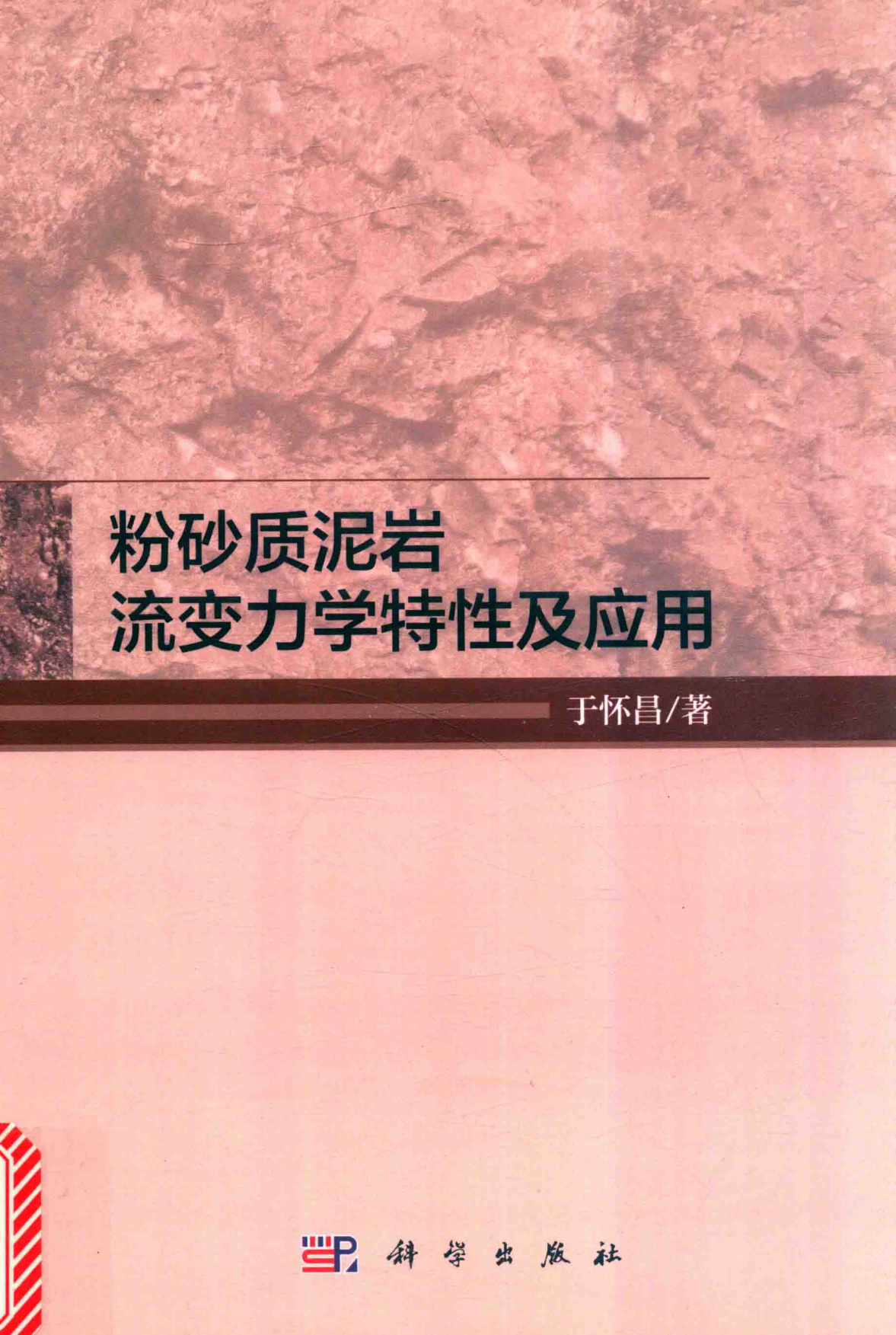




粉砂质泥岩 流变力学特性及应用

于怀昌/著



科学出版社

国家自然科学基金项目(51309100)
国家科技支撑计划项目(2015BAB07B08)

粉砂质泥岩 流变力学特性及应用

于怀昌 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对三峡地区巴东组二段(T₂b²)粉砂质泥岩区挖方高边坡时效变形显著的问题,采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的研究方法,研究粉砂质泥岩的流变力学特性,阐明粉砂质泥岩地层中边坡开挖后流变破坏机理,预测边坡变性发展趋势,为工程防灾减灾提供科学依据。全书主要包括:粉砂质泥岩常规力学性质试验研究、岩石蠕变力学特性试验研究与模型研究、水对岩石蠕变力学特性影响、岩石应力松弛特性和挖方高边坡流变破坏机理研究等。

