

岩土多场多尺度力学丛书

多尺度岩石损伤力学

Multiscale Rock Damage Mechanics

朱其志 著



科学出版社

岩土多场多尺度力学丛书

多尺度岩石损伤力学

朱其志 著

科学出版社

内 容 简 介

多尺度本构建模基于材料微观尺度的结构特征和力学特性,旨在建立能够反映细观力学损伤和破坏机制的本构关系.多尺度岩石损伤力学研究相较于传统的宏观唯象模型具有明显的优势,本构理论和工程应用方面的研究成果引起了国内外学者的广泛关注.

本书将复合材料细观力学的研究成果用于裂隙岩石非线性本构关系研究,围绕裂隙发展引起的材料力学性能劣化和裂隙摩擦滑移引起的非线性变形两种能量耗散机制,进行了深入系统的理论分析.内容涉及裂隙岩石有效弹性特性、裂隙单边接触效应、岩石衍生型各向异性、损伤摩擦耦合行为、细观力学强度准则、应力应变方程解析解、水力耦合本构关系、时效损伤与变形、强耦合问题数值算法和程序研制等.

本书可作为高等院校和科研院所相关专业研究生的学习用书,也可作为固体材料本构关系研究提供一定的参考.

图书在版编目(CIP)数据

多尺度岩石损伤力学/朱其志著. —北京: 科学出版社, 2019.3
(岩土多场多尺度力学丛书)

ISBN 978-7-03-060689-1

I. ①多… II. ①朱… III. ①岩石力学-损伤(力学)-研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 039328 号

责任编辑: 惠 雪 高慧元 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 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>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 300 000

定价: 119.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“岩土多场多尺度力学丛书”编委会

名誉主编：陈祖煜 何满潮 赖远明

主 编：邵建富 周 辉

副 主 编：朱其志 陈卫忠

编 委：(按姓氏笔画排序)

马国伟	井兰如	韦昌富	田 斌	冯夏庭	朱合华	刘继山
刘德富	杜修力	李世海	李术才	李海波	杨 强	吴 伟
吴智深	张东晓	张春生	周创兵	周锦添	侯正猛	姚 军
姚仰平	徐卫亚	殷建华	唐春安	唐辉明	盛 谦	崔玉军
梁 冰	蒋宇静	蒋明镜	蔡 明	潘一山		

“岩土多场多尺度力学丛书”序

为了适应我国社会、经济与科技的快速发展,深部石油、煤炭和天然气等资源的开采,水电工程 300m 级高坝、深埋隧洞的建设,高放核废料的深地处置、高能物理的深部探测等一系列关乎国计民生、经济命脉和科技制高点的重大基础设施建设正紧锣密鼓地开展。随着埋深的增大,岩土工程建设中的多场(地应力、动载、渗流、温度、化学条件等)耦合效应与多尺度(微观、细观、宏观及工程尺度)特性更加突出和复杂。例如,天然岩体是完整岩石与不同尺度的节理/裂隙等不连续系统组成的复合介质,具有非均匀性、非连续性、非弹性等特性,其力学行为具有显著的多尺度特性。岩石的微观结构、微裂纹之间的相互作用、孔隙和矿物夹杂均影响着岩石细观裂隙系统的演化,而裂隙的扩展和贯通与宏观上岩石的损伤和破坏密切相关,也决定了工程尺度上的岩体稳定性与结构安全性。因此,研究岩土多尺度力学特性不仅对岩土工程建设至关重要,同时可以促进岩土力学研究向理论化与定量化方向发展。近年来,岩土微观与细观实验技术与几何描述方法、细观力学损伤模拟方法、从细观到宏观的损伤模拟方法等细-宏观等效研究方法已基本确立了细观到宏观尺度上的沟通桥梁。但这还不够,建立微观-细观-宏观-工程尺度上系统的分析方法才能全面地处理好工程建设中复杂的岩土力学问题。大型岩土工程建设还普遍涉及复杂赋存环境下岩土体的应力和变形、地下水和其他流体在岩土介质中的运动、地温及化学效应直接或间接的相互作用及相互影响。以岩土渗流与变形耦合作用为例,渗流是导致岩土介质及工程构筑物发生变形和破坏的重要诱因,国内外因渗控系统失效导致的水库渗漏、大坝失稳与溃决、隧洞突涌水等工程事故屡见不鲜。渗透特性具有非均匀性、各向异性、多尺度特性和演化特性等基本特征,揭示岩土体渗流特性的时空演化规律是岩土体渗流分析的基础,也是岩土工程渗流控制的关键问题。因此,对于处于复杂地质条件和工程环境中的岩土体,揭示其多场耦合条件下多尺度变形破坏机理、流体运移特征、结构稳定性状态及其演化规律是保证岩土工程安全建设与运行的重中之重。

近年来,岩土多场多尺度力学研究领域成果丰富,汇聚了 973、863、国家自然科学基金项目以及其他重大科技项目的科研成果,试验和理论研究成果也被进一

步广泛应用于重大水利水电工程、核废料处置工程及其他工程领域中,取得了显著的社会效益和经济效益.在此过程中,我们也欣喜地看到,岩土多尺度、多场耦合理论体系在与工程地质、固体力学、流体力学、化学与环境、工程技术、计算机技术、材料科学、测绘与遥感技术、理论物理学等多学科不断融合的基础上日趋完善.更振奋人心的是,越来越多的中青年学者不断投身其中,推动该研究领域呈现出生机勃勃的发展态势.“岩土多场多尺度力学丛书”旨在推介和出版上述领域的相关科研成果,推进岩土多场多尺度力学理论体系不断发展和完善,值得期待!

“岩土多场多尺度力学丛书”涉及近年来在该领域取得的创新性研究成果,包括岩土力学多场多尺度耦合基础理论、多场多尺度岩土力学数值计算方法及工程应用、岩土材料微观细观宏观多尺度物理力学性能研究、岩土材料在多场耦合条件下的理论模型、岩土工程多场耦合计算分析研究、多场耦合环境下岩土力学试验技术与方法研究、复杂岩土工程在多场耦合条件下的变形机制分析以及多尺度、多场耦合环境下的灾害机制分析等方面的内容.

相信在“岩土多场多尺度力学丛书”的各位编委和全体作者的共同努力下,这套丛书能够不断推动岩土力学多场耦合和多尺度分析理论和方法的完善,全面、系统地为我国重大岩土工程解决“疑难杂症”.



2018 年 11 月

前 言

作为天然非均质材料,岩石有其细观结构特征和局部力学特性,而复杂地质环境必然赋予岩体复杂多场耦合行为.在构建岩石本构关系时,我们总是希望能够更多地考虑岩石作为固体材料的本质特性,用最少的方程体现尽可能多的材料损伤和变形机理、破坏机制和多场耦合过程,总是希望本构方程包含尽可能少的模型参数,数值程序研制简单、收敛性好.多尺度岩石损伤力学研究通过理性方式回应上述期待,已有成果令人鼓舞,前景可期.

在法国高等教育与科研部的资助下,作者有幸以准脆性材料细观损伤力学为博士研究课题,并走上学术之路.十多年来,虽受限于专业背景、知识结构和个人能力,却也潜心研究,笔耕不辍.然研究体会日深,前行难度愈大,迫切期待更多的青年同行关注和从事岩石多尺度本构关系研究.将现有成果加以整理和介绍不失为一个好的方法,于是便成此拙著.

全书分为三篇,内容衔接紧凑.第一篇介绍张量运算、不可逆热力学原理、连续损伤力学理论等基础知识;第二篇介绍基于均匀化方法的各向异性岩石损伤本构理论,涉及衍生各向异性、单边接触效应、损伤摩擦耦合分析、细观力学强度准则、水力耦合效应等岩石力学本构研究的基本内容;第三篇介绍各向同性简化下的塑性损伤耦合分析,涉及本构方程解析解、收敛数值算法、强度准则、时效变形和损伤等.

全书内容围绕岩石裂隙扩展这一关键科学问题,写作过程遵循以下原则.

(1) 理论严谨.尽可能完整地介绍多尺度各向异性损伤本构关系的构建过程,以张量为基本工具,理论推导力求简洁,避免大量使用数值模拟算例.

(2) 机理明确.用细观力学方法研究岩石力学问题,充分体现岩石非线性变形、渐进损伤和破坏过程涉及的主要力学机理和机制,避免追求拟合效果而随意引入经验公式.

(3) 框架统一.将非均质材料均匀化方法与基于内变量的不可逆热力学原理相结合,在同一理论框架下研究裂隙损伤问题、闭合裂隙摩擦滑移问题、水力耦合问题以及瞬时损伤和时效损伤行为,为进一步开展热力耦合和热水力三场耦合研究

奠定基础.

本书涉及的研究工作得到了法国高等教育与科研部博士研究基金项目、中国国家自然科学基金青年项目 (11202063) 和面上项目 (51679068)、国家“青年千人计划”和江苏省“双创计划”等项目的支持. 法国里尔大学邵建富特级教授与法国皮埃尔和玛丽·居里大学 (巴黎第六大学) Djimédo Kondo 教授给予了作者长期的关心和指导, 博士研究生赵伦洋参加了近期研究工作, 博士研究生尤涛对书中的部分插图进行了文字处理, 河海大学岩土工程学科对本书的出版提供了经费支持, 在此一并表示衷心的感谢. 同时, 对科学出版社有关编辑的辛勤付出, 对在写作过程中参考的国内外文献作者一并表示感谢. 特别感谢家人和朋友在本人的学习、工作中长期给予的关心和支持, 对在成书过程中对孩子的疏于陪伴深感歉意.

岩石力学、连续损伤力学和复合材料力学等领域的研究内容非常丰富, 限于作者的学识和水平, 书中难免存在疏漏之处, 恳请读者和学界同行不吝指出.

作 者

2018 年 9 月于南京清凉山麓

参数符号表

第一类：张量及其运算符号

a	标量
$\boldsymbol{a}$	向量, 即一阶张量
$\boldsymbol{e}_i, i = 1, 2, 3$	笛卡儿坐标系中的单位向量基
$\boldsymbol{A}$	二阶张量
$\text{tr}(\boldsymbol{A})$	二阶张量 $\boldsymbol{A}$ 的迹
$\boldsymbol{A}^{-1}$	表示张量 $\boldsymbol{A}$ 求逆
$\mathbb{A}$	四阶张量
$\mathbb{E}^i, i = 1, 2, \cdots, 6$	Walpole 四阶方向张量基
$\cdot$	张量间的点积
$:$	张量间的双重点积或双点积
$\otimes$	张量积 (tensor product) 或并矢积 (dyadic product)
$\otimes^s$	对称化张量积
δ	$\delta_{ij} = \boldsymbol{e}_i \cdot \boldsymbol{e}_j$ 表示二阶对称单位张量, 也称为置换张量
$\mathbb{I}$	$I_{ijkl} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$ 四阶对称单位张量
$\mathbb{J}$	$= \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}$
$\mathbb{K}$	$= \mathbb{I} - \mathbb{J}$, 四阶各向同性张量算子
$(\boldsymbol{a} \otimes \boldsymbol{b})_{ij}$	$= a_i b_j$
$(\boldsymbol{a} \otimes^s \boldsymbol{b})_{ij}$	$= \frac{1}{2}(a_i b_j + a_j b_i)$
$(\mathbb{A} : \boldsymbol{B})_{ij}$	$= A_{ijkl} B_{kl}$

第二类：适用于各个章节的变量

$\boldsymbol{n}$	单位方向向量
$\boldsymbol{u}$	位移向量
$\boldsymbol{\varepsilon}$	宏观应变张量

ε_1 、 ε_2 和 ε_3	分别为大主应变、中间主应变和小主应变
ε^e	宏观弹性应变张量
ε^p	宏观塑性应变 (非弹性应变) 张量
σ	宏观应力张量
σ_1 、 σ_2 和 σ_3	分别表示大主应力、中间主应力和小主应力
d	各向同性标量损伤变量
s	$= \sigma : \mathbb{K}$ 表示应力偏张量
p	$= \sigma : \delta / 3$ 表示平均应力, 并且 $p\delta = \sigma : \mathbb{J}$ 表示应力球张量
$\mathbb{C}^0$	岩石基质的四阶弹性张量
$\mathbb{S}^0$	$= (\mathbb{C}^0)^{-1}$ 岩石基质的四阶柔度张量
E_0	各向同性岩石基质的杨氏模量
ν_0	各向同性岩石基质的泊松比
μ_0	各向同性岩石基质的剪切模量
k_0	各向同性岩石基质的体积压缩模量
Ψ	应变自由能
Ψ^*	吉布斯自由能 (Gibbs free energy)
ψ	水力耦合系统的热力学势
F_d	与损伤变量 d 关联的热力学力, 也称为损伤驱动力
$R(d)$	损伤抗力函数
$\mathbb{C}^{\text{tan}}$	基于率形式应力应变关系的剪切弹性张量
σ^p	与 ε^p 关联的热力学力, 即作用在裂隙处的局部应力
λ^p	塑性乘子
Λ^p	累积塑性乘子
$\mathbf{b}$	二阶 Biot 系数张量
λ^d	损伤乘子
p_w	孔隙水压力
ϕ	特征单元体的孔隙率
ϕ_0	特征单元体的初始孔隙率
$\mathbf{q}$	热流矢量

第三类: 与特征单元体有关的变量

$\mathbb{C}^{\text{hom}}$ 特征单元体的有效弹性张量

S^{hom}	特征单元体的有效柔度张量
$\epsilon(\boldsymbol{x})$	特征单元体内的局部应变 (应变场)
$\sigma(\boldsymbol{x})$	特征单元体内的局部应力 (应力场)
k^{hom}	特征单元体的有效压缩模量
μ^{hom}	特征单元体的有效剪切模量
$\bar{\epsilon}$	局部应变在特征单元体上的体积平均值
$\bar{\sigma}$	局部应力在特征单元体上的体积平均值
S_e	四阶 Eshelby 张量
P_e	四阶 Hill 张量

第四类: 与第 i 族裂隙相关的变量

d_i	第 i 族裂隙的损伤变量
φ_i	第 i 族裂隙占有空间的体积比率
$\epsilon^{c,i}$	第 i 族裂隙引起的非弹性应变
$C^{c,i}$	特征单元体中第 i 夹杂相的弹性张量
$\lambda^{c,i}$	第 i 族闭合裂隙的塑性乘子
$\lambda^{d,i}$	第 i 族裂隙的损伤乘子
β	裂隙面相对开度
γ	裂隙面相对滑移向量
$\mathcal{N}$	单位体积内一个裂隙族中的裂隙数量

第五类: 模量参数和中间变量

C^p	各向同性塑性损伤模型中的强化软化模量
r_c	临界 (最大) 损伤抗力
d_c	临界损伤值
α	裂隙面摩擦系数
η	裂隙固体的等效摩擦系数
γ	描述亚临界裂隙扩展速度的参数
c_n	$= \frac{3E_0}{16(1 - \nu_0^2)}$
c_t	$= c_n(2 - \nu_0)$

目 录

“岩土多场多尺度力学丛书”序

前言

参数符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石基本力学特性	2
1.1.1 单轴拉伸试验	2
1.1.2 常规三轴压缩试验	2
1.1.3 真三轴压缩试验	3
1.1.4 岩石流变力学试验	4
1.1.5 岩石水力耦合行为	5
1.2 裂隙岩石宏观行为的细观力学机理	6
1.3 多尺度岩石损伤力学研究进展	9
1.3.1 损伤力学及其发展简史	9
1.3.2 细观损伤力学研究进展	10
1.4 本书的主要内容	13

第一篇 理论基础

第 2 章 张量运算与方向张量	19
2.1 向量与张量	20
2.1.1 爱因斯坦求和约定	20
2.1.2 向量	20
2.1.3 张量	21
2.2 各向同性张量	23
2.2.1 二阶对称单位张量及其性质	23
2.2.2 四阶单位张量及其性质	23
2.3 方向张量与 Walpole 张量基	25

2.3.1 二阶方向张量 25

2.3.2 Walpole 四阶张量基 25

2.3.3 方向张量的球面积分 26

2.4 张量分析 27

2.4.1 梯度与散度 27

2.4.2 张量函数积分变换 27

第 3 章 基于内变量的不可逆热力学原理 29

3.1 连续体热力学第一定律：能量守恒 30

3.2 连续体热力学第二定律和 Clausius-Duhem 不等式 31

3.3 非弹性问题基于内变量的热力学原理 32

第 4 章 Eshelby 夹杂问题 34

4.1 均匀极化应力场问题 35

4.2 Eshelby 非均质问题 36

4.3 Eshelby 张量的几个解析解 38

4.3.1 各向同性基质-球形夹杂体的情况 38

4.3.2 各向同性基质-椭球体形夹杂体的情况 38

第 5 章 连续损伤力学基础 40

5.1 一维弹性元件模型 41

5.1.1 弹簧元件模型 41

5.1.2 一维弹性损伤模型 42

5.2 Lemaitre-Chaboche-Marigo 各向同性损伤模型 44

5.2.1 损伤变量 44

5.2.2 各向同性假设 45

5.2.3 有效应力与应变等价原理 45

5.2.4 应变自由能和状态变量 46

5.2.5 损伤准则及演化方程 47

5.2.6 率形式应力应变关系 48

第二篇 裂隙岩石细观损伤力学

第 6 章 裂隙材料均匀化理论 51

6.1 特征单元体 52

6.2	非均质材料均匀化理论	53
6.2.1	均匀应力边界条件	53
6.2.2	均匀应变边界条件	54
6.2.3	均匀化方法一般路径	55
6.2.4	有效弹性张量的一般表达式	55
6.2.5	体积平均基于材料相的分解	56
6.3	均匀化方法在裂隙固体中的应用	58
6.3.1	固体微裂隙-基质系统的数学描述	58
6.3.2	币形微裂隙问题的 Eshelby 张量	59
6.3.3	有效弹性张量	59
6.3.4	裂隙闭合效应	60
6.3.5	Mori-Tanaka 方法	61
6.3.6	Ponte-Castaneda-Willis 方法	63
6.3.7	弹性应变边界法	64
6.4	裂隙对宏观弹性特性的影响	65
6.4.1	单族平行微裂隙情况	65
6.4.2	任意分布微裂隙情况	67
6.5	本章小结	70
第 7 章	裂隙岩石弹性损伤力学	71
7.1	各向异性细观损伤力学	72
7.1.1	损伤变量	72
7.1.2	系统自由能与状态变量	72
7.1.3	损伤准则和演化法则	73
7.2	单轴拉伸作用下的解析解	75
7.2.1	单族裂隙无损伤强化情况	75
7.2.2	从单族到多族: 代表性裂隙族	78
7.2.3	多族裂隙且考虑损伤强化软化	79
7.3	单轴压应力条件下的解析解	82
7.4	本章小结	83
第 8 章	损伤摩擦耦合效应	84
8.1	特征单元体	85

8.1.1	几何表述	85
8.1.2	应变分解	86
8.2	系统自由能的确定	87
8.2.1	直接均匀化方法	87
8.2.2	裂隙预应力及问题分解	88
8.2.3	基质-闭合摩擦微裂隙系统的自由能	90
8.3	摩擦滑移引起的非线性力学行为	92
8.3.1	状态变量	92
8.3.2	摩擦准则	92
8.3.3	摩擦无剪胀情况下的局部非弹性应变演化准则	93
8.3.4	摩擦有剪胀情况下的局部塑性应变演化准则	94
8.4	损伤摩擦耦合分析	95
8.4.1	一致性条件	96
8.4.2	损伤摩擦强耦合	97
8.5	考虑多族裂隙的损伤摩擦耦合分析	97
8.5.1	系统自由能一般公式	97
8.5.2	状态方程	99
8.5.3	内变量演化准则和一致性条件	99
8.5.4	率形式应力应变关系	101
8.6	本章小结	103
第 9 章	破坏准则与参数跨尺度关联	104
9.1	细观力学强度分析的基本公式	106
9.2	莫尔平面内的破坏准则表达式	107
9.2.1	拉伸破坏	107
9.2.2	压剪破坏	108
9.2.3	破坏准则表达式	110
9.2.4	连续性与光滑性	110
9.3	主应力平面上的破坏准则表达式	111
9.3.1	常规三轴压缩应力路径	111
9.3.2	常规三轴轴向卸载试验	113

9.3.3	张开裂隙的张拉破坏	113
9.4	破坏函数的连续性和光滑性	114
9.4.1	从纯张拉破坏到拉剪破坏	114
9.4.2	从拉剪破坏到压剪破坏	115
9.4.3	裂隙张开/闭合条件的证明	116
9.5	细观力学破坏准则: 归纳与讨论	116
9.5.1	破坏准则数学表达式	116
9.5.2	单轴压/拉强度比	117
9.5.3	室内试验验证	118
9.6	本章小结	118
第 10 章	水力耦合效应	120
10.1	裂隙张开情况下的水力耦合分析	121
10.1.1	广义应力场	121
10.1.2	应力应变关系和 Biot 系数张量	122
10.1.3	自由能	123
10.1.4	状态变量	125
10.2	闭合裂隙损伤摩擦耦合下的水力耦合分析	125
10.2.1	问题分解	125
10.2.2	自由能与状态方程	126
10.2.3	应变连续条件	127
10.2.4	孔隙率连续条件	127
10.2.5	自由能表达式及其连续性	128
10.3	微裂隙任意张开/闭合组合下的水力耦合模型	128
10.3.1	自由能	128
10.3.2	状态方程	130
10.3.3	破坏准则	131
10.4	本章小结	131
第 11 章	相关数值问题	132
11.1	大量任意分布微裂隙的数学处理	133
11.1.1	问题的提出	133

11.1.2	球面数值积分	134
11.2	离散方向变量的结果表征	134
11.2.1	结构张量函数的球面积分	134
11.2.2	损伤函数的二阶张量表示	135
11.2.3	损伤函数的四阶张量表示	136

第三篇 各向同性塑性损伤耦合分析

第 12 章	弹塑性损伤耦合本构方程	139
12.1	基本公式	140
12.1.1	应变分解	140
12.1.2	有效柔度张量和有效弹性张量	141
12.1.3	系统自由能与状态变量	143
12.1.4	裂隙闭合状态	143
12.1.5	基于背应力的统一强化与软化	144
12.1.6	塑性屈服准则	145
12.1.7	损伤准则	145
12.1.8	裂隙张开/闭合准则	145
12.2	一致性条件与率形式应力应变关系	146
12.2.1	张开裂隙情况	146
12.2.2	闭合摩擦裂隙情况	147
12.3	本章小结	148
第 13 章	本构方程解析解与破坏准则	149
13.1	常规三轴压缩试验	150
13.1.1	加载路径及塑性损伤耦合分析	150
13.1.2	损伤抗力函数	152
13.1.3	应力应变关系解析表达式及计算流程	153
13.1.4	算例	154
13.2	常规三轴环向卸荷试验	154
13.3	常规三轴等比例压缩试验	156
13.4	等平均应力常规三轴压缩试验	157