

江苏高校优势学科建设工程项目资助
江苏省自然科学基金项目(BK20130189)资助
江苏省博士后基金项目(1101033C)资助

湿度场下灰质泥岩的 力学性质演化与蠕变特征研究

季 明 著

Research on the
Mechanical Characteristics and
Creep Properties of
Calcareous Mudstone under Humidity

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

江苏高校优势学科建设工程项目资助

江苏省自然科学基金项目(BK20130189)资助

江苏省博士后基金项目(1101033C)资助

湿度场下灰质泥岩的 力学性质演化与蠕变特征研究

季 明 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

湿度场下灰质泥岩的力学性质演化与蠕变特征研究/

季明著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2866 - 6

I. ①湿… II. ①季… III. ①泥岩—力学性质—研究
②泥岩—蠕变—研究 IV. ①P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 242283 号

书 名 湿度场下灰质泥岩的力学性质演化与蠕变特征研究

著 者 季 明

责任编辑 姜志方

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 9.25 字数 180 千字

版次印次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

岩石力学从最初的萌芽,直到 20 世纪 50 年代才真正成为一门学科,从最初的经验理论阶段到现在的非线性科学应用于岩石力学与工程的研究领域,近年来岩石力学的研究已经得到了长足的发展。

随着国家西部大开发、“一带一路”等相关战略的实施,国家重大的涉水环境的基础建设正以前所未有的速度在开展。如龙滩、小湾、三板溪等在建、拟建的水电工程,大多以地下硐室群为主的水工结构物;南水北调西线工程为埋深在 400~900 m 的隧洞工程;煤炭资源的开采,部分矿井的采深已达 1 300 m 以上,其煤系地层巷道、硐室也存在地下水的影响。

实际上,水环境对岩石的物理力学性质有着极其重要的影响,这一点国内外众多学者已经进行了大量的研究工作。笔者针对煤矿井下的煤系岩层在湿度场影响下的本构方程、膨胀特性、力学特性、水—力耦合作用下岩石的损伤演变规律和声学特征、流变力学特性进行了相关的实验研究和理论探讨。

本书研究内容得到了江苏高校优势学科建设工程项目、江苏省自然科学基金项目(项目编号:BK20130189)、江苏省博士后基金项目(项目编号:1101033C)的资助。

本书的撰写过程得到了中国矿业大学高峰教授、张益东教授等专家的指导和帮助,在此向他们表示感谢!

在本书的撰写过程中,参阅了大量的国内外相关专业的文献,在此向其作者们表示衷心的感谢!

本书可作为高等院校开设的《岩石力学》、《矿山岩体力学》等课程的本科生、研究生的补充读物,也可供矿山企业、科研院所和设计部门等从事岩石力学研究的工程技术人员参考。

由于作者水平所限,文中如有不妥之处,敬请读者批评指正!

季 明
2015 年 9 月

目次

1 概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究情况	3
2 考虑湿度效应的弹塑性本构模型	23
2.1 广义胡克定律	23
2.2 湿度应力场理论的耦合方程	26
2.3 塑性本构理论	28
2.4 湿度效应下的弹塑性本构模型	30
3 灰质泥岩的膨胀实验	34
3.1 岩石膨胀本构模型	34
3.2 岩石的膨胀实验	39
3.3 岩石膨胀微观机理	48
4 湿度影响下灰质泥岩的单轴压缩与声发射实验研究	52
4.1 实验条件及方法	52
4.2 实验结果及分析	57
5 不同含水率下泥岩的单轴压缩损伤分析	72
5.1 岩石损伤基本理论	73
5.2 载荷作用下的岩石机械损伤	76
5.3 湿度作用产生的岩石损伤	82
5.4 考虑载荷和湿度共同作用的岩石损伤本构模型	83
6 湿度场作用下软岩的流变本构模型理论研究	87
6.1 传统经验模型	87
6.2 岩石流变模型理论	89

6.3 考虑湿度效应的流变本构模型.....	92
6.4 考虑湿度对损伤影响的流变本构方程.....	99
6.5 考虑湿度对黏性影响的流变本构方程	101
6.6 考虑湿度对损伤、弹性及黏性共同影响的流变本构方程.....	102
6.7 考虑湿度效应的多轴蠕变理论模型	107
7 考虑湿度影响的巷道支护蠕变特征数值模拟	111
7.1 数值计算模型的建立	111
7.2 蠕变特征的计算结果分析	114
8 结论	124
参考文献.....	126

