

断裂力学及其工程应用

胡传炘 编

北京工业大学出版社

2

断裂力学及其工程应用

胡传炘 编 著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书简明系统地对线弹性断裂力学及弹塑性断裂力学进行了介绍,反映了断裂力学研究近年来的新成果,在介绍中充分考虑到工科学生(或工程技术人员)的特点。在此基础上,本书列举了大量的例题及工程实例,对断裂力学在选材及指导工艺、缺陷评定、疲劳寿命估算、抗断裂设计计算、结构安全分析等方面作了详细讨论,对断裂力学在焊接接头及结构中的应用进行了深入分析。

断裂力学及其工程应用

胡传炆 编著

*

北京工业大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
铁道科学研究院印刷厂印刷

*

1989年5月第1版 1989年第1次印刷

787×1092毫米1/16开本 印张: 15.375 字数: 380千字

印数: 0001-2500册

ISBN 7-5639-0029-2/G·17

定价: 7.60元

序

《断裂力学及其工程应用》即将出版。胡传炘先生多年来在教学和科学研究中，勤于钻研，勇于改进，以其丰富的经验，赢得学生欢迎。此书问世，必获盛誉于来日。

断裂力学并具有较强的理论性与实践性。本书旨在供工科院校有关专业教学之用。书首着重引入数学基础部分，并加强力学基础内容；实践方面，对断裂韧性测试技术、缺陷评定、安全分析等，给予了足够重视。足见编写中安排之得当。

虽然线弹性断裂力学在理论与测试技术方面，均发展得比较成熟，业已广泛应用，但对于工业结构中大量应用的中低强钢构件，迅速断裂前有大塑性区，线弹性断裂力学已不适用。编者阐述并探讨大范围屈服、裂纹失稳扩展以及弹塑性条件下裂纹体的应力应变场和断裂准则等问题，既总结了已有成果，又指明了发展中有待深入研究的问题。

末篇，断裂力学在焊接结构力学中的应用，内容紧密结合实际，把焊接接头、焊接结构的特点与断裂力学理论的应用相结合，旁征博引，全面探讨，深入浅出，颇具匠心。

书中各篇的例题和习题，安排适当，对学习甚有裨益。

窃以为此书必将对焊接专业教学和学生学习起到有利的作用，故乐为之序。

徐碧宇

前 言

近些年来，断裂力学在工程中的应用日益受到人们的重视，不少高等学校均开设这门课程。笔者将近10年来从事断裂力学课程教学及科研的体会，编成此书，目的是为有关专业（如焊接、金属材料及热处理、铸造、机械制造、油气储运等）学生提供一种简明实用的讲义，使他们能够以较少的时间掌握断裂力学的基本内容，并且能够运用它去分析和解决有关工程问题。同时，本书对在职的工程技术人员和其他有兴趣的读者，也不失为一本适宜的自学参考书。

本书包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学及断裂力学在工程中的应用3个部分。叙述中力求基本内容系统清楚、基本概念物理意义明确、必要的数学推导详细，尽量反映最新水平。但内容的选取决不企求全面，也不希望成为一本手册之类的东西。在内容取舍及安排上，尽量考虑到工科学生的基础及作为一个工程技术人员的实际需要，尤其是考虑到工科学生的数学及力学基础，力图做到深入浅出。

