

稳态扩展裂纹前缘形态的研究

*金 江, 盛季生

(南通大学建筑工程学院, 江苏 南通 226007)

摘 要: 利用超声波断口图技术对不同类型的带单侧贯穿裂纹的 PMMA 试件进行了测试, 得到试件断口上的超声波线。基于 ANSYS 软件的有限元分析, 计算了试件的三维 J 积分, 得到的试件在不同裂纹长度下的三维 J 积分与它们断口图上的超声波线的形状和凸凹方向相似, 将试件扩展裂纹前缘由直线调整为特定曲线后, 计算出的三维 J 积分趋向常量, 证实了扩展裂纹前缘的任一点, J 积分矢量的幅值都是相同常量的假设。

关键词: 断裂力学; 超声波断口图; 裂纹前缘; 三维 J 积分; 有限元法

中图分类号: O346.1; TB553 **文献标识码:** A

A STUDY OF CONFIGURATION OF PROPAGATING CRACK FRONT

*JIN Jiang, SHENG Ji-sheng

(Civil Engineering Department, Nantong University, Nantong 226007, China)

Abstract: In this paper, ultrasonic fractography method is used to test several types of PMMA specimens with one-side-through crack. The ultrasonic lines in the fracture surface of these specimens are obtained. Three-dimensional J integrals of the specimens are evaluated based on the finite element code of ANSYS. There are similarities between three-dimensional J integrals evaluated under different crack lengths and ultrasonic lines in the specimens' fracture surfaces in shape and protruding direction. Three-dimensional J integrals tend to be constant after line crack fronts are changed to certain predicted curve shapes, which verifies the hypothesis that the magnitudes of J integral vectors are equal on every point of propagating crack fronts.

Key words: fracture mechanics; fractography; crack front; three-dimensional J integral; finite element method

在断裂力学的研究中, 稳态扩展裂纹前缘形态是一个值得进一步深入研究的问题。Bažant^[1]采用球坐标形式的变分原理和相应的有限元方法对裂纹前缘在弹性体表面终点附近的三维奇异应力场进行了分析, 结果发现一般扩展裂纹的前缘并不与表面垂直, 而是与表面成倾斜角度。

稳态扩展裂纹前缘为与表面成倾斜角度的曲线的现象也得到实验的证实。超声波断口图技术是在某些脆性材料断裂过程中利用超声换能器叠加超声波产生包含大量有用断裂信息的断口图的一种实验技术, Kerkhof^[2]首先提出这种技术, 并应用于玻璃试件。Takahashi^[3]、盛季生^[4,5]利用超声换能

器(PZT)在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)试件中产生横向超声波来得到超声波断口图。在断口上残留的超声波线标志着在不同时刻扩展裂纹的曲线前缘, 由此既可以获得裂纹扩展速度, 又可以对不同时刻扩展裂纹的前缘的几何形态进行分析。张诗捷^[6]在不同厚度铝合金试样的疲劳裂纹扩展试验中, 发现厚试件中心处裂纹最先扩展。何宇廷^[7]考察了试件厚度对裂纹扩展能量释放率的影响。

J 积分首先由 Rice 定义, 成功地应用于二维脆性、弹塑性断裂问题。在脆性材料中, J 积分就是能量释放率; 在弹塑性材料中, J 积分也是重要的断裂参数。Miyamoto^[8]应用 Eshelby 能量动量张量

收稿日期: 2004-10-28; 修改日期: 2004-11-10

作者简介: *金 江(1964), 男, 江苏省吴江市人, 副教授, 博士, 副院长, 从事工程力学的研究(E-mail: river_vt@yahoo.com.cn);

