

断裂力学判据存在的一个问题及讨论^{*}

PROBLEM AND DISCUSSION ON CRITERION OF FRACTURE MECHANICS

汤安民^{**} 王忠民

(西安理工大学 工程力学系, 西安 710048)

TANG An'min WANG Zhongmin

(Department of Engineering Mechanics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

摘要 利用细观力学对材料断裂机理的认识,结合脆性材料常规破坏试验结果,提出了一个新的拉断破坏条件,该拉断强度条件与常用的几种脆断强度条件相比,能更好地解释材料在复杂应力状态下发生的脆断与小塑性韧断。并对常用的断裂力学判据存在的问题进行了讨论,通过分析影响裂尖空穴扩张的主要因素,给出能适应不同应力状态的新的断裂判据。

关键词 断裂判据 应力三维度 脆性断裂 强度条件

中图分类号 O346.1 TG111.91

Abstract Based on the realization of fracture mechanism of materials in mesofracture mechanics, and experimental results of brittle materials failure in the common condition, a new tensile brittle fracture criterion is presented. Compared with traditional strength condition, this strength can better explain materials brittle fracture and small ductile fracture in the complex stress states. Then, a problem arising from criterion of fracture mechanics in common use is discussed, and a new brittle fracture criterion, which is suitable for different stress states, is given by analyzing the main factors influencing void extension in the tip of crack.

Key words Fracture criterion; three-dimensional stress degree; Brittle fracture; Strength theory

Correspondent: TANG An'min, E-mail: anmintang@china.com

Manuscript received 19990422, in revised form 20000814.

1 引言

当前线弹性断裂力学的分析方法已在工程实际中得到大量的应用,弹塑性复合型断裂的力学机理和影响参量已被深入地研究。无论在应用上,还是在研究中,寻求建立合理的、简单方便的并满足不同应力状态影响的断裂判据,始终为理论分析与实验研究的重点内容,一直受到人们的重视,并做了大量的工作^[1,2]。本文利用细观力学对材料断裂机理的分析^[3,4],结合脆性材料常规破坏试验结果,提出了一个新的断裂破坏条件;该强度条件比常用的几种脆断强度条件能更好地解释材料在复杂应力状态下发生的脆断与小塑性韧断。并对常用的断裂力学判据存在的问题进行讨论,通过分析影响裂尖空穴扩张的主要因素,给出能适应不同应力状态的新的断裂判据。

2 常用断裂判据及问题

目前工程上单一裂纹的断裂判据(如 I 型裂纹),线弹性断裂力学问题主要使用 K 准则(见式(1)),弹塑性断裂问题主要使用 J 准则(见式(2))。

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

$$J = J_{Ic} \quad (2)$$

其中 K_I 为结构裂纹尖区域的应力强度因子, J 为裂纹区域的 J 积分; K_{Ic} 、 J_{Ic} 为平面应变状态下两个材料参数。

按强度理论的思想,断裂准则的建立要求准则表达式的极限指标值在准则适用范围内为一常量,不受应力状态变化的影响,同时能反映断裂机理,解释破坏过程。以上准则存在的问题是,首先没有考虑应力状态的不同对材料断裂产生的影响,由于 K_{Ic} 、 J_{Ic} 只是在平面应变状态下测定的断裂参数,式(1)、式(2)仅适合平面应变下使用。同时 K_I 、 J 的断裂极限值随裂尖区域的应力状态不同而变化,它们均不是常数。其实对于带裂纹的构件,无论是纯 I 型、还是纯 II 型,其裂纹尖端附近区域均为复杂应力状态场,不能使用简单的断裂条件作为断裂准则,而应寻找合适的强度理论解决其断裂问题。

3 一个新的断裂强度条件

细观断裂力学研究认为,脆性断裂的机理主要是,材料内的微小缺陷在张力的作用下形成空穴,空穴逐

* 19990422 收到初稿,20000814 收到修改稿。

** 汤安民,男,1958 年 1 月生,陕西省潼关县人,汉族。西安理工大学工程力学系力学实验室主任,高级工程师。主要从事材料力学、断裂力学的教学与实验工作。

渐地扩张,直至相邻间空穴聚合形成宏观裂纹,进而导致材料断裂;韧性断裂的机理,以空穴的形成、扩张与聚合引起断裂为主导,过程中伴随有较多塑性应变的产生,减缓了空穴的扩展,破坏载荷明显提高。而剪切断裂机理与脆断、韧断完全不同,以剪切塑性变形的发展、连通为主,断裂形式为剪断。由于脆性断裂与韧性断裂的断裂机理较为接近,断裂形式均为拉断,所以可将材料的断裂问题分为两类,拉断与剪断。对于材料的拉断问题,考虑到危险点应力三维度愈高,材料越易断裂的现象,并由于试件拉断面基本与 σ_1 方向相垂直,可以认为 σ_1 是引起材料拉断的主要因素;其次 σ_2 、 σ_3 的作用也对 σ_1 方向的断裂产生一定的影响,设其影响系数为 λ ($0 < \lambda < 1$)。可建立一种新的强度条件,设材料拉断函数为

