

文章编号: 1000-0887(003) 10_10 7_08

韧脆转变的一种细观随机模糊统计分析^{*}

吕震宙¹, 岳珠峰, 冯蕴雯¹

(1. 西北工业大学 飞机工程系, 西安 71007 ;
. 西北工业大学 工程力学系, 西安 71007)

(我刊编委岳珠峰来稿)

摘要: 对不同温度和应力状态下 40Cr 材料进行大子样宏观试验和细观观测, 提出了一种新的材料断裂韧脆转变统计随机模糊模型。该模型认为, 在统计意义上, 材料的韧性断裂为空穴机制, 临界空穴扩张比参数可以作为韧性断裂的判据; 材料的脆性断裂可以用内嵌币状裂纹的脆性断裂模型来模拟, 为此测量断裂特征长度, 提出并具体计算了控制币状裂纹失稳扩张的细观临界应力强度因子; 在韧脆转变区域内, 这两种机理并存并相互竞争, 为此提出了模糊准则。对模型参数进行了测量和统计分析, 给出分布规律, 给出了计算断裂特征的概率模型。计算了韧脆转变区域内的细观机制变化和宏观响应。结果表明, 该模型及分析方法可以很好地模拟应力状态及温度对韧脆转变的影响

关键词: 韧脆转变; 断裂准则; 随机性; 模糊性

中图分类号: TB115; TG116 **文献标识码:** A

引 言

工程结构的断裂由韧性向脆性转变往往导致灾难性后果。韧脆转变(DBT)问题是工程界和学术界长期以来十分关注的一个主要研究内容, 它涉及的因素较多, 如温度、应力状态、应变率等外因和材料的细观组成及热处理等内因。准确定量描述韧脆转变过程中的断裂机制变化, 寻找控制参量是研究的宗旨。

韧脆转变是一个综合问题。它包括材料的韧性断裂、脆性断裂以及转化机制。对于一般结构钢, 韧性断裂一般认为是空穴机制, 空穴的形核、扩大直至聚合导致韧性断裂; 脆性断裂则认为空穴不易长大。通常认为控制韧性断裂的细观参量与空穴的大小和密度等相关^[1, 2], 而脆性断裂可以用应力强度因子来控制, 也可以用裂纹尖端特征长度处的拉应力来表征^[3]。因此用细观和宏观相结合的方法来研究韧脆转变区域的机制变化和控制参量, 则有助于韧脆转变问题的解决。

细观模型的一个显著特点为模型参数的随机性^[4], 考虑断裂状态的模糊性可以更好地反应断裂的本质^[5]。为了较全面研究韧脆转变问题, 本文对 40Cr 钢制光滑、缺口拉伸试件以及 3 点弯曲试件在不同温度下进行了试验, 有效度样数为 41; 试样断口进行电镜观测获得 037

* 收稿日期: 000_03_09; 修订日期: 003_05_13

基金项目: 航空科学基金资助项目(00B53010); 航天基金和陕西省自然科学基金联合资助项目

作者简介: 吕震宙(1966—), 女, 湖北黄石人, 教授, 博士(E-mail: zfyue@nwpu.edu.cn)。

组有效数据,从而可以对韧脆转变问题进行大子样分析。

1 材料和实验方案

采用 40Cr 钢材料,其成分示于表 1,为调质态。

表 1 40Cr 材料成分(干重) (%)

| C | Si | Mn | S | P | Ni | Cr | Cu |
|-----|------|------|-------|------|-----|------|------|
| 0.4 | 0.18 | 0.09 | 0.018 | 0.01 | 0.0 | 0.96 | 0.01 |

