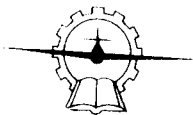


断裂力学



国外航空编辑部

1975年3月

简 介

本书译自日本宫本博著的《破坏の力学》，主要叙述断裂力学中宏观的、计算方面的问题，由三部分八章组成。第一部分是线性断裂力学，第二部分是非线性断裂力学，第三部分是微观的断裂力学。第一部分、第二部分处理各向同性均匀体，第三部分研究结晶粒范围的各向异性非均匀体。

第一章绪论叙述“断裂力学”在材料力学中的地位，并回顾关于过去研究形状系数 α 及缺口系数 β 的情况。

由第二章到第四章属于第一部分，叙述最近有显著发展的线性断裂力学。

由第五章到第七章属于第二部分，叙述裂纹尖端的弹塑性响应及其应用。

第八章属于第三部分，试图由结晶粒的性质推出多结晶体的机械行为。

参加本书译校工作的有 301 所周馥秋和北航 503 教研室断裂力学课题组的有关同志。

目 录

第一章 绪 论

1.1 断裂力学所处的地位	1
1.2 断裂力学以前的情况 (形状系数 α 与缺口系数 β) ...	3
1.2.1 形状系数 α	4
1.2.2 缺口系数 β	10

第一部分 线性断裂力学

第二章 断裂力学的基本概念

2.1 前言	15
2.2 关于弹性裂纹传播的 Griffith 理论, 能量释放率 g 的引入	17
2.3 裂纹尖端附近的应力场, 应力强度因子 K 的引入 ...	18
2.4 应变能释放率 g 与应力强度因子 K 的关系	22
2.5 裂纹尖端的塑性区	24
2.6 线性断裂力学的精度和有效性	26

第三章 求应力强度因子的方法与资料

3.1 应力强度因子的解析 (解析的方法)	29
3.1.1 根据形状系数求应力强度因子的情况	29
3.1.2 裂纹尖端附近的应力场	30

3.1.3 应力强度因子的计算	33
3.2 应力强度因子的解析 (有限元法)	34
3.2.1 关于平面问题的应力强度因子	35
3.2.2 关于三维问题的应力强度因子	38
3.3 应力强度因子的资料	49

第四章 线性断裂力学的应用

4.1 前言	61
4.2 应力强度因子与疲劳破坏	61
4.2.1 应力强度因子和裂纹传播速度	62
4.2.2 应力强度因子与裂纹型式 (mode) 的变化	66

第二部分 非线性断裂力学

第五章 非线性断裂力学 (其一: 用解析法处理)

5.1 前言	71
5.2 I 型裂纹的弹塑性响应	72
5.2.1 前言	72
5.2.2 I 型裂纹的弹塑性解	72
5.3 Rice 的 J 积分及其应用	79
5.4 裂纹尖端的塑性变形	80

第六章 非线性断裂力学 (其二: 用有限元法处理)

6.1 有限元法在弹塑性理论中的应用	83
6.2 对于单调载荷的弹塑性响应	89
6.3 对循环载荷的弹塑性响应	94

6.3.1 脉动拉伸载荷的情况	94
6.3.2 拉压交变载荷的情况	100

第七章 非线性断裂力学的应用

7.1 前言	106
7.2 循环载荷的弹塑性响应	106
7.3 疲劳裂纹的扩展理论	116
7.3.1 前言	116
7.3.2 Head 理论	117
7.3.3 Rice 和 Weertman 理论	120
7.3.4 McClintock 理论	121

第三部分 微观的断裂力学

第八章 微观的断裂力学

8.1 前言	123
8.2 粗大结晶粒铝板的滑移线的发生	124
8.2.1 前言	124
8.2.2 弹性模型	125
8.2.3 弹塑性模型	134
8.3 多结晶金属的弹性模数	140
8.3.1 前言	140
8.3.2 只有方位是随机的模型	140
8.3.3 方位和形状都是随机的模型	145
参考文献	147

第一章 绪 论

1.1 断裂力学所处的地位

本章将从连续体力学的角度阐明断裂力学的有关机理。为此，必须明了裂纹的发生及扩展的机理。从研究机理的角度来看有宏观的和微观的两种，各自皆有其判定的方法和统计方法。我们把这种研究称为断裂力学。

