第15卷 第4期 南京化工学院学报 Vol. 15 No. 4
1993年10月 JOURNAL OF NANJING INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGY Oct. 1993

模拟压力容器接管的新型十字试板的角裂纹疲劳扩展性能

冯志力* 沈士明 戴树和

（化工机械系）

摘 要 用新型十字试板进行了双轴载荷下的角裂纹疲劳扩展性能的研究，以模拟压力容器接管处角裂纹的疲劳扩展行为。试板角裂纹尖端的应力强度因子采用三维边界元法计算，裂纹疲劳扩展的形貌变化采用降载勾线法记录。试验结果表明，裂纹疲劳扩展规律与双向载荷比及裂纹初始形状有关，裂纹沿长度方向的扩展速率可以用 Paris 公式表示，但在深度方向则不然。

关键词 疲劳裂纹扩展 角裂纹 边界元法 十字形试板

压力容器接管处拐角裂纹的存在及交变载荷工况下的疲劳扩展将导致压力容器的失效，对这一问题，近年来引起工程界的广泛重视，已成为压力容器研究领域中的一项重要课题。对压力容器接管处角裂纹的研究大致可分为真实容器接管结构的试验[1-3]及模拟试板的研究[4,5]。作者根据压力容器接管处的应变场特征设计了承受双向载荷的新型十字试板[6]，进行疲劳试验，来模拟容器接管结构角裂纹的疲劳扩展性能。

1 十字试板角裂纹应力强度因子的计算

采用边界元法对十字试板角裂纹的应力强度因子(SIF)进行了计算。对前人采用的边界元程序[7]进行了改进。采用了拟波前法[8]求解技术，同时扩充了计算应力强度因子的子程序。

应力强度因子用裂尖张开移位计算[9]，计算公式如下：

$$K_I = \frac{E\sqrt{2\pi}}{4(1-\mu^2)}\frac{\Gamma(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}} \tag{1}$$

式中：E —— 材料的弹性模量，[MPa]

μ —— 材料的泊松比

$\Gamma(\varepsilon)$ —— 离裂纹前缘法向距离为 ε 处的裂纹面张开位移，[mm]

使用式(1)时，通常用邻近裂纹尖端为一排节点的张开位移进行计算，对图1所示的四边形等参单元(阴影单元，裂纹面垂直于 Y 轴)，裂尖1点的应力强度因子 K_I

$$K_I = \frac{E\sqrt{2\pi}}{4(1-\mu^2)}\frac{V(2)}{\sqrt{L}} \tag{2}$$

---

* 武汉化工学院机械系

本文于1992年2月28日收到

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中 $\Gamma(2)$ 为阴影单元节点 2 的张开位移，

L 为阴影单元节点 1 和节点 2 之间的距离，

$$L = \sqrt{(x_2-x_1)^2+(z_2-z_1)^2}$$

采用改进后的程序对具有中心穿透裂纹单向拉伸板和带孔边角裂纹的单向拉伸板的裂尖应力强度因子进行了计算，计算结果与 Newman-Raju 工程计算式的计算结果[10]相比，误差仅为 5%左右。

对十字试板孔边角裂纹尖端的应力强度因子进行计算时，选取 1/2 的试板中心减薄区（即具有容器接管处应变场特征的区域）作为计算对象，减薄区的边界条件由线性静动力结构分析程序 SAP5C 应力分析结果确定，1/2 试板减薄区的边界元网格图和孔边角裂纹处的局部放大网格图分别见图 2(*a*)和(*b*)。

采用改进后的边界元程序分别对试板角裂纹的长度方向（*c* 方向，沿板面方向）和深度方向（*a* 方向，垂直于板面方向）的裂尖应力强度因子 K_{Ic}，K_{Ia} 进行了计算。从而得到在交变载荷下的应力强度因子幅值 ΔK_{Ic}，ΔK_{Ia}。