本书可供从事地质工程、岩土工程、水利工程和采矿工程等研究领域的科研人员及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉砂质泥岩流变力学特性及应用/于怀昌著. —北京:科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053858-1

I. ①粉… II. ①于… III. ①泥岩—岩体流变学—研究 IV. ①P588.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139669号

责任编辑:李 雪 冯晓利/责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

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:10 1/2

字数:190 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流变是岩石材料固有的力学属性之一，是进行工程长期稳定性预测的重要依据。许多大型岩石工程的服务年限都是几十年甚至上百，不仅要考虑工程施工期的安全，而且要确保工程运行期的安全，即要考虑岩石的流变效应。因此，岩石流变力学特性的研究对于工程的长期稳定与安全具有重要的理论与实践意义。

三叠系中统巴东组二段(T_2b^2)粉砂质泥岩是一种软岩，强度低、变形量大、遇水软化，在三峡地区的秭归、巴东、巫山、奉节等地大面积分布，是三峡地区的“易滑地层”之一。在 T_2b^2 粉砂质泥岩地层工程边坡开挖后，坡体变形随时间不断增加，边坡稳定性差，表明 T_2b^2 粉砂质泥岩流变力学特性显著，在边坡变形过程中起主导作用。因此，查明 T_2b^2 粉砂质泥岩地层挖方高边坡的变形破坏机理，合理描述和揭示岩石与时间相关的力学特性，对于确保粉砂质泥岩地层中边坡工程的长期稳定和安全具有重要的理论意义和工程实用价值。

本书以高边坡工程的长期稳定和安全为研究目标，以三峡地区 T_2b^2 粉砂质泥岩为研究对象，采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的研究方法，对 T_2b^2 粉砂质泥岩进行常规单轴、三轴压缩试验、三轴压缩蠕变试验及三轴应力松弛试验，研究了粉砂质泥岩的常规力学性质、蠕变力学特性及应力松弛特性，揭示岩石在三向应力作用下的流变力学特性。基于试验结果，建立岩石的线性黏弹性与非线性黏弹塑性流变本构模型，并将岩石流变力学特性的研究成果应用到高边坡工程实践中，阐明了 T_2b^2 地层中边坡开挖后流变破坏机理，预测边坡变性发展趋势，为工程防灾减灾提供科学依据。书中内容主要包括：线路区地质环境及主要地质灾害、粉砂质泥岩常规力学性质试验研究、岩石蠕变力学特性试验研究、岩石蠕变本构模型、水对岩石蠕变力学特性影响、岩石应力松弛特性、挖方高边坡流变破坏机理研究等方面。

本书由国家自然科学基金项目(51309100), 国家科技支撑计划项目(2015BAB07B08)资助。在本书的撰写过程中, 得到了华北水利水电大学刘汉东教授、黄志全教授、姜彤教授的悉心指导和大力支持, 同时也得到了中国地质大学(武汉)余宏明教授的支持与帮助, 在此表示由衷的感谢!

由于作者水平有限, 书中不妥之处, 恳请各位读者批评指正。

作者

2017年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石流变力学研究现状	3
1.1.1 岩石(体)蠕变力学特性试验研究	3
1.1.2 岩石蠕变本构模型研究	9
1.1.3 岩石(体)应力松弛特性试验与模型研究	12
1.1.4 岩质边坡流变研究	14
1.2 岩石流变力学特性研究中存在的不足	18
第 2 章 线路区地质环境及主要地质灾害	20
2.1 线路工程概况	20
2.2 气象水文	21
2.2.1 气象	21
2.2.2 水文	21
2.2.3 降雨量	22
2.3 地形地貌	23
2.4 地层岩性	24
2.4.1 第四系(Q)	25
2.4.2 三叠系上统须家河组(T_3xj)	25
2.4.3 三叠系中统巴东组(T_2b)	25
2.4.4 三叠系下统嘉陵江组(T_1j)	26
2.5 地质构造	28
2.5.1 褶皱构造	29
2.5.2 断裂构造	30
2.5.3 节理裂隙	31
2.6 地震	32
2.7 主要地质灾害	32
2.8 本章小结	34
第 3 章 粉砂质泥岩常规力学性质试验研究	35
3.1 岩石矿物成分	35