本书原稿《断裂力学及其在焊接结构中的应用》，曾在北京工业大学本科生及有关工程技术人员中作为教材使用过多次，他们提出了许多宝贵意见，在此深致谢忱。

徐碧宇教授为本书曾提出许多宝贵意见。全书由宋甲荫副教授主审。北京工业大学焊接教研室各位同仁给予极大帮助。在此，一并表示感谢。

限于笔者水平，书中错误之处在所难免，诚恳欢迎批评指正！

胡传炘

1988年10月于北京

目 录

本书所用主要符号	(1)
结 论	(3)
第一篇 线弹性断裂力学	
引 言	(9)
第一章 复变函数方法	(10)
§ 1-1 复数和复变函数	(10)
§ 1-2 解析函数和调和函数	(11)
第二章 弹性力学基础简介	(15)
§ 2-1 应力分量和应变分量	(15)
§ 2-2 广义虎克 (Hooke) 定律	(17)
§ 2-3 平衡条件及边界条件	(19)
§ 2-4 平面问题	(21)
§ 2-5 弹性力学基本方程组及求解途径	(23)
第三章 断裂及断裂机理	(27)
§ 3-1 断裂及其分类	(27)
§ 3-2 疲劳断裂	(30)
§ 3-3 应力腐蚀及氢脆	(31)
§ 3-4 断裂机理	(34)
第四章 线弹性断裂力学基本理论	(38)
§ 4-1 I 型裂纹基本方程及边界条件	(39)
§ 4-2 Westergaard 应力函数	(39)
§ 4-3 双向拉伸 I 型裂纹顶端的应力应变场	(42)
§ 4-4 单向拉伸 I 型裂纹顶端的应力场	(46)
§ 4-5 II 型和 III 型裂纹顶端的应力应变场	(48)
§ 4-6 应力强度因子 K_I	(51)
第五章 小范围屈服下 K_I 的修正	(58)
§ 5-1 修正 K_I 的必要性及可能性	(58)
§ 5-2 塑性区的形状和大小	(58)
§ 5-3 应力松弛对塑性区尺度的影响	(61)
§ 5-4 小范围屈服下 K_I 的修正	(63)
第六章 能量释放率 G	(67)
§ 6-1 历史简述	(67)
§ 6-2 能算转换与能量释放率 G	(68)

§ 6-3	G_1 与 K_1 的关系	(72)
第七章	线弹性断裂判据及其工程应用	(75)
§ 7-1	线弹性断裂判据	(75)
§ 7-2	K 判据在工程中的应用	(75)
§ 7-3	抗断设计计算	(76)
§ 7-4	疲劳寿命估算	(79)
§ 7-5	选材及指导工艺	(83)
§ 7-6	平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测定	(84)
	第一篇参考文献	(89)
	第一篇习题	(90)
第二篇	弹塑性断裂力学	
	引言	(93)
第八章	塑性力学基础简介	(95)
§ 8-1	塑性理论简介	(95)
§ 8-2	应力张量及应变张量	(95)
§ 8-3	弹-塑性小变形理论基本方程 (全量理论)	(97)
§ 8-4	塑性流动理论基本方程 (增量理论)	(98)
第九章	J 积分	(101)
§ 9-1	J 积分定义	(101)
§ 9-2	J 积分证明	(101)
§ 9-3	J 积分守恒性	(107)
§ 9-4	J 积分的物理意义	(109)
§ 9-5	J 积分形变功率表达式	(111)
§ 9-6	J 积分判据 (H. R. R. 理论)	(116)
§ 9-7	J 积分在实际裂纹中的应用	(119)
§ 9-8	临界 J 积分 (J_{Ic}) 的测定	(122)
第十章	COD 法	(125)
§ 10-1	COD定义及COD判据	(125)
§ 10-2	COD计算	(127)
§ 10-3	断裂参量 K_1 , G_1 , δ , J 间的关系小结	(138)
§ 10-4	COD判据在工程中的应用	(141)
§ 10-5	临界COD (δ_c) 测定	(146)
	第二篇参考文献	(150)
	第二篇习题	(152)
第三编	断裂力学在工程中的应用	(153)
	引言	(153)
第十一章	断裂力学在工程中的一般应用	(154)
§ 11-1	断裂力学在选材中的应用	(154)

§ 11-2	断裂力学在指导工艺中的应用	(158)
§ 11-3	抗断设计计算及强度校核	(159)
§ 11-4	冲击韧性及断裂韧性的关系	(161)
第十二章	焊接接头断裂力学	(169)
§ 12-1	焊接接头断裂力学分析的特点	(169)
§ 12-2	焊接接头不同部分的断裂韧性	(170)
§ 12-3	焊接残余应力、角变形及错口对接头断裂的影响	(175)
§ 12-4	防止焊接接头低应力脆断的途径	(179)
§ 12-5	焊条熔敷金属的COD值	(182)
§ 12-6	焊接接头的应力腐蚀断裂	(184)
第十三章	焊接结构断裂力学	(188)
§ 13-1	焊接结构断裂力学分析的特点	(188)
§ 13-2	压力容器断裂力学	(189)
§ 13-3	缺陷评定	(197)
§ 13-4	断裂事故分析	(207)
§ 13-5	断裂安全分析——确定论方法	(208)
§ 13-6	断裂安全分析——概率论方法简介	(216)
§ 13-7	焊接结构中裂纹的高速扩展及止裂	(217)
第三篇参考文献		(224)
第三篇习题		(225)
习题答案		(226)
附录A 单位换算表		(228)
附录B COD测试实验指示书		(229)
附录C 焊条熔敷金属COD测试		(234)