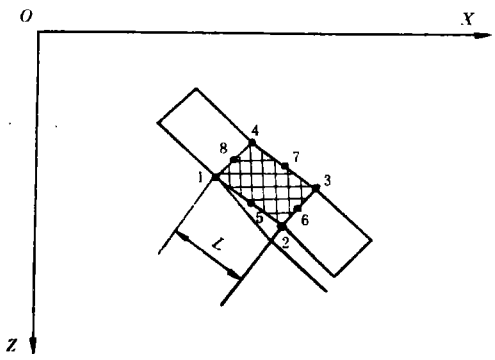


图 1　四边形等参单元

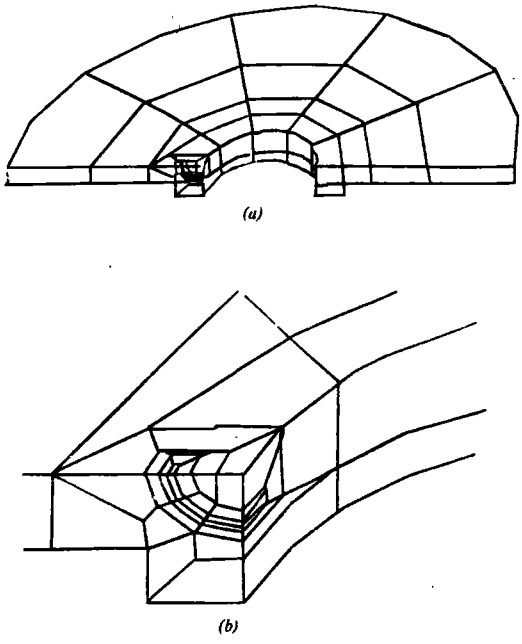


图 2　边界元计算网格图

2　试验研究

2.1　十字试板的加工

十字试板是采用国产压力容器常用钢材 16MnR 制造的，材料的化学成份及常规机械性能见表 1。在试板的中心孔拐角处开有角裂纹，其放大示意图如图 3 所示。角裂纹由电火花加工而成。裂纹面与板材的轧制方向垂直。试验用了两种不同的双向载荷比和两种不同的初始裂纹，具体试验方案见表 2。

2.2　试验过程

试验是在日本东京衡机所与西德辛格公司联合制造的电液伺服式双轴疲劳试验机上进行的。

电火花加工的角裂纹先进行疲劳予制，再开始疲劳裂纹扩展试验。扩展试验时 Y 方向所施加的最大载荷为 98.0kN，X 方向载荷由双向载荷比加以确定，疲劳载荷循环特征（最小载荷幅与最大载荷幅之比）$R=0.1$。在疲劳扩展试验验中，为了记录角裂纹的形貌变化，采用降载勾线法[11,12]。因此试验时按勾线循环-疲劳扩展循环不同载荷反复进行。勾线循环时的载

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

荷幅值为疲劳扩展循环时的一半，两循环过程中，疲劳载荷循环特性不变。

试验结束后，用读数显微镜在试板断口上，根据勾线循环时得到的迹线读出裂纹不同阶段的尺寸 a 和 c。图 4 表示了断口的形貌，其中(a)为试板断口全貌。(b)为初始裂纹为 1/4 图形的断口勾线形貌。(c)为初始裂纹为 1/4 椭圆的断口勾线形貌。

表 1　16MnR 材料的化学成份及机械性能

化学成份(%)					机械性能				
C	Si	Mn	P	S	σ_s(MPa)	σ_b(MPa)	E(MPa)	δ(%)	ψ(%)
0.15	0.51	1.40	0.02	0.09	367	572	2.07×10^5	25	26

表 2　试验方案

组别	载荷比 ($P_i:P_0$)	初始裂纹尺寸 $a\times c$(mm×mm)	试样编号
Ⅰ	1:1	2×2	BN.1 BN.2
Ⅱ	0.5:1	2×2	BN.3 BN.4
Ⅲ	1:1	2×3	BN.5 BN.6

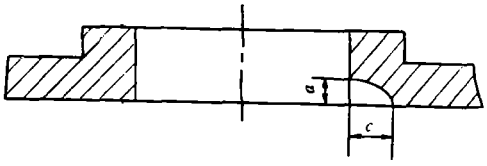
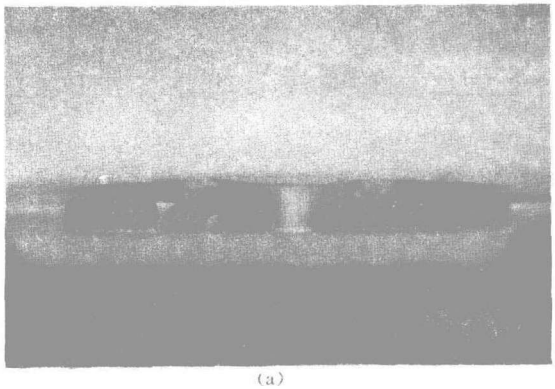
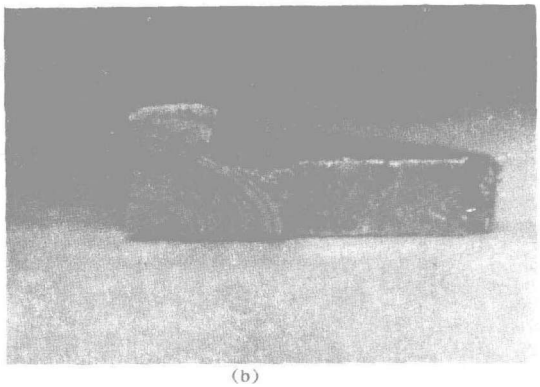


图 3　试板角裂纹示意图(x-x 剖面)



(a)



(b)

(c)

图 4　试件断口形貌和迹线

2.3　裂纹扩展的形貌变化

裂纹扩展的形貌变化可以从图 4 中定性地看出，试板角裂纹在长度方向(c 方向)与深度方向(a 方向)不同。在扩展初期，a、c 两方向的扩展速率差不多。但随着扩展量的增加，裂纹沿

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

c 方向的扩展速率大于沿 a 方向的扩展。为了定量地描述角裂纹扩展的形貌变化。首先需将勾线循环时裂纹的扩展量进行等效换算。换算按下式[11]进行（参见图 5）

$$\Delta N_{ie} = \Delta a_i' \Big/ \frac{1}{2}\left(\frac{a_i' - a_{i-1}''}{\Delta N_i'} + \frac{a_{i+1}' - a_i''}{\Delta N_{i+1}'}\right) \quad (3)$$

式中　$\Delta a_i'$ ——勾线宽度 $\Delta a_i = a_i'' - a_i'$

$\Delta N_i'$ ——勾线前的一次疲劳循环次数

$\Delta N_{i+1}'$ ——勾线后的一次疲劳循环次数

$a_i' - a_{i-1}''$ ——勾线前的一次疲劳循环扩展量

$a_{i+1}' - a_i''$ ——勾线后的一次疲劳循环扩展量

换算后　$a_i = a_i' + \Delta a_i'$

$N_i = N_i' + \Delta N_{ie}$

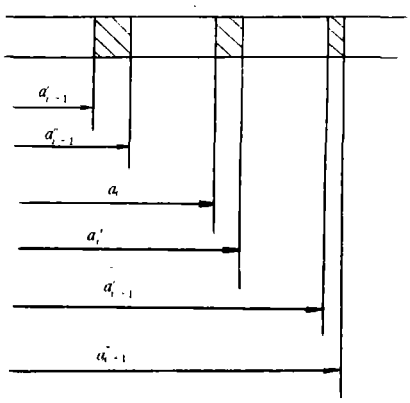


图 5　勾线扩展时的等效换算

对不同初始裂纹的疲劳扩展量处理后，结果示于图 6 中，线性回归结果可见，角裂纹沿长度方向与深度方向扩展量不一样，但两者间呈指数关系，即

$$C = A \cdot a^B \quad (4)$$

同时，结果也表明，初始裂纹的尺寸不同，其关系式的系数与指数也不一致。

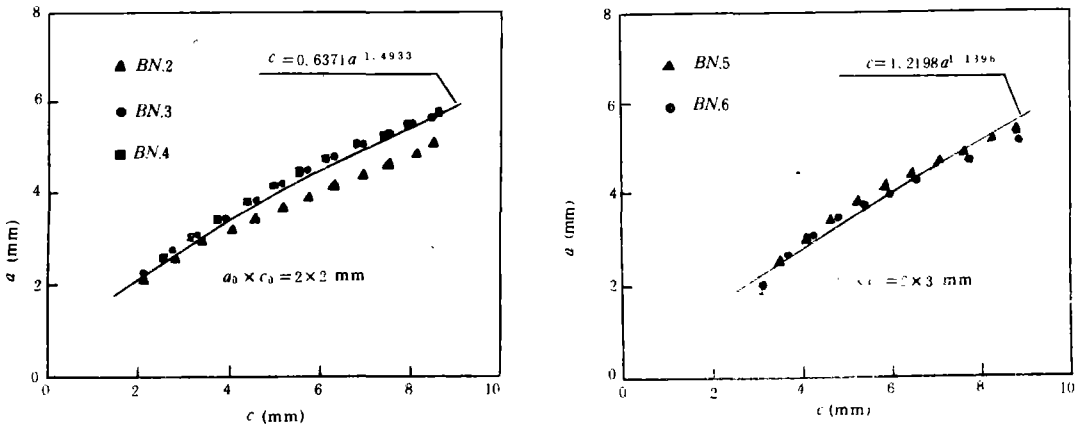


图 6　十字试板角裂纹疲劳扩展的形貌变化

3　角裂纹疲劳扩展速率

由角裂纹疲劳扩展形貌变化知道，裂纹在长度方向上扩展较快，将裂纹沿长度方向的扩展速率 dc/dN 与该方向的应力强度因子幅 ΔK_c 的关系对不同组的数据作图（图 7、8、9）可见，$dc/dN \sim \Delta K_c$ 在双对数坐标纸上呈直线关系，即角裂纹沿长度方向的扩展规律符合 Paris 公式。只是因各组的条件不同而产生 Paris 公式中的系数与指数不同，它们的值列于表 3 中。

为将裂纹沿深度方向的扩展速率 da/dN 与该方向的应力强度因子幅 ΔK_a 的关系作图（见图 10）可见，无论那一组数据 $da/dN \sim \Delta K_a$ 之间在双对数坐标纸上都不呈直线关系。即它

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

们之间不符合 Paris 公式，这个结论与弯曲载荷作用下板中心孔边角裂纹的扩展规律是一致的[7]。

将不同组别的 $dc/dN \sim \Delta K_c$ 的关系集中在同一双对数坐标图(图 11)上，相互比较可见，在低 ΔK_c 时第Ⅲ组的 dc/dN 最大，其次是第Ⅱ组，而第Ⅰ组的 dc/dN 最低，这是因为第Ⅲ组试件的初始裂纹为 1/4 椭圆(2×3mm)，其余两组为 1/4 圆形(2×2mm)，因此初始裂纹长的扩展速率大。

表 3　各组试验 $dc/dN \sim \Delta K_c$ 关系中的系数与指数

Paris 公式	组别	A	m
$\frac{dc}{dN}=A\cdot(\Delta K_c)^m$	Ⅰ	2.565×10^{-10}	3.785
	Ⅱ	6.080×10^{-11}	4.465
	Ⅲ	7.678×10^{-9}	2.904

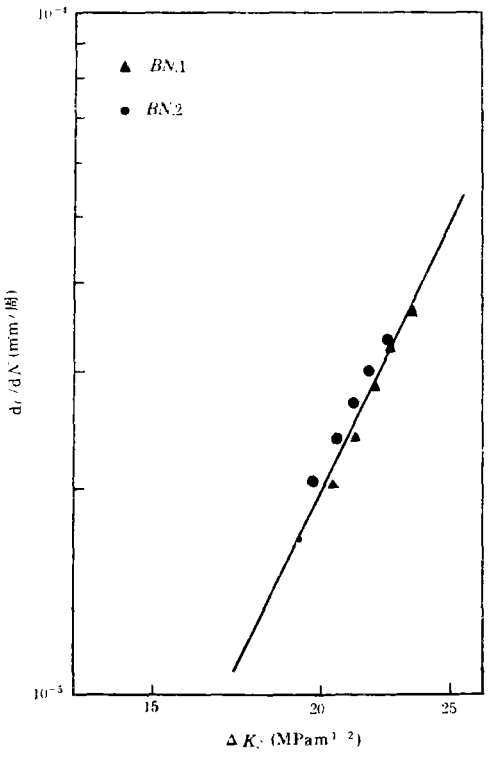


图 7　第Ⅰ组 $dc/dN \sim \Delta K_c$

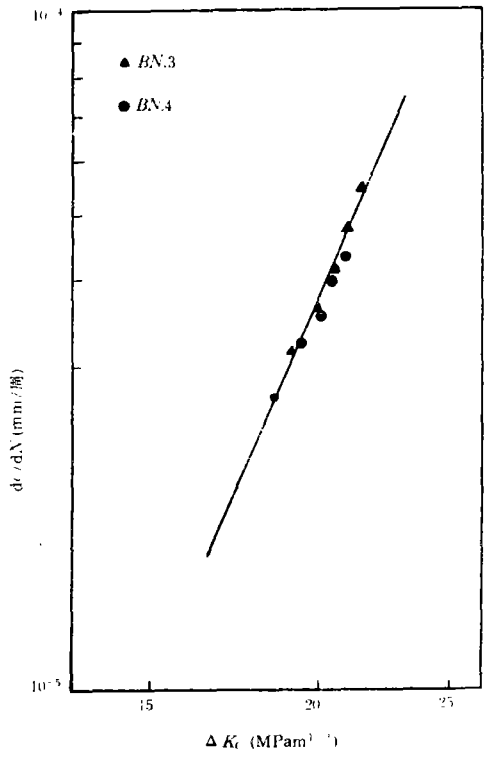


图 8　第Ⅱ组 $dc/dN \sim \Delta K_c$

由Ⅰ、Ⅱ组的数据比较可见，尽管初始裂纹相同，由于双轴向载荷比不同，扩展速率也不同。第Ⅱ组试验裂纹方向(x 方向)的载荷与另一方向(y 方向)的载荷比 $P_x : P_y = 0.5 : 1$，第Ⅰ组试验为 $P_x : P_y = 1 : 1$，因此比较可见，载荷比为 1：1 时，扩展速率小，这一结论也可从第Ⅱ、第Ⅲ组试验数据比较得到，当 ΔK_c 较小时，$(dc/dN)_{Ⅲ} > (dc/dN)_{Ⅱ}$。这时，初始裂纹起主导作用。而当裂纹扩展一段时间后，第Ⅱ组试验裂纹趋于椭圆。此时 $(dc/dN)_{Ⅱ} > (dc/dN)_{Ⅲ}$，因为第Ⅲ组载荷比 $P_x : P_y = 1 : 1$，这时载荷比的影响较明显，载荷比 $P_x : P_y = 0.5 : 1$ 的扩展速率大于 $P_x : P_y = 1 : 1$ 时的扩展速率，其主要原因是 P_x 对 x 方向裂纹闭合效应降低的缘故。

将同样材料的 CCT 试板的 $dc/dN \sim \Delta K$ 关系也标于图 11，同时标出置信度为 95% 的分散带上、下限(见图中虚线)，将这一结果与前面三组数据比较可见，除第Ⅰ组的 $dc/dN \sim \Delta K_c$ 直

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

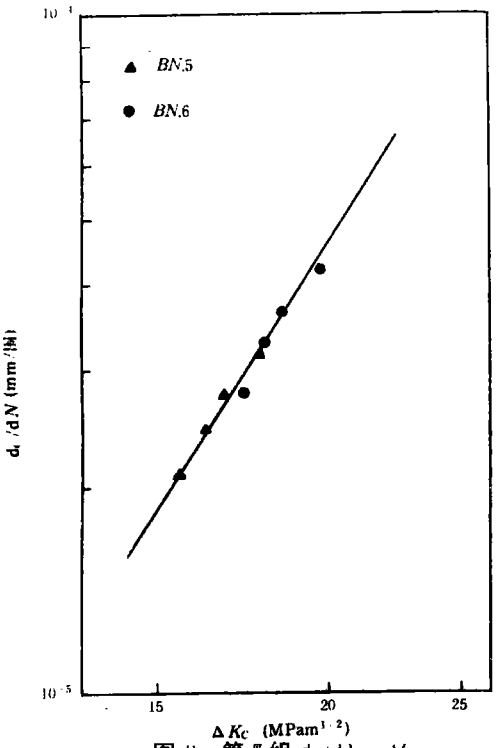


图 9　第Ⅲ组 dc/dN～ΔKc

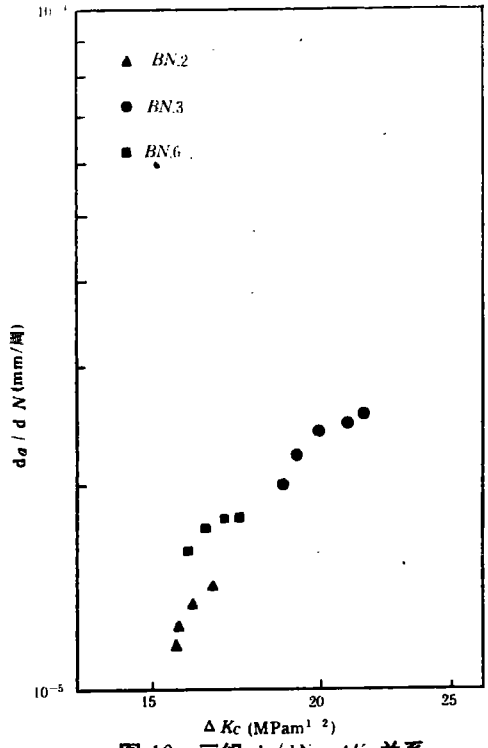


图 10　三组 dc/dN～ΔKa 关系

线位于分散带下限处外，其余两组数据都位于分散带之上，因此，将 CCT 试板的裂纹疲劳扩展速率数据用于双向试板（或容器接管）角裂纹的疲劳寿命予测，将得到不安全的结果。

4　结　论

由试验结果可以得出以下几点结论：

4.1　在双轴载荷作用下角裂纹的疲劳扩展研究中，采用降载勾线法来记录裂纹扩展形貌变化，只要降载选择适当，是行之有效的。

4.2　双向载荷作用下，新十字形试板角裂纹的疲劳扩展规律，在长度方向是符合 Paris 公式，而在深度方向不符合。但角裂纹在深度方向的扩展量与长度方向扩展量之间呈指数关系。

4.3　双向载荷作用下，新型十字试板角裂纹的扩展速率一方面与初始裂纹的形状尺寸有关，另一方面与双向载荷的比值有关。

4.4　将 CCT 试板所得的裂纹扩展速率结果用于双

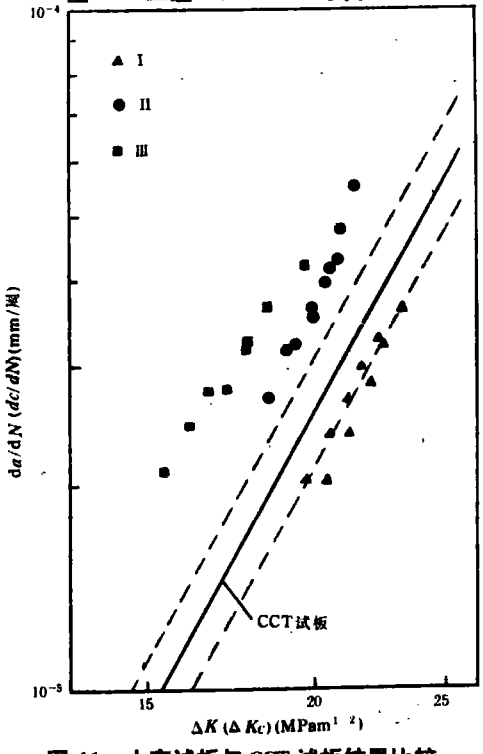


图 11　十字试板与 CCT 试板结果比较

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

轴向载荷作用下的接管角裂纹的疲劳寿命予测，会得出不安全的结果。

参 考 文 献

1 Docock J. 1st Intern Conf on Pressure Vessel Techn, Part Ⅰ Ⅱ－58,1969:743

2 Yoichi Hara et al. 3rd Intern Conf on Pressure Vessel Techn, Part Ⅱ,1977:717

3 Zhang Kangda, Fang Deming. 5th Intern Conf on Pressure Vessel Techn, 1984:1351

4 Brockhoven M J G,Kuijtenbeek M G. 3－SM:RT Paper G 4/7 London: Sept 1975

5 李泽震. 压力容器接管断裂与疲劳试验研究报告，合肥通用机械研究所,1985:251

6 冯志力,沈士明,戴树和. 具有容器接管高应变区应变场特征的一种十字形试板,南京化工学院学报,1993;15(3):17

7 沈士明等. 孔边角裂纹在弯曲疲劳载荷作用下扩展速率的研究，化工机械,1991;18(5)

8 袁 驷. 计算结构力学及其应用，1986;3(1):108

9 Thomas A, Cruse. Philip M, Besuner. Journal of Aircraft 1975;12(4)

10 Newman J C, Raju I S. Computation Methods in Mechanics of Fracture (2)311～334. Ed. Atluri S N New York: 1986

11 孙学伟等. 固体力学学报，1986:(1)

12 Cook T R. 3rd Intern Conf on Pressure Vessel Techn, Part Ⅰ 1977:749

FATIGUE BEHAVIOUR OF CORNER CRACK IN A NEW CROSS SPECIMEN SIMULATING THE NOZZLES OF PRESSURE VESSELS

Feng Zhili　Shen Shiming　Dai Shuhu

(Department of Chemical Machanical Engineering)

Abstract: A study of fatigue growth behaviour of the corner crack was conducted with a new cross specimen under biaxial loading for simulating the corner crack at the junction of vessel and nozzle. The SIF at the crack tip of specimen was computed by BEM. The pattern of corner crack was recorded by a marking technique in which the specimen was applied a load slightly below the maximum load. The experimental results show that the biaxial load ratio and the initial crack shape could influence the fatigue growth behaviour of the corner crack, and that the fatigue growth rate of the corner crack can be described by Paris equation in the length-direction, but not in the depth-direction.

Key words: fatigue crack growth, corner crack, BEM, cross specimen.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne