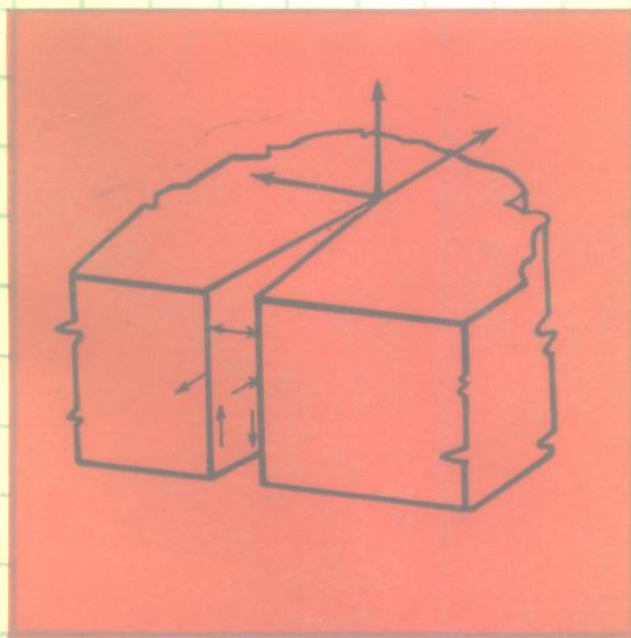


应用 断裂动力学 基础

范天佑 编著



FOUNDATION OF
APPLIED FRACTURE
DYNAMICS

北京理工大学出版社

应用断裂动力学基础

范天佑 编著

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内容简介

本书是一本比较系统介绍断裂动力学应用的著作,也是作者的《断裂动力学引论》的配套著作。《引论》一书主要介绍断裂动力学的基本原理和方法,本书则侧重于应用,内容有动态应力强度因子汇编。材料动态断裂韧性的测试方法、断裂动力学的应用实例(分别介绍了材料动态断裂力学性能的测试。结构动态断裂事故分析和预防动态断裂的止裂研究以及地震断层破裂过程分析)。

本书可供材料科学、力学、地球科学以及航空、兵器、机械、造船、石油与天然气输送工程、核结构等专业的科学工作者和工程技术人员参考。

应用断裂动力学基础

范天佑 编著

北京理工大学出版社出版发

各地新华书店经销

北京市通县向阳印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 7.875 印张 202 千字

1992 年 6 月第一版 1992 年 6 月第一次印刷

ISBN 7-81013-637-2/O·93

印数:1—2000 册 精装定价:13.00 元

平装定价:7.50 元

前 言

在裂纹体受到高加载速率的载荷作用和裂纹发生快速传播的情形下,现有的只能处理裂纹静态起始扩展和缓慢扩展的线性弹性断裂力学和弹塑性断裂力学的方法是无能为力的。而民用与军用的许多重要结构物,例如海洋平台、大型水坝、大型船舰、石油与天然气输送管道、核反应堆压力容器、航空与航天器等等,都可能遇上高速载荷,其内部的裂纹也可能发生快速传播,这两种情况的出现,对结构物构成严重的威胁,而其后果是不堪设想的。为了解决这些问题,自然也是为了使断裂力学在民用与军用工业方面更好地发挥作用,能动性地进行止裂控制,一门新学科——断裂动力学发展起来了。但断裂动力学的意义远不只是用于工业一个方面,它在基础研究,例如地球科学方面也有重要的意义。由于这门学科在基础理论和实际应用两方面均有重要的意义,在不太长的时间里,我国一些大学和研究机构已经开展了许多工作。我们小组仅仅是这众多研究断裂动力学单位中的一员,我们对断裂动力学的认识(其中也包括我们的一点工作)已经写在《断裂动力学引论》一书中。此书1990年出版以来,受到科学界老前辈、国内外同行的鼓励。但同时我们也清醒地看到,我们在这方面的工作还有缺点和不足之处。为了使得断裂动力学尽快在我国发展起来,更好地为实现四个现代化服务,还有许多工作要做。一些产业部门的读者建议我们尽快写出一本应用断裂动力学方面的著作,以便他们能直接用于解决生产实际问题,有的专家还建议增加岩石断裂动力学的内容,以便它更好地用于解决地球科学中的问题。我们认为这些建议都是合理的,应该采纳。事实上,类似的问题在《断裂动力学引论》写作之初就曾考虑过,为此,我们汇集了一些资料,同时在力所能及