盛季生(1941), 男, 北京市人, 教授, 从事断裂力学的研究。

把 J 积分扩展到三维断裂问题中。这样在三维及二维断裂问题中, J 积分有了明确的物理含义, 即 J 积分是沿着裂纹前缘的裂纹扩展力。如同普通力矢量一样, J 积分也有三个分量。Machida^[9]分析了 CCT 钢试件的厚度对在直线裂纹前缘及试验所得的曲线裂纹前缘下的 J 积分的影响。Kikuchi^[10]基于有限元方法, 采用移动节点的办法来模拟弹塑性状态下三维裂纹扩展问题。Crews^[11], 邹振民^[12]分别利用三维有限元方法和可动边界变分方法, 求出各向同性和各向异性双悬臂梁试件分层前缘的能量释放率的分布。刘东学^[13]利用三维有限元方法分析了带表面裂纹拉伸板的 J 积分。

本文利用超声波断口图技术对不同类型的 PMMA 试件进行了测试。这些试件为带单侧贯穿裂纹的 PMMA 板, 承受均匀拉伸或三点弯曲变形。拉伸试件又分为光面和带表面沟槽的两种。结果发现, 光面的拉伸和弯曲试件, 断口上超声波线沿裂纹扩展方向为凸向; 而带表面沟槽的拉伸试件, 断面上的超声波线沿裂纹扩展方向为凹向。利用 ANSYS 有限元软件对这些试件进行了分析, 计算了试件在不同裂纹长度下的三维 J 积分, 得到的试件在不同裂纹长度下的三维 J 积分与它们断口图上的超声波线的形状和凸凹方向相似。为了解释这个现象, 本文假设在扩展裂纹前缘的任一点, J 积分矢量的幅值都是相等的。将试件扩展裂纹前缘由直线调整为特定曲线后, 计算出的三维 J 积分趋向常量。这证实了本文假设, 也说明扩展裂纹前缘的曲线形态并与试件表面倾斜是三维 J 积分作用的结果。

1 试件

超声波断口图试验采用的试件是 PMMA 板, 杨氏模量 $E=3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$ 。图 1 显示的是三种 PMMA 试件, 其中(a)为单侧预制裂纹拉伸试件, (b)为单侧预制裂纹三点弯曲试件, (c)为表面带沟槽的单侧预制裂纹拉伸试件。几何尺寸: 长度 $l=160\text{mm}$, 宽度 $b=60\text{mm}$, 厚度 $t=15\text{mm}$ 。表面沟槽的张角 $\alpha=45^\circ$, 深度 $d=2\text{mm}$ 。单侧预制裂纹拉伸试件的厚度分 15mm 和 5mm 两种。预制裂纹是在机械切槽上用斜劈冲击而成。试验在常温下使用机械式万能试验机进行。超声波换能器采用 PZT(30×10×4.2mm)振子, 用快干胶粘结在试件的端面上。PZT 所加电压为 400V, 超声波频率选为

