

裂纹尖端弹塑性变形的实验测量 与有限元计算

周忠良 顾家琳 陈南平
(清华大学工程材料系, 北京 100084)
李国琛 刘洪秋
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 用显微网格数字图像处理方法, 测量了 Fe-Si 材料平面应力条件下 I 型单边裂纹尖端附近的应变场, 并且用弹塑性有限元程序进行了数值模拟. 对实测结果和有限元计算模拟结果进行了对比分析. 结果表明: 逐级更新拉格朗日坐标体系下的弹塑性有限元计算在裂纹尖端不出现严重钝化和损伤的条件下, 可以正确反映裂尖区域的弹塑性变形. 在裂纹接近临界扩展时, 有限元计算与实测结果之间有较大差别, 其原因有待进一步研究.

关键词 裂纹尖端, 弹塑性有限元, 弹塑性变形, 应变场

概 述

为了建立材料断裂准则, 除了需要研究本构模型和材料损伤机理外, 另一个重要问题就是研究裂尖前沿的应力应变场. 1968 年提出的 HRR 奇异解^[1,2]为弹塑性断裂力学提供了理论起点. 为了探明裂尖前沿的变形分布和评定 HRR 解的适用范围, 人们从不同角度进行了研究, 如裂尖钝化影响区^[3]、三轴张力引起的塑性体膨胀^[4]、材料损伤^[5]等. 数值分析方面的有限元计算已取得很大进展^[3,6]. 在实验研究中, 用散斑^[7]、显微网格^[8]等方法测量了裂纹尖端区域内变形场的分布.

在弹塑性裂纹问题的研究中, 将理论计算和实际测量结合起来相互比较方面的工作还开展很少. 实验工作与按实际实验条件进行的理论计算结果相互比较, 有助于综合地和实际地判断裂纹前沿诸多因素的影响和作用范围.

本文用显微网格数字图像处理方法^[9], 测量了 Fe-Si 材料平面应力条件下 I 型单边裂纹尖端区域的应变场, 并且用弹塑性有限元程序对它进行了数值计算, 对实测结果和有限元计算结果进行了对比分析.

1 裂尖区域应变场实验测量

试验材料为含 0.5%Si 的热轧硅钢板, 厚度为 0.5mm. 将钢板冲裁成条状, 并进行去应力退火, 退火工艺为: 随炉升温至 650°C, 保温 20min, 随炉冷却.

1994-04-08 收到第一稿, 1994-12-23 收到修改稿.

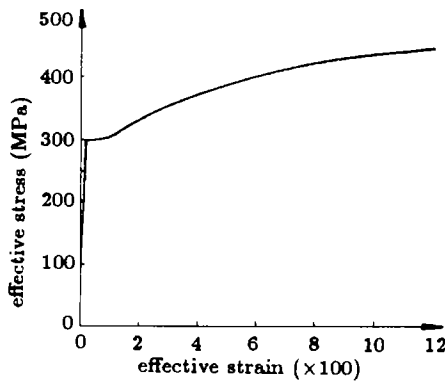


图 1 材料单轴拉伸应力-应变曲线
Fig.1 Stress and strain curve of material

在光学读数显微镜下观察这时材料的金相组织, 晶粒呈等轴状, 平均晶粒尺寸约为 $50\mu\text{m}$. 材料机械性能为: 弹性模量 $E = 1.9 \times 10^5 \text{MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 屈服应力 $\sigma_s = 305 \text{MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_b = 408 \text{MPa}$, 延伸率 $\delta_k = 19\%$, 断面收缩率 $\psi = 12\%$. 图 1 为材料的单轴拉伸应力-应变曲线.

裂纹试样尺寸如图 2 所示. 试样制备过程为: 用线切割方法加工出试样外形、加载孔及疲劳裂纹引口, 并开制长 1mm

左右的疲劳裂纹. 选取疲劳裂纹尖端平直的试样, 以保证 I 型裂纹加载条件. 将试样进行磨制和抛光, 在疲劳裂纹尖端区域刻上 100 线/mm 的显微网格, 刻线区域为 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$. 最终的试样厚度为 0.372mm , 裂纹尺寸如图 2(b) 所示.

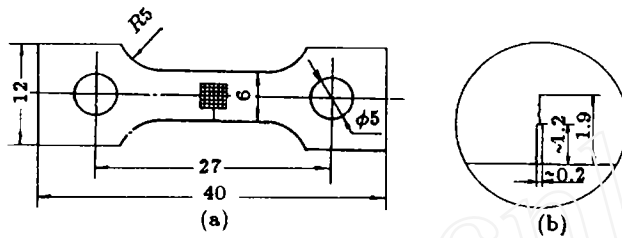


图 2 裂纹试样形状尺寸
(a) 试样尺寸, (b) 裂纹尺寸
Fig.2 Test specimen with crack
(a) Geometry of specimen, (b) Crack dimension

试样的拉伸过程在 HITACHI S-570 扫描电镜上进行. 先拍摄裂尖附近网格的原始图像, 然后缓慢加载, 拍摄同一区域网格变化过程的图像. 将所得网格图像数字化并进行图像处理, 先进行图像预处理, 以增强图像反差并去除干扰点; 然后利用灰度梯度值检测法提取出网格中心线位置, 经过网格中心线自动跟踪和人机对话修改, 并进行图像自动拼接. 经过图像处理识别出网格节点的位置后, 根据变形前后网格节点的变化, 即可求得裂纹尖端区域的位移场和应变场. 应变计算公式为^[12]

$$\varepsilon_{xx} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} - 1$$

$$\varepsilon_{yy} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} - 1$$

$$\gamma_{xy} = \arcsin \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y}}{(1 + \varepsilon_{xx})(1 + \varepsilon_{yy})}$$

设载荷为 P , 板厚为 t , 韧带宽为 B , 取 $\sigma_p/\sigma_s = P/(Bt\sigma_s)$, 其中 $t = 0.372\text{mm}$, $B = 4.108\text{mm}$.

图 3 所示为随着载荷增加, 裂尖区域的变形过程, 图 4 为经过数字图像处理得

到的加载前和载荷 $\sigma_p/\sigma_s = 0.866$ 时的网格形状. 从图 4 中可以看出, 裂纹两侧各有一大变形带, 其方向大约与裂纹成 45° 角.

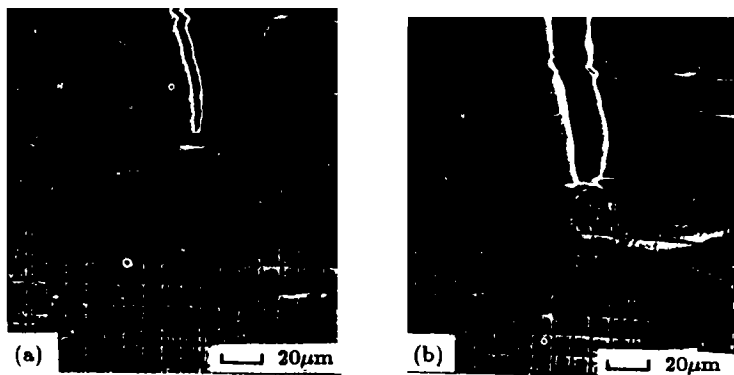


图 3 裂尖区域变形过程
Fig.3 Deformation process of crack tip region
(a) $\sigma_p/\sigma_s = 0.835$, (b) $\sigma_p/\sigma_s = 0.883$

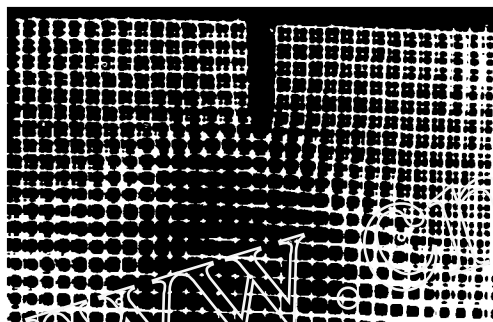


图 4 经数字图像处理后的网格形状
Fig.4 Mesh shape by digital image processing

图 5 为实测的沿 $\theta = 45^\circ$ 方向的裂尖区域应变分量 ε_y -半径 r 关系曲线 (坐标系如图 5(a) 所示). 可以看出, 裂尖前沿应变无奇异性, 最大应变位于离裂尖一定距离的位置上. 随着载荷增加, 最大应变的位置逐渐靠近裂尖.

2 弹塑性有限元计算

有限元计算采用逐级更新拉格朗日坐标体系^[10,11]和弹塑性问题计算的变刚度法 (位移加载), 计算上面实验中的裂纹变形问题.

图 6 为根据实际试样尺寸划分的有限元计算网格, 由于试样的对称性, 只取一半的试样区域进行计算. 最后划分的网格共有 1328 个单元, 703 个节点, 裂尖前沿单元尺寸为 $80\mu\text{m}$.

计算中所用的材料参数已在上节给出. 值得注意的是, 在图 1 所示的材料单轴拉伸应力应变曲线上, 材料进入屈服后有一屈服平台. 在应变小于 1% 时, 材料近似于理想弹塑性材料. 用式 (1) 所示的 Ramberg-Osgood 应力应变关系对其进行拟合

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} = \frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n \quad (1)$$

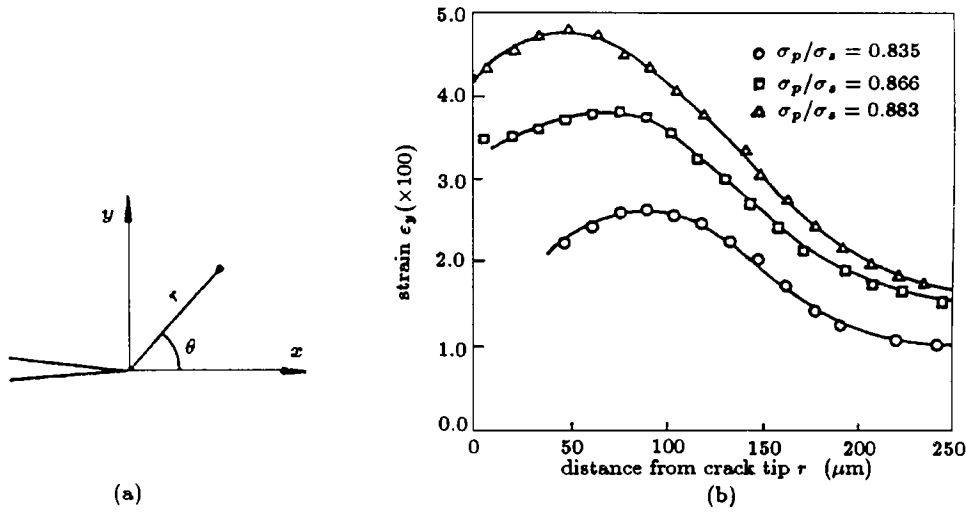


图 5 裂尖区域应变在加载过程中的变化
 (a) 坐标系, (b) 应变分量 ϵ_y 的变化过程
 Fig.5 Strain distribution around crack tip
 (a) Co-ordinate system, (b) Strain ϵ_y versus radius r

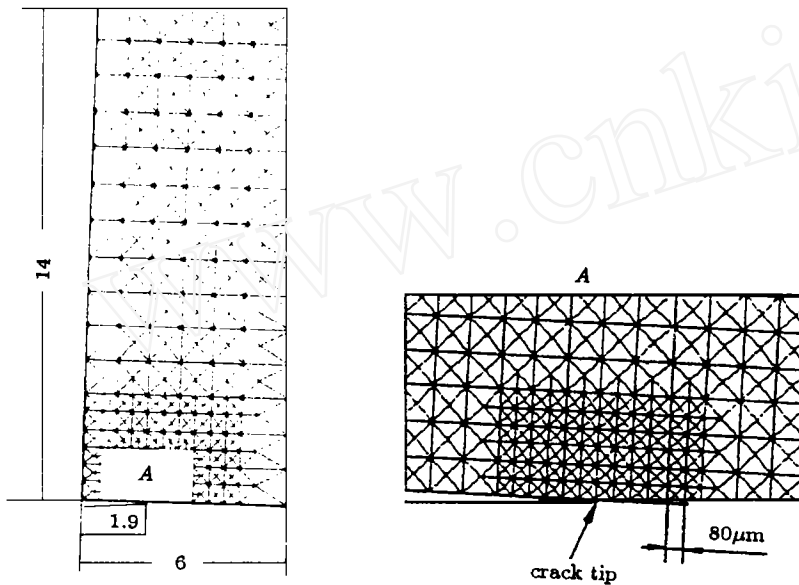


图 6 有限元计算单元划分
 Fig.6 Meshes used in finite element calculation

其中 ϵ_s 为屈服应变, $\epsilon_s = \sigma_s/E$, α 为硬化系数, n 为材料硬化指数. 取 $\alpha = 0.01$ 进行拟合, 在 $\epsilon < 1\%$ 时, n 近似等于 120; $\epsilon > 1\%$ 时, n 等于 15.

按照 HRR 解, 裂尖附近等效应力 σ_e 的分布具有下列形式

$$\sigma_e \propto K_0 \left(\frac{1}{r}\right)^{1/(n+1)} \quad (2)$$

其中 K_0 为一与所加载荷有关的比例因子, r 是离裂尖的距离, n 为材料硬化指数.

图 7(a) 表示了 $\sigma_p/\sigma_s = 0.835$ 时，有限元计算得到的裂尖区域等效应力 σ_e 随离裂尖距离 r 的变化情况，图中采用了双对数坐标。随着离裂尖的距离由远及近，可以发现有下列特点：

- (1) 在离裂尖远处是一直线段，其斜率为 1:2，即 $\sigma_e \propto K_0 \left(\frac{1}{r}\right)^{1/2}$ ，说明是由应力强度因子 K 控制的弹性区，即 K 场。
 - (2) 接下来也是一直线段，其斜率大约为 1:120，即 $\sigma_e \propto K_0 \left(\frac{1}{r}\right)^{1/120}$ ，在此范围内的等效应变低于 1%，材料硬化系数 $n = 120$ ，该范围为 HRR 场。
 - (3) 裂尖前沿为钝化和损伤区。
- 随着载荷增加，HRR 场逐渐向外移动，见图 7(b)。

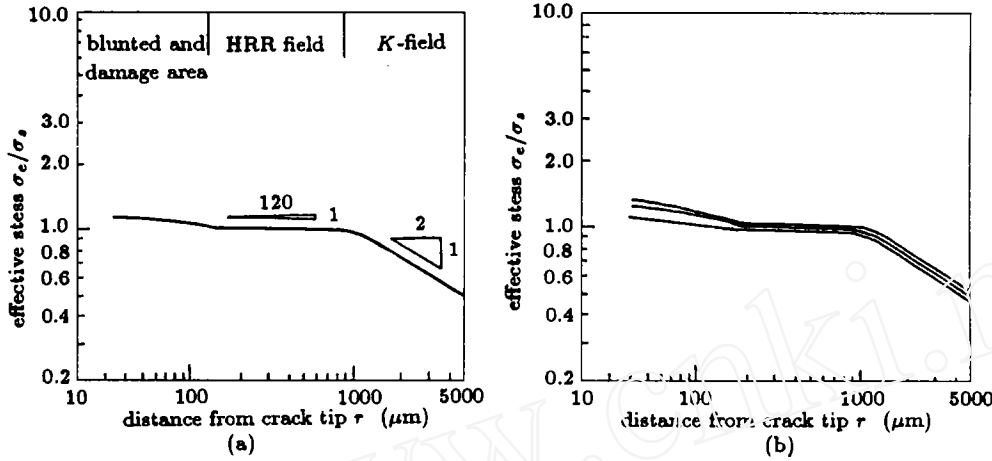


图 7 裂纹尖端的应力分布
 (a) $\sigma_p/\sigma_s = 0.835$ 时等效应力 σ_e -裂尖距离 r 曲线，
 (b) 载荷增加时 σ_e - r 曲线的变化
 Fig.7 Stress distribution in crack tip
 (a) Effective stress versus radius r when $\sigma_p/\sigma_s = 0.835$,
 (b) σ_e - r curves at different load levels

3 实测和有限元计算结果对比

3.1 载荷 - 裂尖张开位移关系曲线对比

图 8 为实测和有限元计算的载荷 - 裂尖张开位移关系曲线。图中载荷用 σ_p/σ_s 表示，裂尖张开位移 CTOD 用离裂尖 $80\mu\text{m}$ 处裂纹表面之间的距离表示，并用韧带宽 B 无量纲化 (即 CTOD/B)。从图中可见，有限元计算结果与实测数据比较符合，尤其在开始阶段。在出现较大弹塑性变形时，它们之间大约有 6% 左右的误差。

