

扰动状态概念理论 及其应用

吴 刚 © 著



科学出版社

扰动状态概念理论及其应用

吴 刚 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍由 Desai 教授创立的一种全新的、统一的工程材料本构模拟方法——扰动状态概念理论及相关研究成果。

本书重点介绍了扰动状态概念的由来、基本原理及其主要研究方法,综述了扰动状态概念理论的发展历史及国内外研究现状,阐述了扰动状态概念的基本理论及其基本方程、基于扰动状态概念的有限元数值模拟方法,归纳了扰动状态概念理论的特点及其与其他本构模型的区别,给出了国内外有关扰动状态概念理论在不同材料及相关工程的应用实例,简要评述了扰动状态概念理论并展望其发展前景。

本书为扰动状态概念理论的学术专著,可作为高等院校土木工程、力学及材料学专业的高年级本科生、研究生相关课程的教材或教学参考书,也可供从事工程材料本构模拟研究的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

扰动状态概念理论及其应用 / 吴刚著. —北京: 科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047506-0

I. ①扰… II. ①吴… III. ①岩土力学-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044463 号

责任编辑: 刘宝莉 孙伯元 高慧元 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 左 迅

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 315 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

当前,科学技术的发展日新月异,呈现方兴未艾的景象。由于工程材料的多样性、复杂性和特殊性,普遍存在尺寸效应、非均匀、有天然缺陷、不确定性以及受工程环境和施工的影响等,在力学行为上呈非线性。因此,将新兴的科学理论应用于各种工程材料的研究已成为一种趋势。

由美国著名学者 Desai 提出的扰动状态概念理论,为工程材料提供了一种全新的、统一的本构模拟方法。40 余年来,Desai 及其合作者对扰动状态概念进行了深入的研究,扰动状态概念的理论体系已较为系统化,扰动状态概念应用于工程材料的本构模拟已取得了丰硕的成果,其中的一些研究成果已得到应用和推广。在国内,关于扰动状态概念的研究虽然开展时间不长,但也获得了一些进展并取得了较多的研究成果。

关于扰动状态概念,作者最初是从 Desai 于 1993 年 5 月在西安举行的“计算机方法在岩石力学及工程中的应用国际学术讨论会”发表的“利用扰动状态概念进行本构模拟”一文所了解的,此后作者学习该理论,领会其基本原理,并应用扰动状态概念从事相关领域的研究。本书是作者十余年从事扰动状态概念理论研究的总结,期间部分研究内容受到国家自然科学基金“基于扰动状态概念的岩石力学分析方法研究”(40272115)和“高温对岩石的作用机制及其扰动状态本构模型研究”(40872180)的资助。

本书力图全面阐述扰动状态概念的由来、基本原理及基本理论,综述扰动状态概念理论的研究现状及利用扰动状态概念进行工程材料本构模拟的主要方法,归纳扰动状态概念理论的特点及其与其他本构模型的区别,介绍国内外有关扰动状态概念理论应用于不同材料及相关工程的实例,最后对扰动状态概念理论及其应用作简要评述,并展望其发展前景。

作者感谢国家自然科学基金委员会的资助,感谢关心和支持作者进行写作的

家人，感谢与作者一起从事相关课题研究的本科生和研究生，感谢为本书出版提供帮助的友人，特别要感谢研究生翟松韬为本书出版所做的工作。此外，本书中还引用了国内外同行的有关研究成果，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，本书尚存不足之处，望读者不吝指正。

吴 刚

2015 年 9 月

本书主要符号

DSC	扰动状态概念	σ_{ij}^r	总相对应力
RI	相对完整状态	$d\sigma_{ij}^r$	相对应力增量
FA	完全调整状态	D_E	有限元方法中的扰动
AV	平均响应状态	D_T	实验室测试所得扰动
D	扰动函数（因子）	V_E	有限元方法中试件的体积
HISS	分级单屈服面	V_T	实验室测试试件的体积
ϵ_V	体应变	L	单元长度
J_1	应力张量第一不变量	$\bar{D}$	平均直径
J_{2D}	应力张量第二不变量	σ_{ij}^i	RI 状态下材料的应力张量
J_{3D}	应力张量第三不变量	ϵ_{ij}^i	应变张量
p	静水压力	S_{ij}	偏应力张量
p_0	初始压力	E_{ij}	偏应变张量
p_a	大气压力	I_{2D}	E_{ij} 的二阶不变量
p_w	孔隙水压力	T	温度
δ_{ij}	Kronecker 符号	α_T	热膨胀系数
G	剪切模量	d_T	温度变化量
K	体积模量	$C_{ijkl}^{(I)}(T)$	由温度决定的本构张量
μ	泊松比	T_r	参考温度（300K）
$d\sigma_{ij}^d$	应力张量增量	ϵ	总应变
C_{ijkl}^i	与本构特性有关的四阶张量	ϵ^p	塑性应变
α	相对运动参数	ϵ^e	弹性应变
ξ	塑性总应变迹	σ_y	单轴拉或压下的屈服应力
ξ_D	塑性偏应变的迹	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
F	屈服函数	θ	Lode 角
τ_{oct}	八面体的剪应力	e^e	孔隙率
∇^2	Laplace 算子	e	孔隙比
		e_0	初始孔隙比

ϵ_s^p	塑性剪切应变	μ	黏度系数
ϵ_v^p	塑性体积应变	σ_p	给定周期 N 下的峰值应力
F_y	连续屈服函数	$\Delta \bar{Q}^{\text{ISC}}$	包含扰动影响的等效载荷向量
P_a	大气压常数		
R	黏结应力	F_d	动态屈服面
n	阶段改变参数	$\dot{\epsilon}^{\text{vp}}$	黏塑性应变率张量
γ	极限状态包络线有关的参数	I_2^{vp}	$\dot{\epsilon}^{\text{vp}}$ 的第二不变量
β	主应力空间与形状有关的参数	$\underline{S}$	偏应力矢量
S_r	应力比	$\bar{\sigma}$	固体骨架承受的有效应力
θ_c	材料在压缩试验中的内摩擦角	p^f	液体压力
θ_E	拉伸试验中的内摩擦角	A^s	接触面积
Φ	内摩擦角	u_g	孔隙内空气压力
λ	流动因子	$\bar{\delta}_{ij}$	有效应力张量
Q	塑性势函数	$f(s)$	空气和孔隙水压力的函数
e^{vp}	黏塑性应变	J_1^a	总张量的第一不变量
$\dot{\epsilon}$	总应变率	$\bar{J}_1$	有效应力张量的第一不变量
$\dot{\sigma}$	应力矢量		
$\underline{C}^r$	各向同性材料的弹性本构矩阵	χ	有效应力参数
Γ	流动参数	$\bar{C}^i$	固体骨架 RI 部分的矩阵
$\underline{B}$	应变-位移的变换矩阵	$\bar{C}^e$	固体骨架 FA 部分的矩阵
$\underline{q}(n)$	位移矢量	ϵ^i	RI 部分的应变
$\underline{C}_n^r$	弹性本构矩阵	ϵ^e	FA 部分的应变
$\underline{C}^r$	FA 状态下的本构矩阵	e^{max}	最大孔隙比
$\Delta \epsilon^e(t)$	依赖于时间的等效弹性应变	e^{min}	最小孔隙比
$k_{t(n)}^{-1}$	切线刚度矩阵	e^a	观察到的孔隙比
$\Delta \bar{Q}$	增量载荷向量	c^f	有效结合力
$\Delta \epsilon_n^{\text{vp}}$	黏塑性应变增量	ϕ^f	有效摩擦角
		τ_0	完全饱和土的慢剪强度
		K	渗透率
		K	完全饱和状态下的渗透率
		γ_v	体积塑性应变与总塑性应变的比值

D_b	基本状态的扰动	v_r	相对法向位移
D_s	与结构相关的扰动	u_r^p	相对塑性剪切位移
ε_t (ξ_t)	极限塑性应变	v_r^p	相对塑性法向位移
$\bar{D}_{\varepsilon_v}$	与体积有关的扰动函数	F_u	最终屈服面积
$\bar{D}_{\varepsilon_d}$	与偏应变有关的扰动函数	σ_n^c	临界状态下的正应力
p'	平均有效压力	τ_u	极限剪应力
A_r	加权实际接触面积	τ^p	给定周期的峰值剪应力
k_s	剪切刚度	τ^c	残余剪应力
k_n	法向刚度	V^c	给定界面区的临界体积
R	粗糙度		
u_r	相对剪切位移		

目 录

前言

本书主要符号

第 1 章 绪论	1
1.1 扰动状态概念的基本原理及其研究方法	1
1.1.1 扰动状态概念	1
1.1.2 扰动状态概念的基本原理	2
1.1.3 扰动状态概念的研究方法	4
1.2 扰动状态概念的特点及其与其他模型的对比	7
1.2.1 扰动状态概念的特点	7
1.2.2 扰动状态概念与损伤模型的对比	9
1.2.3 扰动状态概念与其他模型的对比	11
1.3 扰动状态概念的发展历史及研究现状	12
1.3.1 扰动状态概念的发展历史	12
1.3.2 扰动状态概念的研究现状	13
参考文献	18
第 2 章 扰动状态概念的基本理论	22
2.1 扰动状态概念的各基本状态量	22
2.1.1 相对完整状态	22
2.1.2 完全调整状态	23
2.1.3 扰动及其表述	25
2.2 基于扰动状态概念的本构方程	30
2.2.1 DSC 的弹性理论	30
2.2.2 DSC 的塑性理论	39
2.2.3 DSC 的分级单屈服面模型	47

2.2.4	DSC 的黏弹性和黏塑性模型	53
2.2.5	饱和材料和非饱和材料的 DSC 模型	66
2.2.6	结构材料和刚性材料的 DSC 模型	80
2.2.7	界面或节理的 DSC 模型	86
参考文献		104
第 3 章 扰动状态概念在岩土力学中的应用		108
3.1	扰动状态概念在岩石力学中的应用	108
3.1.1	岩石的弹塑性扰动状态概念本构模型	108
3.1.2	扰动状态概念应用于单轴压缩下岩石破坏后区的分析	117
3.1.3	岩体卸荷破坏的扰动状态概念分析	126
3.1.4	岩石疲劳的扰动状态概念本构模型	133
3.1.5	高温岩石的扰动状态概念分析模型	136
3.2	扰动状态概念在土力学中的应用	142
3.2.1	饱和软黏土的扰动状态本构模型	142
3.2.2	结构性黏土的扰动状态本构模型	146
3.2.3	结构性土的次塑性扰动状态模型	154
参考文献		160
第 4 章 扰动状态概念在岩土工程中的应用		163
4.1	扰动状态概念应用于砂土液化	163
4.1.1	基于扰动状态概念的砂土液化判据	163
4.1.2	应用实例	166
4.1.3	结论	170
4.2	扰动状态概念在大坝稳定性分析中的应用	170
4.2.1	扰动状态概念模型	170
4.2.2	参数的反演	171
4.2.3	三峡大坝 3 [#] 坝段的稳定性分析	174
4.2.4	结论	175
4.3	扰动状态概念在桩基工程中的应用	176
4.3.1	扰动状态土力学的基本原理	176
4.3.2	基于 DSC 的荷载传递函数	177

4.3.3 模型验证	180
4.3.4 工程应用	181
4.3.5 结论	182
参考文献	182
第5章 扰动状态概念在其他工程领域的应用	184
5.1 扰动状态概念在电子封装材料中的应用	184
5.1.1 电子封装材料的本构模型	184
5.1.2 材料参数	185
5.1.3 有限元方法	187
5.1.4 应用实例	188
5.1.5 结论	200
5.2 扰动状态概念应用于热疲劳作用下材料的寿命预测	200
5.2.1 热黏弹塑性模型	201
5.2.2 材料模型的验证	202
5.2.3 有限元法用于热疲劳预测	202
5.2.4 陶瓷芯片载体和印刷布线板之间焊点的疲劳寿命分析	205
5.2.5 结论	212
5.3 扰动状态概念应用于路面材料的数值模拟	213
5.3.1 路面材料的分析与设计方法	214
5.3.2 路面材料的扰动状态模型	215
5.3.3 结论	222
参考文献	222
第6章 扰动状态概念的有限元方法	224
6.1 控制方程及平均化分析	224
6.1.1 DSC 的控制方程	224
6.1.2 扰动状态概念的平均化分析	225
6.2 有限元方程	227
6.2.1 基本方程	227
6.2.2 求解方法	227
6.2.3 应力的计算	228

6.3 基于 DSC 有限元法的特点及算例	228
6.3.1 DSC 对计算网格的适宜性	228
6.3.2 计算网格的敏感性	230
6.3.3 切线刚度矩阵	232
6.3.4 局部化问题和非局部化方法	233
6.3.5 算例	236
参考文献	242
第 7 章 评述和展望	245

第 1 章 绪 论

当前科学技术的发展日新月异,呈现出方兴未艾的景象。随着现代数学、力学、计算机科学的迅速发展以及各类工程实践的需要,许多学科已相互融合、相互渗透,并不断开创出新的研究领域,大大推动了科学技术的发展。新兴的科学理论如分形几何、分叉、混沌、突变理论、协同论等已应用于工程领域。而对工程材料及其分界面或节理的力学行为的理解和描述,在预测材料行为以及工程系统的分析和设计中,具有至关重要的意义。工程材料具有多样性、复杂性和特殊性等固有属性,且普遍存在尺寸效应、非均匀、有天然缺陷、不确定性、在力学行为上常呈现出非线性以及受工程环境和施工的影响等,由于新材料的不断出现,将传统经典理论应用于工程材料力学特性的研究,存在相当的局限性。因此,将新兴的科学理论应用于各种工程材料的研究已成为一种趋势。

工程材料的本构理论,就是研究工程材料在力学、物理以及化学作用下的力学行为。它是进行工程材料力学分析、模拟与研究的基础和出发点,是材料力学理论研究的核心问题。当前,研究固体材料及其交界面/接缝的力学响应特性,建立本构模型并进行相关的试验已成为研究的热点。在工程材料本构关系研究中,主要采用的是以连续介质力学为基础的确定性研究方法。弹性、塑性、热塑性、热黏塑性、连续介质损伤、微观力学以及内时理论等常常被用来建立工程材料的本构模型,但其本构理论的许多基本问题目前仍未认识清楚。由美国的 Desai 提出的扰动状态概念(disturbed state concept, DSC)理论,为工程材料提供了一种全新的、统一的本构模拟方法。

本章将简要叙述扰动状态概念理论的由来,阐述扰动状态概念的基本原理及其研究方法,综述扰动状态概念的特点,并对其与损伤力学、临界状态理论及自组织理论的异同进行了比较,最后介绍有关扰动状态概念的国内外研究现状。

1.1 扰动状态概念的基本原理及其研究方法

1.1.1 扰动状态概念

扰动状态概念源于超固结的地质材料模型,是由 Desai 于 1974 年提出的^[1]。

20 余年来,在美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)的资助下, Desai 及其合作者对扰动状态概念进行了全面而深入的研究,已基本形成了扰动状态概念理论的分析体系,扰动状态概念理论已较为系统化。

在扰动状态概念中,假定作用力(机械力、热力、环境力)引起材料微观结构的扰动,致使材料内部微观结构发生变化。由于扰动,材料内部的微观结构从(最初的)相对完整(relative intact, RI)状态,经过一个自觉的自动调节过程,达到完全调整(fully adjusted, FA)状态(通常为临界状态)。这种自调整过程可能包含能导致材料产生微裂纹、损伤或强化颗粒的相对运动,它能引起观测到的明显的扰动,特别是在以上两种状态下的响应。这种扰动通过一个函数(称为扰动函数)来定义,它表示观测响应、初始响应和临界响应的关系,并用宏观观测量来描述扰动的演化,从而对材料的本构关系进行模拟。

扰动状态概念理论就是一种本构理论,它提供了工程材料的一种统一的建模方法。它可根据材料及使用者的需要,选用从简单的(线弹性的)到复杂的(具有微裂纹和扰动的黏弹塑性的)某一特定模型。扰动状态概念的重要特性之一是它集弹性、塑性、蠕变、微裂纹产生及软化、强化和(周期)疲劳破坏为一体。因此,它具有一种体系特征。

扰动状态概念的基础是其基本的物理思想,即可观测到的材料响应可以用一系列组成要素的响应来表达,各要素由合成或扰动函数来联系。简单地说,观测到的材料状态可看做相对于处于适当定义的基准状态下材料行为的扰动或偏离。材料系统的当前状态,无论是生命的还是非生命的,都是相对于初始或最终状态的扰动状态。

1.1.2 扰动状态概念的基本原理

扰动状态概念是一种有别于其他理论的工程材料的本构模拟方法。

扰动状态概念认为:材料单元的观测行为可用处于相对完整状态及完全调整状态(即所谓的基准状态)的行为来表示。在由机械和(或)环境加载而导致的变形过程中,材料单元被认为是由随机地处于相对完整状态和完全调整状态的部分所组成的混合物,如图 1.1 所示。结果是:最初相对完整的材料,在它的微结构自调整或自组织的过程中被不断地调整并在其某些部分达到完全调整状态。自调整意味着材料能够调整内部的结构,使它能有效地承受外部荷载。这些调整包含内部的变化,如颗粒的转变、旋转、常规运动以及微裂纹的产生。在转变过程中,微结构的颗粒可能会经历局部失稳或其状态的变化。在变形过程中的某一临界区域,这

种改变可能预示着临界转变(包括状态的重大或突然改变,如从压缩到膨胀的体积变化,峰值应力以及残余应力状态的起始)。

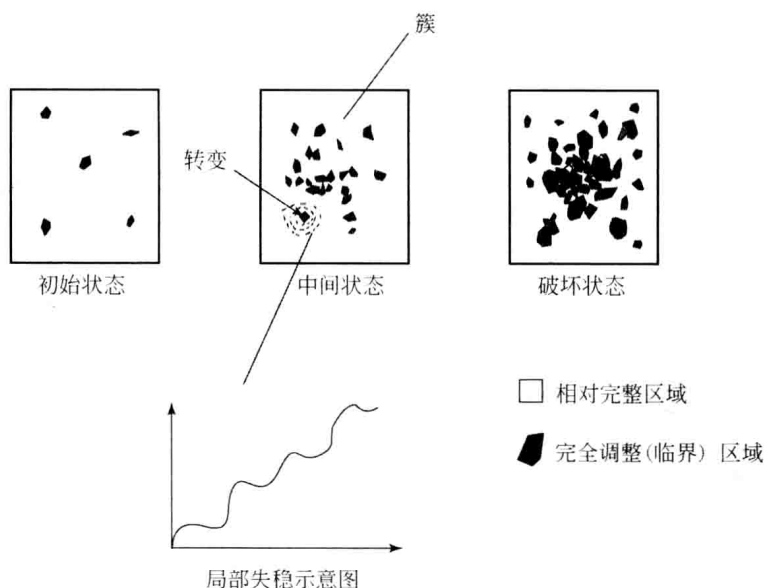


图 1.1 扰动状态概念中相对完整和完全调整簇的关系示意图

在扰动状态概念理论中,相对完整状态可以用线弹性、弹塑性或其他合适的模型来表示,并假定其作为连续介质承受弹性和非弹性的应变以及相关的应力。完全调整状态则可用临界状态或其他合适的模型来模拟,它对应着裂纹或孔隙的扩展而最终导致的破坏,在完全调整状态中材料达到一个恒定能量耗散的状态。

处于相对完整状态下材料的响应可从试验的应力-应变-体积变化以及非破坏性行为得到,并且能通过使用连续介质理论(如弹性、塑性、热塑性、热黏塑性理论等)加以区别。图 1.2 为利用扰动状态概念描述弹塑性材料力学响应的关系示意图。

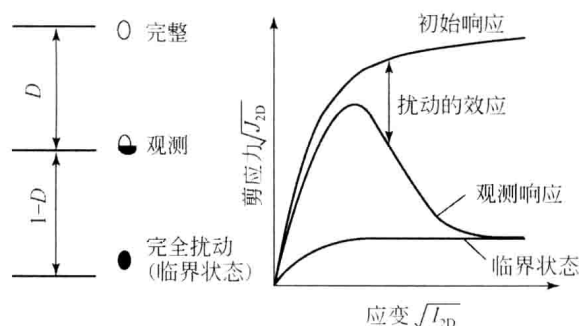


图 1.2 扰动状态概念示意图

1.1.3 扰动状态概念的研究方法

相对完整状态、完全调整状态和扰动函数是构成扰动状态概念理论体系的基础。

1. 相对完整状态

处于相对完整状态的那部分材料的响应被认为是排除了扰动因素的影响。从这种意义上讲,该状态表示一种相对于受扰动状态而言的完整的状态。如在图 1.3(a)中,由初始弹性模量定义的反应可作为相对完整状态的响应,而实际观测到的非线性弹性的特性是由受诸如微裂纹产生(即扰动)等因素的影响而造成的,这些因素导致了实际响应偏离相对完整状态的响应。图 1.3 中, σ 和 e 分别表示量测应力和孔隙率,上标 a 、 i 和 c 分别表示观测的、相对完整状态以及完全调整状态的响应。相对完整状态取决于初始条件,如围压或平均压力(σ_0)、密度(ρ_0)。在限

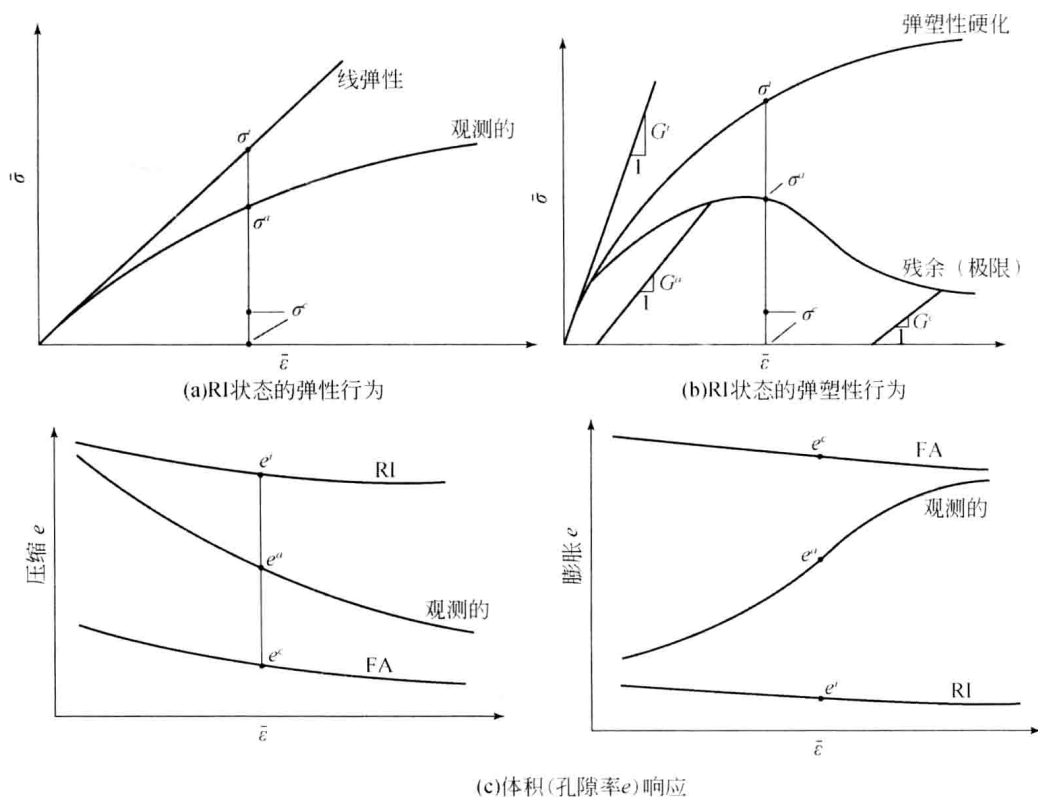


图 1.3 不同材料行为的扰动示意图

定范围内,极限或最终相对完整状态对应于 σ_0 和 ρ_0 最大值处的响应,但这种最终状态是渐进的,实际上不可能达到。

此外,材料中的一部分不会受由微裂纹产生和损伤引起的扰动的影响,相对完整状态可基于这部分材料的弹塑性硬化特性而定义,如图1.3(b)所示。在这种情况下,相对完整状态能用基于相关各向同性硬化塑性的分级单曲面(hierarchical single-surface, HISS)方法中的 δ_0 模型来定义,也可用其他的模型如热塑性和热黏塑性模型来定义。

2. 完全调整状态

处于完全调整状态的材料部分可认为已达到了极限状态,它的结构使其特性不同于处于相对完整状态的材料部分的特性,它不能像处于相对完整状态的材料那样承受外加剪切应力和静水压力的作用。不同的模型可被用来描述该状态的特征。

在这种状态下,材料被假定为:①它没有强度,如同连续介质损伤模型中的孔洞;②它无剪切强度,但能像受限液体那样承受平均或静水压力;③它处于临界状态,在给定的静水压力作用下,它能继续承受剪切作用并在体积不变情况下发生剪应变,即可被看作为“受限液-固体”状态。通常,运用上述②或③来定义完全调整状态较为合适。这主要是因为处于完全调整状态的材料部分是被处于相对完整状态的那部分材料所包围并限制的。因此,把它看成具有一定程度的变形和强度特性比把它看成无任何强度的孔洞更为合适。

3. 扰动及其演化

在扰动状态概念中,材料的观测响应是根据材料的两种基准状态(相对完整状态和完全调整状态)的响应通过扰动函数 D 来表达的。

处于完全调整状态下的材料行为相比相对完整状态的材料是不同的,其响应通常呈现较大软化。但是,当它被相对完整材料所包围时,它就具有一定的强度。例如,施加一个给定的初始压力,它能持续承受剪应力直到剪切变形保持恒定体积的状态,该状态常被称为临界状态。因此,对照经典的连续介质损伤模型,其材料的损伤部分没有强度,而在扰动状态概念中完全调整材料具有有限的强度。扰动状态概念理论的特征之一是观测的材料响应包含材料两部分及其相互作用的响应。因此,在扰动状态概念模型中体现了微裂纹相互作用效应。

1) 扰动函数

扰动函数 D 通常是依赖于方向的,因此是一个张量。但是,为了简单起见,它