200kHz。

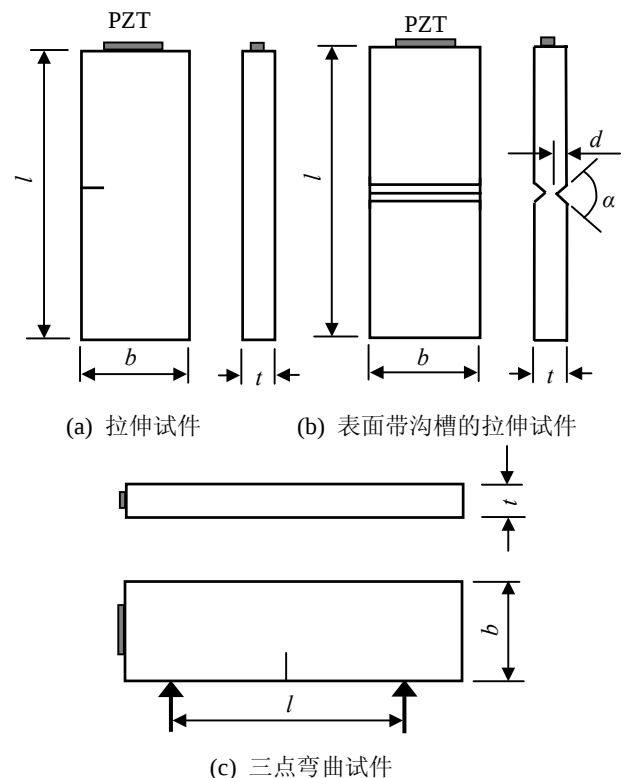


图 1 带单侧预制裂纹的 PMMA 试件

Fig.1 PMMA specimens with one-side-crack

2 试验结果

图 2 和图 3 显示的是在轴向加载下, PMMA 拉伸试件断口上的超声波线; 图 4 显示的是三点弯曲 PMMA 试件断口上的超声波线; 图 5 显示的是在轴向加载下, 带表面沟槽的 PMMA 拉伸试件断口上的超声波线。所有裂纹扩展都是从图的左边向右边进行。这些超声波线标志着在不同时刻扩展裂纹的前缘。其中图 2~图 4 中的超声波线或裂纹前缘沿裂纹扩展方向为凸向, 说明试件截面上中间部分较表面部分先断裂扩展。图 5 中的超声波线或裂纹前缘沿裂纹扩展方向为凹向, 这说明试件截面上表面部分较中间部分裂扩展, 这是由于表面沟槽产生的在沟槽底部具有高度应力集中的缘故。在所有的试件断口上, 发现经过裂纹扩展的初始阶段后, 超声波线形状相似而且相互平行。这个现象说明在试件断口上, 沿厚度方向裂纹扩展速度几乎是相同的。



图 2 拉伸试件(15mm PMMA)的断口图

Fig.2 Fracture surface of tensile specimen (15mm PMMA)



图3 拉伸试件(5mm PMMA)的断口图

Fig.3 Fracture surface of tensile specimen (5mm PMMA)



图4 弯曲试件(15mm PMMA)的断口图

Fig.4 Fracture surface of bend specimen (15mm PMMA)

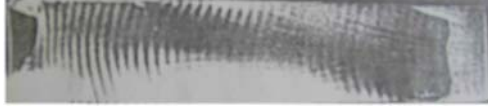


图5 表面带沟槽的带拉伸试件(15mm PMMA)的断口图

Fig.5 Fracture surface of tensile specimen (15mm PMMA)
with two side notches

3 三维 J 积分

Miyamoto^[2]应用 Eshelby 能量动量张量把 J 积分扩展到三维断裂问题中, 提出 J 积分是沿着裂纹前缘的裂纹扩展力。三维 J 积分矢量的三个分量为

$$J_x = \int_{\Gamma} (W \delta_{jx} n_j - \sigma_{ij} n_j u_{i,x}) ds - \int_S (\sigma_{iz} u_{i,x})_{,z} ds \quad (1)$$

$$J_y = \int_{\Gamma} (-W \delta_{jy} n_j - \sigma_{ij} n_j u_{i,y}) ds - \int_S (\sigma_{iz} u_{i,y})_{,z} ds \quad (2)$$

$$J_z = - \int_S (\sigma_{iz} u_{i,z})_{,z} ds \quad (3)$$

$$J = [J_x, J_y, J_z] \quad (4)$$

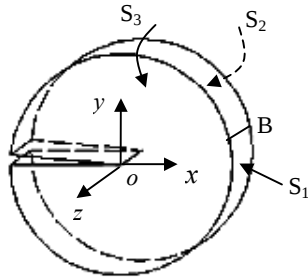


图6 三维裂纹前缘的积分路径

Fig.6 The section of three-dimensional crack front

其中, W 是应变能密度, δ_{ji} 是 Kronecker 符号, σ_{ij} 为应力张量, u_i 是位移场, Γ 表示围绕裂纹的任意平面曲线, n_j 为 Γ 曲线上任一点的单位法向矢量, S 是围绕裂纹的表面。