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_1 + \lambda(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

拉断函数 f 适用于有拉应力作用的脆断、韧断情况。强度准则可叙述为,危险点应力三维度在某一范围内,只要拉断函数 f 达到其极限值材料就发生拉断。可用单向拉伸试验方便地确定材料的拉断函数 f 的极限值,即为单拉强度极限 σ_b ,材料拉断的破坏条件可写为

$$\sigma_1 + \lambda(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_b \quad (4)$$

从塑性应变对断裂的影响也可解释式(3)、式(4),在常见的受力范围内,当 $\sigma_1 > 0, \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq 0$ 时,体内形状改变比能较大,易产生较多的塑性变形,使空穴形变消耗部分变形能,则拉断不易发生;当 $\sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ 为拉应力时,体内形状改变比能较小,产生的塑性变形较少,体积改变比能较大,空穴更易成长,使拉断容易发生。对几种不同牌号的铸铁、硬铝试件进行拉伸破坏与扭转破坏试验,试验结果见表1。

表1 铸铁、硬铝的拉伸、扭转破坏试验结果

Tab.1 The experimental results of cast iron and duralumin MPa

	HT150	HT200	HT250	ZL101
抗拉强度 σ_b	183	229	264	158
抗扭强度 τ_b	261	319	369.5	219

材料破坏时,拉伸试件中 $\sigma_1 = \sigma_b, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$,扭转试件中 $\sigma_1 = \tau_b, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau_b$ 。对铸铁材料选取 λ 等于0.27,硬铝取 λ 等于0.33,将以上试验结果代入各强度理论公式并作误差分析,常用的几种强度理论均有较高的误差,而式(4)的计算与试验结果非常吻合^[5],同种材料的拉断函数 f 极限值在两种不同受力形式下接近一常量。材料破坏时产生的塑性变形大小影响着极限应力取值,含裂纹构件的断裂力学试验表明,同种材料的平面应力断裂韧性普遍高于其平面应变断裂韧性,其原因在于平面应力试件裂纹前端附近处于两向应力状态,而平面应变试件裂纹前端附近处于三向拉应力,前者与后者相比,在断裂前裂纹尖端附

近有较大塑性变形产生,塑性变形要耗费一定的变形能,产生卸载阻碍脆性断裂的发生。

4 对脆性断裂判据的修正

在应力场中,通常用平均应力 σ_m 与等效应力 σ_e 之比表示应力三维度的大小,可记为

$$R_\sigma = \sigma_m / \sigma_e \quad (5)$$

其中 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $\sigma_e = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{2}$, R_σ 的大小综合表示应力场三轴张力状态程度和对材料形变的约束程度。在一定范围内应力三维度取值高,表示偏于受拉状态,材料易于脆性断裂;应力三维度取值低,则偏于受压状态,材料易于剪切断裂;由于脆断、韧断的机理以空穴形成、扩张和聚合为主,受塑性变形影响为次,则应力三维度 R_σ 是影响空穴发展的主要因素;在裂纹开裂前三个主应力对空穴扩张的影响是等效的,而在裂纹开裂时开裂面上的主应力又比其他两个主应力作用更为重要。将上述新强度理论思想用于处理含裂纹构件的拉断破坏,可以认为裂纹初始扩展沿着应力三维度达到最大的方位,当这个方位上拉断函数 f 达到极限值时裂纹就开始扩展,新的断裂判据可写为

$$(\partial R_\sigma / \partial \theta)_{\theta=\theta_0} = 0 \quad \partial^2 R_\sigma / \partial \theta^2 < 0 \quad (6)$$

$$f = \sigma_1 + \lambda(\sigma_2 + \sigma_3) = f_c \quad (7)$$

以平面问题的纯I型裂纹为例,裂纹尖端附近应力场的各主应力分量解析式为

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{\frac{1}{2} \sin^2 \theta} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} - \sqrt{\frac{1}{2} \sin^2 \theta} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} 0 & \text{平面应力} \\ \nu(\sigma_1 + \sigma_3) & \text{平面应变} \end{cases} \quad (10)$$

