



博士后文库

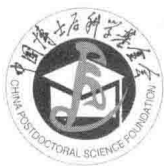
中国博士后科学基金资助出版

泥岩物性与改性

柴肇云 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

泥岩物性与改性

柴肇云 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统论述我国煤系地层泥岩的物理力学性质及通过电化学和有机硅材料改性技术实现其工程特性强化的理论与方法。书中详细介绍煤系泥岩的典型工程危害及矿物学特征、表面性质与孔裂隙特征、力学性质、泥化与崩解以及胀缩性等与工程特性密切相关的物理力学性质,系统阐述采用电化学和有机硅材料改性技术强化泥岩工程特性的研究思路方法及软岩巷道围岩的改性加固技术等。

本书内容丰富,资料翔实,是一部涉及软岩及其工程稳定性控制的专著,可以作为矿业工程、安全技术与工程、工程力学和岩土工程等专业的低年级本科生和研究生的高等岩石力学课程辅助教材,也可作为科研及矿山工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泥岩物性与改性 / 柴肇云著. —北京: 科学出版社, 2017.8

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-054378-3

I. ①泥… II. ①柴… III. ①泥岩-研究 IV. ①P588.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第218444号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 240 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱
刘 伟	卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪
万国华	王光谦	吴硕贤	杨宝峰	印遇龙
喻树迅	张文栋	赵 路	赵晓哲	钟登华
周宪梁				

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

煤炭开采环境为沉积岩，在煤系地层沉积岩中，泥岩是一种主要构成岩层，包括碳质泥岩、砂质泥岩和页岩等软弱岩体。由于泥岩独特的物理化学性质，其对温度、湿度、应力和地下水等环境因素极为敏感，特别是湿度条件变化时，泥岩的性质和状态会发生很大的变化，产生水化膨胀、碎胀扩容、强度降低，导致处于这类岩层中的巷道、硐室、建筑物基体等产生大变形甚至坍塌。

在工程中对软岩加固支护处理的方法有锚喷加固、棚式支护、砌碇或封闭混凝土拱，以及这几种方式相结合的各类支护方式。通常，根据具体条件合理采用各类支护方式，以确保软岩工程的稳定与安全。但这些方法的研究重点都集中在对已破碎或软化崩解的软岩的加固上，只是从力的平衡角度进行加固，存在着较大的局限性和时效性，如对遇水膨胀的泥岩，由于支护系统不能承受巨大的膨胀和碎胀应力，而锚固系统又找不到有效的着力点，支护效果不佳。

本书是作者及其所在课题组近 20 年从事软岩及其工程稳定性控制问题研究工作的总结。书中详细分析煤系泥岩的工程特征，基于全国 9 个典型软岩矿区的 20 余种泥岩样品的 X-射线衍射分析，得出煤系泥岩的物质组成及矿物学特征；基于泥岩样品的扫描电镜测试和液氮等温吸附试验，系统研究煤系泥岩的表面凹凸形貌特征、表面性质和显微孔裂隙形态特征与分布规律，揭示孔裂隙分布对泥岩吸水软化崩解的影响规律；基于泥岩的单轴压缩、巴西圆盘劈裂和变角剪切压模试验，研究不同条件下岩样载荷-位移曲线的相关性、破坏形态、破坏裂隙演化规律和破裂块体的分形分布规律；基于不同成煤期煤系地层泥岩的耐崩解性对比试验，结合岩样物质组成和孔裂隙分布的测试结果，研究循环崩解作用下泥岩崩解物形态特征和耐崩解性指数的变化规律，揭示泥岩耐崩解性差异、差异产生机理及其与矿物组成的相关规律；基于泥岩的自由膨胀试验，研究泥岩的胀缩各向异性、水化学环境变化以及干湿循环作用对泥岩胀缩性能的影响规律，揭示泥岩胀缩性发生变化的内在机制；对比分析电化学改性前后泥岩的零电荷点与电荷密度、 ζ 电位与等电点、颗粒沉降与体积膨胀性、矿物成分含量与晶体结构以及孔裂隙与强度的变化规律，阐明电极材质对泥岩电化学改性效果的影响规律，提出新型的软岩巷道围岩电化学加固的电极布置方式；通过泥(砂)岩的有机硅材料改性试验，对比分析有机硅材料改性前后泥(砂)岩的表面疏水性、孔裂隙、胀缩性、微结构、强度特征等物性变化规律，揭示有机硅材料改性泥(砂)岩的改性机理。

本书是作者所在课题组许多研究者的辛勤劳动和集体智慧的结晶，更多地凝

结了作者硕士博士导师康天合教授在此领域创新的学术思想，作者对他们的支持和帮助表示衷心的感谢。

本书相关研究内容获得包括国家自然科学基金(51004075, 51674173)、中国博士后科学基金(20110491631)、山西省自然科学基金(2011021024-2, 201601D102038)和山西省回国留学人员科研资助项目(2016-040)等多项课题的资助。作者对长期关心和支持本项研究的领导、专家、学者和工程技术人员表示由衷的感谢，由于水平所限不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017年3月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 泥岩的工程特征	2
1.1.1 泥岩的强度特性	2
1.1.2 泥岩的变形特性	3
1.1.3 泥岩的水理特性	4
1.2 软岩工程稳定性控制方法及局限性	7
1.3 泥岩改性的基本思路	8
1.3.1 电化学改性技术的发展	9
1.3.2 有机硅材料改性技术的发展	10
参考文献	12
第 2 章 泥岩的典型工程危害及矿物学特征	16
2.1 泥岩的工程危害	16
2.2 煤系地层泥岩的成因	20
2.2.1 泥岩所含黏土矿物	20
2.2.2 黏土矿物成因分析	23
2.3 泥岩的物质组成	25
参考文献	32
第 3 章 泥岩的表面性质与孔裂隙特征	34
3.1 泥岩的表面凹凸形貌特征	34
3.2 泥岩的表面性质	38
3.2.1 表面润湿性	38
3.2.2 表面能	41
3.2.3 表面官能团	42
3.2.4 表面电性	42
3.3 泥岩的孔裂隙特征	45
3.3.1 孔隙分类与测定方法	45
3.3.2 显微孔裂隙形态特征	46
3.3.3 孔裂隙分布特征	49

3.4 孔裂隙与吸水性的关系	50
参考文献	51
第4章 泥岩的力学性质	53
4.1 泥岩的单轴压缩	53
4.1.1 单轴压缩的全程应力-应变曲线	53
4.1.2 单轴压缩的破坏形式	55
4.1.3 峰后残余强度与支护的相互关系	55
4.2 泥岩的巴西劈裂	56
4.2.1 巴西劈裂的载荷-位移曲线	56
4.2.2 巴西劈裂的破坏形式	57
4.3 泥岩的压剪破坏	58
4.3.1 变角剪切压模试验	58
4.3.2 压剪破坏的裂隙演化规律	62
4.3.3 压剪破坏破裂块体的分形特征	64
参考文献	67
第5章 泥岩的泥化与崩解	68
5.1 泥岩的泥化特性	68
5.2 泥岩的耐崩解性	69
5.2.1 实验样品与方法	69
5.2.2 崩解循环对岩样形态的影响	71
5.2.3 崩解循环对耐崩解性指数的影响	72
5.2.4 耐崩解性差异产生机理分析	75
5.3 泥岩的泥化崩解机理	75
5.3.1 泥岩的泥化机理	75
5.3.2 泥岩的崩解机理	77
参考文献	79
第6章 泥岩的胀缩性	80
6.1 试验岩样与方法	81
6.1.1 试验岩样	81
6.1.2 试样制备	81
6.1.3 试验装置	82
6.1.4 试验方案	83
6.2 泥岩膨胀各向异性	84
6.2.1 膨胀变形随层理面方位的变化规律	84
6.2.2 膨胀各向异性形成机理	85

6.3 水化学环境变化对膨胀性的影响	87
6.3.1 溶液浓度变化	87
6.3.2 阳离子价位变化	88
6.3.3 化学路径	93
6.4 泥岩的循环胀缩特性	94
6.4.1 胀缩变形随循环次数的变化规律	94
6.4.2 泥岩循环胀缩特性的形成机理	96
6.5 关于泥岩胀缩性的讨论	97
参考文献	98
第7章 泥岩的电化学改性	100
7.1 改性前后泥岩的零电荷点与电荷密度	100
7.1.1 电位滴定(PT)法	100
7.1.2 电位滴定法测定零电势点的理论探讨	101
7.1.3 零电势点的测定结果与分析	102
7.2 改性前后泥岩的 ζ 电位和等电点	105
7.3 改性前后泥岩颗粒沉降与体积膨胀性	106
7.3.1 试验岩样与方法	106
7.3.2 试验现象及其机理解释	108
7.3.3 蒸馏水中电化学作用对泥岩颗粒沉降与膨胀性的影响	109
7.3.4 溶液浓度对泥岩颗粒沉降与膨胀性的影响	111
7.3.5 加电时机对泥岩颗粒沉降与膨胀性的影响	113
7.3.6 电位梯度对泥岩颗粒沉降与膨胀性的影响	114
7.3.7 电化学作用过程中岩样电流强度和温度的变化	115
7.4 改性前后泥岩矿物成分含量与晶体结构	116
7.4.1 溶液浓度变化对泥岩矿物成分含量的影响	117
7.4.2 溶液浓度变化对泥岩新生矿物及其含量的影响	119
7.4.3 溶液浓度变化对泥岩矿物晶层间距的影响	119
7.4.4 溶液浓度变化对泥岩矿物晶粒大小的影响	120
7.5 改性前后泥岩孔裂隙与强度	122
7.5.1 试验岩样与方法	122
7.5.2 典型试验现象	123
7.5.3 温度变化	125
7.5.4 孔隙变化	127
7.5.5 显微结构变化	129
7.5.6 单轴抗压强度变化	132
7.6 泥岩电化学改性的物理模拟	133

7.6.1	试验装置与试验过程	133
7.6.2	试验现象	135
7.6.3	电极腐蚀与新生矿物	136
7.6.4	电流变化与电流降低率	138
7.6.5	电阻率变化	138
7.6.6	单轴抗压强度变化	140
7.6.7	泥岩电化作用机理分析	142
7.6.8	电阻率与单轴抗压强度的相关性	143
7.6.9	存在问题与讨论	143
7.7	电化改性巷道围岩电极布置方式	144
7.7.1	现有电极布置方式及存在问题	144
7.7.2	改进后的电极布置方式及合理性分析	146
	参考文献	148
第8章	泥(砂)岩的有机硅材料改性	150
8.1	有机硅材料改性软岩思路的递进演化	150
8.2	有机硅材料改性泥岩的物性演化规律	151
8.2.1	试验岩样与改性材料	151
8.2.2	改性前后泥岩物性变化规律	151
8.2.3	改性机理分析	158
8.2.4	讨论	158
8.3	有机硅材料改性砂岩的强度与 ζ 电位变化规律	159
8.3.1	改性材料与试验岩样及方案	159
8.3.2	改性前后砂岩强度变化规律	160
8.3.3	改性前后砂岩 ζ 电位变化规律	164
8.3.4	改性机理分析与讨论	166
8.4	有机硅材料改性软岩的工业试验	166
8.4.1	试验巷道的基本情况	166
8.4.2	巷道变形破坏特征及机理分析	168
8.4.3	巷道支护方案	169
8.4.4	效果检验与经济效益分析	170
	参考文献	174
	编后记	175

第1章 绪 论

近年来,随着我国国民经济的快速增长,矿产资源开发和岩土工程建设不断向深度和广度发展,但也遇到越来越多的软岩问题。由于软岩独特的物理化学性质,其对温度、湿度、应力和地下水等环境因素极为敏感,特别是湿度条件变化时,软岩的性质和状态会发生很大的变化,产生水化膨胀、碎胀扩容、强度降低,导致处于这类岩层中的巷道、硐室、建筑物基体等产生大变形甚至坍塌。在实施“西部大开发”、“西电东送”、“南水北调”、“高速公路网”以及“高速铁路网”等战略过程中,较多工程的建设已受到软岩问题的重大影响,如南水北调中线河南渠段大量遭遇泥灰岩、砾岩、泥岩等第三系软岩^[1],西南、西北及中部地区的高速公路、铁路建设长期受到红层软岩的困扰^[2]等;在资源开发领域,“十一五”重点建设的神东、晋东、晋中、晋北、陕北、两淮、蒙东、鲁西、河南、冀中、云贵、黄陇、宁东 13 个煤炭基地,近半数的矿区存在软岩矿井,有的矿区甚至大部分或全部矿井是软岩矿井。软岩问题已成为我国重大基础工程建设所面临且亟待解决的工程地质和岩石力学问题之一。

软岩对工程所造成的破坏及其所带来的经济损失是巨大的。软岩及软岩工程在我国占有很大比例,在资源开发行业尤为严重,我国每年新掘井巷工程量约 15 000km,巷道支护产生的顶板事故在煤矿事故中所占的比例居高不下,2001 年以来无论是事故数量还是死亡人数都居首位。据国家安全生产监督管理总局事故查询统计,2001~2010 年我国煤矿顶板事故起数占所有事故的 58.81%,死亡人数占 29.47%,这 10 年间的顶板事故单次平均死亡人数达到 1.32 人,见表 1-1。尽管煤矿单起顶板事故不像瓦斯或水害那样造成重大伤亡,而受到社会各界的普遍关注和重视,但是顶板事故已成为严重制约煤矿安全生产和快速发展的桎梏。

煤矿顶板事故发生的主要原因有地质条件恶劣、顶板岩石破碎、顶板无稳定结构以及应力环境差等。煤炭开采环境为沉积岩,在煤系地层沉积岩中,泥岩是一种主要构成岩层,包括碳质泥岩、砂质泥岩和页岩等软弱岩体^[3]。泥岩的矿物成分主要有黏土矿物、石英和其他矿物,而黏土矿物所占的比例一般达到 40%~90%。由于黏土矿物特殊的易风化和遇水膨胀特性,常对巷道的稳定性造成破坏性影响。在巷道开掘后,围岩由于卸载、风化、特别是水的浸湿影响,产生水化膨胀、强度降低和软化崩解甚至泥化,从而引发安全事故。此时,因水造成的强度损伤比力学因素造成的损伤更为严重^[4]。

表 1-1 2001~2010 年我国煤矿顶板事故统计结果

年份	所有事故起数/起	顶板事故起数/起	所有事故死亡人数/人	顶板事故死亡人数/人	顶板事故占比/%	顶板事故死亡人数占比/%	单次顶板事故死亡人数/人
2001	703	347	2138	505	49.36	23.62	1.46
2002	1593	944	3765	1165	59.26	30.94	1.23
2003	1909	1254	3993	1530	65.69	38.32	1.22
2004	1476	978	2979	1254	66.26	42.09	1.28
2005	1438	905	3372	1101	62.93	32.65	1.22
2006	325	128	1525	268	39.38	17.57	2.09
2007	187	56	1219	217	29.95	17.8	3.88
2008	79	6	526	19	7.59	3.61	3.17
2009	85	10	643	30	11.76	4.67	3.00
2010	88	8	609	32	9.09	5.25	4.00
合计	7883	4636	20769	6121	58.81	29.47	1.32

泥岩所导致的工程问题是在水化或风化作用下,岩体质量持续恶化的结果。在工程中常用的泥岩支护加固处理的方法有锚喷加固、强力棚式支护、砌碇或封闭混凝土拱,以及这几种方式相结合产生的各类支护方式,以确保泥岩工程的稳定与安全。但这些方法的研究重点大多放在对已破碎或软化崩解的泥岩的加固上,只是从力的平衡角度进行加固,通过改变泥岩的外在因素实现泥岩工程的稳定性控制,存在着较多的局限性和时效性^[5]。因此,寻找一种能够使泥岩的物理力学特性及泥岩工程长期稳定的方法是十分迫切和必要的。

1.1 泥岩的工程特征

1.1.1 泥岩的强度特性

强度是岩石在各种荷载作用下达到破坏所能承受的最大应力,是衡量岩石性质的一个重要指标值。朱珍德等^[6]采用 MTS815.02 型岩石刚性伺服试验系统和岩石膨胀测量仪,对南京红山窑水利枢纽工程膨胀红砂岩进行了力学特性试验研究,探讨了膨胀红砂岩膨胀力与吸水率的相关性以及膨胀力与膨胀变形的规律,认为膨胀红砂岩的初始吸水率对其膨胀力有着强烈的影响。

周应华等^[7]、封志军等^[8]通过对川东地区一红层边坡中砂岩、粉砂岩和泥岩三种岩石的三轴应力应变全过程试验研究,将 0~3MPa 的低围压下,红层软岩的全应力应变曲线概括为压密阶段、弹性阶段、屈服阶段、应变软化阶段和塑性流动

阶段5个阶段。分析试验结果后,发现红层软岩的弹性模量随围压的增加而提高且变化明显,砂岩和粉砂岩在低围压内为脆性破坏,泥岩为塑性破坏。

此外,何满潮等^[9,10]、李洪志和何满潮^[11]、周翠英等^[12]、廖红建等^[13]、张少华等^[14]分别探讨了沉积特征对泥岩力学特征的影响,不同饱水时间泥岩的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度、抗剪强度及其随泡水时间的变化规律,固结压力对泥岩残余强度的影响规律以及测试方法对岩石抗拉强度的影响等方面进行了详细研究。

1.1.2 泥岩的变形特性

岩石在荷载作用下,首先发生的物理现象是变形。随着荷载的不断增加,或在恒定荷载作用下,随着时间的延长,岩石变形逐渐增大,最终导致岩石破坏。赵法锁等^[15,16]、陈文玲和赵法锁^[17]、宋飞等^[18]通过泥岩的室内三轴压缩试验、单轴压缩流变试验和三轴压缩流变试验,发现泥岩的径向蠕变变形比轴向蠕变敏感,以径向蠕变长期强度作为长期强度更合理;围压越大,对径向变形的约束能力越强,径向蠕变长期强度和轴向蠕变长期强度均增加,径向蠕变长期强度与轴向蠕变长期强度的比值减小。

张芳枝等^[19]通过一系列常规三轴试验对风化泥质软岩的变形特性进行了初步研究,发现其应力应变关系具有明显的非线性特征和应变软化特征;岩体的整个变形阶段可用多项式拟合,其硬化阶段可用双曲线拟合;另外,岩体随着剪应力增加,表现出剪缩特性,在峰值强度附近伴随着较弱的剪胀。在轴向压力作用下,岩体产生侧向变形,其初始切线泊松比较小,一般为0.2~0.25。

刘新喜等^[20,21]通过对复杂应力下强风化泥岩的压实特性和湿化变形的试验研究,发现强风化泥岩用于高等级公路路基填筑时,其承载比值随压实度的增大而增大;填料在压实度为90%且有较大的偏应力作用下,湿化不仅产生较大的附加轴向应变,而且还能引起相当大的附加体积应变和偏应变。

肖克强等^[22]通过地质力学模型试验,研究泥岩高边坡在开挖及降雨时,坡体的稳定性及其变形变化规律,分析支挡结构对边坡变形的影响机理。试验结果表明,在开挖过程中及时地施加支挡结构,可以减小施工期间坡体的变形;同时,支挡结构可以有效地抑制坡体的蠕变变形,特别对坡体中下部的蠕变变形抑制效果更显著。

泥岩的流变特性也是岩体工程中不可忽视的重要特征。在流变特性研究方面,有关岩石材料流态形态的资料和成果也日渐丰富和完善;建立了众多的流变模型^[23~25]。然而大部分的黏弹、黏塑性模型无法描述加速蠕变阶段,限制了这类模型的应用。于是许多学者致力于解决这一问题。陈沅江等^[26,27]提出两种非线性元件:蠕变体和裂隙塑性体,建立了一种新的复合流变力学模型,可很好地描述泥岩加速蠕变阶段的特性。邓荣贵等^[28]引入一种非线性黏滞阻尼器,利用该黏滞阻

尼器建立了综合流变力学模型,可同时描述弹性变形、滞后的黏弹性变形和等速与加速黏塑性变形 3 种蠕变变形。曹树刚等^[29]将黏滞性体模型中的黏滞系数修正为非线性,改进了西原正夫模型,能较好地反映岩石的非衰减蠕变特性。何峰等^[30]和王来贵等^[31]以改进的西原正夫模型为基础,建立了参数非线性蠕变模型,能较好地反映岩石试件的 3 阶段蠕变过程,尤其是非线性加速蠕变变形。通过对线性模型理论的改进而得到的非线性模型,能够描述岩石的加速蠕变过程。但是,由于以上模型中只考虑了单个参数 η 的非线性,使流变方程不得不分段使用来描述不同阶段的蠕变。

范庆忠和高延法^[32]根据对单轴压缩条件下泥岩蠕变特性的分析,引入损伤变量和硬化函数,建立泥岩轴向和横向非线性蠕变模型。通过对泥岩轴向蠕变典型曲线的衰减、等速和加速蠕变 3 个阶段分析,认为:产生衰减蠕变的原因是岩石力学性质发生了硬化,主要是由于黏滞系数的硬化引起的;产生加速蠕变的原因是岩石发生了损伤软化,主要是由岩石弹性模量损伤引起的。泥岩蠕变过程的 3 个阶段是非线性损伤和硬化两种机制并存、互相竞争的结果,采用单一的模量损伤或黏滞系数的非线性变化均不能合理地描述和解析蠕变过程的 3 个阶段。同时,引入损伤和硬化两种机制后所建立的非线性蠕变模型可以用一个统一的方程描述泥岩蠕变过程 3 个阶段的变形特征,也可以对蠕变过程的 3 个阶段做出合理解析,并将该模型与泥岩及红砂岩的试验曲线进行对比,两者吻合较好。

1.1.3 泥岩的水理特性

岩石的水理特征是指岩石在溶液作用下所表现出来的性质,是影响岩石工程特别是软岩工程稳定性的重要因素。由于工程岩体总是赋存于一定的水环境中,受水环境变化的影响,工程岩体的强度、变形和破坏等力学特性将发生明显的改变,因此长期以来该问题一直受到岩石力学与工程领域众多学者的关注,但研究成果大多集中在以下两个方面。

1. 强度降低

软岩的水理特征最初是由水作用后岩石强度降低,即饱和后岩石普遍存在软化现象引起国内外专家学者注意的。Hoek 和 Bray^[33]认为,孔隙压力会减少岩石结构面的抗剪强度;高含水量增加岩石重度,并加速其风化;水结冰产生压力,对岩石产生类似楔子的作用,这些因素共同作用,促使岩石强度降低。Chugh 和 Missavage^[34]研究了湿度对岩石力学性能的影响。他从矿井巷道观察,发现夏季塌方比冬季明显增多,认为这是由于夏季天气潮湿,巷道岩面在吸热的同时也在吸湿,从而得出湿度对岩石强度有影响的印象。通过研究和调查,得出以下一些认识:①岩石的单轴抗压强度与弹性模量随温度加大而减小。将岩石试件浸在水中

或在 100%湿度条件下放置 24h, 与天然湿度的试件相比, 单轴抗压强度将减小 50%~60%。②在弹性模量减小的同时, 泊松比加大。③平均硬度与断裂韧度随相对湿度加大而减小。④泥质页岩吸湿主要在表面, 吸湿量与试件大小无关。⑤沿层面的吸湿率比垂直层面的吸湿率大很多。

李先炜^[35]认为, 岩石饱水后, 水就顺着裂隙、孔隙进入岩石内部并润湿自由面上的每个矿物颗粒, 从而削弱颗粒间的连接, 降低岩石的强度。他的试验结果表明沉积岩类的软化程度大, 而岩浆岩、变质岩软化程度小。肖学沛和李天斌^[36]、王义军等^[37]及徐华等^[38]研究了某滑坡炭质泥岩抗剪强度受含水量的影响, 发现同一种炭质软岩, 在不同的含水量下会表现出不同的力学性质, 一般含水量高, 其力学性能要低, 反之要高, 尤其是对一些含亲水性矿物组成的岩土体, 其影响更大。同一种炭质软岩, 扰动前后的性能将发生变化, 主要是其物质成分发生了变化, 物质成分决定其力学性能, 扰动后的物质成分发生重组, 黏粒含量增加, 降低了其力学性能。在饱水初期, 抗剪强度降低的幅度较大, 单位时间内的抗剪强度降低值大, 曲线斜率的绝对值较大, 主要是蒙脱石受水影响发生分子膨胀作用, 因蒙脱石晶胞与晶胞以氧离子接触, 不够紧密, 可以吸收不定量的水分子, 体积膨胀大, 使整体失去连接, 从而强度大大降低; 在后期, 抗剪强度降低幅度较小, 主要是高岭石受水影响发生胶体膨胀, 高岭石晶胞与晶胞之间连接较强, 亲水性相对较差, 体积膨胀也小, 故抗剪强度降低幅度较小。此外, 康红普^[39]对泥岩进行了实验研究, 发现泥岩抗压强度及弹性模量随含水量的增加显著减小, 见图 1-1。

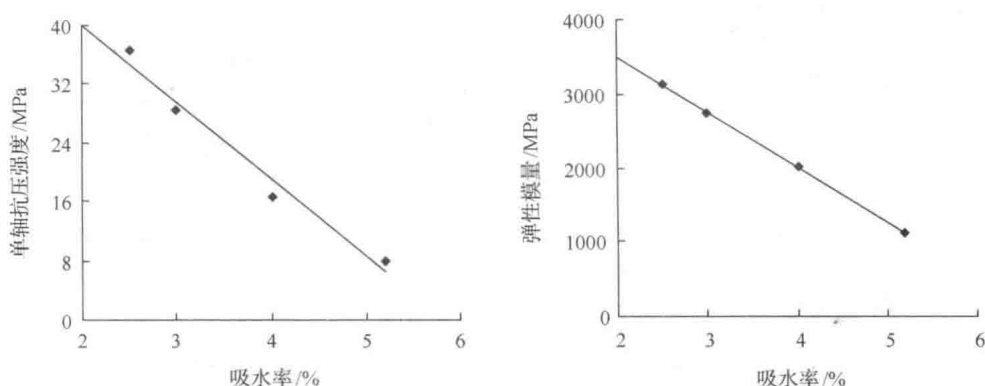


图 1-1 泥岩单轴抗压强度、弹性模量与吸水率的关系

2. 软化崩解

随着对软岩水化作用研究逐步深入, 黏土岩、泥岩以及页岩的泥化、崩解问题逐渐引起了相关学者的注意。戴广秀等^[40]对葛洲坝水利枢纽坝基红层内泥化夹层的工程地质特征和结构特征进行了详细的研究, 将软弱夹层细分为节理带、劈

理带、泥化带及泥化层等层次,并对其形成和演化趋势作了讨论。王幼麟^[41]研究了上述泥化夹层形成及发展趋势的物理化学原因,认为泥化夹层的形成主要是由于黏土岩含有大量黏土矿物等高分散、高亲水性物质,地质构造作用,水的物理化学作用,三者缺一不可。谭罗荣^[42]则研究了上述泥化夹层的物质组成特性,认为泥化夹层与非泥化夹层部位岩体的矿物成分及含量无明显差异,但泥化物中的小于 5 μm 或 2 μm 的细颗粒含量高于两侧未泥化部位黏土岩。谭罗荣^[43]研究了蚀变凝灰岩的水稳特性,明确指出崩解泥化与物质组成的关系,特别是与蒙脱石类矿物含量的关系。

张世右等^[44]对我国煤系地层泥岩遇水损伤机理进行了研究,认为泥岩遇水后的损伤破坏主要有两种:一是软化、破碎和崩解,但体积基本不增加,这类岩石的矿物成分主要以高岭石和伊利石为主;二是体积发生膨胀,然后导致软化、松散,这类岩石的矿物成分主要以蒙脱石为主。上述区别主要取决于两类黏土矿物的晶层结构和阳离子交换能力^[45-48]。对黏土矿物层间距与孔隙液电解质浓度及孔隙中气相性质间的关系的进一步研究发现^[49]:在饱和状态下,蒙脱石晶体的膨胀和收缩可归纳为受两种作用势控制,即作用在蒙脱石层间的渗透压和除渗透压作用外的综合作用势;在非饱和状态下,除上述两种作用外,还受气-液界面引起的收缩势-基质吸力势的影响。因此,从诱发机理上讲,导致泥岩膨胀变形的原因有两大类,即力学原因和物理化学原因。力学原因包括泥岩的塑性变形,沿滑动面(层理、节理、裂隙等)滑动及高应力所形成的异常压力等引起软岩破裂或碎胀扩容;物理化学原因是指水溶液与泥岩发生物理化学作用引起水化膨胀和分散、导致岩石强度下降等。但最重要的原因是泥岩的水化作用^[50,51]。

当泥岩和水溶液接触时,黏土矿物表面阳离子浓度将比溶液的阳离子浓度大,存在阳离子浓度梯度,阳离子趋向于从黏土矿物表面向主体溶液扩散,结果黏土矿物表面对阳离子的静电吸引和阳离子自黏土矿物表面向外扩散最终达到平衡^[52]。其最终平衡状态取决于水溶液的活度 W_A (water activity)^[53]。把开挖出来的新鲜黏土岩立即浸入水中,即使浸泡很长时间也可以保持原状不崩解,但当此类软岩在大气中脱水或稍稍失水后再浸入水中时,就可能发生不同程度的崩解或崩裂,崩解或崩裂的程度与软岩中矿物成分及其含量有关^[54]。蒙脱石对崩解性状的影响要明显高于非膨胀性矿物伊利石和高岭石,但在没有蒙脱石的情况下,只要伊利石和高岭石的含量足够高,岩样也同样会发生崩解碎裂。在天然状态下,埋藏于地下岩体内的黏土岩是不会发生泥化或崩解的。室内模拟试验研究亦表明,黏土岩在直剪试验后破裂带上的含水量提高,且随着上下层的相对位移的增加而增加。当相对位移足够大时,含水量可超过岩块的塑限,表明岩层破裂,并且产生相对错动时,可吸水形成泥化物。

谭罗荣^[55]分析了水利、采矿、地下储库等工程中常见的黏土岩、泥岩等泥化