

地下工程岩石与混凝土 多场耦合特性及理论研究

胡大伟 张 帆 周 辉 著
赵建建 刘海涛 邵建富



科学出版社

地下工程岩石与混凝土 多场耦合特性及理论研究

胡大伟 张帆 周辉 著
赵建建 刘海涛 邵建富



科学出版社

北京

内 容 简 介

地下工程结构往往受到温度、应力、渗流和化学等多场因素的耦合作用,这些耦合作用对地下工程结构的稳定性造成了重要影响。本书主要介绍在地下工程岩石和混凝土多场耦合试验方法、本构理论、数值分析方法和工程应用等方面的一些最新研究成果。按照从单场到多场耦合、先试验后理论的步骤,分别介绍砂岩的矿物成分、力学、热学等各个单场特性,分析热处理对花岗岩力学、热学和渗流等特性的影响机理,酸碱性溶液渗透侵蚀下花岗岩裂隙流变机理与二氧化碳和咸水渗流作用下砂岩的流变机理。同时,在试验基础上分别建立岩石各向异性热学参数本构模型、多孔岩石 HMC 耦合本构模型和混凝土应力-化学侵蚀耦合模型,研究岩石和混凝土材料在应力、渗流、化学等耦合作用下的变形、渗透性、热传导系数与热膨胀系数等演化规律,并对高放废物地质处置工程巷道衬砌的长期稳定性进行了评估。

本书可供岩土工程、岩石力学、水利水电和环境工程等相关专业的高年级本科生、研究生、技术人员参考,也可对相关从业人员提供重要的理论指导和技术支持。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程岩石与混凝土多场耦合特性及理论研究/胡大伟等著. —北京:科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-056130-5

I. ①地… II. ①胡… III. ①地下工程-岩石结构-耦合作用-研究②地下工程-混凝土结构-耦合作用-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 316772 号

责任编辑:周 炜 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 12

字数: 242 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着能源开发、地下储存等工程建设范围的扩展和规模的扩大,地下工程建设呈现出前所未有的发展势头,更有一些极具挑战性的特殊工程问题(如放射性废物地质处置、二氧化碳地中隔离、页岩气开发、增强性地热开发等)亟待解决。在这些地下工程中,岩石与混凝土材料所处的地质与应力环境往往比较恶劣,温度、应力、渗流和化学等各场耦合更为复杂,温度和化学的作用尤其突出。然而,岩土介质中多场耦合机理的研究才刚刚起步,大部分研究主要集中在流固耦合,对温度和化学方面的耦合研究还不多见。因此,本书主要介绍作者近年来在岩土工程多场耦合方面,特别是温度和化学耦合方面取得的一些研究进展,以期在上述地下工程的设计、施工和运营提供理论和技术支持。

第2章主要介绍采用岩石 THMC 耦合多功能试验系统等试验仪器进行的试验研究,分析了沉积层面对岩石力学性质、热膨胀性质以及纵波速度的影响。根据试验结果,验证岩石各向异性力学性质与纵波速度之间的关系,层理面以及岩石基质和层理之间矿物成分的不同造成岩石表现出宏观各向异性特性。

第3章主要从高温热处理后花岗岩物性试验出发研究温度-应力对花岗岩的影响,研究花岗岩在温度-应力耦合条件下的常规物理力学性质,并深入分析高温热处理的内在影响机理。

第4章分别采用碱性溶液和酸性溶液作为渗透介质,深入研究含裂隙花岗岩不同围压下酸性和碱性化学溶液侵蚀作用下的力学性能,并进行裂隙面的微观结构观察,揭示花岗岩应力-化学侵蚀耦合的细观机理。

第5章研究了渗流-应力-化学耦合作用下 CO_2 在含水层砂岩储存过程中砂岩储层的性质,分析砂岩试样在 CO_2 -咸水或者仅在 CO_2 作用下的流变应变、渗透率以及弹性模量的演化规律。

第6章分析包括裂纹分布、裂隙流体的种类以及所施加的应力状态等不同因素对裂隙岩体有效热学性质的影响,提出裂隙岩体的有效热学性质表达式,分析裂隙分布、裂隙流体对裂隙岩体有效热传导系数和热膨胀系数的影响规律。

第7章基于砂岩的渗流-应力-化学耦合作用下的试验研究,提出了一个适用于砂岩的渗流-应力-化学耦合模型,引入了力学损伤和化学损伤,并且考虑了在不同 pH 溶液的侵蚀下砂岩三种主要矿物的溶解速率。

第8章建立了一个水泥基材料应力-化学耦合理论框架,并提出了一个适用于混凝土材料力学加载下钙离子浸出耦合模型,考虑力学和化学损伤之间的耦合效应,

并建立相应的数值分析方法,能够较好地模拟出混凝土钙离子浸出和力学耦合作用规律。

本书的相关研究得到国家重点研发计划(2018YFC0809600、2018YFC0809601)、湖北省技术创新重大专项(2017AAA128)、国家自然科学基金(51479193、51779252、51579093)、中国科学院“百人计划”等的资助。同时,在撰写本书的过程中得到了有关专家的指导和帮助,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程背景	1
1.2 相关研究进展和基础	2
1.2.1 岩石的力学特性	2
1.2.2 HM 耦合	4
1.2.3 TM 耦合	6
1.2.4 THMC 耦合	10
1.2.5 混凝土材料的耐久性	12
1.3 本章小结	18
参考文献	19
第 2 章 含层理砂岩力学、波速和热学特性研究	34
2.1 引言	34
2.2 试样准备	34
2.3 试验仪器简介	35
2.4 砂岩的热力学试验	39
2.4.1 单轴压缩试验	39
2.4.2 热膨胀系数测试试验	41
2.4.3 纵波波速测试	43
2.5 试验数据分析	43
2.6 本章小结	45
参考文献	45
第 3 章 TM 耦合条件下花岗岩物理力学特性研究	48
3.1 引言	48
3.2 TM 耦合条件下花岗岩物性试验	49
3.2.1 试样加工及热处理方法	49
3.2.2 高温处理后的花岗岩常规物理参数测试	51
3.2.3 微观测试试验研究	56
3.2.4 试验数据分析	65
3.3 TM 耦合条件下花岗岩力学特性	66

3.3.1 三轴试验系统	66
3.3.2 静水压力试验	67
3.3.3 常规三轴压缩试验	74
3.3.4 试验数据分析	82
3.4 本章小结	88
参考文献	89
第4章 花岗岩流变特性研究	91
4.1 引言	91
4.2 试验准备	92
4.2.1 试样的制备	92
4.2.2 试验设备	92
4.2.3 化学溶液配制	92
4.3 三轴压缩试验	93
4.4 高温作用后花岗岩流变特性	95
4.4.1 流变试验方案	95
4.4.2 流变试验结果	95
4.4.3 试验结果分析	99
4.5 MC耦合条件下花岗岩流变试验	103
4.6 本章小结	110
参考文献	110
第5章 CO₂-砂岩-咸水的 HMC 耦合试验研究	111
5.1 引言	111
5.2 以往试验结果总结	111
5.2.1 砂岩试样概况	112
5.2.2 力学性质	112
5.2.3 破坏过程中渗透率的变化情况	113
5.2.4 pH对岩石矿物溶解以及孔隙发育的影响	113
5.2.5 HMC耦合试验	115
5.3 纯CO ₂ 或CO ₂ -咸水混合物注入下的流变试验	115
5.3.1 试验准备	116
5.3.2 纯CO ₂ 注入下的流变试验	117
5.3.3 CO ₂ -咸水混合物注入下的流变试验	118
5.4 CO ₂ -砂岩-咸水反应后的压痕试验	119
5.5 试验数据分析	121
5.6 本章小结	123

参考文献	123
第 6 章 岩石 TM 耦合本构模型	127
6.1 引言	127
6.2 TM 耦合模型框架	128
6.3 有效热学参数	129
6.3.1 有效导热系数	130
6.3.2 有效热膨胀系数	131
6.4 裂纹分布及裂隙流体对岩石有效热传导特性的影响	132
6.4.1 裂纹方位的影响	133
6.4.2 裂隙流体的影响	135
6.5 应力状态对岩石有效热传导特性的影响	136
6.6 本章小结	140
参考文献	140
第 7 章 砂岩 HMC 耦合本构模型	143
7.1 前言	143
7.2 模型框架	143
7.3 砂岩的 HMC 试验结果	145
7.4 砂岩 HMC 耦合模型	147
7.4.1 力学模型	147
7.4.2 质量传输模型	149
7.4.3 孔隙度和化学损伤的演化	151
7.4.4 孔隙力学模型	152
7.5 模型应用	152
7.5.1 数值计算方法	152
7.5.2 化学溶解过程的数值模拟	153
7.5.3 瞬时力学行为模拟	155
7.5.4 黏塑性力学行为模拟	157
7.5.5 HMC 耦合行为模拟	158
7.6 本章小结	159
参考文献	160
第 8 章 水泥基材料 MC 耦合作用下短期与长期性质模型研究	163
8.1 引言	163
8.2 模型框架	164
8.2.1 状态变量和状态准则	164
8.2.2 塑性和流变特性	165

8.2.3 力学损伤	166
8.2.4 化学损伤	166
8.3 钢纤维混凝土材料的特殊模型	166
8.3.1 弹塑性损伤模型	167
8.3.2 流变模型	169
8.3.3 浸出模型	169
8.4 模型应用	172
8.4.1 拉伸和弯曲试验的模拟	173
8.4.2 压缩流变和弯曲流变模拟	174
8.4.3 硝酸铵侵蚀后单轴拉伸和四点弯曲试验的模拟	176
8.4.4 化学侵蚀下压缩流变和四点弯曲流变的模拟	178
8.5 本章小结	180
参考文献	181

第 1 章 绪 论

1.1 工程背景

20 世纪 80 年代以来,水利水电、地热开发及石油、天然气开采和地下储存等工程建设呈现出前所未有的发展势头,同时,出现了一些更具挑战性的特殊工程,如放射性废物地质处置、二氧化碳地中隔离等。由于这些重大岩土工程设计、建设及其对环境影响评价的需要,岩土介质中的温度-渗流-应力-化学(thermal-hydrological-mechanical-chemical, THMC)耦合问题越来越受到关注。目前,关于岩土介质中 THMC 耦合的研究已经成为国际岩土力学和工程领域的热点与前沿。

在这些不同类型的岩土工程中,尤以放射性废物地质处置工程中的 THMC 耦合作用最为突出。从第一个地下实验室的建设算起,高放射性废物地下实验室已有 50 余年的历史^[1]。由于放射性物质的衰变放热、地下储存场地的开挖与建造,以及地下水的存在,放射性废物地下处置必须考虑以下各物理-化学过程的相互作用:

(1) 由高放废物处置库的开挖引起的岩石区域碎裂过程以及由此而引起的岩体渗透率及裂隙开度的变化。

(2) 由高放射性废物中放射性核素发热(几千年至一万年)而引起的温度变化以及由此造成的岩体体积膨胀、热应力和水-岩及水-缓冲材料间的化学作用的变化。

(3) 由以上过程造成的地下水流场的变化以及流场内压力对岩体应力、变形和温度的反作用。

(4) 以上各过程对反应性和非反应性化学过程及放射性核素迁移过程的影响。

(5) 以渗流为主要载体的化学反应(包括反应性和非反应性溶质与核素传输和迁移)过程对岩体力学性质和渗透性质的作用。

因此,高放射性废物处置库的多场耦合具有长时间尺度、较明显变温、多场因素都较突出且化学场意义特别重要等特点。

此外,我国是一个干旱且严重缺水的国家,水资源分布极不平衡,南北相差悬殊,水资源成了制约地区经济发展的主要因素。因此,跨流域调配水资源成了区域经济协调发展的重要保障,相继出现了一大批调水工程,如举世瞩目的南水北调东

线、中线和西线工程。同时,在水利水电工程领域,我国西部水电资源丰富。由于水电具有污染小、技术经济指标优越等优点,因此相继建设了一大批世界级的大型水电工程。这些重大水利工程能有效解决区域水资源短缺,缓解能源供需矛盾,保障我国国民经济全面、持续、协调发展。引水隧洞是这些重大水利工程的重要组成部分,其往往处于地应力、水头压力和侵蚀性水环境等复杂条件之下。例如,兰州市水源地建设工程引水隧洞沿线地下水 pH 为 7.41~8.51,对混凝土具有重碳酸型弱到中等腐蚀性,最大水平主应力 18.3MPa;锦屏二级引水隧洞最大埋深约 2525m,最大地应力 70MPa,最大水头压力 10MPa,局部存在重碳酸钙型水,对混凝土具有弱到中等腐蚀性。混凝土材料是这些地下工程中最主要的结构工程材料,在地应力、水头压力和地下水侵蚀等复杂条件下混凝土材料的耐久性对引水隧洞的衬砌结构稳定性具有决定性影响,对这些重大水利工程的质量和服役寿命影响巨大。而岩石和混凝土作为这些地下工程的衬砌结构,其稳定性对工程质量和服役寿命具有决定性的影响。

由此可见,地下工程岩土介质中 THMC 耦合研究对于岩石力学基础理论、重大工程设计和施工等均具有重要的现实意义。

1.2 相关研究进展和基础

国内外许多学者在岩石的力学特性、渗流-应力(hydrological-mechanical, HM)耦合、温度-渗流(thermal-hydrological, TH)耦合、THMC 耦合以及混凝土材料的耐久性等方面已开展了大量的研究工作,本节将对这些方面的研究进展进行简要叙述。

1.2.1 岩石的力学特性

岩石是多种矿物的集合体,由于成岩过程中发生了一系列物理化学变化,因此不同种类岩石的微观结构也千差万别。而微观结构又是决定岩石宏观物理力学特性的主要因素,所以从岩石的微观结构特征入手,分析其矿物组成、孔隙度、裂隙开度、胶结物类型等可为宏观试验结果提供物理依据与理论解释。因此,对岩石微观结构、矿物成分、孔隙度、胶结物及其排列组合方式进行研究是十分必要的。

相对于软岩,硬脆性岩石具有较强的应用价值,在各种实际工程施工中常会遇到硬脆性岩石。硬脆性岩石具有强度高、以脆性破坏为主、破坏时应变能快速释放等特点,因此对硬脆性岩石的基础性研究很有必要,国内外学者对此也做了大量的研究,取得了可观的研究成果。例如,许多学者研究了硬脆性岩石在三轴压缩条件下的力学和损伤特性,分析了应力-应变曲线特征、变形特征和强度特征,以及在不同应力条件下的破坏过程和特点^[2~10];通过研究硬脆性岩石在三轴作用下的失效

特点得出,硬脆性岩石的峰值强度、残余强度、杨氏模量和变形模量随围压的增大呈线性增长,以及单轴压缩条件下的破坏形式为张拉型破坏,三轴压缩下的破坏形式为压剪型破坏形式,并在不同围压条件下表现出不同的体积变形趋势。Arora等^[11]对页岩在双向应力压缩和三向应力压缩过程中的破坏模式进行了研究,分析了在双向应力和三向应力压缩过程中页岩的破坏模式。Arzúa等^[12]对完整花岗岩和单裂隙花岗岩在三轴试验中的强度和膨胀量进行了试验研究和理论分析,利用全应力-应变曲线计算并分析了花岗岩试样的杨氏模量、抗压强度和峰后残余强度,并且研究了膨胀角。结果表明,单裂隙的存在使得花岗岩的峰值强度大幅度降低,但对残余强度的影响较弱;在低围压水平下,带裂隙花岗岩的膨胀量小于完整花岗岩,随着围压的提高,差异性逐渐降低;另外,对于峰后阶段的屈服准则,带裂隙花岗岩适用塑性剪切应变模型,而完整状态的花岗岩适用成熟的限制依赖关系模型。

微观测试技术在硬脆性岩石常规试样中的应用为分析宏观破坏机制提供支撑。Higo等^[13]利用CT扫描技术对三轴压缩过程中非饱和砂岩的局部变形进行检测。Tkalic等^[14]研究了花岗岩在一定围压下的三轴压缩试验和微观压痕试验,并对试验结果进行了数值模拟,在试验结果分析中解释了弹塑性材料的分段屈服准则、塑性强化/弱化准则以及复合损伤和非关联塑性流动准则,得出岩石的剪胀角随压力的增大呈线性减小。

国内外许多学者利用数值模拟的方法对常规三轴试验进行模拟。Shin等^[15]通过有限元分析软件,研究在常规三轴压缩过程中由于端部限制作用和压缩过程中试样外围的橡胶套对试样表面微粒的影响,橡胶套和端部限制作用使岩石三轴压缩过程应力-应变曲线出现异常,并指出剪切强度出现的偏差可以利用基本的模型进行修正。

对测试试验数据进行屈服强度分析时常用到的屈服准则有特雷斯卡(Tresca)屈服准则、Mises屈服准则、莫尔-库仑屈服准则、Drucker-Prager屈服准则。国内外学者利用经典屈服准则对岩石破坏特性进行了分析。Öztekin等^[16]、Shin等^[17]、Yurtdas等^[18]测定了普通混凝土和高强混凝土在三轴压缩条件下的Drucker-Prager屈服参数,通过不同围压条件下混凝土的不同抗压强度的试验数据画出莫尔应力圆。根据莫尔应力圆可以求出试验选用的混凝土材料的强度参数:内摩擦角和黏聚力。Singh等^[19]、Barton^[20]对完整岩石在三轴及多轴压缩过程中常用到的莫尔-库仑屈服准则进行了修正,指出莫尔-库仑屈服准则的两大主要局限,一是岩石的强度与围压呈线性函数关系,二是未考虑中间主应力的影响,并通过相关文献和试验数据得出Barton屈服准则能很好地规避这两个局限性。Chen等^[21]、Belheine等^[22]通过一系列传统三轴压缩试验和数值模拟结果揭示了花岗岩在破坏前的损伤特点。试验结果表明,在体积变形拐点之前损伤增加的速度较慢,之后

损伤迅速增加。同时,根据试验结果推导出单轴压缩和三轴压缩中的最大弹性应变能密度的相关性的一个新的失效准则,利用泰森多边形理论建立了一个基于颗粒离散元的微观力学模型。Zhang 等^[23]、Alkan 等^[24]对岩石在无侧限和侧限压缩过程进行了声发射分形分析,研究表明,分形维数在加载初始阶段增加迅速,随着荷载的继续增加,分形维数逐渐减小。

对于硬脆性岩石在考虑中间主应力下的破坏机理,国内外学者也进行了大量的研究工作。Kun 等^[25]、Jia 等^[26]针对目前在深部挖掘过程中常遇见的岩体破裂和诱发性岩爆,进行了大量真三轴应力卸载试验研究。在试验研究过程中,为了充分考虑中间主应力(σ_2)对板裂破坏的影响,保持 σ_2 不变,减小最小主应力(σ_3)和增大最大主应力(σ_1),试件内部微破裂的发生通过声发射装置实时监测。试验研究表明,岩石的抗压强度随 σ_2 的增大呈现增大趋势,但增大的幅度逐渐降低;当 σ_2 较小时,破坏形式主要为剪切型破坏,随着 σ_2 的增大,破坏形式由剪切型向板裂破坏形式转变。Kaunda^[27]对岩石真三轴应力状态进行人工神经网络研究,并对中间主应力对原岩强度的作用做出了论证。

深基坑工程以及深部巷道开挖工程常会涉及硬脆性岩石的卸荷试验。Huang 等^[28]研究了大理岩在三轴卸荷过程中的应变能转换规律,试验中选用的初始围压为 20MPa、30MPa 和 40MPa,选用的卸荷速率为 0.1MPa/s、1.0MPa/s 和 10MPa/s。研究表明,在卸荷过程中初始围压和卸荷速率对岩石破坏模式和能量转换率有很重要的影响,随着卸荷速率增加,岩石破坏的形式由压剪型破坏向张拉型破坏转变,峰前应变能转换率随卸荷速率增加而逐渐增大,峰后应变能转换率随卸荷速率的变化趋势与峰前变化趋势相近,但是增加的速率提高了将近 10 倍。

1.2.2 HM 耦合

近年来,岩土介质中的流固问题越来越受到关注。大部分岩土介质均处于饱和状态,其中的孔隙、裂隙被一种或几种流相填充。因此,HM 耦合机理研究对许多结构和地下工程的稳定性分析尤为重要。根据试验观察,对于大多数脆性岩石,其中裂纹萌生、扩展直至贯通引起各向异性损伤,并导致材料最终破坏。这个损伤过程不仅会对材料的力学性质产生很大影响,而且会显著改变渗流路径,进而影响 HM 耦合规律。

多孔介质流固耦合问题的研究源于土的固结理论。Brace 等^[29]首先研究了在高围压和孔隙压力下花岗岩的渗透率变化规律,开创了结合应力状态研究岩石渗透率的先例,认为花岗岩的渗透性随着有效围压的增大而减小,而孔隙压力对渗透性的影响与围压不同。Patsoules 等^[30]根据英国约克郡的白垩灰岩的渗透性试验也得出类似的结论。Gangi^[31]得出完整岩石的渗透性随围压的变化关系:完整岩

石标准化的渗透率(k/k_0)随着围压比(p/p_0)的增大而减小。上述结果表明,岩体的渗透率随着有效压力的增大而减小。Ghaboussi 等^[32]、Kranzz 等^[33]、Jones^[34]、Keighin 等^[35]、Zoback 等^[36]、Senseny 等^[37]在这方面做了大量的工作。

裂隙水力耦合模型发展最早的是平行板窄缝模型,而岩体预制裂隙耦合作用的研究主要集中在粗糙的类天然裂隙渗透系数与应力(应变)之间的相互作用关系上。Louis^[38]根据一些钻孔压力水试验成果给出了岩体渗透系数与法向应力呈负指数关系的经验公式。Gale^[39]通过对花岗岩、大理岩和玄武岩三种岩体裂隙的室内试验,得出了导水系数和应力的负指数关系方程。Tsang 等^[40]认为由于张开度的变化和岩桥的存在,裂隙渗流会出现偏流现象。Esaki 等^[41]开展了岩体的剪切渗流耦合试验,并对参数取值进行了研究。耿克勤等^[42]对剪切变形与渗流耦合进行了试验研究,解释了不同压应力作用下裂隙面剪缩和剪胀的原因。

三轴试验全过程的耦合试验是近些年随着先进试验设备和方法的不断研制开发才得以实现的试验方法。工程中岩体的破坏及其渗透性质是一个与细观损伤演化和宏观裂纹产生密切相关的过程,因此,耦合问题的试验研究势必要从简单裂隙的研究深入到渐进破裂及其渗透演化过程的分析中。

最初的研究是通过三轴压缩和剪切试验研究岩石峰值前后的渗透率变化规律,Zhang 等^[43]对 Carrara 大理石和方解石等岩样的渗透试验表明,随着应变增大,渗透率增加得更加明显。Mordecai 等^[44]在 Darley Dale 砂岩的断裂试验中测得渗透率增加 20%。Peach 等^[45]、Stormant 等^[46]对岩盐的试验也得到类似的结论。Li 等^[47]、李世平等^[48]开展了岩石应力-应变全过程中渗透率研究,发现渗透率是轴向应力-应变的函数。韩宝平等^[49]的研究结果表明,细砂岩、粉砂岩等低渗透率岩石的渗透率在应力峰值附近有一个突跳增大的现象。Zhang 等^[50]通过试验认为,脆性岩石峰值后渗透率明显产生突跳增大,这和体应变变化一致,李树刚等^[51]、姜振泉等^[52]也得到类似的结论。

随着对岩石破裂机制问题研究的深入,一些学者对峰值后试件剪切带随应变发展渗透率的演化过程存在较大争议。Zhu 等^[53]发现,围压为 13~550MPa、孔隙压力为 10MPa 的条件下,对于低孔隙度($<5\%$)的砂岩等脆性岩石的渗透率规律和李世平的结论基本一致;但对于高孔隙度($>10\%$)的岩石,不管样品表现为应变软化还是应变硬化,渗透率都随着应变的增加而减小。Zoback 等^[54]发现,花岗岩岩性的样品在脆性断裂区渗透率增加了 2/3,此时应力为峰值应力的 80%。Gatto^[55]在 Berea 岩中观察到,在剪切滑移带,非静水压力的增加通常会导致高孔隙度岩石中孔隙被压缩,渗透率减小。可见,岩石膨胀性的变化和渗透性具有一致性。Zhu 等^[56]通过研究 Adamswiller 岩、Berea 岩、Boise 岩、Darley Dale 岩和 Rothbach 岩由脆性向塑性过渡时渗透率和应力之间的函数关系,从砂岩孔隙度变化的角度详细解释了岩石由延性变形到膨胀变形的原因。Rhett 等^[57]观察到,砂岩中

渗透率的变化对通过静态和非静态相互作用的加载方式比较敏感。Somerton 等^[58]研究得出,对于煤岩,膨胀区的渗透率主要依赖于平均应力,非静水压力的影响可以忽略。Wang 等^[59]对混凝土材料裂纹扩展过程渗透性试验的研究表明,加载引起渗透率变化幅度较大。

此外,国内外许多学者采用细观分析手段对岩土介质中的 HM 耦合机理进行了大量研究。仵彦卿等^[60]开展了基于 CT 尺度的砂岩渗流与应力关系试验研究。郭芳等^[61]基于沥青路面早期水损害的水-荷载耦合 CT 扫描试验分析了力学响应机理。丁梧秀等^[62]进行了渗透环境下化学腐蚀裂纹岩石破坏过程的 CT 试验研究。李妮^[63]进行了庄 36 区低渗透油藏示踪剂适用性研究。杨勇等^[64]在低渗透水力压力下对岩石的裂纹扩展进行了 CT 扫描,曹广祝等^[65]进行了单轴和三轴及渗透水压条件下砂岩应变特性的 CT 试验研究,仵彦卿等^[66]进行了 CT 尺度砂岩渗流与应力关系试验研究。高桥学等^[67]利用显微 X 光 CT 对围压和孔隙水压条件下岩石试样的细微成像进行了研究。Ikeda 等^[68]开展了岩石渗流-应力-化学(hydrological-mechanical-chemical, HMC)耦合试验研究,崔中兴^[69]进行了基于 CT 实时观测的水-岩力学耦合机理研究。Ud-Din 等^[70]进行了关于核电站废料处理的水力耦合方面的相关研究。

1.2.3 TM 耦合

温度对岩石的物理和力学性质有着非常重要的影响,但随着岩石赋存环境的不同以及成分、结构等的差别,对温度的作用有不同的响应。

1. 试验研究

为了探究温度对岩石物理与力学性质的影响,很多学者进行了大量的试验研究,对温度影响下岩石的破坏机理有了深入的了解,并且根据试验的结果提出了模拟岩石在温度作用下的力学模型。

国内外学者在常规力学试验基础上,对岩石在温度-应力(thermal-mechanical, TM)耦合下的性质进行了大量的研究工作^[71~81]。Heuze^[71]对高温状态下花岗岩的物理力学和热学性能进行了综合叙述,对高温状态下岩石的杨氏模量、泊松比、抗拉和抗压强度、纵波波速、热膨胀率、密度、导热系数以及热扩散系数等参数的演化规律进行了阐述。唐明明等^[82]对花岗岩在低温状态下的力学性质进行了试验研究,研究表明,低温状态下,花岗岩的单轴和三轴抗压强度随温度的降低呈现出增大的趋势,黏聚力随温度的降低逐渐增大,而内摩擦角随温度的降低变化趋势不明显。黄真萍等^[83]、Yin 等^[84]、王朋等^[85]、郜保平等^[86]、Takarli 等^[87]对高温遇水处理后的岩石力学性质进行了大量的试验研究,研究表明,经过高温遇水快速冷却后的花岗岩的峰值强度、杨氏模量和纵波波速随热处理温度的提高呈减小趋

势,比高温自然冷却的花岗岩劣化程度高。Zhang 等^[88]对热处理后的岩石的物理力学性能进行了试验研究,研究表明,经过高温处理后岩石内部矿物成分、内部结构和含水率的变化使得岩石的物理力学性能发生变化,证实了随着岩石颗粒周围的结合水和结晶水的消散,岩石的强度和纵波波速逐渐降低,渗透性增大。Tian 等^[89]、徐小丽等^[90~93]、万志军等^[94]、Dwivedi 等^[95]、杜守继等^[96]对高温热处理后的岩石进行力学性能研究,研究表明,杨氏模量随热处理温度的提高逐渐降低,抗压强度与围压呈非线性二次多项式增长关系,破坏形式由脆性破裂向塑性变形过渡,低温失稳形式是突发失稳,中高温时是准突发失稳,高温时为渐进失稳;经过高温热处理后的岩石力学性质最主要的影响因素为温度,其次是围压。蔡燕燕等^[97]研究经历高温处理后的花岗岩试样在三轴卸围压试验中岩石的力学特征,研究表明,热处理温度为 300℃ 的花岗岩试样围压卸荷量最少,最容易发生破坏;并且定量地揭示了卸荷试验破坏的主要原因在于强烈的环向变形致使体积扩容破坏,高温热处理后的花岗岩破坏形态较为复杂,未经高温处理后的花岗岩破坏形式为高角度的局部剪切破坏,随着热处理温度的升高,破坏为贯通的剪切破坏,900℃ 时又变成局部剪切破坏形式。Shao 等^[98]研究了不同矿物颗粒大小的花岗岩高温冷却速率对其力学性质的影响,研究中两种不同冷却方法是高温状态在空气中自然冷却和高温状态快速浸入冷水中迅速冷却。试验结果表明,400℃ 之前,两种热处理方式中峰值应力没有显示出明显的随温度变化的趋势,杨氏模量随热处理温度的升高呈现增加的趋势;随着热处理温度的提高,细颗粒花岗岩峰值强度和杨氏模量变化的幅度远远小于中颗粒和粗颗粒花岗岩的峰值强度和杨氏模量。

也有大量学者从矿物颗粒的微观角度展开研究,分析在 TM 耦合下矿物颗粒的变化对岩石物理力学的影响。Vázquez 等^[99]研究了热处理温度对花岗岩内部矿物含量的影响,研究表明,岩石内部的矿物组成对岩石应力分布和裂隙产生的影响远远大于岩石内部单个矿物对岩石整体应力分布和裂隙产生的影响,造成岩石内部产生微裂隙的主要原因是岩石内部矿物颗粒的热膨胀量不一致。综合微观观察试验结果和类花岗岩模型数据显示,在黑云母矿物颗粒附近会出现应力集中,这会影响其他矿物颗粒的应力分配;模型数据表明,当石英和长石含量接近时(假设均占矿物成分的 45%),占矿物成分 10% 的云母承受的应力达到最大。刘泉声等^[100,101]、Szczepanik 等^[102]对多场耦合作用下岩体内部出现的裂隙扩展和演化规律进行了研究,总结了裂隙多场耦合的机制、模型和方法,对裂隙网络扩展的演化及模拟的关键问题进行了研究,并根据研究内容提出了裂隙网络演化的耦合机制和数值模拟方法。

张静华等^[103]对室温至 300℃ 温度范围内花岗岩试样的三点弯曲断裂试验和圆柱体试样的单轴压缩试验做了研究。结果表明,花岗岩以小于 2℃/min 的速率

缓慢加热到 150°C 时,断裂韧度将取得最大值,约为室温值的 1.14 倍,而单轴抗压强度随着温度的增加而递减;另外,利用扫描电子显微镜和光学显微镜的观察结果说明了温度对花岗岩断裂过程的影响。周宏伟等^[104]通过大量试验对北山花岗岩进行了不同温度作用后的细观破坏现象研究,对不同温度条件下花岗岩的破坏过程进行了细观分析,同时分析了温度与北山花岗岩强度之间的关系,发现强度随着温度的增加具有先增加后降低的趋势。

付文生等^[105]对大理岩在温度影响下的损伤特性进行了研究,在室温至 500°C 范围内,每间隔 50°C 进行大理岩多组温度下单轴压缩恒温破坏试验,得到了材料性质随温度变化的规律: 100°C 时,材料性质受温度影响不大,抗压强度和弹性模量仅有微弱减小;温度高于 100°C 时,抗压强度随温度的提高急剧降低,弹性模量也很快地减小;温度达到大约 200°C 后,发生了大理岩的脆延转换。李鹏举等^[106]从宏观和微观角度出发,分别采用宏观试验、X 射线衍射分析、断口分析研究了大理岩的脆延转换,结果表明,在试验温压范围内温度是大理岩脆延转换及成分变化的主要因素。左建平等^[107]通过试验研究了不同温度条件下砂岩的变形破坏特性,并且比较了宏观断口位置图和应力-应变曲线,认为砂岩的局部变形破坏受到温度的影响很大。左建平等^[108]还讨论了温度和压力作用下岩石的变形破坏机制,认为岩石的变形破坏是伴随着能量释放的耗散结构形成过程。

张渊等^[109]通过试验手段研究了阜新细砂岩的热破裂过程,同时对不同温度作用下阜新细砂岩的微结构、矿物组分以及内部微裂纹的发展变化进行了观测。徐小丽等^[110]对高温处理后花岗岩的力学与声发射特性进行研究,提出了机械损伤和热损伤的概念,建立了 TM 耦合损伤本构方程,并且对花岗岩热损伤开裂机理进行了分析。Wong^[111]对不同温度和压力下 Westerly 花岗岩的破坏及峰后行为进行了试验研究,发现对于干燥试样,相对于压力的影响,温度与加载速率的影响较为不明显。而且数据表明,与常温相比,高温条件下水的影响更大。刘泉声等^[112]通过三峡坝区细粒花岗岩 $20\sim 300^{\circ}\text{C}$ 温度下的单轴和常规三轴压缩流变试验,对三峡花岗岩单轴应变和黏聚力随温度和时间变化响应进行了探讨。刘泉声等^[113]还对三峡花岗岩在不同温度作用下弹性模量的变化规律进行了试验研究,采用热损伤的概念,得到了热损伤演化方程以及一维 TM 耦合弹脆性损伤本构方程。

2. 理论模型研究

邵保平等^[114]首先对鲁灰花岗岩主要成分和微焦 CT 细观结构进行了分析,然后分析了其在温度作用下流变过程中的热破裂,还对 600°C 、 150MPa 以内不同温度以及不同应力条件下花岗岩的弹性模量、热膨胀系数以及黏滞系数进行了认真细致的试验研究,通过对试验数据进行拟合,将弹性模量、热膨胀系数和黏滞系数