将以上主应力代入式(5),确定应力三维度函数。对于平面应变情况有

$$R_\sigma = \frac{2(1+\nu)}{3} \sqrt{\frac{(1-2\nu)^2 + 3\sin^2 \theta/2}{2}} \quad (11)$$

对于平面应力情况有

$$R_\sigma = 2/3 \sqrt{1 + 3\sin^2 \theta/2} \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可知,应力三维度在 $\theta_0 = 0$ 方向取极大值,即I型裂纹沿原裂纹面方向开裂,此结论与试验结果一致。

断裂判据式(7)中包含了两个参数 λ 与 f_c ,均为材料常数,需要通过材料的两个不同应力状态的断裂力学试验加以确定。为方便起见,可选取材料的平面应力断裂试验与平面应变断裂试验的应力强度因子极限值来确定参数,分别将 $\theta_0 = 0, K_I = K_{Ic}$ 和 $\theta_0 = 0,$

$K_I = K_C$ 代入式(8)、(9)、(10),再代入式(7)得

$$K_{IC} + (K_{IC} + 2\nu K_{IC}) = \sqrt{2\pi r} f_c \quad (13)$$

$$K_C + \lambda K_C = \sqrt{2\pi r} f_c \quad (14)$$

由式(13)、式(14)解出

$$\lambda = \frac{K_C - K_{IC}}{K_{IC}(1+2\nu) - K_C} \quad (15)$$

$$\sqrt{2\pi r} f_c = \frac{2\nu K_C K_{IC}}{K_{IC}(1+2\nu) - K_C} \quad (16)$$

纯 I 型裂纹的断裂判据可表达为

$$\sigma_1 + \frac{K_C - K_{IC}}{K_{IC}(1+2\nu) - K_C} (\sigma_2 + \sigma_3) < \frac{2\nu K_C K_{IC}}{\sqrt{2\pi r} [K_{IC}(1+2\nu) - K_C]} \quad (17)$$

与式(4)相同,式(17)仅适合于以空穴的扩张、聚合为主的拉断形式(包括脆性断裂、韧性断裂)的断裂破坏,而不适应剪切断裂。

对于 30CrMnSiNi2A 钢,试验^[6]测得 K_{IC} 为 3 038 N/mm^{3/2},而 K_C 为 3 508 N/mm^{3/2},可计算出 λ 与 $\sqrt{2\pi r} f_c$ 分别为 0.35 和 4 733 N/mm^{3/2},则对于该材料裂纹开裂判据为,在其应力三维度取极大值处,三轴应力满足

$$\sigma_1 + 0.35(\sigma_1 + \sigma_3) = 4 733 / \sqrt{2\pi r} \quad (18)$$

时发生以拉断形式为主形态的断裂,比较试验结果^[6],式(18)能很好解释试件变厚度情况下 30CrMnSiNi2A 钢 K_{max} 的试验曲线。

5 讨论与说明

1)断裂试件的极限 K 值随厚度的改变为一曲线关系,单参数断裂准则仅考虑了单一应力状态情况,不能反映这一变化。本文给出的准则使用了两个参数 λ 与 f_c ,用线性关系近似地代替了上述曲线关系,见图 1。它考虑了材料的断裂机理,在塑性变形较小的脆性断裂、韧性断裂范围内,该强度准则可适应于不同

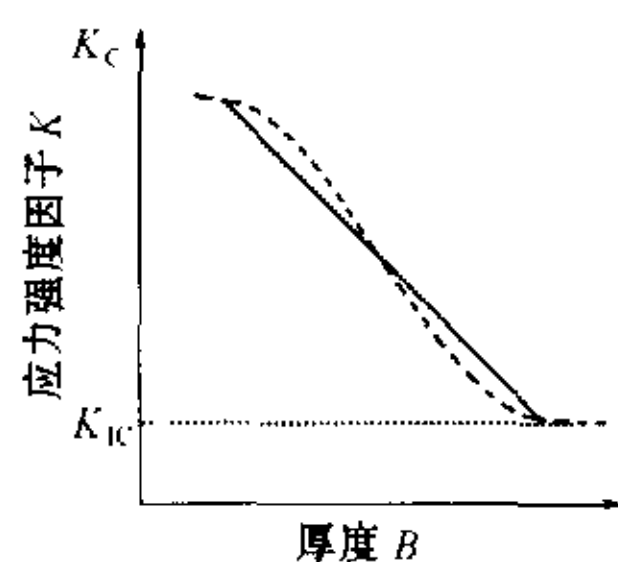


图 1 试件断裂与厚度的关系
Fig.1 Variation curve between fracture and thickness of specimen

应力状态形式下的断裂问题。

2)一些中强度的材料,其断裂试件在平面应力下发生剪切断裂,所测得的 K_C 值比 K_{IC} 值高出 2~2.5 倍,这是由于试件破坏过程产生了大的塑性变形,导致材料强化所致。作者建议对这类材料应取裂纹初始开裂时($\Delta a < 1.0$ mm)的载荷值计算 K_C (此时为韧断),仍可用式(16)建立其强度准则。

