

用超声波确定应力强度因子时对波型的选择

张忠平, 车俊, 刘志毅, 杨尊袍, 张建邦
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:利用与超声纵波相应的材料声折射率和应力强度因子的关系,并考虑到横波、纵波在材料中的传播速度及其与入射角、反射角的关系,研究了用超声波确定应力强度因子时对波型的选择。发现:一列超声纵波入射于含裂纹的受力试件表面时,由于反射与折射,将有两列超声纵波透过试件后表面,四列超声纵波穿出试件前表面。要用超声波确定应力强度因子,只能采用透出试件前(或后)表面的第一个纵波信号。

关键词:应力强度因子;超声纵波;声速;波型转换;声折射率

中图分类号:TB559 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)02-0064-03

几十年来,在定量超声无损评价领域,人们既可采用纵波也可采用横波确定试件的应力。然而,所研究的试件仅限于厚度均匀的试件,应用的原理也只是波的反射原理。对于一个含裂纹的受力试件,由于裂纹尖端附近区域的应力集中作用,不仅试件的厚度不再均匀,而且试件的声折射率也不再均匀,因此,入射到试件表面上的波,不仅要发生反射现象,而且要发生折射现象,同时还要有波型的变化。此时,要确定试件裂尖附近的应力分布,尤其是确定应力强度因子,对于波型有无特殊要求呢?回答这个问题便是本文的目的。

1 应力强度因子与波型的关系

如图1所示,考虑一含中心裂纹的无限大板,其裂纹长度为 $2a$,在图示坐标系中,裂尖附近区域的应力分布近似为^[1]

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \sigma_y &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_I \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中 (r, θ) 为所考察点的极坐标, K_I 为应力强度因子。

根据 Hooke 定律^[2],平面应力条件下,试件厚度减小量 Δd 为

$$\Delta d = \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) d \quad (2)$$

式中 ν 为 poisson 比, E 为 young's 模量, d 为试件的厚度。

结合式(1)、(2)可知,平面应力条件下,试件厚度减小量与应力强度因子的关系为

$$\Delta d = \frac{2\nu d K_I}{\sqrt{2\pi r} E} \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

方程(3)表明,含裂纹的试件受力后,其厚度变化(如图2所示)不再均

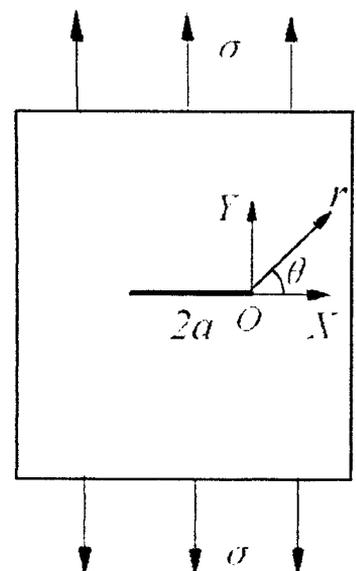


图1 含中心裂纹的无限大板

匀。

另外,在文献[3]中,对于沿 z 方向(或主应力 σ_3 方向)传播的平面超声波,本文第一作者曾得到了下列式子

$$\begin{aligned} \frac{n_{10} - n_1}{n_{10}} &= a\sigma_1 + b\sigma_2 + e\sigma_3 \\ \frac{n_{20} - n_2}{n_{20}} &= b\sigma_1 + a\sigma_2 + e\sigma_3 \\ \frac{n_{30} - n_3}{n_{30}} &= c(\sigma_1 + \sigma_2) + g\sigma_3 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中,下角标 1、2、3 分别表示沿主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向的振动, n_{10} 、 n_{20} 及 n_1 、 n_2 表示试件受力前后与横波相应的声折射率, n_{30} 、 n_3 表示试件受力前后与纵波相应的声折射率, a 、 b 、 e 、 c 、 g 是声—应力系数。

考虑到 $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y$ ^[2] 及关系式(1)后,式(4)中的第三式在平面应力($\sigma_3 = 0$)条件下成为

$$\frac{n_{30} - n_3}{n_{30}} = \frac{2cK_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

式(4)表明,平面应力($\sigma_3 = 0$)条件下,若要确定主应力分量 σ_1 、 σ_2 ,只需借助于横波,分别测量沿 σ_1 、 σ_2 方向振动的横波的声折射率的变化。而要确定应力强度因子,则由式(5)可知,只能借助于纵波,测量与纵波相应的声折射率的变化。然而,关系式(3)表明,含裂纹的试件受力后,其厚度将发生不均匀变化,因此,纵波沿 z 方向进入试件后必发生折射与反射现象,伴随着折射与反射现象又会发生波型的变化,即经折射或反射后,在试件内部既有横波传播又有纵波传播,经试件表面进入液体耦合介质(如水、油)后,所有的横波信号与纵波信号却又全部转换成纵波信号(如图 2 所示)。

既然如式(5)所示,只有试件内部的纵波信号与应力强度因子有明确的关系,因此,为了确定应力强度因子,首先需要区别试件内部的横波与纵波信号。

2 横波信号与纵波信号的区别

如图 2 所示,一束超声纵波沿 z 方向自液体耦合介质入射于厚度为 d 且含有裂纹的受力试件表面,根据关系式^[4]

$$\frac{V_{1L}}{\sin \alpha} = \frac{V_{2L}}{\sin \beta_L} = \frac{V_{2T}}{\sin \beta_T}$$

可知,经试件表面折射后,原来的入射波将一分为二:纵波 L 及横波 T 。此处 α 、 β 为入射角与折射角, L 、 T 表示纵波与横波, 1、2 表示耦合介质及试件。实际测量过程中,入射角 α 是由试件受力后表面的变化引起的,显然, α 角很小,相应的 β_T 、 β_L 也很小,而纵波的传播速度又几乎是横波在同一介质中传播速度的二倍^[4],因此不难理解,纵波 L 将先于横波 T 到达试件的后表面。

到达试件后表面后,纵波 L 又将发生折射与反射现象,折射线中仅有纵波分量 L^l ,而反射线中既有纵波 L_L 又有横波 L_T ,同样考虑到纵波的传播速度几乎是横波传播速度的二倍,因此,纵波 L_L 将先于横波 L_T 到达试件的前表面,并由试件的前表面透出。

至于横波 T ,也会发生类似的现象,经后表面折射后仅有纵波分量 T^l ,而经后表面反射后,在反射线中既有纵波 T_L 又有横波 T_T ,虽然二者相比,纵波 T_L 将先于横波 T_T 到达试件的前表面,但与纵波 L_L 相比,纵波 T_L 仍将落后于 L_L 。

总之,一束超声纵波沿 z 方向入射于试件表面后,在反射与折射过程中,虽然波型发生了变化,但纯粹的纵波信号总是较其它波型的信号先期透出试件。

3 结论

当一束平面超声纵波沿 z 方向入射于含裂纹的受力试件表面,虽然试件的厚度发生不均匀变化,并由此导致波在折射与反射过程中发生波型的变化,但由于只有试件内部的纵波信号与应力强度因子联系在一起,

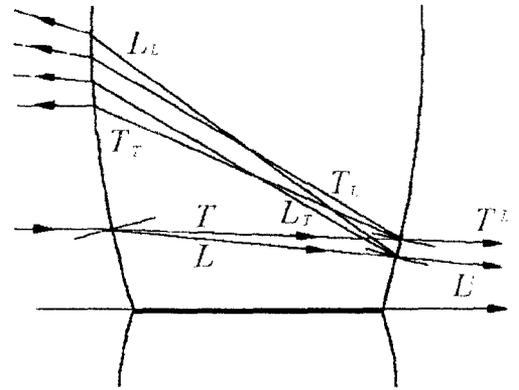


图2 波在试件表面反射及折射时波型的变化

且纯粹的纵波信号将首先透过试件的表面,因此,只可借助于透过试件后(或前)表面的第一个纵波信号来确定应力强度因子。

参考文献:

- [1] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
- [2] 钱伟长,叶开元. 弹性力学[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [3] 张忠平. 声折射率及其随应力的变化[J]. 空军工程学院学报,1999,19(4):62-67.
- [4] 胡建恺,张谦林. 超声检测原理和方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993.

Requirement for Wave – mode to Determine Stress Intensity Factor by Ultrasonic Wave

ZHANG Zhong-ping, CHE Jun, LIU Zhi-yi, YANG Zun-pao, ZHANG Jian-bang

(The Engineering Institute of the Air Force Engineering University(AFEU.), Xi'an 710038, China)

Abstract·The requirement for wave – mode to determine stress intensity factor (SIF) by ultrasonic wave is studied. The relationship between SIF and acoustic refractive index corresponding to longitudinal wave is used. The propagating velocities of both transverse and longitudinal waves in specimen and the refractive law are taken into account. It is found that, if a beam of ultrasonic longitudinal wave incidents upon the front surface of a loaded specimen with crack, two beams of ultrasonic longitudinal waves will pass through the rear surface of the specimen and four beams of them will pass through the front surface of the specimen since the reflection and the refraction. So, if ultrasonic wave is used to determine SIF, only the first one passing through the front (or rear) surface of the specimen can be used.

Key words·stress intensity factor; ultrasonic longitudinal wave; acoustic velocity; wave – mode conversion; acoustic refractive index