

线性断裂力学入门

〔日〕冈村弘之 著

李 顺 林 译

张 仲 升 校

江苏科学技术出版社

線形破壊力学入門

岡村弘之 著

培風館 1976

線形断裂力学入門

〔日〕岡村弘之 著

李顺林译 张仲升校

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：南京人民印刷厂

开本850×1168毫米 1/32 印张10 字数242,000

1981年8月第1版 1981年8月第1次印刷

印数1—2,500册

书号13196·073 定价1.03元

内 容 提 要

本书采用与材料力学对比的方式来阐述线性断裂力学的基本概念，通俗易懂，书内附有不少例题与习题，这对初学断裂力学的读者是一本很好的入门书。

书中对线性断裂力学的两个基本参数——应力强度因子与能量释放率的物理概念和基本性质作了简要的讨论。主要讨论用这些参数来分析裂纹顶端附近的应力、应变和位移的分布；随着裂纹扩展的能量变化；含裂纹构件为弹性体、小范围屈服状态和静不定结构中构件时的应用方法。另外，还列举了线性断裂力学在分析各种断裂现象上的工程应用实例。

本书适用于具有初等材料力学知识和大学数学基础知识的工程技术人员及有关大专院校师生阅读参考。

译 序

断裂力学在我国从引入至今只有近十年的历史，然而十年来的发展是非常迅速的。工程上的许多断裂现象已经用断裂力学来分析 & 处理并得到了较满意的结果，利用断裂力学概念的新的工程设计方法也正在我国航空等部门逐步推广。我国大专院校力学专业已将断裂力学列入必修课，其他不少专业也将断裂力学列为选修课或必修课，新编的大学材料力学教材已加上了断裂力学的内容。目前，我国还有大量的工程技术人员未学过断裂力学，然而许多工程问题必须采用断裂力学的方法来处理，断裂力学的知识已是必不可少的了。阅读本书，对我国广大工程技术人员迅速掌握断裂力学的基本知识会有所帮助。

本书是日本正在陆续出版的“断裂力学与材料强度讲座”的第一卷。主要阐述线性断裂力学的基本问题，对线性断裂力学的基本概念及其在各方面的应用给予了详尽的说明。

本书的内容汇集了著作者本人在美国从事断裂力学研究的经验和教学中积累的一些问题。书中列有不少例题和习题，对于加深理解基本概念会有所补益。最后还附有“二维裂纹的弹性理论入门”。具有弹性理论基础知识的读者阅读这部分内容将有助于对线性断裂力学的深入理解。

本书内容有少部分涉及微观断裂的知识，读者阅读这方面的内容需补充有关金属物理方面的知识。

范天佑同志对本书的译文初稿，提出了不少宝贵的意见，对此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限，译文中如有缺点错误，望读者批评指正。

李 顺 林

一九八〇年二月于南京航空学院

目 录

1. 绪论	1
1.1 何谓线性断裂力学	1
1.2 线性断裂力学分析的特点	4
1.3 本书的组成	15
2. 裂纹顶端附近的弹性变形状态	17
2.1 缺口的应力集中	17
2.2 裂纹顶端附近的独立的三种变形型式	22
2.3 裂纹顶端附近的应力和位移的分布	24
2.4 应力强度因子	28
2.5 应力集中与应力强度因子的关系	32
3. 应力强度因子的基本问题	40
3.1 二维问题的基本解析解	40
3.2 应力强度因子的重要实例	41
3.3 椭圆形片状裂纹	42
3.4 叠加原理及其应用	46
3.5 裂纹和缺口的相似法则	56
3.6 应力强度因子的渐近特性	60
4. 能量与变形	64
4.1 应变能与位能	64
4.2 柔度与能量释放率	68
4.3 能量释放率与应力强度因子的关系	74

4.4	应力强度因子的实验测定法	80
4.5	能量释放率的积分表示与 J 积分	86
5.	裂纹顶端的小范围屈服	96
5.1	线性断裂力学对小范围屈服状态的应用	96
5.2	裂纹顶端塑性区的修正	98
5.3	塑性区的平面应力与平面应变状态	105
5.4	裂纹顶端的结合力模型	107
5.5	结合力模型的能量释放率	112
6.	变形与静不定问题	119
6.1	多力作用下弹性体的变形与能量	119
6.2	裂纹扩展的能量变化	125
6.3	裂纹引起变形的增大	130
6.4	含裂纹构件变形的例题	134
6.5	大变形时的非线性变形	141
6.6	缺口件的振动	144
6.7	用假想载荷计算位移	145
6.8	接互柔度实验测定应力强度因子	148
6.9	静不定结构中裂纹件的分析	149
6.10	裂纹扩展时应力强度因子的变化	155
6.11	非线性变形的一般分析方法	161
6.12	含微小裂纹状缺陷材料的变形	170
7.	线性断裂力学在工程上的应用	181
7.1	线性断裂力学的应用范围	181
7.2	脆性断裂的条件	185
7.3	断裂韧性	190
7.4	裂纹的不稳定扩展与止裂	203
7.5	疲劳裂纹扩展	208

7.6 环境对裂纹扩展的影响	225
附录 二维裂纹的弹性理论入门	235
A.1 二维弹性理论的基本关系式	236
A.2 Airy 应力函数	238
A.3 Goursat 应力函数	245
A.4 Westergaard 应力函数	249
A.5 关于应力函数的几个注意事项	252
A.6 扭曲弹性理论	259
A.7 受均匀应力的无限板中的直线状裂纹	261
A.8 裂纹顶端附近的应力、位移的一般解	268
A.9 应力函数与应力强度因子的关系	277
A.10 解析解的典型示例	281
参考文献	284
附表 1 单位换算表	289
附表 2 应力强度因子资料 1 —— 二维问题的基本解析解	290
附表 3 应力强度因子资料 2 —— 重要的基本实例	297

1.1 何谓线性断裂力学

在机械或结构物的设计与使用时，作为研究对象的机械或结构物，其强度标准大致可分为两种，即由于过大变形不耐用而造成的破损，以及由于材料的分离、断裂而产生的破坏。

其中多数是由于裂纹(crack)^{〔注〕}或其他缺陷的发生、扩展、合并等产生的断裂破坏。断裂力学(fracture mechanics)原来是研究这种破坏现象的力学方面的学科分支的总称。但是，由于断裂这一宏观的物理现象受到微观组织和微观断裂机理的影响很大，所以对断裂的研究要求采用多种学科的方法，试图通过各种各样的途径来进行研究。目前断裂力学这个分支，主要是用连续体力学(弹性力学、塑性力学、粘弹性力学等)来研究内部含有裂纹状缺陷的材料和构件的情况。断裂力学的定义不是一成不变的。它的内容和重点与其他学科分支一样是随着时代变化和发展的。

这里，线性断裂力学(linear fracture mechanics)是以线弹性理论所得的结果为基础，研究含有裂纹或尖缺口的构件或结构物的强度和变形的学科分支。本书的内容限定如下：

- (1) 本书是以裂纹和类似裂纹的缺陷作为研究的对象；
- (2) 本书不是以应力和应变作为裂纹顶端的力学状态条件，

〔注〕 材料中产生的微小的可见裂纹常用裂纹、裂缝、裂痕等术语。

而是采用所谓应力强度因子 K ，或者与这完全相对应的能量释放率 G 这样的参数。这些参数，是由首先人为地近似假设材料为线性弹性体，而后再用弹性理论来求得的。

(3) 裂纹顶端塑性区的大小(尺寸)与裂纹长度(尺寸)相比很小，因此，除裂纹顶端近旁外均为弹性变形。这叫做小范围屈服状态。这时，即使材料的应力—应变曲线是实际的非线性的弹塑性材料，上述参数 K 或 G 作为表示裂纹顶端附近力学状态的参数仍能使用。

(4) 利用这个事实，在实际上存在着裂纹时，或者假想存在裂纹及其发生、扩展时，来定量地研究机械或结构物的断裂控制，以及进行合理的设计与维护工作。

线性断裂力学的发展史是与重大破坏事故的发生有密切关系的。特别是，脆性断裂往往是突然发生的，在发生之前没有预兆，所以往往造成大量的人、物损失。在Shank的调查¹⁾[注]中，有关于64个事例的报告，而且在Parker的著作²⁾中也有详细的记述。很久以前，1886年纽约250英尺高的水塔水压试验时的破坏，1919年波士顿的糖浆罐的破坏(死12人，伤40人以上)等，都是铆接结构物的破坏。而在焊接结构方面的破坏，有1938年比利时架设在阿尔伯特运河上的费廉德尔大桥(构架式结构)，发生三处破坏而坠落于运河中的事故等。

由于第二次世界大战中焊接技术的发展，建造了许多大型焊接结构物。除了大型贮水池、铁桥、高压气体输送管道等的破坏外，最有名的例子是，第二次世界大战美国大量生产的全焊接战时标准船中，约有250艘发生了致命性的破坏或者破损。其中大约有10艘的破坏是在平静的海面上发生了几乎突然断成两段那样的惊心动魄的场面(见图1.1²⁾)。这个事故，是由于焊接部位的

[注] 数字是表示书末参考文献的号码。

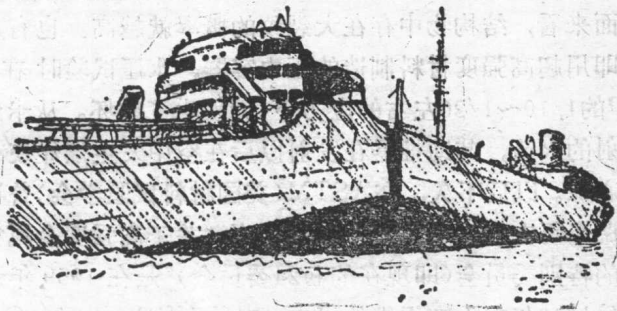


图1.1 在平静的港口突然破坏的油船—什凯尼库他
得号(1943年1月)

缺口应力集中处发生裂纹而产生的，若按传统的设计标准，则是在所允许的低应力下引起的脆性断裂。这只要改善碳素钢材料的低温缺口脆性，以及设法去掉应力集中部分就可一下子解决了。然而在当时(40年代)，设计技术人员还不能定量地处理裂纹的问题。由于这个主要原因，在1920年前后问世的 Griffith的脆性断裂理论，这个关于玻璃等脆性材料的理论经 Irwin、Orowan 等人的修改之后也能适用于钢材了。这就是现在断裂力学的先导，而 Griffith理论至今还起着“光辉的指路明灯”的作用。

另外，日本的造船界，对脆性断裂的危险性很早以前就有所认识，战后采用全焊接结构并没有发生过美国那样的事故。而且，关于低温脆性方面的研究也做了很多工作，特别应该指出，当美国还在用冲击试验等方法来评定材料质量时，吉识、金泽的“两向拉伸试验”等方法，即使按现在的断裂力学的观点来看，也是一种合理的方法。日本对这个问题的研究比其他各国领先。

第二次世界大战以后，拉伸强度高的材料，即所谓高强度材料和超高强度材料的研制已经获得了实际的应用。但是这些材料，一旦发生裂纹，则可能在比低强度材料还要低得多的应力下

发生破坏。而且，如果结构物越是大型化，则从焊接和无损检验等方面来看，结构物中存在大裂纹的概率就越高。也有这样的实例，即用超高强度材料制造的压力容器，水压试验时在拉伸强度^[注]的 $1/10\sim 1/20$ 左右的应力下，就发生了破坏。从卡纳维拉尔角发射的火箭，其助推器在发射以后在空中发生爆炸使有关人员胆战心惊。以后不久，在ASTM(美国材料试验学会)曾设有电话委托调查研究这样的奇闻。ASTM的“关于高强度金属材料破坏试验的特别委员会(即现在的E24委员会)”是在1959年建立的。然后经过10年左右有组织的研究，对Griffith-Irwin-Orowan体系的发展做出了许多重大的贡献。这样，线性断裂力学的基础大体上就确立了。在日本和世界各国，这方面的研究后来越来越多，曾经不过是挑选抗脆性断裂材料的筛选法，最近不仅用于脆性断裂，还应用于其它许多方面，并正在发展成为控制断裂的新的工程方法。

线性断裂力学无论在什么情况下，只要满足上述(3)的要求，即小范围屈服的条件下，就可用来分析裂纹顶端附近的力学状态。低应力下发生的脆性断裂，以及由于疲劳或应力腐蚀引起的裂纹扩展情况等，都是满足这个要求的实例。另外，不满足这个要求的现象也很多。因此，现在断裂力学还正在积极研究线性断裂力学不能适用的范围。

1.2 线性断裂力学分析的特点

用拉伸强度或屈服极限加上适当的安全系数所形成的许用应力作为基础的设计方法，是传统的设计方法，然而对于有关裂纹引起的断裂问题，这个方法是不适用的。这就是发展线性断裂力

[注] “拉伸强度”在许多书籍中常称为“强度极限”——译者。

学的出发点。在下一章将要详细论述，这里先简单叙述一下线性断裂力学分析的特点。

材料力学与线性断裂力学 首先列举一下与一般材料力学的不同点和共同点。如果从学校的讲义或者学会的手册的区分方法来看，所谓“材料力学”的内容是包括：(1)关于材料强度的内容，(2)关于机械或结构物的构件的应力、应变分析的内容。这种狭义上的“材料力学”，可以说是把材料强度与结构物强度结合起来，合理地进行结构物设计和维护的课程，或工程学的方法。因此它是讨论：求在外力作用下结构物中所产生的应力和应变，及在这个应力和应变下材料是否破损或破坏。或者相反，是研究在给定材料强度时结构物能承受多大的外力。这时，所谓材料强度与结构物强度，通常是用应力 σ 和应变 e 这些表示力学状态的参数作为媒介使其对应起来的(参阅图1.2)。

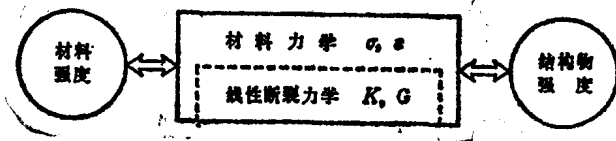


图1.2 “材料力学”与线性断裂力学

如表1.1所示，疲劳寿命 N_c 和蠕变破坏时间 t_c 等的强度特性最主要的是决定于应力或应变，例如，把交变应力幅 $\Delta\sigma$ 和名义应力 σ_0 作为参数，通常表示为 $N_c = f(\Delta\sigma)$ 或 $t_c = f(\sigma_0)$ 等。而且，圆棒试件的屈服极限 σ_{ys} 、加工硬化特性 $\sigma = f(e)$ 、拉伸强度 σ_B 等也用应力或应变的值来表示。这些表示材料强度的参数 σ_{ys} 、 σ_B 和函数 $f(\Delta\sigma)$ ，…，在温度、时间的变化、化学环境等方面为相同的情况下，对于同样的材料几乎为相同的值，而对于构件的尺寸变化是无关紧要的。因此在这个意义上，应力和应变可以用作表示力学状态(关于外力与变形的物理状态)的参数。也就是说，若载荷

表1.1 “材料力学”与线性断裂力学的状态参数

	研究对象的力学现象实例	力学状态参数	发生现象的条件式	材料强度的参数
「材料力学」	屈服	σ 或 ϵ	$\sigma = \sigma_{ys}$	屈服极限 σ_{ys}
	最大承载能力		$\sigma = \sigma_B$	拉伸强度 σ_B
	疲劳寿命 N_c		$N_c = f(\Delta\sigma)$	(SN曲线)
	蠕变破坏时间 t_c		$t_c = f(\sigma_0)$	(蠕变破坏曲线)
线性断裂力学	脆性断裂	K 或 G	$K = K_c$ 或 $G = G_c$	断裂韧性 K_c 或 G_c
	疲劳裂纹扩展速度		$\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$	裂纹扩展速度
	上述扩展的下限值		在 $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ 时 $\frac{da}{dN} \approx 0$	ΔK_{th}
	应力腐蚀下的裂纹扩展速度		$\frac{da}{dt} = f(K_0)$	(裂纹扩展曲线)
	上述扩展的下限值		在 $K \leq K_{Isc}$ 时 $\frac{da}{dt} \approx 0$	K_{Isc}

或外力为与它原来不同的值，而如果 σ 和 ϵ 为相同，则即使构件的形状、大小不同，也几乎发生同样的力学现象。当这样的力学状态参数很明确时，无论是研究材料强度的学科材料强度学，还是测定材料强度特性的材料试验，只要能说明在给定的力学状态下是否发生破坏或破损就达到了要求，没有必要把实际结构物的

形状、大小和外力的大小等一起来讨论。在仅仅用 σ 和 ϵ 作为力学的状态参数还不充分时，只要再加上其他的力学条件(例如，应力集中系数和缺口顶端曲率半径等)在多数情况下也就足够了。

另一方面，线性断裂力学就是研究含裂纹结构物的断裂和变形。对于满足小范围屈服条件并且仅由裂纹顶端附近的材料情况决定的现象，线性断裂力学才能适用。这样的现象的实例列于表1.1的下半部分，在表示材料强度特性的参数和裂纹顶端的力学状态的参数的同时，还列有两者相结合的条件式。最好与表上半部分的例子，应力或应变为力学的状态参数对比来看。材料除裂纹顶端近旁外保持为弹性状态时， K 或 G 与裂纹顶端附近的应力、应变的分布有一一对应的关系。 K 称做应力强度因子， G 称做能量释放率($\approx K^2/E$ ，其中 E 是弹性系数)，这些从下章起开始详细叙述。

在这里，就脆性断裂的情况作为例子说明一下。图1.3上表示与表1.1相对应的描述载荷、裂纹的扩展和应力强度因子随时间的变化。图右上方所示的构件，在裂纹顶端的 K 值是裂纹长度 $2a$ 、宽度 W 、名义应力 σ 的函数，这个函数关系业已知道。该构件在小范围屈服状态时发生脆性断裂的情况，如图1.3(a)所示，如果逐渐增加名义应力 σ ，在几乎为弹性变形之后，当 $\sigma = \sigma_c$ 的载荷时，就会突然断裂。如果这时的裂纹长度初始值为 $2a_i$ ，那么如图1.3(b)所示，在载荷增加过程中 $2a_i$ 基本不变，直到断裂。应力强度因子 K 一般与 σ 成比例，所以象图1.3(c)所示那样不断增加，假如 K 到达某一临界值 K_c ，则发生断裂。材料与板厚相同的几个构件，如果 a_i 和 W 不同，则每个构件的 σ_c 就有不同的值，但 K_c 值几乎相同。因此， σ 不能成为表示这种力学状态的参数，而 K 可作为这种力学状态的参数，与此相对应，不是 σ_c ，而是把 K_c 作为表征此材料的强度特性值。 K_c 为一定值的理由之一，是因为，假如在一个构件上当 $K = K_c$ 时，发生这个断裂现象，而

在其他构件上即使 σ 和 a_i 的值不同，如果 K 与它为相同的值，那么，由于裂纹顶端附近的弹塑性应力—应变分布完全相同，所以就具备了能发生同样断裂现象的条件。但这时，在这些构件上是否发生完全相同的现象，要根据其后 K 的变化方法或能量释放的增减情况来决定，关于这一问题以后要详细叙述。

无论是这个脆性断裂的例子，或图 1.3 所示的其他实例，对于仅由裂纹顶端的状态来决定其发生的现象，在同一材料中 K 值

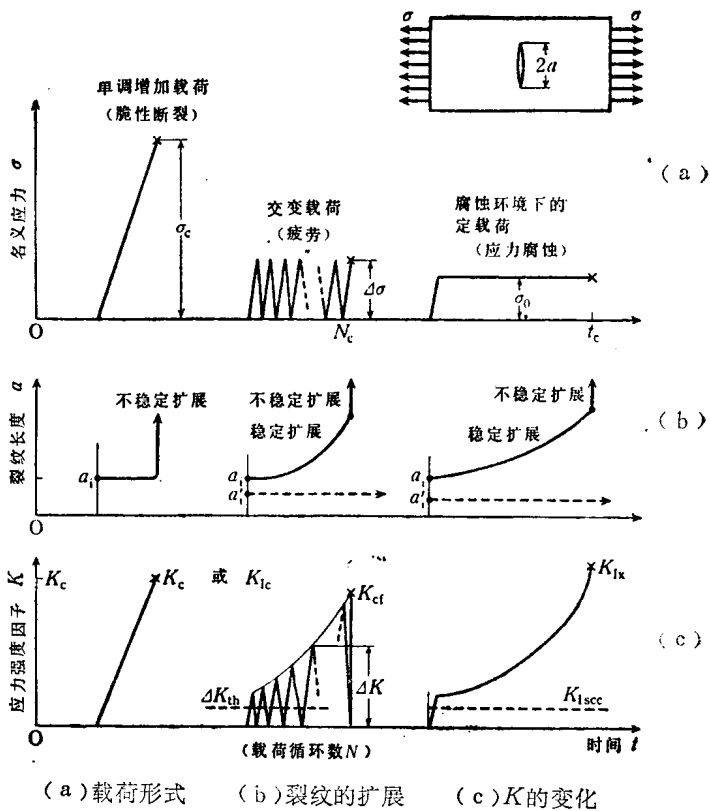


图 1.3 载荷的各种形式与断裂的过程

相等的两个裂纹，假如在一个裂纹中发生某种现象，那么在另一个裂纹中也能发生同样的现象。所以，一方面用计算方法求结构物中的裂纹在外力作用下所产生的 K ，另一方面，假如材料的强度性能也以与此现象有关的 K 作为参数来表示，那么结构物的强度与材料强度就能建立关系式。如果与前述“材料力学”的方法比较，就可理解，在力学状态参数为 K （或 G ）这一点上是与材料力学有所不同的。

从采用与裂纹顶端的应力—应变分布有对应关系的 K ，以及可作为设计和维护的工程学方法出发，线性断裂力学可看作是材料力学的一个分支。与英语相对应可写成：

材料力学——strength of materials

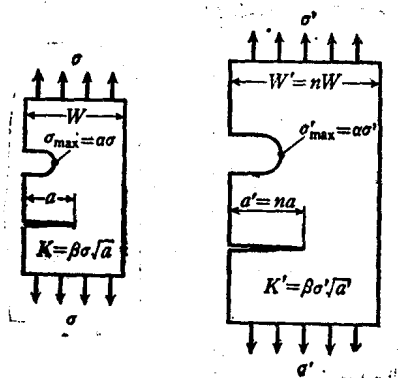
断裂力学——fracture mechanics

上述两个对应的名词都含有相当广泛的意义。不过，本书的范围如上所述，都是只着重解决材料的性能与结构物强度之间相联系的任务，至于为什么 K_c 或 σ_y ，取那个值，是属材料强度理论的范围，本书不予谈及。

断裂力学中相似法则的特殊性 对于图1.4(a)所示的构件，缺口底部产生的最大应力为 σ_{max} ，假如 α 为应力集中系数，则可得：

$$\sigma_{max} = \alpha\sigma \quad (1.1)$$

又如图1.4(b)所示，即使构件尺寸放大为 n 倍时，其 α 也取相同



(a) 基准构件 (b) 尺寸为 n 倍的构件

图1.4 相似的两个构件的比较