



岩石 混凝土 损伤力学

谢和平 著

中国矿业大学出版社

TU45
X-387

高等学校教学用书

岩石、混凝土损伤力学

谢和平 著

中国矿业大学出版社

696144

内 容 提 要

本书内容包括:损伤及损伤力学,脆性材料的损伤力学分析、不可逆热力学及损伤材料状态方程描述;混凝土的损伤机理、强度及损伤断裂;岩石的微观断裂机理及损伤特征,岩体(包括节理岩体)静态及动态的损伤力学描述和数值模拟;最后介绍了微观与宏观相结合研究岩石、混凝土损伤断裂的新方法—分形几何方法及其研究成果。

本书内容均系近十年来数学和力学中的新理论和新成果,可作为力学、应用数学、土建、采矿、地质、冶金等专业的研究生和高年级本科生的教材或教学参考书,也可供从事脆性材料研究和地下工程方面的科技工作者参考。

责任编辑:谢桂林

高等学校教学用书

岩石、混凝土损伤力学

谢和平

中国矿业大学出版社出版

江苏省新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32 印张10字数249千字

1990年2月第一版 1990年2月第一次印刷

印数:1—1000册

ISBN 7-81021-298-2

O.11

定价:2.20元

前 言

从古典的强度理论的研究开始，到今天仍处在发展阶段的破坏理论，它一直是固体力学中一个十分重要的分学科。近年来，损伤力学异军突起，已成为材料破坏理论中最活跃的分支之一。

岩石、混凝土作为地质材料，它的力学行为及其破坏理论的研究，是岩土工程学当前研究的一个重要部分。它制约着能源回收和开发（石油和天然气、近海和极地的开采，采矿、地热开发等），地下构筑物以及各种岩土工程的提出、设计和控制。岩石、混凝土损伤力学作为一门新的学科分支，目前已引起国内外科技工作者的普遍关注，从1986年起，国内科研机构及高等院校约有成百个研究课题涉及到这一领域；可以预料，它作为固体力学和岩土工程学的前沿领域，今后必将有更可观的发展。

为了不断更新研究生的教学内容，介绍科学技术发展的新领域、新成果，作者就近几年自己的工作及国内外关于岩石、混凝土损伤力学方面的大量研究论文为力学、采矿、建筑、地质等学科研究生编写了“岩石、混凝土损伤力学”这本讲义并开设了这门课程。这次出版在此讲义的基础上进行了修改和补充。

全书分四篇共十二章，第一、二、三、四章介绍脆性材料损伤力学的基本理论；第五、六、七章介绍混凝土的损伤力学；第八、九、十、十一章介绍岩石材料的损伤断裂描述和数值模拟；第十二章介绍用微观与宏观相结合研究岩石、混凝土损伤断裂的新方法——分形几何方法。本书讲授时数为35~40学时。限于作者

1987.10.15

的能力和水平，错误和不当之处，望读者多加批评指正。

本书的出版得到了作者的导师陈至达教授，日本 Takashi Kyoya 教授，美国 B.B.Mandelbrot 教授和中国矿业大学陆士良教授、钱鸣高教授和崔广心教授的鼓励和支持，在此表示衷心感谢。

谢和平

1988年10月

目 录

绪论.....	(1)
---------	-------

第一篇 脆性材料损伤力学概论

第一章 损伤及损伤力学.....	(6)
第一节 损伤现象.....	(6)
第二节 损伤的测定及损伤变量.....	(8)
第三节 损伤的研究方法和内容.....	(14)
第四节 连续损伤力学的描述方法.....	(19)
第二章 不可逆热力学和损伤材料状态方程.....	(29)
第一节 不可逆热力学.....	(29)
第二节 内变量理论.....	(34)
第三节 小变形下损伤材料状态方程.....	(35)
第四节 大变形下损伤材料状态方程.....	(47)
第三章 脆性材料的损伤力学分析.....	(59)
第一节 Krajcinovic 连续损伤理论.....	(59)
第二节 Marigo 脆性和疲劳损伤模型.....	(70)
第三节 Bui和Ehrlacher 损伤模型.....	(77)
第四节 理想损伤模型.....	(80)
第五节 Frantziskonis和Desai损伤模型.....	(83)
第六节 脆性材料损伤的统计模型.....	(88)
第四章 损伤材料的蠕变、疲劳与断裂.....	(90)
第一节 损伤与断裂.....	(90)

第二节	Качанов蠕变损伤方程.....	(94)
第三节	蠕变损伤材料裂纹扩展模型.....	(95)
第四节	多轴应力下损伤材料的蠕变断裂分析.....	(98)
第五节	单轴循环加载下的疲劳损伤断裂.....	(100)
第六节	单轴循环加载下的蠕变损伤断裂.....	(103)
第七节	多轴循环加载下的疲劳损伤断裂.....	(105)
第八节	蠕变、疲劳损伤断裂预估方法.....	(107)

第二篇 混凝土损伤力学

第五章	混凝土的损伤机理.....	(111)
第一节	混凝土的微裂隙对其力学性质的影响.....	(111)
第二节	混凝土微裂纹的产生和发展.....	(114)
第六章	混凝土的损伤力学分析.....	(116)
第一节	损伤理论在混凝土单轴受拉 模式中的应用.....	(116)
第二节	损伤理论在单轴受压混凝土 行为模型中的应用.....	(120)
第三节	线性损伤模型.....	(121)
第四节	Mazars 模型在三维问题中的推广.....	(124)
第五节	考虑损伤的强度计算.....	(125)
第七章	混凝土损伤与断裂分析.....	(130)
第一节	Janson 和 Hult 假说.....	(130)
第二节	Loland 关于混凝土 受拉破坏 的联合理论.....	(131)
第三节	Mazars 关于受弯混凝土结构破坏 的FCM和 CDM 结合理论.....	(136)
第四节	混凝土损伤与断裂的模拟.....	(139)

第三篇 岩石材料损伤力学

第八章	岩石宏观破坏特征及微观断裂机理.....	(148)
-----	----------------------	-------

第一节	岩石的宏观力学性质	(148)
第二节	岩石微观断裂机理分析	(152)
第三节	岩石的局部损伤拉破坏	(166)
第九章	岩石的损伤力学分析	(173)
第一节	岩石的损伤机理和特征	(173)
第二节	岩石的连续损伤力学描述	(179)
第三节	节理岩体的损伤力学描述	(187)
第四节	节理岩体动力学损伤分析	(196)
第五节	断裂后岩体的不连续变形分析	(201)
第十章	岩石蠕变与损伤	(211)
第一节	岩石流变速率物性方程理论模式	(211)
第二节	岩石蠕变与损伤分析	(213)
第三节	岩石蠕变损伤与断裂	(223)
第十一章	岩石蠕变损伤与断裂数值模拟	(224)
第一节	岩石蠕变损伤非线性大变形 有限元分析	(224)
第二节	地下开采的“空单元”模拟	(238)
第三节	岩体蠕变损伤与断裂数值分析	(239)

第四篇 岩石、混凝土损伤断裂 的微结构效应

第十二章	岩石、混凝土损伤断裂的分形特征	(252)
第一节	分形几何概论	(252)
第二节	岩石损伤断裂的分形研究	(260)
第三节	地质材料应力应变曲线的 分形几何特征	(275)
第四节	地质材料力学中的分形几何现象	(278)
第五节	裂纹分叉的分形几何特征	(283)
参考文献		(291)

绪 论

能源回收，结构工程如桥梁、隧道、采矿井巷等构筑物，减轻地震灾害，以及常规防护和核防护等各个领域所具有的进展，都取决于岩石和混凝土材料的力学和热学行为方面新的理论的发展，它涉及到采矿、石油和天然气就地回收，地热开发、核废物隔离、海底隧道、地下仓库，核试验防护外壳，地面和地下爆炸效应等等领域。新的理论应该包括：岩石、混凝土材料的非弹性变形，破坏前和破坏后行为的物性理论、细观结构和宏观结构的影响等等。〔1〕

我们知道材料力学假设材料是各向同性的均匀介质。但在显微镜或光学显微镜下看到材料的组织远非均匀，因而也不可能是各向同性的。岩石、混凝土材料更是如此。这些材料组织中有微裂缝，有时还有宏观的缺陷如裂纹、夹渣、气泡、孔穴、偏析、甚至节理等。意外断裂事故的发生有两个因素：①缺陷（特别是裂缝）的存在；②材料对缺陷的敏感性。缺陷的存在是否就会导致断裂，这要决定于材料本身的性质、即材料对缺陷存在是否敏感。所谓脆性材料（如石膏、陶瓷、岩石、混凝土等）就是对缺陷十分敏感的材料。韧性材料就是对缺陷不敏感的材料。材料是脆性还是韧性，可根据裂缝扩展前，裂纹尖端是否先产生塑性区，以及所产生塑性区的大小而定。脆性材料中的裂缝扩展前，裂缝尖端不产生塑性区，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隙扩展、汇合阶

段所表现的力学行为是我们更为关心的。

岩石和混凝土是明显的脆性材料，它们的非弹性响应十分复杂，表现出金属、合金和聚合物所未遇到过的某些不寻常的特点。这主要是由于存在于材料中的空洞、裂纹、晶粒、胶结、分层等等细观结构对材料响应的显著影响引起的，也是由于流体压力对材料响应的影响引起的。这也导致大家都知道的尺寸效应，较大尺寸试样的行为是受导致不同响应性质的较小尺寸结构的影响。它们共同表现出的材料特性为：

(1) 非弹性体积变化，剪切增强压实，扩容，以及由于裂纹和空洞的存在所引起的依赖于压力的屈服；

(2) 由于内摩擦引起的流动中可能的非正交性；

(3) 脆性应变软化，裂纹和空洞也可能引起弹性非线性，而卸载行为通常是非弹性的；

(4) 非线性蠕变，它们的变形随时间而增长，在应力不变的情况下，微裂隙会不断地发生，变形在不断地增长，经过一段时间至破坏，它的变形随时间变化的曲线和通常的蠕变曲线相似，也可以分辨出第一阶段、第二阶段和加速阶段。

当然由于岩石材料和混凝土材料还有本质的差异，还存在很多各异的力学行为。

如何才能将岩石、混凝土细观的断裂机理与这些宏观特性结合起来，把强度和断裂理论建立于微裂纹(空洞)演化的微观或细观动力学基础上，从而统一导出所有重要的宏观力学量并以某些更基本的物理量表示之？又如何从此出发建立更适于体现应力应变关系的物性方程？这是人们为实现材料的强度和韧性设计必需解决的重要的理论课题，也是地下工程稳定性设计和防护急需解决的现实问题。解决这一难题的基础理论是目前正在发展和广泛应用的连续损伤力学(CDM—Continuous Damage Mechanics)。它是近几年发展起来的一门新学科。随着它的产生和发展，世界

各国开展了许多有意义的研究工作^[1-7]。

损伤就是指在单调加载或重复加载下材料的微缺陷导致其内粘聚力的进展性减弱，并导致体积单元破坏的现象。材料损伤的描述模型可按其特征尺寸和研究方法大致分为微观、细观和宏观三种。微观模型在原子结构层次研究损伤的物理过程以及物质结构对损伤的影响，然后用经典或量子统计力学方法来推测宏观上的损伤行为。由于理论上尚未趋于完备，统计计算量又过于浩繁，这种基于统计方法的微—宏观结合理论目前只能是定性而有限度地预测某些损伤现象。细观模型略去了损伤的物理过程细节，为损伤变量和损伤演变赋予某一真实的几何形状和物理过程，使它们不再仅仅是笼统而抽象的数学符号和方程式，也避免了连续体损伤力学中那些唯象假设，从几何和热力学过程上考虑了各种类型损伤的形状和分布，并可预测它们在不同介质中的产生、发展和最后破坏过程。然而，细观模型的赋予真实的几何形状和物理过程的研究方法不具有一般性和代表性。宏观损伤模型基于宏观尺度上的连续体力学和连续介质热力学，把包含各种缺陷的材料笼统地看成是一种含有“微损伤场”的连续体。引进了在物体内连续变化的损伤变量来描述损伤状态。并在满足力学和热力学基本公设和定理的条件下唯象地确定材料的物性方程和损伤演变规律。目前宏观损伤力学理论的发展正处于一个兴旺发达的百家争鸣的阶段，各国学者都有各自的研究方法和见解。然而也就在这种理论争鸣中，损伤力学被广泛应用于工程实际，解释了若干材料损伤和破坏现象。

损伤力学概念起源于1958年К а н а н о в^[8]研究蠕变断裂时，引用“连续性因子”和有效应力的概念，以后Работнов^[9]又进一步引进“损伤因子”的概念。在此基础上他们采用连续介质力学的唯象方法，研究了材料蠕变损伤过程。此后二十年，这些概念和方法均局限于分析蠕变断裂。直到七十年代后期，原子能工

业和航天技术工业材料行为研究遇到了很多问题,才开始对材料损伤概念重视起来。各国学者给损伤概念引入了物理意义和合理解释,把损伤因子推广为场变量,形成了连续损伤力学(CDM)这门新的学科。1980年5月IUTAM(国际理论与应用力学联合会)委托Krempel^[10]在美国 Cincinnati 举办了“连续介质力学对损伤和寿命预测”讨论班。1981年9月欧洲力学委员会委托巴黎第六大学 Lemaitre^[11]在巴黎近郊 Cachan 组织了一次非正式“损伤力学”讨论会。近年来各种国际会议:如断裂会议 ICF-5、ICF-6;国际材料力学行为会议 IBM;国际核反应堆结构力学会议 SMIRT-5,6,7; IUTAM 举办的“结构中的物理非线性”(1980),“三维本构关系及韧性断裂(1980)”,“结构中的蠕变(1970,1980)”,“压力容器非弹性分析(1982)”;及国际非线性力学会议 ICM(1985)等等专业会议上都有涉及到损伤力学概念的文献。在国内外材料学、力学、原子工业、岩石、混凝土等专业杂志上均可查到损伤力学的文章。在我国这方面的研究还刚刚起步^[11]。李灏教授^[12]1982年在中国力学学会第二届理事会上作过“损伤力学与断裂”的报告。黄克智教授^[13]编写了“损伤与断裂讲义”。1985年12月召开了全国第一届损伤力学讨论会。1988年5月在广州召开了全国断裂与损伤研讨会。可见国内外都很重视损伤力学这一新学科。

岩石和混凝土在自然状态下就是一种明显的多孔隙介质,岩体工程的失稳,大多是由断层和裂隙扩展促成的,如法国的马耳帕塞坝,是筑在微裂隙发育的片麻岩上的薄拱坝,1959年12月发生事故,坝踵前缘岩体出现了宽0.4~0.5m的裂缝,勘察分析该坝失稳的根本原因是片麻岩体中的微裂隙扩展造成的。我国梅山连拱坝基岩体及一些有压坠洞中也发生过类似的裂隙扩展问题。地下工程中由于开采引起顶板上覆岩层的破坏,围岩松动,离层的形成显然也是岩体中微裂纹扩展汇合造成的。由实验观

察^[14]在岩石4mm²的视域内,一旦有微裂隙少则十几条,多则几十条,只有40%的点无微裂隙。以往用弹塑性有限元计算岩体应力场和位移场,由于没有考虑岩体内这些微裂隙的影响,使得计算值和实测值有成量级之差,经典的岩体力学理论无法定量地去模拟岩体的应力位移状态。

