

水岩物理作用下 岩石力学特性研究

■ 李克钢 著



冶金工业出版社

www.cnmip.com.cn

国家自然科学基金项目 (41202229) 资助

水岩物理作用下 岩石力学特性研究

李克钢 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书介绍了作者近年来有关水岩物理作用条件下岩石力学特性及其变化规律方面所取得的研究成果。本书讨论的水岩相互作用主要为两种:一是长时间、不间断浸水对岩石力学特性的影响,在该方面,重点探讨了白云岩单轴力学特性、剪切特性、声波特性等随含水率的变化规律;二是反复干湿循环操作对岩石力学特性的影响,其中又细分为低次和高次两种情况,重点阐述了砂岩物理特性、单轴压缩强度特性、变形特性、破坏特征和剪切特性等对干湿循环效应的响应规律,最后介绍了考虑干湿循环效应的三轴压缩试验和本构关系的建立过程。

本书可供从事采矿工程、地质工程、土木工程及水利工程等研究领域的工程技术人员,以及从事岩石力学及其相关专业的科研人员、高等院校师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

水岩物理作用下岩石力学特性研究 / 李克钢著. —
北京:冶金工业出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5024-7193-4

I. ①水… II. ①李… III. ①岩石力学性质—研究
IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 045859 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7193-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版, 2016 年 3 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9 印张; 175 千字; 136 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

由于水对岩石力学特性及岩石工程稳定性的影响具有普遍性，因此对水岩相互作用的研究始终是岩土工程相关科研人员研究的前沿领域和重要内容。考虑到水岩相互作用的复杂性，要想系统全面地将水岩之间的物理作用（包括润滑、软化、干湿、冻融等）、化学作用（包括水化、溶解、酸化等）、力学作用（包括静水压力、动水压力等）以及不同水岩作用方式下岩石不同受力（如抗压、抗拉、抗剪等）状态时的力学特性变化规律全面覆盖是很困难的。本书重点介绍的是在软化和干湿两种水岩物理作用下岩石的力学特性及变化规律，而对水岩化学作用和力学作用并未涉及。

之所以有如此多的研究人员关注水岩作用下的岩石力学特性，是因为在岩石与水交互作用的过程中，岩石的强度、变形参数、剪切参数等力学特性会出现不同程度的降低，进而影响岩石工程的稳定程度。在水的影响下，岩石的强度也好，参数也罢，究竟会降低多少，将呈现何种变化规律，只能通过大量的、实实在在的试验研究才能获得。本书总结了作者近年来对水岩物理作用条件下岩石力学特性及其变化规律方面所取得的研究成果。全书共6章，主要介绍了含水率的连续变化对岩石力学特性的影响（第2章）、反复干湿循环对岩石单轴和剪切力学特性的影响（第3、4章）、三轴压缩条件下岩石力学特性对干湿循环效应的响应规律（第5章）以及考虑干湿循环效应的岩石本构关系的建立（第6章）。鉴于目前有关干湿循环效应与岩石力学特性方面的研究成果多数是在干湿循环最大次数为15次左右得到的，因此，

本书特别对这一内容进行了专题讨论,分别是第3章的低次干湿循环条件(最大干湿循环15次)和第4、5章的高次干湿循环条件(最大干湿循环达30~50次)。

由于岩石种类的多样性、岩石性质本身的复杂性以及岩石所处工程条件的多变性,对岩石力学的研究是一项需要长期为之付出努力的科研事业。本书的研究内容与成果只是“冰山一角”,今后还需开展更进一步的探索与研究。在成书过程中参考了部分国内外有关水岩研究方面的文献,谨向文献的作者表示感谢。

由于著者水平所限,书中不妥之处恳请专家和读者批评指正。

著 者

2015年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水岩相互作用下岩石力学特性研究现状	2
1.2.2 水岩相互作用下岩石微结构的研究现状	5
1.2.3 干湿循环作用下岩土体材料力学特性研究现状	6
1.2.4 岩石本构关系研究现状	7
参考文献	8
2 不同含水率下岩石力学特性变化规律研究	13
2.1 试验对象	13
2.2 白云岩样含水率随时间的变化规律	13
2.3 不同含水率下白云岩的单轴压缩试验研究	16
2.3.1 含水率测试	17
2.3.2 试验结果及分析	18
2.4 不同含水率下白云岩直剪试验研究	23
2.4.1 含水率测试	23
2.4.2 试验结果及分析	25
2.4.3 直剪岩样吸水效应分析	29
2.5 含水率对白云岩声波特性影响的试验研究	31
2.5.1 试验设备	32
2.5.2 试验结果及分析	34
2.6 本章小结	40
参考文献	41
3 低次干湿循环作用下岩石力学特性研究	43
3.1 试验对象	43
3.2 试验方案	43

3.3 干湿循环作用对岩石吸水性的影响	44
3.3.1 岩石吸水性试验设计及步骤	45
3.3.2 干湿循环对砂岩吸水率的影响	45
3.3.3 干湿循环对岩石质量损失的影响	46
3.4 干湿循环作用下砂岩的单轴压缩试验研究	47
3.4.1 干湿循环作用下岩石单轴压缩试验结果	48
3.4.2 干湿循环作用对砂岩强度特性的影响	50
3.4.3 干湿循环作用对砂岩变形特性的影响	51
3.4.4 干湿循环作用对砂岩破坏特征的影响	54
3.4.5 干湿循环作用对砂岩声发射特性的影响	56
3.5 干湿循环作用下砂岩直剪试验研究	59
3.5.1 干湿循环对砂岩抗剪参数的影响	59
3.5.2 砂岩剪切变形特性随干湿循环作用的关系	62
3.5.3 干湿循环下砂岩剪切破坏规律分析	63
3.5.4 干湿循环对岩石剪切特性影响机理的探讨	65
3.6 本章小结	66
参考文献	67
4 高次干湿循环作用下岩石力学特性研究	69
4.1 试验对象	69
4.2 试验方案	70
4.3 干湿循环对砂岩吸水率的影响	71
4.4 单轴压缩条件下砂岩力学特性的干湿循环效应研究	75
4.4.1 单轴压缩试验结果	75
4.4.2 干湿循环对砂岩变形特性的影响	77
4.4.3 干湿循环对砂岩强度特性影响分析	80
4.4.4 干湿循环对砂岩破坏特征影响分析	81
4.4.5 干湿循环作用下砂岩声发射特性研究	83
4.5 砂岩剪切特性的干湿循环效应试验研究	86
4.5.1 干湿循环对砂岩抗剪参数的影响	86
4.5.2 干湿循环对砂岩剪切破坏特征的影响	89
4.6 干湿循环作用下岩石劣化机理初步探讨	91
4.6.1 水在岩土中的赋存状态	91
4.6.2 砂岩水物理作用效应	92
4.6.3 砂岩水化学损伤机制分析	93

4.6.4 不同干湿循环条件下的砂岩微观结构分析	94
4.7 本章小结	96
参考文献	97
5 三轴压缩条件下砂岩的干湿循环效应研究	99
5.1 引言	99
5.2 试验概况	99
5.3 试验结果分析	100
5.3.1 干湿循环对砂岩三轴抗压强度的影响	100
5.3.2 干湿循环对砂岩变形特性的影响	101
5.3.3 干湿循环对砂岩抗剪参数的影响	104
5.3.4 干湿循环对砂岩破坏特征的影响	106
5.4 讨论	107
5.5 本章小结	108
参考文献	108
6 考虑干湿循环效应的岩石损伤本构关系研究	110
6.1 引言	110
6.2 受干湿循环效应影响的岩石损伤统计本构模型研究	110
6.2.1 损伤统计本构模型的建立	111
6.2.2 本构模型的试验验证	113
6.3 受干湿循环效应影响的岩石神经网络本构模型研究	114
6.3.1 人工神经网络的基本原理和方法	115
6.3.2 BP 神经网络	118
6.3.3 考虑干湿循环影响砂岩本构模型的神经网络表达	120
6.3.4 模型体系结构的确定	121
6.3.5 模型数据样本的提取及处理	122
6.3.6 BP 神经网络本构模型的程序实现	130
6.3.7 基于 BP 神经网络本构模型的仿真分析	131
6.3.8 砂岩 BP 网络本构模型的预测应用	133
6.4 本章小结	134
参考文献	135

1 绪 论

1.1 引言

岩石力学最早起源于采矿工程,但作为一门学科的出现,是随着矿山、公路、铁路、水利、水电、土木及国防等众多岩土工程建设的需要和各种力学理论、计算技术、实验手段等的进步而逐步发展形成的。岩石力学面向的研究对象是经历漫长的地质作用且受工程活动影响的那部分极其复杂非均质、各向异性的岩体。岩石是自然界最为复杂的固体材料之一,由于反复多次的地质构造应力场作用和改造,使得原本较为完整的岩体变成了不同损伤程度的地质体,并形成了大小不一、形态各异的节理、裂隙等结构面及断层,因此,即便是看上去比较完整的岩块,在其内部亦随机分布着大量的隐微裂隙。近些年,随着“三峡工程”、“西气东输工程”、“南水北调工程”、深部矿产资源开采、地下隧道与厂房建设、核废料地下处置、地下能源的储存与开发等各种岩土工程规模的不断扩大,对岩体开发、改造的深度与广度不断深入,遇到的岩土工程问题也不断增多。

在众多的岩土工程问题中,除岩土环境问题外,大多数集中在岩土工程的稳定性上,如地基的稳定性、边坡的稳定性、硐室的稳定性、隧道的稳定性等,因此,要有效解决岩土工程问题,根本上可归结为评价并维护岩体稳定性的问题。众所周知,影响岩体稳定性的因素很多,岩石坚硬程度和岩体完整程度是岩体的基本属性,它反映了岩体质量的基本特征。除此以外,水、岩体结构、应力状态以及工程轴线或走向线方位与主要软弱结构面产状的组合关系等也是影响岩体稳定很重要的因素。其中,由于岩石水理性的存在及自然界中水存在的广泛性,使得水成为所有影响因素中最为普遍、也最为重要的一个条件,也正因如此,才有了“十个边坡九个水”之说,也才有了含膨胀性矿物岩石不断吸水膨胀进而导致巷道失稳破坏的情况。

据不完全统计,90%以上岩体边坡的失稳破坏、60%的矿井事故及30%~40%的水电工程大坝失事等均与水有着密切关系。如此多的工程岩体失稳与破坏由水对岩石的作用所引起,更进一步说明自然界中广泛存在的水岩相互作用对岩石的力学性质及岩体工程的稳定性有着非常重要的影响。从岩土工程领域的研究角度出发,水岩相互作用实质上就是水与岩土体之间不断进行物理、化学、力学

作用的过程,不管哪种作用方式,它们的实质均是使岩土体物理力学参数发生改变,进而引起岩体工程稳定性的变化。因此,作为岩土工程领域研究的热点与前沿课题,系统地研究水岩相互作用下岩石物理力学特性的变化规律,掌握在水的物理、化学、力学作用下岩土体所产生的劣化效应,不仅可以为相关岩土工程的开挖、支护和稳定性分析提供科学理论依据,还有利于工程的安全建设及确保其长期稳定,而且也是对岩石力学理论体系的进一步完善与有益补充。

1.2 国内外研究现状

20 世纪 30 年代,太沙基在对云母开展室内劈裂实验时,发现云母被劈开裂缝的长度受水溶液的影响明显,由此揭开了水岩相互作用研究的帷幕,但水岩相互作用作为术语被正式使用,则是在 50 年代以后的事情。从发展进程看,水岩相互作用的研究大致可分为以下几个阶段:20 世纪 50~70 年代初为起步阶段,70 年代初~80 年代末为研究框架基本形成阶段,80 年代以后至今为快速全面发展阶段。自 1974 年第一届国际水岩相互作用大会召开至今,已经连续举办了 14 届,每三年举办一次,最近一次于 2014 年 6 月 8~14 日在法国阿维尼翁举办。由于该国际大会由国际地球化学协会(IAGC)主办,所以会议内容主要偏向于水岩作用的水化学方面,例如探测地球中水的化学演化、水质时空分布规律、水-岩作用的地球化学特征与地质效应、页岩气开采、地热流体、化学动力学等方面,而对水-岩作用的另一分支即水动力学方面涉及较少,而该部分内容,包括水岩作用下的岩土体稳定性问题、地质灾害发生机理等,与岩石力学关系最为密切,因此,针对该部分水岩相互作用方面的研究便成为当前岩石力学研究的重点与热点。水岩相互作用过程示意图可用图 1-1 表示。

1.2.1 水岩相互作用下岩石力学特性研究现状

针对水对岩石力学性质影响方面,开展相对较早且成果相对丰富的研究内容集中在岩石中含水量的不同状态与岩石力学性质变化规律方面。

在国外方面,L. Obert 等很早就对含水量对不同矿岩强度方面的影响进行了研究,结果表明,砂岩在饱水状态下的抗压强度较风干状态下降了 10%~20%。Colback 和 B. L. Wiid 就水对岩石在变形及强度特征方面的影响作了一定程度的研究。Y. P. Chugh 和 R. A. Missavage 分别研究了温度和湿度对岩石力学性能的影响,结果表明随着湿度的加大,岩石泊松比上升,而抗压强度、弹性模量以及断裂韧度都有不同程度的下降。L. J. Feuchtb 等以水岩化学作用为出发点,通过模拟化学环境讨论了其对砂岩在力学摩擦特性方面的影响。B. K. Atkinson 等研究了 HCl 和 NaOH 溶液对石英的裂隙扩展速率、应力强度因子和应力强度系数的影响。J. M. Logan 与 J. H. Dieterich 等也认为环境侵蚀对摩擦变形的影响很大。

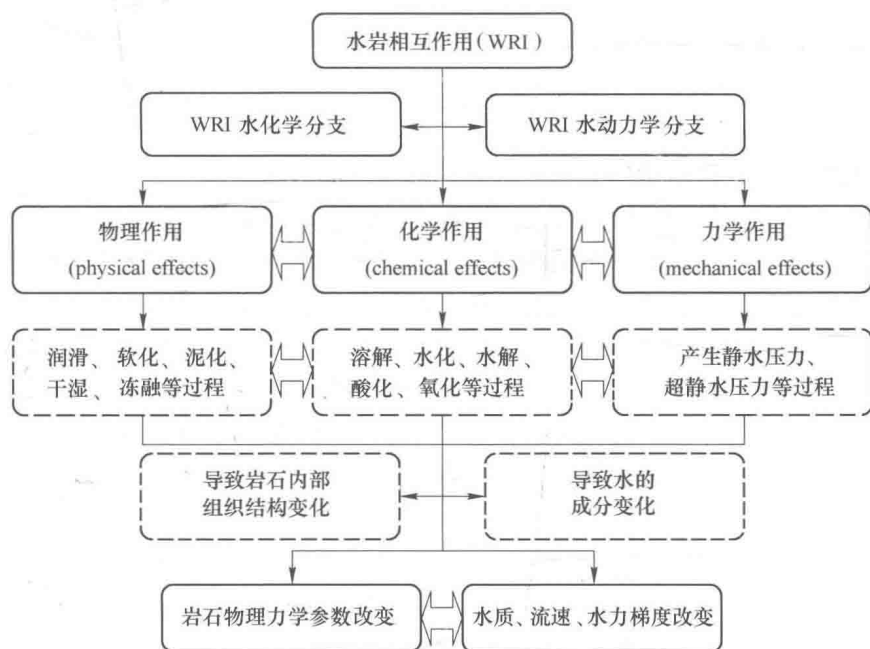


图 1-1 水岩相互作用过程示意图 (据傅晏, 2010)

A. B. Hawkins 等对英国 35 种砂岩进行了干燥和饱水条件下的单轴抗压强度的对比试验, 研究发现饱水后的砂岩强度普遍降低, 强度损失率主要受制于岩石中石英和黏土矿物的比例, 并认为泥屑岩的水稳定性较差主要是与含水量增大时黏土颗粒的结合水膜厚度加大及抗剪强度降低有关等。

对于饱水后的岩石力学特性, 国内许多学者也进行了大量的研究。陈钢林等通过对不同饱水条件下的花岗闪长岩、砂岩、大理岩和灰岩进行单轴压缩试验, 分析了这几种岩石抗压强度和弹性模量随饱水度的变化关系, 得出了岩石含水率与岩石力学效应密切相关, 干燥花岗闪长岩、砂岩浸水后, 其弹性模量和峰值强度随饱水度的增大而迅速降低等相关结论。张倬元等通过研究认为由于水的作用, 导致岩体孔隙水压力发生变化, 继而影响岩石的力学性能; 黄润秋等在地下水劈裂作用方面亦取得了一定的研究成果。朱合华等对饱水状态下致密岩石的声学参数进行了探讨, 认为岩石饱水后纵波主频明显降低, 且岩石滤波作用各向异性明显, 从而间接地反映了岩石的各向异性, 即不同方向上微观结构的差异性。赵中波进行了干燥及含水率为 7% 的板岩的抗拉、抗压和抗剪试验, 证实了板岩在干燥状态下抗压强度为 80MPa, 含水状态下为 45MPa, 强度下降了 57% 左右, 水对岩石具有弱化作用, 其主要原因是板岩层面相对光滑、粗糙度小, 试验工程中形成的相对薄层粉末减小了摩擦力, 破坏是沿层面产生的。曾云通过对盘

道岭隧道地区采集的泥岩、砂岩等软岩进行三轴压缩试验,测定了岩石在天然和饱和状态下的强度、变形等参数,采用次应变系数 K_t 值来评估岩样的软化程度,结果表明:(1)随着岩样中粉黏粒含量的增加,含水量的升高,岩石更易软化,其强度降低,相应的应变、变形增大;(2)含水量增加后,受饱水后浸水软化作用,岩样发生变形时塑性变形区增大,峰点和屈服点距离增大,饱水时屈服点应变值是峰点应变值的 73.3%,自然状态为 84.8%,反映出浸水软化的效应作用使变形增大,强度降低。李铀等采用单轴压缩系统进行自然状态与饱和状态下花岗岩的单轴压缩流变试验,证实试验曲线可用 $u = a\sigma + F + A\ln(1 + \beta t)$ 关系式进行很好的拟合,其中 A 和 β 的不同取值可用来体现岩石饱和度的不同变化。彭曙光等对金川四种不同岩性矿岩进行了饱水状态下的抗压试验,采用数值分析方法总结出含水率与单轴抗压强度的拟合关系,而该区域矿岩呈现遇水软化、抗压强度降低的特点,且岩石破坏不属于脆性破坏。熊德国等针对煤系地层中的砂岩、砂质泥岩和泥岩进行了自然及饱水状态下的三轴压缩试验研究,表明饱水状态下试样峰值强度对围压的敏感度大于自然状态下峰值强度对围压的敏感度。

另外,考虑到岩石对水的吸收是个逐步发展的动态过程,针对此现象,亦有不少学者对不同含水量与岩石力学性质二者之间的变化规律进行了试验研究与探讨。如胡昕等为了描述不同水分含量红砂岩的力学性质,对红砂岩试样进行了不同幅度的吸水操作,继而对其进行单轴压缩变形试验,结果表明红砂岩的强度随吸水幅度的加大而降低,但当红砂岩含水率超过 6% 时,水对其力学特性的影响明显减弱,并建立了考虑含水率影响的红砂岩损伤统计关系模型。孟召平等就不同含水条件下沉积岩的力学性质进行了研究,结果表明,随含水量的加大,岩石单轴抗压强度及弹性模量有下降的趋势,在干燥及含水率较小的条件下,岩石应力-应变曲线上的应变软化阶段明显,即岩石在峰值强度后具有明显的脆性及剪切破坏特征,但在含水率较大的前提下,岩石的应变软化特性减弱,相应的塑性破坏特征体现得渐为明显,岩石的冲击倾向性能下降。李昌友等对风化板岩进行不同含水率条件下的崩解特性试验研究,证实了矿物的水理性强弱与含水率的变化交替程度有关,一般保持在天然含水率状态下浸水的矿岩,其水理性显现程度较小,而干燥失水作用的矿岩再浸水后,其水理性变得极其强烈。周翠英对碳质泥岩做了不同初始含水率和不同浸水时间状态下的抗剪强度试验,认为土石含水量的提高与水流带走土石中细小颗粒成分等物理作用,以及水的侵入使岩体破坏面上的有效正应力减小等力学作用是导致岩石抗剪强度弱化的主要原因。周瑞光等通过对断层破裂带附近糜棱岩、断层泥进行的一系列不同含水率流变试验,证实了岩石的破坏强度、内摩擦力、长期强度的内摩擦系数与含水率大小呈负指数关系,且断层泥蠕变特性具有明显的含水量力学效应。

1.2.2 水岩相互作用下岩石微结构的研究现状

国外学者 S. W. J. Den 等对高温、不同含水状态、不同加载速率等条件下的砂岩进行了试验研究以分析砂岩内部微裂隙的变化情况。J. Hadizadeh 等通过不同围压和应变速率下的砂岩力学试验,阐述了水对砂岩强度的劣化效应,认为砂岩的颗粒形态、胶结成分、孔隙形态和孔隙大小等是影响水对岩石不同作用程度的主要因素。T. Heggheim 等对不同溶度盐水、乙醇和海水处理后的灰岩进行了力学性能及相应微观结构的变化研究,认为灰岩力学性能的变化取决于溶液中的离子与灰岩之间化学反应的结果,即灰岩矿物结构与成分的变化,并基于研究成果初步建立了相关的理论模型。F. S. Jeng 等以中国台湾地区的第三纪砂岩为研究对象,分析水作用下岩石弱化的微观机制,得到了单轴压缩条件下的强度随岩石水饱和度的增加呈现负指数关系下降的结果,同时对其进行了干湿循环淋滤作用的模拟,在循环了 60 次后砂岩强度下降了近 20%,而孔隙率随循环次数的增加呈现非线性增长的态势。F. G. Bell 等总结了地下水对岩石及土体工程性质等方面的影响情况,认为水对岩石化学风化作用的原因主要有两方面:一方面认为就水本身而言水就是有效媒介,另一方面则是水对组成岩石的矿物进行持续溶解的过程。M. G. Karfakis 等以化学环境为出发点探讨了其对岩石破裂等方面的影响情况。J. Dunning 等通过试验得到了岩石在湿润条件下其破坏结果韧性值较干燥状态下要低,同时前者裂纹扩展速度较后者要快的结果。

国内学者汤连生等在岩石水化学作用效应方面有着较为深入的研究,分析表明,岩石之所以产生水-岩化学作用力学效应,关键因素是岩石内部的胶结成分及所含钙离子或铁离子矿物的程度。冯夏庭等在对岩石分别进行了水浸泡及不同化学溶液的侵蚀处理后,进行了单轴压缩试验并及时观察了试验过程中岩石内部微缺陷等的发展演变情况,分析了灰岩、砂岩及花岗岩在化学腐蚀下微细破裂变化情况及相应的蚀变机制,另外还对砂岩在三轴加载过程中微缺陷等的发展演变过程利用 CT 技术进行了即时扫描,并在试验后基于统计的 CT 数建立了考虑化学腐蚀效应的砂岩损伤变量关系。杨春和等通过对板岩进行最大上限为 9d 的不同时间浸泡处理,发现岩样内部的矿物颗粒随着浸泡的持续体积逐渐膨胀,胶结变得松散,孔隙度也随之增大。周翠英等对软岩进行了水化学作用的研究,认为岩石软化是诸多因素综合作用的结果,如易溶性矿物的溶解及相应矿物的生成、黏土矿物的亲水性、水作用下软岩内部微观力学的作用机制等。乔丽苹等针对不同水环境下组成砂岩的矿物蚀变以及砂岩的孔隙率变化等情况进行了相关的试验,从微观、细观方面探讨了砂岩的损伤机制。

1.2.3 干湿循环作用下岩土体材料力学特性研究现状

对干湿交替作用下岩石(土)类材料基本力学特性方面的研究,主要集中在混凝土及膨胀土方面,如乔宏霞、黎海南等学者将粉煤灰混凝土置于饮用水中进行干湿循环试验,试验结果表明混凝土的动弹性模量降低,干湿循环作用对混凝土有较强的损伤作用。Steven H. Kosmatka 等认为硬化的混凝土吸湿会出现膨胀,干燥时会产生收缩,当混凝土受到约束时,内部将产生拉应力,而当其超过混凝土的抗拉强度时,便会出现裂缝。Robert D. Cody 等通过试验对比了混凝土在硫酸钠溶液中干湿循环、连续浸泡和冻融循环状态等不同条件下的膨胀量,结果表明干湿循环作用的影响最大,连续浸泡产生的影响最小。于连顺对不同干湿循环幅度下膨胀土的强度和变形规律进行了研究,认为干湿循环会对膨胀土的强度参数产生影响,且对黏聚力的影响程度大于内摩擦角,而膨胀土的变形随着干湿循环次数的增加表现出先增大后趋于稳定的特征。王艳军在对膨胀土进行干湿循环试验后也认为干湿循环的影响主要体现在土体强度衰减上,且对黏聚力的影响要明显大于内摩擦角。杨和平等通过试验研究了有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律,得到了在干湿循环次数相同时,膨胀土的胀缩率与荷载大小成反比,而在荷载大小不变时,膨胀土的抗剪强度与干湿循环次数亦成反比的结论。

在有关岩石物理力学特性与干湿交替作用二者之间的关系方面,已有的研究成果相对较少,且主要集中在有关干湿循环次数对岩石强度的影响方面,如傅晏等对干湿循环作用下微风化砂岩的强度特性进行了研究,在经过 15 次的干湿循环操作后,微风化砂岩的抗压和抗拉强度以及弹性模量均出现下降,且与干湿循环次数的变化规律可用对数函数关系表示。另外,他还以中风化砂岩为研究对象,对其进行了不同程度的干湿循环操作,并通过试验探讨了砂岩抗剪强度特性随干湿交替次数的变化规律,结果表明砂岩抗剪强度参数随干湿循环幅度的加大有减小的趋势,且这种现象在前期体现的较为明显,后期的减小幅度则逐渐变缓。姚华彦等对红砂岩进行了最大上限为 8 次的室内干湿交替模拟,在此基础上对干燥及经过不同干湿交替作用的红砂岩试样开展了单轴压缩与三轴压缩试验,同样的,分析表明,经干湿交替作用后红砂岩试样的强度与变形参数较干燥状态出现了一定程度的下降。秦世陶等进行了两种不同岩性的多次干湿、变温循环试验研究,发现干湿循环下的岩石强度损失率要大于变温循环,且岩石强度的衰减并不是随着循环次数的增加无限制的增大,而是存在一个临界循环次数。许波涛等分析了二长浅粒岩在干燥和饱水这一简单干湿循环条件下的动静弹模关系,发现饱和状态下的动静弹模比值总是大于 1,且干燥状态下的动静弹模比值要比饱和状态时小。A. Prick 研究比较了干湿、冻融交

替两种作用对页岩风化的影响程度,亦得到了后者作用更为强烈、但前者的影响也不可忽略的结论。

1.2.4 岩石本构关系研究现状

对岩石本构关系的探索,国内外许多研究学者在试验的基础上,根据岩石材料的复杂多变性提出了许多本构模型,如线弹性模型(如虎克定律)、弹塑性模型(如剑桥模型)、黏弹塑性模型(如修正的索费尔-斯科特-布内尔模型)等,这些模型都在一定程度上反映了岩石的力学性质。

国外学者在此领域涉足较早,Dougill 是国内外最早提出岩石材料损伤力学研究的。Dragon 和 Morz 提出了能反映应变软化岩石与混凝土的弹性本构关系的应用损伤概念,认为塑性膨胀率与损伤有直接的关系,并建立了相应的连续介质损伤力学模型。随后 Krajcinovic 和 Kachanov 等分别从不同的角度将损伤力学应用于岩石材料,并从岩石自身的构造特征出发,探讨岩石损伤的机理,建立了相应的理论和模型,且将有关成果进一步推广到了一般的脆性损伤问题。Lemaitre 采用等效应变概念提出一种应力-应变关系,认为只需要将本构关系中的应力用有效应力代替,该本构关系就能体现其应变性能。Krajcinovic 以岩石脆性类材料为研究对象,在基于热力学理论建立本构关系方面作了较为系统的研究。Ortiz 从岩石材料内部微裂纹损伤这一基点出发构建了相应的连续损伤模型。Costin 建立了连续损伤关系,用于等效宏观损伤标准表征微裂纹的扩展。

国内学者在此方面也做了大量的工作,亦取得了不少的成果,推动了岩石统计损伤力学的发展。李长春等考虑微裂纹对岩石材料力学特性的影响,根据假设的弹性介质、小裂纹和等效裂纹,采用自洽方法建立脆性岩石类材料的细观损伤本构关系。叶黔元将岩石类材料分为未损伤和损伤两种来讨论它的自由特性,并引入内蕴时理论,建立了岩石内时损伤模型。唐春安则以试验过程中岩石的纵向应变作为损伤统计分布变量,对岩石材料的断裂损伤过程进行了深入的研究。吴政等根据 Weibull 统计理论从唯象学的角度出发,推导出了岩石单轴压缩荷载作用下的损伤模型,揭示出了岩石材料固有力学特性与临界损伤值的关系。曹文贵等基于 Drucker-Prager 强度破坏准则,引入了岩石微元强度这一概念,且以岩石微元强度服从 Weibull 随机分布特征为切入点,构建了岩石变形断裂过程的损伤软化统计本构模型,并通过对本构方程进行 2 次对数及线性拟合取得 Weibull 分布参数。杨友卿根据岩石材料强度的概率统计特征,并结合莫尔强度理论,建立了三轴压缩应力状态的岩石损伤本构模型。徐卫亚、杨圣奇等基于岩石微元强度的随机统计分布假定及岩石应变强度理论,构建了单轴压缩条件下考虑材料残余强度的岩石损伤

统计本构模型,并基于不同尺寸岩石所得试验结果差异性这一实际情况,建立了考虑尺寸效应的岩石材料损伤统计本构关系。李树春等在前人研究的基础上,针对以往岩石材料损伤统计本构关系存在的缺陷,引入岩石应力-应变全过程曲线特征参量及初始损伤系数 q ,以此对岩石材料损伤统计本构关系进行了修正。刘树新等以岩石微元强度的 Mohr-Coulomb 准则为出发点,在基于 Weibull 分布建立的本构关系中引进了考虑岩石初始损伤的分形参数,并研究了岩石微元强度 Weibull 参数在不同多重分形参数下的取值规律。刘军忠等进行了斜长角闪岩在不同应变率及围压等级下的冲击压缩力学特性试验研究,从岩石微元强度服从 Weibull 随机分布特点出发,在试验结果的基础上结合统计损伤模型及黏弹性模型建立了相应的动态损伤本构关系。此外,杨松岩、周飞平、韦立德等在 Terzaghi 型本构模型及 Darcy 定律的基础上,将面积分数、体积分等作为损伤变量,建立了处理饱和非饱和岩石的损伤统计本构模型。

参考文献

- [1] 刘业科. 水岩作用下深部岩体的损伤演化与流变特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [2] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [3] Obert L, Windes S L, Duvall W L. Standardized tests for determining the physical properties of mine rock [J]. RI-3891, Bureau of Mines, U. S. Dept. of the Interior, 1946.
- [4] Colback Wiid B L. Influence of moisture content on the compressive strength of rock [C] // Proc. 3rd Canadian Rock Mech. Symp. University of Toronto, 1965: 385 ~ 391.
- [5] Chugh Y P, Missavage R A. Effects of moisture on strata coal mines [J]. Engineering Geology, 1981 (17): 241 ~ 255.
- [6] Feuchtl L J, John M L. Effects of chemically active solutions on shearing behavior of a sandstone [J]. Tectonophysics, 1990 (175): 159 ~ 176.
- [7] Atkinson B K, Meredith P G. Stress corrosion cracking of quartz: A note on the influence of chemical environment [J]. Tectonophysics, 1981 (77): 1 ~ 11.
- [8] Logan J M, et al. The influence of chemically active fluids on the frictional behavior of sandstones [J]. EOS, Trans. Am. Geophys. Union, 1983, 64 (2): 835 ~ 840.
- [9] Dieterich J H, Conrad G. Effects of humidity on time and velocity dependent friction in rocks [J]. J. Geophys. Res., 1984 (89): 4196 ~ 4202.
- [10] Hawkins A B, McConnell B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, 25 (11): 115 ~ 130.
- [11] 陈钢林. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的试验研究 [J]. 地球物理学报, 1991 (3): 335 ~ 342.
- [12] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1997.
- [13] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (5): 573 ~ 576.

- [14] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (5): 823 ~ 828.
- [15] 赵中波. 某水电坝基工程岩石物理力学试验及探讨 [J]. 江西有色金属, 1998, 12 (4): 4 ~ 6.
- [16] 曾云. 盘道岭隧洞软弱岩石浸水软化对强度和变形特性的影响 [J]. 陕西水力发电, 1994, 10 (1): 29 ~ 33.
- [17] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10): 1673 ~ 1677.
- [18] 彭曙光, 裴世聰. 水-岩作用对岩石抗压强度效应及形貌指标的实验研究 [J]. 实验力学, 2010, 25 (3): 365 ~ 370.
- [19] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (5): 998 ~ 1006.
- [20] 周瑞光, 成彬芳, 高玉生, 等. 断层泥蠕变特性与含水量的关系研究 [J]. 工程地质学报, 1998, 6 (3): 217 ~ 222.
- [21] 胡昕, 洪宝宁, 孟云梅. 考虑含水率影响的红砂岩损伤统计模型 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (5): 609 ~ 613.
- [22] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮, 等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (A1): 2637 ~ 2643.
- [23] 李昌友, 傅鹤林, 蔡海良, 等. 风化板岩水理特性研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6 (1): 74 ~ 77.
- [24] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (1): 33 ~ 38.
- [25] Den Brok S W J, Spiers C J. Experimental evidence for water weakening of quartzite by microcracking plus solution-precipitation creep [J]. Journal of Geological Society, 1991, 148 (3): 541 ~ 548.
- [26] Hadizadeh J. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 1991, 28 (5): 431 ~ 439.
- [27] Heggheim T, Madland M V, Risnes R, et al. A chemical induced enhanced weakening of chalk by seawater [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 46 (3): 171 ~ 184.
- [28] Jeng F S, Lin M L, Huang T H. Wetting deterioration of soft sandstone-microscopic insights [C] // An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, 19th - 24th Nov. 2000.
- [29] Lin M L, Jeng F S, Tai L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism [J]. Environment Geology, 2005 (48): 265 ~ 275.
- [30] Bell F G, Cripps J C, Culshaw M G. A review of the engineering behaviour of soils and rocks with respect to groundwater [J]. Groundwater in Engineering Geology, London, 1986: 1 ~ 23.
- [31] Karfakis M G, Askram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing [J]. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci. & Geomech. Abstr. 1993, 37 (7): 1253 ~ 1259.
- [32] Dunning J, Douglas B, Millerete M. The role of the chemical environment in frictional deforma-