

# 《裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用》

## 书籍信息

版次：1

页数：

字数：

印刷时间：2012年08月01日

开本：16开

纸张：

包装：精装

是否套装：否

国际标准书号ISBN：9787030347336

丛书名：岩石力学与工程研究著作丛书

## 内容简介

《裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用》结合我国水利水电、交通、矿山等地下工程建设中基础理论与工程技术的难点，用实验室试验、现场试验、现场监测、数值仿真与反馈分析等方法对裂隙岩体力学特性、本构模型、反演方法及锚固可靠性等方面进行论述，研究工程岩体宏观力学与渗透参数的取值方法、复杂本构模型以及多场耦合参数的有限元反演、流变岩体锚固机理及地下工程的支护可靠度；介绍了岩土介质在复杂温度-渗流-应力耦合条件下的试验技术及仪器设备。《裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用》还介绍了研究成果在国内重大水利水电、交通、矿山等地下工程中的应用。

《裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用》理论分析与工程应用紧密结合，所提出的理论研究成果在工程中得到了应用和验证，具有广泛的工程应用价值。《裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用》研究领域为岩土及地下工程，可供水利、矿山、土木、交通等专业的科技人员和相关专业的高等院校师生参考。

## 目录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第一章 绪论

1.1 裂隙岩体地下工程稳定性分析研究现状

1.2 研究内容与研究方法

参考文献

第二章 工程岩体裂隙扩展机理研究

2.1 引言

2.2 非饱和岩石微裂隙扩展机制研究

2.3 三维预制裂纹岩石扩展机理研究

2.4 雁形裂纹扩展的断裂机制与模型试验

2.5 裂隙岩体岩桥扩展机制研究

2.6 裂纹动态扩展有限元模拟方法

2.7 本章小结

参考文献

第三章 工程岩体宏观力学特性及其参数取值研究

3.1 引言

3.2 岩石三轴试验与力学模型研究

3.3 结构面剪切试验与力学模型研究

3.4 各向异性弹性体的柔度张量形式及求解

3.5 工程岩体宏观力学参数的研究方法

- 3.6 岩体变形模量的尺寸效应和各向异性研究
- 3.7 岩体抗压强度尺寸效应和各向异性的研究
- 3.8 岩体力学强度参数研究
- 3.9 本章小结

#### 参考文献

### 第四章 工程岩体宏观渗透参数取值研究

- 4.1 引言
- 4.2 低渗透介质温度-应力-渗流耦合试验仪简介
- 4.3 岩石渗透率的计算方法
- 4.4 结构面渗透率的计算方法
- 4.5 低渗透岩石渗透试验结果
- 4.6 岩石结构面气体渗透试验结果
- 4.7 各向异性连续介质的渗透系数张量形式及求解
- 4.8 岩体渗透特性尺寸效应及各向异性的研究方法
- 4.9 岩体渗透特性尺寸效应及各向异性的研究
- 4.10 本章小结

#### 参考文献

### 第五章 裂隙岩体损伤断裂机理及其强度特性

- 5.1 引言
- 5.2 多裂隙岩体相互作用机理研究
- 5.3 岩体裂隙蠕变断裂机制及其损伤演化方程研究
- 5.4 断续节理岩体强度特性研究
- 5.5 本章小结

#### 参考文献

### 第六章 裂隙岩体渗流应力耦合特性的研究

- 6.1 引言
- 6.2 裂隙岩体损伤渗流应力耦合力学特性研究
- 6.3 软岩与水相互作用机理研究
- 6.4 多孔介质渗流应力耦合理论研究
- 6.5 软岩渗流-损伤耦合模型的研究
- 6.6 泥岩微裂隙损伤自愈合模型研究
- 6.7 本章小结

#### 参考文献

### 第七章 岩体非线性流变特性试验和理论研究

- 7.1 引言
- 7.2 软岩应力-渗流耦合试验仪研制
- 7.3 软岩现场三轴流变试验
- 7.4 软岩渗流应力耦合流变力学模型研究
- 7.5 裂隙岩体黏弹塑性损伤耦合率本构方程
- 7.6 岩石能量耗散蠕变损伤模型
- 7.7 经验幂函数非线性蠕变损伤模型
- 7.8 本章小结

## 参考文献

### 第八章 地下工程围岩力学参数反演分析理论

#### 8.1 引言

#### 8.2 基于侧压力系数的三维初始地应力场反演理论

#### 8.3 地下工程围岩力学参数反演理论

#### 8.4 岩土介质弹塑性损伤本构模型参数反演分析

#### 8.5 基于损伤渗流耦合模型的工程岩体参数反演分析研究

#### 8.6 本章小结

## 参考文献

### 第九章 地下工程锚固时效性及可靠性研究

#### 9.1 引言

#### 9.2 锚固微元体受力特征研究

#### 9.3 黏弹塑性围岩体锚固体力学分布特性

#### 9.4 流变岩体锚固界面试验研究

#### 9.5 锚固界面的接触力学特性研究

#### 9.6 锚固界面流变本构模型的建立

#### 9.7 接触本构模型的数值仿真

#### 9.8 地下工程锚固可靠性研究

#### 9.9 本章小结

## 参考文献

### 第十章 地下工程稳定性分析理论在大型工程中的应用

#### 10.1 锦屏二级水电站引水隧洞宏观力学参数研究

#### 10.2 淮南刘庄煤矿深埋软岩巷道支护设计优化及稳定性研究

#### 10.3 裂隙岩体蠕变损伤力学模型在龙滩急倾斜地下厂房中的应用

#### 10.4 厦门翔安海底隧道应力渗流耦合反演及长期稳定性研究

#### 10.5 大岗山地下厂房地应力反演及锚固时效性、可靠性研究

## 参考文献

## 在线试读部分章节

### 第一章 绪论

#### 1.1 裂隙岩体地下工程稳定性分析研究现状

1.1.1 岩石裂隙扩展研究进展及现状Griffith [ 1 , 2 ] 在1920年、1924年相继发表的两篇论文建立了脆性断裂力学理论的基本框架，之后，国内外学者在断裂理论和实验方面进行了广泛和深入的研究。

1966年，Brace等 [ 3 ] 提出二维裂隙滑移开裂模型，认为滑动裂隙端部生成的弯折型张性裂纹是在压剪型荷载作用下新裂纹生成的主要机制，并根据该模型对岩石破坏前的扩容现象进行了微观解释。同时指出，在准静态方式下，裂隙的进一步扩展要求压力连续

增长以维持这个过程，而次生裂纹最初是以突跃的方式出现的。

相反，试件在受拉状态下，裂纹的增长是不稳定的。该模型对解释岩石中微裂纹的延性开裂机制是适宜的，但该模型没有考虑裂隙间的相互作用，因而也只适用于裂隙密度较小和裂隙扩展前期的情况。

朱维申、陈卫忠等 [ 4~6 ] 通过相似材料模拟试验的方法研究了双轴压缩荷载作用下闭合雁形裂隙的起裂、扩展和岩桥的贯穿机理，得到在双轴压缩荷载的作用下，不同方位雁形裂隙的开裂角、起裂荷载、岩桥贯通荷载及临界失稳荷载等重要的断裂力学参数。任伟中等 [ 7~9 ] 通过直剪试验条件下的模型试验，研究了不同节理连通率、节理排列方式、正应力条件下同时包含闭合节理和岩桥的剪切面的变形和强度特性及其相应的变化规律，探讨了节理、岩桥变形和破坏机理，并建立起表征岩桥初裂强度和不同破坏模式下的贯通强度计算公式。

香港大学黄凯珠等在岩石裂纹扩展方面通过物理实验和数值模拟，研究双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置三裂纹的萌生、扩展和贯通机制，结果显示，裂纹贯通模式主要受加载条件与预置裂纹几何分布的影响，裂纹在双轴加载条件下有拉、剪、压和混合贯通等模式 [ 10~20 ]。研究认为，压裂纹是在侧压下产生的次生裂纹，其贯通受制于两非共线的重叠裂纹间的距离。

Ayatollahi 等 [ 21 ] 采用PMMA 材料制成包含一个边裂纹的标准SCB 试样，进行纯和纯型裂纹的断裂试验，试验发现，对采用NSCB 试样的断裂试验来说，最大拉应力准则过高估计了断裂强度，而裂纹扩展路径则与试验结果基本一致。

第一章 绪论 1.1 裂隙岩体地下工程稳定性分析研究现状 1.1.1 岩石裂隙扩展研究进展及现状 Griffith [ 1

, 2 ] 在1920年、1924年相继发表的两篇论文建立了脆性断裂力学理论的基本框架，之后，国内外学者在断裂理论和实验方面进行了广泛和深入的研究。1966年，Brace 等 [ 3 ] 提出二维裂隙滑移开裂模型，认为滑动裂隙端部生成的弯折型张性裂纹是在压剪型荷载作用下新裂纹生成的主要机制，并根据该模型对岩石破坏前的扩容现象进行了微观解释。同时指出，在准静态方式下，裂隙的进一步扩展要求压力连续增长以维持这个过程，而次生裂纹最初是以突跃的方式出现的。

相反，试件在受拉状态下，裂纹的增长是不稳定的。该模型对解释岩石中微裂纹的延性开裂机制是适宜的，但该模型没有考虑裂隙间的相互作用，因而也只适用于裂隙密度较小和裂隙扩展前期的情况。朱维申、陈卫忠等 [ 4~6 ] 通过相似材料模拟试验的方法研究了双轴压缩荷载作用下闭合雁形裂隙的起裂、扩展和岩桥的贯穿机理，得到在双轴压缩荷载的作用下，不同方位雁形裂隙的开裂角、起裂荷载、岩桥贯通荷载及临界失稳荷载等重要的断裂力学参数。任伟中等 [ 7~9 ] 通过直剪试验条件下的模型试验，研究了不同节理连通率、节理排列方式、正应力条件下同时包含闭合节理和岩桥的剪切面的变形和强度特性及其相应的变化规律，探讨了节理、岩桥变形和破坏机理，并建立起表征岩桥初裂强度和不同破坏模式下的贯通强度计算公式。

香港大学黄凯珠等在岩石裂纹扩展方面通过物理实验和数值模拟，研究双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置三裂纹的萌生、扩展和贯通机制，结果显示，裂纹贯通模式主要受加载条件与预置裂纹几何分布的影响，裂纹在双轴加载条件下有拉、剪、压和混合贯通等模式 [ 10~20 ]。研究认为，压裂纹是在侧压下产生的次生裂纹，其贯通受制于两非共线的重叠裂纹间的距离。Ayatollahi 等 [ 21 ] 采用PMMA

材料制成包含一个边裂纹的标准SCB 试样，进行纯和纯

型裂纹的断裂试验，试验发现，对采用NSCB 试样的断裂试验来说，最大拉应力准则过

高估计了断裂强度，而裂纹扩展路径则与试验结果基本一致。Al-Shayea 在巴西圆盘试样上预制线型穿透裂纹，进行了 + 复合型加载条件下的裂纹扩展试验，对裂纹的起裂角和扩展路径进行了研究和分析 [ 22 ]。研究认为，当裂纹倾角不大时，最大拉应力理论可以预测裂纹起裂方向，但当裂纹倾角较大时，由于裂纹面闭合，裂纹扩展路径并不沿预制裂纹尖端方向，因此此时圆盘试样已经不再适于断裂韧度等方面的分析。Nara 等 [ 23 ] 采用花岗岩试样开展双剪试验，通过不同温度和蒸汽压力，得到次生裂纹的扩展能，进而可以得到不同温度、蒸汽压力和应力集中系数下裂纹的扩展速度。Nara 等 [ 24 ] 还采用安山岩和花岗岩试样开展双剪试验。结果表明，在保持相对湿度恒定的情况下，裂纹扩展速度随温度的升高而增加；在保持温度恒定时，裂纹扩展速度随相对湿度的升高而迅速增加，通常3~4倍的相对湿度变化将引起裂纹扩展速度1~4个数量级的变化。Park 等 [ 25 ] 开展了单轴压缩下预制裂纹石膏试样的裂纹扩展试验。试验发现，裂纹类端有翼裂纹、共线裂纹和剪切斜裂纹产生，并且闭合裂纹试样与开裂裂纹试样的试验结果是一致的。李强等 [ 26 ] 采用熟石膏模型试样研究发现，翼型裂纹从原裂纹的尖端出发，沿曲线路径扩展，并逐渐逼近过裂纹中点且平行于最大主应力方向的一条直线，据此提出双曲线形式的翼裂纹扩展模型。在三维裂纹研究方面：Sahouryeh 等 [ 27 ~ 30 ] 在方形试样上预制人工三维裂纹，进行了砂岩、混凝土和树脂试样的双轴压缩试验。试验结果表明，双轴压缩荷载加载下裂纹的扩展与单轴压缩下是不同的。研究认为，单轴压缩下在裂纹边缘产生的包裹型翼裂纹是限制翼裂纹继续扩展的原因，而在双轴压缩下翼裂纹可以充分发展从而引起试样劈裂破坏。Dyskin 等 [ 31 ~ 33 ] 进行了大量二维、三维裂隙的扩展方面的试验和理论研究。Sahouryeh 等采用树脂、水泥砂浆材料，通过改变裂纹的形状和长度，研究单轴压缩下三维内置裂纹的扩展规律，发现三维裂纹扩展规律与二维扩展规律很不同，其裂纹尖端生成的包裹型裂纹会限制张拉型翼裂纹的发展。对于两共面裂纹，剪切裂纹只有当两裂纹间距达到某一临界值时才会产生。Wong 等 [ 34 ] 研究了含三维边裂纹PMMA 试样和大理石岩样的裂纹扩展试验，通过改变预置裂纹深度和倾角，研究裂纹起裂模式和扩展路径。试验发现，预置裂纹尖端不仅有翼裂纹出现，而且产生了包裹型（型）裂纹；裂纹扩展长度取决于裂纹深度、倾角和试样材料性质。Heyder 等 [ 35 ] 采用PMMA 材料，进行了三维裂纹的四点弯曲疲劳试验，并考虑了 型加载、型加载和 + 混合型加载模式。试验发现，在裂纹前缘，应力分布总是趋向于使裂纹前缘应力场形成 $r^{-0.5}$ 奇异性，认为经典的应力集中系数判据可以用于三维裂纹稳态扩展的判据。黄达等 [ 36 ] 通过裂隙岩体物理模型试验，发现卸荷条件下裂隙试样的强度、变形破坏及裂隙扩展均受裂隙与卸荷方向夹角及裂隙间的组合关系影响，卸荷速率及初始应力场大小主要影响岩体卸荷强度及次生裂纹的数量；裂隙扩展是在卸荷差异回弹变形引起的拉应力和裂隙面剪切力增大而抗剪力减小的综合作用下的破坏。近年来，随着高分辨率数码相机的不断涌现，数字图像测试技术得到了发展。数字图像相关技术是由Sutton 等 [ 37 , 38 ] 在20世纪80年代发展起来的一门无损测量技术，它利用数码相机记录物体不同状态下的图像，然后对两张图像内同一大面积的子空间进行像素相似度比较，从而找到物体初始位置对应的变形后的实际位置。根据物体初始空间位置到变形后的空间位置之间转换关系，利用不同方法（比如有限元、平均梯度法）确定全场应变分布。Yang 等 [ 39 ] 在这一方面做出了新探索。1.1.2 裂隙岩体断裂损伤实验研究进展及现状在裂隙岩体断裂损伤实验研究方面，主要有模型试验、声发射

技术、扫描电镜技术和CT技术等。

在模型试验方面，国内外学者进行了众多研究。自从1967年举行的第九届国际大坝会议及同年举行的国际岩石力学会议上提出用材料的块体组合来模拟多裂隙岩体介质的设想以后，国内外学者对裂隙岩体的力学性质做了许多研究。Goldstein、Hayashi、Lama、Kawamoto、Muller、Einstein、Brown等许多学者利用模型试验，对裂隙岩样进行了单压、单拉、纯剪的试验，同时也进行了二维及三维的压缩试验，对影响裂隙岩体强度特性、变形特性、破坏方式等因素做了分析研究。周维垣等[40, 41]进行了众多水电站的地质力学模型试验。他们在处理裂隙岩体中数量众多的节理裂隙时，认为必须对其作适当的简化，但在各个方向节理裂隙出现的频度、原型与模型应保持相似，即原型岩体内各个方向单位长度内缝隙数之比应与模型相同；刘东燕等[42]通过含中心裂纹砂浆试件的单轴压缩试验，测试并分析了裂纹扩展过程中的声发射特征和裂纹面的相对位移特性。试验证明，岩石类脆性材料的压剪断裂破坏机理与拉剪断裂有本质的区别，裂纹面相对位移变化与轴压荷载和声发射具有一定的同步性；黎立云等[43]采用类岩石材料白水泥模拟多裂纹岩体进行了双向加压实验，对裂纹开裂角、初始开裂荷载的理论计算值和实验值进行了对比分析；黄凯珠等[44]采用类砂岩模拟材料，研究双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置三裂纹的萌生、扩展和贯通机制。结果表明，裂纹贯通机制主要受加载条件与预置裂纹的几何分布影响；郭少华[45]进行了含中心裂纹的矩形石膏试件单轴、双轴压缩条件下的破坏试验，对裂纹起裂位置、起裂角、应力集中、断开模式进行了研究。模型试验结果直观，建立在一定的物理背景之上，具有较强的说服力，因而成为进行岩石力学研究一种不可或缺的重要手段。

近年来，随着声发射技术的发展、高倍扫描电子显微镜以及CT

试验机的出现，裂隙岩体断裂损伤的实验研究得到较快发展。刘东燕等[46]用水泥砂浆模拟含裂隙岩石试样，在刚性压力机上进行单轴压缩试验，通过声发射测试技术，分析含裂隙岩石在受压过程中新裂纹的萌生、扩展、断裂破坏全过程，并对含中心斜裂纹试样受压破坏的声发射特征进行研究，根据声发射过程线特征段上的转折点区分裂纹扩展的阶段。研究表明，试件受压破坏过程中的声发射事件主要来源于裂纹尖端新生裂纹发展时的能量释放。Tsuyoshi[47]对4种不同粒度花岗岩试样进行了水压致裂声发射测试，研究了粒度和不同黏度液体作用下试样的断裂机制。研究表明，当粒度较大时，以剪切破坏机制占主导，当粒度较小时，以张拉破坏机制占主导；当裂隙中注入高压水后，以剪切破坏机制占主导，当注入黏度较高的油时，以张拉破坏机制占主导。李银平等[48, 49]采用含预制裂隙大理岩试件，对压剪应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究，根据试样的不同声发射特征，分析材料损伤断裂过程的不同机制。Lei等[50]选用含裂隙面花岗岩和泥岩试样，采用32通道高速声波测试仪，对试样的断裂过程进行声发射的时空记录，并将裂纹的损伤演化过程分为三个阶段。Changa[51]采用声发射技术研究了Hwangdeung花岗岩和Yeosan

大理岩试样的微裂纹汇合问题，分析其断裂损伤的微观机理。

研究表明，三轴压缩荷载下岩石的破坏机制以剪切破坏为主导，并且随着围压的增加，剪切破坏的主导性增强。另外，Zinina等[52]、Tang等[53]、Rudajev等[54]、Chang[55]、Xu等[56]、Zietlow等[57]

都曾采用声发射技术进行了岩石破坏特征的研究。在扫描电镜试验方面，周维垣等[58]采用黑色大理石试样，进行了岩石材料切片的扫描电镜(SEM)下的断裂试验及宏观试件的三点弯曲断裂试验，研究试样细观破坏的机理及宏观断裂破坏形成的过程，并采

用局部化理论和分数维重正化理论相结合的近似方法，即用细观网格代替局部的不均一性，建立了岩石、混凝土材料细观开裂网格模型；肖洪天等 [ 59 ] 采用扫描电镜，即时记录了裂纹尖端的微裂纹发育和演化过程，并应用双扭试件，对三峡船闸花岗岩进行了亚临界裂纹扩展试验，得到花岗岩的断裂力学参数；朱珍德等 [ 60 ] 选取三峡船闸高边坡花岗岩和山西万家寨水电站灰岩进行不同应力状态的全应力-应变过程渗透性对比试验，然后将其岩石破坏断裂断面进行微观扫描电镜试验，分析了脆性岩石的微观断裂形式，认为脆性岩石的断裂机理有两种，即剪切破坏和翼裂纹扩展破坏；赵永红等 [ 61 ] 对房山大理岩进行了单轴压缩条件下大理岩填充割缝周围微裂纹生长的扫描电镜实时观测研究，微裂纹首先呈剪切破裂带状发育，随外载的增加而连通形成断裂带，割缝填充后微裂纹萌生所需的荷载水平明显提高。1986

年，日本首先研制成功室内受压岩样弹性波CT

机，并用该机对受压岩样内部裂隙发展过程进行了研究，取得了丰硕成果，这标志着CT技术被引入岩石力学领域，成为岩石力学CT技术研究和应用的开端。1989 ~ 1991

年，Raynaud、Fabre和Vinegard等分别利用CT机研究受轴对称荷载的岩石。研究显示，初始非均匀性和局部密度变化是由岩石内部破坏机理引起的。Verhelst等于1995年利用X射线CT机研究了岩样的微裂缝和不均一结构；Kawakata等1997年用X射线CT机研究了Westerly花岗岩在三轴压缩时的损伤扩展特性。杨更社等 [ 62 , 63 ]

在国内最早应用医用X射线CT机重点对岩石的初始损伤特性进行了研究，给出用CT数表示的岩石损伤变量公式并对单轴压缩荷载作用下砂岩的损伤扩展机理进行了CT实时初步试验研究。葛修润等 [ 64 ~ 66 ] 利用自己研制成功的岩土CT

专用三轴加载装置进行了三轴和单轴压缩下的煤岩试件细观损伤扩展情况的CT动态即时扫描试验，实现了不卸载扫描，首次获得了实时CT图像，使试验技术有了新的突破。他们通过试验得到在不同荷载作用下煤岩材料中微孔洞被压密 微裂纹萌生

分叉 发展 断裂 破坏 卸载等各个阶段清晰的CT图像，从细观尺度上证实了岩石疲劳破坏存在门槛值及疲劳损伤扩展具有不均匀性和局部化现象，得出循环荷载轴向应力最大值的变化对疲劳损伤寿命影响很大，该值越接近门槛值，岩石越易发生疲劳破坏。葛修润等利用与CT机配套的专用三轴加载试验设备，研究了砂岩在三轴或单轴荷载作用下破坏全过程的细观损伤扩展规律，给出砂岩应力损伤门槛值的范围，以及砂岩的初始细观损伤具有不均匀性，并将岩石破坏全过程宏观曲线划分为损伤弱化、准线形、损伤开始演化、损伤稳定发展、损伤加速发展和峰后损伤急剧发展等几个阶段。从理论上推导出密度损伤增量的概念，实现了对岩石密度损伤的定量描述，建立了岩石体积变形与密度损伤增量的定量关系 [ 67 ~ 69 ] 。丁卫华等 [ 70 ] 提出CT

尺度裂纹的概念，其含义是基于X射线CT

设备分辨率水平，通过图像处理，能够从CT图像中识别的特定物质或结构的最小尺度，尤其是图像中的线状或环状影像的尺度。岩石内部裂纹宽度达到10-1 mm

或更大时，已可从CT图像中识别。CT尺度裂纹出现时，岩石试件必须考虑结构效应而不能看成简单的岩石材料。相对于岩石试件，CT

尺度裂纹介于宏观、细观裂纹之间。简浩 [ 71 ]

采用相似材料，用水、细砂、水泥、憎水剂按1 4 5 0.2的质量比例，均匀混合后按国际岩石试件标准制取了含内置单裂纹试件，进行了裂隙内含有压水和水压致裂的单轴、三轴压缩破坏CT实时试验，对水压致裂过程裂隙的扩展规律和试样损伤演化过程进行了分析。李术才等 [ 72 ] 采用类岩石陶瓷材料，成功制取了类岩石材料三维内置币

状裂纹，进行了单轴和三轴压缩状态下含单裂隙、双裂隙、三裂隙试件的CT实时试验，并根据试验结果，计算了含裂隙脆性岩体三维有效柔度张量，建立了三维裂隙岩体脆弹性断裂损伤本构关系。敖波等 [ 73 ] 对高分辨率CT

技术在疲劳裂纹研究领域的进展进行了系统调研与总结。CT

检测技术在岩土材料的细观试验研究方面受到众多学者和专家的关注，当然，将CT技术应用到岩土工程领域，还有不少方面尚有待完善和发展。1.1.3 裂隙岩体断裂损伤研究进展及现状岩体断裂损伤力学对岩体从微裂纹萌生、扩展、演化到宏观裂纹的形成、断裂、破坏全过程进行研究，把岩体中的微裂纹和微孔洞作为岩体的一种初始损伤，把裂隙张开、闭合、滑移、扩展与贯通的过程看成是损伤的演化过程，通过引入损伤变量并建立损伤变量演化方程，通过几何的或能量的方法结合到本构方程中，从而可以描述裂隙对岩体宏观力学行为的影响，进而分析裂隙岩体的稳定性。

材料在外界的作用下，因内部缺陷的产生和发展而劣化，且此过程是不可逆的。材料的破坏过程就是这种劣化的累积过程，当损伤累积至一定程度后材料就产生宏观裂纹，致使材料破坏。损伤力学是确定损伤连续场变量的演化规律，研究连续介质力学和研究耗散过程的不可逆热力学。材料的损伤实质上是材料微细观结构的变异，要了解损伤的成因及其微结构形态和特征，又需要细观和材料学的方法。细观方面，可以选用孔隙数目、长度、面积、体积等；宏观方面，可以选用弹性系数、屈服应力、伸长率、密度、电阻、超声波速和声发射率等，相应于这些度量损伤的基准，可以建立不同损伤本构模型，得到不同的损伤演化方程 [ 74 ] 。

细观损伤研究主要从细观或微观角度研究材料微结构的形态和变化及其对材料宏观力学性能的影响，再通过连续介质力学方法和热力学理论建立连续损伤模型。统计损伤方法是基于岩石的非均质性（包括微裂纹、微空洞等缺陷的随机性以及弹性模量、强度的非均匀性），将概率统计理论和损伤理论结合起来研究岩石类材料的本构理论 [ 75 ] 。

宏观损伤方法是从宏观的现象出发并模拟宏观的力学行为。宏观唯象学研究的目的是在材料的本构关系中掺入损伤场变量，使得含有损伤变量的本构关系能更好地描述受损材料的宏观力学行为。损伤力学发展至今较为成熟的一些损伤模型主要是用宏观唯象方法研究的结果。宏观损伤研究方面：连续损伤理论就是以连续介质力学和不可逆热力学为基础，从宏观现象出发并模拟宏观的力学行为。Krajcinovic 于1981

年运用热力学理论对岩石类脆性材料建立了本构模型 [ 76 ] ；Swoboda 等 [ 77 ]

采用内时理论结合自由能函数得到了裂隙岩体损伤演化方程和本构关系；Rashid 等利用不可逆热力学和有限变形的基本理论，推导了有限变形的弹塑性损伤耦合的本构模型 [ 78 ~ 80 ] ；王学滨等 [ 81 ， 82 ] 基于非局部理论研究了单轴拉伸条件下损伤变量的局部化特征，得到局部损伤变量与非局部损伤变量的关系；秦跃平等 [ 83 ~ 85 ] 假设岩石的损伤与外界施加的功量成正比，推出岩石类材料在单轴压缩条件下的损伤演化方程和本构方程；朱维申等 [ 86 ] 从不可逆过程的原理出发，分析

[显示全部信息](#)

本站所提供下载的PDF图书仅提供预览和简介，请支持正版图书。

[更多资源请访问www.tushupdf.com](http://www.tushupdf.com)