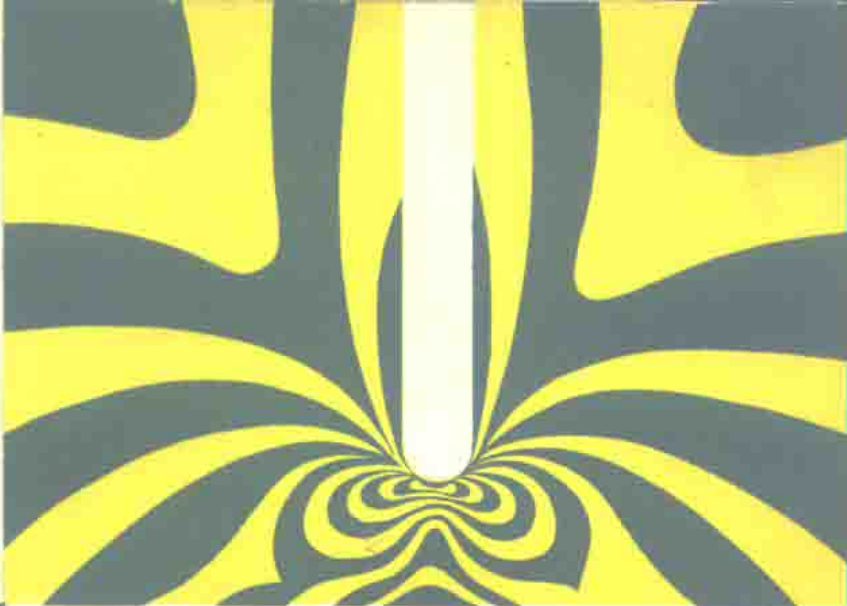




工程断裂力学 基础

D. 布洛克 著

科学出版社

工程断裂力学基础

D. 布洛克 著

王克仁 何明元 高桦 译

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是一本断裂力学的入门书,对断裂力学比较成熟的方面作了深入浅出的介绍,其中包括线弹性断裂力学的理论基础、实验方法、计算方法及应用。也介绍了全面屈服断裂力学中比较成熟的COD方法。

本书特点是深入浅出、讲究实用、图表多、能直接解决实际问题。读者对象为力学、冶金、机械、应用数学工作者,也可作为高等学校的教学参考书。

D. Broek

ELEMENTARY ENGINEERING FRACTURE MECHANICS

Noordhoff International Publishing, Leyden, 1974

工程断裂力学基础

D. 布洛克 著

王克仁 何明元 高 桦 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年5月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1980年5月第一次印刷 印张: 13

印数: 0001—13,800 字数: 294,000

统一书号: 13031·1244

本社书号: 1729·13—2

定价: 1.35 元

序

当我要开始讲授工程断裂力学课程的时候，我发现目前尚无一本对于该学科作一般性叙述的简明的教科书。其原因无疑是这一学科目前尚处于早期发展阶段，以及此学科所采用的一套方法，其应用仍很有限。现在尚无法给出断裂力学概念通用的一些准则，但是我们对于材料和结构的开裂和断裂特性的了解正在不断地增加。在不太远的将来我们可以预料会有进一步的发展，有可能在先进的断裂力学方法的基础上，对于断裂安全和断裂特征作出合用的预先估算。人们在能够应用这种先进的方法之前，首先必须要对其基本的概念有一般的了解，这就是本书要介绍的内容。

本书把重点放在断裂力学的实际应用方面，但是在叙述中力图同时满足冶金学家和工程师的兴趣。为了使工程师了解断裂力学的局限性，断裂机理和断裂准则的一般知识是必不可少的。因此，本书对于断裂机理、断裂准则以及其它冶金方面的问题作了一般性的讨论，但并不过多地涉及其细节。本书提供许多参考文献，以便于读者对于这些尚处于纯理论讨论阶段的课题进行更详细的研究。冶金学家和力学家为了解决工程师提出的问题，需要知道工业中具体的问题。因此本书讨论了一些有关的实际问题。

本书并不打算对于断裂力学原理和应用的每一方面均提出详尽的论述。Liebowitz 所编辑的七卷《断裂：高级教程》，已作了这方面的工作。本书则如其书名所指出的，力求处理一些基本的问题，以及那些已多少得到公认的工程应用问题。

本书的内容可以作为文献的入门以及作为理解即将发展起来的一些课题的基础。虽然我试图对于各个题目在叙述中尽量取得平衡,但是在对于某些课题的处理中,可能会流露出我个人的兴趣所在。

由于断裂力学尚处于发展阶段,所以一定程度的揣测是不可避免的。在适当的地方,我指出哪些讨论是属于揣测性的。我们把注意力集中在那些在设计中有可能得到定量应用的课题上面。对于定性的断裂分析方法和试验方法,例如却贝试验数据的利用,Robertson 试验以及动态撕裂试验,本书不予讨论,因为这些题目在其它地方已广泛地讨论过了。

本书的内容对于高年级大学生和一年级研究生是适用的。但是对于那些以前没有碰到过断裂力学的工程师和冶金学家,本书也可以作为这一较新的学科的一般性的引论。

D. 布 洛 克

1974 年 1 月

目 录

第一部分 原 理

第一章 基本问题和概念的摘要	1
1.1 引言	1
1.2 结构中的裂纹	4
1.3 裂纹顶端附近的应力	6
1.4 Griffith 准则	14
1.5 裂纹张开位移准则	16
1.6 裂纹扩展	17
1.7 结束语	22
第二章 断裂和裂纹扩展机理	24
2.1 引言	24
2.2 解理断裂	30
2.3 韧性断裂	37
2.4 疲劳开裂	47
2.5 环境作用下的开裂	56
2.6 工作破坏分析	58
第三章 裂纹顶端附近的弹性应力场	64
3.1 Airy 应力函数	64
3.2 复变应力函数	65
3.3 裂纹问题的解	66
3.4 有限尺寸的影响	71

3.5	特殊情况	74
3.6	椭圆裂纹	77
3.7	一些有用的表达式	83
第四章	裂纹顶端的塑性区	88
4.1	Irwin 的塑性区修正	88
4.2	Dugdale 方法	92
4.3	塑性区的形状	94
4.4	平面应力和平面应变的比较	100
4.5	塑性约束系数	103
4.6	厚度效应	106
第五章	能量原理	114
5.1	能量释放率	114
5.2	裂纹扩展准则	119
5.3	裂纹扩展阻力 (R 曲线)	122
5.4	柔度	127
5.5	J 积分	131
第六章	动力学和止裂	139
6.1	裂纹速度和动能	139
6.2	动态应力强度和能量释放率	144
6.3	裂纹分叉	146
6.4	止裂原理	151
6.5	在实际中的止裂	156
6.6	动态断裂韧度	159
第七章	平面应变断裂韧度	164
7.1	标准试验	164
7.2	尺寸要求	167
7.3	非线性	170
7.4	适用性	174

第八章 平面应力及其过渡状态的特性	179
8.1 引言	179
8.2 平面应力的一个工程概念	179
8.3 R 曲线概念	187
8.4 厚度效应	194
8.5 平面应力试验	204
8.6 结束语	211
第九章 裂纹张开位移准则	215
9.1 全面屈服后的断裂	215
9.2 裂纹顶端张开位移	217
9.3 CTOD 准则可能的应用	220
9.4 CTOD 的实验测定	221
9.5 影响临界 CTOD 的参数	225
9.6 COD 方法的局限性,全面屈服时的断裂	227
第十章 疲劳裂纹扩展	234
10.1 引言	234
10.2 裂纹扩展和应力强度因子	234
10.3 影响裂纹扩展的因素	241
10.4 变幅度工作加载	247
10.5 裂纹扩展的预测	252
10.6 结束语	258
第十一章 材料的断裂阻力	265
11.1 断裂准则	265
11.2 裂纹扩展准则	272
11.3 合金和第二相粒子的影响	274
11.4 加工过程和各向异性的影响	282
11.5 温度的影响	288
11.6 结束语	289

第二部分 应 用

第十二章	破损安全和损伤容限	294
12.1	引言	294
12.2	保证破损-安全的方法	295
12.3	断裂力学方法所需要的知识	300
12.4	结束语	302
第十三章	应力强度因子的确定	305
13.1	引言	305
13.2	解析法和数值法	305
13.3	有限元法	307
13.4	实验方法	314
第十四章	实际问题	324
14.1	引言	324
14.2	从孔开始的穿透裂纹	324
14.3	孔边的角裂纹	329
14.4	靠近孔的裂纹	333
14.5	复合加载	336
14.6	焊件的断裂韧度	340
14.7	在工作载荷下疲劳裂纹扩展	343
14.8	工作破坏分析	350
第十五章	结构的断裂	355
15.1	引言	355
15.2	压力容器和管道	356
15.3	“破裂前渗漏”准则	366
15.4	材料选择	370
第十六章	加筋板结构	378
16.1	引言	378

16.2	分析	379
16.3	疲劳裂纹扩展	382
16.4	剩余强度	385
16.5	阻力曲线和加筋板的剩余强度	392
16.6	其他分析方法	395
16.7	止裂	398
16.8	结束语	402

第一部分 原 理

第一章 基本问题和概念的摘要

1.1 引 言

多年来,工程设计中材料的应用,使人们面临不少难题。石器时代,问题主要是如何使材料成形。而在铜器时代和铁器时代的早期,在生产和成形上都存在困难。许多世纪以来,金属的加工一直是既费力又昂贵。据估计,在十三世纪,一个骑士和他所用马的装备,其价值相当于第二次世界大战期间一台“世代”坦克的价值。

随着金属加工技术的改进,金属在结构中的应用逐渐增加。然而经验表明,用这些材料制造的结构并不总是可靠的,意外事故经常发生。中世纪关于铸件和锻件生产的详细叙述现在还存在,当用现今的认识去审核时,即知这些生产方法必定会使构件存在重要的技术缺陷。从而使得炮手们在点火开炮时不禁要祈祷:但愿炮弹能正常地放出去,炮筒千万不要炸裂……。

十九世纪,由于金属的应用大大增多,使偶然不测事故的数量达到数不清的程度。1860—1870年期间,英国每年死于铁路事故的人数约为200名。大多是由于车轮、车轴或轨道断裂造成的出轨事故。Anderson^[1]最近对二百年来的事故报告作了一个有趣的汇编。下面是一小部分摘录:

“1830年3月19日,大约有700人会聚在蒙脱罗斯

(Montrose) 吊桥上观看划船比赛, 由于其中一根主链条破坏……使许多人丧命。”

“1866 年 1 月 22 日, 曼彻斯特火车站的一部分屋顶坠落, 使二人死亡. 事故系因连接的铸铁支柱断裂所造成。”

“1898 年 12 月 13 日发生的纽约市大贮气罐破裂, 使许多人死亡和受伤, 并毁坏了周围大量财物。”

“1913 年 1 月 3 日, 波士顿一个高压水管破裂, 使该地区被淹……”

“工程杂志在 1866 年 2 月刊上登载: 每年在联合王国有 50—60 起锅炉爆炸事件, 使许多人丧命, 并使许多建筑破坏, 难道还不该是政府指定一个委员会来调查这些问题的时候吗?”

“1887 年 4 月 20 日发生了该周内最严重的铁路事故, 原因是拉杆破断, 造成三人死亡, 二人重伤。”

“1887 年 5 月 27 日发生了该周内最严重的铁路事故, 一个轮子破裂造成 6 人死亡。”

“1887 年 6 月 23 日发生了该周内最严重的铁路事故, 这是由于一根路轨断裂造成的, 一人死亡。”

“1887 年 7 月 2 日发生了该周内最严重的铁路事故, 事故由轮轴断裂造成。”

其中一部分事故肯定是由于设计不良造成的, 然而人们也逐渐发现, 预先存在的各种材料缺陷会引起开裂和破断. 防止这种缺陷就可以改善结构的性能. 采用更好的生产方法, 加上对材料性能的更深入了解和认识, 使破坏的次数减少到了较可接受的程度.

随着全焊接设计的引进, 开始了一个新的结构破坏事故的时期. 在二次世界大战期间建造的 2500 艘自由轮, 其中有 145 艘断成两截, 有近 700 艘发生了严重的破坏. 许多桥梁

和其他建筑也发生了同样的灾难性事故。关于这些事故的情况, Anderson^[1] 也作了叙述, 更加专门的报告, 可见 Biggs^[2] 的文章。

令人费解的是, 这些事故常常在低应力情况下发生(有几条船是在港湾内突然破坏的)。由此, 很多国家开展了大规模的研究, 尤其是美国。这些研究工作再次表明, 缺陷和应力集中(以及在某种程度上内应力)是破断的原因所在。

这些破断是真正的脆断: 只伴有很少的塑性变形。人们发现: 低温以及可能存在于尖锐缺口处或缺陷处的三向应力条件会促进钢的脆断。在这样的条件下, 结构钢会发生解理断裂(第二章), 而不出现显著的塑性变形。高于某一温度, 即所谓转变温度, 钢就处于韧性状态。在焊接过程中, 由于热循环的作用, 可能使转变温度升高。

目前, 已可成功地防止用低强度结构钢制造的焊接结构的脆断。为此必须确保所生产的材料具有低的转变温度; 同时, 焊接过程应确保不提高韧性-脆性转变温度; 大的应力集中应当避免; 并且焊缝处应经过检查, 保证没有缺陷。

第二次世界大战以后, 高强度材料的应用大幅度增加。选用这些材料常常是为了减轻重量。与此同时, 发展了能够更可靠地确定局部应力的应力分析方法。从而即可减小安全系数, 使重量更进一步减轻。其结果是, 高强度材料制成的结构安全系数很低。这意味着, 工作应力(有时更伴有腐蚀性环境)高到了足以导致开裂的程度, 特别是在预先存在缺陷或高度应力集中时更是如此。高强度材料的抗裂性(断裂韧性)很低: 当有裂纹存在时, 其剩余强度很低。选用高强度材料设计的结构, 只要存在很小的缺陷, 就可能在低于最高设计应力的情况下破坏。

由小裂纹引起的低应力破坏, 在很多情况下, 与低强度钢

焊接结构的脆性破断十分相似。只有很少量的塑性变形；尽管材料分离的微观机理与韧性断裂相同，但从工程意义上说，此破断是脆性的。在高强度材料中出现的低应力破断导致了断裂力学的发展。

工程断裂力学可对传统设计概念的不合理方面提供补偿的方法。传统设计准则系基于拉伸强度、屈服强度和屈曲应力。这些准则对许多工程结构是合适的。但是，当有可能存在缺陷时，它们就显得不足了。现在，经过大约二十年的发展，断裂力学已成为高强度材料设计的有力工具。

本书第一章是断裂力学的导论。第1,2节综述了可用断裂力学概念来解决的问题；概述了断裂力学总的领域，它比人们通常设想的要广泛得多。本章的其余部分是对断裂力学概念的一个简单、初步的摘要。所有这些问题，在以后各章中将更深入地讨论。

1.2 结构中的裂纹

考虑一个包含一条裂纹的结构。由于交变载荷的作用，或者由于载荷和环境侵蚀的联合作用，裂纹将随时间逐渐扩展。裂纹越长，则由它引起的应力集中越高。这意味着，裂纹的扩展速率将随时间而增加。裂纹扩展作为时间的函数，可由图1.1a之上升曲线表示。由于裂纹存在，结构的强度被削弱了：它低于设计时的原始强度。随着裂纹尺寸增大，结构的剩余强度逐步减小，如图1.1b所示。经过一定时间，结构的剩余强度就会低到无法承受在工作时可能出现的意外高载荷。此后，结构就易于破坏。如果不出现这种意外的高载荷，那么裂纹将继续扩展，剩余强度将继续降低，最后在正常工作载荷下断裂。许多结构其设计的工作载荷就已经高得足以

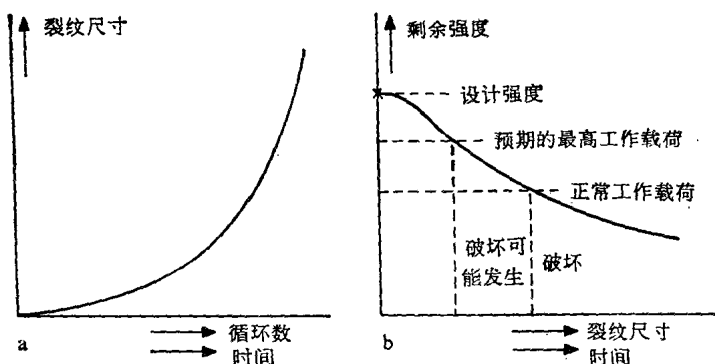


图 1.1 工程问题

a. 裂纹扩展曲线; b. 剩余强度曲线

引发裂纹,当预先存在缺陷或有应力集中时就更是如此。设计者必须预期开裂的可能性,从而不得不冒结构破坏的危险。这意味着,结构只能具备有限的寿命。当然,在整个工作寿命期间,破坏的可能性应当维持在可以接受的低的程度。为了保证安全,必须估算:这些裂纹的扩展有多快,以及剩余强度的下降有多快。进行这些估算,并且发展估算的方法,即是断裂力学的任务。

关于图 1.1,断裂力学应当可以回答如下诸问题:

- 剩余强度与裂纹尺寸的函数关系如何?
- 在预期的工作载荷下,能够容许多大的裂纹? 即临界裂纹尺寸是多少?
- 裂纹从一定长度的初始尺寸,扩展到临界尺寸,需要多长时间?
- 在结构工作寿命开始时,允许存在多大的原始缺陷?
- 每隔多长时间,应当对结构进行一次裂纹检查?

断裂力学对于上述某几个问题可给出满意的回答,而对

另一些则作了有用的回答。如图 1.2 所示，断裂力学设计程序的发展牵涉到若干个学科。在标尺的右端为对载荷和应力的工程分析。应用力学给出了裂纹顶端附近的应力场，以及裂纹附近材料的弹性和(一定程度的)塑性变形。对断裂强度的估算可用实验来核对。材料科学处理的是原子、位错以至杂质和晶粒尺度内的断裂过程。根据对这些过程的了解，应该有可能得出支配裂纹扩展和断裂的准则。要预言裂纹在给定的应力应变场中的特性，就必须应用这些准则。对断裂过程的了解还可给出一些对于裂纹抗力来说是重要的材料参数；欲研制裂纹抗力较好的材料，就应该知道这些材料参数。

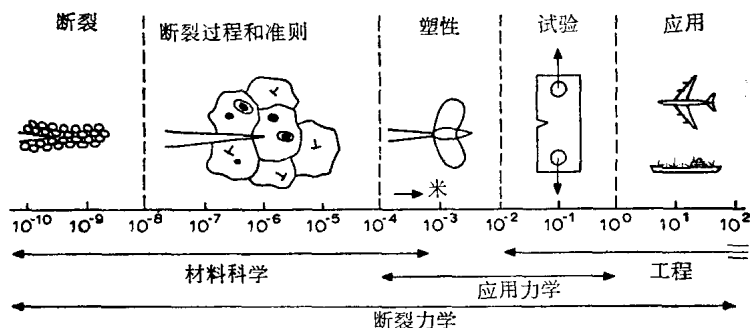


图 1.2 断裂力学的广阔领域

为了在工程实际中成功地应用断裂力学，对图 1.2 所示的整个领域有所了解是很重要的。本书力图就此领域提供一些基本的知识。

1.3 裂纹顶端附近的应力

人们可以用三种不同型式对固体中的裂纹施加应力，如图 1.3 所示。垂直应力造成“张开型”，记作 I 型：裂纹表面

的位移垂直于裂纹面，面内剪切造成 II 型或“滑开型”：裂纹表面的位移在裂纹面内，并垂直于裂纹前缘。“撕开型”或 III 型是由面外剪切造成的，裂纹表面的位移在裂纹面内，并且平行于裂纹前缘。对于开裂的一般情况可用三种型式的叠加来描述。I 型在技术上最重要；在引论性的这一章中讨论仅限于 I 型。

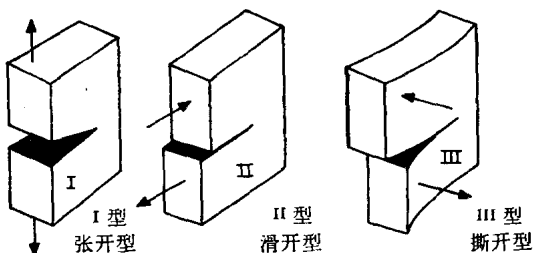


图 1.3 开裂的三种型式

考虑在无限大平板中，有一条长度为 $2a$ 的 I 型穿透厚度的裂纹，如图 1.4 示。此平板在无限远处受拉伸应力 σ 作用。如第三章和十三章讨论的那样，有几种计算裂纹顶端附近的弹性应力场的方法。在距裂纹顶端为 r 、与裂纹面夹角为 θ 处，有一面元 $dx dy$ ，它在 X 和 Y 方向的正应力为 σ_x 和 σ_y ，剪应力为 τ_{xy} 。这些应力^[3-6]为(见第三章)：

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
 \sigma_z &= 0 \quad (\text{平面应力}) \\
 \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{平面应变})
 \end{aligned} \tag{1.1}$$