在二维断裂问题中, σ_{iz} 为零(平面应力状态)或常量(平面应变状态), 它对 z 的导数为零, 所以方程(1)就退化为众所周知的 Rice 定义的形式。

因为三维 J 积分是裂纹扩展力, 对于稳态裂纹扩展的情形, 假设在扩展裂纹前缘的任一点, J 积分矢量的幅值均相等, 都等于特定的临界值, 即

$$|J| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2} = \text{const} \quad (5)$$

如果裂纹面位于试件的对称面, 则 $J_z=0$ 。而且对于带贯穿裂纹的板, 沿板厚的应力梯度很小, 式(5)可以近似变为

$$J_x = \text{const} \quad (6)$$

由于进行的是弹性分析, J_x 就是能量释放率 G_1 。在平面断裂问题中, G_1 与应力强度因子 K_1 的平方成正比。在板的三维断裂问题中, 我们仍然假设, 在裂纹前缘的任一点, G_1 与应力强度因子 K_1 的平方成正比, 即

$$J_x = G_1 = CK_1^2 \quad (7)$$

这里 C 是一个常数, 在单侧裂纹板受到均匀拉伸应力作用的情况下, 应力强度因子可以采用其平面应力状态的形式(Gdoutos^[14]), 即

$$K_1 = \sigma_f(a(z), b) \quad (8)$$

而

$$f(a(z), b) = \sqrt{\pi a(z)} \left[1.12 - 0.23 \frac{a(z)}{b} + 10.55 \left(\frac{a(z)}{b} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a(z)}{b} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a(z)}{b} \right)^4 \right] \quad (9)$$

这里 $a(z)$ 是沿板厚度的裂纹长度, b 是板的宽度。

由式(7)和式(8), 在板的 $z=z_1$ 和 $z=z_2$ 两层, 有

$$\frac{J_x(z_1)}{[f(a(z_1), b)]^2} = \frac{J_x(z_2)}{[f(a(z_2), b)]^2} \quad (10)$$

如果 $z=z_1$ 是板的对称面(中面), $a(z_1)$ 是在板中面上的裂纹长度, 由方程(10)可以计算沿板厚度的其它各层的扩展裂纹长度 $a(z_2)$, 因此扩展裂纹前缘的形态可以确定。

4 算例

图7显示的是承受均匀拉伸应力的带单侧贯穿裂纹的板。由于对称性, 取试件的四分之一进行分析。单元采用 8 节点等参数块单元。图8是板在 x-y 平面内的单元划分及三个积分路径, 板沿厚度方向划分为若干均匀等分分层。

图9~图11分别为带单侧贯穿裂纹的厚度15mm、厚度5mm的PMMA拉伸试件(图1(a), $120 \times 60 \times 15\text{mm}$, $E=3 \times 10^3 \text{N/mm}^2$, $a=20\text{mm}$)及厚度15mm的PMMA三点弯曲试件在不同裂纹长度下的 J 积分曲线(取三条积分路径 J 积分的平均值), 由图可见, 板截面中间部分的 J 积分比表面部分的 J 积分大, 这些 J 积分曲线沿裂纹扩展方向为凸向,

说明裂纹扩展时,中间部分比表面部分先扩展,这与图 2~图 4 相应试件断口上的超声波线的凸向相符。图 12 为厚度 15mm 的带两侧沟槽的 PMMA 拉伸试件在不同裂纹长度下的 J 积分曲线,由图可见,板截面中间部分的 J 积分比表面部分的 J 积分小,这些 J 积分曲线沿裂纹扩展方向为凹向,说明裂纹扩展时,表面部分比中间部分先扩展,这也与图 5 相应试件断口上的超声波线的凹向相符。这些结果说明扩展裂纹的前缘成曲线形状并与试件表面倾斜是由于裂纹前缘的裂纹扩展力—三维 J 积分作用

