

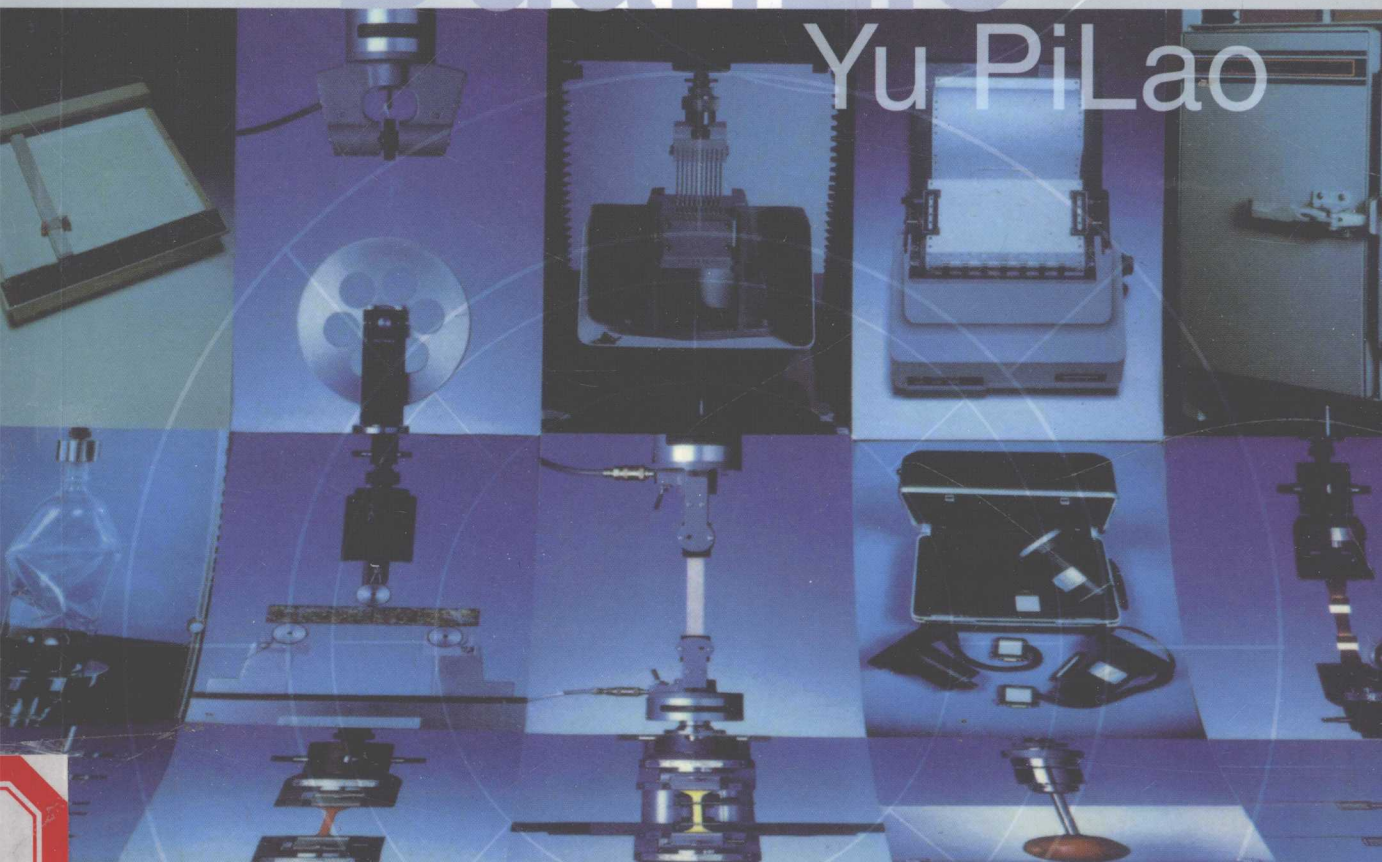
中国地质大学(武汉)“十一五”规划教材

断裂与疲劳

伍颖 编著

DuanLie

Yu PiLao



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

中国地质大学(武汉)“十一五”规划教材

断裂与疲劳

DUANLIE YU PILAO

伍颖 编著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 简 介

变形、断裂、腐蚀、磨损、变性是材料或结构失效的主要原因与形式,其中断裂最为常见也最为危险,在很多情况下可能造成灾难性事故。在断裂事故中又以疲劳断裂为多为害,且多属低应力脆性断裂,易失察失防。本书以断裂(力学)和疲劳(断裂)为主题,系统阐述了该领域最成熟、最前沿和最活跃的研究课题与成果。

