

第一卷 上册

(线弹性断裂力学)

袁懋昶 编著

断裂力学理论及其工程应用

Duanlie Lixue Lilun

Jiqi Gongcheng

Yingyong

重庆大学出版社

断裂力学理论及其工程应用

第一卷 上册

(线弹性断裂力学)

袁懋昶 编著

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书第一卷分上下两册。上册两编，第一编讲固体强度、裂纹存在与断裂力学，它实际上是断裂力学的预备知识。第二编讲线弹性断裂力学基本原理，分成第四、五、六、七、八等五章编写的。第二编算是线弹性断裂力学的基础理论和核心内容。该编阐明线弹性断裂力学里四个问题，即脆性断裂理论（第四、五两章），裂纹尖端区应力场、应变场和位移场的理论分析（第六章），应力强度因子及其计算方法（第七章），塑性区与塑性区修正法（第八章）。在脆性断裂理论里详细阐明格里菲斯能量平衡脆性断裂理论（第四章），奥罗文准脆性断裂理论与伊尔文理论（第五章）。

断裂力学理论及其工程应用

第一卷 上册

（线弹性断裂力学）

袁懋昶 编著

责任编辑 朱庆祥 周任

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

中国人民解放军重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16印张：15.75 字数：393 千

1989年2月第1版 1989年2月第1次印刷

印数：1—2000

标准书号：ISBN 7-5624-0131-4 定 价：3.16元
O·19

前 言

英格里斯 (E.C.Inglis) 1913年发表无限板椭圆孔应力集中理论分析结果; 格里菲斯 (A.A.Griffith) 1920年发表著名论文“固体的断裂与流动的现象”(“The phenomenon of Rupture and Flow in solids”)。前者为后者准备了某种条件, 而后者为后来固体断裂现象的研究与断裂力学的创立奠定了理论基础。

伊尔文 (G.R.Irwin) 于1958年和1960年分别发表“断裂”(“Fractur”)和“断裂力学”(“Fracture Mechanics”)两篇有划时代意义的著名论文。从此, 断裂力学这门新兴的工程结构强度科学便在全世界广泛地传播开来。现在这门学科已成为当代最新科学技术成就里最富实用价值的强有力的一门新的工程科学了。

我已在60年代前后就得到了奥罗文 (E.Orowan)、伊尔文 (G.R.Irwin) 和巴林布拉特 (G.I.Barenblatt) 等著名学者的经典论文以及阿维尔巴赫等人 (B.L.Arerbach et al) 1959年主编的论文集《断裂》(《Fracture》)。这些论文和文集曾一度引起我的注意, 可是, 由于客观条件不允许一直没有机会学习。1972年在德阳召开了四川省光测与电测协作会议, 我国著名学者孙训方教授在会上公开倡议学习断裂力学与有限单元法两门新的科学。

1974年我又重新开始注意断裂问题, 阅读了伊尔文、奥罗文等学者的经典论文, 也读了阿维尔巴赫等人的和 STP381两种论文集里一些论文, 同时还读了国内学者如孙训方教授和上海交大等编译的断裂力学讲座和译文集以及其他著作, 参加过一些断裂力学学术活动。

1975年秋我邀约了两三位有志于这门新学科的教师组成了重庆大学断裂力学小组即今天的断裂力学教研组。1975年冬为了适应重庆市工业单位和重庆大学个别专业的教学需要编出很可能算是我国第一本铅印断裂力学教材, 名曰《断裂力学试编讲义》。1976年春由我主讲向重庆大学金相专业本科生班正式开设断裂力学新课程。估计在国内, 至少在西南算是首次开这门课。同时也向重庆市好几家大工厂如特殊钢厂等和事业单位讲授了断裂力学。此后又连续解决了几起有关国家和地方工业生产中重大的断裂力学问题, 从而使这门新兴科学在重庆大学、重庆市工业界和科技界扎下了根。

由于断裂力学教研组几年的工作成绩, 1978年我任导师开始招收固体力学专业应用弹性力学(断裂力学与实验力学)方向硕士研究生, 一直连续招收了好几届, 现在获得学位毕业的已有11名(在学习中的还有4名)、几届硕士生的断裂力学课程是由我担任的, 通过教学工作积累了一些教学资料(讲稿等)。加上几届断裂力学硕士学位论文指导工作的促进, 不能不阅读相当数量而内容广泛的文献。这两方面的工作为编写教材准备了条件。

由于退休, 把本来由我担任的研究生断裂力学课程交给了中年教师上。新的任课教师深感缺乏适用的教材, 因而热烈要求我在过去几年教学基础上编写一种研究生用教材。此外由于几届研究生学位论文指导工作中阅读过相当数量的文献资料, 又需适当整理归纳。基于这两种原因, 就不得不执笔写书了。

大量的当代断裂与断裂力学文献资料表明, 断裂力学不是一门单纯的固体力学而是内容

相当广泛涉及到若干门现代科学领域的一门综合性科学。除力学本身外，它相当紧密地牵涉到物理（主要是金属物理）、化学、数学、冶金（金相）以及多种实验技术与计算技术。总之，包括了多种学科的综合。虽然如此，我的书仍然是用力学的观点和方法来看待和分析裂纹体的断裂现象，从而为解决缺陷固体（工程结构及其零件）的断裂强度问题为宗旨来写的，因而只好把书命名为《断裂力学理论及其工程应用》。

