

结构中的断裂与疲劳控制

——断裂力学的应用

〔美〕 S.T.罗尔夫 J.M.巴逊姆 著

机械工业出版社

TB301
854L

结构中的断裂与疲劳控制 ——断裂力学的应用

[美] S.T.罗尔夫 J.M.巴逊姆 著

刘文珽 仇仲翼 黄乃人 张诚文 译



机械工业出版社

本书根据 S. T. 罗尔夫和 J. M. 巴逊姆所著《Fracture And Fatigue Control in Structures》译成。

本书是以断裂力学在结构的断裂与疲劳控制中的应用为重点的应用断裂力学著作。第一至五章介绍线弹性断裂力学的基本原理和断裂韧性试验方法。第六章介绍断裂韧性与一般缺口韧性之间的关系。第七至十一章阐述由疲劳、应力腐蚀或腐蚀疲劳所引起的亚临界裂纹扩展。第十二、十三章介绍影响断裂准则的因素和现有断裂准则的实例。第十四、十五章提出了断裂控制设计的主要内容和各种类型结构断裂控制设计的实例。第十六章介绍了弹塑性断裂力学的基本原理。

本书可供从事机械、航空、化工、建筑等方面的结构强度、设计的科学技术工作者参考，并可作为高等院校有关专业的教学参考书。

本书第一至四章由张诚文译，第五章由黄乃文译，第六章及第十三至十六章由刘文琰译，第七至十二章由仇仲翼译。

**FRACTURE AND FATIGUE
CONTROL IN STRUCTURES**
Applications of Fracture Mechanics
S. T. Rolfe & J. M. Barsom
PRENTICE-HALL, INC.
1977

**结构中的断裂与疲劳控制
——断裂力学的应用**

[美] S. T. 罗尔夫 J. M. 巴逊姆 著
刘文琰 仇仲翼 黄乃文 张诚文 译

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₃₂·印张 19⁵/₈·字数 430 千字
1985 年 9 月北京第一版·1985 年 9 月北京第一次印刷
印数 0,001—5,750·定价 4.50 元

统一书号：15033·5645

译者序

断裂力学在我国已经比较普及了。由我国学者编著和翻译的有关断裂力学基础知识和断裂性能测试的书已有若干种。在断裂力学的理论研究和工程应用方面也取得了可喜的成果。但是，相比之下，断裂力学在结构断裂与疲劳控制中的应用还欠普遍。因此，使更多的科学技术工作者从工程应用的观点熟悉断裂力学的基本原理以及将其用于结构的断裂与疲劳控制的方法是一项迫切的任务。S. T. 罗尔夫和 T. M. 巴逊姆所著的《结构中的断裂与疲劳控制》一书恰恰可以对此提供有益的帮助。所以，我们把这本书翻译出来，敬献给广大的科学技术工作者和有关院校师生。

这本书是从事断裂力学应用的美国著名学者 S. T. 罗尔夫和 J. M. 巴逊姆于1977年出版的一部专著。其撰写目的和主要内容已详细记述于著者的“前言”中。著名的断裂力学专家 G. R. 欧文为此书撰写了“序”，给这本书以很高的评价。

我们认为，这本书的主要特点在于它具有较高的工程应用价值。这主要体现在：第一，对断裂力学基本原理的介绍简单而实用；第二，在介绍各种断裂性能试验方法的同时，给出了断裂性能参数和各种常规缺口试验数据之间的经验关系，而且给出了大量有参考价值的数据；第三，在阐述结构的断裂与疲劳控制方法时，列举了大量试验研究成果和由此而得到的许多有价值的经验公式和工程方法；最后，这本书

IV

较为详细地介绍了美国现有的若干种结构型式的断裂控制设计和具体的材料韧性准则。这些内容不仅可以作为我国科技工作者在设计、制造和使用类似型式结构时的直接参考，而更重要的是其方法和思路将有助于对任何具体型式的结构进行断裂与疲劳控制。

我们希望这本书能对致力于断裂力学应用与研究的读者有所帮助。但是，由于我们在断裂力学理论与应用方面的知识有限，对有些结构也不很熟悉，因此，翻译中错误难免，敬请读者批评指正。

原 序

洛夫在其众所周知的教科书《弹性数学理论》中简略地讨论了若干个看来不足以用线弹性方法处理的工程重要课题，断裂就是其中之一。洛夫指出，通常采用以极限拉伸强度为基础、大小为6~12的各种安全系数。他评论道：“断裂的条件还含糊不清”。洛夫专著的第一版于1892年出版。五十年以后，结构材料得到了改进，同时安全系数值相应减小。尽管就1946年的工程实际而言，洛夫的见解仍然适用，但是，回顾起来可以看到，在正确的基础上系统地叙述断裂机制所需的大部分观点已经有了。在1946至1960年期间内，现代断裂力学的基本内容发展起来。严重的断裂问题为断裂力学的发展提供了足够的动力。而那个时期技术取得了巨大的进步，断裂力学研究工作取得成就是很自然的。

除了承认实际结构含有缺陷的事实外，所需要的主要是一种简化的观点，即裂纹逐渐扩展。一些缺陷就是预存的裂纹，而另一些缺陷在施加应力时发展成裂纹。一般的看法如下。假定结构部件在某种整体屈服之后断裂，显然，这种类型的破坏可以归因于引起截面强度不足的设计错误或施加过载。难于理解的断裂破坏是那些在不大于设计结构时所预计的应力水平下以一定的脆性方式发生的破坏。这第二种断裂按一种特定意义来说也是由于过载所引起的。如果考虑到一个承受拉伸的预存裂纹周围的应力重新分布，显然，邻近裂纹顶端的区域由于严重的应力集中而承受过载，而且必然发

生局部塑性变形。如果韧性有限，则随着裂纹扩展的同时，在裂纹前缘可能产生塑性变形。同样，裂纹前缘的过载随着裂纹尺寸的增大而提高，因而裂纹逐渐扩展趋向于自身驱动。给定一个预存的裂纹和一种韧性有限的材料，显然存在着在整体屈服之前发生快速断裂的可能。

解析断裂力学提供了表征裂纹前缘“过载”的方法。试验断裂力学则积累了有关断裂韧性、疲劳开裂和腐蚀开裂的重要实用数据。通过集中研究引起逐渐断裂的这个主动区域，把试验室得到的数据以一种可以换算到结构部件中裂纹前缘数据的形式收集起来。应用断裂力学分析方法和数据以足够的定量精度解释了许多使用中的断裂破坏。通过预先研究这些断裂的可能性，制订了有效的断裂控制设计。

目前最重要的任务是教育。必须承认，至今还没有弄清断裂控制的所有方面。但是，现有的资料是基础的，广泛应用的，并且理应编入讲授材料强度的教程之中。这本书的特殊价值是强调现有资料的实际应用。断裂力学基本概念的介绍直观、简要。试验方法的描述在主要试验细节方面是清楚的，并附有有关的图表说明。断裂控制的论述是认真推敲过的。读者将认识到，实际结构的断裂控制不是一项简单的任务。这应该是预料之中的，而且这在很大程度上与实际结构的其它许多方面情况有关。本书提供了一些有用的断裂控制建议和一种正确的观点。除此以外，工程师必须根据需要用这些方法处理实际问题。“经验是最好的老师”这句格言似乎不会由于本书的出版而改变。但是，由这两位人在断裂力学应用方面深受尊敬的专家所著的这本书提供了必要的基础知识。显然，这本书达到了它的预期目的，并将具有永久的价值。

马里兰，科勒吉帕克 马里兰大学 G. R. 欧文

前 言

断裂力学已成为控制结构脆性断裂和疲劳破坏的主要方法。本书着重于从应用观点介绍断裂力学知识。一旦提出这个课题，则断裂力学在结构的断裂和疲劳控制方面的应用必然得到强调。我们认为，作为教科书可为高级或初级研究生用作断裂力学知识的入门，而更重要的是，它把从事实际工作的工程师引入一个日益重要的领域。近年来，结构的破坏和对增加结构安全性和可靠性的需求导致对包括桥梁、飞机和核压力容器在内的许多结构型式的各种断裂准则的建立。

现在更加普遍地为诸如海上钻井设备、浮动核电站、航天飞行器等新的非寻常结构制订断裂控制设计。每一个断裂准则和断裂控制课题都是从工程观点出发，考虑了经济和实用方面的因素而提出来的。我们认为，本书能帮助工程师们了解断裂力学的基本原理，特别是认识他们自己对控制结构脆性断裂和疲劳破坏的责任。

第一章作为结构断裂和疲劳问题的概述以及断裂力学领域的引论。第二章从理论上建立应力强度因子 K_I ，而第三章描述确定临界应力强度因子 K_{Ic} 或 K_{Ic} 的试验方法。第四章介绍温度、加载速率和板厚对各种结构材料，主要是对结构钢的断裂韧性的影响。第五章用具体的设计实例介绍应力、裂纹尺寸和材料韧性之间的关系。这前五章提供了线弹性断裂力学原理方面的基础。

由于许多结构材料在使用的温度和加载速率下的断裂韧性水平超出线弹性断裂力学范围，所以，断裂韧性与其它更一般的缺口韧性试验之间的关系得到广泛应用，这些在第六章中予以介绍。

第七至十一章讨论由疲劳、应力腐蚀或腐蚀疲劳所引起的亚临界裂纹扩展。在这些领域线弹性断裂力学或许有着最广泛的应用。第七章介绍用断裂力学知识分析从钝缺口萌生疲劳裂纹的方法。第八章介绍断裂力学最广泛的应用之一，即在恒幅载荷波动下的疲劳裂纹扩展。第九章介绍变幅载荷波动下的疲劳裂纹扩展和 ΔK 的均方根值 ΔK_{RMS} 的应用。

第十和十一章引入了环境对亚临界裂纹扩展的影响，即分别为应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳。

第十二和十三章介绍了影响断裂准则的各种因素并列举了几个通用的断裂准则实例。第十四章提出了断裂控制设计的主要内容，而第十五章列举了如核压力容器、飞机和桥梁这样一些具体类型结构的现有断裂控制设计实例，以及为焊接船体和浮动核电站平台所提出的断裂控制设计。

第十六章介绍了用裂纹张开位移 (COD)， R 曲线或 J 积分进行分析的弹塑性断裂力学领域。

根据学生的基础知识，一个基础教程应该由第一至第六章、第八章、第十章和第十二章至第十四章组成，而一些更深入的内容包含在第七、九、十一、十五和十六章中。通常熟悉结构材料性能的从事实际工作的工程师在阅读第一、二和五章之后可以任意挑选自己最感兴趣的章节进行学习。

著者愿对各自所在的工作单位，堪萨斯大学和美国钢铁研究试验室为撰著本书所给予的支持表示感谢。更重要的是，感谢我们的工作单位内、外的许多同事对我们撰写本书所给

予的帮助。最后, B. Lane, J. Herrington, L. Smoot 和 T. Bernadowski 等给予了不断的鼓励和支持,在此表示诚挚的谢意。

S. T. 罗尔夫

J. M. 巴逊姆

目 录

第一章 对结构断裂和疲劳的认识	1
1.1 历史	1
1.2 缺口韧性试验	8
1.3 脆性断裂的设计考虑	14
1.4 断裂力学	17
1.5 疲劳和应力腐蚀裂纹的扩展	26
1.6 疲劳判据	29
1.7 断裂控制设计	30
参考文献	31
第二章 带裂纹元件的应力分析	34
2.1 引言	34
2.2 线弹性断裂力学	34
2.3 应力强度因子公式	38
2.4 裂纹顶端的变形	48
2.5 应力强度因子的叠加	50
2.6 裂纹张开位移 (COD)	51
2.7 应力强度因子与断裂韧性之间的关系	51
参考文献	52
附录	53
第三章 K_{Ic} 和 K_{Id} 的测试	56
3.1 概论	56
3.2 K_{Ic} 试验方法的背景	58
3.3 试样尺寸要求	62
3.4 K_{Ic} 试验程序	69
3.5 典型 K_{Ic} 试验结果	84

3.6	低温 K_{Ic} 试验	89
3.7	K_{Id} 动态断裂试验	89
	参考文献	99
第四章 温度, 加载速率和板厚对断裂韧性的影响		101
4.1	引言	101
4.2	平面应变转变温度特性	102
4.3	厚度(约束)和缺口锐度对断裂韧性的影响	108
4.4	温度和加载速率对 K_{Ic} , K_{Id} 的影响	118
4.5	结构钢的典型 K_{Ic} 和 K_{Id} 结果	125
4.6	结构钢加载速率的变化	140
	参考文献	151
第五章 断裂力学设计		152
5.1	引言	152
5.2	最后破坏的一般断裂力学设计程序	156
5.3	设计选择材料	163
5.4	直径 260in 发动机壳破坏设计分析	166
5.5	设计举例——高强度钢制压力容器的选材	171
	参考文献	183
第六章 K_{Ic} 或 K_{Id} 与其他断裂韧性试验的关系		184
6.1	概述	184
6.2	其他断裂韧性试样	186
6.3	K_{Ic} -CVN 上平台关系	194
6.4	转变温度区的 K_{Ic} -CVN 关系	197
6.5	用 CVN 冲击数据估计整个 K_{Ic} 曲线	205
6.6	NDT 温度下的 K_{Id}	208
6.7	用预裂的 CVN 冲击试验结果确定 K_{Id}	210
6.8	NDT-DT-CVN- K_{Ic} 的关系	216
6.9	CVN 横向伸长率	222
	参考文献	226

VI

第七章 疲劳裂纹的形成	229
7.1 引言	229
7.2 断裂力学方法	231
7.3 应力集中附近的应力场	232
7.4 应力集中对疲劳裂纹形成的影响	234
7.5 疲劳裂纹形成门槛值与拉伸特性的关系	240
7.6 不扩展的疲劳裂纹	246
7.7 有限疲劳裂纹形成寿命特性	250
参考文献	253
第八章 等幅交变载荷下的疲劳裂纹扩展	256
8.1 引言	256
8.2 马氏体钢	260
8.3 铁素-珠光体钢	263
8.4 奥氏体不锈钢	264
8.5 钢的讨论	266
8.6 铝合金和钛合金	268
8.7 平均应力对疲劳裂纹特性的影响	271
8.8 循环频率和波形的影响	273
8.9 应力集中对疲劳裂纹扩展的影响	276
8.10 钢焊接件中的疲劳裂纹扩展	277
8.11 不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响	281
8.12 疲劳速率转变的重要性	284
8.13 设计举例	285
参考文献	291
第九章 变幅载荷波动下的疲劳裂纹扩展速率	294
9.1 引言	294
9.2 应力历程	294
9.3 概率密度分布	296
9.4 在变幅载荷作用下的疲劳裂纹扩展速率	300

9.5	一个或几个高载荷波动	300
9.6	变幅载荷波动	302
9.7	各种钢的疲劳裂纹扩展	308
9.8	在各种单峰分布曲线下的疲劳裂纹扩展	312
	参考文献	315
第十章 应力腐蚀开裂		317
10.1	引言	317
10.2	断裂力学方法	317
10.3	试验方法	318
10.4	K_{Isc} ——一个材料参数	325
10.5	K_{Isc} 数据的有效性	328
10.6	一般的观察结论	331
10.7	裂纹扩展速率试验	337
10.8	成分和外加电位的影响	339
	参考文献	342
第十一章 腐蚀疲劳		346
11.1	引言	346
11.2	一般特性	346
11.3	低于 K_{Isc} 的腐蚀疲劳特性	348
	参考文献	372
第十二章 断裂准则		375
12.1	引言	375
12.2	性能的一般标准	377
12.3	加载速率的重要性	386
12.4	破坏的后果	392
12.5	安全寿命和破损安全	394
12.6	转变温度法	399
第十三章 各种缺口韧性准则举例		404
13.1	引言	404

XV

13.2	船尾钢的15ft-1b CVN 冲击准则	406
13.3	加载速率移位准则	410
13.4	断裂分析图解 (FAD)	416
13.5	全厚度屈服准则	420
13.6	先漏后断准则	428
13.7	比例分析图解 (RAD)	436
13.8	总结	445
	参考文献	448
第十四章 断裂控制设计		451
14.1	引言	451
14.2	历史	456
14.3	断裂控制设计	459
14.4	综合的断裂控制设计	477
	参考文献	482
第十五章 断裂控制设计举例		483
15.1	引言	483
15.2	压力容器研究委员会 (PVRC) 对核电站部件铁素体材料的韧性要求	484
15.3	美国国家公路与运输人员协会 (AASHTO) 对钢桥的材料韧性要求	499
15.4	对焊接船体所推荐的断裂控制指南	511
15.5	对浮动核电站工作台所推荐的断裂控制设计	531
15.6	军用飞机结构的断裂控制和结构完整性	550
	参考文献	564
第十六章 弹塑性断裂力学		567
16.1	引言	567
16.2	裂纹张开位移 (COD)	567
16.3	R-曲线分析	590
16.4	J 积分	603
	参考文献	612

第一章 对结构断裂和疲劳的认识

1.1 历史

虽然因脆性断裂[⊖]而破坏的结构是很少的，但是脆性断裂发生了，并且在结构中发生。下面简要的历史回顾不是全部，而是为了说明脆性断裂可能在诸如储罐、压力容器、船舶、桥梁和飞机等工程结构中发生这样的事实。

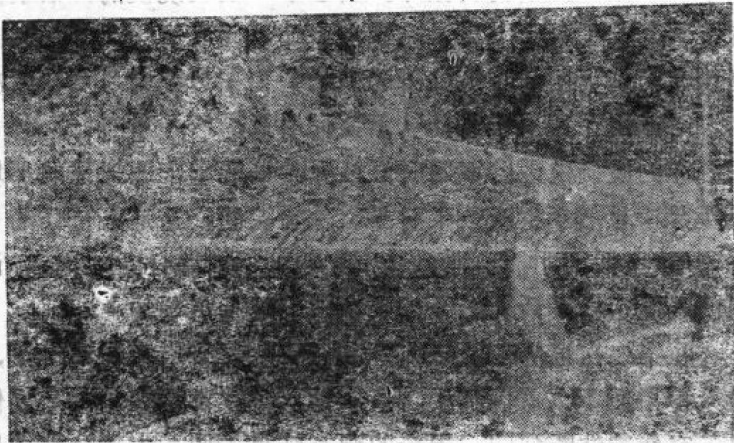


图1.1 典型的脆性断裂表面的照片

- ⊖ 脆性断裂是结构材料的一种灾难性破坏，这种破坏往往事先没有塑性变形并以非常高的速度（如7000ft/sec）产生。这种断裂的一般特点是断裂表面平整（解理表面），带有小的或没有剪切唇，如图1.1所示。且平均应力水平低于总体屈服的应力水平。脆性断裂不象疲劳，屈服或屈曲破坏那样经常发生，但一旦发生就可能对生命或财产造成很大的损失。

Shank^[1]和 Parker^[2]考察了许多结构的破坏，同时从十八世纪后期开始报导了脆性钢中的神秘裂纹，当时他们是英国钢铁研究所的成员。1886年在长岛 Gravesend 一个250ft高的储水罐在水压试验时发生了脆性断裂。同一时期也报导了一些如储罐、水箱、油罐等的铆接结构发生了灾难性的脆性断裂，而这些结构所用的材料都符合规定的拉伸强度和塑性要求。

最出名的一次储罐破坏是1919年1月，美国波士顿糖浆罐破坏。罐内储藏有230万加仑的糖浆，12人被糖浆淹死或撞死，40多人受伤，一些马被淹死，房屋遭到损坏。波士顿架空铁路部分结构被撞坏。引起了一场大规模的诉讼案，许多著名的工程师和科学家都出庭作证。经过几年的调查，法庭任命的陪审团宣布了储罐的破坏是由于过应力引起的决定。陪审团在评论矛盾的技术证词时说：“……在科学论争的海洋的漩涡中，陪审团时时认为它可能牢牢地抓住的那块石头是，显然至少有一半科学家是错误的，这是不奇怪的……”。这段话简明扼要地总结了工程师们对脆性断裂现象认识的状况。这段话对于今天来说，仍然是正确的。

在第二次世界大战以前，欧洲一些焊接空腹桁架桥梁，投入使用后不久就破坏了。所有这些桥梁都是在小载荷，低温下突然脆性断裂的，周密的调查结果表明，大部分破坏是在焊缝处开始的，有不少焊缝是有缺陷的（有不连续点）。Charpy冲击试验结果说明大多数钢材在使用温度下是脆性的。

然而，尽管发生这样和那样的脆性断裂，但是直到第二次世界大战期间的大量船舶破坏后，工程界才完全认识到这是一个脆性断裂的问题。在第二次世界大战时制造了大约