全书分四篇共十五章。断裂基础篇主要提出了强度问题、断裂问题、疲劳问题、裂纹问题和平面问题,断裂理论篇主要阐述了线弹性断裂力学的格氏裂口断裂理论、能量平衡断裂理论、应力强度因子断裂理论、复合裂纹脆断理论以及弹塑性断裂力学的 COD(开裂)理论与 J 积分(启裂)理论,疲劳断裂篇主要论述了传统疲劳分析的应力-疲劳寿命法、应变-疲劳寿命法和用断裂力学应力强度因子研究疲劳问题的疲劳断裂扩展速率与疲劳裂纹扩展寿命理论,断裂实践篇主要介绍了断裂与疲劳的相关理论在现代安全设计与评定方面的工程应用以及相关力学性能参数的实验测试技术。

本书可作为工科类本科生或研究生教学用书,也可作为相关工程技术人员或科学研究工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

断裂与疲劳/伍颖编著. —武汉:中国地质大学出版社,2008.10

ISBN 978-7-5625-2230-0

I. 断…

II. 伍…

III. ①断裂力学②疲劳断裂

IV. O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 142780 号

断裂与疲劳

伍 颖 编著

责任编辑:方 莉

责任校对:戴 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511 传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:310 千字 印张:11.875

版次:2008 年 10 月第 1 版

印次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2230-0

定价:30.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

亲爱的读者,钦佩您勇敢地翻开此书,您马上就能得到解释。

——首先是关于书名。这是一部力学书籍,主要讨论裂纹体类材料或结构在(动静)载荷、(高低)温度、(腐蚀)环境等因素共同作用条件下的变形、损伤、疲劳和断裂的过程和机理,全面研究(疲劳)裂纹的萌生机理、扩展规律和断裂判据,详细介绍现代安全设计方法与现代安全评定技术,涉及断裂力学、断裂物理和材料疲劳等学科或专业领域。本书没有局限于断裂力学,并且也认为断裂力学最成功的标志体现在疲劳裂纹扩展速率规律和疲劳裂纹扩展寿命估算的研究成果上;结合工程技术人员知识结构和工程应用的需要,将该书的主题确定为断裂与疲劳;并且把疲劳裂纹研究作为断裂力学理论的成功应用,把疲劳断裂控制作为工程断裂预防的一项主要任务,把裂纹的萌生、微观裂纹扩展(断裂物理)、宏观裂纹扩展作为断裂破坏不可或缺及不可分割的过程;故该书名定为《断裂与疲劳》,该书的内容也是基于这些认识和思路拟定与组织的。

——其次是关于内容。本书分四篇,即断裂基础篇、断裂理论篇、疲劳断裂篇与断裂实践篇。

断裂基础篇共5章,在对一般应力状态与传统强度理论温故知新的基础上,主要提出了传统强度理论的局限性和低应力脆性断裂的新课题。抛砖引玉地介绍了晶体的理论断裂强度、材料的测试断裂强度与结构的实际(计算)断裂强度之间的关系和矛盾,并用应力集中的观点给予了初步解释,逐渐认识到缺陷或裂纹对材料性能的影响。进而分专题对疲劳问题、裂纹问题与平面问题作了基本简述,为后面章节的论述起到承前启后的铺垫作用。

断裂理论篇共6章,基本上按照断裂力学的发展历程分别系统阐述了线弹性断裂力学的裂口断裂理论、能量平衡断裂理论、应力强度因子断裂理论和弹塑性断裂力学的COD(开裂)理论与 J 积分(启裂)理论以及复合型裂纹脆断理论。这一篇是该书的核心与重点。断裂基础篇的裂纹问题与平面问题就是为该篇应力强度因子断裂理论等章节的应力分析与求解作链接的。

疲劳断裂篇共2章,主要论述了传统疲劳分析的应力-寿命法和应变-寿命法以及用断裂力学应力强度因子研究疲劳问题的疲劳裂纹扩展速率和疲劳裂纹扩

展寿命理论。此篇一般可单独成书,与断裂基础篇的疲劳问题章节前呼后应,比较系统地阐述和解决了疲劳断裂的强度设计与寿命控制问题。

断裂实践篇共2章,主要介绍了断裂与疲劳的相关理论在现代安全设计与评定方面的工程应用以及相关参数的实验测试技术。前者主要包括现代疲劳设计、先漏后破方法、材料性能评定、缺陷安全评定、工艺质量控制,后者主要包括机械式、液压式、电子式、电液式试验系统知识和静态力学性能试验、动态力学性能试验与断裂力学性能试验技能。

——最后是关于理念。

本书力求理论与实践相结合、力学与工程相结合、问题与探究相结合、宏观与微观相结合、教学与科研相结合,力求内容丰富、体系完整、结构合理、逻辑规范、思路明晰。编者也确实殚精竭虑,自评最有意义的工作在于精选、凝练和描述同断裂与疲劳这一主题有关的发展历程、研究成果及其知识体系。由于水平和时间所限,书中错误敬请指正。

