

岩石损伤演化理论与数值模拟

THEORY OF ROCK DAMAGE
EVOLUTION AND NUMERICAL
SIMULATION

王 利 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

岩石损伤演化理论与数值模拟

王 利 著

图书在版编目(CIP)数据

岩石损伤演化理论与数值模拟 / 王利著. —杭州:
浙江大学出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-308-15271-6

I. ①岩… II. ①王… III. ①岩石—损伤(力学)—
演变—理论研究②岩石—损伤(力学)—数值模拟
IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 252376 号

岩石损伤演化理论与数值模拟

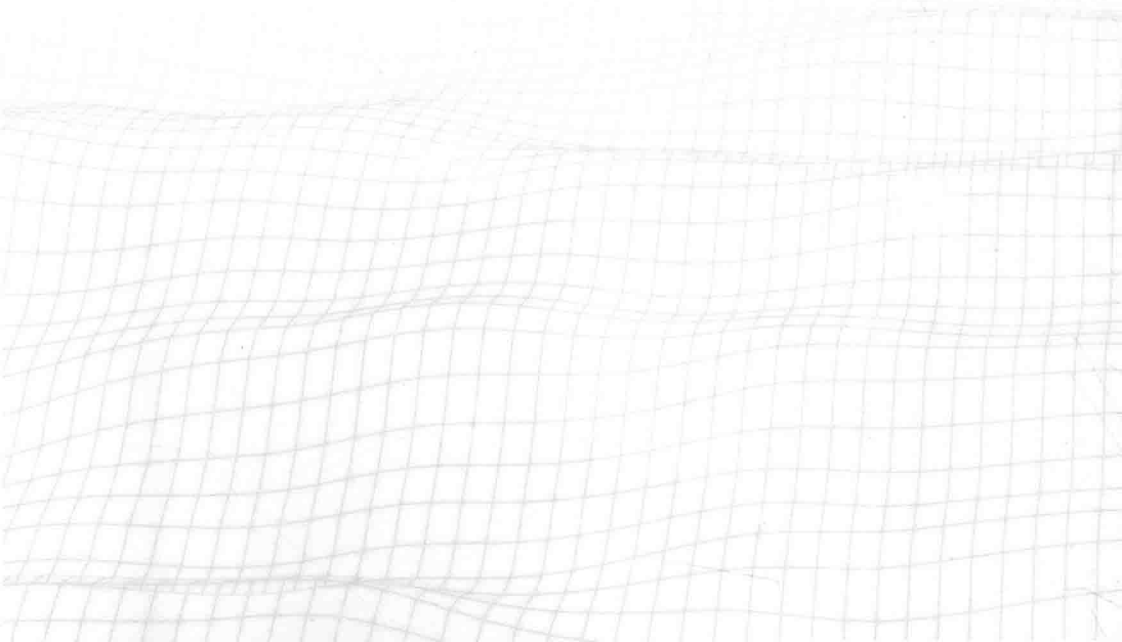
王 利 著

责任编辑	王元新
责任校对	陈慧慧
封面设计	续设计
出版发行	浙江大学出版社 (杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007) (网址: http://www.zjupress.com)
排 版	杭州林智广告有限公司
印 刷	富阳市育才印刷有限公司
开 本	710mm×1000mm 1/16
印 张	11
字 数	201 千
版 次	2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-308-15271-6
定 价	45.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

THEORY OF ROCK DAMAGE
EVOLUTION AND NUMERICAL
SIMULATION



前 言

岩石工程在国民经济中具有非常广泛的用途,涉及矿山和石油、天然气开采、水电资源开发、核废料处理、铁路、公路和港口建设等国民经济中的基础产业,对于国民经济建设和国防所起的作用非常巨大。岩石工程建设和服役期间所面临的最大问题是结构破坏问题,如地下采矿巷道的塌方、片帮、公路的滑坡等,常常给生产和人民的生命财产造成很大的影响。尤其是,特定应力条件下发生的岩石动力学灾害如岩爆、煤矿开采的“三突”等,已经严重影响了矿山企业的正常生产,给深部资源开发带来很大的困难。而长期以来的地震、高速滑坡也随着全球自然环境的恶化,呈现高发态势,给国民经济和社会和谐发展带来很大的危害。

实践表明,岩石工程的破坏和岩石动力学灾害的发生都有一个孕育演化的过程,在这个过程中,岩石结构内部经历由微缺陷或微裂纹的均匀分布向宏观大裂隙的集中分布的演化,结构进入临界稳定状态。达到临界稳定状态的结构在外界荷载扰动或内部构造的细节差异的影响下,都有可能失稳,而极为快速的失稳过程则表现为岩石动力学灾害的发生。上述过程被称为损伤演化诱致灾变。岩石力学性质复杂,而岩石工程一般体量庞大,不确定性因素甚多,这给岩石工程稳定性分析和灾变预测带来了巨大挑战。对于灾变预测不准导致灾害发生,一部分原因是存在一些未知的不确定性因素,另外很大一部分原因是灾变演化缺乏确定性的规律认识。在力学上,通过研究小尺度材料的力学损伤演化模型,将其嵌入到有限元模型中,通过迭代计算可以自动识别出大尺度工程结构断裂损伤区的形状及其发展演化过程,这相当于建立了工程结构灾变演化的确定性的机理模型。在实际的灾害预测中,一种可行的模式是:灾害预测=确定性机理模型+监测数据。小尺度材料的力学行为即材料本构关系,在岩石破坏理论中占有非常重要的地位,是岩石工程失效预测的基础,具有非常重要的理论意义。

在上述框架中,本专著的工作属于确定性机理模型的范畴,内容和组织

结构如下:

第1章较为详细地阐述了损伤力学理论框架和基本损伤模型。

第2章系统地阐述岩石系统演化的理论框架。因此,面对复杂的岩石力学性质和体量庞大的岩石工程,开展研究的第一步就是进行工程结构尺度的划分,然后针对不同的结构尺度进行宏观力学实验和微观机理观测,在此基础上进行不同结构尺度的损伤建模和灾变分析。岩石灾变是系统损伤演化突变的结果,可在不同尺度上发生。小尺度灾变可串级放大导致大尺度工程结构的灾变破坏。中科院力学所白以龙、夏蒙梵等从系统论的角度揭示了材料灾变演化的模式和共性特征,这些对于理解岩石动力灾害的非线性性质具有重要意义。因此,本章简要介绍了这方面内容。

第3章介绍岩石动力系统演化的数值模拟方法。小尺度材料力学行为的描述属于本构关系的内容,小尺度材料灾变串级放大引起大尺度工程结构灾变,是通过材料刚度损伤退化与应力涨落的耦合迭代实现的。通过耦合迭代的数值计算,可以在工程结构中识别宏观断裂损伤区的位置和形状,从而建立一个确定性的工程结构灾变破坏机理模型。

第4章对一些岩石单轴拉伸和尺寸效应进行了数值模拟实验。

第5章和第6章提出了岩石弹塑性损伤演化的统一模式。本模型基于材料损伤演化的阶段性特征提出:峰值前为分布性的微损伤演化阶段,峰值阶段是裂纹成核阶段,而峰值后是裂缝扩展阶段。在本模型中采用两段曲线描述这种内部损伤演化。之所以称为统一模式是因为该损伤表达式可以描述高一中一低多种围压条件下岩石应力—应变关系,而本模型在峰后复杂的软硬化特性可通过参数变化来反映,在本模型中参数随围压变化而变化。相比一些既有损伤模型,参数都是基于单轴应力状态获得,难以反映高围压下岩石承载能力的变化。

第7、8、9章是损伤模型在实际工程中的应用。第7章是关于煤矿长壁回采推进过程中围岩裂隙场演化的数值模拟,可以直观、清晰、完整地揭示回采推进过程中,顶、底板围岩裂隙场演化、破断距和工作面压力变化。第8章是一个深埋隧道岩爆孕育演化过程的数值模拟,揭示了岩爆演化的“V”形剪切带模型和应变能释放的楔形体模型。第9章是损伤—渗流耦合原理用于水力压裂裂缝扩展轨迹的识别。

第10、11章提出基于微缺陷成核数序列的岩石裂纹尺度增长模型。该模型基于微缺陷聚集排列形成微裂纹的思想以及微缺陷成核数与微裂纹尺度之间的分形统计关系,建立了基于微缺陷累计成核数的微裂纹生长和弹性微

损伤模型。虽然模型的实用化还需要继续探索,但是它毕竟还是为声发射预测内生裂纹生长开辟了一条可能的研究途径。

第12章将损伤断裂机理用于岩石块度分布研究。通过建立块度的分形演化模型,利用能量耗散原理,建立块度分布分维数、岩石损伤以及最小块度尺度之间的定量函数关系。利用该方法计算得到金川矿区三种典型岩石的分维数:橄榄岩、混合岩和大理岩的分维数分别为1.41、1.68和1.79,矿石的分维数为1.67,与现场实测相符。该方法是一种块度演化形成的动态预测方法,具有广阔的应用前景。

本专著是作者在岩石断裂损伤研究方面的初步总结,由于时间和精力所限,没有将它们有机地、深入地、系统地概括总结,而其中每一项内容都有很大的深入研究的空间,这里只当作是抛砖引玉了。由于学识所限,书中定有很多不正确的地方,希望得到读者的批评和指正。

作者于2001年进入北京科技大学先后师从明士祥教授和高谦教授攻读硕士和博士学位,在此对他们给予作者在学术和生活上的关心和指导,表示由衷的感谢,是他们提供的宽松、自由的学业环境,使作者能够在损伤力学的领域内自由散步,渐入佳境。

王 利

河南理工大学

2015年7月于焦作

目 录

1 绪 论	1
1.1 损伤力学简介	1
1.2 岩石损伤机理检测	2
1.3 岩石损伤模型	3
1.3.1 细观损伤模型	3
1.3.2 宏观唯象损伤模型	5
1.3.3 概率损伤模型	9
1.3.4 材料损伤和破坏的逾渗模型	10
1.3.5 材料损伤和破坏的生长模型	11
1.3.6 统计细观损伤力学	11
1.4 本章小结	11
参考文献	12
2 岩石动力系统演化理论	16
2.1 岩石系统的尺度划分	16
2.2 微损伤系统演化理论(低损伤阶段)	18
2.2.1 微损伤数密度的演化	18
2.2.2 基于微损伤数密度的宏观损伤	20
2.3 损伤演化诱致灾变模式	20
2.3.1 损伤诱致灾变的模式	21
2.3.2 耦合斑图演化模型	21
2.4 灾变的共性特征	22
2.4.1 样本个性	23

2.4.2	跨尺度敏感性	23
2.4.3	应力涨落	24
2.5	本章小结	25
	参考文献	26
3	岩石动力系统演化数值模拟方法	27
3.1	引言	27
3.2	细观无序性和有限元模型	27
3.3	细观损伤规则与不可逆演化	29
3.4	非平衡迭代与自适应加载	29
3.4.1	非平衡迭代	30
3.4.2	自适应加载步的确定	30
3.5	数值模拟结果	31
3.5.1	损伤斑图的生长	31
3.5.2	应力—应变曲线	33
3.5.3	无序性对宏观力学量的影响	35
3.6	本章小结	35
	参考文献	36
4	岩石单轴拉伸与尺寸效应数值模拟	38
4.1	单轴拉伸数值模拟	38
4.1.1	损伤斑图的生长	38
4.1.2	应力—应变曲线	40
4.2	尺寸效应数值试验	41
4.2.1	应力—应变曲线	42
4.2.2	损伤斑图	42
4.2.3	尺寸效应	44
4.3	本章小结	46
	参考文献	47
5	岩石弹塑性损伤演化的统一模式	49
5.1	引言	49

5.2	损伤演化的统一模式	49
5.3	参数意义	51
5.4	基于统一强度理论的三维损伤模型	54
5.5	低围压验证	56
	参考文献	57
6	岩石塑性机理和中—高围压损伤模型的统一模式	60
6.1	岩石塑性机理	60
6.2	弹塑性损伤本构关系	61
6.3	软、硬化特性	63
6.4	验证与讨论	64
6.5	完全基于实验曲线特征的弹塑性损伤模型	68
6.6	圆柱试件压缩数值模拟	69
	参考文献	72
7	隧道岩爆孕育过程数值模拟与临界平衡分析	73
7.1	引 言	73
7.2	隧洞的格形有限元模型	74
7.3	数值模拟结果	74
7.4	极限平衡分析	76
7.4.1	极限受力分析	77
7.4.2	剪切带失效概率	77
7.4.3	“V”形体冲击性分析	78
7.4.4	“V”形体应变能释放机制	78
7.5	本章小结	81
	参考文献	82
8	长壁回采围岩渐进破坏区数值模拟	84
8.1	计算条件	84
8.1.1	几何模型与数值模型	84
8.1.2	开挖条件与顶板管理	86
8.1.3	损伤参数	87

8.2	计算流程	87
8.3	计算结果	88
8.3.1	裂隙场扩展	88
8.3.2	位移与应力等值线	93
8.4	结果分析	103
8.4.1	关键层破断距	103
8.4.2	采动裂隙场的分布规律	105
	参考文献	106
9	基于损伤—渗流耦合的水力压裂数值模拟	107
9.1	引言	107
9.2	压裂原理和控制方程	108
9.2.1	孔隙流动和压力分布	108
9.2.2	渗流—应力耦合	109
9.2.3	应力场重新分布	109
9.2.4	劈裂准则	111
9.2.5	计算流程	112
9.3	实例	112
9.3.1	几何模型和地应力	112
9.3.2	材料参数	113
9.3.3	注水压力	113
9.4	计算结果	114
9.4.1	裂缝扩展过程	114
9.4.2	主压应力比 $\lambda = \sigma_{T1} / \sigma_{T2}$ 对裂缝扩展方向的影响	114
9.4.3	主压应力比 $\lambda = \sigma_{T1} / \sigma_{T2}$ 对裂缝宽度的影响	115
9.4.4	主压应力比 $\lambda = \sigma_{T1} / \sigma_{T2}$ 对孔隙压力的影响	116
9.5	本章小结	117
	参考文献	117
10	基于微缺陷成核序列的岩石微裂纹生长和损伤演化模型	120
10.1	引言	120
10.2	基于微缺陷累计成核数序列的微裂纹尺度增长模型	121

10.2.1	形成单个微裂纹需要的微缺陷数	121
10.2.2	微缺陷累计成核与微裂纹系统尺度增长	122
10.3	基于微缺陷成核序列的微裂纹损伤模型	124
10.4	微裂纹系统演化图像	125
10.4.1	微裂纹演化图像	125
10.4.2	裂纹系统参数演化	126
10.5	模型验证和应用	128
10.5.1	验证	128
10.5.2	应用	129
10.6	本章小结	130
	参考文献	131
11	边坡剪切滑移带尺度增长预测	133
11.1	引言	133
11.2	微裂纹尺度增长模型	134
11.3	边坡模型和数据统计	134
11.4	分析结果	136
11.5	本章小结	137
	参考文献	138
12	基于损伤能量耗散原理的岩石块度预测	139
12.1	引言	139
12.2	岩石块度分布的分形度量	141
12.3	岩石块度分形演化模型	144
12.3.1	岩石分割的分形损伤断裂机理	144
12.3.2	岩石破碎的分形模型	146
12.3.3	岩石损伤破碎过程能量守恒分析	147
12.4	岩石损伤破碎的理论分析	148
12.4.1	各向同性损伤岩石破碎分析	148
12.4.2	正交各向异性损伤破碎分析	149
12.5	应用	151
12.5.1	公式简化	151

12.5.2 试验确定常数 C	152
12.6 本章小结	154
参考文献	154
13 研究展望	156
附 录 岩石力学试验	157
致 谢	164

1 绪 论

1.1 损伤力学简介

损伤是指在外载荷环境的作用下,由于细观结构的缺陷(如微裂纹、微孔洞等)引起的材料或结构的劣化过程^[1]。而损伤力学学科的形成最早可追溯到1958年苏联科学家卡钱诺夫(Kachanov)在研究金属蠕变破坏时提出的连续场概念,以及1968年拉博诺夫(Rabotnov)提出的有效应力概念,他们为损伤力学的建立和发展做了开创性的工作。但是,此后很长一段时间内,这些概念和方法除了用于蠕变问题研究外,并未引起人们的广泛重视。此后的研究进展:^[2]

1971年,法国学者勒梅特(Lemaitre)提出了应变等效假设,以解决损伤和应变的耦合关系,将损伤概念用于低周疲劳研究。

1972年,英国学者勒基(Leckie)和瑞典学者赫尔特(Hult)提出连续损伤力学概念,将损伤理论的研究向前推进了一步。

1974年,Leckie和Hayhurst第一次将连续损伤力学用于结构损伤分析。

1976年,Budiansky讨论了损伤和弹性的关系;Dufailly和Lemaitre提出了基于刚度损失的损伤测量方法。

1976年,Gurson提出了韧性损伤模型。

1978年,Lemaitre和Chaboche提出了不可逆热力学过程框架内的损伤变量。

1979年,Cordebois和Sidoroff提出了基于能量等价的各向异性损伤模型。

1981年,Murakami和Krajcinovic提出各向异性损伤变量的唯象学物理定义。

至此,一个连续损伤力学的框架基本形成。另一方面,材料科学家也一

直进行着与力学家相同研究对象的研究,所不同的是,他们用材料学的工具,从细观结构上研究损伤的物理和力学过程,并采用了体积平均化的方法得到材料的宏观力学性质,这被称为细观损伤力学。这两种力学分支在 20 世纪 80 年代中后期才被力学家和材料学家在不同层次上加以认可^[1]。

岩石损伤研究的内容非常丰富,包括损伤机理观测、损伤建模以及损伤数值模拟等。它们对于解决一个实际的工程问题是缺一不可的。

1.2 岩石损伤机理检测

近年来,能够较好地反映岩石损伤机理的观测技术有扫描电镜观测技术、声发射技术、CT 观测,它们推动着岩石细观损伤力学的发展。

Sprunt 和 Brace^[3]将扫描电镜技术引入岩石损伤检测研究以来,已有许多研究报道。Tapponnier 和 Brace 研究了利用扫描电镜检测花岗岩中应力诱发的裂纹扩展^[4];Krang 研究了花岗岩蠕变损伤过程中裂纹的生长和发展^[5]。在国内,许江等采用带有微型显微装置的光学显微镜对砂岩进行了不同加载阶段的损伤裂纹分析^[6];谢和平对岩石在加载条件下的损伤断口进行了电镜分析^[7];赵永红等分别采用带有微型加载装置的扫描电镜分析了岩石微损伤的扩展机理^[8,9]。近年来,在扫描电镜观测的基础上,学界开展了数字图像处理技术的研究,以定量描述微损伤的发展^[10]。

岩石受力从微损伤到破坏的过程会产生声发射现象。声发射现象最早在 20 世纪 30 年代由美国矿山局的 Obert 发现,并应用到矿山岩柱稳定性和岩爆的预测预报中^[11]。自那时以来,声发射技术在国外岩土工程和矿山岩体稳定性监测方面得到推广应用^[12]。文献^[13]以受压金属试件为例,通过韧性位错结构说明了声发射产生的原因:位错使原子发生碰撞发出弹性波并释放声发射信号,同时位错运动释放多余的点阵应变能,部分能量表现为弹性振动波,产生声发射信号。文献^[14]按照这个机理类似地解释了岩石声发射产生的微观机理:岩石声发射是由于岩石微团之间以及组成成分之间的分子键的错动,以及先天存在的裂纹、孔隙的摩擦、碰撞、集中应变能的释放等。这些微观机制对岩石力学性能所造成的影响是不可逆的,称为损伤。声发射代表了岩石内部损伤的产生,没有声发射信号,则表明没有损伤形成,这说明声发射与损伤是直接相关的。

CT 技术是射线技术和计算机技术相结合的产物,目前已成功地应用于

医学界的人体检查。它和普通 X 射线投影有着严格的区别。普通的 X 射线投影将三维空间投影到二维平面上,使得厚度方向的信息重叠在一起,而 CT 检测可以识别材料内每一个层面或指定层面的信息,并以高分辨率的数字图像显示出来。不但可以检测材料损伤缺陷的位置、大小,而且还能进行定量分析。鉴于这种独特的优越性,CT 技术已从医学界渗透到工业领域,在复合材料检测、金属结晶状况、冻土及冰的相变分析方面得到不同程度的应用研究。国内从 1994 年起,在中科院兰州冻土研究所冻土工程国家重点实验室开展岩石损伤的 CT 检测研究^[15]。

上述检测方法是通过直接的观测,如 CT 和扫描电镜技术,或直接监测声波数来量化岩石内的损伤程度,属于直接检测法。直接检测技术对于认识岩石损伤机理及损伤演化起到积极的推进作用。

其他的一些损伤检测方法有密度变化检测法、弹性模量下降检测法、超声波检测法、循环塑性响应法^[15]。它们主要通过一定假设建立岩石材料物理量(如密度、弹性模量、超声波速、塑性向应力等)与损伤变量之间的关系。这些方法属于间接检测法。

1.3 岩石损伤模型

损伤力学研究的难点和重点在于含损伤材料的本构理论和演化方程。岩石损伤模型已经发展为三种基本的理论框架:① 细观损伤模型;② 宏观唯象损伤模型;③ 概率损伤模型。近年来,随着岩石动力学灾害预测的重大需要,一些主要针对演化现象的损伤模型也相继被提出,如材料损伤和破坏的逾渗模型、材料损伤破坏的生长模型、统计细观损伤力学模型。下面简述这些理论的发展现状。

1.3.1 细观损伤模型

细观损伤模型从材料的细观结构出发,对不同的细观损伤机制加以区分,通过对细观结构变化进行物理力学分析,采用体积平均化的方法从细观分析结果导出材料的宏观性质。图 1-1 表示了细观损伤力学的基本方法。

首先,在材料中选取一个代表性体积单元(representative volume element, RVE)或体胞(cell),它需要满足尺度的二重性:一方面,从宏观上讲其尺寸足

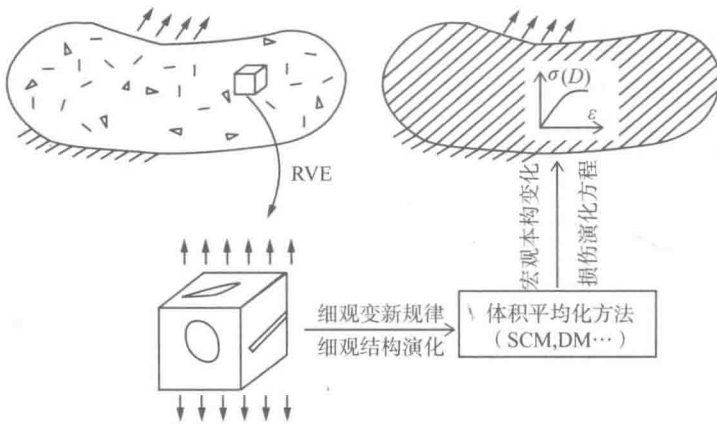


图 1-1 细观损伤力学方法^[1]

够小,可以看作一个材料质点,因而其宏观应力—应变场可视为均匀的;另一方面,从细观角度上讲,其尺寸足够大,包含足够多的细观结构信息,可以体现材料的统计平均性质。利用连续介质力学和连续热力学手段,对代表性体积单元进行分析,以得到细观结构在外载作用下的变形和演化发展规律。其次,通过细观尺度上的平均化方法将细观研究的结果反映到宏观本构关系、损伤演化方程、断裂行为等宏观性质中去。

材料的细观损伤机制有多种,比较典型的有微孔洞、微裂纹、微滑移带、银纹、晶界滑移等,下面主要介绍岩石类脆性材料中比较重要的一类损伤机制,主要有以下典型的计算方法:

① Tailor 模型方法。该方法完全忽略微裂纹之间的相互作用,即认为每个微裂纹均处于没有损伤的弹性基体中,微裂纹受到的荷载等于远场应力。这方面的主要研究者有 Kachanov^[16],Krajcinovic 和 Fanella^[17],Ju^[18]等。这种方法很简单,对于微裂纹分布比较稀疏的情况有很好的精度。由于裂纹之间的应力屏蔽作用和应力放大作用两种机制相互抵消,稀疏分布方法的适用范围很广泛。

② 自洽方法。该方法考虑微裂纹之间的弱相互作用对有效模量的影响,其主要思想是把微裂纹群中任意一条微裂纹看作是嵌含在具有自洽等效柔度基体中的单裂纹,分析单个裂纹引起的变形及其模量变化,然后对所有微裂纹取总体平均,建立有效模量方程,求得材料的有效力学响应。这方面主要有 Budiansky 和 O'Connell^[19],Horii 和 Nemet-Nasser^[20]等人的工作。自洽方法形式简单,受到很多研究者的欢迎,但是研究表明,正是这种对微裂纹