3)由铸铁、硬铝材料的常规破坏试验,可初步确定文中给出的拉断函数 f 的极限值在不同受力形式下接近一常量。但对裂纹体断裂问题还须进一步试验验证。并且式(7)的具体使用范围还有待确定。

6 结论

裂纹的开裂同时受三轴应力和塑性变形两大因素影响,在以拉断为主形态的断裂中,拉应力促使裂纹开裂,而塑性变形阻碍开裂,裂纹开裂易发生在应力三维度较高区域,启裂点上三个主应力对开裂均产生影响。

References

- 1 ZEHNG Changqing, LEI Deng, ZHOU Li, ZHANG Keshi. The preliminary study and application of ductile fracture microscopic mechanics. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1988 (In Chinese) (郑长卿, 雷登, 周利, 张克实. 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).
- 2 Bhattacharjee D. Ductile fracture in HY100 steel under mixed mode I / mode II loading. Acta Metall. Mater. 1994, 42(5): 1 747 ~ 1 754.
- 3 ZUO Hong, CHEN Yiheng. Mixed mode ductile fracture experiment and its controlling parameter. Acta Mechanica Sinica, 1999(5): 534 ~ 540 (In Chinese) (左宏, 陈宜亨. 复合型韧性断裂实验和控制参数. 力学学报, 1999(5): 534 ~ 540).
- 4 SHA Jiangbo, DENG Zengjie, ZHOU Huijiu. Fractal analysis of elastic-plastic fracture surface under mixed mode (I + II) loading. Journal of Mechanical Strength, 1997, 19(3): 45 ~ 47 (In Chinese) (沙江波, 邓增杰, 周惠久. I + II 型复合型弹塑性断口形貌的分形分析. 机械强度, 1997, 19(3): 45 ~ 47).
- 5 TANG Anmin. A strength condition considering the effect of Disortion-Energy. Mechanics and Practice, 2000, (4): 48 ~ 50 (In Chinese) (汤安民. 一个考虑形变能影响的脆断强度条件. 力学与实践, 2000, (4): 48 ~ 50).
- 6 CUI Zhengyuan. Measuring principle and method in fracture ductility. Shanghai: Publishing House of Shanghai Science and Technology, 1981 (In Chinese) (崔振源. 断裂韧性测试原理和方法. 上海: 上海科技出版社, 1981).

(上接第 167 页 Continued from page 167)

- 3 TANG Jiashi. Asymptotic solution of the strong nonlinear vibration with multi-degree of freedom. Journal of Hunan University, 1998, 25(4): 15 ~ 19 (In Chinese) (唐驾时. 多自由度强非线性振动的渐进解. 湖南大学学报, 1998, 25(4): 15 ~ 19).
- 4 LIU Jike, GAO Lei, ZHANG Xiannmin. Matrix perturbation method for complex modes with repeated eigenvalues. Mechanical Science and Technology, 1998, 17(1): 8 ~ 10 (In Chinese) (刘济科, 高磊, 张宪民. 大型机械动力学设计的复模态矩阵摄动法. 机械科学与技术, 1998, 17(1): 8 ~ 10).
- 5 LIU Xinliang, ZHANG Jianwu, LIN Zhongpin. Automotive active suspension

with nonlinear control. Automotive Engineering, 1997, 19(3): 175 ~ 179 (In Chinese) (刘新亮, 张建武, 林忠钦. 汽车主动悬架的非线性控制. 汽车工程, 1997, 19(3): 175 ~ 179).

- 6 LIU Xinliang, ZHANG Jianwu, CHEN Zhaoneng. An approach of self-tuning control for automotive active suspensions. Automotive Engineering, 1998, 20(3): 165 ~ 170 (In Chinese) (刘新亮, 张建武, 陈兆能. 汽车主动悬架的自校正控制. 汽车工程, 1998, 20(3): 165 ~ 170).
- 7 HAN Po, WANG Qingfeng, LU Yongxuan. Optimum design and control for nonlinear hydraulic damping suspension. Automotive Engineering, 1998, 20(2): 96 ~ 100 (In Chinese) (韩波, 王庆丰, 路雨详. 非线性液压阻尼悬架的优化设计及最优控制. 汽车工程, 1998, 20(2): 96 ~ 100).