本书所用主要符号

- A ——横截面；裂纹面积
 a ——穿透裂纹半长；表面裂纹深度
 a_c ——裂纹容限
 C ——表面裂纹半长；柔度
 E ——弹性模量
 G ——裂纹扩展能量释放率
 G_{1c} ——I型裂纹扩展 G 之临界值
 J —— J 围线积分
 J_{1c} ——I型裂纹扩展 J 积分临界值
 K ——应力强度因子
 K_{1c} ——I型裂纹扩展平面应变断裂韧性
 K_I, K_{II}, K_{III} ——I, II, III型裂纹扩展应力强度因子
 l ——长度
 M ——鼓胀因子
 M_p ——塑性区修正因子
 P ——力；内压；外载；
 Q ——裂纹形状系数
 R ——裂纹扩展阻力；考虑应力松弛后，裂纹顶端屈服区尺寸
 R_j —— J 主导区
 T ——外力；张力
 U ——系统总势能
 V ——位移
 W ——外力功；试样宽度
 W_e ——系统应变能
 W_s ——裂纹扩展形成新表面所需能量
 Y ——裂纹形状因子
 ω ——应变能密度
 ω_e ——裂纹顶端弹性区（ K 主导区）；应变能密度弹性部分
 ω_p ——裂纹顶端塑性区；应变能密度塑性部分
 σ ——正应力
 $\sigma_{1(2,2)}$ ——主应力
 σ_s ——屈服应力
 $\sigma_{y,e}$ ——有效屈服应力
 σ_v ——流变应力

- σ_r ——残余应力
 σ_c ——临界应力
 σ_f ——破坏应力
 $\delta(\text{COD})$ ——裂纹张开位移
 ε ——应变
 ε_e ——屈服应变
 η ——裂纹扩展单位面积消耗之表面能
 ϕ ——第二类完全椭圆积分；无量纲张开位移
 τ ——剪应力
 μ ——剪切弹性模量

绪 论

1. 什么是断裂力学

1.1 定义

所谓断裂力学，就是从材料或构件中存在宏观裂纹这一点出发，应用弹性力学和塑性力学理论，研究材料或结构中裂纹产生和扩展的条件及规律的学科。或者，简言之，断裂力学就是研究含裂纹材料或结构的强度及裂纹扩展规律的一门学科。故亦可称之为“裂纹体力学”或“裂纹力学”。

断裂力学集中研究裂纹顶端的应力应变场，找出带裂纹构件的承载能力 (P , σ) 和材料抗脆断性能 (断裂韧性 K_{1c} , δ_c) 间的定量关系：

$$\sigma = f\left(\begin{matrix} K_{1c} \\ \delta_c \end{matrix}, a_c\right)$$

从而可对含裂纹构件的最大承载能力 (P 或 σ)、裂纹容限 (a_c) 及寿命 (N_f) 进行计算。

1.2 研究的出发点

由定义中可知，材料或构件中存在宏观裂纹。这些裂纹可能由下述原因造成：

1) 冶金中产生。例如，冶炼中不慎掉入或混入大块非金属氧化物或夹杂；浇铸时混入脏物；大截面铸钢件冷却时产生的气孔、疏松、偏析、夹杂物等；锻造和轧钢中产生的折叠、夹层和过烧等可能引起的晶间开裂。

2) 制造中产生。例如，焊接可能产生的裂纹、夹杂、未焊透、气孔；热处理可能产生的白点；机加工可能产生的划伤、刀痕；运输中可能产生的划痕；

3) 使用中产生。例如，腐蚀介质 (大气、海水等) 易产生应力腐蚀裂纹；交变载荷下可能产生疲劳裂纹。

因此，一般说来，可以认为：

1) 厚截面材料及构件 (如大型汽轮机转子、厚壁压力容器、超厚板等)，使用前就有裂纹。

2) 大型焊接结构 (如大型压力容器、管道、桥梁、大型吊塔、焊接的宇航器等)，焊缝中存在焊接裂纹。

3) 在应力加高参数 (高温、高压、高速) 及腐蚀介质中工作的部件 (如各种蒸汽机、内燃机曲轴、曲拐，工业用燃气轮机的涡轮盘及叶片，炮管，石油化工用压力容器、管道、反应塔等)，在使用中易产生裂纹。

上述裂纹，在结构使用过程中会逐渐长大，当大到超过临界裂纹尺寸时，就会产生低应力脆断。

2. 断裂力学研究的内容

2.1 线弹性断裂力学 (LEFM)

线弹性断裂力学 (Linear Elastic Fracture Mechanics) 于本世纪60年代初提出, 70年代初成熟。这是断裂力学中最成熟的部分。即视材料为理想弹性体, 并假定应力与应变间呈线性关系 ($\sigma = E\varepsilon$), 应用线弹性力学来分析材料或构件在低应力下裂纹的扩展及脆断问题。

断裂力学研究初期, 由于高强低韧性材料构件 (如火箭外壳等), 发生低应力脆断事故多, 故研究重点也在于此。这种钢材在线弹性范围内断裂, 断口无明显塑性变形, 故可用线弹性理论进行研究。

2.2 弹塑性断裂力学 (EPFM)

弹塑性断裂力学 (Elastic-Plastic Fracture Mechanics) 或称非线性断裂力学 (Non-Linear Fracture Mechanics), 或屈服后断裂力学 (Post-Yield Fracture Mechanics) 于本世纪60年代提出。即应用塑性力学理论研究裂纹扩展的规律及脆断问题。对于大量的中低强钢, 断裂前在裂纹顶端附近已产生大范围的屈服, 用线弹性理论已无法描述, 即 *LEFM* 已不适用, 故发展了 *EPFM*。这是目前断裂力学中最引人注目的部分, 还很不成熟。

2.3 概率断裂力学 (PFM)

概率断裂力学 (Probabilistic Fracture Mechanics) 于本世纪70年代提出。即应用可靠性理论 (概率论和数理统计) 并借助计算机技术研究裂纹扩展的规律。这方面的研究成果要在工程中广泛应用, 还有待于长期积累各种资料。目前, 参数敏感性的分析, 即与断裂有关的各参数变化对断裂概率的影响 (如为提高核容器的可靠性, 迫切需要了解人力、财力集中投到哪几个环节效果最好) 的研究, 已取得初步成效。

2.4 微观断裂力学 (MFM)

微观断裂力学 (Micro-Fracture Mechanics) 也有人称之为断裂物理 (Fracture Physics)。即应用金属学及位错理论, 研究原子、位错以至杂质和晶粒等微观范围内的断裂过程 (包括裂纹形成、裂纹扩展), 从而获得有关裂纹扩展和断裂的准则。这方面的研究还很不成熟。在1984年12月举行的第4次国际断裂力学会议上, 有人提出微观与宏观相结合的断裂力学。

2.5 断裂力学在工程上的应用

断裂力学主要用于: 抗断设计计算; 选材及指导工艺; 估算结构的疲劳寿命。

此外, 断裂力学还在疲劳破坏、应力腐蚀、蠕变及静载下裂纹缓慢扩展中得到应用。

我们将主要研究2.1, 2.2, 2.5这3部分。

断裂力学研究的内容可归纳为如图1。

断裂力学是一门新兴学科, 是固体力学与工程实际紧密结合的产物。从提出至今30年来, 发展很快, 研究工作十分活跃。国内外举行过多次断裂学术会议。在有关专业学术会议 (如失效分析、化工机械、压力容器、焊接、热处理等) 上, 也发表了大批断裂力学研究论文。我国开始这方面的研究已近20年, 取得了很大的成绩。当前, 尽管断裂力学在理论上、测试技术上、计算方法上还存在不少有争论和不成熟之处, 但并未阻止它的工程应用的日益广泛和深入。

3. 学习断裂力学的目的

随着近代工业的发展, 结构的低应力脆断 (构件在工作应力低于设计应力时的破坏) 事

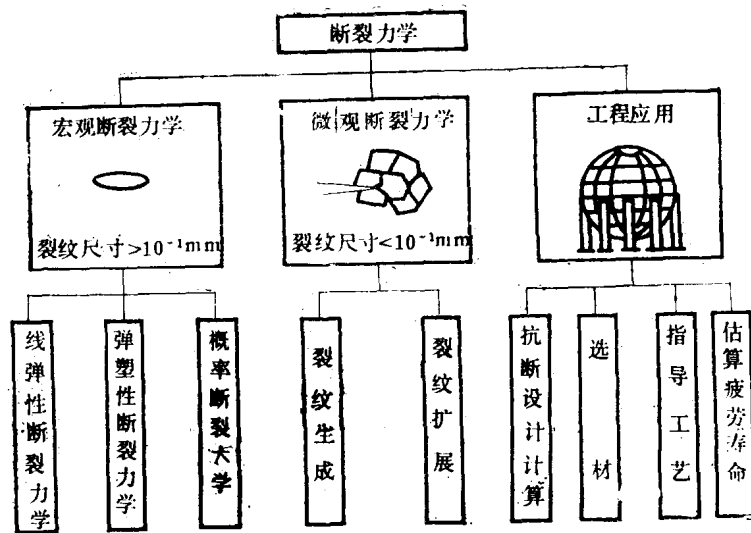


图 1 断裂力学研究的内容

故日益增多。而这种现象是传统强度理论无法解释的。因此，分析断裂事故，研究裂纹体强度及裂纹发生、扩展的规律，并根据这一规律设计安全的工程结构、制定合理的质量验收标准及工艺制度、研制新材料等等，就成为十分迫切的问题。这些问题正是断裂力学要解决的。

可见，对于一个机械或材料工程技术人员，了解并掌握断裂力学是非常重要的。只学习工程力学及有关课程显然不够。我们学习断裂力学，不仅可以进一步认识传统强度理论的应用条件及范围，而且能够设计出更合理、更安全的工程构件，更深刻地认识材料和结构的安全性。

断裂力学的强大生命力在很大程度上在于它在工程结构中的广泛应用。对于一个工程技术人员，保证结构的安全性是一个十分重要的任务。不了解断裂力学，想要完成这一任务是难以想象的。

4. 断裂力学的产生

4.1 传统强度设计的危机

传统强度设计是以材料力学为基础的。假定材料均质、连续、各向同性、没有裂纹和缺陷，设计时只要满足下式

$$\sigma \leq [\sigma] \begin{cases} \frac{\sigma_s}{k} & \text{塑性材料 (如中低强钢、合金钢)} \\ \frac{\sigma_b}{k} & \text{脆性材料 (如铸铁)} \end{cases}$$

结构就安全，否则就不安全。

式中： σ ——工作应力； $[\sigma]$ ——许用应力； σ_s ——材料屈服强度； σ_b ——材料抗拉强度； k ——安全系数。

一般取 $k=1.3\sim 2.0$ 。实际结构中可能有的缺陷和其他想不到的或难以控制的因素（如计算

方法的不准确、载荷估计的难以准确等)，系数 k 中都考虑到了。

传统的强度设计方法，在工程中已经成功地应用了100多年。事实证明，在一般情况下（如对于中低强钢制的中小型构件或零件），传统设计是可行的。虽然材料破坏条件的研究不断发展以及结构的应力计算方法不断进步，但基本设计思想一直没有变。

原因在于：直到30年代以前，广泛应用的低强合金钢，韧性较好，破坏往往是强度不够，韧性有余。实际上，破坏以塑性失效为主，故传统的强度设计是合理的。以后的研究也证明，对中低强钢的中小型构件或零件，传统设计也是适用的。

30年代（二次大战前），欧洲一些焊接空腹桁架桥，投入使用不久，在低温下突然脆断，在小载荷下，脆断从焊缝处开始。可惜，当时工程界未认识到是脆断。

40年代以来，对于中低强钢构件，广泛采用焊接技术，当时焊接技术水平低，焊接缺陷多。中强钢又有低温脆性，故发生一系列的焊接轮、焊接容器、锅炉气包、桥梁等的低应力脆断事故。例如美国，有9个T-2贮罐突然断成两段；在二次大战中，造了5000艘全焊接轮，1946年，发现其中1000多艘有明显裂纹，进而破坏。在1942~1952年间，200艘严重破坏，其中7艘在风平浪静的港湾中突然断裂，经检查材料常规机械性能完全合格。

50年代以来，高强钢广泛应用，破坏往往是韧性不足而强度有余。结构破坏以脆断为主，以传统设计理论无法解释。

例如，美国1950年的北极星导弹发动机壳体爆炸事件（壳体用D6GC高强钢， $\sigma_s = 1373.4 \sim 1569.6 \text{MPa}$ ），传统检验合格，水压试验时爆炸，破坏应力为 $\sigma_c = 686.7 \text{MPa}$ ；1951年，一艘全新的全焊接轮突然裂成两段；1953年，一个横向焊接贮罐裂成两段；1954年，一个纵向焊接贮罐裂成两段，这个贮罐的母材及焊接质量均属上乘，且结构设计先进。

50年代中期，美国两架彗星号飞机在高空中，机身舱门处铆钉也产生疲劳裂纹，突然扩展，造成灾难性破坏；此外，F-111飞机零件原始裂纹扩展，亦发生脆断；以后，又多次发生汽轮机转子脆断的事故。

