

第1章

绪 论

1.1 研究背景及多尺度划分

1.1.1 研究背景

岩体的力学性态不仅表现出宏观的弹性和塑性,而且具有与时间相关的性质,包括蠕变、松弛和弹性后效。当外力不变时,岩体的宏观变形会随时间的增加而逐渐增大,称为蠕变。岩体的蠕变是岩体的重要力学特性之一,陈宗基院士曾指出,一个工程的破坏往往是有时间过程的。如深埋于地下的洞室或巷道,其围岩具有随时间的增长而缓慢变形的明显特征,包括地压、破坏等都与时间有关;又如露天矿的滑坡是由边坡岩体的蠕变变形累积而引发的,在重力荷载的作用下,首先在坡顶产生拉张裂缝,随着时间增加,裂纹变宽变深,沟通地下水等,与坡脚的剪切破裂贯通形成滑面或者是已有弱面形成滑面,最终沿滑面发生滑坡。也就是说边坡的蠕变是由岩石裂纹→裂缝→破裂面→滑面→滑坡的多尺度逐渐演化发展的过程。图 1.1 所示为海州露天矿边坡顶部拉张裂缝 2004 年 8 月 19 日与 2005 年 8 月 12 日的对比图。从图中可以看出,裂缝变宽并沿破裂面发生了错动,破裂面随着时间逐渐演化。

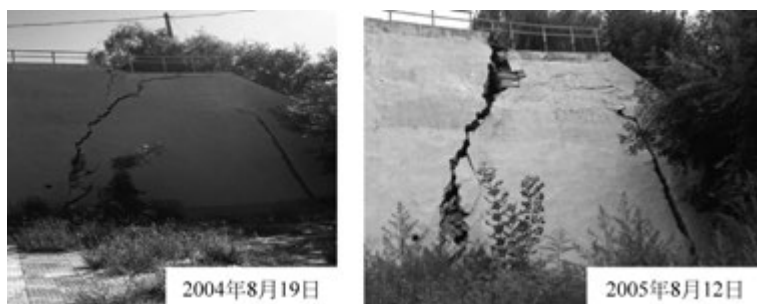


图 1.1 海州露天矿边坡顶部拉张裂缝演化

岩石的破坏形式主要有拉破坏和剪破坏。根据岩石的破坏形式,其蠕变变形也可分为拉张蠕变变形和压剪蠕变变形。无论哪一种都是从宏观角度观测到的现象,变形随着时间逐渐累加,当变形累积到一定程度后发生蠕变失稳。实际上宏观变形是由微观变形与破裂、

细观裂纹扩展累积形成的。那么,微观变形与破裂、细观裂纹扩展是如何累积形成宏观变形的?微观、细观和宏观三者之间的关系是怎样的?这些问题成为众多学者研究的重点。

岩石由不同矿物组成,同时包含各级不同尺度结构面,在外荷载的作用下发生变形。也就是说岩石变形取决于外荷载及岩石本身的性质。当外荷载持续增加时,岩石变形增大;当外荷载恒定时,岩石变形随时间也会缓慢增加,而发生宏观蠕变变形。对于岩石蠕变变形,外荷载不变,宏观变形为什么会持续增加?事实上,岩石产生蠕变变形的根本原因是岩石本身的非均匀特性。岩石由不同矿物组成,同时包含孔隙、裂隙等结构面,其非均匀特性包括组成成分非均匀和结构非均匀。

1. 组成成分非均匀

岩石由不同矿物组成,可分为结晶连接或胶结连接。对于结晶连接的岩石,其非均匀特性主要为结晶矿物成分的不同,花岗岩的微观结构如图 1.2 所示。胶结连接的岩石由不同胶结物将矿物颗粒等胶结在一起,其组成成分天然非均匀。