这种书预计要分成三卷写才行，现在只完成了第一卷，第二、三两卷有待今后创造条件来完成。这三卷的内容分别是线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学与断裂力学工程应用问题。

第一卷分为四编并拟定装成上下两册。第一编固体强度、裂纹存在与断裂力学算是全书的预备知识；第二、三、四编分别是线弹性断裂力学基本原理，固体材料的断裂与断裂准则以及动态裂纹几个问题。这一卷虽然侧重于线弹性断裂力学，但在第三编里讨论固体材料的断裂时，却不局限于线弹性体而是相当全面地论述了断裂问题，既讨论了脆性解理断裂，也讨论了延性断裂。

如前所述，本书可以作为研究生教材用，要求较高的本科生专业也可以采用为教材。对于高校教师、科研工作者和工程技术人员也有重要的参考价值。

我在编写时尽量遵守循序渐进和由浅入深等教学原则而且论述又是相当详细的，也可来自学。

再者，由于编著者知识面十分有限而又受到一些客观条件的限制，兼之仓卒成书，错误缺点必然不少，深望海内外贤达先进者和读者不吝指教为幸！

袁懋昶

1987年7月26日谨识

献 给

我的恩师和益友

目 录

第一编 固体强度、裂纹存在与断裂力学

第一章 断裂力学概论	(1)
一、工程结构的安全设计与断裂力学	(1)
(一) 工程结构的古典安全设计	(1)
(二) 古典安全设计条件	(2)
(三) 工程结构的脆性断裂事故	(2)
二、断裂力学的创立及其重要意义	(3)
(一) 断裂力学的创立	(3)
(二) 断裂力学的意义	(4)
(三) 断裂力学的重要作用	(5)
三、断裂力学领域、分类和主要内容	(5)
(一) 断裂力学的领域	(5)
(二) 断裂力学的分类	(6)
(三) 宏观断裂力学	(6)
四、断裂力学的发展简史	(7)
(一) 断裂力学在我国的发展	(7)
(二) 断裂力学在国际上的发展	(8)
(三) 国际文献资料、学术会议等对于断裂力学发展的影响	(10)
参考文献	(11)
第二章 固体的强度与裂纹存在	(14)
一、固体的屈服强度	(14)
(一) 固体强度的意义	(14)
(二) 固体材料的理论屈服强度	(14)
(三) 对于理论屈服强度公式的修正	(15)
(四) 固体的实际屈服强度	(16)
二、固体的断裂强度	(17)
(一) 固体的理论断裂强度	(17)
(二) 固体理论断裂强度的近似简化公式	(19)
(三) 固体的理论与实际断裂强度的比较	(20)
三、固体的固有缺陷与强度	(21)
(一) 格里菲斯的预在裂纹理论	(21)
(二) 裂纹存在对于非金属固体材料断裂强度的影响	(21)
(三) 金属固体材料里的预在裂纹	(22)
(四) 其他因素对于固体材料强度的影响	(24)
四、裂纹位移形式与裂纹类型	(25)

参考文献	(26)
第三章 弹性力学基础与英格里斯断裂强度	(27)
一、对于弹性体的应力、变形和虎克定律	(27)
(一) 应力状态与应力平衡微分方程式	(27)
(二) 应变分析与变形几何方程式	(30)
(三) 普遍虎克定律	(32)
二、平面问题应力解基本方程式与圆孔应力集中问题	(34)
(一) 平面问题应力解的基本微分方程式	(35)
(二) 圆孔无限板的应力集中问题的求解结果	(35)
三、弹性力学基本微分方程式及其通解	(36)
(一) 应力解基本微分方程式	(37)
(二) 位移解的基本微分方程式	(37)
(三) 弹性力学基本微分方程式的几种通解	(38)
四、弹性力学二维问题的复变势函数通解	(40)
(一) 复变函数基本知识	(40)
(二) 在直角坐标系里弹性力学二维问题的复变势函数通解	(41)
(三) 在极坐标系里二维问题的复变函数表示法	(44)
五、椭圆孔应力集中问题的英格里斯解法	(45)
(一) 单向均匀拉伸椭圆孔无限板应力集中问题的英格里斯解法	(45)
(二) 二向或各向均匀拉伸椭圆孔无限板应力集中问题的英格里斯解法	(47)
(三) 椭圆孔最大环向应力的曲率半径 ρ 表示法	(49)
六、由英格里斯应力集中理论导出的脆性断裂强度	(50)
(一) 贾雅提拉卡断裂准则	(50)
(二) 英格里斯脆性断裂强度	(50)
七、魏斯特高尔德裂纹应力的复变函数分析法	(51)
(一) 魏斯特高尔德的复变函数	(51)
(二) 魏斯特高尔德应力函数 ϕ_1 及裂纹应力公式	(52)
参考文献	(53)

第二编 线弹性断裂力学基本原理

第四章 格里菲斯脆性断裂理论	(54)
一、格里菲斯关于裂纹问题的能量平衡原理	(54)
(一) 热力学第一定律在分析裂纹问题时的应用	(54)
(二) 格里菲斯裂纹扩展的能量平衡原理	(55)
二、在格里菲斯能量平衡脆性断裂理论里的能量计算问题	(56)
(一) 格里菲斯对于裂纹体释放能量的计算结果	(56)
(二) 斯宾塞对格里菲斯裂纹能量的计算	(58)
(三) 古吉尔对于格里菲斯裂纹的能量计算	(61)
三、薛昌明与李波维兹对于格里菲斯裂纹问题的解法	(66)
(一) 面外剪切(纵向剪切)问题的复变函数解法	(66)
(二) 在纵向剪切变形能公式里常数 a_0 和 A_0 的确定法	(68)

(三) 双轴拉伸问题的复变函数解法	(70)
(四) 在双轴拉伸变形能公式里常系数的保角映射确定法	(72)
(五) 椭圆孔无限板在纯剪切下的变形能	(73)
四、格里菲斯能量平衡断裂准则	(74)
(一) 格里菲斯能量平衡的断裂准则	(74)
(二) 格里菲斯能量平衡断裂准则在裂纹无限板上的应用	(74)
(三) 格里菲斯能量平衡断裂准则在椭圆孔无限板上的应用	(77)
五、格里菲斯断裂理论里的能量释放率	(81)
(一) 格里菲斯裂纹的能量释放率	(81)
(二) 在定常加载与定常位移下的能量释放率	(83)
参考文献	(85)
第五章 奥罗文准脆性断裂理论与伊尔文理论	(87)
一、延性金属的准脆性断裂	(87)
(一) 理想弹性体的脆性断裂	(87)
(二) 延性金属的准脆性断裂	(88)
二、试样的普遍屈服与塑性约束因子	(90)
(一) 在切槽拉伸板塑性区里的最大主应力	(90)
(二) 切槽试样在普遍屈服下的塑性约束与应力强化	(93)
三、奥罗文准脆性断裂理论	(100)
(一) 奥罗文的准脆性断裂理论	(100)
(二) 奥罗文准脆性断裂的能量平衡理论	(102)
四、伊尔文线弹性断裂力学理论	(104)
(一) 伊尔文对于断裂问题的研究与断裂力学的创立	(104)
(二) 对于裂纹体应力和应变场的线弹性分析	(104)
(三) 几个问题的讨论	(107)
(四) 伊尔文裂纹扩展力的理论计算与实验标定公式	(109)
(五) 裂纹扩展力 G_I 的实验标定法	(112)
参考文献	(114)
第六章 在裂纹前缘区内的应力和位移	(115)
一、格里菲斯古典裂纹问题的保角映射解法	(115)
(一) 格里菲斯古典裂纹问题及其解法	(115)
(二) 格里菲斯裂纹在单向拉伸加载下的应力计算公式	(115)
(三) 格里菲斯裂纹在单轴拉伸加载下应力的确定	(117)
(四) 格里菲斯裂纹位移分量的确定	(119)
二、裂纹应力分析的魏斯特高尔德方法	(120)
(一) 魏斯特高尔德裂纹分析的复变函数方法	(120)
(二) I型裂纹的应力和位移	(121)
(三) II型裂纹的应力与位移	(124)
(四) III型裂纹的应力与位移	(125)
三、二维裂纹问题应力分析的本征值方法	(126)
(一) 本征值的确定	(126)

(二) 极座标应力分量的确定.....	(129)
(三) 位移极座标分量的确定.....	(130)
(四) 直角座标应力分量的确定.....	(131)
(五) 位移直角座标分量的确定.....	(133)
(六) 反平面裂纹问题(Anti-plane Crack Problems).....	(134)
四、威廉斯裂纹应力分析的无穷级数法.....	(137)
(一) 威廉斯无穷级数法的最初表达式.....	(137)
(二) 威廉斯无穷级数法的又一种表达式.....	(141)
参考文献.....	(145)
第七章 脆性断裂参量——应力强度因子K的计算方法.....	(146)
一、应力强度因子K的意义与计算方法.....	(146)
(一) 应力强度因子K的意义.....	(146)
(二) 应力强度因子K的计算方法.....	(147)
二、确定应力强度因子K的应力集中方法.....	(148)
(一) 伊尔文-骆伊伯的应力强度因子的普遍公式.....	(148)
(二) 无限与半无限裂纹板在拉伸应力加载下的应力强度因子 K_I	(149)
(三) 有两个对称U形切槽的无限长板在单轴拉伸 σ 加载下的应力强度因子 K_I	(151)
(四) 哈-古两氏应力强度因子的应力集中法*[5].....	(152)
三、魏斯特高尔德应力强度因子 K_I 的复变函数方法.....	(156)
(一) 魏斯特高尔德应力强度因子 K_I 的普遍计算公式.....	(156)
(二) 中央裂纹无限板的应力强度因子 K_I 的计算.....	(157)
(三) 魏斯特高尔德应力强度因子普遍计算公式在工程实际问题中的应用.....	(157)
四、计算应力强度因子 K_I 的保角映射法.....	(162)
(一) 映射函数 $w(z)$ 与应力强度因子 K_I 的计算公式.....	(162)
(二) 平面复合型应力强度因子 K 公式的应用.....	(164)
(三) 几个二维裂纹问题的应力强度因子 [7,8].....	(165)
五、确定应力强度因子的本征值方法 [3].....	(167)
(一) 平面复合型裂纹应力强度因子 K 的普遍基本公式.....	(167)
(二) 平面复合型应力强度因子 K 的确定.....	(168)
(三) 反平面裂纹问题的应力强度因子.....	(172)
六、确定应力强度因子的边界配置法.....	(174)
(一) 边界配置法的意义与应力函数.....	(174)
(二) 在边界配置法里应力函数及其导数以及应力分量的准确解和近似解.....	(176)
(三) 线性代数方程组的建立.....	(181)
(四) 三点弯曲试样应力强度因子 K_I 的计算.....	(185)
七、二维裂纹问题应力强度因子的计算结果.....	(190)
(一) 无限板中央裂纹问题的计算结果.....	(190)
(二) 半无限板边裂纹问题的计算结果.....	(192)
(三) 有限板裂纹问题的计算结果.....	(193)
(四) 圆柱拉伸杆的圆周裂纹问题.....	(196)
八、表面裂纹的应力强度因子.....	(197)

(一) 表面裂纹问题概论	(197)
(二) 伊尔文关于平面半椭圆形表面裂纹K的近似解	(198)
(三) 纽曼表面裂纹的断裂分析	(199)
参考文献	(204)
第八章 裂纹尖端塑性区与塑性区修正法	(206)
一、裂纹尖端塑性区的形状和尺寸	(206)
(一) 在二维裂纹体裂纹前沿区里一点的应力状态	(206)
(二) 在冯米塞斯准则下裂纹尖端塑性区的形状和尺寸[1]	(207)
(三) 在托雷斯加塑性准则下塑性区的形状和尺寸	(210)
(四) 在II型和III型加载下裂纹前沿的塑性区	(211)
二、伊尔文塑性修正法里的塑性区	(212)
(一) 在伊尔文塑性区修正法里的塑性区模型	(212)
(二) 在平面应力状态下塑性区尺寸的确定	(213)
(三) 伊尔文平面应变状态下塑性区尺寸的确定	(214)
(四) 在平面应变及切槽屈服应力下塑性区尺寸的确定	(215)
三、伊尔文塑性区修正法	(216)
(一) 伊尔文塑性区修正法里的分析公式	(216)
(二) 对断裂参量K塑性区修正的逐步逼近计算法	(217)
(三) 断裂参量塑性区修正的图解法	(221)
(四) 伊尔文关于 K_c 和 K_{Ic} 塑性区修正值的分析公式	(225)
四、达格德尔的塑性区修正法	(227)
(一) 达格德尔塑性区尺寸的确定	(227)
(二) 达格德尔断裂参量塑性区修正法	(228)
五、估计到材料硬化影响的塑性区修正法	(231)
(一) 对塑性区修正法的三种不同的观点	(231)
(二) 估计到材料硬化性质对塑性区修正法的影响	(232)
(三) 对裂纹扩展力的塑性区修正法	(234)
(四) 对塑性区修正法三种观点的简短评论	(240)
参考文献	(240)

第一编 固体强度、裂纹存在与断裂力学

第一章 断裂力学概论

一、工程结构的安全设计与断裂力学

(一) 工程结构的古典安全设计

断裂力学作为一门新的工程结构强度科学于本世纪五十年代末期间世之前，一切工程结构如机械结构和建筑结构等等在正式投入建造之前都必须经过安全设计。这种安全设计可以叫做古典安全设计。所谓古典安全设计是以材料力学为基础的古典强度科学所建立的设计原理和方法进行的工程结构设计。古典安全设计至少要满足下面两条基本要求：

1. 安全设计原则；
2. 安全设计条件。

从材料力学的学习可知，要做到安全设计必须遵守安全与经济这两条主要的强度设计原则。就安全原则言，设计者必须保证使所设计建造出来的工程结构物及其零件在投入生产或在服役工作中能正常运行而不破坏。即必须保证所设计的工程结构物及其零件在投入使用过程中不发生下列任何强度破坏现象之一。

- (1) 不发生过大的残余变形或屈服现象；
- (2) 不发生断裂，即不被破断成为若干部分；
- (3) 对于精密机械，其弹性变形要在规定的许可范围以内；
- (4) 对于受压力作用的结构或零件要不改变其原有形状，即不丧失稳定性。

如果设计出的工程结构及其零件能满足这些要求，就算是符合安全设计原则了。

什么是经济原则呢？一般言之，要使工程结构及其零件符合经济原则，如果只从设计上去看，那就是在设计时要做到省料、省工和省费用。在这里姑且不去论述省工和省钱的设计，只就省料而言，至少应该做到两点。

(1) 要使工程结构物在承受载荷时各个部分的材料都能充分发挥它应有的和同等的作用，也就是要采用合理的结构形式与合理的截面形式。

(2) 不能有过的强度储备。为了要使设计制造出的工程结构能正常安全地服役，一定的强度储备是必要的，但不能过多。要做到这一点是不太容易的。设计者不但要有丰富的设计经验，而且还要作调查研究，尽量把情况摸准，从而使设计出的结构能满足既有必要的强度储备，也不会过多这一基本要求。

(二) 古典安全设计条件

在古典强度科学里，为了使工程结构及其零件的强度设计满足安全要求，通常都是按照材料力学里建立的安全强度条件来设计的。在材料力学里惯于把强度条件区分为破坏与安全两类。这两类条件用公式表示如下

$$\begin{aligned} \text{单轴加载} \quad & \sigma_{\max} \leq \sigma_L \\ \text{复合加载} \quad & \sigma_{\text{eq}} \leq \sigma_L \end{aligned} \quad (1)$$

这里 σ_L 表示工程材料的极限应力 (Limited stress)，而 σ_{\max} 及 σ_{eq} 分别表示结构危险点在单轴应力状态下的最大工作应力和多轴应力状态下由强度理论折算出的等价工作应力 (Equivalent Working Stress)。

在强度科学里，通常把材料发生屈服和断裂时的应力状态叫做极限应力状态。而把在极限状态下的应力即屈服应力 σ_Y (或有时用 σ_{YS} 、 σ_S 表示) 与强度极限 σ_u (或用 σ_b 表示之) 叫做极限应力以 σ_L 表示之。

我们把结构危险点达到极限状态时的强度条件，在(1)式里采用等号时的强度条件叫做破坏条件，即有

$$\begin{aligned} \text{单轴加载} \quad & \sigma_{\max} = \sigma_L \\ \text{复合加载} \quad & \sigma_{\text{eq}} = \sigma_L \end{aligned} \quad (2)$$

这样的强度条件只有在个别特殊情况下使用，不过在安全设计里是不会用的。

为了能使工程结构安全地工作而不发生强度破坏就必须使危险点的工作应力下降到材料的极限应力之下，即采用(1)式里的不等式。

$$\begin{aligned} \text{单轴加载} \quad & \sigma_{\max} < \sigma_L \\ \text{复合加载} \quad & \sigma_{\text{eq}} < \sigma_L \end{aligned} \quad (3)$$

引入常数 n 使不等式转化成等式，则有

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{n} \sigma_L, \quad \sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{n} \sigma_L \quad (4)$$

通常令

$$[\sigma] = \frac{1}{n} \sigma_L \quad (5)$$

这里 n 及 $[\sigma]$ 分别叫做安全系数与许用应力，两者均在设计规范里有具体规定，这里就不细谈了，这样，强度条件可以写成如下形式

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad \sigma_{\text{eq}} \leq [\sigma] \quad (6)$$

上式就是在古典安全设计里通用的**安全强度条件**了。

古典强度观点认为，只要设计时安全强度条件被满足，则设计制造出来的工程结构便被认为是安全的，即能够安全服务的。

(三) 工程结构的脆性断裂事故

根据古典安全强度条件作了安全设计而制造出来的工程结构是否能真正保证安全可靠的工作呢？从古今中外有记载的许多工程结构发生重大的脆性破坏事故看来，通过古典安全设计而制造出来的工程结构不一定是安全的。从现有的断裂力学文献所列举出的各式各样的脆性断裂事故均不难证明这一论断。例如在文献[1]的“表1-1”里就列出了古今中外灾害性脆性断裂事故29件。在文献[2]里列出了在十九世纪发生的偶然不测事故，其数量之多达到数不清的程度；仅在1860-1870年的十年期间，就英国而论每年死于铁路破坏事故的人约

有200名。在该文献里，还介绍了安得生(W.E. Anderson)[3]与比格斯(W.D. Biggs)[4]两人在断裂事故资料搜集方面的有益工作，而安得生把最近二百年来的重要断裂事故编成了汇编。文献[5]用生动的笔墨描述了1919年1月15日波士顿商业街大糖浆储罐发生爆炸的重大破坏事故。关于破坏事故的著作不打算继续介绍下去了。现在只就这些著作里所介绍出的破坏事故选出几条为例介绍如下：

1. 1956年重庆钢铁公司大型钢板轧机人字齿轮轴在轧制过程中突然折断。
2. 1898年12月13日纽约市大贮气罐发生爆炸，使许多人死亡和受伤，并毁坏了周围大量的财物。
3. 工程杂志1886年2月号上刊登：每年在联合王国有50~60起锅炉爆炸事件，使许多人丧命，并使许多建筑物受到破坏。
4. 1940年在二次世界大战期间，美国建造的2500艘自由轮中有145艘断成两截。大约有700艘发生了严重破坏。
5. 1982年11月长航东方红122号客轮发动机连杆突然断裂而造成巨大损失。[6]。

从列举出的许多破坏事故可以看出，经过古典强度安全设计而制造出来的各种工程结构物在服务工作中不一定都能保证安全而不发生破坏。这是什么原因呢？许多断裂事故的发生好像是偶然现象，可是经过许多学者仔细研究后证明：**破坏事故的发生决不是偶然现象而是事物发展的必然结果。原来任何固体材料都不是如材料力学和弹性力学所设想的那样十全十美的连续介质而总是会有这样或那样的局部不连续性缺陷(裂纹)存在。随着使用时间的推移，裂纹会逐步扩展而导致工程结构最后的断裂。因此，脆性断裂事故的发生决不是偶然性事件而是结构本身裂纹扩展的必然结果。**

古典强度科学把固体材料设想成为完美无缺的连续介质，从而建立其古典安全强度条件。我们可以把这样的条件叫做**连续体安全强度条件**。对于工程结构的安全设计古典的连续体安全强度条件只是应该首先被满足的必要条件，如果只根据这种条件来进行工程结构的安全设计而不考虑材料固有的局部不连续性缺陷，那就远远不够了。

从上面对于工程结构安全设计的分析结果，我们似乎可以引出这样两条有益的结论：

1. **古典安全强度条件(6)式只是工程结构安全设计首先应该满足的必要条件而不是充分条件。**
2. **研究固体材料局部不连续性宏观缺陷进入临界状态的条件是进行工程结构安全设计必须考虑到的必不可少的补充条件。**

为了建立宏观缺陷进入临界状态这一补充的安全强度条件，许多学者从本世纪二十年代起直到目前为止作出了许多重大努力，不但创立了断裂力学这样一门新兴工程强度科学，而且还在不断努力促其发展和完善过程中。这样一门新兴强度科学正是本书各章要详细介绍的内容。

二、断裂力学的创立及其重要意义

(一) 断裂力学的创立

如果我们把第一节里讨论过的内容归纳起来，主要问题有两个：

(1) 工程结构的古典安全强度设计及其条件;

(2) 古今中外许多工程结构在使用过程中曾经发生过许许多多灾害性的断裂事故, 而造成巨大的损失。

上面第一个问题已在第一节里充分地讨论过了。现在着重讨论第二个问题。

由于近代工农业和国防工业的高速度发展, 在服役中的工程结构灾害性脆性断裂事故也频繁地发生而层出不穷。考察这些由于灾害性脆性断裂事故而被破坏的工程结构都是经过古典安全设计而制造出来的, 为什么会发生为人们意想不到的严重破坏事故呢? 这些不曾预料到的破坏现象不但使人格外震惊, 而且也引起许多科学技术专家的特别重视。经过分析研究后发现, 以材料力学为基础的古典安全设计原理和方法还存在着严重缺点和不足之处, 没有从根本上做到完全彻底地解决工程结构安全强度设计问题。因此基于现代化工程建设的迫切需要, 迫使人们不得不去寻求解决工程结构强度设计问题的新途径。从而提出一套崭新的更完善的安全设计原理和方法。

从本世纪二十年代起到五十年代末止大约经过四十多年的探索和研究, 科技工作者根据大量的断裂现象观测结果和试验研究提出了解决工程结构强度问题的一套新理论和新方法, 从而使断裂力学这门崭新的工程强度科学问世了。创立断裂力学的简单经过概况大致如此, 更详细的发展史待有机会时再作介绍, 或参阅其他著作。

(二) 断裂力学的意义

什么是断裂力学呢? 从国内外发表的文献看出, 对于这个问题的回答却有种种不同的说法。例如:

日本学者国尾武的说法: “断裂力学是连续介质力学应用于材料破坏的一门应用科学, 而又把材料的缺陷模型化为理想裂纹”。接着又说: “在美国, 它的定义是: 在强度方面安全地使用有缺陷或预期会产生缺陷的材料为目的的工程方法” [7]。

英国学者诺特(J. F. Knott)说: “宏观断裂力学的目的在于比可用的传统韧性试验技术更多的定量方式为工程师们提供一种对于工程结构抵抗断裂的设计方法” [8]。

苏联学者切勒潘诺夫(G. P. Cherepanov)说: “若干年前出现的术语“断裂力学”在两种意义下被采用: 在狭义情况下, 断裂力学指的是裂纹传播的研究; 在广义情况下, 断裂力学包括着关于研究变形过程最后阶段材料强度科学的分支。因此结构的强度问题作为一个重要组成部分已被包括在断裂力学之内了” [9]。

从上面种种说法的实质性定义可以看出, 断裂力学的定义似乎可以简化成这样一些说法:

(1) 一门应用科学; (2) 工程方法; (3) 设计方法; (4) 裂纹传播的研究; (5) 强度科学的分支; (6) 新的工程科学; 等等。

从这些简明定义中每一个来看, 虽不全面恰当, 但是每一种说法均各反映出它一个方面的特性; 而且研究对象相同, 都是裂纹体; 方法相同, 都是用连续介质力学方法。最后两条是断裂力学诸定义的共同基础。

再者, 断裂力学与材料力学(包括弹性力学等)两者研究对象的物理模型是相同的, 都是变形固体。但是两者所面临的变形固体却有区别, 材料力学里的变形固体是没有缺陷存在而处处连续的完全连续体; 而在断裂力学里的变形固体总是会有这样那样的缺陷存在而不是处处连续的非完全连续体。

那么究竟什么是断裂力学呢? 根据前面由分析得出的两条基本共同点和研究对象的物理

模型，我们可以把断裂力学定义为：**断裂力学是运用连续介质力学方法来研究有这样或那样缺陷存在而不是处处连续的非完全连续变形固体的裂纹扩展规律以期能为工程结构的安全设计提供一套新的设计原理和方法的一门新的工程强度科学。**

(三) 断裂力学的重要作用

断裂力学对于我国加速实现社会主义“四个现代化”具有十分重要的作用。因为减少或消灭工程结构灾害性脆性断裂事故的发生以及建立新的安全设计原理和方法必然会促进现代工业、现代农业、现代国防和现代科学技术的发展。详言之，其重要作用有下列几个方面：

(1) 发现并证实了固体材料的固有缺陷，即认为固体材料总是会有这样或那样缺陷存在而不会是处处连续的理想固体连续介质。并由此提出裂纹体安危容限的预报准则。这样同传统作法就大不一样了。**工程界的传统作法是：不承认工程结构物会有缺陷存在，一旦发现缺陷便立即作报废处理。**

但是自断裂力学创立以来的现代作法却大不相同。断裂力学不但承认由固体材料制造出来的工程结构物会有缺陷存在而不会是处处连续的理想连续体，并且还给出了缺陷安危的判定准则，即能判定什么样的缺陷是容许的无害的，什么样的缺陷是有害的不容许的。提出了对于缺陷的“容限设计”，找出缺陷的容限尺寸。因而**有缺陷存在的物体不一定不能使用，而使用时不一定不安全，只是能使用的时间即使用寿命有一定的限度而已。**

(2) 对于用固体材料制造的工程结构的强度问题提出一整套崭新的强度观点和方法，弥补了古典强度科学的重大缺点。这有以下三个方面：

- ① 新的强度观点与新的强度准则的提出；
- ② 新的材料机械性能即断裂韧性的发现及其测试方法的研制；
- ③ 新的工程结构“安全设计”方法即“容限设计”方法的提出。

(3) 提出工程结构使用寿命的计算方法。传统观点认为，机械或其他工程结构具有无限长寿命可以永久使用；而新的强度观点认为，**任何机械或任何工程结构同人一样是有一定寿命的，决不会永远可用。**

(4) 研究各种因素对于结构强度的影响。例如受力大小、加载方式、温度高低、环境因素、残余应力、冶金因素、热处理，……等等对于工程结构强度都各有不同程度的影响。

(5) 其他方面的研究。例如，疲劳裂纹的研究、氢脆性问题和蠕变断裂问题的研究，止裂原理和方法的研究，避免材料缺陷和增加韧性冶炼方法的研究，等等。

三、断裂力学领域、分类和主要内容

(一) 断裂力学的领域

什么是断裂力学领域呢？所谓**断裂力学领域 (The field of fracture mechanics)**就是它研究问题的范围。断裂力学虽然名为力学，却不是单纯的一门力学而是广泛地牵涉到若干门学科如物理、化学、力学、数学、材料学和工程科学等等一门综合性科学；或者如下面图1所示是牵涉到材料科学、工程科学和应用力学等的一门综合性科学。

断裂力学研究对象的裂纹体（工程结构或试样）从微观到宏观尺寸的变化范围如上面图1所示是由 10^{-10} 米（埃）到 10^2 米，即从物体的原子尺度到几百米大的大型工程结构如飞

机、船舶及其他大型结构都在它研究范围之内。

布洛克 (D. Broek) [2] 在描述断裂力学的广阔领域时是通过应用力学把材料科学同工程结构联系起来, 他用示意图表示如图 1。应用力学是就裂纹体 (试样和工程结构) 裂纹尖端附近的应力场以及裂纹附近的弹性和塑性变形用数学和力学手段进行理论分析, 为解决工程结构断裂问题和材料的断裂常数的测试提供可靠依据。

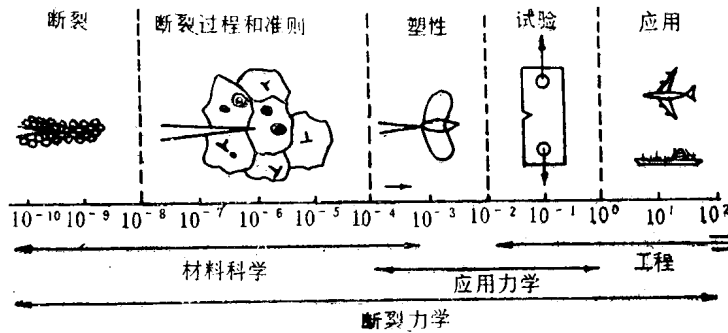


图 1 断裂力学的广阔领域 [2]

材料科学是在晶粒尺度范围内研究原子、夹杂、位错和晶粒尺寸等因素在断裂过程中的影响, 并导出支配裂纹扩展和物体断裂的准则, 从而为力学运用这些准则预报裂纹体在给定条件下的断裂或裂纹扩展特性准备条件。

(二) 断裂力学的分类

为了便于阐明断裂力学的主要研究内容有必要首先说明有有什么样的断裂力学。一般言之, 由于载荷性质、研究工具和其他因素不同, 断裂力学有种种不同的名称。例如:

1. 由于是否借助显微装置作为研究工具而有微观和宏观断裂力学;
2. 由于加载方式不同而有静态、动态与疲劳断裂力学;
3. 由于加载程度不同或由于裂纹尖端地区塑性变形大小不同而有线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学以及屈服或屈服后断裂力学;
4. 由于是否借助实验机仪和计算机而有实验断裂力学与计算断裂力学;
5. 其他分类法。例如由于借助化学物理冶金等方法而有化学断裂力学, 物理断裂力学以及断口金相分析等。

(三) 宏观断裂力学

如果把上面开列出的几种断裂力学分类法归纳起来, 我们将要讨论的断裂力学内容由下面几个部分组成:

第一部分: 宏观断裂力学;

第二部分: 微观断裂力学;

第三部分: 断裂力学的实验技术与计算技术;

第四部分: 物理和化学断裂力学。如断裂的位错理论, 应力腐蚀和氢脆性, 等等。

在本书里, 我们侧重研究宏观断裂力学及其有关的实验测定技术。宏观断裂力学的主要研究内容是有宏观缺陷存在的裂纹体裂纹传播规律及其控制条件。它被分为下列几个部分:

(1) 线弹性断裂力学——其任务是研究裂纹体裂纹尖端地区发生完全弹性变形和小规模屈服的裂纹扩展规律的断裂问题, 即研究裂纹体的脆性和准脆性断裂问题; 也就是研究裂

纹体在断裂过程中没有或很少发生塑性变形的裂纹扩展规律。例如由铸铁、高碳钢, 高强度钢和超高强度钢, 以及有巨大尺寸的中低强度钢等材料制造出来而有缺陷存在的工程结构就是属于这类问题。线弹性断裂力学是本书第一卷侧重研究的主要内容。

(2) 弹塑性断裂力学——弹塑性断裂力学的任务是研究由延性材料制成而尺寸不太大的工程结构裂纹体的裂纹扩展规律与断裂问题。它是研究裂纹尖端地区发生大规模塑性屈服而又被广大弹性区所包围的裂纹的扩展规律与断裂问题。例如由尺寸不太大的低碳钢、中低强度钢、铝合金和钛合金等材料制成的薄板、薄壳和细管等工程结构裂纹体就属于这类问题。弹塑性断裂力学及其有关断裂参量的测试技术是本书第二卷侧重研究的主要内容。

(3) 动态断裂力学——或叫做动态裂纹问题。研究裂纹体的动态应力强度与动态裂纹传播规律和断裂问题。动态裂纹问题是本书第一卷研究的内容之一。

(4) 断裂力学工程应用问题——这个部分的主要内容通常包括疲劳断裂、应力腐蚀, 高温蠕变断裂, 止裂问题, 残余应力影响等。如有可能准备把这些内容放在本书第三卷里去讲。

(5) 断裂力学的实验与计算技术问题——在本书里不打算讨论计算技术问题。而断裂力学的实验技术包括断裂韧性的测试和断裂力学参量的实验确定法两个部分。本书对这两个部份内容打算放在适当的有关章节里去讲。

四、断裂力学的发展简史

对于断裂力学发展简史拟分成国内和国际两个部分介绍。

(一) 断裂力学在我国的发展

断裂力学这门新兴强度科学传入我国的时期虽然早在本世纪六十年代之初, 而我国对这门新科学开始研究起步时间大约是在七十年代左右(估计一般在1972年左右)。而且在起步的初期阶段从事这项研究工作的又只局限于少数几家先进单位里的极少数几个先驱学者。例如西南交通大学的孙训方, 东北工学院或金属研究所的赖祖涵, 浙江大学的王仁东和北京钢铁设计研究院的陈兢等就是。由于少数先进学者的提倡并在全各地用讲学和办讲习班等方式进行宣传和鼓动, 使这门新兴强度科学在我国生根发芽并迅速成长壮大起来了。

1974年到1984年这十年里通过在北京和其他地方举办不同性质和不同大小规模的断裂力学或断裂韧性测试技术的讲习班和训练班, 同时又召开有相当规模的全国性的、地方性的和行业性的断裂力学、实验力学、断裂和疲劳等的学术讨论会和经验交流会议等方式进行广泛的学术传授和交流, 从而把我国的断裂力学的学术水平推向日趋接近当代国际先进水平的高度。到目前为止, 断裂力学的初步知识和断裂韧性的基本测试技术几乎已成为全国各有关科技界家喻户晓的普通常识了。普及速度之快, 普及面之广泛和深入使人吃惊。

自1978年武汉断裂学科会议之后, 我国第一部自订的断裂韧性 K_{Ic} 测试标准诞生了[11]。1980年我国又制订出“金属材料延性断裂韧度 J 积分的试验标准”[12]。这算是世界上最早的一部 J 积分试验标准。从1981年起我国主要是重庆大学又开始着手对人字形切槽短柱试样 K_{Ic} 测试法的实验研究并取得了较满意的研究成果。

1977年我国有代表参加在加拿大召开的第四届国际断裂会议 ICF4; 1982年也参加了在法国召开的 ICF5, 即第五届国际断裂会议。从这些时候起在著名的国际断裂力学刊物