

基于非线性超声的疲劳裂纹检测中 二次谐波的激发效率

陈 鹏, 师小红, 徐章遂

(石家庄机械工程学院 电气工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 提出在疲劳裂纹的非线性超声检测中, 将二次谐波激发效率作为定量表征疲劳裂纹缺陷的特征参数, 并对其理论公式进行了详尽的推导, 证明了将二次谐波激发效率作为特征参数对疲劳裂纹缺陷进行量化是有效的。

关键词: 二次谐波; 激发效率; 非线性超声; 疲劳裂纹

中图分类号: TG115.28; O221.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)11-0865-03

The Deduction of Second Harmonic Generation Efficiency in Fatigue Crack Testing Using Nonlinear Ultrasonic

CHEN Peng, SHI Xiao-Hong, XU Zhang-Sui

(Department of Electric Engineering, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To find effective parameter for quantifying fatigue crack defects, second harmonic motivating efficiency was used in this paper as the feature parameter of quantitatively identifying fatigue micro-crack defect of metal component, and the deduction of theory formula was obtained. Moreover, its correction was proved.

Keywords: Second harmonic; Generation efficiency; Nonlinear ultrasonic wave; Fatigue crack

在材料的非线性超声检测和评价中, 目前有多种检测方法, 因此也就有多个特征参数可供选择。因为当大幅度超声波在材料中传播时, 有多种超声非线性响应现象与材料的性质相关, 它们的产生方式和特征响应信号各不相同。这些方法有热力学方法、声弹性方法、有限幅度方法、共振技术以及声散射方法, 其对应着非线性参数、声速变化、倍频谐波、和差频波以及分频谐波等特征参数; 利用的超声波型式有纵波、横波、表面波以及界面波。有限幅度方法的高次谐波响应信号主要反映材料微观组织变化导致的力学性能变化以及内部缺陷或损伤的特征。针对研究的检测对象, 即金属件中的疲劳裂纹缺陷, 结合工程实用前景的考虑, 笔者选择有限幅度方法作为设计试验系统的依据, 二次谐波激发效率

A_2/A_1 作为描述疲劳裂纹扩展过程的特征参数, 这是因为二次谐波激发效率反映了裂纹在一定幅度的超声波作用下, 谐波激发的强度, 由二次谐波激发的强弱可以直接反映裂纹扩展的不同阶段。

1 疲劳裂纹的非线性超声响应模型

当超声纵波 $f(x-ct)$ 在施加外部静态压力 p_0 通过裂纹传播时, 可将疲劳裂纹等效为如图 1 所示的两个半无限大的粗糙裂纹界面 A_1 和 A_2 ; $Z_- = \mu(-0, t)$ 和 $Z_+ = \mu(+0, t)$ 是粗糙裂纹面 A_1 和 A_2 的平均等效面; $\mu(0, t) = 1/2[\mu(-0, t) + \mu(+0, t)]$ 表示两裂纹的平均等效接触面, 它随超声波的传播动态运动, 如图 1 中 Z_1 和 Z_2 间的分界线所示; $y(t) = \mu(+0, t) - \mu(-0, t)$ 是裂纹界面动态开口位移 (裂纹间距); P 是粗糙裂纹接触面动态压力; F 是超声波作用力; $g(x+ct)$ 和 $h(x-ct)$ 是弹性纵波产生的反射波和透射波。

假设现有一个由裂纹面 A_1 入射的超声纵波如下:

收稿日期: 2009-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475053)

作者简介: 陈 鹏 (1968—), 男, 副教授, 主要从事电磁超声检测和故障诊断方面的研究工作。

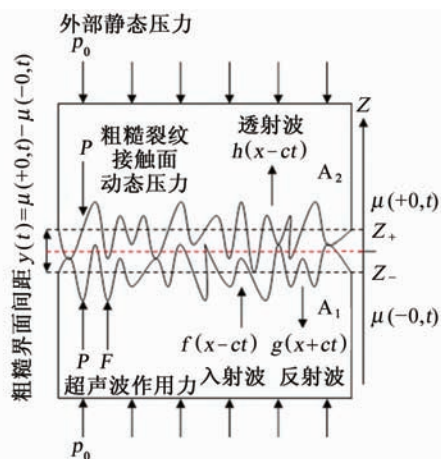


图1 疲劳裂纹非线性超声响应示意图

$$f(x-ct) = -A \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

式中 $k = \omega/c$ 是波数; $\omega = 2\pi f$ 是角频率; $c = \sqrt{E/\rho}$ 是纵波的波速; E 和 ρ 分别是弹性模量和介质密度。那么, 此刻作用在平均等效面 $Z_- = \mu(-0, t)$ 的超声波作用力为:

$$F(t) = -E \left. \frac{\partial f(x-ct)}{\partial x} \right|_{x=0} = -E f'(-ct) = \rho c \omega A \cos \omega t = B \sin \omega t \quad (2)$$

