \end{cases} \quad (11)$$

标准的数值算法,如牛顿迭代程序,可以用来计算公式(11)。

图 6 展示了预紧力 20 kg 且激励时间 1 s 时,不同激励强度(15%, 20% 和 25%)下,检出概率随裂纹尺寸的变化曲线,表 2 给出了检出概率函数的主要

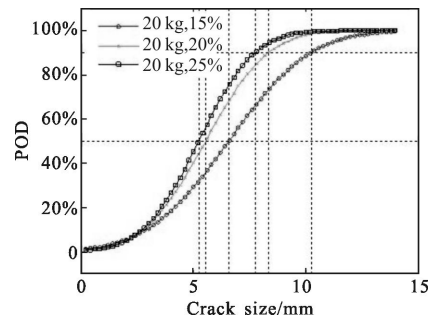


图 6 POD 随裂纹尺寸的变化曲线

Fig.6 POD as a function of crack size for different conditions

表 2 POD 参数

Tab.2 Parameters for POD models

Parameters	Excitation intensity		
	15%	20%	25%
$\hat{\mu}$	6.575	5.543	5.158
$\hat{\sigma}$	2.858	2.185	1.961
a_{50}	6.575	5.543	5.158
a_{90}	10.241	8.343	7.671

参数, 其中 a_{50} 和 a_{90} 分别表示检出概率为 50% 和 90% 时对应的裂纹尺寸。可以看到: 裂纹检出概率随着裂纹尺寸的增加而增大, 提高激励强度有助于提高裂纹检出概率。

6 置信区间

Wald 置信区间是由 Wald 检验统计的正态分布性质得到的总体参数的估计区间。估计参数 $\hat{\theta}=(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})$ 的方差-协方差矩阵由下式定义:

$$V(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})=I^{-1} \quad (12)$$

式中: I 为估计参数 $\hat{\theta}=(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})$ 的 Fisher 信息矩阵, 其元素 I_{ij} 组成通过下式求出:

$$\begin{aligned} I_{11} &= \frac{1}{m\tau^2}n \\ I_{22} &= \frac{1}{m\tau^2} \sum_{i=1}^n a_i^2 \\ I_{33} &= \frac{1}{m\tau^2} \left(-n+3 \sum_{i=1}^n z_i^2 \right) \\ I_{12} &= I_{21} = \frac{1}{m\tau^2} \sum_{i=1}^n a_i \\ I_{13} &= I_{31} = \frac{2}{m\tau^2} \sum_{i=1}^n z_i \\ I_{23} &= I_{32} = \frac{2}{m\tau^2} \sum_{i=1}^n a_i z_i \end{aligned} \quad (13)$$

式中: m 为重复测试次数; n 为测试目标个数。

采用 μ 和 σ 真实值的泰勒级数展开式来线性化公式(5)和(6)的关系, $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的方差-协方差矩阵由协方差矩阵 $V(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})$ 通过 Delta 方法获得, 即:

$$V(\hat{\mu}, \hat{\sigma}) = \frac{1}{2} TV(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\tau})T' \quad (14)$$

式中: T 为转化矩阵, 如下表示:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\mu} & 0 \\ 0 & \hat{\sigma} & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

检出概率函数 $POD(a)$ 的置信度为 α 的置信边界可由下式求出:

$$POD_a(a \pm h) = \Phi(p) \quad (16)$$

式中: $\Phi(z)$ 为标准累积正态分布, 且

$$p = \frac{a - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (17)$$

$$h = \Phi_{1-\alpha}(\text{var}(\hat{\mu}) + p^2 \text{var}(\hat{\sigma}) + 2p \text{cov}(\hat{\mu}, \hat{\sigma}))^{1/2} \quad (18)$$

式中: $\Phi_{1-\alpha}$ 为标准正态分布的 α 分位数。

图 7 给出了预紧力 20 kg、激励强度 25%、激励时间 1s 对应裂纹检出概率及其置信边界, 实线表示裂纹检出概率曲线, 虚线为检出概率曲线的 95% 置信边界, 其中 $a_{90/95}$ 表示检出概率为 90% 的裂纹尺寸对应的 95% 置信下限。

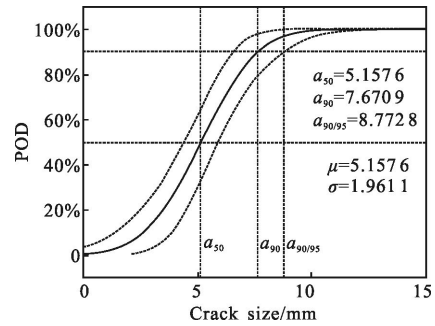


图 7 检出概率曲线及其置信区间

Fig.7 POD curve and its confidence interval

7 结论

文中提出了一种评价超声红外热像检测技术中缺陷可检测性的方法流程, 给出计算裂纹检出概率及其置信区间的方法。实验结果分析表明: 当检测条件确定时, 裂纹响应热信号的对数与裂纹尺寸大体上呈线性关系。采用极大似然估计和 Wald 法分别给出了检出概率曲线的参数及其置信区间, 为评价超声红外热像技术中检测可靠性提供量化依据。尽管如此, 仍有以下几方面需要完善:

- (1) 文中仅采用温差的极大值作为响应信号, 若要获取热像序列中更加完整的信息, 仍需要提取其它有用的响应变量;
- (2) 文中将判定阈值确定为 0.5°C , 没有充分的理论依据。实际上, 判定阈值的确定与材料特性、仪器精度等条件密切相关, 将在其他文章中进一步讨论;
- (3) 忽略噪声的影响, 实际上噪声会引起虚警率 (PFA), 即便不存在裂纹, 即裂纹尺寸为 0, 也可能引起报警。

参考文献:

[1] Favro L, Han X, Ouyang Z, et al. Infrared imaging of

- defects heated by a sonic pulse [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(6): 2418–2421.
- [2] Renshaw J, Chen J, Holland S, et al. The sources of heat generation in vibrothermography[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(7): 736–739.
- [3] Morbidini M, Cawley P, Barden T, et al. Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(10): 104905–1–104905–13.
- [4] Berens A R. NDE Reliability Data Analysis[M]//ASM Metals Handbook. 9th ed. New York: ASM International, 1989, 17: 689–701.
- [5] Stephen Holland, Christopher Uhl, Jeremy Renshaw. Toward a viable strategy for estimating vibrothermographic probability of detection [C]//AIP Conference Proceeding, 2008, 975: 491–497.
- [6] Stephen Holland, Christopher Uhl, Zhong Ouyang, et al. Quantifying the vibrothermographic effect [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(7): 775–782.
- [7] Ming Li, Stephen Holland, William Meeker. Quantitative multi-inspection-site comparison of probability of detection for vibrothermography nondestructive evaluation data [J]. *J Nondestr Eval*, 2011, 30(9): 172–178.
- [8] Duan Yuxia, Pierre Servais, Marc Genest, et al. ThermoPoD: a reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(7): 1985–1991.
- [9] Ben Weekes, Darry Almond, Peter Cawley, et al. Eddy-current induced thermography-probability of detection study of small fatigue cracks in steel, titanium and nickel-based superalloy [J]. *NDT & E International*, 2012, 49: 47–56.
- [10] Liu Junyan, Liu Yang, Wang Fei, et al. Study on probability of detection(POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 448–456.
- [11] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Effect of engagement force on vibration characteristics in sonic IR imaging[J]. *Ultrasonics*, 2015, 56(2): 473–476.
- [12] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Heating characteristics of metal plate crack in sonic IR imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1456–1461.
- [13] ASTM Committee on Fatigue and Fracture. E647 –11 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates [S]. Pennsylvania: ASTM International, 2011.