需要特别说明的是,由于该书主要作为师生教材和科技普及,书中内容不可避免地引用和参考了前人工作的智慧结晶,包括不同时期和不同国籍的所有科技工作者的研究课题与成果,包括为了介绍和传播这些知识而进行再创造的各种版本及各种传媒的所有知识载体与编著者,在此表示崇高的敬意和诚挚的谢意。

最后还要感谢中国地质大学(武汉)对该书的资助,感谢支持本书编写和帮助本书出版的单位和个人。

编者

2008年6月

目 录

第 0 章 绪 论	(1)
-----------	-----

断裂基础篇

第 1 章 强度问题	(4)
1.1 应力状态	(4)
1.2 强度理论	(7)
1.3 强度理论问题	(9)
第 2 章 断裂问题	(12)
2.1 断裂的定义和分类	(12)
2.2 断裂强度	(14)
第 3 章 疲劳问题	(17)
3.1 疲劳描述	(17)
3.2 疲劳断裂	(23)
第 4 章 裂纹问题	(30)
4.1 裂纹的定义与分类	(30)
4.2 裂纹对强度的影响	(31)
4.3 裂纹探伤的尺寸换算	(33)
第 5 章 平面问题	(34)
5.1 弹性力学问题	(34)
5.2 平面问题基本方程组	(36)
5.3 平面问题应力法求解	(38)

断裂理论篇

第 6 章 格里菲斯裂口断裂理论	(40)
6.1 理论描述	(40)
6.2 断裂分析	(41)
6.3 理论修正	(43)
第 7 章 能量平衡断裂理论	(46)
7.1 能量释放率	(46)
7.2 G_I 柔度公式	(47)

7.3	G_I 力学标定	(49)
第 8 章	应力强度因子断裂理论	(52)
8.1	平面问题的威斯特噶尔德应力函数法	(52)
8.2	I 型裂纹问题	(54)
8.3	应力强度因子	(60)
8.4	断裂韧度与断裂判据	(62)
8.5	I 型裂纹顶端塑性区及 K_I 修正	(64)
8.6	K_I 与 G_I 的关系	(73)
8.7	II 型、III 型裂纹的应力场及应力强度因子	(75)
第 9 章	COD(开裂)理论	(80)
9.1	大范围屈服	(80)
9.2	裂纹顶端张开位移(COD)	(82)
9.3	δ (COD)判据	(89)
第 10 章	J 积分(启裂)理论	(91)
10.1	J 积分的回路积分	(91)
10.2	J 积分判据	(95)
10.3	J 积分的形变功率	(97)
第 11 章	复合型裂纹脆断理论	(105)
11.1	复合型裂纹问题	(105)
11.2	最大拉应力理论	(106)
11.3	能量释放率理论	(110)
11.4	应变能密度理论	(113)
11.5	近似断裂判据	(116)

疲劳断裂篇

第 12 章	传统疲劳	(118)
12.1	应力-寿命法	(118)
12.2	应变-寿命法	(122)
第 13 章	断裂疲劳	(129)
13.1	疲劳裂纹演化机理	(129)
13.2	疲劳裂纹扩展速率	(135)
13.3	疲劳裂纹扩展寿命	(140)

断裂实践篇

第 14 章	工程应用	(142)
14.1	现代安全设计	(142)
14.2	断裂安全评定	(152)

第 15 章 性能测试	(161)
15.1 试验系统	(161)
15.2 试验项目	(171)
参考文献	(181)

第0章 绪论

断裂尤其疲劳断裂是引起结构(构件)和机械(零件)失效的最主要原因,并且可能造成灾难性事故。在21世纪的今天,人们对传统强度(静载荷作用、无缺陷材料的强度)的认识已相当深刻,工程中强度设计的实践经验与积累也十分丰富,对于传统强度的控制能力也大大增强。因而,疲劳与断裂引起的失效在工程失效中越来越突出。研究材料或结构的断裂机理与规律,控制和减少断裂事故的发生一直是工程技术人员和材料科学工作者的重要课题之一。

材料的断裂是一个很复杂的过程,是材料性质、载荷类型、服役环境、构件尺寸等多种因素共同作用的结果,使得对断裂过程的分析增加了更多的不确定因素,增加了断裂控制的难度。但是随着科学技术的进步与发展,人们对断裂问题认识的加深,断裂控制仍然是有规律可循的。特别是近几十年来对材料断裂问题的研究已经取得令人瞩目的进展,如断裂力学的产生和发展、材料断裂问题微观分析与理论的发展都标志着断裂学科的研究工作进入了一个比较成熟的阶段。