粗糙裂纹面 A_1 和 A_2 的平均等效面 $\mu(-0, t)$ 和 $\mu(+0, t)$ 由于超声波作用力产生了位移, 表现为平均等效接触面 $\mu(0, t)$ 产生了位移, 从而引起了等效接触面动态压力的产生, 即:

$$P(y) = -E \left. \frac{\partial \mu(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -E \frac{\partial \mu(0, t)}{\partial x} \quad (3)$$

因此, 裂纹间距 $y(t)$ 与等效接触面动态压力 $P(y)$ 以及超声波作用 $F(t)$ 的关系可用下式表达^[1-2]:

$$\rho c \dot{y}(t) - 2P(y) = -2F(t) \quad (4)$$

裂纹平均等效面 $\mu(-0, t)$ 和 $\mu(+0, t)$ 上的反射波和透射波 $g(x+ct)$ 和 $h(x-ct)$ 表达式如下^[2]:

$$g(x+ct) = -\frac{1}{2} y \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad (5)$$

$$h(x-ct) = f(x-ct) + \frac{1}{2} y \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (6)$$

裂纹在外部静态压力 p_0 作用下有三种不同的初始状态: 完全闭合、完全张开和部分闭合。不同的初始状态, $y(t)$ 的变化值是不同的且与一个无量纲参数 $\eta = p_0/B$ 有关, $B = \rho c \omega A$ 是超声波作用力 $F(t)$ 的幅度。

(1) 当 $\eta > 1$ 时, 即裂纹外部静态压力 p_0 大于超声波作用力幅度 B , 对于 $t \geq 0$ 或在第一次裂纹闭合后, 裂纹会一直保持完全闭合状态, 因此, $y(t) =$

0, 那么 $\dot{y}(t) = 0$ 。由式(4)可知, $P(y) = F(t)$, 最终超声波完全透射, 无反射波。

(2) 当 $\eta < 0$ 时, 即裂纹外部静态压力 p_0 小于超声波作用力幅度 B , 对于 $t \geq 0$ 或在第一次裂纹张开后, 裂纹会一直保持完全张开状态, 因此, $P(y) = 0$ 。由式(4)可知, $\rho c \dot{y}(t) = -2F(t)$, 最终超声波完全反射, 无透射波。

(3) 当 $0 < \eta < 1$ 时, $y(t)$ 的变化随着超声波传播时间的不同而变化, 并且与超声波作用力 $F(t)$ 、裂纹间的应力应变关系及裂纹的初始状态有关, 其解只能通过式(4)的微分方程求得, 从而获悉疲劳裂纹的反射和透射波。

2 二次谐波激发效率的推导

为了便于讨论, 笔者只给出光滑界面时二次谐波激发效率与 $\eta = \frac{\delta_0}{B}$ 的具体表达式。以反射的超声波为例, 得到计算谐波幅度的公式:

$$A_n = \left| \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g(t) e^{-in\omega t} dt \right| \quad (7)$$

对于二次谐波幅度, 由式(7)有:

$$A_2 = \left| \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g(t) e^{-i2\omega t} dt \right| = \left| \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} y(t) e^{-i2\omega t} dt \right| \quad (8)$$

首先, 当裂纹的等效接触面为光滑界面时, 裂纹只存在完全张开和完全闭合两种状态。完全闭合时, $y(t) = 0$, 则 $P(y) = F(t)$, 超声波全部透射; 完全张开时, $P(y) = -p_0$, 也就是说与外部初始静态压力大小相等, 方向相反。由式(4)可得:

$$\rho c \dot{y}(t) + 2p_0 = -2F(t) \quad (9)$$

同时将 $F(t) = B \sin \omega t$ 代入式(9)得:

$$y(t) = -\frac{2B}{\rho c} \left[\frac{p_0}{B} t - \frac{\cos \omega t}{\omega} \right] + C = -2A \left[\frac{p_0}{B} \omega t - \cos \omega t \right] + C \quad (10)$$

而 $C = y(t_0) + 2A \left[\frac{p_0}{B} \omega t_0 - \cos \omega t_0 \right]$, 由完全闭合变为完全张开时的初始, $y(t_0) = 0$, 那么:

$$y(t) = -2A \left[\frac{p_0}{B} \omega t - \cos \omega t \right] + 2A \left[\frac{p_0}{B} \omega t_0 - \cos \omega t_0 \right] \quad (11)$$

在此令 $u = \omega t$, $u_1 = \omega t_0$, 同时将 $\eta = p_0/B$ 代入, 则式(11)变为:

$$y(u) = 2A [\cos u - \cos u_1 - \eta(u - u_1)] \quad (12)$$

由初始状态可知: $p_0 + B \sin u = 0$, 则 $\sin u + \eta = 0$, 而 u_1 是 $\sin u + \eta = 0$ 的最小的正根, 于是有: $u_1 = \pi + \arcsin \eta$, 将此式代入式(12)中则有:

$$y(u) = 2A[\cos u - (1 - \eta^2)^{\frac{1}{2}} - \eta(u - u_1)] \quad (13)$$

由式(8)便可得到 $y(t)$ 的二次谐波幅度的表达如下:

$$Y_2(t) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} Y(t) e^{-2i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{u_1}^{u_2} Y(u) e^{-2iu} du \quad (14)$$

其中 $u_2 = \omega t_1$ 是仅比 u_1 大的 $[\cos u - (1 - \eta^2)^{\frac{1}{2}} - \eta(u - u_1)]$ 最小正根, t_1 是当裂纹由开口再次变为闭合时的时刻, 即裂纹界面位移再次变为 0 的时刻, 也就是说 $y(t_1) = 0$, 则二次谐波激发效率为:

$$\frac{A_2}{A_1} = \left| \frac{1}{\pi} \int_{u_1}^{u_2} [\cos u - (1 - \eta^2)^{\frac{1}{2}} - \eta(u - u_1)] \cdot \exp(-2iu) du \right| \quad (15)$$

当输入的超声波为正弦波时, 可得到裂纹的界面间距与正弦波间的关系, 如图 2 所示。

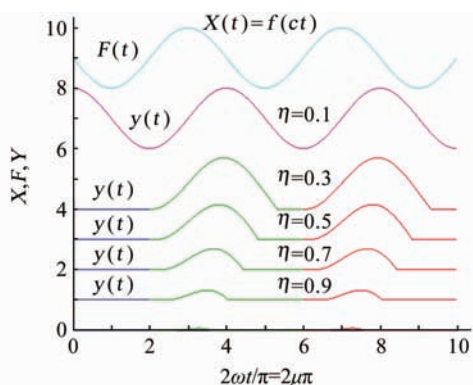


图 2 入射正弦超声波时裂纹的界面间距、超声波作用力的表现

为了便于求出二次谐波激发效率, 在此还给出了裂纹张开与闭合时间曲线, 确定了无量纲参数 η 与 $2\omega t = 2u$ 的关系, 如图 3 所示。

最终由式(15)及图 2 和 3 中确定的 u_1 和 u_2 的

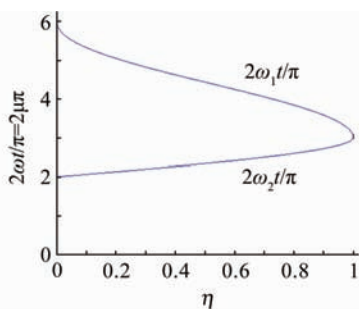


图 3 裂纹的张开闭合曲线

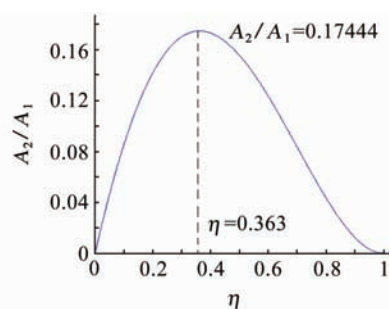


图 4 二次谐波激发效率与 η 的关系

数值范围进行数值求解, 得到了如图 4 所示的二次谐波激发效率 A_2/A_1 与无量纲参数 $\eta = p_0/B$ 的关系曲线, 由图中可以看出, 当 $\eta = 0.363$ 时二次谐波激发效率最大, 最大值点的位置是固定的且与 η 有关。这个结论是假设裂纹界面为光滑界面时导出的, 然而, 实际中裂纹接触界面都是粗糙的, 不过当裂纹界面粗糙峰高度与超声波幅度相比很小时, 可当作光滑界面来考虑。实际裂纹粗糙界面的情况由于其非线性应力-应变公式比较复杂, 二次谐波激发效率 A_2/A_1 与无量纲参数 $\eta = p_0/B$ 的关系需要较复杂的公式联立求出, 这里就不再赘述。

3 结语

通过二次谐波激发效率的公式推导, 证明了利用二次谐波激发效率作为非线性超声检测的特征参数是有充分的理论依据的, 因此, 通过测量二次谐波激发效率, 可以检测金属材料的微缺陷(疲劳裂纹等), 进而评价材料的早期性能退化, 为超声无损检测与评价技术的发展提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Jin-Yeon Kim, Arturo Baltazar, Jong Wan Hu. Hysteretic linear and nonlinear acoustic responses from pressed interfaces[J]. International Journal of Solids and Structure, 2006; 1-17.
- [2] Richardson J M. Harmonic generation at an unbonded interface I. planar interface between semi-infinite elastic media[J]. Int J Eng Sci, 1979(17); 73-85.
- [3] Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing[J]. NDT&E Int, 2001(34); 231-238.
- [4] Gusev V, Castagnede B, Moussatov A. Hysteresis in response of nonlinear bistable interface to continuously varying acoustic loading[J]. Ultrasonic, 2003(41); 643-654.