

张传庆 周 辉 张 洋 著
刘 宁 李 震 王竹春

深埋软岩隧洞稳定性 控制理论与技术



科学出版社

深埋软岩隧洞稳定性控制 理论与技术

张传庆 周 辉 张 洋 著
刘 宁 李 震 王竹春

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在多年软岩力学特性试验和力学理论以及深埋软岩工程实践研究的基础上,总结相关试验方法、本构理论、隧洞(巷道)围岩稳定性和变形控制技术的最新研究成果撰写而成。书中首先介绍了软岩的基本概念和工程地质特征,而后详细阐述了两种深埋软岩的物理和力学试验成果、考虑深埋绿泥石片岩剪胀特性的弹塑性硬化软化力学模型和描述层状岩体力学行为的横观各向同性弹塑性力学模型、深埋软岩隧洞(巷道)工程的开挖力学响应,论述了深埋软岩工程稳定性控制技术和方法。书中成果应用于埋深超过 1500m 的锦屏二级水电站引水隧洞绿泥石片岩洞段和埋深近 900m 的济三矿煤系地层粉细互层砂岩巷道的围岩稳定性分析、控制与设计优化中。

本书可为深埋软岩隧洞(道)和巷道围岩稳定性分析与控制的研究提供启示和借鉴,为工程设计、施工技术和方法研发提供支持。本书也可为高校师生、研究院所及设计部门的人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

深埋软岩隧洞稳定性控制理论与技术/张传庆等著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047463-6

I. ①深… II. ①张… III. ①软弱岩石-岩石隧洞-隧道工程-研究
IV. ①U459. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043726 号

责任编辑:刘宝莉 常朝朝 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:16 彩插:8

字数:323 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国经济高速发展,土木工程建设的规模空前巨大,能源需求日益旺盛,可再生的水电能源利用率提高,大型水电站在西南崇山峻岭中星罗棋布,大型调水和引水工程也相继开工,涉及大量高应力或深埋地下工程的建设。另外,浅部煤炭资源日渐枯竭,深部开采势在必行,深埋巷道将成为深部开采的经济命脉和生命通道。深部工程若赋存于软岩中,常常会遭遇大规模塌方和大变形问题。软岩洞段常常成为整个工程的“瓶颈”,变形控制异常艰难,往往多次返修,拖延工期,并造成投资飙升。因此,深埋软岩隧洞(道)或巷道变形力学机制及稳定性控制理论与技术是岩土科研工作者和生产建设者面临的一个急需解决的难题,此方面的研究具有十分重要的理论和工程意义。

深埋软岩工程主要面临的是挤压变形问题,与膨胀岩吸水鼓胀变形不同,高地应力、低岩体强度和外在环境(主要是水)是该问题的三个核心要素。在把握工程区地应力场基本规律和量值的基础上,本书通过系统的物理力学试验,分析了软岩的物理特性和力学行为,研究其遇水软化属性的力学响应,及其在高应力条件下的时效特性。在对试验数据分析的基础上,本书建立了与其力学行为和特性相适应的本构模型。通过对现场监测数据的分析,采用数值模拟方法对深埋软岩隧洞或巷道开挖力学响应开展研究,分析工程围岩变形力学特性和稳定性,形成了相应的稳定性控制技术和优化方法,并考虑运行期围岩时效特性、水的长期作用等因素,开展了衬砌结构的优化研究。研究成果分别应用到锦屏二级水电站深埋引水隧洞绿泥片岩洞段和济三矿深埋煤系地层粉细互层砂岩巷道施工期的稳定性控制中,并发挥了关键性作用。

本书得到了国家自然科学基金(51079144 和 51279201)、国家重点基础研究发展计划(973)项目第2课题:TBM掘进扰动下深部复合地层围岩力学行为响应规律(2014CB046902)、国家重大科研仪器研制项目(51427803)、中国科学院青年创新促进会等项目的资助。此外,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室等单位对相关成果研究提供了支持和帮助,在此表示衷心感谢!