材料的断裂问题涉及范围很广,根据讨论问题的出发点和目的的不同,可分为断裂力学、断裂物理及断裂化学,它们之间的关系如图0-1所示。其中,断裂力学是从客观物体的受力条件出发,分析材料在力的作用下,物体中的应力、应变及材料中的应变能与材料的断裂行为之间的关系,从而建立起断裂判据的一门学科;断裂物理则是从材料本身的结构出发,根据断裂过程中所表现出来的现象,分析与研究不同材料中裂纹产生机理、裂纹扩展规律的物理过程,从而得到裂纹产生与扩展的较为明确的物理图像;断裂化学则是研究各种化学介质对材料断裂过程的作用及影响的一门学科。由此可见,断裂学是一门综合性的边缘学科,本书将以断裂力学为主,而为了更好地理解断裂机理和裂纹扩展,断裂物理的知识也有所涉及。

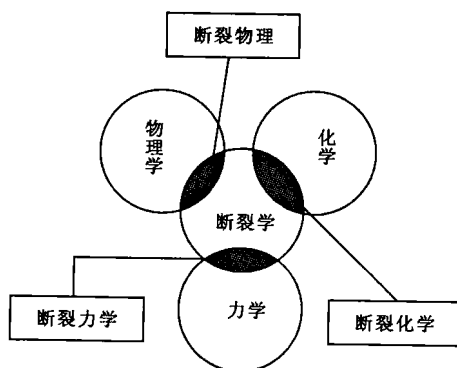


图0-1 断裂学与力学、物理学及化学的关系

断裂力学是研究裂纹体(含裂纹的固体材料或构件)强度与寿命特别是裂纹扩展规律的科学,是固体力学的一门新分支,又称为裂纹力学,与损伤力学为姊妹学科,共称为破坏力学。断

裂力学萌芽于 20 世纪 20 年代格里菲斯(A. A. Griffith)对玻璃低应力脆断的研究,其后,国际上发生了一系列重大低应力脆断灾难性事故,促进了这方面的研究,并于 20 世纪 50 年代开始形成断裂力学。

根据材料断裂的载荷性质,可分为静态断裂力学和动态断裂力学,或称为断裂静力学和断裂动力学,显然断裂静力学是断裂动力学的基础,一般简称为断裂力学。由于研究的尺度、方法和观点不同,断裂力学可分为微观断裂力学和宏观断裂力学。微观断裂力学是研究原子位错等晶粒尺度内的断裂过程,根据对这些过程的了解,建立起支配裂纹扩展和断裂的判据。宏观断裂力学是在不涉及材料内部的断裂机理的条件下,通过连续介质力学分析和试件的试验作出断裂强度的估算与控制。目前宏观断裂力学已有很大发展,而微观断裂力学尚处于初期阶段。根据所研究的裂纹尖端附近材料塑性区的大小,宏观断裂力学又可分为线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学;当然,断裂力学还有其他的分类方法和分支学科,比如近年来将可靠性理论及统计方法与断裂力学的规律、方法等联系起来,出现了概率断裂力学,并应用这种理论和方法进行可靠性设计和寿命预测,成为机械产品可靠性设计的重要方法之一。本书主要介绍宏观断裂(静)力学的理论和方法。

断裂力学的研究对象:裂纹体(含裂纹的固体材料或构件)。

断裂力学的研究目的:主要预防和控制低应力脆性断裂。

断裂力学的研究内容:裂纹的萌生机理、扩展规律、闭合理论以及动态起始与传播-止裂等。

断裂力学的研究任务:求得各类材料的断裂韧度,建立物体的断裂判据,研究裂纹的扩展规律,研究载荷与腐蚀共同作用下的断裂问题等。

断裂力学的研究方法:线弹性断裂力学应用线弹性理论研究物体裂纹扩展规律和断裂准则,可用来解决脆性材料的平面应变断裂问题,适用于大型构件(如发电机转子、接头、车轴等)和脆性材料的断裂分析。实际上,裂纹尖端附近总是存在塑性区,若塑性区很小(如远小于裂纹长度),也可采用线弹性断裂力学方法进行分析;弹塑性断裂力学是应用弹性力学、塑性力学方法研究物体裂纹扩展规律和断裂准则,适用于裂纹体内裂纹尖端附近有较大范围塑性区的情况。由于直接求解裂纹塑性区断裂问题十分困难,通常采用近似或实验方法进行分析。弹塑性断裂力学在焊接结构的缺陷评定、核电工程的安全评定、压力容器和飞行器的断裂控制以及结构物的低周疲劳和蠕变断裂的研究等方面起着重要作用。弹塑性断裂力学的理论至今还不成熟,弹塑性裂纹的扩展规律还有待进一步研究。

断裂力学的研究历程:根据研究断裂问题(包括疲劳断裂)的相关研究背景、研究时间、研究人员、研究成果拟定以下研究历程大事记。

18 世纪 60 年代——第一次工业革命

1842 年——机车事故

1843 年朗肯(W. J. M. Rankine, 英国铁路工程师)——疲劳断裂特征与应力集中危险

1860 年伍勒(A. Woler, 法国)——应力-寿命曲线(疲劳极限)

19 世纪末 20 世纪初——第二次工业革命

1898 年德国 G. 基尔施——首先得出圆孔附近应力集中的结果

1910 年俄国 G. V. 科洛索夫——求出椭圆孔附近应力集中的公式

1910 年巴士坤(O. H. Basquin)——提出了描述 S-N 曲线的经验公式

1912年 TITANIC——举世瞩目的“铁达尼克”号海难事故(断裂沉海)

1913年英格里斯(Ingles)——无限大平板椭圆孔应力分析(奇论:带裂纹的构件根本承受不了任何外载)

1921年英国格里菲斯(Griffith)——裂口断裂理论(玻璃的脆性断裂)

1925年苏联的 N. I. 穆斯赫利什维利等——把复变函数引入弹性力学,用保角变换把一个不规则分段光滑的曲线变换到单位圆上,导出复变函数的应力表达式及其边界条件,进而获得一批应力集中的精确解

1939年威斯特噶尔德(H. M. Westergaard)——表示应力函数的复变函数

1945年前后——大量舰船(金属焊接结构)低应力脆断事故

1947年英国奥罗万(Orowan)——研究并修正裂口断裂理论(金属/塑性功)

1948年美国欧文(Irwin)——研究并修正裂口断裂理论(金属/塑性功)

1953年前后——多架“彗星”号飞机接连失事(疲劳裂纹)

1956年美国欧文——能量平衡断裂理论(能量释放率)

1957年美国欧文——应力场强度因子断裂理论

1960年韦尔斯(Wells)——COD理论(裂纹尖端张开位移)(1965年英国焊接研究所提出判据)

1961年美国帕里斯(Paris),戈麦斯(Gomez)和安德森(Anderson)——疲劳裂纹扩展控制参量(美国波音公司)

1963年帕里斯和埃尔多安(Erdogan)——疲劳裂纹扩展规律(有效应用在疲劳问题的描述)

1968年美国赖斯(Rice)—— J 积分理论(1971年美国电力研究院才提出判据)

20世纪70年代末——动态断裂力学(断裂动力学)

20世纪80年代末——概率断裂力学

20世纪80年代末——损伤力学

断裂力学的研究成果主要有:格氏裂口断裂理论(第6章),能量平衡断裂理论(第7章),应力强度因子断裂理论(第8章),COD(开裂)理论(第9章), J 积分(启裂)理论(第10章),复合型裂纹脆断理论(第11章),断裂疲劳(第13章)。

断裂力学作为一门新兴学科,由于生产实践、工程应用等方面的需要,已成为固体力学的一个重要组成部分,目前广泛应用于航空航天工程、化学工程、机械工程、核电工程、容器管道、土木工程、船舶工程等各个部门和领域。作为一名工程技术人员或高层管理人员,了解甚至掌握断裂与疲劳方面的理论和方法,不仅是学习专业知识的需要,更是提升工程素质的追求。近20年来,我国有不少高校为相关专业的研究生甚至本科生开设断裂力学和材料疲劳的课程。为顺应时代的发展和需要,本书将断裂与疲劳合为一个主题编写,便于高校师生、工程师和科研者参考学习。

断裂基础篇

第1章 强度问题

材料力学是应用弹性力学的分支之一,内容包括研究结构部件在承受各种载荷条件下的力学性能,分析构件的应力、应变和变形,建立验算构件在失效时是否具有足够安全度的方法。构件失效或破坏的形式可表现为产生裂纹、出现超过容许限度的变形、发生屈曲(失稳)等,即谓之结构的强度、刚度、稳定性问题。构件的强度性能和刚度性能均与材料的力学性能(参数),受载状态(静载或动载、瞬时或周期等),环境(温度、湿度与腐蚀)以及构件的几何形状与尺寸、工艺状态(表面光洁度、损伤)等因素有关。材料力学的研究方法是理论分析与实验相结合,所得到的结果可为工程中的结构强度分析与设计提供实用而可靠的理论和方法。

1.1 应力状态

材料力学中需要作应力状态和应变状态分析,实际上强度理论就是如何用材料的单向应力状态的力学性能参数评定一般应力状态的结构失效问题。下面以应力状态分析为主强调一些概念和方法。

1.1.1 外力与应力

使构件发生变形的外部物体作用统称为外力,它包括构件承受的载荷和约束。

1. 载荷

——按载荷性质分类有:拉伸载荷、压缩载荷、剪切载荷。

——按载荷变化分类有:恒载荷和变载荷,变载荷又分为静载荷和动载荷,动载荷又分为冲击载荷和交变载荷。

——按载荷产生分类有:机械载荷、热载荷、电磁载荷等。

——按载荷分布分类有:分布载荷(表面载荷、体积载荷)及集中载荷(集中力、集中力偶矩)等。

——按载荷类型分类有:面力和体力。

2. 约束

力学中通常将物体分为两类:可在空间自由运动的物体称为自由体,运动受到某种限制的物体称为非自由体。工程结构中的构件、机械装置等的零部件多为非自由体。

对于非自由体运动的限制称为约束。约束通常是由非自由体与周围物体相接触而产生

的。周围物体由于约束而施加在非自由体上的力称为约束力,也叫约束反作用力或约束反力。约束力的作用点即在接触点,方向恒与约束阻碍非自由体运动的方向相反,大小则是未知的;要根据平衡条件或动力学方程来确定。

约束力是一种被动力。约束力以外的力称为主动力,亦即能主动引起物体运动或使物体具有运动趋势的力。

构件承载时,支承处受到支座的约束作用称支座约束反力,简称支座反力。

3. 内力

承载构件内部由外力引起的附加相互作用称为内力。根据物体连续性假设,内力在假想截面上是分布的面力,一般情况下它是位置的连续变化函数。

4. 应力

应力是表达截面上任意点的内力强弱和大小的物理量。

应力分为由拉伸载荷引起的拉应力、由压缩载荷引起的压应力和由剪切载荷引起的剪应力。拉应力和压应力都产生在横截面的法线方向上,这种应力通常称为正应力 σ ;而剪应力产生在横截面的切线方向上,通常称为切应力 τ 。

1.1.2 应力状态概念与分类

1. 概念

应力状态:通过受力构件一点各个截面上应力情况的集合,称为该点的应力状态。如图 1-1 所示。

单元体:研究受力构件内一点处的应力状态,可以围绕该点取一个无限小的正六面体,即单元体。若单元体各个面上的应力已知或已计算出,则通过该点的其他任意方位截面上的应力就可用解析法或图解法确定。

主平面:单元体上切应力为零的平面称为主平面,过受力构件内任一点的单元体总有三对相互垂直的主平面。

主应力:主平面上的正应力称为主应力。相应的主应力用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 来表示,它们按代数值的大小顺序排列,即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。 σ_1 是最大主应力, σ_3 是最小主应力,它们分别是过一点的所有截面上正应力中的最大值和最小值。

主方向:主平面的法线方向。

2. 分类

- a. 单向应力状态,只有一个主应力不为零,另两个主应力均为零;
- b. 二向(或平面)应力状态,两个主应力不为零,另一个为零;
- c. 三向(或空间)应力状态,三个主应力都不为零。

单向应力状态又称简单应力状态,二向、三向应力状态合称复杂应力状态。

1.1.3 应力状态分析

1. 平面应力状态分析

在平面应力状态的单元体中,因为有一对主平面上的应力等于零,所以可将单元体用平面图形表示,如图 1-2 所示。

——任意角 α 斜截面上的应力。

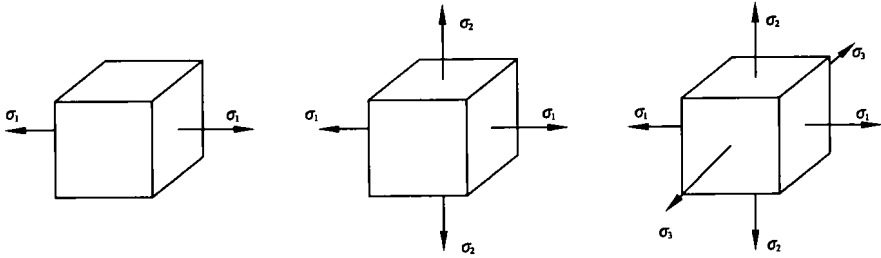


图 1-1 应力状态示意图

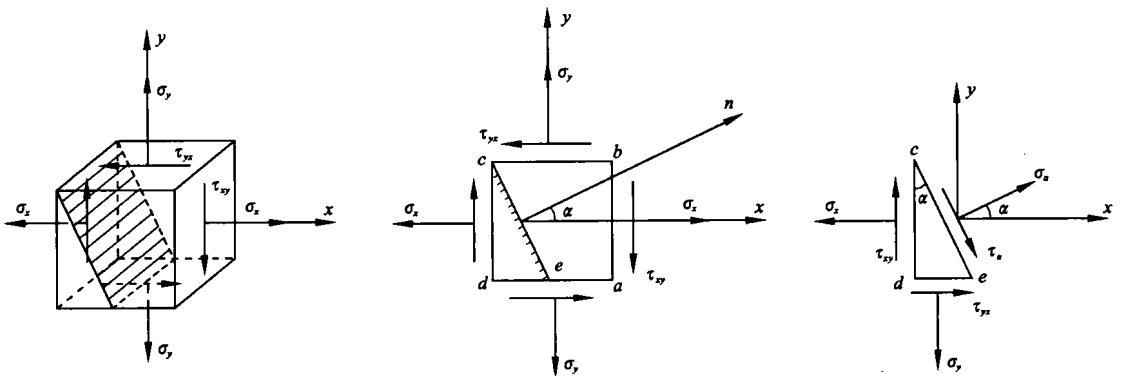


图 1-2 平面应力状态单元体

当已知 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} = \tau_{yx}$ 时,应用截面法,可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\alpha &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \tau_\alpha &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中,正应力以拉应力为正,压应力为负;切应力以对单元体内任意点的矩为顺时针转向为正,反之为负; α 为斜截面外法线与 x 平面外法线即 x 轴间的夹角, α 角从 x 轴量起,反时针转向为正,反之为负。

——主应力。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{aligned} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1-2)$$

式中, σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别表示单元体上垂直于零应力面的所有截面上正应力的最大值和最小值。它们是三个主应力中的两个,而另一个主应力为零。三个主应力 σ_{\max} 、 σ_{\min} 和 0 要按代数值大小排列,分别用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示。

——主平面的方位角 α_0 。

主平面与 x 轴间的夹角 α_0 可按下列式计算

$$\tan 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (1-3)$$

由上式可确定两个主平面的方位角 α_0 和 $\alpha_0 + 90^\circ$,其中当 $\sigma_x \geq \sigma_y$ 时, α_0 主平面上的主应力

为 σ_{\max} , $\alpha_0 + 90^\circ$ 主平面上的主应力为 σ_{\min} ; 当 $\sigma_x < \sigma_y$ 时, α_0 主平面上的主应力为 σ_{\min} , $\alpha_0 + 90^\circ$ 主平面上的主应力为 σ_{\max} 。

2. 三向应力状态

如已知三向应力状态的主应力单元体及主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 , 则有:

- 1) 一点处的最大正应力 $\sigma_{\max} = \sigma_1$;
- 2) 一点处的最大切应力 $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, 其作用面与 σ_2 平行且与 σ_1 、 σ_3 所在主平面夹角各成 45° ;
- 3) 根据 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 作出三个应力圆, 则该点任意斜截面上的应力对应于三个应力圆所围成的阴影区内一点的坐标值, 如图 1-3 所示。

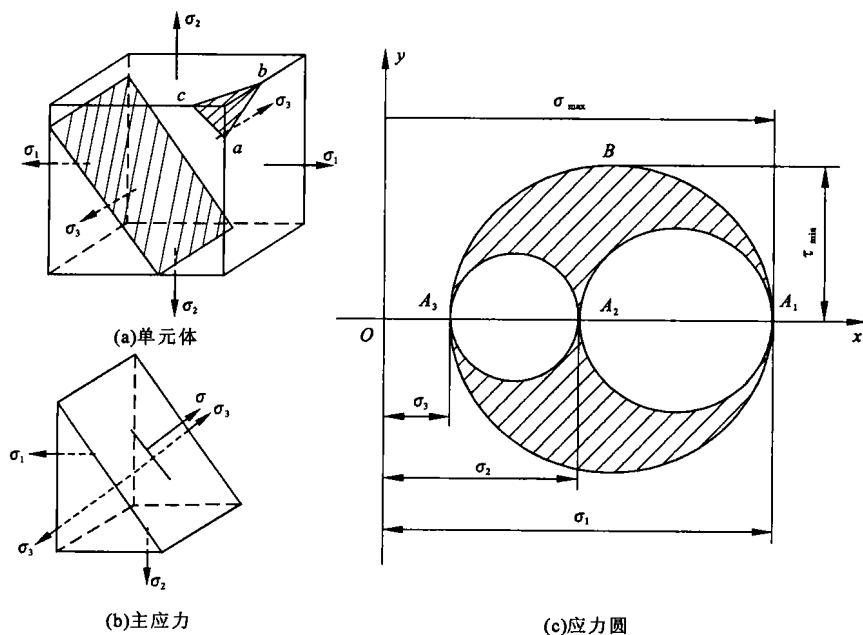


图 1-3 三向应力状态单元体

1.2 强度理论

强度理论有很多种, 现将应用比较多的主要理论介绍如下。

1.2.1 单向应力的静强度指标

1. 屈服极限 σ_s

典型的延性材料具有明显的屈服极限 σ_s 。对于另一些材料如合金钢、有色金属等则不存在明显的屈服极限, 工程上一般规定以残余应变值为 0.2% 所对应点的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服极限, 或称为屈服强度。由于材料的屈服可视为最大剪应力超过材料的某一极限值而引起的, 因此, 延性材料以屈服极限作为静载基准强度。

2. 抗拉强度 σ_b

脆性材料不发生(或很小)塑性变形,没有屈服极限,在经历很小的变形情况下即发生断裂(单向拉伸),因此这类材料在工程上一般以抗拉强度 σ_b 作为静载基准强度。

1.2.2 一般应力状态的强度理论

一般情况下材料所受的应力状态是各种各样的,这时材料的静强度不可能像单向拉伸、压缩或扭转那样可以直接通过简单的试验测定,因此需要根据各种材料性质和不同的破坏形式,对破坏判据提出各种假设,以利用简单的破坏试验建立起适用于各种应力状态下的强度条件,称为强度理论(强度准则)。也就是说,强度理论是关于材料失效现象主要原因的假设,即认为不论是简单应力状态还是复杂应力状态,材料某一类型的破坏是由于某一种因素引起的。据此,可以利用简单应力状态的强度指标,来建立复杂应力状态的强度条件。

下面列出几种经典的或经过改进的强度理论及其适用范围。

1. 脆性断裂的强度理论

——最大拉应力理论(第1强度理论)。

【基本假设】 最大拉应力是引起材料断裂破坏的主要因素。

【断裂准则】 $\sigma_1 = \sigma_b$

【强度条件】 $\sigma_1 \leq [\sigma]$ (1-4)

【适用范围】 该理论适用于铸铁、大理石、混凝土等脆性材料的断裂破坏及三向等应力拉伸状态的延性材料的断裂破坏(即使是延性材料也将在没有塑性变形状态下发生脆性破坏),应用较广。但没有考虑到 σ_2 和 σ_3 对破坏的影响,对没有拉应力的应力状态则无法应用此理论检验其强度。

——最大拉应变理论(第2强度理论)。

【基本假设】 最大拉应变(伸长线应变)是引起材料断裂破坏的主要因素。

【断裂准则】 $\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] = \frac{1}{E}\sigma_b = \epsilon_b$

【强度条件】 $\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]$ (1-5)

【适用范围】 该理论在形式上除了考虑第一主应力 σ_1 外,还考虑了第二、第三主应力的影响。但实践表明,它仅对岩石、合金、铸铁等少数脆性材料在以压应力为主的应力状态下,才与实验结果相符合,目前已很少采用。

2. 塑性屈服的强度理论

——最大切应力理论(第3强度理论)。

【基本假设】 最大切应力是引起材料屈服破坏(塑性流动)的主要因素。

【屈服准则】 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2}\sigma_s = \tau_{13}$

【强度条件】 $\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$ (1-6)

【适用范围】 该理论虽未考虑另两个主剪应力 τ_{23} 、 τ_{12} 的影响,但与材料的试验结果符合较好,它适合于延性材料,如低碳钢、铜、软铝、退火球墨铸铁等;也适用于拉伸时无颈缩现象而剪断的材料。可选用该理论的范围有:单向拉伸、二向应力状态(二向拉伸、一向拉伸一向压缩、二向压缩)和三向压缩状态。按第3强度理论计算出的构件尺寸往往偏于安全。

——畸变能密度理论(第4强度理论)。

【基本假设】 畸变能密度(最大形状改变比能)是引起材料屈服破坏的主要因素。

【屈服准则】
$$u_d = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1+\mu}{6E} (2\sigma_i^2)$$

【强度条件】
$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (1-7)$$

【适用范围】 由于既正确地突出最大剪应力的作用,又考虑了次主剪应力的影响,因此该理论与延性材料的试验结果符合得很好,它与第3强度理论的适用范围相同,在土建工程中(采用第4强度理论较多)和机械工程中(采用第3强度理论较多)得到广泛应用。

3. 统一形式

以上四种强度理论可写成统一形式

$$\sigma_n \leq [\sigma] \quad (i=1,2,3,4 \text{ 表示第 } i \text{ 强度理论}) \quad (1-8)$$

其中, σ_n 称为计算应力,从第1到第4强度理论的次序分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \sigma_1 \\ \sigma_{r2} &= \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \sigma_{r3} &= \sigma_1 - \sigma_3 \\ \sigma_{r4} &= \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

$$[\sigma] \text{ 为许用应力, } [\sigma] = \frac{\sigma_u}{n}, \sigma_u = \begin{cases} \sigma_b \\ \sigma_s \end{cases}$$

n 为安全系数,根据有关技术标准选用。

4. 莫尔强度理论

【基本假设】 以实验资料为基础,考虑了材料拉、压强度的不同,承认最大切应力是引起屈服剪断的主要原因并考虑了剪切面上正应力的影响。

【强度条件】
$$\sigma_1 = \frac{[\sigma_t]}{[\sigma_c]} \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (1-10)$$

【适用范围】 该理论适用于材料抗拉和抗压强度不等的脆性材料,在单向拉伸应力和二向拉伸、一向拉伸和一向压缩等各种二向应力状态均可参考选用。该理论尤其符合脆性材料(如岩石混凝土等)的破坏特点,但未考虑中间主应力 σ_2 的影响是其不足之处。

1.3 强度理论问题

在上面的强度理论中都有强度准则的适用范围,显然,按传统强度理论和强度方法设计并不是万无一失,特别是出现了大量的低应力脆断事故。

1.3.1 低应力脆断事故

1. 工程事故案例

自第二次世界大战以来,随着高强材料和大型结构的广泛应用,一些按传统强度理论和常规设计方法设计、制造并经严格检查合格的产品,都先后发生了不少灾难性断裂事故。例如: