

714013

21

工程断裂力学 基础

黎振兹 编著

中南工业大学出版社

封面设计 鲁 吉 ISBN 7-81020-272-3/TB·003

定 价：2.00元

工程断裂力学基础

黎振兹 编著

中南工业大学出版社

工程断裂力学基础

蔡振兹 编著

责任编辑：曹丽云

插图责任编辑：刘惜英

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本：787×1092 1/32 印张：10.25 字数：227 千

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数：0001—1500

*

ISBN7-81020-272-3/TB·003

定价：2.00 元

内 容 提 要

工程断裂力学是一门新兴学科，在工程技术与材料科学中已广泛的应用；本教材介绍其理论及应用基础，除绪论外，共计6章：

1. 平面弹性力学基础
2. 线弹性断裂力学的基本理论
3. 裂纹体的应力、位移场。Westergaard方法。
4. 应力强度因子的计算方法
5. 裂纹扩展时的能量关系
6. 断裂力学的工程应用

本教材的使用对象为高等院校师生与科研、设计、工程技术人员，也可供从事材料科学工作的有关人员参考。

前 言

工程断裂力学是一门新兴学科，形成于本世纪50年代末期，但广泛地进行研究并用来解释和解决实际工程问题，则是近20年间的事。当前，这门学科在航天、航空、造船、冶金、化工、交通、机械、土建、水利、采矿、地质、地震等工程部门的应用日益广泛，为此，许多高等院校已将断裂力学列入研究生与本科生的必修课或选修课。为了满足当前教学急需，以及为了适应现代工业生产和科学技术发展的需要，作者总结了近十年教学与科研工作的经验，参考了近几年为校内外编写的几份讲稿与讲义。同时，在广泛收集新近国内外资料的基础上，为我校材料、机械、压加、采矿、地质等专业的研究生与本科生编写了这本教学主要参考教材，可供有关高等院校师生与科研、设计、工程技术人员使用，也可供从事材料科学工作的有关人员参考。

限于目前工程设计、材料科学与断裂研究中常遇到的一些问题，作者的主旨是以介绍宏观断裂力学为主，其中包括这门学科的基础理论，基本概念与一些比较成熟而又实用的计算方法，在保持推导过程完整性的前提下，侧重于物理概念的阐述与理论的实际应用，故取名为《工程断裂力学基础》。它既为读者提供解决实际工程问题的一个有力工具，也为初学者向更深入的领域学习打下较好的基础。

本教材除绪论外，共计六章。内容简明，适当反映最新研

究成果。为了便于自学，叙述深入浅出，循序渐进。

为了提高这门课程的教学质量，培养读者灵活运用所学知识去分析和解决实际问题的能力，在每章之后，附有一定数量难易程度不同的习题和参考文献，供读者使用。

在编写本教材过程中，我校研究生部、教材科以及固体力学教研室的同事们给予极大的支持和鼓励。在此，一并表示深切的感谢。

鉴于作者水平有限，教学经验不足，对于教材中的缺点和错误，请不吝指正。

黎振兹

1987年10月

目 录

绪论	(1)
1 平面弹性力学基础	(17)
2 线弹性断裂力学的基本理论	(40)
3 裂纹体的应力、位移场	
Westergaard 方法	(130)
4 应力强度因子的计算方法	(170)
5 裂纹扩展时的能量关系	(223)
6 断裂力学的工程应用	(281)

绪 论

0.1 断裂力学的产生

断裂力学是强度科学在现代工业生产和科学技术发展中的产物。它作为一门独立的新兴学科，形成于本世纪50年代末期。但广泛地进行研究并用来解释和解决工程实际问题，则是近20年间的事，目前，断裂力学已经展示了无限的生命力。

随着焊接、大型和厚壁金属结构的发展，高强度与超高强度材料的产生和应用，结构的脆断事故增多。由于这种断裂常常发生在远低于屈服极限下，不经历宏观的塑性变形，事前无明显的征兆，破坏非常突然，因而，造成的后果也就特别严重。例如，1938年1月，比利时的哈尔什特桥突然发出惊天动地的巨响，六分钟后，这座大桥断裂为三截，成为桥梁史上的一个重大教训；第二次世界大战期间，美国五千余艘全焊接船“自由轮”连续发生一千多起突然断裂事故，其中238艘完全报废，有的甚至断成两半，沉入海中。1978年，英国北海海滨丙烷压缩罐爆炸，死亡三百多人，震动整个欧洲。1980年3月，挪威北海油田的基尔兰平台的突然断裂事故，死123人。

这些事故发生后，有关部门认真检查了设计图纸，图纸没有差错，又仔细审查了材料，材料也完全合格，究竟是什么原因引起断裂呢？通过大量破坏事故的分析发现，这是由于材料中初始存在的缺陷（气孔，夹杂等）在特定条件下发生临界扩展所导致的。可见，缺陷是引起这类破坏的祸根。

然而，固体材料内部的缺陷是从哪里来的呢？原因是多方面的。材料在冶炼、铸造和锻压，焊接等工艺过程中，会出现气孔、夹杂、折叠、未焊透等缺陷，这些都可能形成裂纹，热处理不当，加工质量不高，也可能形成缺陷或裂纹；此外，构件在工作过程中，由于热应力、疲劳、腐蚀造成的裂纹等等。因此，实际构件总是不可避免地存在缺陷或裂纹。为了保证构件安全使用，研究裂纹的扩展规律，不断探索断裂中的学问，这就需要分析缺陷或裂纹前缘附近局部地区的应力、应变情况，寻找能够反映裂纹扩展特性的新指标，建立新的断裂判据，防止发生低应力脆断事故。正是在上述背景下，一门独立的新兴学科——工程断裂力学产生了，这是一门研究含裂纹材料和构件强度问题以及裂纹扩展规律的科学。

0.2 断裂力学的研究内容

材料力学是研究无缺陷构件在弹性范围内的强度、刚度和稳定性的一门科学。长期以来，工程上，对于构件的强度计算方法是以材料力学为基础的。它按照构件的材料、承受的荷载和使用的条件，选用一定的强度理论，计算构件危险点处的相当应力 σ_{zd} ，使其不超过材料的许用应力 $[\sigma]$ ，来保证构件不因超载而发生破坏，即

$$\sigma_{zd} \leq [\sigma] = \frac{\sigma^0}{n}$$

其中： σ^0 是与材料有关的力学性能，即所谓的强度指标 σ_s （屈服极限）或 σ_b （强度极限）， n 为大于1的安全系数，它主要是考虑了局部应力集中、工艺条件、荷载简化和计算方法的近似程度等带来的影响。这种传统的强度计算方法，迄今为止对

构件和结构的设计计算都发挥了重要的作用。然而，许多现代工程结构在设计时许用应力下工作，仍会发生断裂，这是材料力学所无法回答的问题。直到断裂力学诞生之后，使人们对断裂的认识向理性认识的阶段飞跃。断裂力学作为固体力学的一个新的分支，其主要任务是研究含裂纹材料或构件在各种应力状态、温度和介质条件下的力学行为，提出描述裂纹尖端区域力学状态的参量，研究材料或构件中裂纹失稳（快速）扩展的条件，根据此条件，建立相应的断裂判据和强度计算方法，为指导工程设计、制订缺陷标准、估算构件寿命等提供科学依据。

那么，断裂力学与材料力学相比较，究竟有哪些地方不同呢？这可以从下列四个方面来看。

0.2.1 力学模型不同

固体力学中，任何一门分支科学都有它自己的力学模型。这是为了简化物体有关性能和计算，而对物体作出的一种基本假设。材料力学的力学模型是采用均匀连续假设，将所研究的变形固体看作是均匀连续体。它意味着材料或构件不含有初始缺陷或裂纹，因此，它不能从理论上阐述裂纹对构件强度有无影响，影响多大？什么样的裂纹是允许的，什么样的裂纹是不允许的。在使用过程中，一旦发现裂纹，就认为构件即将发生断裂，不允许再继续使用。

断裂力学着眼于裂纹，它的力学模型是在采用均匀连续假设的同时，又考虑裂纹处的不连续，将所研究的变形固体看作是连续和间断的统一体。因而，在力学分析上，仍可采用连续介质力学的方法。它和材料力学的力学模型相比，突出了“裂纹”，需要分析裂纹尖端邻近区域的应力应变情况，致力于研

究最关键的问题，即裂纹端邻近的局部断裂条件。显然，这种力学模型更符合工程材料与构件的实际情况。由此可知，上述两种力学模型的差别，从根本上决定了断裂力学是在传统的强度学科上发展起来而又有创新的一门学科。那种由于断裂力学的产生和发展，材料力学已不适用的观点是不正确的。尤其是断裂力学，目前还是一门年轻的学科，某些方面还很不成熟，尚待作进一步发展，因此，在现阶段的设计中，应该将传统的强度科学与断裂力学结合起来使用。

0.2.2 研究问题的重点不同

在研究结构或构件强度问题时，断裂力学与材料力学的重点是不相同的。后者致力于找出构件受力最大的危险点及其主应力的大小，根据强度理论来预计构件是否发生破坏。前者则不是这样，而是致力于找出有危害性的坏裂纹。以后我们将会看到，由于裂纹尖端区域的应力具有奇异性（即在裂尖处应力为无限大），因此无法用一点的应力来表征构件的受力程度，必须引入一个新的力学参量应力强度因子，来代替个别点的应力状态，来表征裂纹尖端附近应力场奇异性的强度；应该说，应力强度因子包含了比应力更为丰富的内容，在描述构件受力程度上达到了一个新的概括高度。因此，应力强度因子可以用作判断裂纹是否有危害性的坏裂纹，从而明确了研究裂纹体时的基本力学参量应为应力强度因子或其他的断裂力学参量（ G ， δ ， J 等）。

0.2.3 使用的强度指标不同

在材料力学中，我们使用强度（ σ_s ， σ_b ），塑性（ δ ， ψ ）与冲击韧性（ a_k ）等三种指标来表示材料的机械性能。由于在传统的强度设计中，冲击韧性的物理概念不明确，故无法将 a_k

定量地用于设计工作，也无法将 δ 、 ψ 进行定量计算，更不能综合地考虑这三种指标；因而，在材料力学中，只能简单地选 σ_s 或 σ_b 作为衡量材料强度大小的指标，这对中、低强度构件的设计是适用的。

随着焊接、大型、厚壁金属结构的发展，高强度与超高强度材料的生产与使用，材料的塑性和韧性性能下降，按传统的强度计算方法设计的构件，发生低应力脆断事故屡见不鲜。为此，迫切需要一个能反映实际含裂纹构件抵抗低应力脆断破坏的性能指标。研究表明，满足这一要求的有效指标就是按一定试验规程测定的应力强度因子的临界值 K_{Ic} ，称平面应变断裂韧性，以表征含裂纹材料抵抗裂纹扩展的能力，是断裂力学中度量材料韧性好坏的一个新的指标。

0.2.4 建立的破坏条件不同

上面材料力学的基本力学参量——应力及其极限值 σ_s 、 σ_b 与断裂力学中的基本力学参量——应力强度因子及其临界值 K_{Ic} 进行了对比，这里将进一步讨论各自基本力学参量及其极限值或临界值建立的强度条件或断裂判据。

材料力学给出的强度条件为

$$\sigma_{ad} \leq [\sigma] = \begin{cases} \sigma_s / n_s & \text{对塑性材料} \\ \sigma_b / n_b & \text{对脆性材料} \end{cases}$$

该式主要用来保证构件不因超载而发生破坏。仿照上述强度条件，断裂力学给出的脆性断裂判据为——

$$K_I \leq K_{Ic} / n_k$$

n_k 称为低应力脆断安全系数。

上式主要用来保证实际构件不因存在裂纹和裂纹扩展而发生断裂破坏。与材料力学的强度条件相比， K_I 相当于构件危险

点的相当应力 σ_{sd} ，而 K_{Ic} 则与材料的力学性能 σ_s 和 σ_b 相当。那么，安全设计中如何使这两方面的要求协调起来并各自满足相应的要求呢？为了充分利用材料的强度与韧性，最好是使强度条件和断裂判据同时满足，以保证材料在断裂韧性和屈服极限两个方面的储备相差不多。

0.3 断裂力学的分类

断裂力学包括的范围是相当广泛的。按其不同理论基础分，有宏观断裂力学与微观断裂力学两大部分，前者以各向同性均质的变形固体为其研究对象；后者则属于固体物理的范畴。

按其研究对象的特性分，有弹性断裂力学与弹塑性断裂力学。弹性断裂力学包括线性弹性断裂力学与非线性弹性断裂力学，它以脆性断裂为其主要破坏形态。最早的理论是以玻璃断裂作为实验基础的 Griffith 理论。弹性断裂力学的现代研究方向是三维问题，表面裂纹问题，各向异性体问题。

弹塑性断裂力学，按照裂纹尖端前缘区域塑性区的尺寸大小，又可分为小范围屈服，大范围屈服和全面屈服等三种状态。其中小范围屈服断裂（准脆性断裂）可以用弹性断裂力学的方法作近似处理。对于大范围与全面屈服断裂，弹性断裂力学理论已经不适用了，因此，迫切需要探讨与发展弹塑性状态下的断裂判据。于是断裂力学的发展从弹性进入到弹塑性。由于弹塑性断裂理论的复杂性和数学处理上的困难，迄今为止，尚无重大的突破，目前，它已成为断裂力学研究的最主要方向之一。

按照裂纹体承受荷载的性质分，有静态断裂力学与动态断

裂力学。断裂动力学包括裂纹疲劳扩展，裂纹高速扩展与分岔以及断裂的防止等内容。

按其研究对象所处的介质分，有空气断裂力学与介质断裂力学。比如腐蚀疲劳断裂，高温蠕变断裂等属于介质断裂力学的范围。

0.4 断裂力学的历史概况及其在我国“四化”建设中的作用

如前所述，断裂力学是研究带裂纹材料和结构的强度以及裂纹扩展规律的一门新兴学科，它是近20年来发展起来的。从第二次世界大战以来，由于工业生产和科学技术的飞速发展，出现了火箭、导弹、原子能电站、大型化工设备、大型运输机等大型结构，对于结构的安全性提出了更高的要求，因为这些结构的破坏会给生产和人们的生命财产造成极大的损失。由于高强度材料和新工艺的采用，结构的大型化，结构在高压、高速和高温的恶劣工作条件下，增加了结构破坏的可能性，而经典强度理论又无法确保结构的安全性，例如经传统方法严格检验被认为是合格的火箭发动机壳体却发生了多起爆炸事故。如何解释和防止这些低应力脆断现象，成为生产发展所迫切需要解决的问题，断裂力学正是在这样的背景下发展起来的。

最早研究脆性断裂的是 Griffith (1921年)。当时人们发现玻璃的理论强度约比实际强度高2~3个数量级，他第一次认为这是玻璃中有小裂纹所造成。而玻璃的断裂是由于裂纹失稳扩展，他用能量平衡理论对此作了研究，建立了裂纹扩展准则，成功地解释了玻璃实际强度远低于理论强度的原因，由于

他未考虑塑性变形能量对裂纹扩展的影响，他的理论对金属材料不适用，因而当时未能引起普遍重视。50年代，Irwin, Orowan二氏研究了塑性对裂纹扩展的影响，修正了Griffith的能量理论，Irwin提出了表征裂纹顶端附近应力强度因子概念，Griffith、Irwin、Orowan等人的工作为线弹性断裂力学奠定了基础。1959年，根据美国国防部的建议，由ASTM（美国材料实验学会）与NASA（美国国家宇航局）组织专门机构研究断裂问题，后来即成为ASTM E-24断裂试验委员会，到1964年举行第一次讨论会，出版了第一本系统的断裂力学文集。这标志着线弹性断裂力学从理论到实验已有一个相当严密的基础。由于线弹性断裂力学成功解释了低应力脆断现象，成为防止结构脆断的一个重要工具。所以，从本世纪60年代开始，断裂力学获得迅速发展，应用范围愈来愈广。研究的主要课题有：应力强度因子计算方法、复合型断裂准则、断裂力学在疲劳和应力腐蚀中的应用、断裂力学和断裂韧性测试方法在工程中的应用等等。近年来发展十分迅速，研究成果已被制订成各种规范和标准。但线弹性断裂力学仅适用于高强度材料构件。

在大截面中，低强材料以及在材料脆性转变温度下工作的构件，其应用范围是有局限性的，它并不能完全解决在各种复杂条件下工作结构的安全可靠性，所以，本世纪60年代，国外在大力发展线弹性断裂力学的同时，断裂力学的其他几方面也得到发展，其中特别是弹塑性断裂力学（目前已成为国际上断裂力学研究的主攻方向之一）、断裂动力学、聚合物和复合材料断裂力学等。

弹塑性断裂力学研究大致可分为两个方面：①处理弹塑性断裂问题的工程方法即工程弹塑性断裂力学。②弹塑性断裂的

基础研究，当然二者并无严格的界限，一旦基础研究有了成熟结果，就立即被用于工程问题。为了解决工程中广泛使用的中、低强度高韧度材料的断裂问题，发展了裂纹张开位移， J 积分，等价能法等工程方法。为了解决薄板和薄壁结构的断裂问题，发展了阻力曲线法。

这些方法除 J 积分法有一定的理论基础之外，其他方法都是在归纳大量实验结果的基础上提出的经验或半经验方法。

即使 J 积分方法也是在实验上取得进展后才得到蓬勃发展的。1960年左右，英国焊接研究所采用模拟实际焊接结构缺陷的试件，作了大量试验，提出裂纹顶端张开位移可以作为断裂准则。并根据实验数据给出临界缺陷尺寸与缺陷部位应变量之间的关系，为压力容器和焊接结构的安全设计提供了依据。1968年，Rice 在研究裂纹顶端附近的弹塑性应力应变场基础上，提出了 J 积分概念； J 积分理论是基于非线性弹性裂纹的分析而建立的，但在一定条件下可用于实际弹塑性材料，特别是1972年，美国西屋公司发表了用 J 积分法在韧带全面屈服的小试件下，测出了平面应变断裂韧度的试验结果，从实验上说明了 J 积分可作为弹塑性断裂准则，从而使 J 积分的研究大为活跃起来。虽然在理论上 J 积分法尚有很多问题还在讨论，但在实验工作的基础上， J 积分法已被用于处理静载荷下裂纹的临界扩展。

近年来，由于英、美两国学者将 J 积分与 C.O.D 两参数联系起来，因而，在弹塑性断裂力学中，以 C.O.D 为断裂判据的一整套方法，得到了与 J 积分法相平行的发展。与此同时，以 C.O.D 为判据的焊接缺陷评定标准也有所进展。过去，C.O.D 法的研究主要是集中在 I 型裂纹问题上，近几年来，开始研究