

基于能量耗散的岩石破坏研究 及岩质边坡稳定性分析

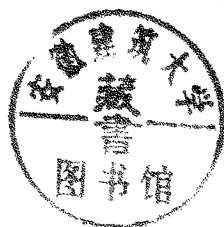
高 玮 著



科学出版社

基于能量耗散的岩石破坏研究 及岩质边坡稳定性分析

高 玮 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面而系统地介绍了作者近年来在岩石破坏理论及岩质边坡稳定分析方面的研究成果,主要从岩石破坏能量方法研究、岩质边坡失稳过程分析及岩质边坡稳定性定性评价三个方面进行研究,提出了基于最小耗能原理的岩石损伤模型及岩石断裂准则,分析了岩石中裂纹扩展的基本过程,在此基础上,从理论上分析了含单裂纹岩质边坡、含双裂纹岩质边坡及多裂纹岩质边坡的失稳过程,并采用数值方法对理论研究进行验证。此外,根据边坡裂纹扩展耗能最小的原理,提出了一种计算多裂纹岩质边坡稳定性的数值方法。最后,基于新型蚁群聚类算法对岩质边坡稳定性定性评价进行研究,提出了一种适用性广泛的工程类比法。

本书可供从事岩石力学、岩质边坡稳定性分析等研究的专业人员及从事边坡工程设计施工的工程技术人员参考,也可以作为岩土工程、水利工程等专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于能量耗散的岩石破坏研究及岩质边坡稳定性分析/高玮著. —北京:科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-055343-0

I. ①基… II. ①高… III. ①岩石破坏机理-研究 ②岩石-边坡稳定性-研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 281193 号

责任编辑:惠 雪 沈 旭 冯 钊/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2018 年 1 月第二次印刷 印张:13 1/2

字数:272 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

岩质边坡与人类生存环境及地质工程活动密切相关,是人类活动中最基本也是极为重要的自然地质环境之一。随着人口的急剧增长和土地资源的过度开发,岩质边坡问题已成为与地震和火山并列的全球性三大地质灾害(源)之一,全世界每年都会因岩质边坡失稳造成巨大的生命和财产损失。我国是一个多山的国家,大约70%的地域为山区,岩质边坡在我国分布相当广泛。受我国西高东低的地势及地质构造格局的影响,岩质边坡主要分布于我国西南地区和西北地区,因此,在“丝绸之路经济带”建设过程中,岩质边坡的失稳问题都是无法回避的现实问题。为了保证“一带一路”倡议的顺利实施,对大型基础工程建设中遇到的岩质边坡失稳问题进行研究具有非常重要的现实意义。实际上,由于边坡岩体是一种经历长期地质作用形成的地质体,各种地质结构对边坡的失稳具有决定性影响。国内外大量工程实践表明,几乎所有的边坡失稳都不是一开始就出现的,通常是工程活动导致边坡体内应力重新分布,使边坡岩体变形在某些结构面或其中的薄弱部位逐渐增长发展,或者地质条件的恶化,导致边坡岩体中的断续结构面不断蠕变、演化,进而造成岩体的宏观断裂并产生新的贯通滑面,最终演变为岩质边坡的整体滑移失稳破坏。实际上,岩质边坡失稳破坏的过程就是边坡岩体整体断裂破坏的过程。研究表明,岩体断裂破坏遵循最小耗能原理,也就是说,其断裂的扩展过程实质是寻找最小耗能路径的过程。因此,本书在综合考虑岩质边坡失稳破坏为边坡岩体断裂破坏本质的基础上,采用岩体断裂破坏的最小耗能原理,提出结合断裂力学理论和最小耗能原理进行岩质边坡失稳破坏研究的新方法。本方法是从裂隙岩质边坡失稳破坏细观机制(内部裂隙开裂、扩展、贯通导致失稳)入手,利用细观力学原理(断裂力学)进行分析而提出的新研究思路,是对岩质边坡失稳破坏分析方法的大胆探索,其研究必将具有重大的理论价值和学术价值。

本书从岩石破坏的能量角度及岩质边坡稳定分析两个角度入手,全面而系统地进行了岩石损伤、断裂及岩质边坡失稳过程的分析,并提出了计算边坡稳定性的定量分析方法和定性分析方法。其主要内容包括:①基于最小耗能原理的基本理论,给出了采用其进行材料破坏研究的基本途径;②基于最小耗能原理,建立了岩石损伤演化的基本方程及其本构模型,并给出了岩石损伤破坏的基本准则;③基于最小耗能原理,建立了岩石断裂破坏力学准则,给出了岩石整体破坏的基本准则;④基于建立的岩石断裂破坏力学准则,研究了岩石内裂纹的开裂、扩展、贯通的全过程,提出了计算压剪作用下岩石裂纹扩展的基本方法,并对多裂纹相互影响下的裂纹扩展进行了研究;⑤在裂纹扩展研究的基础上,考虑复杂环境的影响,提出了化学腐蚀条件下岩石断裂破坏的力学准则,给出了分析化学腐蚀条件下岩石裂纹扩展的基本方法,并通过室内试验结果对理论研究结果的合理性进行了验证;⑥基