3.2	岩石物理水理性质	36
3.3	岩石三轴压缩试验	37
3.3.1	试样制备与试验方法	37
3.3.2	岩石应力应变全曲线	38
3.3.3	强度和围压的关系	41
3.4	四线性弹-脆-塑性本构模型	43
3.4.1	基本假设	44
3.4.2	理论模型	44
3.5	本章小结	48
第4章	粉砂质泥岩蠕变力学特性试验研究	50
4.1	试验设备	51
4.2	加载方式与数据处理方法	53
4.2.1	加载方式	53
4.2.2	Boltzmann 叠加原理	54
4.3	试验方法	55
4.4	试验结果	58
4.5	岩石蠕变规律	60
4.5.1	轴向与径向蠕变规律	60
4.5.2	蠕变速率规律	61
4.5.3	体积蠕变规律	64
4.5.4	应力应变等时曲线	65
4.5.5	长期强度	67
4.6	本章小结	67
第5章	岩石蠕变本构模型	70
5.1	线性黏弹性蠕变模型	71
5.1.1	元件模型的选取	71
5.1.2	Burgers 模型	71
5.1.3	Burgers 蠕变模型参数辨识	76
5.1.4	Burgers 模型参数意义及参数选取	78
5.2	非线性黏弹塑性蠕变模型	79
5.2.1	模型的建立	79
5.2.2	非线性 Burgers 模型参数辨识与验证	82
5.2.3	岩石蠕变模型参数选取	83
5.3	本章小结	84

第 6 章 水对粉砂质泥岩蠕变力学特性影响作用试验研究	86
6.1 试样制备与试验方法	86
6.2 试验结果	87
6.3 干燥与饱水状态下岩石蠕变规律	89
6.3.1 岩石应变规律	89
6.3.2 岩石蠕变长期强度	90
6.4 干燥与饱水状态下岩石蠕变本构模型	90
6.4.1 Burgers 蠕变模型与参数辨识	90
6.4.2 模型参数对比	91
6.4.3 Burgers 模型参数意义	92
6.5 本章小结	93
第 7 章 粉砂质泥岩应力松弛特性试验与模型研究	94
7.1 线性材料蠕变与应力松弛的关系	95
7.2 试验方法及设备	96
7.3 试验结果	97
7.4 岩石应力松弛规律	99
7.4.1 应力松弛阶段	99
7.4.2 应力松弛特征	99
7.4.3 应力松弛速率	100
7.4.4 松弛残余强度	101
7.4.5 径向应变与体积应变	101
7.4.6 松弛模量	104
7.4.7 应力应变等时曲线	105
7.5 岩石应力松弛本构模型与参数辨识	106
7.5.1 应力松弛经验模型	106
7.5.2 应力松弛元件模型的选取	107
7.5.3 Burgers 松弛模型参数辨识	107
7.5.4 应力松弛元件模型的进一步研究	108
7.5.5 元件模型的比较研究	112
7.6 本章小结	113
第 8 章 挖方高边坡流变破坏机理研究	116
8.1 FLAC ^{3D} 软件	116
8.1.1 FLAC ^{3D} 简介	116
8.1.2 FLAC ^{3D} 中的流变本构模型	118

8.2 工程概况	122
8.2.1 地形地貌	122
8.2.2 地层岩性	123
8.2.3 地质构造	124
8.2.4 水文地质条件	125
8.3 边坡模型的建立	125
8.4 边坡初始应力场	127
8.5 边坡开挖弹塑性数值模拟	129
8.5.1 应力场分析	130
8.5.2 位移场分析	133
8.5.3 塑性区分析	136
8.6 边坡开挖流变数值模拟	137
8.6.1 应力场分析	138
8.6.2 位移场分析	141
8.6.3 塑性区分析	145
8.6.4 监测点结果分析	146
8.7 本章小节	149
参考文献	150

第1章 绪 论

流变特性是岩石的重要力学特性之一，与岩石工程的长期稳定和安全密切相关。许多重大岩石工程的建设都迫切需要了解岩石的流变力学特性，使工程建设顺利进行，并确保岩石工程在长期运营过程中的安全与稳定。因此，流变力学特性是岩石力学中一个重要的研究课题。

岩石的流变力学特性，一般是指在外部条件作用下，岩石的应力和应变随时间缓慢变化的过程和现象，表现为蠕变、应力松弛、黏性流动、弹性后效、长期强度五方面^[1]。研究岩石材料和岩体流变理论的主要内容是寻求其应力应变与时间的本构模型，利用数学描述的材料强度和变形法则来解释导致材料失效而破坏的时间历程及确定有关的材料参数，在此基础上，采用流变力学的方法来解决各类岩体工程中有关强度、变形、稳定和破坏的问题。

