

复合型韧性断裂实验和控制参数

左 宏¹⁾ 陈宜亨

(西安交通大学建筑工程与力学学院, 西安 710049)

郑长卿

(西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

摘要 通过对不同韧性材料在各种平面复合载荷形式下裂纹启裂阶段裂端变形、启裂位置和扩展方向的系统的宏微观实验验证及计算分析, 考察了韧性断裂参数空穴扩张比的分布特征和裂纹启裂及扩展方向的关系。得到: 对于不同韧性的材料, 在裂端的钝化变形区域, 空穴扩张比的极大值区对应于裂纹的启裂位置, 裂纹启裂时钝化裂端前缘空穴扩张比的临界值不敏感于复合比的变化。而对于裂纹启裂后的扩展方向, 则需根据具体材料在相应的特定区域中比较空穴扩张比参数极大值的分布特征, 需经进一步的分析, 从而确定裂纹的扩展方向。实验及计算结果表明, 尽管复合型断裂时裂纹启裂及扩展的机理极其复杂, 用于韧性材料复合型断裂的空穴扩张比参数仍能很好地预测裂端的启裂及扩展方向, 可作为复合型韧性断裂过程的控制参数。

关键词 复合型断裂, 韧性断裂控制参数, 空穴扩张比, 裂纹启裂, 扩展

引 言

关于主导复合型裂纹启裂及扩展的控制参数研究可追溯到 60 年代 Sih 等的三个特征参数的研究^[1,2], 即: 最大周向拉应力, 应变能密度和应变能密度因子。所考察的三个参数应用于不同的脆性材料各有优劣。应用于韧性材料的复合型断裂时则误差较大。鉴于此, 众多的学者对现有的各种韧断参数进行了大量的考察研究, 诸如 J 积分、 $CTOD$ 、 $CTSD$ 、 K 等^[3~5], 迄今为止, 这一问题还没有得到一个满意的答案。

本文基于新提出的韧性断裂理论——空穴扩张比理论, 运用宏微观实验及数值分析相结合的方法, 考察了复合型载荷下不同韧性材料中钝化裂端前沿空穴扩张比参数的分布以及复合型裂端的启裂位置及其后的扩展方向。通过实验及计算结果的分析比较, 得到了一些有用的结论。

1 空穴扩张比参数的意义及其理论背景^[6]

一般地, 韧性断裂是大量塑性变形的结果。在大变形的情况下, 等效应力可能没有显著的变化, 而等效应变的数值则会有极大的不同。故用等效塑性应变来表达韧性破坏的条件应是合理的。然而, 材料的等效塑性破坏应变 ε_F 是与应力状态有关的。在准静态、常温、比例加载条件下, 由以下假设:

1997-10-20 收到第一稿, 1998-06-09 收到修改稿。

1) 该作者现在无锡威孚集团有限公司技术开发中心工作, 邮编 214031。

(1) 对于任一材料, 其等效应力 σ_e 与等效应变 ε_e 的关系曲线在不同应力状态下是唯一确定的;

(2) 所研究材料 σ_e - ε_e 曲线上断裂点的位置仅仅取决于加载过程中的应力状态;

(3) 与 J_1/J_2 对断裂点在 σ_e - ε_e 曲线上的位置的影响相比, J_3/J_2 的影响忽略不计. 可求得

$$\varepsilon_F = f_1\left(\frac{J_1}{J_2}\right) = f_2\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) = f_2(R_\sigma)$$

其中: J_1 为应力张量第一不变量, J_2, J_3 分别为应力偏量张量第二、三不变量, σ_m 为平均应力, $R_\sigma = \sigma_m/\sigma_e$ 为应力三轴性状态参数. f_1 和 f_2 表示某函数形式, 可用实验或理论方法求得. 据此, 独立于应力三轴状态的表征韧性断裂的力学参数可定义为

$$V_G = \varepsilon_p f(R_\sigma)$$

其中 $f(R_\sigma) = 1/f_2(R_\sigma)$, ε_p 为工作应变.

由已进行的试验研究及理论推导, $f(R_\sigma)$ 取为 $f(R_\sigma) = \exp(1.5R_\sigma)$ 是合理的. 即, 空穴扩张比参数可定义为

$$V_G = \varepsilon_p \exp(1.5R_\sigma)$$

2 复合型韧性断裂实验

本实验的目的是得到在不同韧性的材料中, 不同的加载阶段裂端的变形特征、启裂位置、扩展方向及其扩展路径. 为此, 选取化学成分 (表 1) 相同而宏观机械性能 (表 2) 有较大差异的两种热处理状态的硬铝合金 LY12 (淬火, 自然时效状态, 记为 CZ; 退火状态, 记为 M). 使用 H.A. Richard^[7] 提出的紧凑拉剪试样及加载装置进行断裂实验. 为了得到启裂阶段裂端的形貌特征, 试验时停机点的选择依据已得到的试样的全程拉伸记录曲线及对试样表面裂尖部位的显微观测而定. 试验得到的加载至启裂阶段的试样经卸载后从中央厚度处纵向切割及对纵剖面抛光, 通过扫描电镜观察, 即可获得启裂阶段裂纹尖端中央厚度处的变形、启裂位置、扩展方向及路径的有关信息.

表 1 LY12 的化学成份

Table 1 The chemical composition of LY12

Main composition (%)				Impurity no large to			
Cu	Mg	Mn	Al	Fe	Si	Fe+Si	Zn
2.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	base	0.5	0.5	0.5	0.3

表 2 材料的机械性能

Table 2 The mechanical property of LY12

Material	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_s (%)	ψ (%)	n
CZ	75 000	268	585	10.0	11.9	0.23
M	65 000	136	230	11.5	12.9	0.11

扫描电镜观察表明: 材料 CZ 在裂端变形极小时, 即发生启裂 (图 1(a)), 启裂点位于裂端钝化变形较大的区域. 裂端变形为非对称的钝化变形, 锐化变形不明显. 启裂初期, 受裂端前沿

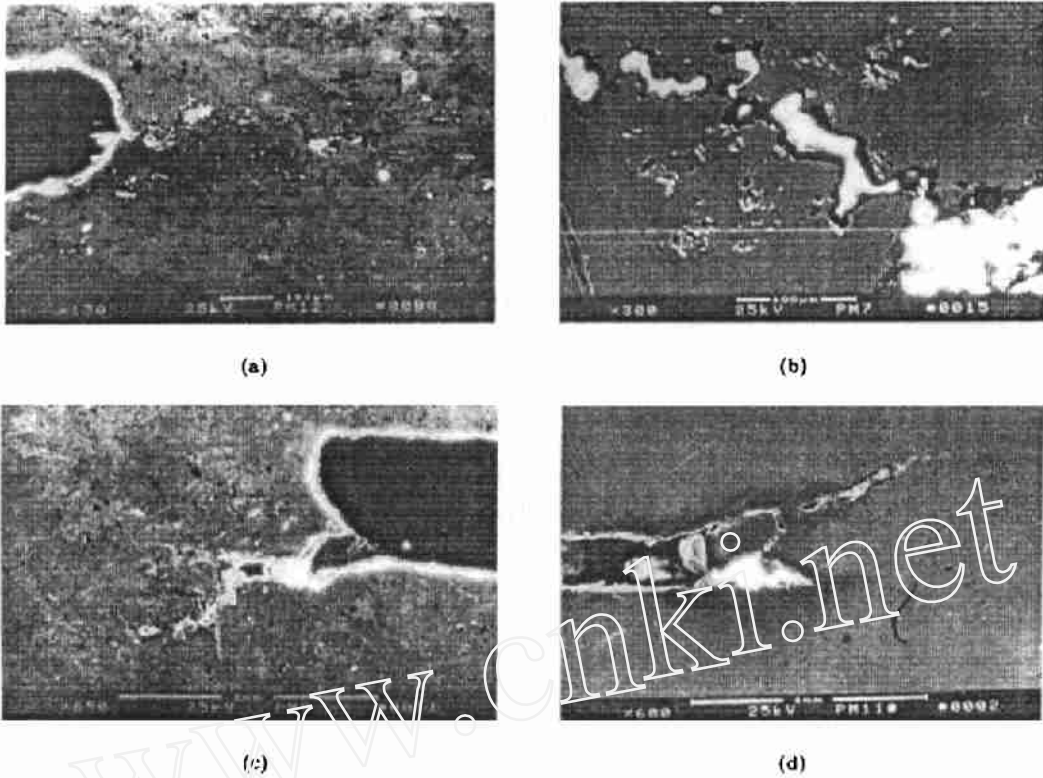


图 1 两种材料裂纹启裂时的裂端形貌

(a), (b) 材料 CZ 在 $\beta_{eq} = 75^\circ$ 和 30° 时; (c), (d) 材料 M 在 $\beta_{eq} = 30^\circ$ 和 0° 时

Fig. 1 The microscopic property of crack tip

(a), (b) $\beta_{eq} = 75^\circ$ and 30° of material CZ; (c), (d) $\beta_{eq} = 30^\circ$ and 0° of material M

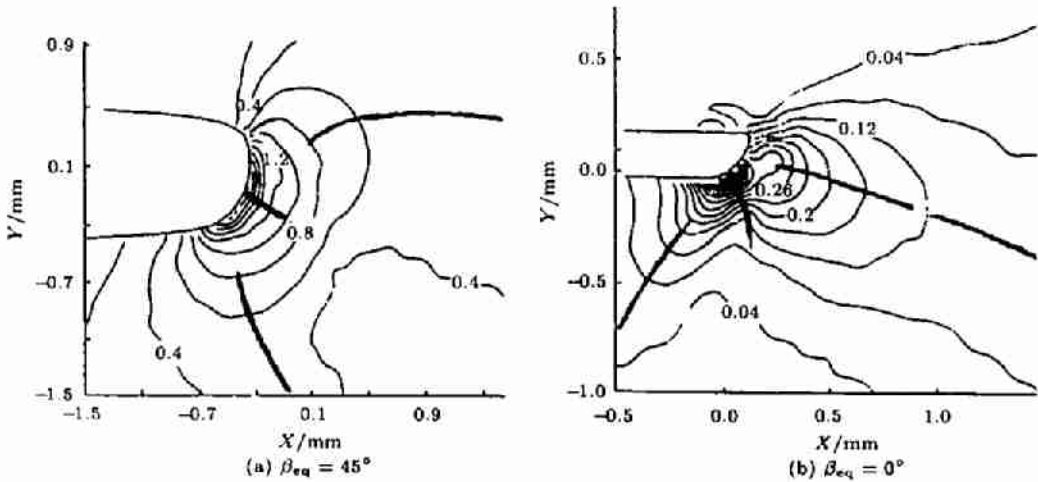


图 2 两种复合形式下接近裂纹启裂时裂端 V_G 的极值分布

Fig.2 The distribution of V_G near crack tip while initiation

随机分布的已形核空洞的影响, 启裂位置和方向的随机性较大, 路径呈“Z”字形(图 1(b)). 但从较大的区域观察, 其扩展方向是趋于稳定的, 随载荷复合程度的变化呈一定的规律性. 该

扩展方向与原裂纹线的夹角随载荷复合程度的变化在图 3 中由曲线 CZ 表示. 材料 M 在发生了较充分的变形之后才出现启裂(图 1(c), 1(d)), 启裂的位置皆位于裂端的钝化变形区, 即使是在纯剪切时裂端的一边发生较强的锐化变形之后(图 1(d)). 启裂位置受随机分布的已形核空洞的影响较小. 启裂后的扩展方向基本保持不变. 该扩展方向与原裂纹线方向的夹角随载荷复合程度的变化在图 3 中由曲线 M 表示.

得到了不同复合型载荷下裂端启裂时的形貌特征, 可以通过测量表征裂端形状及变形程度的特征参数(如 $CTOD$, $CTSD$ 等), 结合数值模拟得到的结果, 将数值模拟得到的各力学参数分布与试验中的特定的加载阶段对应起来, 从而可近似得到对应于启裂阶段裂端前方各力学参数的分布.

3 钝化裂端空穴扩张比分布特征的计算

计算模型同上节试验中的试样, 被离散成 330 个八节点等参元, 1017 个节点. 原始裂端半径 r_0 采用 0.1 mm 的半圆型钝化裂尖模型. 计算程序采用线性非线性结构分析程序 APOLANS. 其应用于弹塑性大应变问题中的正确性已为大量的计算及试验结果所证实.

对材料 CZ 在 I 型、II 型及 I-II 复合型载荷下裂端 V_G 的分布进行了数值分析(对材料 M 的分析类似于材料 CZ 的分析, 区别是变形更加强烈), 图 2 是不同复合形式下接近裂纹启裂时裂端 V_G 的分布, 其中 $\beta_{eq} = \arctan(K_1/K_2)$. 由图 2 可见, 不同的复合比, 在近裂尖处, V_G 的极大值位于钝化变形较大的区域. 但对于裂端发生较大的钝化、锐化变形(对应于材料 M), 当锐化裂端变形为一个尖锐裂纹时, 在此尖锐裂端前沿区域, 也出现一个 V_G 的极大值, 如图 2 中的锐化裂纹尖端区. 在距裂端较远处, V_G 极大值的分布位置发生变化, 其极大值沿裂纹前方两个不同的方向发展. 如在纯 II 型载荷状态下(图 2(b)), 近裂尖处的极大值的方向与原裂纹的夹角从 I 型时的 0° 变为约 67° , 距裂端较远处另一个 V_G 的极大值则已转至与原裂纹夹角约 -20° 的位置(对比参考图 1(d)). 这一 V_G 极大值的分布特征与一些高韧性材料(如 HY100 钢^[8]、HY130 钢^[9]等)裂端启裂及扩展方向的试验结果有较好的对应性. 至于哪一个极大值起主导作用, 则需根据具体材料而定. 鉴于此, 本文认为, 在裂端前沿比较各参数的分布规律时, 不同的材料, 应在不同的范围内比较.

关于裂纹启裂后的扩展方向与 V_G 极值分布特征的关系, 可通过在较大范围内对 V_G 极值分布特征的仔细分析来说明. 如图 2 所示, 在接近裂端时, V_G 的极大值的分布基本位于裂纹尖端的钝化区域, 只有在近 II 型大变形的情况下, 在锐化裂端有分布(图 2(b)). 在钝化裂端区中 V_G 极大值的位置在以原裂纹轮廓线曲率中心为坐标原点时相对于原始裂纹方向所夹的角度在图 3 中由曲线 B_0 表示. 在距离裂纹尖端边缘稍远的区域, V_G 的极大值分布发生变化, 变化后的最大值分布沿两个方向, 在图 3 中由曲线 B_1 、 B_2 表示.

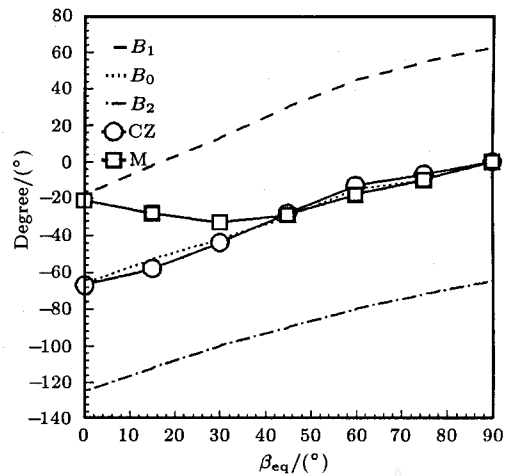


图 3 实验测得的裂纹扩展角与空穴扩张比的极大值分布

Fig.3 The fracture angle from experiment and maximal value distribution of V_G

对于高强材料, 启裂点位于裂端的钝化区域, 且裂端变形较小, 这一现象与 V_G 在裂端变形不大的情况下, 近裂尖处的极大值在钝化裂端的分布特征比较一致. 因此, 从不同复合比时近裂尖处 V_G 的分布位置, 可以预测高强低韧材料在裂端发生较小变形时沿钝化裂端区的启裂. 同时, 裂纹的扩展方向与近裂端区 V_G 极大值的分布方向基本一致. 这说明高强低韧材料 (如本试验的材料 CZ) 所需考虑的范围较小, 局限于近裂端处极大值的范围之内.

而对于低强度高韧性材料, 在近 II 型及纯 II 型载荷下, 有些材料^[8,9] 沿锐化裂端区启裂, 有些 (材料 M) 则沿钝化裂端处启裂 (图 1(c), 1(d)). 可见, 裂端发生较大程度的钝化、锐化变形时, 对照计算结果 (图 2(b)), 在锐化裂尖处, 出现 V_G 极大值, 这样, 在近裂尖处出现两个 V_G 极大值, 此时, 裂纹是在锐化裂尖还是钝化裂端启裂. 需根据其区域中 V_G 的极大值确定.

对比实验测得的裂纹扩展角, 可以发现, 在从纯 I 型到纯 II 型的不同的复合比时, 材料 CZ 的裂纹扩展角与 B_0 较为接近, 而材料 M 的裂纹扩展角在 I 型及近 I 型, I-II 复合型时与 B_0 较为接近, 而在纯 II 型时似乎与 B_1 更为接近 (皆为 20° 左右). 在近 II 型时 ($\beta_{e1} = 15^\circ$), 试验得到的裂纹扩展角处于 B_1 和 B_0 之间 (图 3).

4 启裂时空穴扩张比极大值分布发生变化的临界距离的估计

根据裂端纵剖面的显微观测, 采用启裂时裂端的张开位移 $CTOD$ 并结合滑开位移 $CTSD$, 以此为基准与由有限元计算的不同载荷时裂端张开位移、滑开位移比较, 得到对应于启裂时裂端的 V_G 分布, 进而可以确定 V_G 极大值的分布特征发生变化的临界距离 LC_1 和 LC_2 (在 LC_1 之内, 不同半径上的 V_G 极大值的迹线方向与原裂纹线的夹角用 B_0 表示. 在 LC_2 之外, 两个不同半径上的 V_G 极大值的迹线方向与原裂纹线的夹角用 B_1, B_2 表示. 在 LC_1, LC_2 之间的区域内, V_G 极大值的分布特征不明显). 所试两种材料启裂时, 裂端 V_G 极大值分布特征发生变化的临界距离 LC_1, LC_2 随复合比的变化示于图 4, 5. 由图 4, 5 可见, 随着剪切分量的增大, 该特征距离在逐渐减小, 即 V_G 分布的极大值发生变化的区域将随着剪切分量的增大而趋于接近裂纹尖端.

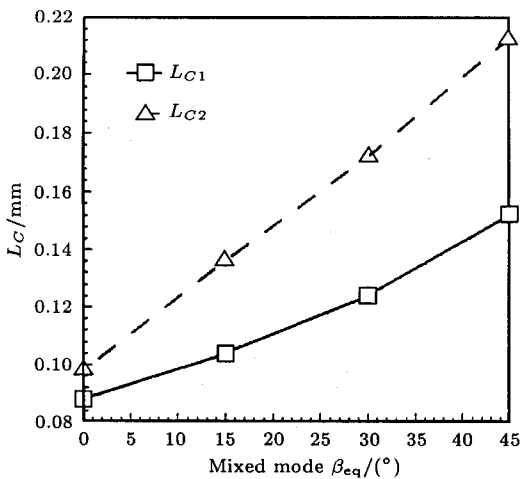


图 4 材料 CZ 中 L_{C1}, L_{C2} 随复合比的变化
Fig.4 The critical distance of L_{C1}, L_{C2} with varying mixed mode in material CZ

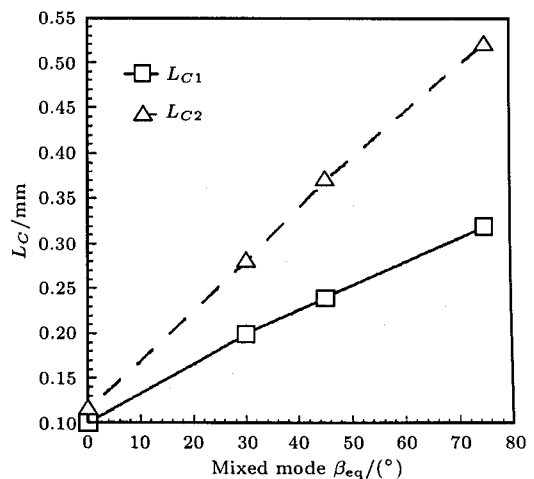


图 5 材料 M 中 L_{C1}, L_{C2} 随复合比的变化
Fig.5 The critical distance of L_{C1}, L_{C2} with varying mixed mode in material M

比较以上 V_G 极大值的分布特征与实验测得的裂纹扩展角 (图 3), 可以发现: 对于在不同复合比时皆以宏观韧性断裂的材料 CZ, V_G 参数在近裂端钝化区中极大值的位置及其方向 (B_0) 均可较好地描述该材料裂纹的启裂和扩展. 而对于材料 M, 在 I 型、近 I 型及复合型时, 启裂及扩展均服从空洞形核、扩张及最后的连接的韧性断裂机制. V_G 参数在近裂端钝化区中极大值的位置及其方向 (B_0) 均可较好地描述该材料中裂纹的启裂和扩展. 然而在近 II 型及纯 II 型载荷下, 启裂和扩展是在一瞬间完成的, 宏观上服从剪切断裂机制, V_G 参数在近裂端钝化区中的极大值的分布位置及其方向 (B_0) 与材料中裂纹的扩展方向有较大的差别. 然而此时可以发现 V_G 参数在距裂纹尖端较远处的极大值分布的迹线方向 (B_1 线) 与材料中裂纹的扩展方向比较接近. 由此可见, 通过对不同材料中影响裂纹启裂和扩展的特征区域的大小的分析, 采用在距裂纹尖端较远处的 V_G 参数极大值的迹线方向 (B_1 线) 分析纯 II 型载荷下材料 M 中裂纹的启裂和扩展是合理的.

5 裂纹尖端启裂时空穴扩张比的临界值 V_{GC}

根据两种材料的实验结果, 从试样中心厚度裂端纵向剖面的显微图像中, 可以估计出启裂时, 裂端的微观参数 $CTOD$ (其中包含原始裂纹尖端张开距离 $D_0 = 0.18 \text{ mm}$) 和 $CTSD$ (其中包含原始裂纹边缘曲率半径 $R_0 = 0.09 \text{ mm}$) 的大小, 以该参数为基准与有限元计算结果的比较, 可估计启裂时裂端前沿材料中空穴扩张比的最大值即临界值 V_{GC} , 见表 3. 由表 3 可见, 随复合比的变化 V_{GC} 基本保持稳定, 在所测量及计算的误差范围内, 这样的参数是可以用来描述材料的断裂过程的. 对于材料 CZ, 其临界值约为 0.90. 对于材料 M, 其临界值约为 1.95.

表 3 实验测量与数值计算得到的裂纹尖端各参数的临界值

Table 3 The critical values of some crack tip deformation parameters measured from experiment and numerical analysis

Material	Specimen No.	β_{eq} ($^\circ$)	$(CTOD + D_0) / \text{mm}$	$(CTSD + R_0) / \text{mm}$	V_{GC}
CZ	PM7	30	0.263	—	0.95
CZ	PM5	45	0.277	—	0.85
CZ	PM4	15	0.234	0.205	0.91
CZ	PM2	0	0.18	0.250	0.97
M	PM9	30	0.390	0.219	1.91
M	PM8	45	0.460	0.177	1.97
M	PM10	75	0.389	—	1.92
M	PM11	0	0.156	0.447	1.95

6 结 论

综合以上分析, 可得以下结论:

1) 韧性材料中, 裂端的变形呈非对称的钝化变形, 裂纹的启裂基本位于裂端钝化变形较大的区域. 即使是在高韧性材料中裂端发生强烈锐化变形的情况下.

2) 空穴扩张比参数在钝化裂尖的分布特征是随距裂端的距离而变化的. 这与线弹性断裂理论中尖端裂纹端力学参数的分布特征与距离 r 无关是截然不同的. 该分布变化的区域随复合加载下复合比的变化而移动, 纯 I 型时距离裂端较远, 纯 II 型时距离裂端较近.

3) 在钝化裂纹尖端前缘, 空穴扩张比的极大值位置与对应条件下裂纹的启裂位置相当一致. 启裂后裂纹的扩展方向可根据具体材料在相应的范围内与空穴扩张比的极大值的分布方向有较好的对应关系.

4) 通过相应的实验及数值分析, 得到裂纹启裂时钝化裂纹尖端前缘空穴扩张比的临界值不敏感于复合比的变化, 可作为裂纹启裂时的控制参数.

参 考 文 献

- 1 Erdogan F, Sih GC. On crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *J Basic Engng, Trans ASME*, 1963, 85:519~529
- 2 Sih CC. Some basic problems in fracture mechanics and new concepts. *Engng Fract Mech*, 1973 (5): 365~377
- 3 Koo JM, Choy YS. A new mixed mode fracture criterion: Maximum tangential strain energy density criterion. *Engng Fract Mech*, 1991, 39(3): 443~449
- 4 Cottrell B et al. Mixed mode plane stress ductile fracture. *Int J Fract*, 1982, 20: 243~250
- 5 Mai YW et al. On Mixed-Mode Plane Stress Ductile Fracture. ICF7, Vol 3, 1989. 2269~2278
- 6 郑长卿等. 韧性断裂细观力学的初步研究及其应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1988 (Zheng CQ et al. The Preliminary Study and Application of Ductile Fracture Mecrosopic Mechanics. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1988 (in Chinese))
- 7 Richard H. A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics. *Int J Fract*, 1983, 22: 55
- 8 Bhattacharjee D et al. Ductile fracture in HY100 steel under mixed mode I/mode II loading. *Acta Metall Mater*, 1994, 42(5): 1747~1754
- 9 Maccagno TM et al. The mixed-mode I/II fracture behavior of lightly tempered HY130 steel at room temperature. *Engng Fract Mech*, 1992, 41(6): 805~820

MIXED MODE DUCTILE FRACTURE EXPERIMENT AND ITS CONTROLLING PARAMETER

Zuo Hong Chen Yiheng

(School of Civil Engineering and Mechanics, Xi'an Jiao-Tong University, Xi'an 710049, China)

Zheng Changqing

(Department of Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In this paper, the experiment of a series of plain strain mixed mode ductile fracture is carried out in two kinds of ductile materials (quenched aluminum alloy LY12-CZ and annealed aluminum alloy LY12-M). The microscopic characteristic behavior of deformation and the initiation of blunted crack tip is investigated by using SEM near the area ahead of the blunted crack tip in the middle thickness profile at the critical range of crack initiation. The adaptability of ductile fracture parameter—void growth ratio is re-examined by the experimental data and numerical analysis in large deformation process of the ductile metal materials under mixed mode loading. The comparison between the results from the experiment and those from FEM analysis is based on the same deformation at the blunted crack tip with the aid of the same crack tip opening

Received 20 October 1997, revised 9 June 1998.

displacement (*CTOD*) or crack tip sliding displacement (*CTSD*), then the critical value V_G at which the crack initiation occurs is evaluated. The directions of trace line of maximal value of V_G distribution and the mixed mode fracture angles are discussed in different materials and mixed mode loading conditions.

From the results under comparison and discussion it could be concluded that: (1) The deformation of blunted crack tip appeals as non-symmetry blunted deformation, the initiation position of crack tip is always in the area of violent blunted deformation, specially in the condition of pure shear loading. (2) The distribution of V_G near the blunted crack tip is different from which far away from the crack tip. This property is different from that in Linear Elastic Fracture Theory in which the distribution of V_G is unchanged with the distance from the crack tip. The transferred area of V_G distribution is affected by the loading condition, for example, this transferred area is near the crack tip in pure mode II and it is far away from the crack tip in pure mode I. (3) The position of maximal value of the void growth ratio near crack tip is consistent well with the position of the initiation in the blunted crack tip. And the critical value of the void growth ratio is insensitive to the differences of mixed mode in a definite ductile material. (4) When a kind of characteristic distance which depending on the material properties is considered, the direction of the crack growth is closed with the direction of the distribution of the maximal value of the void growth ratio in a definite distance. So we can conclude that the ductile fracture parameter——void growth ratio could be used to predict the initiation and growth direction of the ductile mixed mode fracture when considering a material characteristic parameter.

Key words ductile mixed mode fracture, ductile fracture controlling parameter, void growth ratio, initiation and growth direction