及的条件下,我们也开展一些与应用有关的工作。但是由于受到各种条件的限制,该书只能讨论断裂动力学的一些基本问题,或者说以介绍基本原理为主。我们汇集到的实验方面的资料只介绍了一小部分,而关于传播裂纹问题的复杂的数学推导则根本未写进书中。随着我们对这门学科认识的加深,在实验和应用方面亲自做了一点工作,同时也是为了不辜负广大读者的希望,我们尝试编写了这本《应用断裂动力学基础》,供应用部门以及其他单位的同志们参考。当然,应用和对原理的了解是分不开的,但为了避免重复,凡在《断裂动力学引论》一书讨论过的原理,这里就不再赘述了。

断裂动力学虽然还不太成熟,但一经用于实践,仍发挥了重要的作用,产生了很好的效益。这一理论的应用要求具备较完整的、各种带裂纹结构元件在各种动态载荷作用下的应力强度因子(包括表达式或数值或曲线),要求提供各种材料的动态断裂韧性的测试规范。这两部分正是本书所讨论的主要内容。这些内容也表明,本书主要是讨论断裂动力学的线性理论的应用,对于非线性理论(即弹塑性断裂动力学理论)的应用将在第四章中作适当介绍。

在本书的最后一部分,即第四章,我们介绍了若干具体的应用实例,这些内容包括工程动态断裂实例分析,材料动态断裂性能测试,防动态断裂的止裂分析,以及地震震源机制研究。可见应用的范围不仅涉及工程与材料科学,还涉及自然科学。希望各方面专家和读者共同讨论。

这里说明一点:由于本书引用了不同国家和不同时期发表的资料,这些资料采用了不同的计算单位,例如有的用 $\text{N}\cdot\text{m}$ (牛顿·米)作单位,有的用 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$ (公斤力·毫米)作单位,我们只直接引用而不作更动,请读者理解。

最后还要说明一点:国内不少单位都开展了断裂动力学研究,取得很多成果,只要是已公开发表而且我们读过的,均尽量予以介绍。对于那些虽然已经发表,但我们尚未见到的,则未能介绍,请予谅解。

本书由范天佑任主编,其中第一、二、四章为范天佑所写,第三章由范天佑与机电部重庆第五九研究所李祖强共同写作(参考了美国 ASTM 1980 年与 1983 年的两个文件和德国 DVM 1986 年的文件和国内有关单位测试工作的经验)。

编著者感谢国家自然科学基金委材料与工程科学部、数学物理学部和地球科学部先后三次对本项研究的资助。

德国 Ruhr 大学 Prof. J. F. Kalkhoff 的手稿《Experimental Fracture Dynamics》对本书第三章的写作有很大帮助,这里谨致谢意。

我们还要感谢冶金部钢铁研究总院物理研究室高级工程师汪德根等同志,他们提供了一些研究报告和信息以及在实验上的协作,对本书第四章某些内容的写作给予了帮助。

欢迎广大读者和各方面的专家对书中的任何缺点与错误提出批评!

范天佑

1992. 2. 22

目 录

第一章 引论

第二章 动态应力强度因子汇编

§ 2.1 冲击载荷作用下的稳定裂纹	9
2.1.1 求解方法	9
2.1.2 动态应力强度因子表	14
2.1.2.1 无限平面中一半无限裂纹受冲击拉伸或冲击 剪切或冲击纵向剪切作用	15
2.1.2.2 无限平面中一半无限裂纹受冲击点力作用	17
2.1.2.3 无限平面中一有限尺寸裂纹受冲击拉伸或冲击 剪切或冲击纵向剪切作用	19
2.1.2.4 无限平面中一有限尺寸裂纹在矩形脉冲载荷 作用下	21
2.1.2.5 无限平面中一有限尺寸裂纹在幂函数型载荷 作用下	23
2.1.2.6 半无限平面中接近表面的有限尺寸裂纹在冲击 载荷作用下	25
2.1.2.7 无限长条中半无限裂纹在冲击法向位移作用下	28
2.1.2.8 无限长条中有限尺寸裂纹在冲击载荷作用下	29
2.1.2.9 无限长条中有限尺寸裂纹在矩形脉冲载荷 作用下	31
2.1.2.10 无限长条中有限尺寸裂纹在幂函数型冲击 载荷作用下	33
2.1.2.11 纵向长条中有限尺寸裂纹受冲击载荷的作用	35
2.1.2.12 矩形试样中的中心裂纹受法向冲击载荷作用	37
2.1.2.13 矩形试样中的中心裂纹受冲击剪切载荷作用	39
2.1.2.14 矩形试样中单边裂纹受冲击拉伸应力作用	41