把损伤力学应用于岩石和混凝土材料最早见于 Dougill^[15] (1976)。Dragon^[16] (1979) 利用断裂面概念对岩石和混凝土的连续损伤进行了理论探讨。Krajcinovic^[17,18] (1981) 使用热力学和空穴运动学对脆性材料的损伤本构方程进行了较全面的研究。近几年来损伤力学已被广泛应用于岩石、混凝土的强度计算和设计以及采矿工程的岩石力学分析,发展是相当迅速的,有关的文献浩繁。但作为一门理论,尚嫌不够系统和完善,仍需要做大量的理论研究和试验分析工作。比如如何选择合适的损伤变量并能把导出的公式简化到适用于工程计算水平;如何进行有效的损伤实验测试,判别岩石混凝土的初始损伤状态;观测不同应力条件下,损伤的发展条件和发展规律,提出一些简明实用的损伤破坏判据等等。可以说,它还是一个等待开拓的新领域。本书的目的是愿与前辈和同行们共同探讨和研究,深望我国在岩石、混凝土损伤力学的理论研究和应用方面取得更大更多的成绩,为我国四化建设服务。

第一篇 脆性材料损伤力学概论

第一章 损伤及损伤力学

众所周知，断裂力学是以实际固体中不可避免地存在宏观裂纹这一客观事实为前提的。它的任务是通过对裂纹周围的应力、应变分析，着重解决材料的失效问题。但是大多数材料与结构，在宏观裂纹出现之前，已经产生了微观裂纹与微观空洞，人们将材料与结构中的这些微观缺陷的出现和扩展称为损伤。

实验证明，宏观裂纹出现之前，损伤已经影响了材料和结构的强度与寿命。连续损伤力学或简称损伤力学就是为研究这一现象而形成的力学的一个新分支。

第一节 损伤现象

首先让我们看一看几个试验结果。

用一混凝土圆柱体做加载——卸载压缩试验，Benouniche的试验结果表明，试件的纵向和横向的弹性模量都随着载荷过程而变化(图1-1)〔1〕。

岩石在单轴拉、压的加载——卸载试验曲线也表现出同样的特性(图1-2)。

以上实验都表明，材料在载荷的反复作用下，每次载荷循环

的力学响应都不相同，这显然是由于材料逐渐损伤导致的。

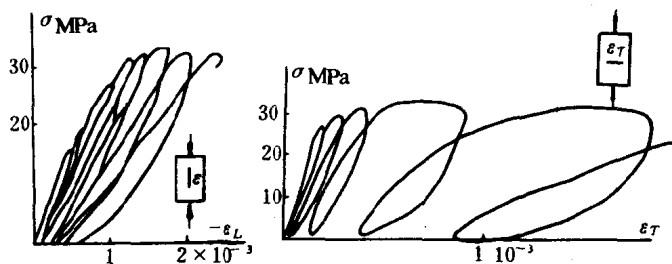


图1-1 混凝土应力应变曲线

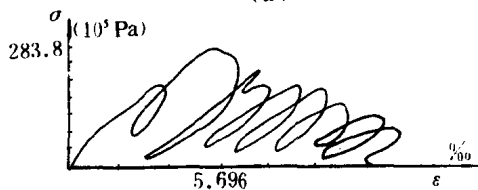
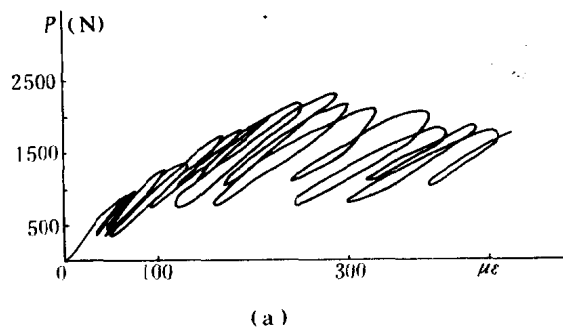


图1-2a 花岗岩间接拉伸曲线(劈裂法)

图1-2b 砂岩单轴压缩实验曲线〔19〕

当人们用线弹性体来模拟时，上述试验表明了材料的杨氏弹性模量随着损伤的增加而逐渐变小。如果将它们看成粘弹性体时，又将有何反响呢？文献〔20〕给出了材料的内阻尼与损伤的关系。将一组(十根)混凝土圆柱体试件预制不同程度的损伤，然后用衰减振动法分别测其内阻尼，测试结果表明：内阻尼随损伤程

度 D 的增加而增加(图1-3)。

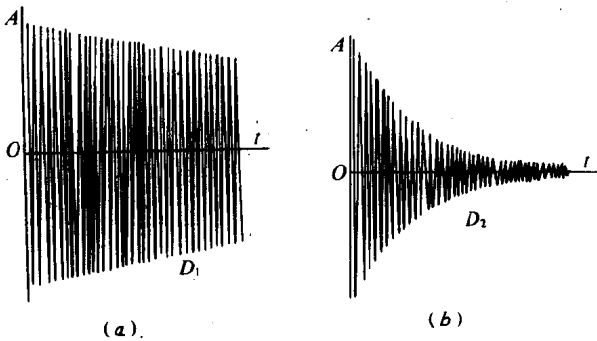


图1-3 内阻尼测试 $D_1 < D_2$

总之,材料损伤后,随着微观结构的变化,宏观的各种物理响应均有变化。

第二节 损伤的测定与损伤变量

研究损伤的最直接的方法是用金相学方法直接测定材料中各种微缺陷的数目、形状大小,分布形态、方位取向、裂纹性质(张开型还是滑移型)以及各类损伤所占的比例。Ashby^[21](1975, 1980), Argon^[22](1981), Dyson^[23](1972), Gittus^[24](1981)等人都曾测定过材料的蠕变损伤,并从材料学角度提出预测蠕变寿命的方法。Cordier和Dang Vang(1981)^[25]用已破坏的晶粒数目和全体晶粒数目的比值,作为疲劳损伤的损伤变量。采用定量金相电子显微镜能有力地促进这方面的工作。欧阳平(1982)^[26]曾用激光散斑频谱相关法测量金属疲劳表面损伤。Schaffel(1980)^[27]指出声散斑干涉法可以测得不透明固体内部的变形信息。超声显微镜可测出微米级的内部损伤(Matera, 1978^[28]);小角度中子散射可测出 $10\text{\AA} \sim 1000\text{\AA}$ 的孔隙。据报导,声谐波、声衰减、正电子湮灭技术,红外紫外摄象, X射线等技

术,都是检测损伤的手段。采用带有加载装置的光学显微镜^[19]和扫描电镜可观测损伤的形成和发展。据报道,日立与Instran公司已联合研制出同扫描电镜相组合的高温蠕变疲劳试验装置。Lockheed公司采用超声图象处理技术观测了固体推进剂裂纹前缘的损伤场(Martison(1982)^[30])。我们对岩石在各种加载条件下破坏后的断口用扫描电镜进行了观察和分析,得到了一些有意义的损伤图片^[31],对于损伤研究有一定的参考价值。

由于材料中损伤孔隙数目众多、形状多异,不可能对它们一一作出几何学的描述。对它们的演变,即使作出运动学的描述,也由于微观测定量和宏观力学量之间量级悬殊,而不能直接用于结构分析。所以力学工作者采取一种抽象的“损伤变量”,它可以是各阶张量,如标量、矢量、二阶张量等,来概括地描述损伤。

Качанов^[8]和Работнов^[9]引进了最简单的损伤变量。设有简单拉伸试件,其原始横截面积为 A_0 ,由于某种原因产生损伤后的瞬时表观面积为 A ,此时横截面上出现孔隙的总面积为 A_D ,试件实际承载面积为 A_f ,则

$$A = A_D + A_f$$

Качанов用 $\phi = \frac{A_f}{A}$ 定义连续性因子,而Работнов用 $D = \frac{A_D}{A}$ 定义损伤因子。于是

$$D + \phi = 1 \quad (1-1)$$

他们认为:原始状态下没有损伤,所以损伤演变的初始条件是 $A_D = 0$, $A = A_0$, 即 $\phi_0 = 1$, $D_0 = \frac{A_D}{A_0} = 0$ 。而当试件内部损伤发展到极限状态时(断裂破坏),则认为有 $A_f = 0$, $A = A_D$, $\phi_f = 0$, $D_f = \frac{A_D}{A} = 1$ 。但由于存在初始孔隙 $D_0 > 0$,实际上破坏时 $D_f < 1$,因为试件在有效面积消失以前已不能继续维持结构的平衡。