1 概 述

1.1 研究意义

软岩是指强度低、孔隙率大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层,该类岩石多为泥岩、页岩、粉砂岩和泥质砂岩等单轴抗压强度小于 25 MPa 的岩石,是天然形成的复杂的地质介质。软岩是地球表面分布最为广泛的一种岩石,泥岩和页岩就占地表所有岩石的 50% 左右。在我国,云贵高原、湘浏低洼盆地、四川盆地、甘肃东北部以及东南沿海和东北地区都有软岩成片或零星分布^[1]。例如在葛洲坝工程中,勘察到坝基下产状近水平的软弱夹层有 50 多层^[2];在云南安楚高速公路工程中,有 2/3 的路段修筑在红层软岩地区^[3];武广客运专线工程中,白垩系下第三系以及元古界泥质粉砂岩、含砾砂岩、泥质板岩等全风化及强风化软岩占全线的 70% 左右^[4]。软岩与工程建设息息相关,特别是对隧道、大坝及边坡工程等大型基础建设工程的稳定性有重大影响。

大量的工程实践表明,软岩是工程性质明显区别于硬质岩体和软弱土体的岩土介质,尤其是在水环境的作用下,软岩的物理力学特性会发生显著的变化。在水的物理化学作用下,软岩的结构发生损伤破坏,极易发生软化甚至崩解,强度降低,甚至由原来的宏观上连续、完整的岩块变成松散的粒状材料。如抚顺矿区的软岩,在饱水前后孔隙率相差 10 多倍^[5]。另外,当软岩遇水后变形受到约束时,岩石内部会产生膨胀应力;当膨胀受到的约束不足时,就会产生膨胀变形。这都将对工程结构的稳定性产生极大危害。

1954 年建成的坝高 66.5 m 的法国马尔巴塞(Malpasset)双曲拱坝,蓄水后在水压力作用下,左坝肩部分岩体产生了不均匀变形和滑动,于 1959 年 12 月 2 日突然溃决,造成了 384 人死亡,110 人下落不明;1963 年 9 月,意大利的维昂特(Vajont)拱坝由于水位的迅速上升,左岸山体突然发生大规模滑坡,致使大量的岩石坠入水库,造成高达 150~250 m 的巨大水浪,洪水没过下游的朗加朗市镇,造成了毁灭性的灾难,有 2 500 人丧生,所幸的是大坝没有损坏,否则其后果更不堪设想;我国的梅山拱坝,高 88.3 m,长 545 m,于 1956 年蓄水,1962 年 11 月 6 日在

右坝肩突然出现 10 条裂缝,最长裂缝长达 24 m,宽 6.5 m,坝座岩体发生明显位移,沿缝大量漏水,与此同时一个未封填好的固结灌浆孔向外喷水,最高水头达 31 m,随即采取了放空水库的措施才避免了严重事故的发生^[6,7]。诸如此类的大坝事故不胜枚举。

煤矿水害是与瓦斯、火灾、粉尘、动力地质灾害并列的矿山五大安全灾害之一,也是世界产煤国家面对的一个安全生产难题。我国煤田地质条件十分复杂,受水威胁的煤炭储量占探明储量的 27%^[8],受底板岩溶水威胁的矿井高达 222 处,核定生产能力为 11.28 Mt/a,占统配煤矿矿井总数的 48% 以上,其中受水威胁较严重的矿井有 171 处,受水威胁的储量为 6 660 Mt,占统配煤矿总储量的 18%,有 51 对矿井随时都有突水的可能^[9]。煤矿地下开采,随着开采向深部发展,开采过程中受高压水体的威胁越来越严重。目前我国煤炭行业频繁发生矿井突水事故,不仅给企业带来巨大的经济损失,而且严重地威胁到人员的生命安全。对于像徐州、淮南、枣庄、峰峰等这样的老矿区,随着煤矿开采深度的增大,综合机械化采煤、放顶煤技术的普遍应用,水害对综采工作面生产的影响日益突出。岩土工程发生突水的实质是,岩体在水压和外力共同作用下发生破坏。煤矿底板围岩的破坏伴随着渗透特性的显著变化,当底板各岩层的渗透特性满足一定条件时,水在底板中的渗流将失去稳定性,引发突水灾害。据不完全统计,自 1956 年到 1994 年内,中国北方煤矿开采山西组与太原组煤层时,来自煤系夹层灰岩和基底中奥陶统灰岩岩溶水的底板突水 1 300 次,其中淹井 200 余次,造成的经济损失数十亿元,因水害造成的人员伤亡达数千人^[10-13]。如 1954 年 12 月 5 日,唐山林西矿四水平石灰水通过断层涌入矿井,最大涌入量为 6 000 m³/h;唐山范各庄矿于 1984 年 6 月 2 日发生了世界罕见的矿井大突水,是奥陶系灰岩中地下水沿着陷落柱涌入矿井,其涌入量达 2 053 m³/min,21 h 后,矿井全部被淹没,直接经济损失 5 亿元以上^[14-18]。