光滑拉伸试件加工成直径为 10 mm 标距 50 mm 的标准试样,切口试样在光滑拉伸试件的基础上在标距中心处加工 $\rho = 1$ 和 4 mm 的 U 型切口,切口内直径为 6 mm。三点弯曲试件取 98 mm \times mm \times 18 mm 的标准型式。试验温度为 5℃、-30℃、-60℃、-90℃、-110℃及 -196℃,温度控制误差为 \pm ℃,属静态试验。所有试验在 Instron1196 和 WE60 上进行,拉伸试件记录载荷_轴向位移_颈缩位移曲线,3 点弯曲记录载荷_裂纹张开位移曲线,进而采用有限元获得试件的应力和应变分布^[6]。

所有试样断口均放在 S_500A 扫描电子显微镜(SEM)上观测,测量空穴的初始(所含杂质)半径和空穴半径,并且测量韧窝区域和脆性断裂区域的面积。

试验结果

1) 随着温度的下降和缺口半径的减小,材料发生韧脆转变,光滑拉伸试件的转变温度最低,缺口半径越小转变温度越高,3 点弯曲试件最高。

2) 对于拉伸试件,随着温度的下降和缺口半径的减小,材料的断裂机制由韧窝向韧窝+准解理,韧+准解理+沿晶,解理+沿晶模式逐渐转变。对于 3 点弯曲试件随着温度的下降也存在着类似的转变过程。

3) 随着温度的下降,空穴扩张量逐渐减小。但是即使在解理+沿晶断裂的断面上,仍然可以观察到空穴,并且材料的失稳扩展仍受控于空穴^[6]。3 点弯曲试件断口也发现空穴。

4) 细观参量具有一定的分散性,需要进行统计分析;断裂状态也有一定的分散性。

3 模型的建立

3.1 韧性断裂准则

文献[1,]指出,对于常用结构钢的韧性断裂,临界空穴扩张比参数可以作为断裂准则:

$$R \geq R_c \quad (1)$$

R 为空穴半径; R_c 为临界空穴半径,它为与温度相关的材料常数。

空穴的长大规律可以用下式表示^[7]

$$R = R_0 \exp \left[C_1 \exp \left(\frac{3}{R_0} \Delta \varepsilon \right) \right], \quad (2)$$

式中 R_0 为空穴形核(初始)半径, C_1 为独立于应力状态的常数, $R_0 (= \sigma_m / \sigma_e, \sigma_m$ 为平均应力, σ_e 为等效应力) 为应力三维度, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_p - \varepsilon_i$, ε_p 为等效塑性应变, ε_i 为形核应变。

3.2 脆性断裂准则

根据实验现象,可以设材料内部存在一内嵌币状空穴,半径为 R ,空穴边端点的应力强度因子为^[8]

$$K_{I m} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi R}, \tag{3}$$

σ_z 为轴向应力分量, $K_{I m}$ 为细观断裂强度因子。当 $K_{I m}$ 达到细观临界断裂强度因子 $K_{I mc}$ 时, 即发生脆性断裂, 其准则可以表示成下式

$$K_{I m} \geq K_{I mc} \tag{4}$$

3 点弯曲试件的应力强度因子的计算公式为

$$K_{I c} = \sigma_c \sqrt{\pi L} F, \tag{5}$$

式中 σ_c 为临界应力, L 为裂纹半长度, F 为形状因子。

我们可以认为裂纹试验(包括 3 点弯曲试样)的脆性断裂是由裂纹尖端特征距离处的拉应力控制^[3], 这样定义的细观临界断裂强度因子可以和(5)式定义的宏观应力强度因子联系起来, 近似认为形状系数 F 不变, 即有下式成立