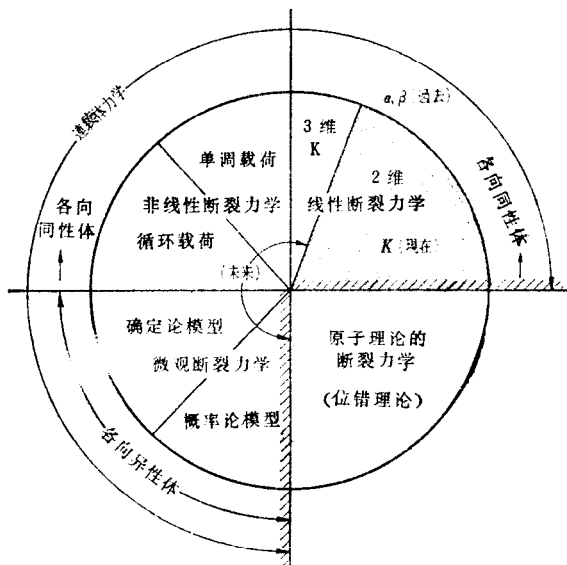


图1.1 从连续体力学看断裂力学的过去、现在、未来

图1.1所示为断裂力学的过去、现在、将来。圆内所示为研究的现状（网版部）及将来。圆外所示为过去的研究。

断裂力学的过去是有关形状系数 α 和缺口系数 β 的材料

力学方面的研究。这个研究是众所周知的，在防止断裂的设计方面有非常大的贡献。此中的学问主要是将形状系数 α 和缺口系数 β 结合起来。为此，虽然提出各种各样的模型方案，而对这样重要的问题，现在仍然不能认为解释清楚了。

约10年前，主要在美国发展起来的线性断裂力学 (Linear Fracture Mechanics) 为各向同性体的二维弹性理论的结果。由于其理论比较简单明了，把应力强度因子 K 与应变能量释放率 G 一一对应地结合起来，不仅能成功地定量地说明脆性断裂，并能成功地说明环境强度及处理有关疲劳断裂的裂纹扩展速度，现在正形成根据连续体力学分析断裂的中心议题。可是，这个线性断裂力学，如从线弹性理论的角度，主要局限于二维（各向同性体）的弹性问题，也可以说处理的裂纹是理想裂纹，而实际上在处理压力容器内壁出现的裂纹、带缺陷的圆棒试验片上出现的疲劳裂纹等实际裂纹时，必须按照三维弹性理论解决。由于线性断裂力学基于线性弹性理论，且由于几乎所有情况下的断裂都伴有塑性变形，因此就存在按照线性处理问题的界限，因而就提出了非线性断裂力学问题。

为了从连续体力学的角度阐明裂纹的传播机理，必须了解

- (1) 裂纹尖端的塑性区形状
- (2) 塑性区内的应变分布
- (3) 断裂判据

然而，由于用连续体力学的计算不能阐明第(3)项，必须根据实验或更微观的立场才能阐明。用非线性断裂力学可阐明(1)(2)两项。

以上有关讨论是将固体当作各向同性或宏观的各向异性的物体进行计算的。但是，在炭素钢疲劳试验方面，塑性区的尺寸为 0.01 毫米左右，这个尺寸与结晶粒的尺寸是等等的。也就是说，把物体假定为各向同性体（或是宏观的各向异性体）。这个假定本身就存在着问题。为此，有必要研究考虑了晶粒机械性质的连续体力学。可是根据这样的结晶粒性质来推定多结晶全体性质（虽然不一定是新的东西）Sachs、Taylor、Hill 等人已有尝试。此时应该考虑的问题，归纳为下述五个题目，即

(1) 单结晶的性质的测定值

(2) 多结晶体的条件

(i) 晶界的性质

(ii) 结晶粒行为与用单结晶试样测定结果的差别

(iii) 结晶粒的相互作用。

(3) 有关合成组织的资料

(4) 基于 (1)~(3) 的平均处理方法

(5) 多结晶体的性质的测定值。

但是，为了详细探索各个结晶的行为，故应用有限元法以取代 (4) 的平均处理的理论。为要阐述判定多晶体全体的性质和结晶粒性质的统计分布，合并使用有限元法与蒙特卡罗法作为平均处理的方法，这样能使过去按照统计阐明的多晶体性质的计算更为精密化。

1.2 断裂力学以前的情况

(形状系数 α 与缺口系数 β)

本节论述关于由缺口引起的应力集中与断裂强度的理论

要点。

1.2.1 形状系数 α

(a) 定义 构造物的部件与试验件的最大差别是：在几乎所有部件上，断面都有变化，即所谓有缺口。如将有缺口的棒拉伸，则缺口附近的应力分布即有所不同，在缺口底部产生的应力远比假定最小断面承受同样外力下所求出的应力大得多。

承受循环应力的部件中，在某些点发生了微小的裂纹，由于应力循环扩大了这些裂纹，因而产生了疲劳断裂。

最初发生裂纹的部位为由于某些原因而发生应力集中的部分。应力集中的部分有：

几何学的不连续 孔、空洞、缺口、倒角、沟槽、裂纹。

材料的不连续 含有物、加固。

载荷的不连续 集中力、不连续的分布载荷、由于不连续的温度分布产生的热应力，由于不连续的约束产生的应力集中。

因而，由于有缺口产生怎样的应力集中是在疲劳问题方面的重要问题之一。为此，部件强度在和其形状综合考虑后才具有意义。所谓忽视形状的部件强度是不切合实际的。在有缺口部件的疲劳强度方面，缺口系数 β 成为重要的问题，在有缺口的部件的应力方面，形状系数 α 成为重要的问题。

为了表示由于缺口引起应力集中的程度，我们采用所谓形状系数的量。

图 1.2 所示为在厚度 1 宽度 $2b$ 的板的中央开有半径为 a 的孔，承受 $P = 2b\sigma_0$ 的力，沿着长度方向板受拉时开孔附近的应力分布状态。力 P 除以最小断面积 $2(b - a)$ 的值称

为平均应力或名义应力 σ_n ，即

$$\sigma_n = \frac{P}{2(b-a)} \quad (1.1)$$

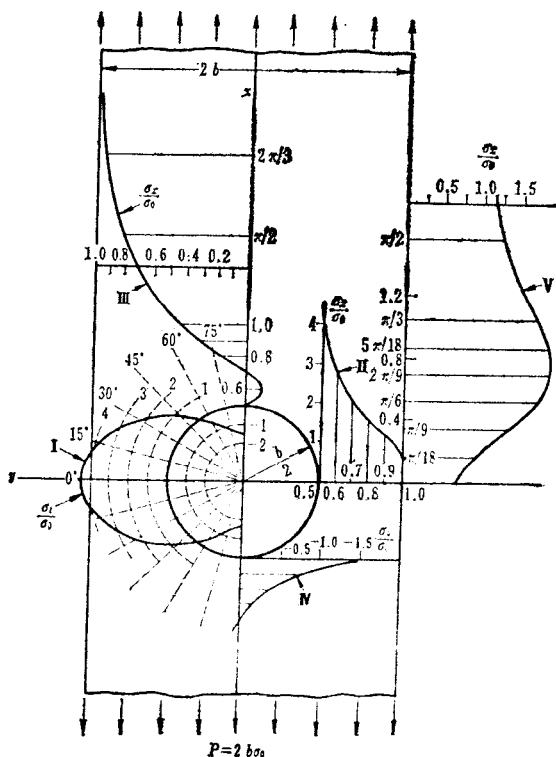


图1.2 有孔板受拉伸时孔边缘附近的应力状态

图中的曲线 I 所示为沿孔边缘产生的切线方向的垂直应力，曲线 II 所示为在最小断面处拉伸方向的垂直应力分布。III 及 IV 为板的中心线上的应力 σ_x 与应力 σ_y 。V 为作用于直线边缘

的 x 方向的垂直应力分布。一般地在缺口附近，缺口底部的应力最大。因而，如果缺口底部产生的最大应力为 $\sigma_{\max}$ ，则

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

α 通常大于 1。 α 为表示应力集中程度的要素之一，一般地说，如果载荷状态为一定的话， α 值主要随物体状态而不同，因而称 α 为其缺口的形状系数。

根据弹性计算能算出 $\sigma_{\max}$ ，但如根据光弹性实验或有限元法求出 $\sigma_{\max}$ 则更好些。此时可大量参考 Peterson 的数据^(1,3)，Neuber^(1,4)，Savin^(1,5)等的计算。

(b) 性质 关于应力集中的性质，下面分几个问题来叙述。

(1) 应力集中的衰减 在缺口附近引起的应力集中为局部的现象，因而由于缺口而形成的不同的应力分布范围，仅局限于缺口附近的比较狭窄范围。人们称此为应力集中的衰减法则。这个法则与圣维南原理具有相同内容。

(2) Neuber 形状系数的三角法则

关于 Neuber 的形状系数计算，其贡献很大。其汇编的结果即有名的缺口应力学，这是距今 30 年前的工作。现考虑在板的两侧有缺口的情况。缺口的深度取为 t ，在 $2t$ 比板中缺口底宽 $2a$ 小得多的情况，则称其缺口为浅缺口，在 $2t$ 比 $2a$ 大的情况，称为深缺口。Neuber 用浅缺口的形状系数 α_{rk} 和深缺口的形状系数 α_{sk} ，考虑了求得具有任意深度缺口的形状系数的方法，这种方法可称为形状系数的三角法则。即

$$\frac{1}{(\alpha - 1)^2} = \frac{1}{(\alpha_{rk} - 1)^2} + \frac{1}{(\alpha_{sk} - 1)^2} \quad (1.3)$$

或

$$\alpha = 1 + \frac{(\alpha_{rk} - 1)(\alpha_{rk} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{rk} - 1)^2(\alpha_{rk} - 1)^2}} \quad (1.4)$$

这种方法虽然便利，但无理论根据。过去，在没有求任意形状的形状系数的简单方法时，就通用这种方法。根据有限元方法求出任意形状的 α 是非常容易的，当然还必须再进行研究（见Peterson的修订本）。

(3) 平板的形状系数

加工成圆角的正方形的孔，加工成各种形状的孔，有切口的板等的形状系数，皆可用与缺口半径大致相同的椭圆的形状系数置换，这可从数理上进行证明^[1,6]。在此情况，对于实际的孔，可能被置换成的假想椭圆的曲率半径 ρ ，应选择与所求孔有相等的曲率半径。然而要注意有关椭圆的长轴选择，近似地把孔的长度选成轴则更好些。总之，在有孔或缺口的平板的形状系数，皆能用带椭圆孔的板的形状系数来代表。如把椭圆的长轴端产生的应力写为 σ_{max} 的话，则带椭圆孔的宽板的形状系数如下：

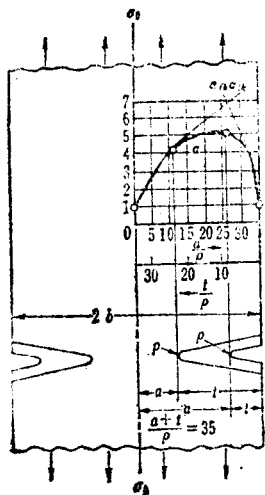


图1.3 浅的缺口和深的缺口

$$(a) \text{ 拉伸 } \alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \alpha_0 - 2 \left(1 + \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \cos^2 \theta \quad (1.5)$$

$$\alpha_0 = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

(b) 拉伸 $\alpha = \alpha_0 = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ (1.6)

(c) 弯曲 $\alpha = 1 + \sqrt{\frac{a}{\rho}}$ (1.7)

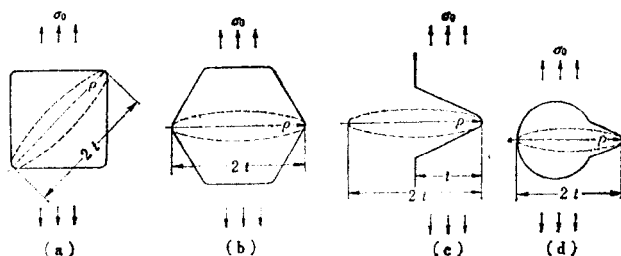


图1.4 将正方形孔置换为椭圆并求出 α

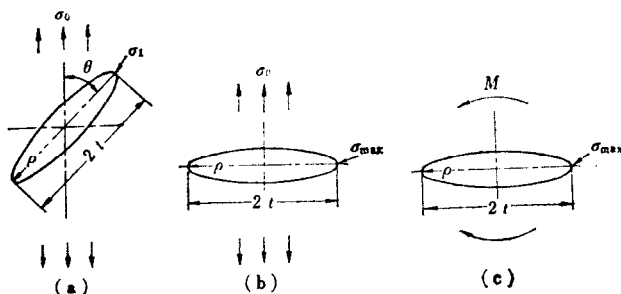


图 1.5

求解立体的形状系数的计算很困难，但能用三维光弹实验或有限元法求得。

(4) 缺口的干涉 在有其他缺口存在的情况，应力集

中衰减法则是成立的。此时，引起了缺口间的互相干涉，有最大应力比干涉前减少和比干涉前增加的两种情况。图1.6所示情况为在无限宽板的中央有很多半径为 ρ 的圆孔，这些圆孔沿外力方向并列。如形成 1 个孔的话， $\sigma_{\max} = 3\sigma_0$ 。但如图所示多孔并列的话， $\sigma_{\max}$ 通常小于 $3\sigma_0$ 。随着 a/ρ 增大， $\sigma_{\max}$ 愈接近于 $3\sigma_0$ ，这就表示孔 B 对孔 A 的干涉随着两孔距离的增大而减弱。如此例所示的缺口间干涉结果，最大应力减少的情况多为缺口与力的作用方向并列的情况（螺纹牙）。反之，缺口与力的方向成直角并列的情况或多数缺口聚集在

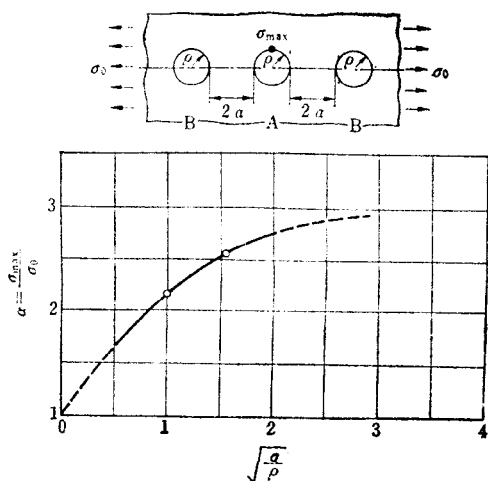
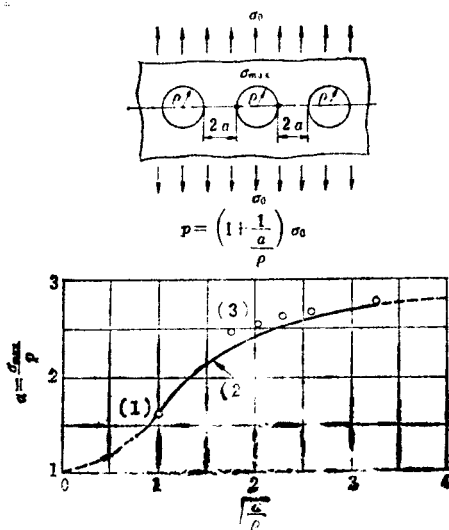


图1.6 圆孔并列引起的干涉（孔的数目无限个）

一起的情况，其最大应力比缺口单独存在的情况要大。图1.7为无限多孔数时的情况，在此情况 $\sigma_{\max}$ 对 σ_0 的比通常大于3，而对于圆孔中心线上的有效断面，形状系数小于3。



孔个限无有 7.1图

1.2.2 缺口系数 β

(a) 定义 大部分的疲劳破坏发生在有缺口的部位, 这是我们经常体验到的。有缺口的部件的疲劳强度成为实际上的重要问题, 原因就在于此。形状系数 α 在材料为弹性变形的范围内才具有意义, 在几何相似的试件上, 加于试件上的载荷大小以及试件尺寸大小等, 对于形状系数 α 都是无关系的数值。