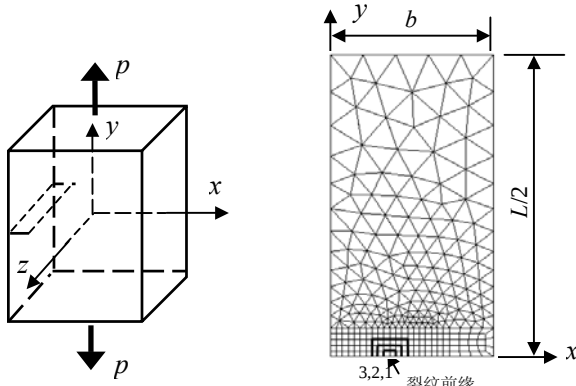


图 7 带单侧贯穿裂纹的均匀拉伸的板

Fig.7 The through crack in a thick plate

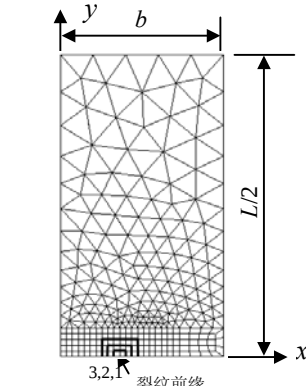


图 8 x-y 平面内的单元划分及积分路径

Fig.8 Mesh division in x-y plane and integral path

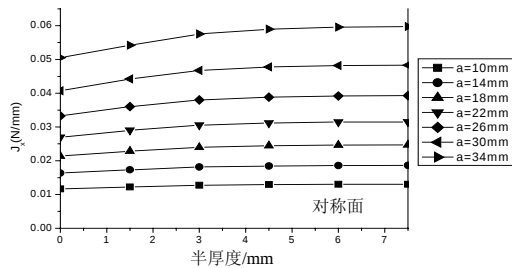


图 9 PMMA 板(15mm 厚)的 J 积分

Fig.9 J_x values of 15mm PMMA plate under different crack length

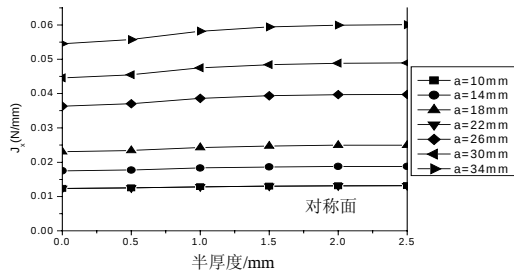


图 10 PMMA 板(5mm 厚)的 J 积分

Fig.10 J_x values of 5mm PMMA plate under different crack length

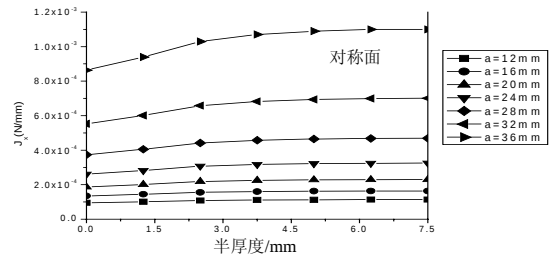


图 11 三点弯曲 PMMA 板(15mm 厚)的 J 积分

Fig.11 J_x values of 15mm PMMA beam under different crack length(three-point-bending beam)

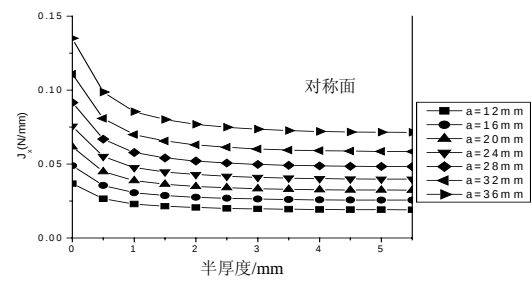


图 12 带沟槽的 PMMA 板的 J 积分

Fig.12 J_x values of PMMA plate with two side notches (deg.=90°, d=2mm) under different crack lengths

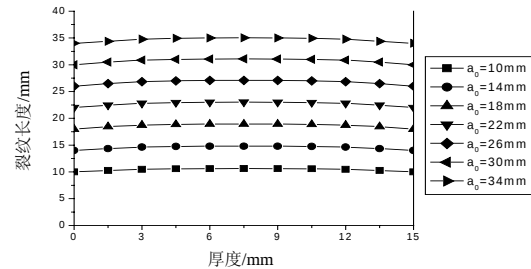


图 13 PMMA 板(15mm 厚)的截面裂纹前缘形态

Fig.13 Configuration of crack fronts on the section of 15mm PMMA plate

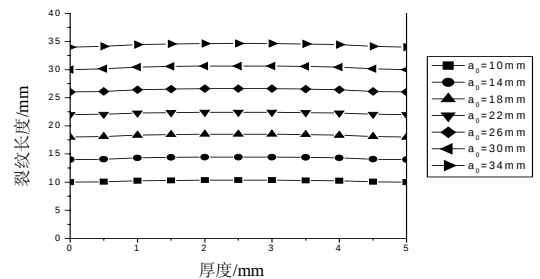


图 14 PMMA 板(5mm 厚)的截面裂纹前缘形态

Fig.14 Configuration of crack fronts on the section of 5mm PMMA plate

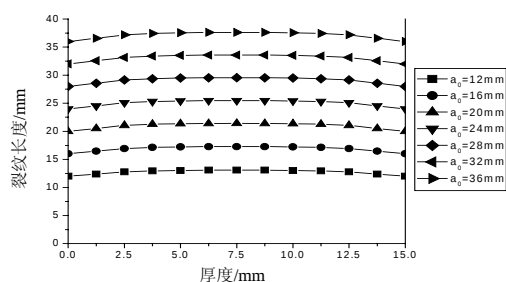


图 15 PMMA 梁(15mm 厚)的截面裂纹前缘形态

Fig.15 Configuration of crack fronts on the section of 15mm PMMA beam

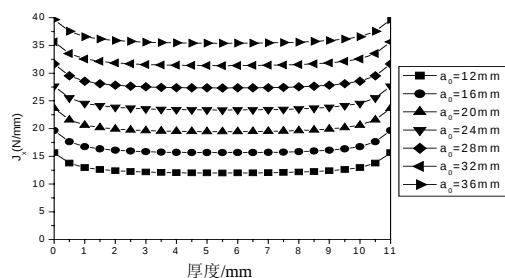
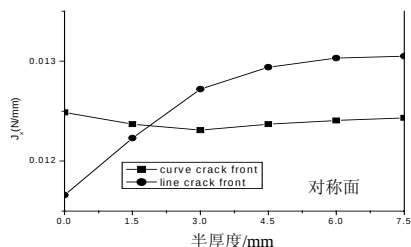
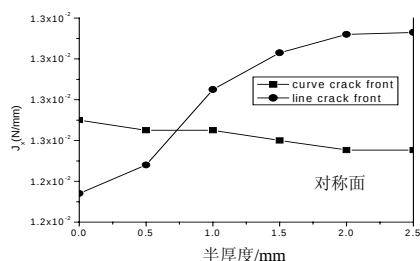
图 16 带沟槽($d=2\text{mm}$, $\alpha=90^\circ$)PMMA 梁(15mm 厚)的截面裂纹前缘形态

Fig.16 Configuration of crack fronts on the section of 15mm PMMA plate with notches

图 17 直线和曲线裂纹前缘的 J 积分 (15mm 厚板, 初始裂纹长度: $a_0=10\text{mm}$)Fig.17 J integrals of line and curve front (15mm thick, initial crack length: $a_0=10\text{mm}$)图 18 直线和曲线裂纹前缘的 J 积分 (5mm 厚板, 初始裂纹长度: $a_0=10\text{mm}$)Fig.18 J integrals of line and curve front (5mm thick, initial crack length: $a_0=10\text{mm}$)

的结果。图 13~图 15 显示的是在图 9~11 中的不同初始裂纹长度下的 J 积分基础上, 根据式(10)计算的扩展裂纹前缘线, 图 16 显示的则是在图 12 中的不同初始裂纹长度下的 J 积分基础上计算的 PMMA 板(15mm 厚, 带表面沟槽)断面扩展裂纹前缘线。图 13~图 16 中计算的扩展裂纹前缘线与图 2~图 5 中的超声波线(裂纹前缘线)在形态及凸凹方向上非常符合。图 17, 18 分别显示的是 15mm 和 5mm 厚度的 PMMA 板拉伸试件(初始裂纹长度 10mm)在直线裂纹前缘和计算的曲线裂纹前缘下的 J 积分, 很明显曲线前缘的 J 积分曲线要比直线前缘的 J 积分曲线平坦, 说明 J 积分在计算的曲线裂纹前缘各点趋向相同, 也证实了裂纹稳态扩展时, J 积分矢量的幅值都是相同常量的假设。

5 结论

本文利用超声波断口图方法对不同类型的 PMMA 试件进行了测试, 得到了它们断口上的标志不同时刻裂纹前缘的超声波线。用 ANSYS 有限元软件对这些试件进行了分析, 计算了这些试件在不同裂纹长度下的三维 J 积分, 得到的试件在不同裂纹长度下的三维 J 积分与它们断口图上的超声波线的形状和凸凹方向相似。将试件扩展裂纹前缘由直线调整为特定曲线后, 计算出的三维 J 积分趋向常量。这证实了本文假设, 说明扩展裂纹前缘的曲线形态并与试件表面倾斜是三维 J 积分作用的结果。

参考文献:

- [1] Bažant Z P and Estenssoro L F. Surface singularity and crack propagation [J]. International Journal of Solids and Structures, 1979, 15: 405~426.
- [2] Kerkhof F. Wave Fractography. Linear fracture mechanics [M]. Edited by Sih G C, Wei R P and Erdogan F, Envo Publishing Company, Lehigh Valley, Pa, 1975.
- [3] Takahashi K. Dynamic fracture instability in glassy polymers as studied by ultrasonic fractography [J]. Polymer Engineering and Science, 1987, 27(1): 25~32.
- [4] 盛季生, 高桥清. 利用超声波 Fractography 对高速破坏中裂纹前缘二维扩展的研究[J]. 机械强度, 1992, 14: 12~19.

Sheng Jisheng, Takahashi K. Study of propagation of 2-dimensional crack fronts in high speed fracture by use of ultrasonic fractography [J]. Mechanical Strength, 1992, 14: 12~19. (in Chinese)

(参考文献[5]~[14]转第 93 页)

高耸结构设计向更为安全、合理、经济的方向发展。

参考文献:

- [1] 高耸结构设计规范编制组. 高耸结构设计规范[S]. (报批稿), 2004.
Technical committee of the high-rise building design code. Code for design of high-rise structures [S]. (Submitted for approving), 2004. (in Chinese)
- [2] GB50009-2001. 建筑结构荷载规范[S].
GB50009-2001. Load code for the design of building structures [S]. (in Chinese)
- [3] GB50017-2003. 钢结构设计规范[S].
GB50017-2003. Code for design of steel structures [S]. (in Chinese)
- [4] 王肇民. 高耸结构的振动控制[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
Wang Zhaoming. Vibration control of high-rise structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese)
- [5] 何敏娟, 马人乐. 336 米高黑龙江广播电视塔悬挂水箱振动控制及其实测[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(1): 39~42.
He Minjuan, Ma Renle. Measurement and analysis of the vibration of Heilongjiang broadcast and TV steel tower controlled by pendulous tank [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(1): 39~42. (in Chinese)
- [6] GB50010-2002. 混凝土结构设计规范[S].
- [7] GB50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
GB50007-2002. Code for design of building foundation [S]. (in Chinese)
- [8] 何敏娟, 马人乐, 朱亮. 黑龙江钢结构电视塔设计若干关键技术研究[J]. 特种结构, 2001, 18(1): 13~16.
He Minjuan, Ma Renle, Zhu Liang. Some key techniques in the design of Heilongjiang broadcast and TV steel tower [J]. Special Structures, 2001, 18(1): 13~16. (in Chinese)
- [9] 马星, 颜明忠, 沈之容. 桅杆结构风振系数简化计算[J]. 特种结构, 2002, 19(3): 54~56.
Ma Xing, Yan Mingzhong, Shen Zhirong. Simplified calculation for wind vibration coefficient of guyed mast [J]. Special Structures, 2002, 19(3): 54~56. (in Chinese)
- [10] 王笑峰, 何敏娟, 潘敏丽. 锥形单管塔的非线性静力分析[J]. 结构工程师, 2000, (4): 21~24.
Wang Xiaofeng, He Minjuan, Pan Minli. Nonlinear static analysis of pole towers [J]. Structural Engineers, 2000, (4): 21~24. (in Chinese)
- [11] 马人乐, 孙德发, 姚伟铭. 黑龙江电视塔设计中的温度效应研究[J]. 上海力学, 1999, 20 (4): 404~409.
Ma Renle, Sun Defa, Yao Weimin. The influence of temperature effect on Heilongjiang TV tower [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1999, 20 (4): 404~409. (in Chinese)

注: 该文在第十四届结构工程学术会议(2005 烟台)应邀作特邀报告

(上接第 66 页)

- [5] 盛季生. 超声波断口图[J]. 实验力学, 1992, 7(3): 221~227.
Sheng Jisheng. Ultrasonic Fractography [J]. Experimental Mechanics, 1992, 7(3): 221~227. (in Chinese)
- [6] 张诗捷, 朱亦钢, 黄新跃, 刘绍伦. 试件厚度对铝合金疲劳裂纹扩展的影响[J]. 航空学报, 1994, 15(6): 757~760.
Zhang Shijie, Zhu Yigang, Huang Xinyue, Liu Shaolun. Thickness effect on fatigue crack propagation of Al-alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(6): 757~760. (in Chinese)
- [7] 何宇廷, 傅祥炯, 陈瑞峰. 材料断裂韧度测试中的厚度效应[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(5): 856~860.
He Yuting, Fu Xiangjiong, Chen Ruifeng. Effect of thickness on testing the fracture toughness of material [J]. Mechanical Science and Technology, 1997, 16(5): 856~860. (in Chinese)
- [8] Miyamoto H and Kikuchi M. Three-dimensional J integral [J]. Theoretical and Applied Mechanics, 1980, 28: 195~204.
- [9] Machida K, Kikuchi M and Miyamoto H. The thickness effects of the CCT specimen [R]. Bulletin of JSME, 1986, 29(249): 701~707.
- [10] Kikuchi M, Miyamoto H and Hiraoka S. Three dimensional crack growth analysis by the T.N.P. method [R]. Bulletin of JSME, 1986, 29(257), 3679-3684(4): 12~19.
- [11] Crews Jr J H, Shivakumar K N, Raju I S. Effects of anticlastic curvature on G distribution for DCB specimens [C]. Mobile, Alabama: Proceedings 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 1989, 1242~1249.
- [12] 邹振民, 樊蔚勋. 双悬臂梁试样能量释放率计算的新方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(3): 371~375.
Zou Zhenmin, Fan weixun. A new method for calculating energy release rate of double cantilever beam specimens [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 28(3): 371~375. (in Chinese)
- [13] 刘东学, 谢志刚, 李惠荣. 表面裂纹受拉伸板三维弹塑性有限元分析模型及其 J 积分[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(2): 146~151.
Liu Dongxue, Xie Zhigang, Li Huirong. Finite element model of 3-D elastic-plastic analysis and J-integral calculation for surface crack in plate under tension [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(2): 146~151. (in Chinese)
- [14] Gdoutos E E. Fracture Mechanics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.