2.1.2-15	矩形试样中单边斜裂纹受冲击拉伸应力作用 (I型与II型混合型问题)	43
2.1.2-16	受冲击的三点弯曲试样——近似分析解	45
2.1.2-17	受冲击的三点弯曲试样——实验方法和数值 方法的结果	47
2.1.2-18	受冲击作用的层状复合板中的有限尺寸裂纹	58
2.1.2-19	受冲击作用的二共线裂纹	60
2.1.2-20	无限介质中的一圆盘状裂纹在冲击载荷 作用下	62
2.1.2-21	圆盘状裂纹受矩形脉冲载荷作用	65
2.1.2-22	圆盘状裂纹在幂函数型载荷作用下	67
2.1.2-23	无限介质中一矩形片状裂纹在冲击载荷的 作用下	69
2.1.2-24	无限介质中的圆环状裂纹在冲击载荷的 作用下	71
2.1.2-25	有限半圆柱体中的圆盘状裂纹在冲击载荷 作用下	74
2.1.2-26	层状复合体中的圆盘状裂纹在冲击载荷 作用下	76
2.1.2-27	受冲击载荷作用的弯曲板中的有限尺寸 裂纹	79
2.1.2-28	受冲击弯矩作用的复合层状板中的裂纹	81
§ 2.2	弹性波作用下的裂纹	85
2.2.1	弹性波的基本概念	85
2.2.2	弹性波—裂纹相互作用问题的解法	88
2.2.3	动态应力强度因子表	90
2.2.3-1	无限平面中的一半无限裂纹受入射弹性纵波 (P波)的作用	92
2.2.3-2	无限平面中的一半无限裂纹受弹性横波 (SV波)的作用	95
2.2.3-3	无限平面中的一半无限裂纹受水平剪切波 (SH波)的作用	98

2.2.3-4	在无限平面中的一有限尺寸裂纹分别受 P 波、SV 波与 SH 波作用	99
2.2.3-5	无限介质中一圆盘状裂纹分别受 P 波和扭转波作用	101
2.2.3-6	无限大体中一矩形裂纹在 P 波作用下	103
2.2.3-7	无限平面中二平行的有限尺寸裂纹在 P 波、SV 波和 SH 波的分别作用下	105
2.2.3-8	无限平面中二共线裂纹在弹性波作用下	108
2.2.3-9	不同介质的界面上的裂纹在 SH 波作用下	112
2.2.3-10	带裂纹板在挠曲波作用下	115
§ 2.3	运动裂纹与传播裂纹	117
2.3.1	运动裂纹与传播裂纹问题的分类及求解方法	117
2.3.2	运动裂纹与传播裂纹的应力强度因子表	124
2.3.2-1	无限平面中不变长度的有限尺寸裂纹以等速沿一个方向运动,物体受单向均匀拉伸	125
2.3.2-2	狭长体中不变长度裂纹以等速运动,物体受单向均匀拉伸	127
2.3.2-3	狭长体中的长度不变的裂纹作等速运动,狭长体上下表面受均匀位移作用	130
2.3.2-4	无限平面中半无限裂纹等速传播,在裂纹面的一段上受均匀压力或均布剪应力作用 (I 型与 II 型问题)	133
2.3.2-5	无限平面中半无限裂纹等速传播,在裂纹面的一段上受均匀纵向剪切 (III 型问题)	135
2.3.2-6	无限平面中一半无限裂纹突然发生,然后以等速向 x 轴正方向传播,无限平面受单向均匀拉伸作用	136
2.3.2-7	无限平面中一半无限裂纹等速传播,在裂纹面的一段上作用着自平衡的压力,而这段的长度 $a(t)$ 可以是时间的函数	138
2.3.2-8	无限平面中一初始长度为零的等速双向传播的裂纹,在单向均匀拉伸应力作用下	140

2.3.2-9	无限平面中一双向等速传播的裂纹,在纵向 剪切作用下	142
2.3.2-10	狭长体中半无限裂纹以等速传播,狭长体上下 表面给定法向位移	143
2.3.2-11	狭长体中半无限裂纹以等速传播,裂纹面的 一段上分别作用均匀压力和均匀剪切应力 (I型与II型问题)	144
2.3.2-12	狭长体中半无限裂纹以等速传播,裂纹面上 一段作用纵向剪切应力(III型问题)	146
2.3.2-13	双悬臂梁试样中的传播裂纹,试样由楔块加载	147
2.3.2-14	矩形试样中的有限长裂纹双向等速传播,矩形 体在冲击载荷作用下	149

第三章 动态断裂韧性的测试

§ 3.1	动态断裂韧性的意义	153
3.1.1	加载速率对 K_{ID} 的影响	153
3.1.2	裂纹传播速度对 K_{ID} 的影响	154
§ 3.2	金属材料在冲击载荷作用下的断裂韧性的 测试方法	157
3.2.1	概述	157
3.2.2	定义、符号及单位	158
3.2.3	试验装置	159
3.2.4	试样、尺寸和制备	162
3.2.5	试验程序	166
3.2.6	结果的计算与表述	168
3.2.7	报告	173
3.2.8	此方法的局限性	173
3.2.9	其他方法	174
§ 3.3	金属材料裂纹快速扩展断裂韧性的测试方法	176
3.3.1	概述	177
3.3.2	定义与符号	177
3.3.3	试验装置	178
3.3.4	试样的形状、尺寸和制备	180

3.3.5 试验程序	183
3.3.6 计算结果及讨论	185
3.3.7 报告	187
3.3.8 其他的方法	188
第四章 断裂动力学的应用实例	
§ 4.1 动态断裂分析的大致步骤	191
§ 4.2 有关材料动态断裂韧性的测试及结果	192
4.2.1 材料动态断裂韧性 K_{Ic} 随温度的变化	192
4.2.2 材料动态断裂韧性随加载速率的变化(之一)	195
4.2.3 材料动态断裂韧性随加载速率的变化(之二)	198
4.2.4 复合材料的动态断裂韧性	200
§ 4.3 机床主轴和其他结构动态断裂事故的分析	202
4.3.1 铣床主轴断裂事故分析	202
4.3.2 其他动态断裂事故分析	205
§ 4.4 天然气输送管道中传播裂纹的止裂研究	206
4.4.1 问题的概述	206
4.4.2 基本原理	207
4.4.3 进一步简化,基本方程	208
4.4.4 稳态压力分布	209
4.4.5 能量释放率(裂纹扩展力)的计算	211
4.4.6 塑性铰位置的确定	211
4.4.7 管道线中裂纹传播与止裂的结果	213
4.4.8 讨论	215
§ 4.5 与核结构完整性有关的裂纹止裂问题研究	215
4.5.1 符号与记号	215
4.5.2 两种测试方案	216
4.5.3 热击引起的效应	217
4.5.4 扩展量不大时裂纹起始扩展与止裂的静态与动态分析	218
4.5.5 扩展量很大时裂纹止裂的静态与动态分析	220
4.5.6 讨论	221
§ 4.6 地震断层的不稳定性和地震过程中的低应力降 的分析	221

4.6.1	模型的建立	222
4.6.2	断层生长起始的分析(断裂静力学分析)	223
4.6.3	断层快速错动的分析(断裂动力学分析)	227
4.6.4	动力学问题与静力学问题的对比	231
4.6.5	结论与讨论	232
§ 4.7	早炸的机理及相应的抑制措施的探讨	232
§ 4.8	讨论与结论	234

第一章 引 论

在文[1]和著作[2]中,我们提到断裂动力学是计及惯性效应的断裂力学。惯性效应有多种形式,这里主要考虑两种情形:

- (1) 裂纹稳定,外力随时间迅速变化;
- (2) 外力随时间变化不显著,裂纹快速传播。

在第一种情形,人们研究裂纹的动态起始扩展,描写其工作状态的物理量为动态应力强度因子 $K_I(a, \sigma, t)$ (对 I 型裂纹),其临界值为动态断裂韧性,记为 K_{Id} ,它是加载速率 $\dot{\sigma}$ 和温度 T 的函数,裂纹发生与不发生动态起始扩展,以下式为判据

$$K_I(a, \sigma, t) = K_{Id}(\dot{\sigma}, T)$$

在第二种情形,我们研究裂纹快速传播和止裂,刻划其工作状态的物理量也称为动态应力强度因子 $K_I(a, \sigma, t)$ (对 I 型裂纹而言),其临界值也称为动态断裂韧性,但记为 $K_{Id}(\dot{a}, T)$ 其中 $\dot{a} = V$ 代表裂纹的传播速度,在这种情形,相应的断裂/止裂判据为

$$K_I(a, \sigma, t) \leq K_{Id}(\dot{a}, T)$$

其中等号代表裂纹传播,小于号代表止裂。

以上两个判据是现阶段断裂动力学实际应用的基础。

在上述判据中,左端的量代表工作状态,由带裂纹结构物的应力分析计算出来,右端的量代表材料的抗断裂阻力,是一种材料特性,由实验测量得到。在著作[2]中,我们花了很大精力去讨论多种典型带裂纹结构元件在冲击载荷和弹性波作用下,动态应力强度因子的计算,并且介绍了一定数量的结果。而对传播裂纹的动态应力强度因子的介绍相对地少许多,这是因为它们的计算更加困难,迄今所得到的结果也较少。总之,著作[2]侧重于动态应力强度因子计算的原理和方法的讨论,由于篇幅等原因的限制,对各种结果

的介绍,还不广泛,为了便于广大读者用断裂动力学去解决实际问题,这里必须提供较为广泛的动态应力强度因子的结果。这就是第二章的任务及其主要内容。读者不难发现,现有的结果仍相当有限。读者在解决实际问题时,确定了结构物的受力状态和结构物中的裂纹的类型、位置、取向和尺寸之后,可以在第二章提供的动态应力强度因子手册中查寻同自己问题最相近的裂纹问题的计算结果,因而得到所研究问题的工作应力强度因子。在实在找不到相近裂纹问题的现成结果时,只得自行计算,而手册中的结果可以作为一种参考。由于目前国内还没有断裂动力学计算的通用的高效能的计算程序,一般的实际应用部门自己开展这种计算工作,将有一定的困难。一个补救的办法是,建议把实际问题进一步简化,抓住其中最主要的因素,从手册中查找相近的结果,至少可以对问题作出定性以至半定量的评价。另一个补救的办法是,建议实际部门同某些大学和研究所合作,使用他们业已编制的若干计算机程序。国内若干大学和研究所编制了断裂动力学的有限差分、有限元和边界元的计算程序(当然各有优点和局限性),在一定的程度上可以解决一些实际部门的需要。

前面已经指出,传播裂纹的动态应力强度因子的结果比较少,不仅如此,有一些结果,例如著名的 Yoffe 解^[3],Craggs 解^[4]等等,局限性很大。但由于它们在理论上有价值,在断裂动力学的发展史上有意义,在第二章的手册中仍把它们收入进去,读者在使用时要注意其局限性,要使用得当。

动态断裂韧性 $K_{Ic}(\sigma, T)$ 与 $K_{Ic}(\dot{a}, T)$ 的测试及结果,在断裂动力学的实际应用中至为重要,但著作[2]没有详细讨论这一问题。目前全世界还没有一个国家或一个权威学术机构颁布过正式的动态断裂韧性的测试规范,现在见到的只是建议的测试方法。形成这种情况的原因是多方面的,譬如说,在测试与计算方面均存在诸多困难。我们参考了美国材料与试验协会(ASTM)^[5,6]的两个文件和德国材料与试验协会(DVM)^[7]的一个文件,同时也参考了近年来

国内有关单位测试工作的经验,整理出两份测试方案,一份为 $K_{I0}(a, T)$ 的测试方法,一份为 $K_{II0}(a, T)$ 的测试方法,建议国内同行参考。事实上,国内若干兄弟单位已经先后采用了(或者部分地采用了)上述的 ASTM 的建议的方法,进行了不少测试工作,有的同志(包括我们在内)曾对其局限性和缺点提出过批评。但目前尚缺乏替代它们的更为有效的方法。我们认为 ASTM 的这两个文件所介绍的方法虽然有局限性和缺点,但它们比较简单可行,不同国家、不同地区的测试单位若采用一种比较一致的方案进行测试工作比较容易形成共识,也便于互相之间比较其测试的结果。我们相信,随着国内各单位动态断裂韧性测试工作更广泛地开展,最终将建立起中国自己的动态断裂韧性测试规范。

有关测试方法的介绍在第三章中给出。

第二章与第三章的资料,为实际部门应用断裂动力学解决生产实践和科学实验中的问题提供了一个初步的基础。用这些材料去具体地处理一个生产实践中的问题或科学实验中的问题,还需要开展一些相应的工作,例如裂纹体的受力分析,具体材料的 K_{I0} 的测试,等等,工作中还需要一些知识和经验。如果能把先期开展了工作的一些单位的经验整理出来,为随后开展工作的部门和单位提供参考无疑是有益的。因此在第四章中,我们试图在这方面作一点介绍。国内不少单位已开展了相当多的应用研究,也取得很好的成果。遗憾的是这些工作绝大部分未曾公开发表,查寻相当困难。因此这里的介绍是很不完整的。这里所介绍的工作也有一部分是我们自己做的,未必成熟,其中有的问题属于一种探索性很强的问题,有关天然气管道和核结构止裂分析的内容是国外的研究成果。在介绍中也可能有欠妥之处,希望大家共同讨论。

这里说明一下,后面汇编的动态应力强度因子手册,资料来源除了新近国内外有关杂志上发表的、有关大学的博士、硕士论文中提供的之外,还引用了 G. C. Sih 主编的手册^[8]和日本 1987 年出版的手册^[9]中的许多结果。对国内研究者的成果,只要是能汇集的,

都尽可能介绍。由于我们查阅的范围有限,难免有疏漏之处,这绝对不是对国内同行工作的不重视。

最后列出一些常用符号和数据,在以后各章讨论时就不再介绍了。

二维裂纹的 I、II、III 型应力强度因子定义如下:

$$K_I = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{yy}(r_1, 0, t)$$

$$K_{II} = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{xy}(r_1, 0, t)$$

$$K_{III} = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{yz}(r_1, 0, t)$$

各符号的意义见图 1-1。

三维圆盘状裂纹的应力强度因子定义如下:

$$K_I = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{zz}(r_1, 0, t)$$

$$K_{II} = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{rz}(r_1, 0, t)$$

$$K_{III} = \lim_{r_1 \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r_1} \sigma_{\theta z}(r_1, 0, t)$$

上述公式中有些符号的意义见图 1-2。

其他符号的意义介绍如下:

$$c_1 = \begin{cases} \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} & \text{(平面应变)} \\ \sqrt{\frac{\lambda^* + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\nu)(1-\nu)}} & \text{(平面应力)} \end{cases}$$

(纵波波速)

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{(横波波速)}$$

c_R = Rayleigh 波波速

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{Lamé 常数(平面应变)}$$

$$\lambda^* = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - \nu)} \quad \text{Lamé 常数(平面应力)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{第二 Lamé 常数(剪切模量)}$$

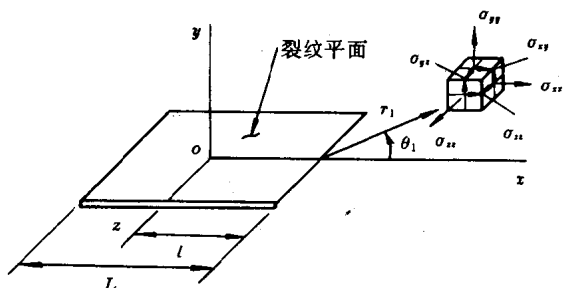


图 1-1 二维裂纹

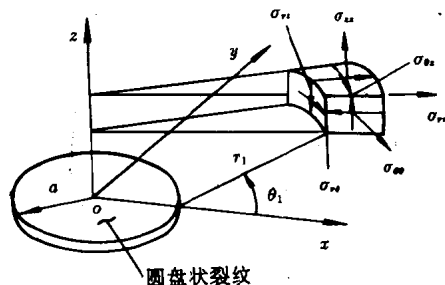


图 1-2 圆盘状裂纹

E = 弹性模量

ν = Poisson 系数

ρ = 质量密度

$\sigma_0, \tau_1, \tau_2 = \text{I, II, III 型的动态载荷幅值}$
 $= P, SV, SH \text{ 波入射波幅值}$

ω = 入射波的圆频率