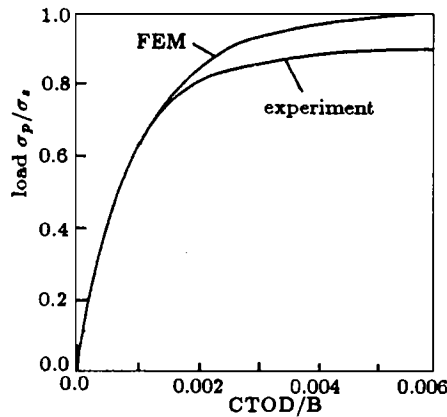


图 8 载荷 - 裂尖张开位移曲线
 Fig.8 Load-crack tip opening displacement curve

3.2 裂尖区域的应变分布对比

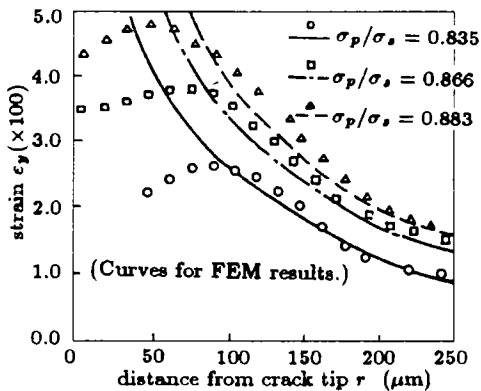


图9 裂尖区域应变分布对比
Fig.9 Comparison of strain distribution
in crack tip region

图9为裂纹尖端区域的应变分布结果比较,其中表示了 σ_p/σ_s 分别为0.835, 0.866, 0.883三种载荷下,应变分量 ε_y 随离裂尖距离 r 的变化曲线。

分析 $\sigma_p/\sigma_s = 0.835$ 时的情况,当 $r > 100\mu\text{m}$ 时,两种结果符合得很好;在紧靠裂尖前沿,实测结果大大低于有限元结果.随着载荷增加,实测结果与有限元计算结果之间误差加大。

通过对比可以看出,逐级更新拉格朗日坐标体系下的弹塑性有限元计算在裂纹尖端不出现严重钝化和损伤的条件下,可以正确反映裂尖区域的弹塑性变形.在裂纹接近临界扩展时,有限元计算与实测结果之间有较大差别,其原因有待进一步研究。

4 结论

- 1) 裂尖前沿最大应变位置离裂尖有一定距离,随着载荷增加,最大应变位置逐渐靠近裂尖。
- 2) 裂尖变形区随离裂尖距离的增加,依次是钝化和损伤区、HRR场区, K 场区。
- 3) 在钝化区外,弹塑性有限元计算与HRR场相符,并可以正确反映裂尖区域的变形情况.在钝化区内,计算与实测结果差别较大。

参 考 文 献

- 1 Hutchinson JW. *J Mech Phys Solids*, 1968, 16: 13
- 2 Rice JR, Rosengren GF. *J Mech Phys Solids*, 1968, 16: 1
- 3 Aoki S, Kishimoto K, Yoshida T, Sakata M. *J Mech Phys Solids*, 1987, 35: 431
- 4 Liu HQ, Li GC. *Eng Fract Mech*, 1992, 42: 737
- 5 Chow CL, Wang J. *Eng Fract Mech*, 1988, 30: 547
- 6 Mishra A, Singh MC. *Int J Eng Fract Mech*, 1988, 30: 609
- 7 Evans WT, Luxmoore A. *Eng Fract Mech*, 1974, 6: 735
- 8 姚可夫. 裂尖尖端塑性变形的微观与细观观察, 清华大学博士学位论文, 1989-04
- 9 周忠良, 陈南平, 顾家琳. 显微网格数字图像处理方法及其在微区变形场测量中的应用. 理化检验物理分册, 1994(4)
- 10 McMeeking RM, Rice JR. *Int J Solids Structures*, 1983, 11: 85
- 11 李国琛, M. 耶纳. 塑性大应变微结构力学. 科学出版社, 1993-02
- 12 曹起骧, 叶绍英, 谢冰, 马喜腾. 密栅云纹原理及应用. 清华大学出版社, 1983-05

COMPARISON OF FINITE ELEMENT CALCULATION
AND EXPERIMENTAL STUDY OF
ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION
AT CRACK TIP

Zhou Zhongliang Gu Jialin Chen Nanping

(Dept. of Material, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Li Guochen Liu Hongqiu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The strain field around a mode I crack tip with plane stress deformation for Fe-0.5% Si material specimen was measured by SEM, micro grid method and digital image processing. Finite element method (FEM) for elastic-plastic deformation was used to calculate the experimental object. Comparison of experimental and FEM results showed that FEM based on the updated Lagrangian formulation was in good accordance with experimental measurement. But some factors, e.g., plastic dilatancy, should be included as crack tip was nearly to extend.

Key words crack tip, elastic-plastic finite element method, strain field, elastic-plastic deformation