具有形状系数为 α 的缺口的部件, 即有缺口的材料的疲劳极限 (用名义应力表示并写为 σ_m), 与用同样材料制造的、表面标准加工的光滑材料 ($\alpha = 1$) 的疲劳极限 σ_{m0} 的比写为

$$\beta = \frac{\sigma_{wc}}{\sigma_w} \quad (1.8)$$

将此缺口的缺口系数称做 β 。 β 为表示有缺口材料的疲劳强度的明显指标。一般地， β 与 α 的大小是不同的， β 较 α 为小。

如果在有缺口的材料上施加循环应力的话，即使在名义应力较小的情况，由于缺口底部附近的应力大于名义应力，故在缺口底部附近引起各种的材质变化，逐渐地达到具有与加载前强度不同的强度。而且，由于缺口附近的应力分布不一样，忽视应力分布对疲劳强度的影响的解释是行不通的。然而，由于应力分布对疲劳的影响随材料性质而不同，因此 β 不仅仅受弹性应力（即 α ）的影响，还承受此外种种因素的影响。

(b) 性质 关于 β 的性质，试涉及几点问题。

图 1.8 所示为外径 (D) 约 12 毫米，厚度约 1 毫米的炭钢管 (0.2% C)，在与轴成直角方向开有直径为 2ρ 的小孔的试验片的旋转弯曲 β 与在此情况下 α 间的关系。如果在横轴取试验片的 α 替代小孔直径的长度，在纵轴取 β ，将图 1.8 进行改画的话，则如图 1.9 所示。在外径约 48 毫米的圆棒上有约 18 毫米直径的缩颈，因而于炭钢及特殊钢试验片上附

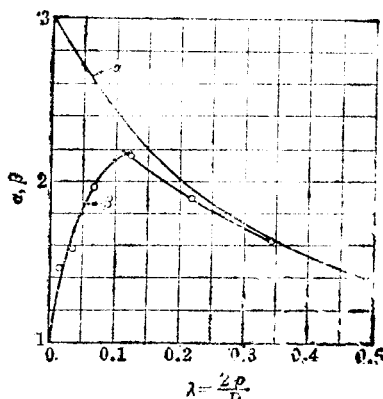


图 1.8 在垂直于轴的方向开有小孔的炭钢管的 α 与 β

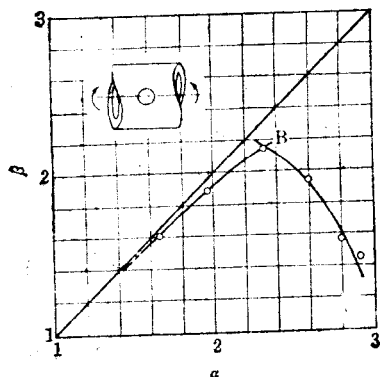


图1.9 在1.8的 α 与 β 之间的关系

有深度 18 毫米的 Neuber 缺口（双曲缺口）和具有 60° 张开的 V 形缺口，图 1.10 所示为在缺口半径 ρ 变化的情况下，弯曲的 α 和旋转变形 β 之间的关系。

从这些实验结果可得到共同的结论。

(i) $\alpha \geq \beta$ 。

(ii) 在 α 小的缺口， $\beta \div \alpha$ 。

(iii) 在 α 比较大的缺口， $\beta \ll \alpha$ 。

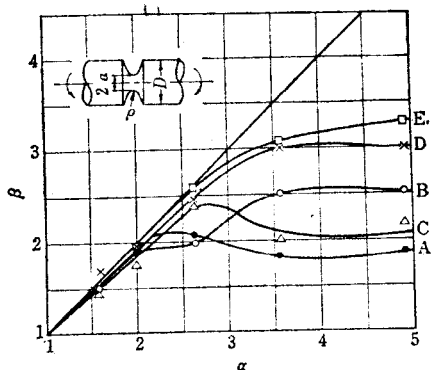


图1.10 具有双曲线缺口的碳钢与特殊钢棒的 α 与 β 之间的关系

在设计 $\beta \ll \alpha$

的缺口时，对于具有小 α 缺口的部件，在 β 值不明时，可以其缺口的形状系数 α 取代，不致有显著的差异。但是，在 α