此外很多地下工程、隧道工程事故也和水有关^[19]。如西班牙马尔托雷尔—卡斯特利维斯瓦尔(Matorell-Castellbisbal)铁路干线第二条线路中一条 850 m 长的隧洞所经过中新世泥灰岩普遍存在遇水膨胀现象;阿尔及利亚布鲁姆(Bou Roumi)水利工程所经特里纳斯(Telliennes)山脉南部地区的隧洞中也发现存在具有膨胀性的中新世泥灰岩;日本的颈城隧道、惠那山隧道、中山隧道和意大利至奥地利阿尔卑斯山脉铁路隧道均发现存在膨胀性软质围岩。我国四川省阆中县境内的回龙宫隧洞,它是升钟灌区左分干渠上的一条隧洞,全长 1 155.6 m。隧洞于 1987 年动工兴建,1992 年 4 月竣工,1994 年开始通水。断面呈城门洞形,隧洞宽 2.5 m,直墙高 2.1 m,顶拱为 150°圆心角,边墙、底板、顶拱采用浆砌条石和局部现浇混凝土衬砌,经 2002 年汛末检查,顶拱沿浆砌拱石灰缝出现多处开裂,部分拱石剪切破坏,甚至压碎、脱落;边墙中部出现多处水平裂缝,最宽达 3 cm,已出现多处

垮塌;底板浆砌条石向上凸起,凸起高度最高达 55 cm,损坏严重。

岩土工程问题总与经济建设的发展密不可分。随着人类社会不断发展的需要,越来越多的岩土工程项目得以实施,如三峡工程、南水北调工程、跨海大桥修建、高速铁路工程等等,这些工程项目中或多或少需要考虑到水对工程的现场施工以及对施工完毕后工程体的影响。据统计,30%~40%的水利大坝失事,60%矿井事故以及 90%以上的岩体边坡破坏和水对岩体的作用有关^[1]。因此研究岩体和水的相互作用关系,以及岩体和水耦合作用对人类工程体的稳定性的影响,是研究岩石水力学的主要任务,也是一项具有理论研究和实际工程应用价值的重大课题,它对水电工程、矿山工程、建筑工程、环境工程以及石油工程等方面都有着重要的指导意义。

1.2 国内外研究情况

1.2.1 水环境对岩石物理力学性质的研究

水与岩体之间的相互作用,一方面改变着岩体的物理、化学及力学性质,另一方面也改变着地下水自身的物理、力学性质及化学组分。水对岩体产生三种作用,即物理的、化学的和力学的作用。国内外学者对此进行了大量的研究,积累很多可靠的数据。

1.2.1.1 水对岩石的力学性质影响研究

海格黑姆(T. Heggheim)等^[20]对灰岩在海水、乙醇及不同浓度盐水浸泡后的力学性质与微观结构的变化进行了分析研究,认为水中的离子与灰岩化学反应后使组成岩石的矿物发生成分和结构的变化,进而导致了岩石力学性能的改变,并在此基础上初步提出了相应的理论模型。登布洛克(S. W. J. Den Brok)等^[21]则通过对高温和含水状态下的砂岩进行不同的加载速率实验来分析其中微裂隙的变化。哈迪扎德(J. Hadizadeh)等^[22]通过对砂岩在不同的围压及应变速率条件下的岩石强度变化来分析水对砂岩的软化作用,认为影响水的作用的因素主要有砂岩颗粒的边界形态、胶结物的成分及孔隙的形态及孔隙大小等。

杨春和等^[23]研究了板岩遇水软化的微观结构及力学特性,发现板岩在浸泡后的吸水率比较低,天然含水率由于板岩内层理面的产状、密度等参数的不同而改变;随着泡水时间的增加,试样的吸水率在最初的两天内变化较大,3~5 d后吸水率相对接近稳定,到以后变化不太明显;微观观测结果显示,在浸泡过程中,板岩内部矿物颗粒将产生体积膨胀,胶结变得更为松散,在没有限制的情况下,孔隙率将增大;在局部区域,孔隙反而会因胶结物的膨胀效应而减小;矿物颗粒产生膨胀的

时间稍滞后于吸水率的变化过程;板岩的三轴压缩实验结果显示,板岩浸泡后发生软化,峰值抗压强度随着吸水率的增加基本按负对数规律降低;弹性模量也显示降低的趋势,但总体规律不太明显;通过微观结构分析及润湿角的降低趋势显示,随着浸泡时间延长,矿物颗粒之间的毛细管力降低,从而黏结力降低,宏观上则体现为岩石发生软化;由于板岩的各向异性,在垂直于层理面方向更易发生体积膨胀,因此岩石在浸泡后更易沿着层理面产生破坏。

周翠英等^[24]实验测试了岩石饱水状态的力学性质,重点探讨了软岩软化的力学规律性。实验按照岩石天然状态以及岩石饱水1个月、3个月、6个月和12个月等饱水时间点进行采样分析,测定其不同饱水时间点的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度、抗剪强度及其随饱水时间的变化规律。结果表明:软岩与水相互作用后,其抗压强度、抗拉强度及抗剪强度变化的定量表征关系一般服从指数变化规律,各力学强度指标将随着饱水时间的延长而不断降低,最终将趋向稳定;6个月的饱水时间点为软岩力学强度趋于稳定的临界点。