60年代，1960~1965年，发生脆断10次。甚至，70年代以后，脆断事故仍时有发生（见图2）。

上述断裂，材料经Charpy $V(a, v)$ 试验有足够的冲击韧性，遂逐步引起工程界重视。原传统的强度设计不灵了，出现了危机。

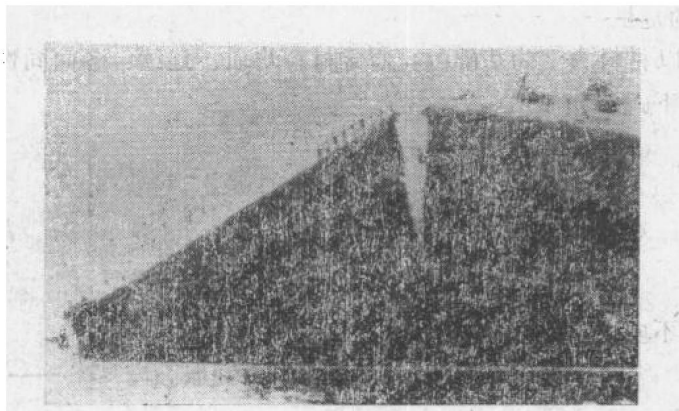


图 2 集装（箱）货轮M.R.Ingram号脆断（1972年）

4.2 断裂力学的产生

正是在上述条件下，于60年代初产生线弹性断裂力学基本概念；60年代中期提出弹塑性断裂力学，上述问题才得到初步解决。

4.3 低应力脆断特征

经分析检查，发现以上的破坏事故有如下共同点：

- 1)破坏时的应力大大低于材料的屈服应力，甚至往往低于许用应力，即 $\sigma_c \ll \sigma_s$ 或 $\sigma_c < [\sigma]$ ；
- 2)破坏时，构件内部都存在或大或小的宏观裂纹；
- 3)低温、厚截面、高速变形时易发生脆断；
- 4)断裂前无或仅有局部塑性变形。低温脆断时，往往裂纹扩展速度极快，可达每秒数百米。这些，是传统强度理论无法解释的。

5. 断裂力学学习方法

断裂力学是一门理论性、实践性都很强的学科。良好的数学基础（微积分、复变函数等）和力学基础（材料力学、弹性力学、塑性力学等），会给学习断裂力学带来极大的方便。此外，断裂韧性测试是断裂力学的重要内容，决不可忽视。所以，在学习本课程时，一方面要搞清理论的来龙去脉，以便应用；另一方面，又必须重视实验，力图掌握断裂韧性测试技术。

工科学生或工程技术人员，在将断裂力学理论应用于工程实际时，必须注意到专业特点。

第一篇 线弹性断裂力学

引言

早在1920年, Griffith(1)应用热力学第一定律及第二定律, 从能量角度出发, 研究了为什么玻璃的实际强度比从它的分子结构所预期的抗拉强度要低几个数量级 ($10^{-1} \sim 10^{-3}$) 的问题。他推测这可能是由其内部缺陷或微小裂纹引起的应力集中而造成的, 从而提出一个能量准则, 建立了断裂应力 (σ_f)、裂纹尺寸 (C)、与材料性质 (A) 之间的关系:

$$\sigma_f = \frac{A}{C}$$

可以认为这是现代断裂力学的前驱。

30年代以后, 发生一系列低应力脆断事故, 传统理论无法解释, 促使人们想到Griffith。

1950年, Orowan(2)和Irwin(3)研究了材料的塑性对裂纹扩展的影响, 修正了Griffith理论。7年后, Irwin(4)提出了应力强度因子 (Stress Intensity Factor) 概念。

1964年, 美国材料试验学会 (ASTM) 和美国国家宇航局 (NASA) 出版了第一本系统的断裂力学文集。1970年提出关于平面应变断裂韧性 K_{Ic} 测试试行标准 (ASTM E399-70)。经过几年试行, 1972年公布正式标准 (ASTM E399-72), 标志线弹性断裂力学形成。我国于1978年制定《金属材料平面应变断裂韧性 K_{Ic} 试验方法 (YB947-78)》。

线弹性断裂力学发展最早, 是断裂力学的基础; 发展较成熟, 应用也较多。因此, 学好并掌握线弹性断裂力学是十分重要的。

线弹性断裂力学主要是从能量和应力强度两个角度来研究裂纹顶端的应力应变场, 从而得出断裂判据。所以, 掌握裂纹顶端的应力应变场分析是学好线弹性断裂力学的关键。

我们将在前三章学习一些预备知识, 从第四章起研究线弹性断裂力学的基本理论。