

文章编号: 1000-4750(2005)02-0062-05

材料裂纹体 $J\sim Q$ 断裂准则的工程化方法研究

*张 敏¹, 马 博¹, 史耀武²

(1. 西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 北京工业大学材料科学与工程学院 北京 100022)

摘 要: 结合现有材料裂纹体断裂参量的表达式, 详细讨论了均匀材料裂纹体的 $J\sim Q$ 双参数准则, 并对该准则中各参量的计算方法进行了简化。为了工程应用方便, 进一步分析了 Q 参量有限元数值解的分布规律, 并曲线拟合得到了该参量的工程化计算方法, 最后对工程化 Q 参量计算方法在断裂参量计算中的有效性进行了讨论。

关键词: 断裂准则; 断裂参量; 有限元; Q 因子; J 积分

中图分类号: O346 文献标识码: A

ENGINEERING TREATMENT METHOD FOR $J\sim Q$ THEORY OF CRACKED STRUCTURE

*ZHANG Min¹, MA Bo¹, SHI Yao-wu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the solution of stress-strain field of cracked structures, the double-parameter $J\sim Q$ theory of homogenous materials is discussed. The parameters in the theory are analyzed for engineering application, and the value of the parameter Q is calculated by the finite element method. As a result, the distribution of Q parameter is obtained. The effectiveness of the present method for assessing the safety of the cracked structure is discussed.

Key words: fracture criterion; fracture parameter; finite element method; Q factor; J -integral

1 前言

从断裂力学的发展来看, 早期的线弹性断裂力学对于弹性材料及小范围屈服的应力场研究发现, 由于 K 场的存在, 使得单参数的 K 准则行之有效^[1]。后来以 HRR 应力奇异场为基础的弹塑性 J 积分准则在韧性材料弹塑性断裂分析中得到了广泛应用^[2,3,4]。然而, 为了确定一个与试件形状、尺寸、裂

纹几何等因素无关的材料断裂韧性参量还有很多困难。目前的材料韧性 J_{IC} 测试标准对试件几何尺寸做了严格规定^[5,6]。而实际测试表明, 不同试件几何, 其 J_{IC} 和 J 阻力曲线明显存在较大差异, 说明 J_{IC} 对试件几何形状具有一定的依赖性^[7]。由此说明, 单参数的 J 积分准则在描述韧性断裂时存在一定的缺陷。

收稿日期: 2003-05-07; 修改日期: 2003-08-27

基金项目: 陕西省教委科学基金项目“焊接接头完整性评价方法及其专家系统研究”

作者简介: *张 敏(1967), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 从事焊接结构强度与断裂, 弹塑性断裂, 数值模拟等方面的科研和教学工作 (E-mail: zhmmn@263.net);

马 博(1978), 男, 宁夏人, 硕士生, 从事焊接结构强度与断裂方面的科研工作;

史耀武(1940), 男, 北京市人, 教授, 博士生导师, 从事焊接结构强度与断裂, 焊接结构完整性评价方面的的科研和教学工作

本文从讨论应力场及其断裂准则出发, 讨论材料断裂准则的工程化方法, 并进行工程简化, 以期得到了更加符合实际的材料裂纹体断裂评价的双参数准则。

2 J-Q 双参数准则的提出

目前关于裂纹体 J 积分主导有效性的范围以及非 J 主导情况下应力场的修正方法已有不少研究结果. 已有的有限元计算表明, HRR 场控制区的大小因试件几何的不同而有所改变^[7,8]。

考虑到工程界常用的幂硬化材料, 应用 Remberg-Osgood 应力—应变曲线所表示的关系如下:

$$\varepsilon / \varepsilon_y = \sigma / \sigma_y + \alpha(\sigma / \sigma_y)^n \quad (1)$$

参照 Sharma^[9]等人的结果, 不同几何裂纹体材料的双参数应力场计算式表示如下:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_y} = \left(\frac{J}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) + Q \left(\frac{r \sigma_y}{J} \right)^\lambda \tilde{\sigma}_{ij}(\theta) \quad (2)$$

+ 高阶项

式中各符号的意义如下:

J : 为 Rice 的 J 积分;

Q : 材料裂纹体的应力三轴性参数;

$\alpha, \sigma_y, \varepsilon_y$: 材料常数;

$\tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n)$, $\tilde{\sigma}_{ij}(\theta)$: 应力角分布函数;

λ : 与材料应变硬化指数有关的常数系数, 可用有限元方法计算^[10]。

本文考虑一种较为简单的方法, 参照文献[11], 将式(2)写成与 HRR 场一致的形式, 和以往的应力计算式相兼容, 并采用 J_M 作为应力场幅值因子, 有下面的应力计算式:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_y \left(\frac{J}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \sigma_{ij}(\theta, n) + Q \sigma_y \delta_{ij} \\ &= \sigma_y \left(\frac{J_M}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \sigma_{ij}(\theta, n) \end{aligned} \quad (3)$$

如果应用上式来表征裂端韧带上的主应力解, 在裂端韧带上的某一点 $r=r_i$, $\theta=0$ 处, 有如下的计算式:

$$\frac{\sigma_{yy}}{\sigma_y} - Q = \left(\frac{J}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n r_i} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \sigma_{ij}(\theta, n) \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{yy}}{\sigma_y} = \left(\frac{J_M}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n r_i} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \sigma_{ij}(\theta, n) \quad (5)$$

联立以上两式可得:

$$\frac{\sigma_{yy} / \sigma_y}{\sigma_{yy} / \sigma_y - Q} = \left(\frac{J_M}{J} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (6)$$

这样可以推算出一个 J_M 参量如下:

$$J_M = J \left(1 - \frac{Q}{\sigma_{yy} / \sigma_y} \right)^{-(n+1)} \begin{cases} r = r_i \\ \theta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

上式中假设裂端韧带上的第一主应力在其特征点达到临界状态, 裂纹体断裂失效, 此时的 J 积分参量、 Q 参量也均达到断裂临界值, 即在裂端韧带上 $r=r_c$, $\theta=0$ 处, 各参量达到如下临界值:

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_{yy}^c = \sigma_y, \quad J = J_c, \quad Q = Q_c$$

式中 J_c 表示断裂临界状态时 J 积分值, 也即材料的断裂韧性, Q_c 则表示断裂临界状态时 Q 参量的大小。

将上面式(7)所确定的 $J-Q$ 断裂准则推广到更一般的形式, 取消仅考虑裂端韧带上第一主应力这一限制条件, 以裂纹结构靠近裂纹尖端位置处任一主应力作为这些断裂参量的取值原则, 将材料裂纹体的断裂准则表示为成如下更为通用的形式:

断裂参量:

$$\begin{aligned} J_M &= J \cdot \left(1 - \frac{Q}{\sigma_{yy} / \sigma_y} \right)^{-(n+1)} \\ &= J \cdot \left(1 - \frac{Q}{k} \right)^{-(n+1)}, \quad \begin{cases} r = r_i \\ \theta = \theta_i \end{cases} \end{aligned} \quad (8a)$$

断裂阻力:

$$\begin{aligned} J_M^c &= J_c \cdot \left(1 - \frac{Q_c}{\sigma_{yy}^c / \sigma_y} \right)^{-(n+1)} \\ &= J_c \cdot \left(1 - \frac{Q_c}{k_c} \right)^{-(n+1)}, \quad \begin{cases} r = r_c \\ \theta = \theta_c \end{cases} \end{aligned} \quad (8b)$$

断裂临界状态:

$$J_M \leq J_M^c \quad (9)$$

上式中 k 为应用载荷作用下极坐标系中, 裂纹尖端近场 $r=r_i$ 处主应力和屈服应力之比, $k = \sigma_{yy} / \sigma_y$; k_c 则为结构裂纹开始扩展临界状态裂纹尖端场 $r=r_c$ 处的主应力和屈服应力之比, 计算方法为 $k_c = \sigma_{yy}^c / \sigma_y$ 。

一般地, 对于裂纹几何和加载方式均对称的裂纹缺陷体, 式中对应于极坐标系的角仍为

$\theta_i = \theta_c = 0$ 。现就式(8), 对如下几个参数进行讨论和简化。

3 基于工程应用的各参量的计算

3.1 r_i 和 r_c 的取值

根据 J 积分与路径无关的性质, 式(8a)中的 J 积分值是一个与坐标参量 r_i 无关的参数, 参照已有的弹塑性裂端场中关于断裂特征点的研究方法[12,13,14], 近似地取:

$$r_i = 2J / \sigma_y \quad (10)$$

式(8)中, r_c 为某一载荷作用下材料的断裂特征点, 也即反映应力场中材料断裂本质特性的坐标函数。基于材料损伤力学的探索, 文献[15]研究表明断裂特征点(也称之为微孔聚合发生的特征距离)的位置决定于材料性能, 且与材料的夹杂粒子半径有很大关系:

$$r_c = 68R_0 \quad (11)$$

上式中, R_0 为材料的夹杂粒子半径。

3.2 Q 及 Q_c 取值的讨论

根据文献[12,13,15], 对于钝化裂纹模型, 仍取 Q 为如下的计算式:

$$Q = (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{HRR}) / \sigma_y \quad (r = 2J / \sigma_y, \theta = 0) \quad (12)$$

临界值 Q_c 的取值仍以材料测试时其所处的临界状态载荷水平 $P = P_c$, 通过一定的途径结合 P_c 值进行估算。

3.3 k 及 k_c 的工程算法

$k = \sigma_{yy} / \sigma_y$ 的值则可简单地按 HRR 场进行估算, 按照这种方法所得到的裂纹驱动力 J_M 应是略高于裂纹体的实际 J_M 值, 如果将其应用于工程实际评定过程中的断裂驱动力估计, 得到的结论是偏安全的。也即 k 值按下式来计算:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha \varepsilon_y \sigma_y I_n (r \sigma_y / J)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \sigma_{ij}(\theta, n) \left(\frac{r \sigma_y}{J} = 2 \right) \quad (13)$$

对于 k_c 的取值, 本文参照[1]的方法作一个全塑性假设, 认为裂纹体在载荷作用下处于全塑性状态, 此时弹性应变分量与塑性应变分量相比可以忽略不计, 然后根据文献[16]所引用的文献[17]方法, 在裂纹体的临界状态有:

$$k_c = \frac{\sigma_{yy}^c}{\sigma_y} = \frac{\sigma_{yy}^{\infty}}{\sigma_y} = \frac{P_c}{P_0} \quad (14)$$

式中, σ_{yy}^{∞} 表示临界状态时远场边界上的主应力值, P_c 为结构处于临界起裂状态时施加于裂纹体上的外载荷测试值, P_0 为裂纹结构的极限荷载, K_c 为裂尖韧带上 $r = r_c$ 处的作用应力与极限应力之比。

4 Q 参量的工程估算

Q 参量在其韧带上的值随无量纲化距离参数 $r \sigma_y / J$ 的变化而不同, 严格的来说, Q 是与计算点坐标相关的一个函数, 因此参数 Q 的取值应考虑到 J - Q 主导区的范围, 以及应力的分布状况。

图 1 是不同载荷水平作用情况下, 三种裂纹深度 ($a/W=0.10, 0.30, 0.50$) 中心裂纹板的 Q 参量有限元计算结果及其随无量纲化载荷参数 P/P_0 的变化规

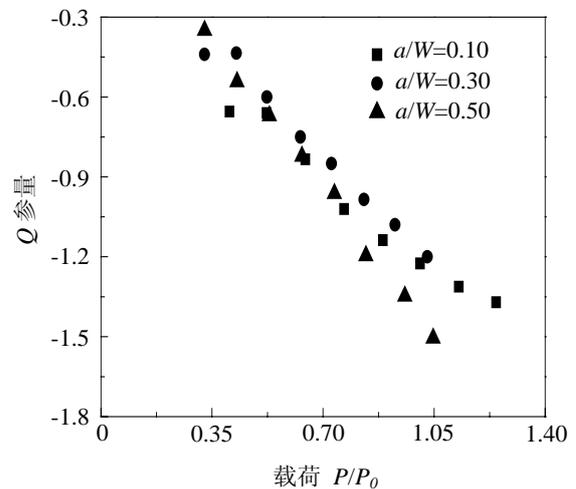


图 1 不同裂纹, Q 参量与载荷 P/P_0 的关系

Fig.1 Relationship between Q and P/P_0 for different crack geometries

律, 计算方法见文献[18]。从图中可以看出, Q 参量与无量纲载荷水平值 P/P_0 近似于直线关系, 因此取下式作为 Q 参量的工程估算式:

$$Q = k_1 + k_2 \cdot P / P_0 \quad (15)$$

式中, k_1 和 k_2 是图 1 中的线性回归系数。

将图 1 中有限元计算的 Q 参量与 P/P_0 之间的关系按直线规律进行回归(回归的相关系数均介于 0.95~1.0 之间), 然后根据所回归的数据将上式(15)中的 k_1 和 k_2 系数进行简化, 所得到的数值列于表 1。

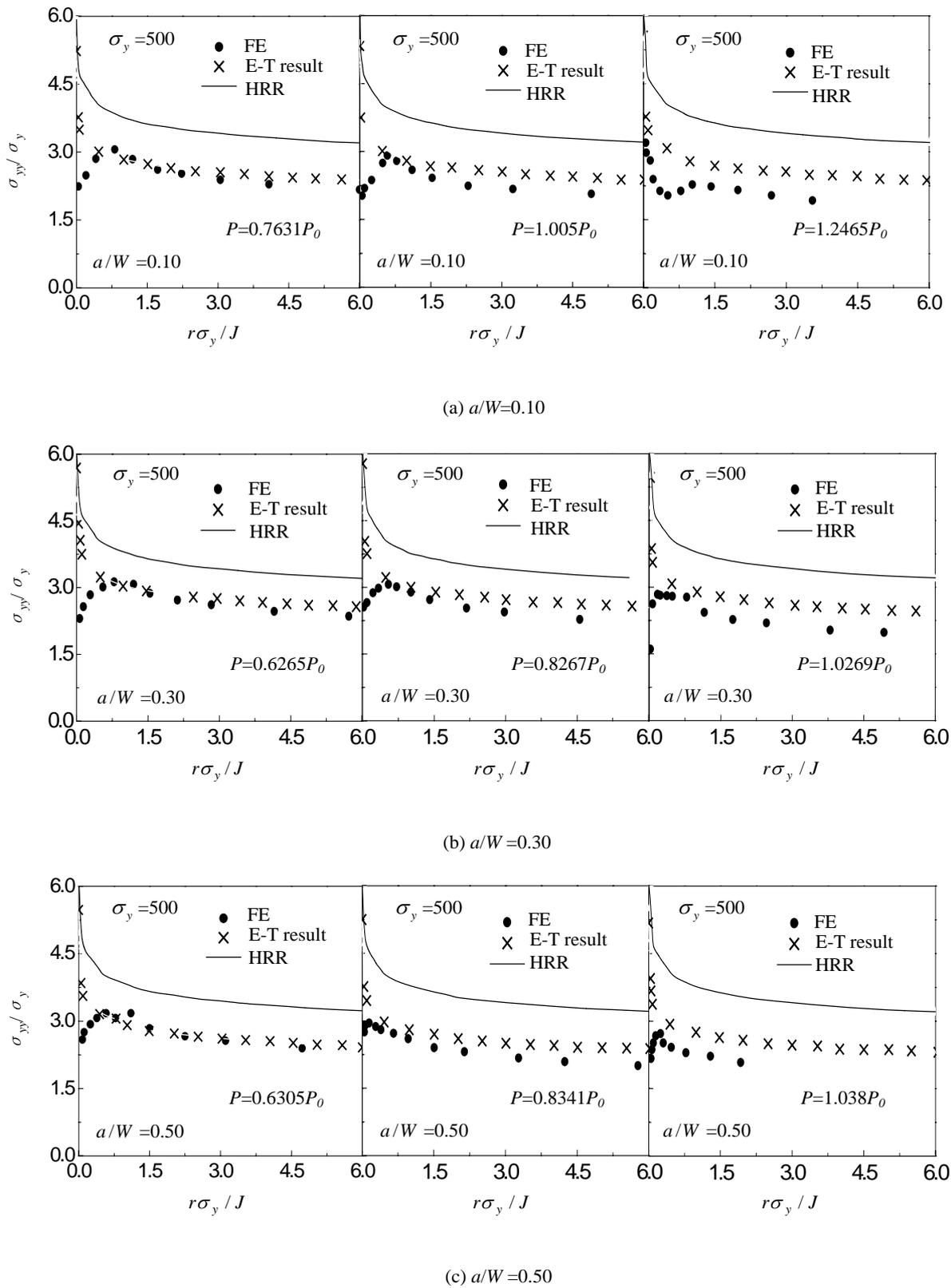


图 2 不同裂纹深度裂纹体应力场比较结果(图中材料屈服强度的单位为 MPa)

Fig.2 Stress fields of cracked structure at different crack depths (Unit of material yield strength: MPa)

表 1 Q 计算式中各系数值Table 1 Coefficients in the expression of Q

a/W	k_1	k_2
$a/W=0.10$	0.04	-1.22
$a/W=0.30$	0.35	-0.76
$a/W=0.50$	0.41	-1.7

依据式(2), J - Q 双参数准则的材料裂纹体应力场可按式(3)来进行计算, 亦可表述为下式:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_y} = \left(\frac{J_M}{r\sigma_y} \right)^{1/(n+1)} \cdot (\alpha \varepsilon_y I_n)^{-1/(n+1)} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (16)$$

为了验证结果的有效性, 将材料应力场的有限元计算结果、HRR 场解以及式(16) 所估算的结果进行比较, 其结果示于图 2 中(图中的 E-T result 为式 16 的均匀材料裂端主应力估算值)。从图中的比较结果可以看出, 不同载荷水平作用下, 新建立的双参数断裂参量式(8)与有限元的应力解结果符合程度较好, 并且大多数情况下, 估算值要略高于有限元的应力解, 说明应用上文所提出的断裂参量及其各参量的估算法来计算裂纹驱动力 J_M , 将其用于实际工程结构的缺陷评定是可行的, 并且结论是偏安全的。

5 结论

(1) 本文结合有限元数值解, 对断裂准则中各参量的工程估算以及各参量临界值的测试和估算作了深入讨论, 提出了材料裂纹体断裂准则计算式中各参量及其断裂临界状态值的工程估算方法, 使新的断裂参量能够应用于工程实际。

(2) 参考 HRR 场解的结果, 对双参数断裂参量在反映均匀材料应力场的有效性方面进行了比较研究, 证明新的断裂准则能够较好地反映平面应变条件下均匀材料应力场的实质, 解决了单参数 J 积分参量不能完全反映平面应变均匀材料应力应变场这一困难, 同时也为工程评定方法的建立奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] Kanninen M F, Popelar C H. Advanced fracture mechanics [M]. New York: Oxford University Press, 1995.
- [2] Hutchinson J W. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material [J]. Journal of the Mechanics Physics and Solids, 1968, 16(1): 13-31.
- [3] Rice J R, Rosengren G F. Plane strain deformation near a

crack tip in a power-law hardening materail [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1986, 16(1): 1-12.

- [4] Shin G C, Sommer E, Dahl W. Application of fracture mechanics to materials and structures [M]. The Hague: Marrinus Nijhoff Publishers, 1984: 401-413.
- [5] GB2038-91, 金属材料延性断裂韧性 J_{IC} 试验方法[BS]. 国家技术监督局, 1991.
- [6] GB2038-91, Experimental method for metal material fracture toughness J_{IC} [BS]. National Bureau of Quality and Technical Supervision, China, 1991. (in Chinese)
- [6] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [7] Lu Yizhong. Engineer fracture mächenics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996. (in Chinese)
- [7] McMeeking R M, Park P M. Thickness and side-groove effects on J and J-resistance curves for A522-B steel at 93 °C[R]. ASTM STP668, 1997. 426-450.
- [8] Shin C F, German M D. Requirements for a one parameter characterzational of crack tip field by the HRR sigilativity [J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(1): 27-43.
- [9] Sharm S M, Aravaw N. Determination of higher-order terms in asymptotic elastoplastic crack tip solutions [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39(8): 1043-1072.
- [10] Li Xia, Wang T C, Shin C F. Higher-order analysis of crack tip in elastic power-law hardening matetials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1993, 41(4): 665-687.
- [11] 马法尚. 钝裂纹端部弹塑性应力应变场及其断裂准则 [D]. 西安: 西安交通大学, 1992.
- [11] Ma Fashang. Sptress-strain field and fracture criterion of blunt cracked structure [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1992. (in Chinese)
- [12] O'Powd N P, Shin C F. Family of crack tip fields characterized by a triaxiality parameter structure of fields [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39(8): 989-1015.
- [13] O'Powd N P, Shin C F. Family of crack tip fields characterized by a triaxiality parameter structute of fields [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1991, 40(8): 939-963.
- [14] Ma F S, Kang Z B. Stresses deformaion and porosities in standard fracture specimes [J]. Acta Metallurgy Material, 1995, 42(2): 497-507.
- [15] 马发尚, 匡震邦. 韧性断裂的微观模型及其在约束中的作用[J]. 力学学报, 1995, 27(增刊): 121-124.
- [15] Ma Fashang, Kuang Zhenbang. Micro mode of fracture toughness and function on restriction [J]. Acta Mechanica Sinica, 1995, 27(Supplement): 121-124. (in Chinese)
- [16] Shin C F, German M D, Kumar V. An engineering approach for examining crack growth and stability in flawed structure [J]. International Journal of Press Vessels and Piping, 1981, 9(2): 159-196.
- [17] Il'yushin A A. The theory of small elastic- plastic deformations [J]. Prikadnaia Matematikai Mekhanika, DMM. 1946, 10: 347-356.
- [18] Zhang Min, Shi Y W, Zhang X P. Influence of strength mis-mtching on crack driving force and failure assessment curve of welding [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 70(1): 33-41.