$$K_{I mc} = \sigma_c \sqrt{\pi r^*} F, \tag{6}$$

即裂纹尖端断裂特征长度 r^* 替代裂纹长度。 r^* 可以通过细观测量获得, 本文取杂质之间的距离。

进一步计算 $K_{I mc}$ 时可以采用下式

$$K_{I mc} = K_{I c} \sqrt{\frac{r^*}{L}} \tag{7}$$

3.3 韧脆转变

采用竞争机理, 即形核空穴如果长大到 R_c 则导致韧性断裂, 如果空穴在长大至 R_c 前满足(4)式将导致脆性断裂。在转变区域内, 为两种断裂共存。

3.4 韧脆转变断裂的随机计算模型

用 M 来表示断裂状态, 考虑(1)~(4)及(7)式中的参量的随机性, 用概率来表示 M , 则发生韧性断裂的概率计算如下

定义: $M = R/R_c$, 得 $\ln M = \ln R - \ln R_c$

$$P_d(M) = P(R \geq R_c) = P(M \geq 1) = P(\ln M \geq 0) = \int_1^{\infty} f(M) dM, \tag{8}$$

其中 $f(M)$ 为变量 M 发生韧性断裂的概密度函数。

发生脆性断裂的概率计算如下

定义: $N = K_{I m}/K_{I mc}$, 得 $\ln N = \ln K_{I m} - \ln K_{I mc}$,

$$P_b(N) = P(K_{I m} - K_{I mc} \geq 0) = P(N \geq 1) = P(\ln N \geq 0) = \int_1^{\infty} g(N) dN, \tag{9}$$

其中 $g(N)$ 为变量 N 发生脆性断裂的概率密度函数。

$P_d(M) = 1$ 和 $P_b(N) = 1$ 表示完全韧性断裂和完全脆性断裂。

3.5 韧脆转变断裂的随机模糊计算模型

传统的断裂判据(1)和(4)式分别控制韧性断裂和脆性断裂, 韧性断裂和脆性断裂之间存在着明确的界线。然而事实上, 由于人为因素的影响以及大多数断裂过程的渐变性, 即韧性和脆性断裂本身也没有明确的界线, (1)和(4)式只能判断在某种程度上属于韧性断裂还是脆性断裂, 即也需要同时考虑断裂状态的模糊因素, 从而建立韧脆转变的随机模糊模型。

基于上述事实, 对(1)式而言, 可以认为断裂的韧性和脆性分别为状态空间 V 上的韧性断裂模糊集 d 和脆性断裂模糊集 b , 且它们互为余集。一般可以采用下列正态型隶属函数表示

变量 M 对模糊集的隶属程度^[6]

$$m_d(M) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{M-D}{a}\right)\right] & M \leq D, \\ 1 & M > D, \end{cases} \quad (10)$$

$$m_b(M) = 1 - m_d(M), \quad (11)$$

式中 D 和 a 为专家确定的常数。

这样发生韧性断裂的概率计算公式如下

$$P_d^{(g)}(M) = \int_{-\infty}^{\infty} f(M) m_d(M) dM. \quad (1)$$

对于脆性断裂, 可以取相同的隶属函数, 从而得到发生脆性断裂的概率计算公式如下

$$m_b(N) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{N-D}{a}\right)\right] & N \leq D, \\ 1 & N > D, \end{cases} \quad (13)$$

$$m_d(N) = 1 - m_b(N), \quad (14)$$

$$P_b^{(g)}(N) = \int_{-\infty}^{\infty} g(N) m_b(N) dN. \quad (15)$$

4 变量分析

4.1 基本随机变量的测量和统计分析

在(1)、()、(3)及(7)式参量中, 选择 R_c 、 R_0 和 r^* 为基本随机变量。 R_0 为一级空穴所含杂质的平均半径, 统计分析测量数据发现可以用对数正态来描述。对数正态的密度函数可以用下式表示

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right], \quad (16)$$

式中 $\mu_{\ln x}$ 和 $\sigma_{\ln x}$ 为 $\ln x$ 的均值和均方差, 对 $\ln R_0$ 分别取 1.765 和 0.366 8。