大量工程实践与研究表明，岩质边坡工程的破坏与失稳，在许多情况下并不是在开挖后立即发生的，岩体中的应力和变形是随时间不断变化和调整的，其调整的过程往往需要延续一个较长的时期，即边坡从开始变形到最终破坏是一个与时间有关的复杂非线性累进过程^[2]。岩石流变是边坡及滑坡产生大变形及失稳的重要原因之一。许多滑坡都是因岩石流变破坏而引起的，并且在破坏前都有明显的加速流变特性。过去国内外对边坡变形破坏的研究只注重荷载的短期效应，较少考虑边坡在荷载长期作用下的时效变形特征。在以往的岩质边坡工程中，不乏因对岩石流变特性研究不够，而导致延误施工甚至工程失败的先例^[3]。许多大型工程的服务年限都是几十年甚至上百年，在工程设计中不仅要考虑施工期的安全，而且要确保工程在日后长期运营过程中的安全，即要考虑岩石的时间效应。因此，研究岩石的流变力学特性对边坡变形破坏分析和滑坡预测预报都具有十分重要的意义。

国家重点工程杭州至兰州高速公路是连接我国东、中、西部的重点干线公路。杭兰线巫山至奉节段(K0+000~K59+553.423)，路线贯穿巫山全境和奉节东部，全长约59.553km，是杭兰线的重要组成部分。该线路的建设是实施“西部大开发”战略的需要，是加强长江经济带一体化发展的需要，更是建设三峡库区生态经济区，开发旅游资源，实施移民开发战略，促进三峡脱贫致富的需要。

线路地处三峡库区长江北岸,海拔高程为 100~1600m,沟谷切割深。谷底与山峰之间的相对高差平均在 500m 以上,地形自然坡度一般大于 30°。由于线路所处地区区域地质环境复杂,线路经过地段的地形、地貌复杂多变,因此,挖方高边坡工程较多,边坡高度为 30.1~53.8m。线路区出露地层主要为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})碳酸盐岩(灰岩),巴东组第一段岩层(T_2b^1)碳酸盐岩(泥灰岩夹泥岩),三叠系中统巴东组第二段(T_2b^2)粉砂质泥岩与泥质粉砂岩,第三段岩层(T_2b^3)碳酸盐岩(泥灰岩)。在上述三段碳酸盐岩地层中的高边坡岩体坚固,岩层产状较缓,层间摩擦系数高,未发现软弱夹层,即使是顺层坡,也能满足抗滑稳定的要求,边坡稳定性较好。在三叠系中统巴东组第二段(T_2b^2)粉砂质泥岩区,地层岩性条件较差,坡体开挖后的自稳能力低。由于粉砂质泥岩所具有的特殊工程特性,对高速公路的修建和运营有很大的影响和制约作用,特别是对挖方高边坡的影响更大。在该套地层中挖方形成的工程高边坡稳定性差,在开挖后一段时间,大部分边坡坡体后缘出现裂缝,坡面发育与开挖走向线近平行的裂缝,坡脚隆起,经过加固后的部分边坡防护结构格构梁出现裂缝,坡体的变形随时间增长不断发生变化。这些现象表明巴东组第二段(T_2b^2)粉砂质泥岩具有显著的时效变形特征,流变特性显著,在边坡变形过程中起主导作用。

T_2b^2 粉砂质泥岩是一种软岩,强度低、变形量大、抗风化能力差、遇水软化,在三峡地区的秭归、巴东、巫山、奉节等地大面积分布,是三峡地区的“易滑地层”之一^[4]。目前研究人员对 T_2b^2 粉砂质泥岩力学性质的研究集中在常规单轴、三轴压缩试验方面^[5-9],但并没有涉及粉砂质泥岩的流变力学特性,这直接影响到对 T_2b^2 粉砂质泥岩地层中边坡变形破坏机理的定量认识。

坡体在载荷的长期作用下引起的时效渐进式破坏,严重影响到该地层中的工程建设和工程长期运营安全,成为公路建设中的一大难题。为查明挖方高边坡的变形机理,合理描述和揭示岩石与时间相关的力学特性和行为,确保边坡工程在长期运营过程中的安全与稳定,有必要对 T_2b^2 粉砂质泥岩的流变特性进行深入研究。本书采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的研究方法,对岩石的流变力学特性进行深入研究,并将研究成果应用于高速公路挖方高边坡工程实践中,解决实际问题。

工程岩体的长期稳定性是当今岩土工程领域中一个十分重大的前沿问题。流变性质和时效特征是岩石材料固有的力学属性,是进行岩体工程长期稳定性预测的重要依据。对 T_2b^2 粉砂质泥岩的流变特性深入研究,将有助于明确复杂应力状态下岩石流变的力学特性及岩石流变破坏机理,从而为该地

区挖方高边坡的长期稳定与安全提供参考依据,深化对该地区边坡失稳机理的认识,为工程防灾减灾提供科学依据。同时也有助于丰富和完善岩石流变力学理论的研究,为其他类型岩石特别是软岩的流变力学特性研究提供一定的参考价值。因此, T_2b^2 粉砂质泥岩流变力学特性的研究具有十分重要的理论价值和工程实用价值。