于 RFPA 软件对岩石的损伤破坏过程 (包括长方体花岗岩单轴压缩试验及圆柱体花岗岩单轴压缩试验) 进行数值模拟研究, 基于室内试验及数值计算的结果, 建立了两种试验条件下, 岩石的损伤演化方程及其本构模型, 通过比较室内试验、数值计算结果及理论计算结果, 验证了基于能量的岩石损伤演化方程及其本构模型的合理性; ⑦在压剪作用下岩石裂纹扩展研究的基础上, 对岩质边坡内含一条裂纹、两条裂纹及多条裂纹三种情况下, 裂纹扩展导致岩质边坡失稳的过程进行了详细分析, 从理论上研究了岩质边坡内部裂纹扩展对边坡失稳的影响; ⑧基于 RFPA 软件及 FLAC 软件对含裂纹岩质边坡 (包括含一条裂纹、两条裂纹及多条裂纹) 的失稳过程进行了详细的数值模拟研究, 主要分析了裂纹的开裂、扩展、贯通的全过程, 验证了本书理论研究结果的合理性; ⑨基于裂纹扩展遵循能量耗散最小的原则, 在强度折减法的基础上, 通过对 FLAC 软件的二次开发, 提出了一种计算多裂纹条件下岩质边坡稳定性的数值方法, 通过与传统强度折减法及理论计算结果进行比较, 验证了新数值方法的有效性; ⑩在岩质边坡稳定性定性方法机理分析的基础上, 提出了一种进行聚类分析的新方法——筛选蚁群聚类算法, 通过多个典型数据集对新算法的有效性进行了系统研究, 并对其主要控制参数进行了敏感性分析, 以期以后的参数选择提供依据; ⑪基于工程类比的思想, 采用筛选蚁群聚类算法进行了岩质边坡稳定性评价, 提出了一种新的岩质边坡稳定性定性评价方法, 并通过多个边坡工程算例对新方法的工程实用性进行了研究, 验证了新方法解决复杂岩质边坡问题的可行性和有效性。

本书内容主要来源于作者完成的国家自然科学基金项目及最近从事的相关研究, 内容包括曾经指导过的多个研究生的工作, 在此向几位做出贡献的学生杨大勇、王磊、何松晟及张飞君等表示感谢。另外, 书中的少量内容也引用和借鉴了一些前辈的研究成果, 在此也向他们表示谢意。

本书研究内容及出版得到中央高校基本科研业务费项目 (2014B17814、2016B10214) 的资助, 在此表示感谢。

在本书撰写过程中, 贺天阳同学参与了部分图片的编辑工作, 在此表示感谢。另外, 作者的爱人杨荣娟女士也参加了部分输入和编辑工作, 并且在撰写过程中承担了几几乎所有的家务, 省去了作者很多时间, 在此对杨荣娟女士的工作和支持表示衷心的感谢。本书也献给作者的小儿——高杨秦楚, 希望他健康成长。

鉴于作者的水平及认识的局限性, 书中难免存在不妥之处, 欢迎各同行批评指正, 相互交流。作者的联系方式: wgaowh@163.com。

高 玮

2017 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石损伤破坏研究现状	1
1.1.1 材料损伤研究现状	2
1.1.2 损伤演化方程研究现状	4
1.1.3 常用的岩石损伤模型概述	7
1.1.4 目前研究的分析	13
1.2 岩石断裂破坏研究现状	15
1.3 岩质边坡稳定分析研究现状	18
1.3.1 岩质边坡稳定性分析研究历史	20
1.3.2 岩质边坡稳定性分析传统方法研究	21
1.3.3 岩质边坡稳定性分析细观方法研究	24
1.4 本书主要内容	28
参考文献	29
第 2 章 基于最小耗能原理的岩石破坏机理研究	39
2.1 最小耗能原理及其基本方法	39
2.1.1 最小耗能原理介绍	39
2.1.2 最小耗能原理与最小熵产生原理的区别	42
2.1.3 最小耗能原理解决问题的三种途径	43
2.2 基于最小耗能原理的岩石损伤研究	44
2.2.1 基于最小耗能原理的损伤及其本构理论	44
2.2.2 基于最小耗能原理的岩块损伤演变研究	48
2.2.3 三向应力作用下岩石的损伤演化方程	53
2.3 基于最小耗能原理的岩石断裂研究	54
2.3.1 基于最小耗能原理的岩石断裂破坏准则研究	54
2.3.2 基于最小耗能原理的岩石整体破坏准则研究	60
2.4 本章小结	63
参考文献	64
第 3 章 裂纹岩体破坏过程理论研究	66
3.1 一般环境下岩体的破坏过程分析	66
3.1.1 岩石断裂破坏的力学机制	66
3.1.2 压剪作用下岩石裂纹扩展研究	68
3.1.3 岩石断裂过程中裂纹间相互作用分析	73

3.2 复杂环境下岩体的破坏过程分析	81
3.2.1 化学腐蚀环境下岩石的损伤研究	81
3.2.2 化学腐蚀环境下多裂纹岩体破坏的断裂准则研究	84
3.2.3 化学腐蚀环境下多裂纹岩体破裂的试验验证	87
3.3 本章小结	96
参考文献	97
第 4 章 岩石损伤破坏过程的数值模拟研究	99
4.1 RFPA 软件简介	99
4.2 长方体花岗岩单轴压缩试验数值模拟	100
4.2.1 基于最小耗能原理的岩石损伤演变方程	104
4.2.2 与 Mazars 损伤模型的对比研究	106
4.3 圆柱体花岗岩单轴压缩试验数值模拟	110
4.3.1 基于最小耗能原理的岩石损伤演变方程	115
4.3.2 与 Mazars 损伤模型的对比研究	116
4.4 本章小结	119
参考文献	119
第 5 章 岩质边坡稳定性分析	120
5.1 岩质边坡失稳过程理论分析	120
5.1.1 含单裂纹岩质边坡破坏过程分析	120
5.1.2 含双裂纹岩质边坡破坏过程分析	122
5.1.3 含多裂纹岩质边坡破坏过程分析	125
5.2 岩质边坡失稳过程数值模拟	130
5.2.1 基于 RFPA 软件的含裂纹岩质边坡的破坏过程数值模拟	130
5.2.2 基于 FLAC 软件的含裂纹岩质边坡的破坏过程数值模拟	134
5.3 基于能量耗散的岩质边坡稳定分析数值方法研究	151
5.3.1 多裂纹岩质边坡稳定安全系数计算方法	151
5.3.2 工程实例分析	154
5.4 本章小结	167
参考文献	168
第 6 章 岩质边坡稳定分析定性研究	169
6.1 岩质边坡稳定分析定性研究现状	169
6.2 岩质边坡稳定分析定性研究算法	170
6.2.1 标准蚁群聚类算法	170
6.2.2 筛选蚁群聚类算法	172
6.2.3 蚁群聚类算法的数据实例验证	174
6.2.4 蚁群聚类算法的参数敏感性分析	181
6.3 岩质边坡稳定分析定性研究工程应用	189
6.3.1 工程实例一	189

6.3.2 工程实例二	195
6.3.3 工程实例三	199
6.3.4 应用中的相关问题说明	201
6.4 本章小结	203
参考文献	203
索引	207

第1章 绪 论

1.1 岩石损伤破坏研究现状

岩石是一种非均匀的各向异性材料,内含很多天然宏观缺陷,如裂纹、孔隙、节理等^[1]。当这些缺陷存在且材料对缺陷敏感时,材料往往容易发生突然破坏。脆性材料是对缺陷十分敏感的材料,而韧性材料则是对缺陷不敏感的材料。材料是韧性还是脆性,应该根据裂纹扩展前,裂纹尖端是否产生塑性区,以及所产生塑性区的大小而定。脆性材料的裂纹扩展前,裂纹尖端不产生塑性区,脆性材料的断裂表现为突发性,这是最危险的断裂形式。因此,脆性材料在断裂前的微裂纹扩展及汇合阶段所表现的力学行为是我们更关心的。而岩石是一种典型的脆性材料。

试验表明,对于没有宏观裂纹的岩石,其在加载后会有微裂纹产生和发展,微裂纹的尺寸大约与晶粒尺寸同等级,有沿晶破坏和穿晶破坏两种方式。当材料内的应力比较大时,微裂纹的发展方向有一定的规律性,其连通导致岩石突然破坏。对于有宏观裂纹的岩石,其微裂纹网络在加载后从现存的宏观裂纹尖端处发生、发展,并且这些裂纹的扩展不是沿一条轨道进行,随着载荷的增加,微裂纹网络增大,微裂纹的分叉也不断增加,直至破坏。目前针对这种试验现象的描述尚缺乏有效的理论模型来进行解释^[1]。

岩石的非弹性响应十分复杂,表现为金属、合金和聚合物某些不寻常的、非常难以解决的特性。这主要是由存在于材料中的空洞、裂纹、晶粒、胶结、分层等细观结构对材料响应的显著影响引起的。材料的失效过程开始于微裂纹的增长和成核,随后宏观裂纹出现、发展并传播,直至材料的最终开裂。一般来讲,裂纹是由微观孔洞的成核引起或形成的,微观孔洞一般存在于非连续区域或是有微观缺陷的区域。这些内部缺陷的影响或许可以通过把它们划分成单一的有限非连续单元来认识。材料中的缺陷不仅影响裂纹的开裂和材料的最终破坏,而且还造成材料特性的变化,如强度、硬度、韧性、稳定性、频率、使用寿命的降低及应力、应变、动态响应和阻尼比的增加等。岩石内部存在大量的节理和裂隙,虽然这些节理和裂隙的规模不大,但它们的存在大大地改变了岩体的力学性质,降低了变形模量和强度参数,且使岩体呈各向异性,这种情况下,用以往的研究方法已不能很好地解决这些问题^[2]。损伤力学从岩石内部的节理、裂隙着手,分析其各向异性,为解决岩体损伤破坏机理的研究提供了新思路,对解决岩石这类脆性材料的损伤破坏可以起到较好的效果。

1.1.1 材料损伤研究现状

材料的损伤现象一般可由损伤模型来描述, 损伤模型可表示材料性能的变化和损伤的出现、增长、传播及裂纹所造成的材料失效过程。实质上, 损伤力学的基本问题就是如何描述损伤的本质以及如何量化损伤的问题。

一些力学工作者直接采用损伤材料颗粒数和材料总颗粒数的比率作为损伤变量来研究疲劳损伤问题。由于在材料中存在大量各种各样的微孔洞, 所以描述每一个孔洞的几何形状都是非常困难的。因此, 很多力学工作者试图提出一个抽象的损伤变量来从现象上描述材料中的各种微观缺陷, 这个损伤变量可以是标量, 也可以是矢量或张量^[2]。从热力学的观点来看, 损伤变量必须能体现材料中微观结构变化的不可逆性。因此, 损伤是一个内变量, 它必须是材料性能、荷载、温度等的函数。并且, 这个内变量也必须能描述损伤的增长和传播过程。

选择损伤变量不是一件容易的事。它可以由微观结构分析来确定, 也可以由试验数据直接产生。为了能在不可逆的热力学过程中模拟损伤, 引入连续损伤力学的变量来表示 (表 1.1)。

表 1.1 外部状态变量、内部状态变量和相关变量

外部状态变量	内部状态变量	相关变量
弹性应变张量 ϵ_e		应力张量 σ
温度 T		熵 S
	损伤累积残余应变 γ	应变硬化变量 R
	损伤变量 D	损伤应变能量释放率 Y

损伤变量可根据材料的不同现象来定义。例如, Kachanov^[3]和 Lemaitre^[4,5]及 Chaboche^[6]采用有效应力 (实际应力或净应力) 定义损伤变量; Rousselier^[7]采用损伤材料的质量密度来定义损伤变量。

Lemaitre^[5,8]根据弹性模量的比值给出的损伤变量表达式是目前关于损伤变量最经典的定义, 其定义可以表示为式 (1.1)。一般情况下, 根据该定义可以发展出损伤变量的其他定义。

$$D = 1 - \frac{E^*}{E} \quad (1.1)$$

式中, E^* 为损伤材料的有效杨氏弹性模量; D 为损伤变量; E 为无损伤材料的弹性模量。

很多力学工作者也采用损伤变量是裂纹和孔洞的表面密度的定义^[2], 这个定义可表示为

$$D = 1 - \frac{A^*}{A} \quad (1.2)$$

式中, A^* 为材料的“有效”面积; A 为材料的未受伤面积。

然而, 在各向异性损伤情况下, 直接应用等效应变假设不能令人满意。因此, 需要一个不同的应变能等效方法。根据应变能等效假设^[9], 各向异性损伤参数可以由杨氏弹性模量定义如下:

$$D_i = 1 - \sqrt{\frac{E^*}{E}} \quad (1.3)$$

陈德华和席道瑛^[10]认为, 损伤的测量是损伤情况下和未发生损伤情况下应变值的比率, 从而给出了如下的定义:

$$D = 1 - \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \quad (1.4)$$

Rousselier^[7]认为, 损伤变量可由材料的质量密度来度量, 损伤材料的质量密度 ρ^* 一定低于未损伤情况下的初始密度 ρ_0 。于是, 损伤变量可定义为

$$D = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_0} \quad (1.5)$$

必须指出的是, Rousselier 考虑的损伤表现为损伤材料的质量密度 ρ^* 低于无损的质量密度 ρ_0 , 这属于宏观的体积膨胀现象。由于塑性损伤和延性断裂往往发生在塑性变形较大的情况下, 可见, 只有在大塑性变形情况下, 这个定义才是有效的。因此, 这个定义仅仅适用于有限变形的损伤理论。另外, Rousselier 损伤模型提供的塑性势与正交理论相耦合。该定义的缺点是, 用材料的质量密度定义损伤给损伤的测量带来了一定的困难。

在 Kachanov^[3]的先期工作之后, 损伤力学首先进入了一维损伤问题的研究阶段。在那种情况下, 标量形式的损伤变量是足够的。从而在材料中损伤是各向同性的假设下, 很多力学工作者采用标量形式的参数来表示损伤变量。

几何模型中第二方向和第三方向的引进, 明显地体现出标量形式损伤变量的局限性。从严格意义上讲, 仅在材料中球状孔洞或微裂纹的分布是严格随机分布的特殊情况下, 标量形式的损伤模型才能适用^[11]。在其他情况下, 微裂纹分布不规则的本质使得学者对标量损伤模型的应用产生了怀疑, 尽管它的应用非常简单^[12]。有趣的是, 大部分微裂纹的损伤表述仍然保留着 Kachanov 采用孔洞面积密度来衡量损伤的原始定义^[3]。因此, 在最简单的情况下, 损伤方程通常被看作标量方程, 但是在比较复杂的各向异性损伤情况下, 损伤方程必须是矢量方程或张量方程。例如, 对于各向异性介质, 损伤变量^[13]必须表示为一系列的状态变量, 即张量方程。

Lemaitre^[5]指出: 在宏观水平和微观水平之间, 应变行为存在一个宏观尺度的连续方程。连续损伤力学倾向于在宏观尺度内将损伤变量定义为平面内裂纹的有效表面密度, 由此, 在宏观尺度内, 损伤变量可引入到有效应力的概念当中。这

个有效应力的概念首先是由 Kachanov 引进的,这是连续损伤力学的起点,之后被 Lemaitre^[8]引入到金属的低周疲劳损伤的研究中,被 Chaboche^[14]引入到高周疲劳问题的研究中,被 Hult^[15]引入到损伤和循环疲劳问题的研究中,被 Lemaitre^[4,5]引入到蠕变和疲劳相互作用问题的研究中。近年来,不可逆过程的热动力学研究为连续损伤力学发展为一套成熟的理论提供了必需的科学依据。这些模型都在热力学的理论框架内,并且为以弹性和塑性相耦合来识别损伤提供了可能。

为了考察裂纹从微观开裂到宏观开裂的发展过程,必须把损伤力学和断裂力学结合起来进行研究。对于损伤发展理论,必须准确地知道损伤过程的极限状态是什么。基于目前连续损伤力学的发展水平,损伤过程的极限状态通常对应于宏观裂纹的发生,这就是所谓连续体单元的“开裂”。由于裂纹的发生呈现出很强的随意性,特别是在疲劳问题中,因此,微观结构中新成核的裂纹和短裂纹显现出复杂的相互作用^[16]。

实际上,在断裂力学理论框架内,宏观裂缝的概念中一般假设材料中的缺陷与微观杂质相比是足够大的。为了在大小、几何形状和方向上显示出足够的宏观同质性,必须假定主宏观裂缝应经过一定的材料颗粒。

随着损伤的发展,材料可能逐步变为各向异性。根据这个事实,损伤可以用一个四阶对称张量来描述,该张量与弹性系数张量相对应,并且包含 21 个独立的分量^[13]。在各向异性损伤模型中,净应力或有效应力张量是非对称的,这使对该张量转置、求逆非常困难。为了简化这样的非对称性,一些力学工作者建议运用一些对称化处理技术,这些处理技术尽管提供了很多数学运算上的便利,但由于其没有物理依据,处理后的模型可能添加了原先并不存在的一些新的材料特性,也可能会丢失对称化处理前应存在的一些材料特性。这样随意的处理在实际工程中可能产生一些具有欺骗性的分析结果。因此, Valliappan 等^[9]提出了一个非对称的各向异性损伤模型。文献^[16]通过推导各向异性损伤模型的各个关键参数,对对称化技术的影响做了评估。研究发现,在大多数情况下,对称化处理明显地影响了损伤模型的参数,这可能会产生一些不可信的结果。因此,在各向异性损伤模型中,应慎用对称化处理技术。

对于岩石工程问题,各向异性损伤力学的概念已被很多力学研究者成功地运用,如张我华等^[16]发展了一种评估岩体随机各向异性损伤状态的方法,并把它应用到随机损伤问题的随机有限元分析当中。

1.1.2 损伤演化方程研究现状

1.1.2.1 国外研究状况

1958 年, Kachanov^[3]在研究金属蠕变时引入了连续性因子和有效应力的概念,

其定义为材料横截面积上的有效承载面积与总面积之比,并给出了连续度的演化方程

$$\dot{\psi} = B \left(\frac{\sigma}{\psi} \right)^V = B \bar{\sigma}^V \quad (1.6)$$

式中,字母符号上方的 $\cdot$ 表示关于时间的导数; B 和 V 为材料参数; σ 为Cauchy应力; $\bar{\sigma} = \sigma/\psi$ 称为净应力。

1969年,Rabotnov^[17]又定义了损伤因子 $\omega = 1 - \psi$ 的概念,建立了如下的耦合损伤本构方程和损伤演化方程:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}^c = A \frac{\sigma^n}{(1-\omega)^m} \\ \dot{\omega} = B \frac{\sigma^v}{(1-\omega)^\mu} \end{cases} \quad (1.7)$$

式中, ϵ^c 为蠕变应变; A, B, m, n, v 和 μ 为材料参数。

Kachanov和Rabotnov工作的重要意义在于,通过引入一个简单的连续介质内变量成为损伤变量来表征材料中复杂的、离散的损伤劣化过程,并建立了本构关系,从而奠定了损伤力学的基础。此后,Hult^[15]进一步发展明确了损伤的概念。

以Lemaitre、Chaboche、Hult、Krajcinovic和Rousselier等为代表的一大批学者,针对损伤力学的基本概念、方法等做了大量开创性的工作,这不仅使其框架渐渐明晰充实,而且还把它的适用范围从最初的蠕变损伤推广到对弹性、塑性、黏弹性、脆性及疲劳等损伤现象的分析;而其所描述的材料,也从金属扩展到复合材料、陶瓷、混凝土等非金属材料,并相继建立了各向同性或各向异性的连续损伤模型,为连续损伤力学发展做出了重要的贡献。

20世纪70~80年代,Lemaitre等提出了两类损伤机制,一类是微裂纹的形成、扩展和汇合,最后形成宏观裂纹,这类损伤不引起明显的塑性变形,因而称为脆性损伤机制;另一类是微孔洞的成核、长大和汇合,由于这类损伤往往伴随着显著的塑性变形,因此称为韧性损伤机制。Lemaitre等的研究表明,这两类机制在不同的材料细观结构及不同的加载条件下所表现出的性质会有很大差别,因此从载荷模式和材料的宏观响应来讲,损伤又可以分为弹脆性损伤、弹塑性损伤、疲劳损伤、蠕变损伤、冲击损伤等多种。针对各种各样的损伤,力学家们提出了一维、三维各向同性损伤理论、各向异性损伤理论、基于细观力学的损伤理论、考虑断裂的损伤耦合理论^[2,5,8]等。

另外,Eshelby、Hill和Rice等的出色工作使得细观损伤力学得以蓬勃发展。细观损伤力学是从材料的细观结构出发,对不同的损伤机制加以区分,通过对细观结构变化的物理过程的研究来了解材料破坏的本质和规律,并借助一定的平均化

方法导出材料的宏观性质。因此,揭示各种工程材料的宏观行为与细观结构及其演化之间的关系是细观损伤力学的基本任务。细观损伤力学的主要研究范围为材料细观结构,如微裂纹、微孔洞、剪切带、晶界等的损伤演化过程。它一方面忽略了损伤过于复杂的微观物理过程,避免了微观统计力学的烦琐计算;另一方面又包含了不同材料的细观几何特征,为损伤变量和损伤演化方程的建立提供了一定的物理背景。

最典型和最成功的细观损伤模型是 Gurson 模型^[18]。1975 年, Gurson 在 Rice 等工作的基础上发展了一套比较完整的本构方程,用以描述微孔洞损伤对材料塑性变形行为的影响。与其他连续损伤模型相比,该模型具有以下特点。

Gurson 模型的损伤变量即孔洞体积百分比有清晰的几何意义和明确的物理内涵;以往的唯象损伤模型,如 Lemaitre 损伤理论认为材料的损伤与弹性模量 E 相关,而该模型认为损伤主要与基体材料的塑性变形相关;该模型提供了一套完整的韧性损伤本构方程;该模型发展了一种考虑细观参量的唯象物理模型,突破了经典方法中无限大基体的限制,更好地反映了材料的细观结构;该模型同时考虑了微孔洞的成核和长大过程。在 Gurson 模型^[18]建立后的几十年时间里,这一模型得到了广泛应用,并与有限元计算相结合,取得了一些重要的研究成果^[2]。

1.1.2.2 国内研究状况

国内损伤力学的研究起步较晚,但发展迅速。谢里阳和于凡^[19]通过对疲劳过程和疲劳失效临界状态的分析,提出疲劳失效判据应与损伤程度和应力水平两个因素有关,并在试验的基础上分析了损伤临界值与循环应力水平之间的关系,给出了疲劳损伤临界值的范围为 0.4~0.8。

李灏^[20]等提出含有各向异性损伤的内时损伤理论,该理论以 Valanis 理论为基础,将材料里任意一点的即时应力状态当作该点近旁形变和温度整个历史的泛函,由此克服了 Lemaitre 等基于不可逆热力学理论建立各向异性理论的困难。

余寿文和冯西桥^[13]提出了脆性材料的微裂纹扩展区损伤模型。该模型认为,在诸如岩石、混凝土等脆性材料中弥散的微裂纹及其形成扩展和汇合将对材料的力学性质发生显著的影响,可以导致材料的逐渐劣化直至最后断裂。所谓微裂纹扩展区是指经过加载后,发生扩展的所有微裂纹在取向空间中所占的范围,由一个区域或多个区域的并集组成。换言之,经过一定的加载路径后,法向矢量位于微裂纹扩展区的所有微裂纹都已经发生了扩展。利用这个概念,可以更准确地描述微裂纹的损伤状态,并且能够解决任意复杂加载路径下的损伤和本构响应问题,从而建立起一套比较完整的脆性材料细观损伤模型。

此外,张行和赵军^[21]发展了疲劳损伤本构关系,指出了现行做法中将损伤演化与塑性流动完全耦合的不妥之处,提出独立于塑性流动势函数之外的损伤势函

数,使疲劳损伤本构关系的理论更为合理与系统。同时,他们还提出了描述各向异性的微结构力学模型。谢兴华等^[22]研究了损伤力学运用于岩体的问题,从微观及宏观两方面对岩体损伤的意义及性质做了阐述。

1.1.3 常用的岩石损伤模型概述

常用的岩石损伤模型目前主要有 Loland 损伤模型^[23]、Mazars 损伤模型^[24]、Sidoroff 损伤模型^[25,26]、分段曲线损伤模型^[13]。这四种模型都是通过研究岩石类材料的破坏行为得出的结果,其研究方法都是参照试验得出的应力与应变关系曲线,将曲线划分为两个阶段,即应力峰值以前和峰值以后。对应于这两个阶段,损伤的扩展分为两个区域,每个区域内的损伤扩展用不同的函数模拟。以下对这几种主要的模型进行阐述。

1.1.3.1 Loland 损伤模型

Loland 损伤模型认为当应力接近峰值时,应力与应变关系曲线已偏离直线,这意味着应力达到最大值以前,材料中已经发生了连续损伤。在 Loland 损伤模型中将这种材料的损伤分为两个阶段,第一阶段是在应力达到峰值之前,即当应变小于峰值应力对应的应变 ε_p 时,在整个材料中发生的微裂纹损伤;第二阶段是当应变大于 ε_p 时,损伤主要发生在破坏区内。

由此,可得到如下的损伤演变方程:

$$\begin{cases} D = D_0 + C_1 \varepsilon^\beta, & \varepsilon < \varepsilon_p \\ D = D_{\varepsilon_p} + C_2(\varepsilon - \varepsilon_p) = D_0 + C_1 \varepsilon_c^\beta + C_2(\varepsilon - \varepsilon_c), & \varepsilon_p \leq \varepsilon < \varepsilon_\mu \end{cases} \quad (1.8)$$

由边界条件: $\sigma|_{\varepsilon=\varepsilon_p} = \sigma_p$ 、 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}|_{\varepsilon=\varepsilon_p} = 0$ 、 $D|_{\varepsilon=\varepsilon_p} = 1$ 可以得出常数 β 、 C_1 、 C_2 如下

$$\begin{cases} \beta = \frac{\sigma_p}{E\varepsilon_p - \sigma_p} \\ C_1 = \frac{1 - D_0}{1 + \beta} \varepsilon_p \\ C_2 = \frac{1 - D_{\varepsilon_p}}{\varepsilon_\mu \varepsilon_p} \end{cases} \quad (1.9)$$

由 Loland 损伤模型模拟的应力与应变关系曲线以及损伤变量 D 与应变 ε 的关系如图 1.1 及图 1.2 所示。

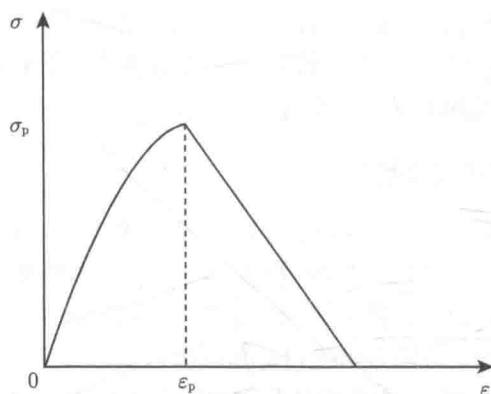


图 1.1 Loland 损伤模型中应力与应变关系曲线

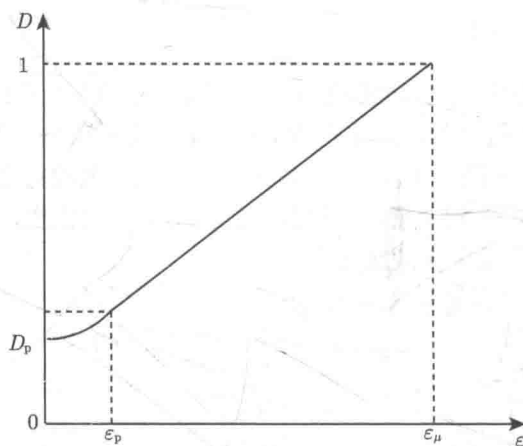


图 1.2 Loland 损伤模型中损伤与应变关系曲线

1.1.3.2 Mazars 损伤模型

Mazars 损伤模型认为, 岩石类脆性材料的应力应变关系曲线一般可以分为线弹性、非线性强化、应力跌落和应变软化等阶段。而且, 试验中得到的这种应力应变关系曲线通常还与试验机的刚度、加载方式等有关。为此, Mazars 损伤模型将脆性材料的压缩应力应变关系分两段描述, 在应力达到峰值强度之前即使有损伤, 也由于 σ - ε 曲线的变化与直线偏差不大而认为是线性的。设 ε_p 是损伤开始时的应变, 也是峰值应力 σ_p 对应的应变, 当 $\varepsilon \leq \varepsilon_p$ 时, 认为材料无损伤, 即 $D = 0$; 当 $\varepsilon > \varepsilon_p$ 时, Mazars 损伤模型假设应变增加按指数函数下降, 它对应于宏观裂缝的形成及快速失稳破坏, 刚度急剧下降, 材料有损伤, 即 $D > 0$ 。

Mazars 损伤模型通过拟合的应力应变关系建立了单轴压缩时的损伤本构

关系:

$$\begin{cases} \sigma = E_0 \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma = E_0 \left[\frac{\varepsilon_c(1 - A_c)}{-\sqrt{2}\gamma} + \frac{A_c \varepsilon}{\exp[B_c(-\sqrt{2}\mu\varepsilon - \varepsilon_p)]} \right], & \varepsilon > \varepsilon_p \end{cases} \quad (1.10)$$

式中, A_c , B_c 表示单轴压缩时的材料常数。

$$\begin{cases} D = 0, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ D = 1 - \frac{\varepsilon_c(1 - A_T)}{\varepsilon} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\varepsilon - \varepsilon_c)]}, & \varepsilon > \varepsilon_p \end{cases} \quad (1.11)$$

由式 (1.10) 和式 (1.11) 可得 Mazars 损伤模型中的名义应力 σ 和损伤变量 D 随应变 ε 的变化曲线, 如图 1.3 和图 1.4 所示。

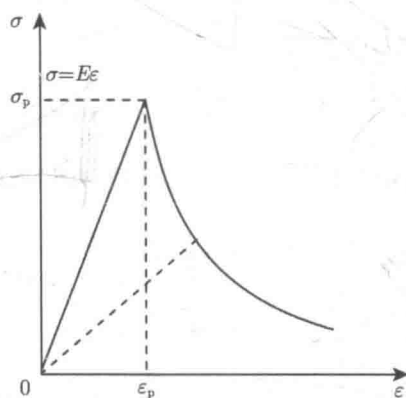


图 1.3 Mazars 损伤模型中应力与应变关系曲线

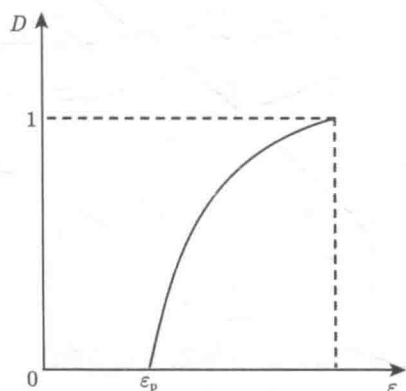


图 1.4 Mazars 损伤模型中损伤与应变关系曲线