冒海军等^[25]以南水北调西线的板岩为研究对象,进行了不同泡水条件下的三轴压缩实验,通过引入相对吸水率的定义,分析了吸水率变化对岩石强度、弹性模量及泊松比等力学参数的影响,并从微观的角度分析了试样发生变化的机理,得出如下结论:①板岩在泡水后三轴抗压强度降低,最大降低幅度达46%左右,抗压强度随相对吸水率的变化可以用函数式来有效描述;②在泡水后,板岩的弹性模量与泊松比随着吸水率的增大而增大,但由于板岩自身各向异性明显,规律性不是特别明显,只能近似用关系式来模拟;③理论分析证实:实际泡水条件下的岩样,在受力挤压后,会经历排水与不排水两种过程,随着吸水率的提高,弹性模量与泊松比增大,验证了实验结果;④利用微观力学模型初步证实:泡水后板岩颗粒的吸水性与颗粒间毛细管力的减小是造成板岩泡水后发生软化的原因。

孟召平、彭苏萍等^[26]发现水对岩石力学性质产生重要影响,在干燥或较少含水量情况下,岩石在峰值强度后表现为脆性和剪切破坏,应力—应变曲线具有明显的应变软化特性;随着含水量的增加,岩石单轴抗压强度和弹性模量值均急剧降低,主要表现为塑性破坏,且应变软化特性不明显。

王军等^[27]针对南京红山窑水利枢纽工程中的红砂岩圆柱体试样,采用RMT—150B多功能刚性岩石伺服试验机,通过常规直接剪切实验的方法对不同含水量状态下的红砂岩圆柱体试样进行室内实验研究。通过对实验结果的线性回归分析得到膨胀岩的凝聚力 C 和内摩擦角 φ 与含水量之间良好的对数关系。

孙钧^[28]院士对长江三峡水利枢纽工程船闸高边坡闸室部分的坡帮岩体研究发现饱和花岗岩的劈裂抗拉强度随加载速率增大而升高。饱和花岗岩劈裂抗拉强度的时效性可用下式来近似反映:

$$\sigma = A + \frac{B}{\lg(\Delta t/s)} \quad (1-1)$$

式中 Δt ——加载时间间隔。

陈钢林等^[29]在 MTS 电液伺服材料实验系统上,对不同饱水度的砂岩、花岗岩、长岩、灰岩和大理岩进行了单轴压缩实验,取得了这几种岩石的单轴抗压强度和弹性模量随饱水度变化的定量结果。结果表明,水对受力岩石的力学效应与岩石中的含水状态是密切相关的,自然状态的砂岩、花岗闪长岩浸水后,其峰值强度和弹性模量随饱水度的增加而迅速衰减,当饱水度达到某一定值时,这两种岩石的峰值强度和弹性模量基本稳定下来,花岗闪长岩和弹性模量随饱水度的变化情况用函数形式表示为:

$$Y = A \exp(-Bx) + C \quad (1-2)$$

其中 Y ——浸水岩石的峰值强度或弹性模量与自然状态值之比;

x ——饱水度;

A, B, C ——都是与岩石类型有关的常数, B 表示了岩石的峰值强度或弹性模量随饱水度的衰减程度。

何满潮等^[30]对深井泥岩吸水特性进行了实验研究,发现泥岩在整个吸水过程中,吸水速率随时间变化。吸水初期比较快,随着时间增加,吸水速率减慢,趋于常数;吸水特征曲线可用分段函数来表示,即减速吸水阶段的负指数函数和后期等速吸水阶段的线性函数;泥岩吸水特征呈 3 种模式,即上凸型、下凹型和直线型模式;泥岩孔隙的几何形状、大小、分布及其相互连通关系,矿物含量与种类以及孔隙中黏土矿物的产状决定其吸水量的大小与吸水速率的快慢。

刘素梅等^[31]对丹江口水库岩石的物理力学性能进行实验研究,发现岩石抗压强度随弹性模量的增加而增加,岩石弹性模量与孔隙率具有一定的关系,岩石吸水后强度弱化程度与孔隙率和岩石矿物成分密切相关,并且建立了岩石单轴抗压强度与弹性模量、孔隙率与弹性模量之间关系式。

李铀等^[32]人研究了风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性,发现产生同样变形,饱水状态下需施加的荷载比风干状态下所需的荷载小得多。

刘亚晨等^[33]利用奥康奈尔(O'Connell)建立的饱和水裂隙岩体等效弹性模量与岩石模量的关系式,并由式中的裂隙密度概念意义,建立了温度作用下的裂隙密度与奥达(Oda)提出的裂隙张量之间的关系式;在实验的基础上给出了温度、饱和和水下的单裂隙岩体应力、应变、抗压强度回归拟合关系表达式。

1.2.1.2 水对岩石动力学特性的影响

自超声波测试技术应用到岩土工程领域以来,已经成功地用于岩石、岩体和土体动弹性参数测试、岩体结构分类、参数确定以及岩体质量评价等问题中,因而得

到岩土工程界的广泛重视,并已进行了大量的理论与实验研究。

朱合华等^[34]研究了饱水对致密板岩、花岗片麻岩、黑云母片麻岩的声学参数的影响,发现饱水后,从上述三种岩石接收到的纵波波谱都发生了变化,纵波主频明显降低,表现为对波谱中高频成分滤波作用的增强。在饱水和烘干状态下,岩石的滤波作用都表现出了明显的各向异性,这反映出岩石不同方向上的微观结构存在差异。

李维树等^[35]从试点的地质代表性、岩石的破坏形态、大范围岩体的声学特征等方面分析了岩体的变形特性、岩体直剪强度特性、混凝土与岩体接触面直剪强度特性及页岩的声学特性,提出了可供设计采用的工程岩石力学参数。

荣耀等^[36]通过研究饱水、自然、干燥状态的岩石在荷载作用下与电磁辐射强度频谱之间的关系、加载环境下岩石蠕变变形破坏孕育、发生、发展过程中的电磁辐射效应及规律,获得岩石蠕变断裂的电磁辐射信息特征,确定不同含水状态及应力变化与电磁辐射强度频谱间的关系。可有效预测岩体的状态,对预测预报岩体的动力灾害提供有效的预测手段。

许波涛等^[37]通过分析动静弹性模量比值的实测结果,提出了解释饱和状态下岩石动弹性模量一般大于静弹性模量、干燥状态下出现相反现象的建议方法,并从工程角度初步探讨了这种现象的规律性以及岩石质量评价方面的意义。

颜玉定^[38]用砂岩、凝灰岩、页岩三类岩石试件进行长时间的饱水,对声波参数 v_p 、 v_s 、 E_d 随饱水时间的变化进行研究,得出了水对岩石动态参数的作用有物理、化学两种效应,以及两种效应均具有初期快速效应和长期缓慢效应的特点; v_p 、 v_s 、 E_d 的值尽管初期效应有增减,但长期的结果都比风干状态的值低。

东北大学李元辉等^[39]应用超声波混凝土测试仪(TICO),系统研究了含水率、裂纹、应力和温度对花岗岩内波速传播的影响。实验发现含水率对波速影响比较大,饱和岩样的声波传播速度高于不饱和岩样的声波传播速度;人工预制裂纹对声波传播速度影响不大;单轴压缩条件下,声波传播速度随应变增加逐渐降低;在同一温度(160℃)下,波速随保温时间的增加而逐渐降低;在对岩样逐渐加热情况下,初始加热阶段波速略有升高,当温度达到60℃时,岩样波速达到峰值,之后随着温度继续升高其波速逐渐下降;波速随温度变化具有一定的尺寸效应。实验结果表明,声波在岩石内传播速度受很多外在因素影响,并具有一定的传播规律。

1.2.1.3 水—岩化学作用的力学效应

地质环境中的活跃因素是地下水,它是一种成分复杂的化学溶液,即使是纯水,它与岩体相互作用,除了物理上的以外,还有更为复杂的水—岩化学作用或水—岩反应,往往对岩石(体)的力学效应比单纯的物理作用产生更大的影响。对遇水后强度降低的岩石,水是造成其损伤的一个重要原因,有时它比力学因素造成

的损伤更为严重。

海格黑姆(T. Heggheim)等^[20]对灰岩在海水、乙醇及不同浓度盐水浸泡后的力学性质与微观结构的变化进行了分析研究,认为水中的离子与灰岩化学反应后组成岩石的矿物发生成分和结构的变化,进而导致了岩石力学性能的改变。威德尔霍恩(Wiederhorn)等^[40]早在1973年就研究了pH对玻璃裂隙扩展的影响,阿特金森(Atkinson)等^[41]则研究了HCl、NaOH溶液对石英裂隙扩展速率、应力强度因子和应力强度系数的影响。

汤连生^[42,43]为了研究水—岩化学作用对岩石的宏观力学效应,在常温常压、不同循环流速条件下,对不同化学性质的水化学溶液作用下的花岗岩、红砂岩和灰岩进行了单轴抗压强度实验,取得了时效性的定量结果。结果表明:水化学作用后,3种岩石的强度均出现了不同程度的下降。分析发现:①水溶液对岩石的力学效应与水—岩化学作用密切相关;②岩石的化学损伤与水—岩化学反应强度成正比;③水—岩化学作用对岩石的力学效应具有很强的时间效应;④影响岩石化学损伤的主要因素有岩石的物理性质和矿物成分、水溶液的化学性质、岩石的结构或物质成分空间分布的非均匀性、水溶液通过岩石的流动速率和岩石的成因及演化历史等5个因素。还对两种花岗岩和两种砂岩进行了断裂力学指标 K_{IC} 和 δ_C 的三点弯曲实验。结果表明:①水—岩化学作用对岩石裂纹的断裂指标有显著的影响,并且具有时间效应。不同岩性、不同浸泡方式及不同水溶液流动速率对岩石断裂力学指标的影响存在着较大差异。总体上,水化学作用对断裂力学指标的影响程度与水—岩化学反应的强度成正比。②岩石中的含铁离子或钙离子的矿物及胶结物成分是水—岩化学作用力学效应的关键物质成分,其中含铁离子物质对水—岩反应的断裂力学效应具有正反两方面的力学效应。