1.1 岩石流变力学研究现状

本书研究内容主要涉及岩石蠕变、应力松弛力学特性的试验研究和模型研究,岩质边坡流变的研究等内容。下面就这几方面内容国内外的研究现状做简要论述。

1.1.1 岩石(体)蠕变力学特性试验研究

岩石蠕变力学特性的试验研究工作从20世纪30年代就已经开始。Griggs^[10]通过对页岩、砂岩和灰岩等岩石的蠕变试验,指出当施加的荷载为破坏荷载的12.5%~80%时,砂岩和粉砂岩等岩石就会发生蠕变。近年来,在室内岩石单轴、双轴及三轴压缩,结构面剪切蠕变的力学特性等研究方面,现场岩体压缩、岩体结构面剪切蠕变力学特性等研究方面均取得了大量的研究成果。本节从岩石材料及岩体的蠕变力学特性试验研究两方面来论述岩石蠕变力学特性的试验研究进展。

1. 岩石材料蠕变力学特性试验研究

在岩石单轴压缩蠕变试验研究方面,Matsushima^[11]及 Jeager 和 Cook^[12]对大理岩和花岗岩进行了单轴压缩蠕变试验工作。陶振宇和潘别桐^[13]进行了石灰岩的单轴压缩蠕变试验,基于试验结果,表明当应力水平为岩石单轴常规峰值强度的50%时,450天时间内石灰岩试样轴向仅压缩减小了0.014%,此应力水平对试样的蠕变变形影响非常小。杨建辉^[14]对砂岩进行了单轴压缩蠕变试验,分析了砂岩纵向变形以及横向变化的变化规律,并依据相关岩石应力松弛试验中横向变形随时间的变化规律,得出岩石试样内部裂纹的产生和扩展是由于横向变形的不断增加而产生的。徐平等^[15, 16]对三峡大坝坝基的花岗岩开展了单轴压缩蠕变试验,基于试验结果给出了岩石蠕变的经验公式,并指出岩石的蠕变存在一个应力阈值 σ_s ,当应力水平小于 σ_s 时,岩石的蠕变力学特性可以用广义 Kelvin 模型进行描述,而当应力水平大于 σ_s 时,岩

石的蠕变力学特性则可以用西原正夫模型进行描述。王贵君和孙文若^[17]对硅藻岩进行了单轴压缩蠕变试验,揭示了岩石的蠕变力学特性,表明硅藻岩层理发育,强度极低,岩石的蠕变量大,与常规强度相比,岩石的长期强度大幅降低。许宏发^[18]对软岩进行了单轴压缩蠕变试验研究,结果表明随时间的增加岩石的弹性模量不断降低,与强度一样具有相似的变化规律。金丰年^[19]对安山岩进行了单轴压缩蠕变试验,研究结果表明随应力水平的增加,试样单轴压缩的蠕变寿命逐渐缩短,同时通过单轴拉伸与单轴压缩蠕变试验的对比研究,表明在两种试验中随应力水平的增加试样的蠕变寿命的变化规律十分相似。Maranini 和 Brignoli^[20]对石灰岩进行了单轴压缩蠕变试验,研究结果表明岩石蠕变的微观机理是由于围压较低时裂隙的扩展及应力水平条件较高时孔隙的塌陷而造成的。张学忠等^[21]开展了辉长岩的单轴压缩蠕变试验研究,基于试验曲线拟合得出了辉长岩蠕变的经验公式。王金星^[22]对花岗岩分别进行了单轴拉伸蠕变试验和单轴压缩蠕变试验,分析了岩石的各向异性特性对其蠕变速率以及蠕变变形的影响,研究了蠕变变形及应力水平与试样的蠕变寿命之间的关系问题。朱定华和陈国兴^[23]对南京地区的红层软岩进行了蠕变试验研究,表明红层软岩的蠕变特性非常显著,红层软岩的长期强度是其单轴常规强度的 63%~70%。赵永辉等^[24]对润扬长江大桥基础处的岩石进行了单轴压缩蠕变试验,揭示了岩石的单轴压缩蠕变特性,并采用广义 Kelvin 元件模型来描述岩石的蠕变特性,依据试验曲线对模型参数进行了拟合,得到了岩石的蠕变模型参数,但获得的研究成果仅表明了岩石单向应力状态下的蠕变特性。李铀等^[25]对风干和饱水两种状态下的花岗岩分别进行了单轴压缩蠕变试验,研究表明,与风干状态下的花岗岩相比,饱水后花岗岩的长期强度大幅降低,并且饱水后花岗岩的蠕变速率和蠕变量显著增大,因此,饱水后硬岩的蠕变力学特性对于工程实践的影响是不容忽视的。徐素国等^[26]在不同的应力水平下,进行了长达 100 多天的钙芒硝盐岩单轴压缩蠕变试验,发现钙芒硝盐岩高应力水平蠕变速率高于低应力水平的蠕变速率,其蠕变速率在初期和后期比较大,并随时间大致呈 U 形分布,与 NaCl 岩盐相比,钙芒硝盐岩蠕变速率及蠕变量均较小。张耀平等^[27]采用单轴分级增量循环加卸载方式,对金川有色金属公司Ⅲ矿区软弱矿岩进行流变试验,探讨了软弱矿岩的黏弹塑性变形特性,建立了软岩的非线性蠕变模型。范秋雁等^[28]以南宁盆地泥岩为研究对象,进行一系列单轴压缩无侧限蠕变试验和有侧限蠕变试验来分析泥岩的蠕变特性,配合扫描电镜分析了泥岩蠕变过程中细观和微观结构的变化,并提出岩石的蠕变机制。汪为巍和王文星^[29]对金川Ⅲ矿区软弱复

杂矿岩蠕变特性进行单轴分级增量循环加卸载试验研究,分析了五种岩样蠕变变形和破坏特征及破坏形态。

在岩石多轴压缩蠕变试验研究方面,Fujii 和 Kiyama^[30]对砂岩和花岗岩进行了三轴压缩蠕变试验,研究了轴向应变、径向应变及体积应变随时间的变化规律,基于研究结果得出在蠕变试验及常应变速率蠕变试验中,可以用径向应变作为衡量岩石损伤程度的指标。赵法锁等^[31, 32]进行了石膏角砾岩三轴压缩蠕变力学特性的室内试验研究工作,指出含水量和微观结构的不同对岩石蠕变力学行为有很大的影响,并对石膏角砾岩试样的破裂断口进行了扫描电镜试验,从细微观角度研究了岩石蠕变破坏的机理。Liao 等^[33-35]通过建立三维黏弹塑性蠕变模型研究了软岩的时间效应。Sun^[36]通过试验研究了软岩的蠕变力学特性,根据软岩的非线性蠕变特征,建立了统一的三维黏弹塑性非线性蠕变本构模型,并将该模型用于地下洞室流变分析中。陈渠等^[37]对三类沉积软岩在不同围压和不同应力比条件下的三轴压缩蠕变特性进行了系统的长期试验研究,研究了在不同条件下三种沉积软岩的强度与变形特征,分析了软岩的蠕变、蠕变速率、时间依存性等特征,为软弱岩体长期稳定性的预测提供了重要的参考价值。刘光廷等^[38]对干燥和饱水两种状态下的砾岩采用岩石双轴流变仪进行了多轴蠕变试验,分析了不同含水率和不同围压条件下砾岩的蠕变力学特性,并基于试验结果分析了拱坝的稳定性。万玲^[39]采用自行设计的岩石三轴蠕变试验仪开展了泥岩的三轴蠕变试验研究,依据泥岩的蠕变特性建立了岩石的黏塑性蠕变损伤模型。张向东等^[40]采用自行设计的杠杆式岩石三轴蠕变试验仪,进行了泥岩的三轴蠕变试验,并依据泥岩的蠕变特性建立了岩石的非线性蠕变模型。刘建聪等^[41]采用 XTR01 型微机控制电液伺服岩石试验机,使用分级加载方式完成了煤岩的三轴蠕变试验,应用西原正夫模型建立了岩石的三维蠕变本构方程。徐卫亚等^[42, 43]进行了锦屏一级水电站绿片岩的三轴压缩蠕变试验,分析了不同围压条件下岩石轴向应变以及侧向应变随时间的变化规律,通过对绿片岩试样破裂断口的扫描电镜试验,得出了岩石的蠕变破裂机理。范庆忠等^[44]采用重力加载式岩石三轴蠕变仪,对山东龙口矿区的含油泥岩在低围压条件下的蠕变力学特性开展了三轴压缩蠕变试验研究工作,研究结果表明含油泥岩的蠕变有起始蠕变应力阈值,低于该阈值时含油泥岩将不发生蠕变,起始蠕变应力阈值与围压之间的关系呈线性变化,随围压的增加而增大,含油泥岩的蠕变破坏应力与围压之间也成比例变化。梁玉雷等^[45]对大理岩进行了不同温度及温度周期变化下三轴压缩蠕变试验,研究了大理岩试样在不同温度及温度周期变化下轴向应变随时间的

变化规律,分析了不同温度及温度周期变化下岩石蠕变的变形机制。唐明明等^[46]对含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩 3 种岩心试样进行了不同围压下三轴压缩蠕变试验,分析了其蠕变变形规律。根据 3 种岩样第 2 蠕变阶段的蠕变特性,基于含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层的体积分数,推导了含夹层盐岩蠕变力学参数与纯盐岩及纯泥岩蠕变参数的关系。李萍等^[47]对川东气田盐岩、膏盐岩进行了蠕变试验,分析了固有的矿物组分及偏应力、温度、围压对蠕变的影响,结合蠕变曲线和岩石参数,提出了稳态蠕变速率本构方程。杜超等^[48]通过对湖北云应的盐岩和泥岩,以及江苏金坛盐岩的单轴、三轴蠕变试验结果的分析,研究了包括应力、围压等外在条件以及内部组成结构对盐岩蠕变特性的影响。张玉等^[49]对某大型水电工程破碎带软岩开展流变力学试验研究,分析了长期荷载作用下岩石的流变力学特性。刘志勇等^[50]利用三轴压缩全过程试验获得进入残余强度阶段的大理岩试件,以此来模拟工程塑性区岩体,并对残余强度阶段的岩石试件进行不同围压下的三轴蠕变试验,系统研究残余强度阶段大理岩的蠕变特性及其长期强度。梁卫国等^[51]采用自主研发的多功能岩石力学试验机,进行了轴压 5MPa、围压 4MPa 条件下,不同渗透压(3MPa, 2MPa, 1MPa)作用下的三轴蠕变力学试验,研究了钙芒硝岩在原位溶浸开采过程中的蠕变力学特性。张帆等^[52]通过一系列黏土岩的单级三轴压缩蠕变试验,获得 Callovo-Oxfordian (COx) 黏土岩较为精确的蠕变速率阈值范围。该阈值可用于在稳定蠕变阶段判断黏土岩是否会出现加速蠕变破坏。

目前,国内外岩石流变力学特性与本构模型的研究多建立在加载力学基础上的岩石蠕变试验,极少开展卸荷应力路径下岩石蠕变特性的研究。近几年,研究人员开展了不同卸荷路径下岩石蠕变特性方面的研究工作。朱杰兵等^[53]以雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞大理岩为研究对象,采用不同轴压方案下恒轴压、逐级卸围压的应力路径开展室内蠕变试验。研究了卸围压产生的偏差应力作用下大理岩轴向及侧向蠕变特征。闫子舰等^[54]结合锦屏水电站引水隧洞的工程实际,采用恒轴压分级卸围压的应力路径对锦屏大理岩开展了室内三轴压缩蠕变试验。对轴向和侧向蠕变规律的差异进行对比分析,研究了卸荷应力路径下应力状态与岩石蠕变变形的关系。王宇等^[55]以典型软岩-泥质粉砂岩为研究对象,进行了不同应力水平下的恒轴压、分级卸围压室内蠕变试验,研究了卸荷条件下岩石的蠕变变性特征。王军保等^[56]对盐岩试件进行了恒围压分级增加轴压、恒轴压分级卸围压、恒轴压循环围压三种不同加载路径的蠕变试验,分析了盐岩在不同加载路径下的蠕变变形规律。张龙

云等^[57]开展大岗山水电站坝区硬脆性辉绿岩的三轴蠕变试验,研究了岩石不同应力路径下加载流变和卸荷蠕变的特征。黄达等^[58]以雅砻江锦屏 I 级水电站大理岩为研究对象,开展相同初始高应力状态条件下恒轴压分级卸围压三轴卸荷蠕变试验,研究了分级卸荷量对岩石卸荷蠕变特性的影响作用。

对岩石工程来说,如果工程长期处于恶劣的地质环境条件下,如在渗流场与应力场的长期耦合作用下,岩石的蠕变变形会非常显著,因此研究渗流应力耦合作用下岩石的蠕变特性同样具有重要的理论意义与实践意义。李刚和梁冰^[59]进行了不同孔隙水压力条件下软岩蠕变试验,研究了孔隙水压力对软岩蠕变的影响。王如宾等^[60]对坝基坚硬变质火山角砾岩进行渗透水压力作用下的三轴流变力学试验。基于试验结果,研究变质火山角砾岩在不同围压下的蠕变特性,并分析岩石蠕变全过程中渗流速率随时间的变化规律。张玉等^[61]对某水电站坝基碎屑岩开展渗流-应力耦合作用下的蠕变和渗透特性试验研究,探讨了碎屑岩轴向、侧向及体积蠕变特性和速率变化规律,对蠕变过程中渗流规律和演化机制进行详细分析。对破坏岩样开展微细观电镜扫描试验,研究宏微观破坏机制。万文等^[62]以湖北云应盐矿含泥岩夹层的氯化钠盐岩试件为研究对象,进行层状盐岩的蠕变-渗透试验,研究了单轴压缩条件下层状盐岩的蠕变特性与渗透演化特征。江宗斌等^[63]以大东山隧道的石英岩为研究对象,进行循环加卸载条件下岩石蠕变-渗流耦合试验,分析了岩石加卸载过程中的蠕变、渗透性变化规律和渗流-蠕变耦合机理,得到了压密阶段、裂纹扩展阶段和裂纹贯通阶段岩石体积应变的发展规律,总结了渗透率与体积应变之间的关系。

2. 岩体蠕变力学特性试验研究

由于岩体中节理、断层及软弱夹层等各种不连续面的存在,导致岩石与岩体力学性质的较大差异。岩体的力学性质受岩体结构所控制,岩体是不连续体,其变形是由岩石的变形以及结构面的变形两部分组成的。

在岩体现场蠕变试验研究方面,Sun 和 Hu^[64]对三峡大坝坝基花岗岩进行了劈裂拉伸蠕变试验,研究结果表明花岗岩的蠕变拉伸强度与试验荷载施加速率有关,并进一步分析了水对花岗岩蠕变力学特性的影响。周火明等^[65]对三峡工程坝址试验洞内的岩体进行了现场单轴压缩蠕变试验、三轴压缩蠕变试验及剪切蠕变试验,其中岩体的压缩蠕变试验结果表明,室内岩石的蠕变力学特性可以用广义 Kelvin 模型来描述,而现场岩体应变随时间的变化规律与室内岩石蠕变规律是一致的,在低应力水平下仍可以用广义 Kelvin 模型

描述现场岩体的蠕变力学特性。同时依据现场岩体的剪切蠕变试验结果,建立了岩体结构面的剪切蠕变模型,并确定了模型参数。徐平等^[66]应用柔性板法对溪洛渡水电站坝址区的错动带岩体开展了现场蠕变试验研究工作。徐平等^[67, 68]研究了三峡永久船闸高边坡花岗岩微风化岩体的蠕变力学特性,分别进行了现场岩体压缩蠕变、剪切蠕变及结构面剪切蠕变试验,基于试验结果对施工期与运行期时间段内的边坡蠕变变形进行了数值分析。陈卫忠等^[69]详细介绍了泥岩现场大型真三轴蠕变试验过程、方法和试验成果,深入分析蠕变变形随时间的变化规律,提出泥岩非线性经验幂函数型蠕变模型及其参数。陈芳等^[70]以大岗山水电站坝区辉绿岩现场剪切流变试验数据为基础,分别采用等时应力-应变曲线法、非稳定蠕变判别法和稳态蠕变速率法计算获得坝区辉绿岩的长期剪切流变强度,并进行了对比分析。

在岩体结构面室内蠕变试验研究方面,丁秀丽等^[71]对三峡船闸高边坡岩体内的硬性结构面进行了室内剪切蠕变试验,研究了在恒定应力水平作用下硬性结构面的蠕变力学特性,在此基础上建立了结构面的室内剪切蠕变本构模型。杨松林^[72]对节理岩体开展了剪切蠕变试验,研究了节理岩体的蠕变力学特性,表明黏聚力对时间的敏感性要高于内摩擦系数对时间的敏感性,与节理短期抗剪强度参数相比,长期抗剪强度参数中的黏聚力降低了 67%,内摩擦系数则降低了 20%。侯宏江和沈明荣^[73]对两组不同爬坡角的结构面进行了室内剪切蠕变试验,揭示了规则齿型结构面的蠕变力学特性,得出了结构面的长期强度。Derscher 和 Hnadley^[74]对某矿山中的石英岩和火山岩中的结构面开展了剪切蠕变试验研究工作。沈明荣和朱银桥^[75]在水泥砂浆试件中生成了规则的齿形结构面,以此来模拟天然岩体中的结构面,并对人工齿形结构面进行了室内剪切蠕变试验,研究了结构面的蠕变规律。李志敬等^[76]对大理岩硬性结构面进行剪切蠕变试验。通过对大理岩硬性结构面表面的量测,采用平均粗糙角描述大理岩硬性结构面表面粗糙度情况,分析了不同粗糙度情况下岩样剪切位移与时间的变化规律。沈明荣和张清照^[77]对锦屏Ⅱ级水电站含有软弱结构面的大理岩试样进行分级加载剪切蠕变试验,通过对不同法向应力条件下岩体结构面的蠕变力学特性及其规律的研究,以及对结构面剪切蠕变试验过程中的蠕变速率特性进行分析,探讨了软弱结构面的蠕变特性。张清照和沈明荣^[78]基于岩石双轴流变试验机得到了具有绿片岩软弱结构面的灰白色大理岩剪切蠕变试验曲线,对绿片岩软弱结构面的长期强度特性和加速蠕变特性进行了研究。