R_c 为一温度相关的参量^[6], 它也可以用对数正态描述。不同温度下的均值和均方差列于表中。

表 2 临界空穴半径 R_c 的对数正态分布参数

| 温度 $T/^\circ\text{C}$ | 5 | -30 | -60 | -90 | -10 |
|-----------------------|-------|------|-------|-------|------|
| $\mu_{\ln R_c}$ | .61 | .50 | .3 | .36 | .9 |
| $\sigma_{\ln R_c}$ | 0.137 | 0.17 | 0.148 | 0.140 | 0.19 |

r^* 测量数据统计分析发现它也可以用对数正态分布予以描述, $\ln r^*$ 的均值和均方差分别为 3.7 和 0.676。

4.2 演绎变量的分析

由()式可知, R 也服从对数正态分布, $\ln M = \ln R - \ln R_c$ 服从正态分布, 正态分布的密度函数如下

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad (17)$$

式中 σ 和 μ 为均方差和均值。

同理 $K_{I\text{m}}$ 和 $K_{I\text{mc}}$ 也服从对数正态分布, $\ln N$ 服从正态分布。表3给出了 $K_{I\text{mc}}$ 的参数。

表3 不同温度下 $K_{I\text{mc}}$ 参数值 $N/\text{mm}^{3/2}$

| 温度 $T/^\circ\text{C}$ | -196 | -10 | -90 | -60 | -30 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\mu_{\ln K_{I\text{mc}}}$ | 35 344 | 40 804 | 47 5 4 | 55 696 | 65 536 |
| $\sigma_{\ln K_{I\text{mc}}}$ | 7 316 | 8 446 | 9 837 | 11 5 9 | 13 566 |

5 模型分析

不同温度下各类试样的应力应变分布可以通过有限元计算和工程算法获得, 进而可以求得试样心部的应力三维度^[5,6]。由于形式的复杂性, 因此本文采用 Monte Carlo 法来模拟, 通过调整模拟次数来确保解的收敛。

5.1 韧性和脆性断裂准则的有效性检验

从实验结果可知, 各类拉伸试件在 5°C 时均为韧性破坏。图1示出了不同试样不同轴向应变断裂概率曲线, 并与试验进行了比较, 由此可见本文提出的韧断准则在宏观上和实验结果一致。图 给出了在试验断裂应变时模拟的空穴平均张大量和实验结果的比较, 也基本上是吻合的。即临界空穴尺寸可以作为韧性断裂的准则。