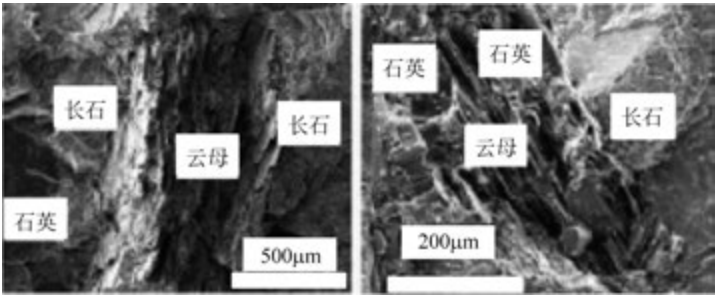


图 1.2 花岗岩的微观结构

2. 结构非均匀

岩石结构非均匀指岩石中包含各级不同尺度结构面,如微孔隙、微裂隙、微裂纹及层理、节理、劈理、软弱包含物等。图 1.3 所示为微层理、劈理及软弱包含物。

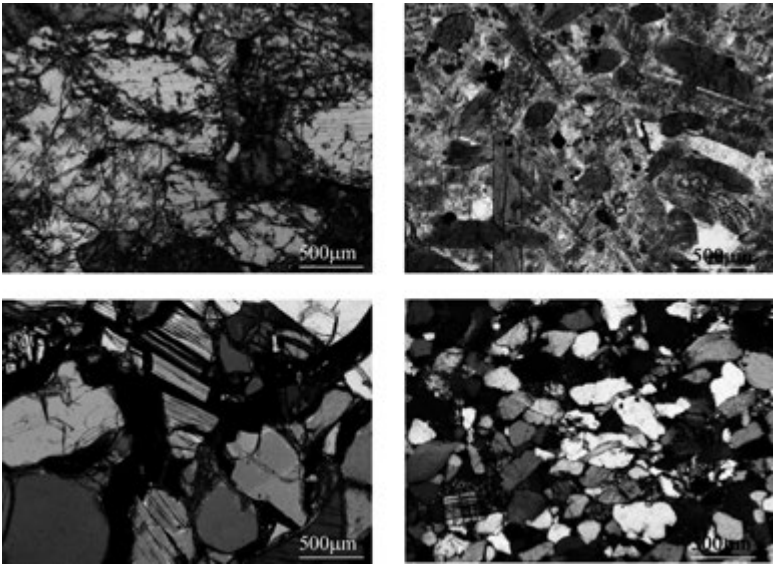


图 1.3 微层理、劈理及软弱包含物

组成成分和结构的非均匀性使得岩石在微观各点或者各部分抵抗变形的能力具有差异,产生势能,势能使得岩石产生内动力,发生变形和破裂,裂纹弥散性萌生;弥散的裂纹继续扩展,超过一定阈值后,相互影响、连接;裂纹贯通后则发生宏观破坏。岩石微观裂纹萌生、细观裂纹扩展过程在宏观的表现即为变形累积的蠕变变形过程。岩体蠕变破裂的实质是在由岩体的非均匀性引起的内动力作用下发生微观变形、破裂→细观裂纹扩展→宏观变形增大的多尺度逐渐演化、跃迁的过程。

受载岩体系统,当外荷载保持不变时,由于岩石本身的非均匀性,产生内动力,发生变形和破裂,变形或者破裂进一步加剧岩石的非均匀性,新的非均匀性又引起新的变形和破裂,如此往复,宏观表现为变形随时间的增加即蠕变。从系统动力学的角度来看,这个过程是一个反馈的过程。

1.1.2 岩石破裂演化多尺度划分

蔡美峰^[1]按照岩体中发育的结构面进行划分,将野外岩体中普遍发育的、直接影响岩体力学特性的、大于毫米级别的裂隙、节理、断层等划定为宏观尺度;把发育在岩石结构中,直接影响岩石力学性质的、毫米-微米级别的裂纹划定为细观尺度;把发育在岩石中矿物晶体内部,一般对岩石的宏观力学性质没有直接影响的微裂纹、位错等划定为微观尺度。依据结构面尺度划分,可以将岩体划分为宏观、细观、微观。目前,对于岩体变形破裂较通用的尺度划分为:宏观大于1mm,细观0.01~1mm,微观小于0.01mm^[2]。

岩石的破裂是由微观至细观、细观至宏观的微裂纹扩展演化、变形累积并跃迁的过程。在微观尺度,岩石破裂包含微孔隙、裂隙等(图1.4)。在恒定外荷载的作用下,矿物颗粒之间相互挤压,微裂纹萌生、扩展。当裂纹尺寸达到0.01~1mm时,岩石破裂进入细观尺度。在细观尺度(图1.5),岩石破裂主要是细观裂纹缺陷及跃迁的新生裂纹持续扩展、连接的过程。随着微细观裂纹的扩展、连接,细观裂纹连接形成贯通性破裂面,岩石发生宏观破坏。在由微观→细观→宏观的裂纹萌生、扩展、连接和贯通的过程中,岩石的宏观表现为岩石的变形持续增加,也就是蠕变。

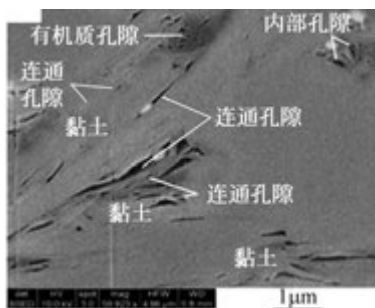


图 1.4 泥岩微观孔隙、裂隙(1 μ m)

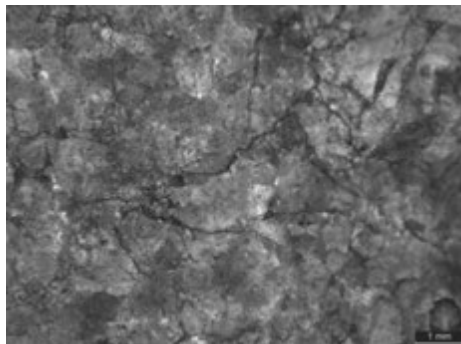


图 1.5 岩石细观裂纹(1mm)

岩石区别于其他材料的主要特性为非均匀性。组成成分的非均匀性体现在微观,而结构的非均匀性贯穿于微观、细观和宏观各级尺度。因此,本书将从微观、细观、宏观分别分析岩石的破裂及裂纹扩展演化机制。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩石破裂多尺度研究

岩石的微观组成成分和结构决定了其宏观力学特性,因此,不同尺度岩石的组成、结构以及由此引起的变形和破裂机制等受到了众多岩石力学工作者的重视。学者分别从微观、细观和宏观尺度研究岩石的破裂特征,并试图建立各尺度之间的联系。

1. 岩石微细观实验研究

岩石的微细观实验主要是采用扫描电镜(SEM)、计算机断层扫描(CT)识别、声发射等技术观测岩石的微细观结构特征等。

SEM 方面,1974 年,Sprunt 等^[3]将 SEM 观测技术用于砂岩研究,之后众多学者应用其进行研究。李先炜等^[4]依据透射和扫描电子显微镜照片,总结了 10 种岩石拉断断口和 8 种剪裂断口花样;张梅英^[5]等基于实时 SEM 扫描实验获得了岩石单轴压缩条件下的破坏过程;Hatzor 等^[6]研究了白云石的细观结构与起裂应力和强度之间的联系;Gehle 等^[7]将砂岩剪切破裂过程划分为实际破裂起始阶段、摩擦滑移和体积膨胀阶段、剪切带滑动过程阶段;Mutlu 等^[8]通过直剪实验分析试件厚度和围压对起始裂纹的影响,发现在接触面前方与中部位置裂纹萌生和应力场出现;张季如等^[9]采用 SEM 和数字图像技术研究软黏土固结前后,微孔隙的大小、数量及其分布规律;张艳博等^[10]利用灰度共生矩阵法和 SEM,对花岗岩和砂岩在干燥和饱水两种状态下的单轴加载实验的破裂断口形貌特征进行研究;赵康等^[11]从微观角度采用 SEM 对岩爆破坏后的岩石断口微观形貌特征进行分析,研究岩爆的产生机理;童庆闯^[12]通过 SEM 研究冻融循环作用下炭质页岩结构劣化情况;郭宏云^[13]通过 SEM 实验和压汞实验研究砾岩水理作用前后的样品,分析砾岩水理作用后微观结构的变化规律;黄兴建等^[14]以粗粒辉长岩为研究对象,对其在单轴、常规三轴、三轴循环荷载实验下的破坏断口进行 SEM 实验,分析了岩石在不同应力状态下的微观破坏形貌、破坏形式及破裂机制;张振华等^[15]采用 SEM 和 X 射线衍射(XRD)研究红砂岩的微细观结构和黏土矿物成分随“湿干”交替作用次数增加的变化规律;亢军杰^[16]进行了花岗岩水化学溶液侵蚀过程中微细观结构、矿物组成、孔隙率以及比表面积的定性分析和定量测试,分析了预制裂隙以及化学溶液对花岗岩力学性质的影响;张卫强^[17]借助 SEM、XRD、X 射线荧光、压汞及差热和失重分析等方法对岩石微观结构及成分随温度的变化进行了综合分析。

近几十年来,CT 扫描技术因具有无损化、精细化、量化等优点^[18-19]得到了众多学者的青睐。Teda 在 1989 年将 CT 技术运用于岩石损伤断裂的研究中,Kawakata 等^[20]通过 CT 扫描观察岩石内部微裂纹的形态;杨更社等^[21]将岩石的损伤状态与 CT 数大小及分布关系建立联系,提出 CT 技术可用于描述岩石的损伤;陈四利等^[22]利用 CT 识别技术对砂岩三轴加载过程进行即时扫描;赵阳升等^[23-25]通过自主研制的显微 CT 系统得到了砂岩的孔隙度、空隙团、空隙团数量的分形维数等数值;Schaefer 等^[26]通过 CT 实验研究玄武岩孔隙率与强度、渗透率的关系;Bubeck 等^[27]将 CT 扫描技术与数值模拟方法相结合,研究不同孔隙形状对岩石强度的影响;Yu 等^[28]、Obata 等^[29]利用 CT 扫描技术建立了混凝土和节理岩体细观数值模型,并进行数值实验,研究试样的破坏特征;杨振琦等^[30]以花岗岩试

件为研究对象,借助于先进的CT技术获取试件内部结构切片图像,利用数字图像处理技术实现了基于CT图像的花岗岩试件结构的识别和表征;郎颖娴等^[31]采用CT扫描技术等多种方法结合有限元,建立三维非均匀数值模拟方法,可以反映岩体内部细观结构;袁俊平等^[32]对黏性土、岩石和泡沫混凝土等材料的CT扫描图像分别采用灰度法和二值化法计算孔隙分形维数,研究了岩土体孔隙率与孔隙分形维数间的关系,对比讨论了这两种方法在孔隙结构分形特性研究方面的特点和适用性;申科等^[33]通过花岗岩SEM实验,获得了花岗岩细观图像;尹晓萌等^[34]取3类具有明显片理面的武当群片岩,采用偏光显微镜、扫描电镜研究其微观组构、断面形貌特征;周喻等^[35-36]综合采用数字图像相关技术(DIC)、计算机化X射线轴向CT技术、声发射(AE)监测技术,结合颗粒流PFC2D计算数据,构建含孔隙的类岩石试样并开展单轴压缩实验,探究孔隙相互作用下试样强度、变形等力学特征及裂纹孕育演化规律;宋义敏等^[37]以高速相机和CCD相机搭建数字图像采集系统,利用数字散斑相关方法对数字图像进行分析,开展不同加载速率下岩石断面细观特征研究;王煜曦等^[38]借助CT检测方法,研究断裂岩体双翼表面细观接触状态、接触损伤演化等影响岩体长期力学行为的特征以及断裂岩石蠕变过程中粗糙表面凹凸体磨损及亚表面微裂纹、微孔洞发展等表面接触损伤演化规律;Bornert等、Wang等^[39-44]使用SEM、CT、光学显微镜等设备,结合数字图像技术给出微观尺度下泥岩在不同环境下的损伤变形的机理。

对于岩石微细观实验,也有学者自主研发了实验装置。1998年,Bobet等^[45]研发了在单轴和双轴加载状态下的显微观测实验系统;葛修润等^[46]将光学体视显微镜用于观测岩样加载全过程,研制了砂岩细观力学加载仪(YXJY-5T),能够获取岩石详细的微观破坏特征;冯夏庭等^[47]在葛修润研究的基础上开发侵蚀装置和数字显微观测系统,观察穿晶、绕晶及沿晶裂纹的动态发育全过程;何学秋等^[48]等通过研制的含瓦斯煤变形及破裂动态显微观测系统研究含瓦斯煤岩的变形特征;柴金飞等^[49]利用PFC软件模拟岩石裂纹孕育、发展和贯通过程中产生的大量声发射数据,基于矩张量理论、 P - T 图法和 T - k 图法研究了岩石破裂各阶段中声发射事件的空间位置、破裂方位、破裂类型、应力状态、矩震级等破裂参数及其演变规律;徐金明等^[50]以北山花岗岩为例,使用室内实验视频和阈值分割技术确定细观组分的类别与位置,研究宏细观力学性质关系和细观力学性质参数的调整方法;邓飞等^[51]采用声发射判断岩石的损伤情况,对砂岩单轴压缩荷载下声发射特征进行分析,表明塑性变形越大,声发射活动越频繁,损伤加快;吴春等^[52]根据不同流变加载方式下单轴流变损伤的表征特点,提出超声检测的流变实验新检测方法;蒋明镜等^[53]指出,在微观上,岩石由许多大小不等的颗粒和粒间填充的胶结物构成,不同位置的胶结厚度不同,岩石的这种微观结构特征从根本上决定其宏观力学响应,从微观尺度出发采用离散元数值模拟有利于探索岩石宏观力学特性的微观机制;张晖辉等^[54]通过声发射速率过程理论分析导出声发射累积能量释放的表达式,反映了岩石破坏过程中的损伤演化状况;曹文贵等^[55]认为岩石由空隙和骨架两部分组成,基于变形力学分析方法得到岩石变形破坏全过程的统计损伤本构模型,给出模型参数的确定方法;杨洋等^[56]基于颗粒微观力学的方法建立了高阶应力-应变理论的损伤本构模型,并采用无网格伽辽金方法建立的离散化的数值模型对静荷载作用下的平底圆柱形压头压入花岗岩的变形(直至破碎)过程进行了模拟分析;冯笑含^[57]通过矿物分析衍射仪测定了岩心内各矿物成分含量,利用多元线性回归方法分析了岩石在不同矿物分布、含量下,其力学性质变化规律,建立了一种岩石微观力学参数表征方法;徐晓

晨^[58]进行了不同水化学环境下的砂岩腐蚀和蠕变实验,利用电化学方法对微观结构进行表述;杨艳等^[59]基于微裂纹在单轴压缩荷载下的扩展机理,在假定岩石中被激活的微裂纹数服从 Weibull 分布的基础上,首先通过临界应变对被激活微裂纹数目的影响,建立了考虑临界应变及微裂纹扩展长度的单轴压缩损伤本构关系,其次根据微裂纹在单轴压缩下的翼裂纹扩展方程,考虑翼裂纹扩展过程中的惯性效应及翼裂纹扩展速度与应变率之间的关系,建立了单轴压缩下岩石动态细观损伤本构模型,最后采用数值算例对模型的合理性进行了验证;张晓东^[60]综合运用声发射监测、高速显微细观观测等方法,研究了不同加载速率下红砂岩 I 型断裂过程中的声发射活动及细观断裂特征。

2. 岩石多尺度模型研究

岩石多尺度模型一直是学者研究的热点,朱珍德等^[61]将量化的岩石细观结构特征信息运用于损伤理论,得到岩石细观结构体的损伤本构模型;于庆磊等^[62]通过数值实验研究岩石细观结构对其变形和强度的影响;罗荣等^[63]通过数值实验研究了非均质岩石材料矿物细胞元含量及其力学参数对岩石宏观力学参数的影响;吕全纲^[64]研究了应力水平和应力强度比对大理岩时效变形破裂的影响规律及其细观演化机理,且对大理岩进行了不同分级加载条件下的蠕变数值实验,对比研究了分级数对岩石蠕变变形和时效破裂的影响规律;丛宇^[65]从宏观角度采用多种方法分析岩石的卸荷破坏特征并利用数值模拟从细观角度深度分析岩石卸荷破坏过程;彭超^[66]以岩质高陡边坡为研究对象,从连续-非连续、宏观-细观的角度,分析边坡岩体的宏细观力学特征和开挖扰动条件下的边坡稳定性;李晓照等^[67-69]基于裂纹扩展机理推出的岩石应力-应变本构模型,并结合莫尔-库仑失效准则,推出了在岩石应力-应变关系峰值应力(对应岩石压缩强度)状态时,本构模型细观力学参数与岩石黏聚力、内摩擦角及剪切强度之间的状态关系;胡光辉等^[70]引入岩石细观单元时效损伤的应力腐蚀模型,建立了基于离散元方法的岩石时效变形损伤破裂模型,并通过室内实验验证了所建立的时效变形损伤破裂模型的合理性;Yu 等^[71]基于分层方法,描述了一种用于大规模建模的新颖多尺度方法,在不丢失原始微观 CT 图像任何信息的情况下,该方法使用混合理论在多级上提取等效的岩石电特性,并在不同级别上级联所有结果以实现总体岩石特性。

1.2.2 岩石蠕变实验研究

1. 岩石压缩蠕变实验研究

岩石的单轴压缩蠕变实验一般采用分级加载的方式,直到试件破坏,而岩石三轴压缩蠕变实验通常是在将围压增加到某一特定值后,逐渐增大轴向压力,直至岩石发生破坏。李永盛^[72]采用伺服刚性机对四种不同强度的岩石材料进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛实验;徐平等^[73]对三峡花岗岩进行了蠕变实验研究;赵延林等^[74-76]采用分级增量循环加卸载方式,对软弱复杂矿岩进行蠕变实验,分析蠕变过程中黏弹塑性变形规律;刘东燕等^[77]采用 MTS815 液压伺服岩石实验系统和 DISP-2 声发射监测系统,对单轴蠕变实验过程中伴随的声发射特征进行了研究;Brijies 等^[78]对页岩试样进行了一系列的单轴和三轴蠕变实验,以研究顶板岩石随时间的变形破裂规律;贺其^[79]对红砂岩进行单轴加卸载条件下的蠕变实验,探究红砂岩在单轴加卸载应力状态下的流变力学特性;He 等^[80]使用大型圆筒在不同加载时间的样品上进行碎石混凝土(RFC)和自密实混凝土(SCC)的压缩蠕变实验,

研究其蠕变性能。

2. 岩石拉张蠕变实验研究

岩石是一种准脆性材料,抗压不抗拉,拉破坏往往控制岩石工程整体的稳定性,因此,岩石的拉张蠕变也应受到重视。目前,少数学者开展了岩石的直接拉伸蠕变实验。周德培^[81]详细进行了10种岩石单向拉伸蠕变实验,采用蠕变柔度描述岩石的非线性蠕变特性;王来贵等^[82]建立了岩石拉伸流变失稳模型,采用有限元法模拟开挖过程中岩梁初次来压拉伸流变失稳过程;孙钧等^[83-84]等采用圆柱切口试样进行直接拉伸实验,试样如图1.6所示,分析了岩石断裂和流变断裂特性;赵宝云等^[85-87]采用自制直接拉伸装置进行岩石拉伸蠕变实验,较好地避免了偏心受拉问题,实验加载装置如图1.7所示。由于岩石两端的夹持装置很容易出现偏心受拉,且加载装置较少,因此拉伸蠕变成果相对较少。

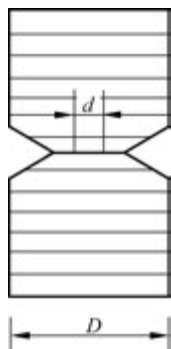


图 1.6 圆柱切口拉伸试样

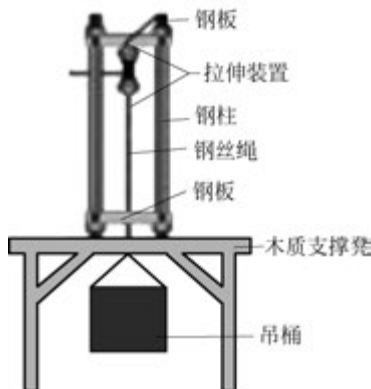


图 1.7 直接拉伸实验装置

1.2.3 岩石蠕变模型研究

在岩石蠕变本构模型方面,Bazant^[88]应用内时理论建立混凝土和岩石的蠕变理论模型;Borchert等^[89]将建立的盐岩内时蠕变模型与蠕变实验结果进行比较,分析模型的特点;Cao等^[90]基于岩石的非线性损伤蠕变特性和损伤变量,结合改进的 Burgers 模型、Hooke 模型和 St. Venant 模型,定义了一种新的高应力软岩非线性损伤蠕变本构模型;Li等^[91]在基于离散元素方法(DEM)的微力学系统中研究了温度如何影响盐蠕变行为的微机理;Hu等^[92]用改进后的 Burgers 模型描述千枚岩裂隙晶石的各个蠕变阶段;He等^[93]通过在原始超弹性 DVIB 上引入黏性键来模拟蠕变断裂;Tang等^[94]基于变阶分数导数和连续损伤机制,提出了一个新的四元蠕变模型;康永刚等^[95]提出一种改进的岩石蠕变模型,首先给出一种修正的 Kelvin 模型用来描述衰减蠕变和稳态蠕变,其次给出一种经验函数用来描述加速蠕变,再次给出一种改进的岩石蠕变本构关系及相应的蠕变函数;Xu等^[96]通过对高密度聚乙烯、聚醚酮等材料的蠕变行为进行3种分数阶模型分析,证明 Poynting-Thomson 模型是模拟黏弹性材料蠕变行为的最优模型;Markelova等^[97]提出分数阶流动模型研究高黏度原油的非牛顿特性;Mino等^[98]在不同温度、应力水平下对沥青混合料进行蠕变实验,提出了沥青混合料的黏弹黏塑性模型;李圣杰^[99]将含水开关元件与蠕变损伤

阈值引入蠕变元件模型,建立岩石含水蠕变损伤模型;李祥春等^[100]得到改进的西原加速模型,提出了蠕变拐点的观点,认为岩石发生非衰减蠕变是蠕变曲线上至少存在1个蠕变拐点的充要条件;Chen等^[101]基于变系数分数阶元件建立分数阶蠕变模型,模拟岩石的蠕变全过程;Ma等^[102]通过将非平稳模块化组件引入 Burgers 黏弹性模型中,提出了岩盐的蠕变损伤模型,使用新开发的模型进行了数值模拟,以评估在各种荷载情况下层状盐岩中存储洞穴的稳定性和可使用性;Liu等^[103]提出了一种改进的 Nishihara 模型;Wang等^[104]使用三峡水库中具有代表性的滑坡砂岩进行蠕变实验,研究在渗透压力和应力耦合作用下的砂岩蠕变行为,提出了一个非线性的、非平稳的、可塑性的、黏性的蠕变模型;Hou等^[105]基于不同初始损伤水平的砂岩多荷载蠕变实验,提出了一种新的岩石非线性蠕变损伤模型。

1.2.4 岩石非均匀特性研究

在早期人们主要通过实验进行研究,Adame等^[106]利用有机玻璃材料制作内置椭圆裂隙岩石试件,在单轴压缩荷载下裂隙尖端首先扩展,在两个裂尖连线上产生鱼鳍状裂纹;Wong等^[107]开展了椭圆和币状裂隙三维扩展实验,发现鱼鳍状裂纹在椭圆裂隙扩展中极易出现。

随着计算机技术的发展,对于非均匀介质的破坏问题,研究手段主要为数值模拟,常用的数值模拟方法包括有限元、有限差分、非连续变形分析(DDA)、物理元胞自动机等,并且人们在此基础上编制了多种计算软件,模拟岩石非均匀性对岩石宏观变形、破裂过程的影响,研究岩石变形破坏机理。

(1) 在有限单元法方面,唐春安等^[108]提出了 RFPA2/3D 模型,借助弹性损伤理论,利用 Weibull 分布描述岩石细观单元抗压强度和弹性模量的分布特征,模拟岩石试样中预制的倾斜裂纹扩展过程,研究材料非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响;梁正召等^[109]利用 RFPA3D 软件,模拟单轴压缩下不同细观残余强度下的三维应力场变形场分布以及破坏形态,分析细观结构非均匀性和残余强度对岩石损伤软化过程和宏观力学性能的影响;陈沙等^[110]提出基于数字图像的非均质岩土工程结构的二维数值分析方法;马天辉等^[111]对非均匀网格与均匀网格进行了对比,分析其对岩石破裂的影响;吕兆兴等^[112]研究了非均质参数 m 对岩石材料强度尺寸效应的影响,提出尺寸效应影响参数 η ;于庆磊等^[113]依据数字图像处理理论,研发出一种基于数字图像的岩石非均匀性表征技术;张艳博等^[114]利用 RFPA 软件进行数值实验,分析整体均质度对岩石破裂过程的影响,指出随着均质度系数的增大,岩石的脆性逐渐增强,并分析不同矿物夹层对岩石破裂过程的影响。

(2) 离散元方面,通过定义颗粒间的接触作用模拟岩石内部矿物晶粒边界、微观裂纹等微观缺陷,以 PFC2/3D、UDEC、ELFEN 为代表。朱泽奇等^[115]以三峡花岗岩为例,利用有限差分程序 FLAC 进行非均质岩石材料的破坏过程模拟;刘建等^[116]以有限差分法(FDM)为计算框架,利用 Weibull 分布描述细观单元弹性模量和单轴抗压强度的分布特征,采用弹塑性应变软化本构模型描述细观单元的力学响应,进而建立一种模拟非均匀岩石介质破裂的数值模型。采用该数值模型探讨了单轴压缩时细观均质度 m 及细观结构对数值试样宏观特性的影响。

(3) DDA 法方面,杨正等^[117]采用非连续变形分析(discontinuous deformation analysis,

DDA)方法,根据 Weibull 分布函数引入岩石细观非均匀性模型,对巴西圆盘的劈裂实验进行计算机模拟。

(4) 物理元胞自动机方面,马志涛^[118]在传统元胞自动机基本理论的基础上,根据岩石的破坏特征,结合前人研究的经验,提出了细观非均质物理元胞自动机模型,并利用该模型对不同均质度岩石在破坏演化过程中的声发射现象和破裂模式进行动态模拟,得到不同均质度材料对应的声发射模式和破裂模式;谭云亮等^[119]基于八邻居 Moore 元胞,采用广义能量构造元胞蠕变及破坏演化算法,建立岩石蠕变的物理元胞自动机模型,对细观非均质岩石从稳定蠕变、临界蠕变到加速蠕变特征进行了有效模拟。

(5) 其他方法方面,张德海等^[120]用梁-颗粒模型 BPM2 模拟了岩石的破坏过程,在模型中,采用 3 种类型梁单元随机分布来模拟岩石类材料力学参数的空间变异性,并通过自动生成的非均质材料模型对岩石类材料的破坏机理进行了研究;杨小彬等^[121-123]采用声发射系统和 CCD 相机分别采集花岗岩试件、红砂岩试件单轴循环加卸载过程中的声发射特征和变形图像,分析试件的非均匀变形等;戴峰等^[124]采用细观损伤数值方法对单轴压缩下不同均质度岩石微破裂萌生、发育、扩展、贯通直至破坏整个过程的声发射分布进行分析;赵娜等^[125]引入内动力的概念,分析非均匀岩石材料裂纹扩展、演化规律,根据裂纹扩展的内外区概念,选定结构非均匀即含有预制裂纹的岩石材料,对于内区材料的均匀和非均匀性分别进行计算,分析其裂纹扩展过程。

1.2.5 岩石破裂内动力研究

在外荷载作用下材料发生破裂,要使裂纹萌生和扩展,必须提供动力。目前,在金属材料 and 岩石断裂力学中都有关于裂纹扩展动力的定义或者表述。

在金属材料方面,裂纹扩展驱动力表示在外力作用下裂纹尖端的受力状态,驱动力大则表示裂纹扩展的可能性大,驱动力通常采用应力强度因子、裂纹张开位移或 J 积分表示。李华等^[126]对循环 J 积分 ΔJ 可否作为应力强度因子 ΔK 不再适用的场合的裂纹扩展驱动力进行了研究;刘金依^[127]利用 ANSYS 有限元软件计算和分析裂纹驱动力参量 J 积分;陈建钧等^[128]采用非均匀有限元法对梯度涂层基体系统中的界面裂纹进行研究,模拟高温蠕变行为得到涂层梯度因子、蠕变系数、蠕变指数以及涂层厚度对裂纹蠕变扩展驱动力的影响关系;熊纛^[129]基于一个荷载循环中柔度变化与裂纹尖端开闭口与弹塑性行为的关系,提出一个新的具有物理意义的两参量驱动力模型;宋全超等^[130]将适用于金属材料的双参量裂纹扩展驱动力模型引入有机玻璃裂纹扩展行为研究;熊庆人等^[131]研究了 X80 级钢管道环焊缝焊接热影响区的组织及其对断裂驱动力的影响;张柏华^[132]基于 Gurson 模型,考虑材料的微观塑性行为,计算了平面轴对称韧性金属平板在弹塑性变形下的裂纹萌生和生长问题,推导了 I 型裂纹演化中,基于 Gurson 模型的裂纹扩展驱动力相关理论。岩石断裂力学方面,李世恩等^[133]将裂纹扩展单位面积能量的下降率作为裂纹扩展的动力,探讨了常位移和常荷载下裂纹扩展能量的变化。

裂纹扩展包括外荷载等引起的外动力和内部结构等引起的内动力。王来贵等^[134]将内动力定义为,在同一层次的工程系统中,由于工程内部各组分之间在组分、浓度、强度、温度、顺序或速度等方面存在差异而引发工程系统内部的合作、竞争、矛盾等相互作用,导致工程结构在规模、组分、关联方式等方面的改变,进而引起工程系统功能或其他性质的改变。例

如,岩土工程系统在外力不变时,由于内部结构的不均匀性,致使岩土工程系统随时间推移而发生蠕变变形。

现有理论对于蠕变变形和破裂多从宏观唯象学的角度出发,实验监测蠕变曲线,建立蠕变模型进行分析。而对于蠕变变形的实质及多尺度破裂机理研究较少,主要存在以下问题:

- (1) 岩石蠕变变形破裂宏观演化过程研究不够充分。
- (2) 岩石蠕变破裂机理的多尺度分析不够深入。
- (3) 岩石蠕变破裂多尺度模型较少。
- (4) 岩石蠕变破裂多尺度演化机理不够明确。

1.3 问题的提出及研究意义

1.3.1 问题的提出

岩石在恒定外荷载作用下,由于非均匀性,各点或者各部分的变形不同,裂纹扩展驱动力发生变化,当裂纹扩展驱动力超过裂纹扩展阻力时则发生破裂。本书从岩石的非均匀性出发,研究岩石微观裂纹萌生、细观裂纹扩展和宏观蠕变变形的破坏机理,分析岩石蠕变破裂演化的全过程,给出岩石蠕变破裂演化机理。岩石由不同矿物组成,同时包含孔隙、裂隙等各级结构面,是复杂的非均匀、非连续的地质体。在恒定外荷载的作用下,岩石的变形随着时间逐渐增大即发生蠕变。蠕变的实质是微细观变形破裂在宏观的表现,因此岩石的微细观裂纹扩展过程如何以及在何种程度上与宏观的蠕变行为相关联成为人们关注的热点问题。在传统连续介质力学连续、均匀假设条件下,以及在恒定荷载作用下,材料并不会发生蠕变变形。恒定荷载作用下的岩石则会发生蠕变变形,其根源为岩石本身的非均匀和非连续。由于岩石的蠕变变形一般时间较长,传统研究方法从宏观唯象学的角度分析其变形规律,将蠕变曲线分为减速蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段。实际上岩石的蠕变变形是由微观裂纹萌生至细观裂纹扩展再到宏观连接和贯通的逐级累加和跃迁的过程。因此,本书通过实验研究裂纹扩展过程及宏观蠕变变形规律,根据岩体的非均匀性给出内动力的概念,进行岩石蠕变破裂机理的多尺度分析,建立多尺度破裂模型,通过数值计算模拟岩石蠕变破裂演化全过程,给出岩石多尺度蠕变破裂演化机理,为预防、控制蠕变灾害的发生提供理论基础。

1.3.2 研究意义

岩石蠕变变形一直是岩石工程中重点关注的问题,如边坡的滑坡问题、洞室的围岩蠕变变形等。由于蠕变变形持续时间长、影响因素多、范围广,工程中对其如何有效预防和治理还没有明确、有效的方法。因此,从蠕变变形的实质研究多尺度演化机理具有深远的工程意义。

在岩石力学理论研究方面,关于岩石蠕变变形的研究也一直是热点问题。现有研究多从连续介质力学出发,从宏观唯象学的角度进行分析,通过弹性、黏性元件建立模型。实际岩石的蠕变变形是由微观破裂、细观裂纹扩展再到宏观变形的逐级跃迁和演化的过程。本书打破原有的连续性假设,从破裂演化的角度进行分析;突破了均匀性假设,指出正是岩石