周翠英等^[44]针对广东地区重大工程中几种典型软岩的基本类型和特点,设计了一系列软岩饱水软化实验。通过选取华南地区粉砂质泥岩和泥质粉砂岩两种代表性软岩,在天然状态以及饱水1个月、饱水3个月、饱水6个月和饱水12个月时,研究水溶液pH和阴离子及阳离子浓度的变化,探讨不同类型软岩在不同饱水时间后,水溶液的pH和化学成分的动态变化规律。结果表明,软岩在饱水过程中,水溶液的pH将逐渐减小,由弱碱性向酸性过度,这些变化率为2%~46%。同时着重指出:饱水3个月时,是水—岩化学作用的临界时间转折点,即3个月之前,阳离子及阴离子的化学交换与吸附作用活跃,反应中离子的浓度是下降的;3个月之后,该作用逐渐减弱,离子的浓度呈现出回升渐趋稳定或稳定的趋势。软岩与水化学反应中离子浓度的变化一般服从两种曲线类型,即指数曲线和动力学稳定方程(反应—扩散方程)曲线。其动力学过程无论服从哪一种规律,最后终将趋向稳定态。此外,对于这两类软岩,其 F^- 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 等离子在实

验过程中基本保持稳定值,表明岩块与水的化学作用过程中基本没有该类离子的参与。

冯夏庭等^[45]自行研制了应力—水流—化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学实验系统,可以进行应力—水流—化学耦合下的多项岩石力学细观实验,实现了应力—水流—化学耦合下岩石破裂全过程的显微与宏观实时监测、控制、记录与分析的岩石力学实验。对不同化学溶液腐蚀的多裂纹灰岩试件,应用该系统进行了应力—水流—化学耦合下单轴压缩破坏全过程的实验。实验过程中试件一直浸泡在流速为 513 mm/s 的相应的化学溶液中,对 NaCl 溶液(0.01 mol/L, pH=7)作用下裂纹的起裂、发展及贯通破坏过程进行了分析研究。与未受化学溶液腐蚀的相同裂纹排列方式试件的实验结果比较,受化学溶液腐蚀与未受化学溶液腐蚀试件裂纹扩展破坏过程差异的主要原因为化学溶液对试件产生了腐蚀及软化作用,而未受化学溶液腐蚀试件的破坏则为脆性破坏。

鲁祖德等^[46]对浙江龙游石窟的红砂岩进行不同化学溶液、相同流速作用下未受载腐蚀特征实验,获得化学腐蚀损伤时间效应曲线和时效特征;进行不同化学溶液、不同流速作用下裂隙岩石试件的单轴压缩实验,获得裂隙红砂岩的单轴压缩应力—应变曲线,并对其强度、变形影响和裂纹搭接破坏模式进行分析。实验结果表明,试件质量的变化与浸泡溶液性质关系不大,溶液 pH 最终趋于中性;试件弹性波纵波速最终也趋于稳定;预制裂纹排列方式、浸泡溶液 pH 和流速均对岩石力学效应产生较大影响;单轴压缩条件下裂隙红砂岩均为张拉破坏,且其裂纹扩展方向与加载方向一致;裂纹搭接破坏模式主要有拉伸模式与拉伸—剪切模式;浸泡流速和化学溶液对裂纹搭接破坏模式影响不大。

乔丽萍等^[47]通过对不同的水环境下砂岩的孔隙率、pH 演变和矿物蚀变等展开了一系列实验研究,从微观的层次上分析了砂岩的水物理化学损伤机制。

1.2.2 岩石遇水膨胀特性研究

1.2.2.1 岩石膨胀的实验研究

罗伯逊(Robertson)^[48]采用常规固结仪对泥岩进行了单轴应变膨胀实验,得到了轴向膨胀应变与轴向膨胀压力的对数呈线性关系,这一实验得到了世界范围的公认,近 30 年来,岩土膨胀测试或计算一直沿用这一实验方法和结果。霍尔茨(Holtz)和吉布斯(Gibbs)^[49]首先研究了膨胀黏土的工程性质,他们做了一系列膨胀岩实验研究,如自由膨胀实验和有侧向约束条件下的膨胀实验;柯默尼克(Komornik)^[50]改膨胀仪的刚性环刀为柔性环刀,在环刀外侧粘贴应变片,测量径向膨胀应变和应力;与此同时,我国学者孙钧、李成江^[51]也做了类似实验,采用厚度为 0.127 5 cm 均匀薄壁圆环,取得了较好的实验结果。1989 年,国际岩石力学

学会膨胀岩专业委员会公布了《泥质膨胀岩实验的建议方法》^[52],对测量最大轴向膨胀应力、轴向和径向自由膨胀应变以及测量轴向膨胀应力和轴向膨胀应变关系的实验方法作了阐述,使之规范化,并提出应该继续开展实验室实验研究,特别是三维实验研究的观点。戴维森(Davison)^[53]在常规膨胀仪实验的基础上,发展了连续荷载膨胀实验方法,使所测得的膨胀和固结参数更为准确。罗(Lo K. Y.)等^[54]描述了单向和双向等压条件下,同时测量三个正交方向上应变的新方法,得出在主方向上施加压力,不仅限制该方向的膨胀,而且也限制了垂直该方向上膨胀应变的结论。杨庆、吴顺川等^[55]在改装的土三轴剪切仪上进行了三轴膨胀实验研究,综合考虑了吸水量及应力对膨胀的影响,测定了膨胀岩膨胀应变与三轴应力、吸水量等之间的关系。焦建奎^[56]针对常规胡德—安贝格(Huder-Amberg)实验不能测量膨胀过程中吸水量和径向膨胀压力的问题,对固结仪进行改造,增加吸水和侧压测量装置,研制开发一种基于吸水过程的侧向受限膨胀实验,得出在侧向受限状态下,由侧向膨胀受到限制会产生很大的侧向膨胀应力,使得侧向应力不符合金尼克条件,而是远高于轴向应力,并在整个过程中保持这种状态。陈宗基和李洪志、何满潮对膨胀岩石的变形和破坏进行了研究。

测定岩石矿物成分的实验主要有X射线衍射、电子显微镜扫描、差热分析以及晶粒及组织的显微分析等几种;测定岩石物理化学性质的实验包括测定离子交换量、测定比表面积等。膨胀岩的微观结构实验目的是测定岩石矿物成分和物理化学性质。

长江科学院王幼麟^[57]提出岩石的膨胀、软化和崩解往往是物理化学因素和力学因素综合的结果,对于微观而言,首要的任务是弄清楚岩石与水之间物理化学作用的机理及其主要的影响因素,为了解决这一问题,需要进行物质成分、结构特征、物理化学性质以及膨胀机理的研究。

中国矿业大学茅献彪等^[58]针对膨胀性岩复杂的物理力学特性,采用X射线衍射、扫描电镜等方法,较为全面地分析了膨胀岩的矿物成分和组织结构特征以及在间接拉伸、单轴压缩、三轴压缩、长期流变实验过程中的损伤破坏规律,分析了膨胀岩遇水作用前后微结构变化情况,得出膨胀岩的主要矿物成分是蒙脱石、伊利石、高岭石和伊蒙混合层,并且存在大量的微裂隙,这些微裂隙的存在为水渗入岩体提供了通道。他们还得出了膨胀岩的破坏特征:在单轴压缩实验和拉伸实验中出现典型的脆性损伤破坏特性,具体表现为绕颗粒弱结合边界面的滑移和拉伸断裂;在三轴和长期流变损伤破坏中则出现部分韧性破坏的特征,发生颗粒细化的现象。

北京科技大学朱建民等^[59]对小官庄铁矿软岩进行了研究,全面分析了软岩微观特性,得出小官庄铁矿主要存在两大类软岩:一类是富含蒙脱石为特征的具有中强膨胀的软岩,以蚀变闪长玢岩为代表;另一类是富含绿泥石或不含黏土矿物的节

理化软岩,不存在膨胀性,以闪长玢岩和绿泥化砂卡岩为代表。从软岩的微结构分析可知,软岩的结构按疏松或定向排列方式排列,所以软岩的性质极不稳定,易受外界影响而发生变化,宏观上表现为低强度、小内聚力、低模量、高泊松比,压缩、剪切或遇水膨胀其结构发生变化,从而引起软岩工程性能的改变。

刘长武、陆士良^[60]以扫描电子显微镜、X射线衍射仪、9310型微孔结构分析仪等先进的设备为测试手段,从泥岩的微观结构及物质组成等方面入手进行研究,结合泥岩遇水后宏观物理、力学性质的变化规律,全面阐述了泥岩遇水的崩解软化机理。

周翠英等^[61]针对广东地区重大工程中几种典型软岩的基本类型和特点,设计了若干软岩饱水软化实验,探讨了不同类型软岩在各种不同饱水状态和饱水时间后微观结构的基本特征;揭示了不同类型软岩微观结构的动态变化规律,为软岩饱水后力学性质的变化规律和软化机制研究奠定了微观学基础。

傅学敏、潘清莲^[62]借助扫描电镜的观察,分析了膨胀过程中岩石内部颗粒结构的微观变化特征。

综上所述,岩石膨胀相关的实验主要可分为以下几类:①岩石的膨胀压力实验:浸水岩石试件在侧向约束条件下,保持试件高度不变,测定最大轴向压力;②岩石膨胀应变实验:测量浸水岩石试件非约束条件最大自由轴向膨胀应变,包括侧限轴向膨胀和三向自由膨胀;③膨胀应力与轴向应变的关系,膨胀应力、应变和含水量的关系;④膨胀岩遇水后的微观实验观察。

1.2.2.2 岩石膨胀本构及其应用研究

胡德—安贝格(Huder-Amborg)实验结果和格洛布(Grob)给出的膨胀本构关系得到了世界范围内的公认,该实验已成为隧道工程领域中测定岩石膨胀和反拱设计的基本实验;爱因斯坦(Einstein)和威特基(Wittke)^[52]在胡德—安贝格实验结果基础上,提出了三维膨胀本构关系;孙钧、李成江^[63,64]在对复合膨胀渗水围岩流变机理的研究中,对一种普通泥质砂岩进行了单轴膨胀实验,认为轴向膨胀应变 ϵ_z 与轴向应力 σ_z 呈半对数线性关系;侧向膨胀压力 σ_r 与轴向压力 σ_z 呈对数线性关系;体积膨胀应变 ϵ_v 与应力不变量 I_1 及 I_3 呈半对数线性关系。杨庆等^[65,66]学者把三轴应变仪改制成三轴膨胀仪,对某膨胀岩原状样和重塑样进行了单轴和三轴膨胀实验,提出了考虑含水量的体积膨胀本构方程;傅学敏、潘清莲^[62]借助扫描电镜的观察,分析了膨胀过程中岩石内部颗粒结构的微观变化特征,并做了大量的实验来研究膨胀过程的宏观显现规律,提出了用膨胀元件、弹性元件、黏性元件和塑性元件并联组合,来模拟软岩膨胀的力学行为;陈宗基^[67]认为膨胀是物理、化学和力学过程联合作用的结果;一些学者从有效应力的观点出发,把不饱和泥岩中产生的间歇空气压力和间歇水压力,以及吸水膨胀压力总括起来用膨胀压力表示,并

把膨胀压力看作内部应力,如果将岩石视为各向同性的均质体,则关于岩土结构的有效应力理论对这类岩石也认为是适用的。中国矿业大学缪协兴教授^[68,69]认为水分在膨胀岩体中的扩散与含水率、吸水作用力、体积变形等都是耦合的,提出了湿度应力场理论。

利用实验总结出来的膨胀数学模型分析膨胀岩工程的稳定性、计算膨胀岩地基的变形等是膨胀岩课题研究的主要任务。很多学者在格洛布(Grob)推导出的本构模型基础上也做了很多有益的探索。据科瓦里(Kovari)^[70]报导,格洛布(Grob)于1972年首次提出了一种预测硐室围岩竖向膨胀底鼓的近似计算方法,认为底鼓围岩内任一点产生的径向膨胀应变与硐室开挖引起的卸载符合胡德—安贝格实验规律,对由径向应力的变化引起的膨胀应变进行积分,其值即为底板的最大底鼓量,这是一种非常近似的计算方法,没有考虑与膨胀发展方向相垂直的切向应力的影响,并假设巷道围岩处于饱水状态,其计算公式为^[71]:

$$h = \int_{r=\infty}^{r=r_0} K \cdot 10^{-2} \cdot \log \frac{\sigma_r}{\sigma_m} dr \quad (1-3)$$

式中 h ——底板的最大底鼓量;

r_0 ——巷道底板中点距巷道中心的距离;

r ——巷道底板以下一点距巷道中心的距离;

K ——胡德—安贝格(Huder-Amberg)实验参数;

σ_m ——最大轴向膨胀应力;

σ_r ——距巷道中心距离为 r 点的径向应力。

汉贝格(Hamberg)^[72]根据现场的实际湿度剖面图,以及荷载与土吸力之间的应力变化量测法,对某些点做了隆起预测。

柯丹达罗摩斯瓦米(Kodandaramaswamy)等^[73]提出了黏土的位移随时间变化呈双曲线变化关系:

$$\Delta S = \frac{t}{a_m + b_m t} \quad (1-4)$$

式中 a_m, b_m ——材料常数;

ΔS ——膨胀量。

当 $t \rightarrow \infty$ 时,得到最大膨胀量为:

$$\Delta S_{\max} = 1/b_m$$

科瓦里(Kovari)^[70]假设巷道底鼓仅发生在距巷道底板1倍巷道跨度的范围内,即在距巷道底板为1倍跨度处膨胀应变为零,并假设这一范围的膨胀应变规律符合胡德—安贝格(Huder-Amberg)实验规律,认为巷道底板的底鼓量与跨度和膨胀应变的形状系数成正比,与支护反力的对数成反比。计算公式为: