

一个新的声应力系数及其确定¹⁾

孙 强* 张忠平*† 李春旺* 乔艳江* 赵文轸†

*(空军工程大学, 西安 710051)

†(西安交通大学, 材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 为建立声焦散线与平面应力条件下裂尖应力强度因子的关系, 定义了一个新的声应力系数——声程差随应力线性变化的比例系数, 该系数的大小既取决于材料常数又取决于耦合介质及声束的传播历程. 借助 6061-T6 铝、EPTI 钢两种材料的实验结果, 说明了确定新的声应力系数的方法与步骤. 所得结论是: 只要确定了平面应力条件下超声纵波速度相对变化与主应力和之比, 便可确定新的声应力系数.

关键词 声应力系数, 超声焦散线, 超声纵波, 应力强度因子

最近 30 多年来, 随着超声波发射与接收技术的改进, 应力引起的声双折射现象愈来愈受到人们的重视, 该现象在实验应力分析中的地位和作用也愈来愈显著. 迄今为止, 人们已经能够利用声双折射现象确定受力试件的应力分布或试件内部的残余应力. 为了能够进一步利用声双折射现象确定含裂纹受力试件的应力强度因子, 在文献 [1] 中提出了超声焦散线的概念及形成原理, 指出了基于声双折射原理的超声焦散线, 能够克服光学焦散线只能用于透明材料的缺陷, 超声焦散线可用于透明及非透明材料, 确定受力试件中裂纹尖端的应力强度因子.

根据文献 [1, 2], 要用超声焦散线确定受力试件中裂纹尖端的应力强度因子, 必须首先确定试件受力前后声程差随应力线性变化的比例系数. 因此, 本文定义声程差随应力线性变化的比例系数为一个新的声应力系数. 作为实例, 借助了 G.S. Kino 等的实验结果 [3], 在平面应力条件下确定了新的声应力系数.

1 新声应力系数的定义

根据文献 [3], 平面应力条件下, 超声纵波速度相对变化与主应力之和有如下关系

$$\frac{\Delta V}{V} = c(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

式中, σ_1, σ_2 是平面内的两主应力, V 是垂直于两主应力方向传播的超声纵波速度, ΔV 是试件受力前后波速 V 的变化, c 反映了速度相对变化与主应力和之比, 称为声应力系数, 对于确定的材料, c 值

一定.

根据超声焦散线的形成原理 [1,2], 之所以会有超声焦散线, 是由于含裂纹的试件受力后, 围绕裂纹尖端的应力梯度导致了试件厚度及声折射率 [4] 梯度的产生. 因此, 对于垂直入射到试件表面的一束超声波而言, 试件相当于一个凹 (或凸) 透镜的作用. 从声程的角度讲, 试件受力前后, 声程不仅发生了变化, 而且距裂纹尖端不同距离的点, 声程的变化不同, 也就是说, 应力梯度导致了试件厚度及声折射率的梯度, 而试件厚度及声折射率梯度又进一步导致了声程梯度. 结果, 如果在试件前或后放一“屏幕”, 则在该“屏幕”上显示一条曲线——超声焦散线, 该超声焦散线是超声能量分布为零与不为零区域的分界线, 在超声焦散线内, 无超声波到达, 因而超声能量为零, 而在超声焦散线上, 超声波到达最多, 超声能量最大, 超声焦散线的形状及大小完全取决于声程梯度的大小. 本文作者在文献 [1,2] 中曾导出了试件受力前后与声程梯度紧密相关的声程改变量 ΔS 与平面内两主应力和之间的关系为

$$\Delta S = fd(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

而超声焦散线的最大直径 D 为

$$D \propto (fK_I)^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

式 (2), 式 (3) 中, d 是试件的初始厚度, K_I 是裂纹尖端应力强度因子, f 与式 (1) 中的 c 类似, 反映了声程差与应力及试件厚度的比例系数, 是决定超声焦散线大小的关键因素之一, 同时也是确定应

2004-05-19 收到第 1 稿, 2005-04-21 收到修改稿.

1) 空军工程大学学术基金项目 (2002×18) 资助.

力强度因子的关键因素之一^[1,2]，所以，本文进一步定义它为新的声应力系数，它与式(1)中的声应力系数 c 的关系如下^[2]

$$f = \frac{\nu}{E} \quad (4)$$

(超声纵波在试件前表面反射)

$$f = (1 - 2n_0) \frac{\nu}{E} - 2n_0c \quad (5)$$

(超声纵波在试件后表面反射)

$$f = (1 - n_0) \frac{\nu}{E} - n_0c \quad (6)$$

(超声纵波透过试件)

式(4)~式(6)中， n_0 为试件不受力时试件材料相对耦合介质的声折射率^[4]。

由式(4)~式(6)可知，新的声应力系数 f 的大小，一方面取决于材料常数——弹性模量、泊松比、声应力系数 c ，另一方面，取决于耦合介质及声束的传播历程(如前表面反射，后表面反射，透射)，要确定声应力系数 f ，关键是确定声应力系数 c 。

2 6061-T6 铝及 EPTI 钢的新声应力系数 f

2.1 6061-T6 铝及 EPTI 钢的声应力系数 c

式(1)表明，对于一种材料，知道了超声纵波速度相对变化及平面内两主应力之和，便知道了相应的声应力系数 c ，本文利用双脉冲回波重叠法确定声应力系数 c 。

首先，假设有一试件受平面应力作用，受力前试件的厚度为 d ，纵波在试件中来回垂直传播一次的周期为 T ，前后表面反射波重叠时震荡器的频率为 ν ，而受力后，试件厚度变化了 Δd ，纵波传播周期变化了 ΔT ，震荡器频率变化了 $\Delta \nu$ ，则下式成立

$$\frac{1}{\nu} = T = \frac{2d}{V} \quad (7)$$

由式(7)可得试件受力前后各量的关系为

$$\frac{-\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta V}{V} \quad (8)$$

考虑到式(1)及平面应力条件下的 Hook 定律^[5]

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

式(8)变为

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = -\frac{\Delta T}{T} = \left(\frac{\nu}{E} + c\right)(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (9)$$

在单向应力 σ_1 作用下，式(9)成为

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = -\frac{\Delta T}{T} = B\sigma_1 \quad (10)$$

式中

$$B = \frac{\nu}{E} + c \quad (11)$$

以上各式中， E 是 Young's 模量， ν 是 Poisson's 比。 B 反映了试件受力前后震荡器频率相对变化与主应力之比，它也称为声应力系数。为确定该声应力系数，G.S. Kino 等^[3]曾分别得到了超声纵波沿 6061-T6 铝和 EPTI 钢试件的前后表面反射波重叠时震荡器的 $\frac{\Delta \nu}{\nu}-\sigma_1$ 曲线，不仅发现 B 是一材料常数，而且其值分别为 $18 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 及 $2.0 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。

有了声应力系数 B 值之后，将 B 值及材料的 Young's 模量 E 、Poisson's 比 ν 值代入式(11)便可获得声应力系数 c

$$c = B - \frac{\nu}{E} \quad (12)$$

2.2 6061-T6 铝及 EPTI 钢的新声应力系数 f

为了确定新声应力系数 f ，不妨以水或柴油为耦合介质，这样各试件不受力时的声折射率 n_0 ^[4]如表 1 所示。

表 1 6061-T6 铝和 EPTI 钢试件不受力时的声折射率^[5]

| 耦合介质 | 水 | | 柴油 | |
|------|-----------|--------|-----------|--------|
| 材料 | 6061-T6 铝 | EPTI 钢 | 6061-T6 铝 | EPTI 钢 |
| 声折射率 | 0.23 | 0.25 | 0.20 | 0.21 |

将由式(12)确定的 c 值及表 1 中的声折射率 n_0 先后代入式(4)~式(6)，可得不同情况下新声应力系数的数值如表 2 所示。表 2 中各量的单位依次为： $B, c, f: 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ ； $E: 10^{10} \text{ Pa}$ 。

表 2 中的下脚标 f, r, t 依次代表超声纵波在试件前表面反射、试件后表面反射及透过试件；而下脚标 s, y 分别代表耦合介质是水或柴油。

表 2 不同介质中 6061-T6 铝和 EPTI 钢的新声应力系数

| 名称 | EPTI 钢 | 6061-T6 铝 |
|----------|--------|-----------|
| B | 2.0 | 18 |
| ν | 0.28 | 0.35 |
| E | 20.58 | 6.8 |
| c | 0.64 | 12.85 |
| f_{fs} | 1.36 | 5.15 |
| f_{rs} | 0.36 | 3.13 |
| f_{ts} | 0.86 | 1.01 |
| f_{fy} | 1.36 | 5.15 |
| f_{ry} | 0.52 | -2.05 |
| f_{ty} | 0.94 | 1.55 |

3 结束语

定义了一个新的声应力系数——声程差随应力线性变化的比例系数，新声应力系数的大小，一方面取决于材料常数——弹性模量、泊松比、声应力系数 c ，另一方面，取决于耦合介质及声束的传播历程(如前表面反射，后表面反射，透射)。要确定新的声应力系数，首先要确定平面应力条件下超声纵波速度相对变化与主应力和之比。通过新的声应力系数及应力强度因子与超声焦散线大小的关系，有可能像光学焦散线法一样，确定含裂纹平面应力试件的应力强度因子。

参 考 文 献

1 曹克强, 张忠平. 声焦散线及其与应力强度因子的关系. 力学与

实践, 2002, 24(2): 39~41 (Cao Keqiang, Zhang Zhongping. Acousto-caustics and stress intensity factor. *Mechanics in Engineering*, 2002, 24(2): 39~41 (in Chinese))

2 张忠平. 声程差与应力强度因子的关系. 力学与实践, 2001, 23(4): 27~29 (Zhang Zhongping. Relationship between acoustic-path difference and stress intensity factor. *Mechanics in Engineering*, 2001, 23(4): 27~29 (in Chinese))

3 Kino GS, et al. Acoustoelastic imaging of stress fields. *J Appl Phys*, 1979, 50(4): 2607~2613

4 张忠平. 声折射率及其随应力的变化. 空军工程学院学报, 1999, 19(4): 62~67 (Zhang Zhongping. Acoustic index and the change of it with stress. *Journal of Air Force Engineering Institute*, 1999, 19(4): 62~67 (in Chinese))

5 钱伟长, 叶开元. 弹性力学. 北京: 科学出版社, 1980 (Qian Weichang, Ye Kaiyuan. *Mechanics of Elasticity*. Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese))

DEFINITION AND DETERMINATION OF A NEW ACOUSTIC-STRESS COEFFICIENT

SUN Qiang* ZHANG Zhongping*,† LI Chunwang* QIAO Yanjiang* ZHAO Wenzhen†

*(Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

†(The State Key Laboratory For Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract In order to establish the relationship between acousto-caustics and stress intensity factor under plane stress condition, a new acoustic-stress coefficient—the ratio between acoustic-path difference and stress is defined. The new coefficient is related not only to the material properties but also to the coupling medium and the acoustic traveling path. The method and the steps to get the new coefficient are described together with the tested results of 6061-T6 aluminum and EPTI steel. It is concluded that the new acousto-stress coefficient can be obtained as soon as the ratio of relative change of ultrasonic longitudinal wave to the sum of the principal stresses under plane stress condition is known.

Key words acoustic-stress coefficient, acoustic-caustics, ultrasonic longitudinal wave, stress intensity factor

(上接第 61 页)

POWER SPECTRUM ANALYSIS ON THE PHASE CHANGING PROCESSES IN TRAFFIC FLOW

LI Yan ZHU Keqin

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To investigate the phase changing processes in traffic flow, we simulated a single lane traffic flow using a cellular automation. By extracting the section flux data and using discrete Fourier transform method, we made the power spectrum analysis. From the result we found that in the phase of jam, there exists a same period as that of a traffic shockwave resulting from our using the periodic boundary conditions; in the phase of heavy synchronized flow with high road occupancy, there still exists some periodic waves which are very different from the traffic shockwave, and we could not attribute them to the periodic boundary conditions; in the phase of free flow under low road occupancy, no periodic waves exist.

Key words traffic flow, cellular automata, phase changing, power spectrum analysis