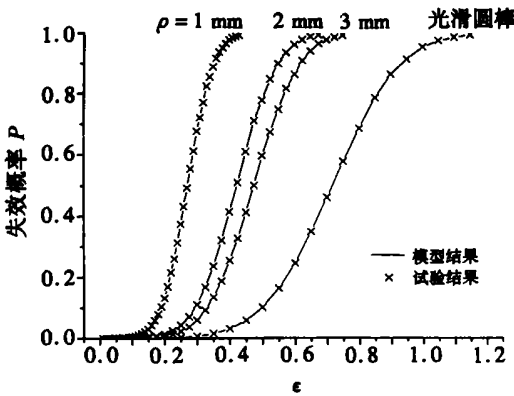


图1 室温时的不同切口试样与光滑试样的失效概率

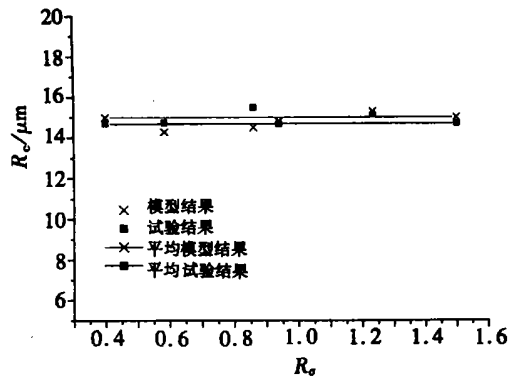


图2 室温时的空穴半径的模型与实验结果比较

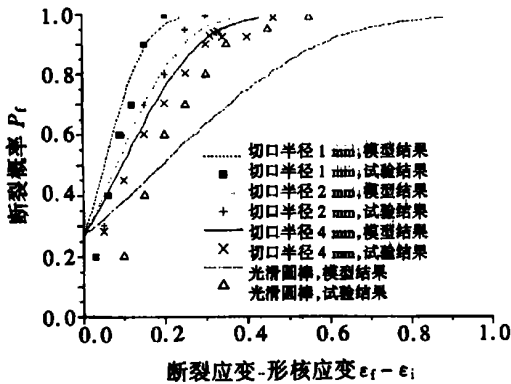


图3 -196°C 时的失效概率的模型与试验结果比较

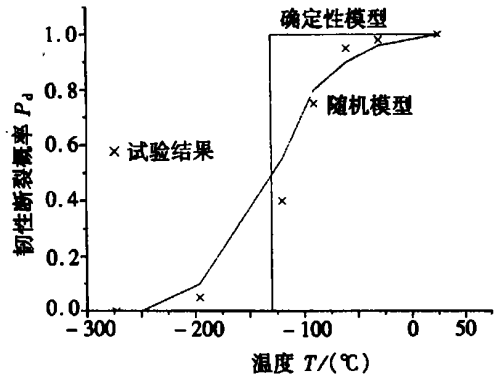


图4 光滑试样的韧性失效概率的模型与试验结果比较

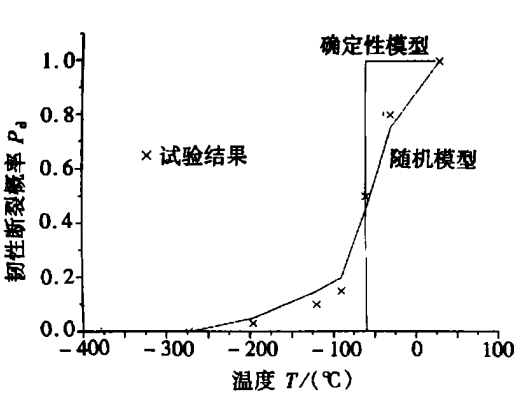


图 5 切口半径 1 mm 的切口试样的韧性失效概率的模型与试验结果比较

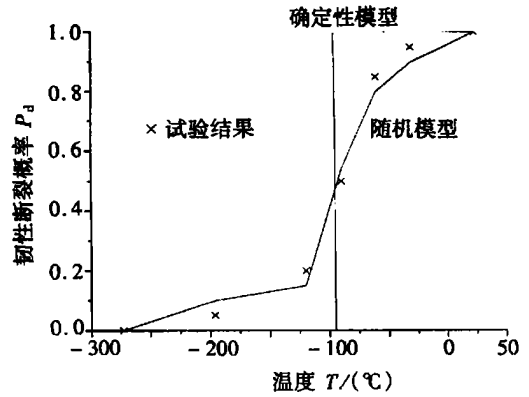


图 6 切口半径 2 mm 的切口试样的韧性失效概率的模型与实验结果比较

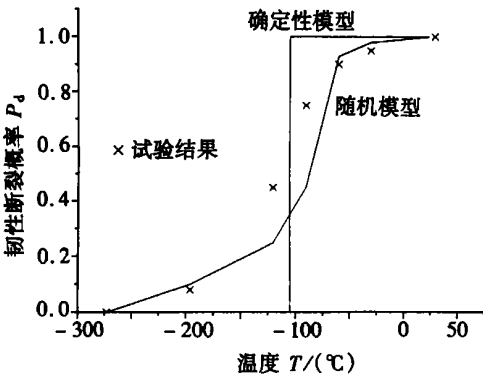


图 7 切口半径 4 mm 的切口试样的韧性失效概率的模型与试验结果比较

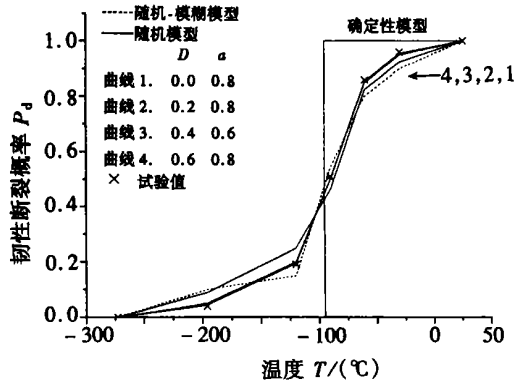


图 8 切口半径 2 mm 的切口试样的韧性失效概率的 3 个模型与实验结果比较

对于脆性断裂,采用-196℃的实验结果。模拟结果和实验结果示于图 3 中,从图中结果可以看出,空穴一形核后,就可能导致试样的脆性断裂。近似认为形核应变约为弹性应变的倍。所提的模型可以作为脆性断裂准则。

5.2 韧脆转变的随机模型计算

通过 Monte Carlo 法可以计算拉伸试件在不同温度下的断裂规律。图 4~7 分别给出了光滑拉伸试件和切口拉伸试件在不同温度下空穴发生韧性断裂和脆性断裂的概率,并与实验测得的韧窝区和解理区面积变化进行比较。在图中同时与不考虑参量随机性的确定性模型进行了比较。从图中可以看出,在所计算的光滑和 3 种切口拉伸试件中,随机模型都可以和实验测量结果吻合。

在上述计算中,同时可以获得试样断裂时,空穴直径分布规律。由于()式得到的空穴直径 R 满足对数正态分布,实验测得的断裂时的空穴直径也满足对数正态分布,因此只要比较它们的均值和方差即可,示于表 4 中。从表中可以看出,模拟值和实验值基本上是一致的,方差较均值差较大,其中一个原因为 R₀ 的方差大导致 R 的方差大,另一个原因为实验测量时的人为因素,一些偏差较大的没有被统计上。

表 4 断裂时空穴半径比较(光滑拉伸试样)

| 温度 $T/^\circ\text{C}$ | 5 | - 30 | - 60 | - 90 | - 1 0 | - 196 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 模拟 μ_{lnR} | . 96 | . 55 | . 49 | . 3 | . 00 | 1. 78 |
| 模拟 σ_{lnR} | 0. 559 | 0. 5 9 | 0. 517 | 0. 463 | 0. 416 | 0. 370 |
| 实验 μ_{lnR} | . 61 | . 50 | . 43 | . 16 | . 04 | 1. 77 |
| 实验 σ_{lnR} | 0. 137 | 0. 1 7 | 0. 148 | 0. 14 | 0. 14 | 0. 10 |

从断口面积和空穴扩张量可以看出,随着温度的下降,韧窝面积和空穴扩张量都减少。如果以 50% 断口解理面积来定义韧脆转变温度 T_c/K , 则转变温度和应力三维度(可以通过有限元计算获得)的关系为

$$T_c = - 131. 5 + 44R_0 \text{ } ^\circ\text{C}, \tag{18}$$

实验结果为^[8]

$$T_c = - 136. 6 + 50R_0 \text{ } ^\circ\text{C}, \tag{19}$$

可见本文模型和实验基本上是一致的。

5.3 韧脆转变的随机模糊模型计算

以 $\rho = \text{mm}$ 的切口拉伸试件为例,通过调整隶属函数式中的 a 和 D 参数,来研究考虑断裂状态模糊性的影响。模拟结果示于图 8 中,并和随机模型、确定性模型及实验结果进行了对比。从计算结果来看,给定适当的 a 和 D 可以使随机模糊模型基本上一致。反之可以说明, a 和 D 参数的选择可以通过大子样试验结果来确定。

5.4 三类模型比较

上述计算分析结果可以看出,不考虑参量的随机性和断裂状态的模糊性的确定性模型不能反应实际情况,这是因为模型的细观参量具有很强的分散性,仅仅用均值来代替整个分布是远远不够的,也不能描述韧脆转变区域内的渐变机理。考虑断裂状态的模糊性不仅具有理论意义,同时也可以考虑实验测量数据的人为分散性,还可以弥补断裂准则的人为性、局限性和某种程度的不准确性。所以韧脆转变的随机模糊模型最符合实际情况。

6 结 论

本文对 40Cr 材料在不同温度和应力状态下的断裂特征进行大子样的宏观和细观试验,得到如下结论:

1. 温度的下降和应力三维度的上升都将导致韧脆转变。细观 SEM 断口观测,即使是完全解理断裂,仍有起着控制断裂作用的空穴。
基于实验结果,提出了一种新的韧脆转变断裂模型。该模型认为韧性断裂可由空穴的临界尺寸控制,脆性断裂可用内嵌币状空穴模型来模拟,提出了并具体测量和计算了细观应力强度因子。韧脆转变认为这两种机制的竞争是一个渐变。
3. 给出了分析韧脆转变的随机模型和随机模糊模型,具体测量了模型的细观参数,并给出分布规律。
4. 计算分析结果表明,确定性模型不能反应实际情况,也不能描述韧脆转变区域内的渐变机理,这是因为模型的细观参量具有很强的分散性,仅仅用均值来代替整个分布是远远不够的。考虑断裂状态的模糊性不仅具有理论意义,并且也可以考虑实验测量数据的人为分散性,同时也可以弥补断裂准则的人为性和局限性。所以韧脆转变的随机模糊模型最符合实际情况。

致谢 文中部分引用了李小陵和王魁的硕士论文的原始实验数据,在此一并感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 郑长卿. 韧性断裂细观力学的初步研究及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
- [] 郑长卿. 裂纹体与无裂纹体断裂理论研究文集[M]. 西安: 西安工业大学出版社, 1991.
- [3] Ritchie R O, Knoff J F, Rice J R. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel[J]. *J Mech Phys Solids*, 1973, 2(): 195—06.
- [4] 岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿. 40Cr 钢韧脆转变区域的一种随机模型[J]. *材料科学与工艺*, 1997, 5(): 19—13.
- [5] 吕震宙, 岳珠峰, 郑长卿. 金属材料细观韧性断裂的随机模糊分析[J]. *金属学报*, 1996, 32(11): 158—164.
- [6] YUE Zhu_feng, ZHENG Chang_qing. Effect to triaxiality and temperature on void growth in a smooth and notched 40Cr steel bar[J]. *Theor Appl Fract Mech*, 1995, 22(): 139—150.
- [7] Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress field[J]. *J Mech Phys Solids*, 1969, 17(): 01—17.
- [8] David Brock. *Elementary Engineering Fracture Mechanics* [M]. Third revised edition. Hangu: Martinus Nijhoff Publisher, 198.

Random_Fuzzy Model for the Ductile/Brittle Transition

LÜ Zhen_zhou¹, YUE Zhu_feng, FENG Yun_wen¹

(1. Department of Aircraft Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 71007, P. R. China;

. Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 71007, P. R. China)

Abstract: A large sample of experiments was carried out to study influence of stress triaxiality and temperature on the growth of micro voids and the ductile/ brittle transition(DBT) behavior of 40Cr steel. A random_fuzzy model was put forward for the transition. It is assumed that the ductile fracture is controlled by the micro void mechanism, and the critical void growth ratio can be used as the criterion of ductile fracture. The brittle fracture is modeled by an embedded penny crack. A micro stress intensity and the fracture characteristic length of the brittle fracture was then presented and calculated. The DBT is completed by the two mechanisms, which exists in the fracture of all specimens simultaneously. The distributions of model parameters were measured experimentally. A random model and a random_fuzzy model for DBT were presented. The comparison between the calculated and experimental results shows that the random_fuzzy model can model the DBT satisfactorily.

Key words: ductile/brittle transition; fracture criterion; randomness; fuzziness