参与研究的还有:杨凡杰助理研究员、刘继光高级工程师、孙峰硕士、邢亮硕士、高红博士、卢景景助理研究员、朱勇助理研究员、胡大伟研究员、胡善超博士。冯夏庭研究员、张春生教授级高工、侯靖教授级高工、陈祥荣教授级高工、周春宏教授级高工、张伟教授级高工、曹强教授级高工等参与了锦屏二级水电站绿泥石

片岩洞段挤压变形问题处理相关研究工作并给予了现场试验工作的支持。郭念波副矿长、魏秉祥科长、任振群区长等参与了济三矿深埋煤系地层软岩巷道变形分析相关研究工作并给予了现场试验工作的支持。博士生渠成堃、孟凡震、徐荣超、杨艳霜、郑俊、胡明明、姜玥、程广坦、崔国建、高阳、宋明、刘海涛、硕士生梁恒、沈铮、陈珺等参与了部分研究工作,科学出版社刘宝莉老师等为本书的编辑出版付出了辛勤劳动。在本书的撰写过程中还得到有关专家的指导和帮助,引用了多位学者的文献资料,在此对上述做出贡献的专家和研究生表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请专家、学者不吝批评和赐教。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究现状	3
1.2.1 深埋软岩的定义和分类	3
1.2.2 深埋软岩的变形破坏机理	5
1.2.3 软岩力学试验方法	6
1.2.4 软岩力学本构模型	8
1.2.5 软岩工程稳定性分析	13
1.2.6 软岩工程稳定性控制理论与技术	14
1.3 主要研究内容和思路	17
第 2 章 深埋软岩的工程地质特征	19
2.1 软岩工程的一般工程地质特征	19
2.1.1 软岩的分类	19
2.1.2 软岩地下工程的变形特征	21
2.1.3 软岩地下工程的强度特征	22
2.2 深埋绿泥石片岩隧洞工程地质特征	22
2.2.1 工程概况	22
2.2.2 区域地质概况	23
2.2.3 深埋软岩洞段地层岩性和地质构造	24
2.2.4 深埋绿泥石片岩洞段工程地质条件	26
2.3 深埋煤系地层粉细互层砂岩巷道工程地质特征	31
2.4 小结	33
第 3 章 深埋软岩物理力学特性与试验方法	34
3.1 深埋绿泥石片岩的物理特性及试验	34
3.1.1 锦屏二级水电站深埋绿泥石片岩洞段概况	34
3.1.2 绿泥石片岩取样加工	34
3.1.3 绿泥石片岩的矿物成分	35
3.1.4 绿泥石片岩的细观结构	37
3.1.5 绿泥石片岩的密度、含水率和孔隙率	39

3.1.6	绿泥石片岩的膨胀性测试	40
3.1.7	绿泥石片岩的渗透性	41
3.2	深埋绿泥石片岩力学特性及试验	44
3.2.1	干燥和饱和条件下绿泥石片岩单轴压缩力学特性试验	44
3.2.2	干燥和饱和条件下常规三轴压缩力学特性	47
3.2.3	干燥和饱和条件下完整岩样直剪力学特性	49
3.2.4	干燥和饱和条件下单裂隙面岩样直剪力学特性	51
3.2.5	充填水泥浆单裂隙面岩样直剪力学特性	54
3.2.6	干燥和饱和条件下完整岩样的三轴流变试验	57
3.2.7	饱和化学溶液条件下绿泥石片岩力学特性	61
3.2.8	软化机理分析	64
3.3	深埋层状软岩的力学特性及试验	64
3.3.1	试验目的及方案设计	65
3.3.2	岩样性质和制备	66
3.3.3	层状岩石常规压缩试验研究	68
3.3.4	层状岩石巴西劈裂试验研究	81
3.4	小结	82
第4章	深埋软岩力学模型	85
4.1	绿泥石片岩力学参数演化分析与力学模型	86
4.1.1	试验结果分析与初始屈服位置的确定	86
4.1.2	内变量的定义	88
4.1.3	强度参数演化	89
4.1.4	剪胀特性与流动法则	91
4.2	绿泥石片岩力学模型的数值验证	94
4.3	互层状粉细砂岩横观各向同性应变软化力学模型的建立	96
4.3.1	初始屈服位置选择和塑性内变量定义	96
4.3.2	应变软化规律	96
4.3.3	剪胀特性与流动法则	101
4.4	互层状粉细砂岩力学模型的数值验证	105
4.4.1	层状岩石本构关系	105
4.4.2	屈服准则和塑性势函数	105
4.4.3	数值计算流程设计	108
4.4.4	算例验证	109
4.5	互层状粉细砂岩力学参数敏感性分析	112
4.5.1	参数敏感性分析方法	112

4.5.2 数值计算模型的建立	113
4.5.3 模型参数对围岩变形的影响分析	114
4.6 小结	116
第5章 深埋软岩工程变形特性与稳定性分析	117
5.1 锦屏二级水电站绿泥石片岩洞段变形特征与评价	117
5.1.1 绿泥石片岩洞段工程问题概况	117
5.1.2 开挖与支护情况	118
5.1.3 绿泥石片岩洞段上层开挖后围岩位移及锚杆应力监测	119
5.1.4 绿泥石片岩洞段二次扩挖前物探测试	125
5.1.5 绿泥石片岩洞段围岩变形扫描	133
5.1.6 绿泥石片岩洞段变形程度的评价	136
5.1.7 绿泥石片岩洞段支护原则及对策	139
5.2 济宁三号井深埋层状围岩变形特征与稳定性分析	140
5.2.1 济宁三号井深埋层状围岩基本情况	140
5.2.2 监测方案设计	142
5.2.3 巷道围岩深部位移监测成果分析	144
5.2.4 深部巷道表面收敛变形监测成果分析	146
5.2.5 巷道围岩开挖稳定性数值分析	148
5.3 小结	160
第6章 深埋软岩工程稳定性控制技术与优化	161
6.1 深埋绿泥石片岩挤压变形洞段围岩力学参数分析	161
6.2 深埋绿泥石片岩隧洞挤压变形洞段加固方案的研究	163
6.2.1 支护加固原则	163
6.2.2 支护加固方案	164
6.2.3 方案计算结果及对比分析	169
6.3 绿泥石片岩洞段落底开挖方案研究	174
6.3.1 中等挤压变形洞段落底开挖方案分析	176
6.3.2 严重挤压变形洞段落底开挖方案分析	180
6.3.3 落底开挖方案的评价	182
6.3.4 落底开挖方案结论与建议	183
6.4 绿泥石片岩地层落底过程中变形速率控制问题	184
6.4.1 变形曲线的类型	184
6.4.2 变形速率控制方法	185
6.5 绿泥石片岩洞段重点工程灾害问题的分析处理	189
6.5.1 大塌方洞段扩挖及落底开挖风险分析及应对策略	189

6.5.2	软硬共存洞段扩挖及落底开挖稳定性分析	197
6.5.3	绿泥石片岩洞段扩挖对隧洞变形影响效应分析	203
6.6	绿泥石片岩洞段工程问题处理效果	214
6.7	小结	215
第7章	深埋软岩隧洞衬砌结构研究	217
7.1	绿泥石片岩流变力学特征和力学模型的选取	217
7.1.1	室内试验所反映出的岩石流变特征	217
7.1.2	现场监测曲线所反映出的围岩流变特征	218
7.1.3	绿泥石片岩流变力学模型研究	218
7.2	深埋软岩隧洞围岩流变参数反演	221
7.3	深埋软岩隧洞围岩安全性及衬砌结构分析	224
7.3.1	衬砌浇筑完成初期的受力情况	224
7.3.2	长期内水入渗条件下的衬砌安全性分析	228
7.3.3	考虑内水入渗岩体软化的衬砌及围岩安全性分析	232
7.4	小结	237
参考文献		239
彩图		

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

二十一世纪是一个革命性的时期,发展中国家特别是中国,土木工程建设的规模 and 水平都达到了前所未有的高度。然而,随着社会的不断发展,城市化水平逐渐提高,城市人口不断增加,人们对于能源的需求不断增大。能源枯竭等问题纳入人们视线,除了对煤炭类常规能源的发掘,各国已经开始寻找非常规能源,清洁可再生的水能资源开发受到前所未有的重视。中国是世界上富水量最多的国家之一,我国水电资源开发正以史无前例的速度开展,这已成为国家重大战略方向,是我国能源发展的重要战略方针和举措。同时,我国水资源分布极不平衡,西南和南方多水,洪涝灾害频发,北方却干旱缺水。为充分利用水资源,在维持生态平衡的基础上保障北方生产和生活用水,一系列大规模国家级和省级调水工程正在或将要实施。

我国水能资源主要分布在西南高山峡谷地区,水电站地下洞室、超长引水或输水工程等建设中常出现大量深埋软岩隧洞、高应力软岩地下厂房、调压室等,如锦屏二级水电站引水隧洞西端绿泥石片岩洞段埋深 1500m 以上,开挖过程中发生大变形,锦屏一级水电站地下厂房在高应力作用下出现弱岩深部破裂并持续变形的问題,滇池补水工程过断裂带软岩洞段出现大规模塌方等问题,与集中在相对较短时间内的岩爆破坏不同,软岩变形时间和过程长,可能从施工期一直持续到运行期,故软岩洞段经常成为整个工程的“瓶颈”问题,成为工程施工期的关键线路,往往需要多次返修,造成工期拖后,投资飙升。

除水利水电工程外,矿山工程也经常遭遇软岩问题。在我国能源结构中,煤炭仍然占据极其重要的地位,2003~2010 年各种能源在能源生产和消费总量中的平均比重中,原煤产量占能源生产总量的 76.4%,煤炭消费量占能源消费总量的 68.9%。然而随着能源需求量的增加和开采强度的不断加大,浅部资源日益减少,国内外矿山都相继进入深部资源开采阶段。国外一些主要产煤国家早在 20 世纪 60 年代就开始进入深井开采^[1~4]。1960 年前,联邦德国煤矿平均开采深度已经 650m,1987 年已将近 900m。苏联在 20 世纪 80 年代末煤炭产量就有一半以上来自地下 600m 以下深部区域。目前,我国已探明的煤炭资源中,埋深在 1000m 以下的约有 2.95 万亿 t,占煤炭资源总量的 53%^[5],我国煤矿开采深度以每年 8~

12m 的速度增加,而东部矿井正以 100~250m/(10a)的速度发展^[6]。近年已有一批煤矿进入深部开采,其中,沈阳采屯矿开采深度为 1197m、开滦赵各庄矿开采深度为 1159m、徐州张小楼矿开采深度为 1100m、北票冠山矿开采深度为 1059m、新汶孙村矿开采深度为 1055m、北京门头沟开采深度为 1008m、长广矿开采深度为 1000m。可以预计,在未来 20 年内我国很多煤矿开采深度将进入到 1000~1500m 的深度。煤矿软岩巷道底鼓、两帮内移等大变形问题日渐突出,巷道返修成为“常态”,造成开采困难和重大经济损失。霍州煤电集团李雅庄煤矿 2-501 工作面副巷 5012 巷道内发生了锚杆大面积破断现象,据统计,从 2-614 副巷口至 2-616 副巷口的 50m 范围内,锚杆共破断约 160 根,平均每米巷道要破断 3.2 根;锚索共破断(失效)约 20 根,部分地段因锚杆、锚索破断,导致顶板冒落。

此外,尽管金属矿山多为硬岩,然而也存在局部软岩出露,且由于金属矿山开采深度更大,一旦遭遇局部软岩,其正常开采将受到很大影响。目前,南非绝大多数金矿的开采深度在 1000m 以下。其中,安格鲁金矿(Anglogold)有限公司西部深井金矿的采矿深度达到 3700m,维特沃特斯兰德(West Driefountain)金矿矿体赋存于地下 600m,并且一直延伸至 6000m 以下。印度的科拉尔(Kolar)金矿区,已有三座金矿采深超过 2400m,其中,钱皮恩里夫金矿共开拓 112 个阶段,总深度达到 3260m。俄罗斯的克里沃罗格铁矿区,已有捷尔任斯基、基洛夫、共产国际等 8 座矿山采掘和准备巷道深度达到 910m,开拓巷道深度达到 1570m,预计未来可达到 2000~2500m。另外,加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山采深也超过 1000m。我国红透山铜矿目前开采已进入 900~1100m 深度,冬瓜山铜矿现已建成 2 条超 1000m 竖井来进行深部开采,弓长岭铁矿设计开拓水平 750m,距地表达 1000m,夹皮沟金矿二道沟坑口矿体延深至 1050m,湘西金矿开拓 38 个中段,垂深超过 850m。此外,还有寿王坟铜矿、凡口铅铋矿、金川镍矿、乳山金矿等许多矿山都将进行深部开采^[7]。

其他非煤矿山也存在软岩工程问题,开磷集团马路坪矿段随着开采向深部发展,地应力逐渐增大,高应力地段的巷道出现了严重的变形和破坏,如片帮、冒落、坍塌、底鼓等,在 800m 以下的深部,几周甚至数月内巷道无法正常运输,车辆无法通行,甚至进入都很困难。

实践表明,由于软岩自身物理力学特性和所处地质环境极其复杂,且深埋条件下软岩隧洞(道)或巷道开挖后力学响应的认识、围岩压力理论 and 支护设计理论尚不完善,导致软岩隧洞(道)或巷道在建设中常常处于被动局面,遭遇大规模塌方或大变形问题,给工程安全生产带来巨大挑战,造成不必要的人力、物力浪费。巷道掘进与维护费用是煤炭企业成本的重要组成部分。我国部分煤矿支护困难的巷道,经常需要翻修 3~4 次,巷道维修费用大大超过成巷费用,很多巷道因维护不当而报废,造成较大的经济损失,致使很多矿井连年亏损,巷道前掘后修,有

些矿山近一半的员工需要投入到巷道的维护中,煤炭生产陷于停顿、半停顿状态。据统计,一个年生产能力为 120 万 t 的软岩矿井,每年的巷道维护费用就高达一亿元以上,给煤矿企业增添了一笔沉重的经济负担。

因此,深埋软岩隧洞(道)或巷道变形力学机制及稳定性控制理论与技术是岩土科研工作者和生产建设者面临的一个急需解决的难题,此方面的研究具有十分重要的理论和工程意义。

由于隧洞、隧道和巷道结构形式类似,仅不同行业领域命名不同,为表述方便,书中统称为隧洞,除特殊行业因素外,本书所述理论均适用上述结构。

1.2 研究现状

国内外许多学者在深埋软岩的定义和分类、深埋软岩的变形破坏机理、岩石的力学试验和本构模型、软岩工程稳定性分析及控制方面做了很多卓有成效的工作,本节将对这些方面的研究成果分别进行综述。

1.2.1 深埋软岩的定义和分类

随着经济建设的高速发展,全球范围内资源需求量日益增大,煤炭等化石能源已逐渐转向深部开采。同时,近年来我国在水力发电领域也投入巨大,但大部分工程都位于西部,海拔较高,大量隧洞存在大埋深或高地应力问题,地质条件较为复杂。通常情况下,深部工程存在高地应力、涌水量大、地温较高等问题,极易造成突发性地质灾害,给工程建设带来了巨大挑战。

目前,国内外岩石力学与采矿界在“深部”、“深部工程”的界定上还没有统一的划分标准。通常认为,深部开采是由于矿床埋藏较深,而使生产过程出现一些在浅部矿床开采时很少遇到的技术难题的矿山开采。世界上有着深井开采历史的国家一般认为,当矿山开采深度超过 600m 即为深井开采,但对于南非、加拿大等采矿业发达的国家,矿井深度达到 800~1000m 才称为深井开采;德国将埋深超过 800~1000m 的矿井称为深井,将埋深超过 1200m 的矿井称为超深井开采;日本把深井的“临界深度”界定为 600m,而英国和波兰则将其界定为 750m。上述关于“深部”的概念均以具体的工程深度为指标进行定义,在工程应用中具有局限性。如有的工程岩体在所定义深度区间以上就会表现出深部所特有的非线性力学现象;而有的工程岩体处于所定义深度区间范围之内也未必会出现深部工程岩体的非线性力学现象。因此,何满潮^[8]针对深部工程所处的特殊地质力学环境,通过对深部工程岩体非线性力学特点的深入研究,建立了深部的概念体系。在该理论体系中,深部工程的概念为随着开采深度增加,工程岩体开始出现非线性力学现象的深度及其以下的深度区间。非线性力学现象是指软岩工程岩组的

非线性大变形现象和硬岩工程岩组的冲击地压、岩爆等非线性动力学现象。

国内学者对软岩的定义各异。我国煤炭系统于 1984 年召开过矿山压力名词专题讨论会,将软岩定义为“强度低、孔隙度大、胶结程度差,受构造切割面及风化影响显著或含有大量黏土矿物的松、散、软、弱岩层”^[9]。该定义尚缺乏流变性 & 高地应力情况。后来又出现了一些定义,如单轴抗压强度小于 20MPa、抗压强度与上覆岩层荷重(γh)之比小于 2 或等于 2、松动圈厚度大于或等于 1.5m 等^[10]。但是上述对于软岩的定义需结合起来考虑,那么内容就会太多太宽泛,不易于记忆和现场判断,特别是“松、散、软、弱”的定义,几乎囊括了除流沙以外的所有不良岩层。范秋雁^[11]进一步从两方面分别考虑,一方面是软岩的松、散、软、弱性质,另一方面是围岩变形和支护难度,他的定义为“地下空间开挖后产生流变、膨胀等显著时效变形且用常规支护困难的围岩”。郭志^[12]讨论了软岩成因的原生类型和次生类型,将其定义为变形大、强度低、赋存环境效应和时间效应强烈的岩体,他分析了软岩状态的易变性,并列出了部分软岩的崩解试验结果,概述了水、时间、温度对软岩力学性质的影响,并给出了泥岩力学性质与含水量的关系。林育梁^[13]对软岩定义为“工程环境各种因素下,呈软弱或松散破碎的自然性状,产生显著变形或流动的各种岩体”,并对软岩的分类进行了建议。

综合比较近些年对软岩定义的研究成果,主要有如下几种:

(1) 指标性定义,如国际岩石力学学会在 1990 年和 1993 年对软岩定义为“单轴抗压强度在 0.5~25MPa 的一类岩石”,还有部分学者定义软岩为“抗压强度与上覆岩层荷重(γh)之比小于 2 或等于 2 的一类岩石”。

(2) 描述性定义,如长春煤炭研究所总工程师陆家梁^[14]提出的概念是松软岩层是指松散、软弱的岩层,它是相对于坚硬岩层而言的;原煤炭工业部软岩分会郑雨天^[15]等认为软岩是指软弱、破碎、膨胀、流变、强风化及高应力岩体的总称;淮南矿业学院朱效嘉^[16]提出,松软、破碎、软弱、膨胀及风化等岩层称为松软岩层,简称软岩;1984 年冯豫^[17]在“煤矿矿山压力名词讨论会”上提出的定义为松软岩层是指强度低、孔隙度大、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。

(3) 工程性定义,如董方庭^[18]提出围岩松动圈大于 1.5m 的围岩为软岩;鹿守敏^[19]提出围岩松动圈大于 1.5m,并且用常规支护不能适用的围岩称为软岩;学术界有些学者认为松软岩层是指难支护的围岩或多次支护,需要重复翻修的围岩。

何满潮^[20]在充分研究前人关于软岩概念的基础上,提出了新的软岩概念及其分类体系。目前,最普遍的对软岩的定义分为地质软岩和工程软岩。

地质软岩是从地质学的角度对软岩的定义,是指单轴抗压强度小于 25MPa 的松散、破碎、软弱、受结构面切割及风化影响显著或含有膨胀性黏土矿物的一类岩体的总称。该类岩石多为泥岩、页岩、粉砂岩和泥质岩石等强度较低的岩石,是

天然形成的复杂的地质介质。国际岩石力学学会将软岩定义为单轴抗压强度在0.5~25MPa之间的一类岩石,其分类的依据基本上是强度指标。

该软岩定义用于工程实践中会出现矛盾。如巷道所处深度足够的小,地应力水平足够的低,则小于25MPa的岩石也不会产生软岩的特征。相反,大于25MPa的岩石,其工程部位足够深,地应力水平足够高,也可以产生软岩大变形、大地压和难支护现象。因此,地质软岩的定义不能用于工程实践,故何满潮提出了工程软岩的概念。

工程软岩是指在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体。如果说目前流行的软岩定义强调软岩的松、散、软、弱等低强度的特点,那么本定义不仅重视软岩的强度特性,而且强调软岩所承受的工程力荷载的大小,强调从软岩的强度和工程力荷载的对立统一关系中分析、把握软岩的相对性实质。

该定义的主题词是工程力、显著塑性变形和工程岩体。工程岩体是软岩工程研究的主要对象,也是巷道、隧洞、边坡、基坑开挖扰动影响范围之内的岩体,包含岩块、结构面及其空间组合特征;工程力是指作用在工程岩体上的力的总和,它可以是重力、构造残余应力、水的作用力和工程扰动力以及膨胀应力等;显著塑性变形是指以塑性变形为主体的变形量超过了工程设计的允许变形值并影响了工程的正常使用,其包含塑性变形、黏塑性变形,连续性变形和非连续性变形等。此定义揭示了软岩的相对性实质,即取决于工程力与岩体强度的相互关系。当工程力一定时,不同岩体,强度高于工程力水平的大多表现为硬岩的力学特性,强度低于工程力水平的则可能表现为软岩的力学特性;而对同种岩石,在较低工程力的作用下,则表现为硬岩的变形特性;在较高工程力的作用下,则可能表现为软岩的变形特性。

1.2.2 深埋软岩的变形破坏机理

深埋软岩变形破坏机理主要有深部软岩水力作用机理、深部含结构面软岩非对称大变形机理^[21~23]、深部软岩岩爆机理^[24~26]、高温高湿环境引起深部岩体软化大变形机理^[27]、耦合作用下深部软岩气体运移规律等。

深部软岩吸水膨胀变形是导致深部工程围岩发生大变形的主要原因之一。针对软岩中的黏土矿物成分吸水膨胀大变形导致的巷道塌方灾害,He等^[21,22]利用软岩吸附超级计算系统进行了软岩吸附量子力学研究,结果表明软岩组分中蒙脱石、高岭石等黏土矿物的内部结构(电子结构、能带结构)缺陷导致替代元素与被替代元素之间出现价电子数目的差异,使其产生负电性,具有较强的水分子吸附能量。巷道开挖后由于力学和物化条件改变,引发了软岩内部产生巨大的膨胀能,从而具有很强的破坏性。在此基础上,周莉等^[23]利用自主研发的深部软岩水力作用系列实验系统,进行了软岩与水相互吸附作用实验研究,揭示了工程岩体

吸水量随时间增加,强度随时间衰减,而导致大变形塌方的规律,为深部软岩工程稳定性控制提供了依据。

研究表明,受地应力场方向、岩层产状、岩体结构的不对称等因素影响,造成深部软岩隧洞围岩由于结构效应而产生非对称变形,使得常规对称支护无法控制。由于现场观察到的是围岩最终变形破坏状态,而最先破坏的关键部位无法确定,从而难以确定支护重点,影响支护效果。针对深部软岩含结构面层状碎裂结构的岩体大变形破坏导致的巷道塌方灾害,中国矿业大学研发了软岩巷道破坏结构效应物理模型实验系统,进行了不同工程地质条件下巷道开挖破坏过程的模拟试验。试验结果表明,岩体及岩层结构面是引起巷道围岩强度降低、产生非对称大变形破坏的主要原因,对于结构面的控制是非对称支护设计的关键,为控制深部软岩结构大变形破坏提供了设计依据。

针对深井开采高温、高湿环境引起围岩软化大变形导致的巷道塌方灾害,何满潮等^[27]对围岩在常温、低湿到高温、高湿环境下的力学特性进行了实验研究,揭示了高温、高湿环境易导致围岩软化大变形、强度衰减而发生破坏的规律,得出了深井高温、高湿环境的控制是深部环境效应引起围岩软化大变形控制的关键的重要结论。

1.2.3 软岩力学试验方法

岩石力学是固体力学的一个分支,对岩石力学的研究比金属等材料力学起步晚,因此,岩石力学中很多理论框架都是从金属等材料力学的研究成果中借鉴过来的。然而,由于岩石材料结构的特殊性和复杂性,其力学响应与金属等材料存在很大差异^[28];另外,岩石材料所处的外界环境条件,即地应力、温度和水等对其力学性质影响也比较大。为了研究岩石的变形破坏特性,许多学者从不同角度、利用不同试验方法和设备开展了大量试验工作,这些研究成果为岩石本构模型的研究提供了基础。

1. 常规三轴压缩试验

常规三轴压缩试验是岩石力学基础试验。试验中,一般是将圆柱形岩样放置在液压室中,通过液压油对岩样施加静水压力,进行轴向压缩。

岩石在常规三轴应力路径下的力学行为具有如下主要特征^[29]:

(1) 围压对岩石力学行为的影响较大。对于所有围压水平下的加载过程,在一段线性部分后,应力-应变曲线表现出非线性的力学行为。

(2) 岩石峰值应力随着围压的升高而增大。

(3) 随着围压的升高,岩石变形能力增强,应力-应变曲线逐渐上升并且坡度减缓。

(4) 随着围压的升高,岩石的破坏方式由脆性向延性过渡,在围压较低的情况下,应力-应变曲线在峰值后急剧下降,表现为脆性,而在围压较高的情况下,应变软化不再出现,表现为延性。

在加载过程中,体积变形的演化通常是另一个重要现象。三轴压缩应力条件下,在静水压力和偏压较小的加载阶段,通常可以观察到体积压缩(全部或部分初始裂纹和孔隙的闭合引起体积变形压缩);然而,随着轴向应力的增加,体积变形发展趋势逐渐由压缩向膨胀转化。这种体积膨胀主要由微裂纹的萌生和发展引起,这是岩石力学行为的一个重要特征。

2. 渗流-应力耦合试验

研究裂隙岩体中的渗流特征可以通过对裂隙岩体进行室内渗透试验,以测试各种状态下裂隙岩体的渗流特征。人们最初是通过三轴压缩和剪切试验来研究岩石峰值前后的渗透率变化规律。Zhu 等^[30]、Zoback 等^[31]发现当应力增加导致岩石破裂膨胀时,将引起渗透性的提高,而应力增加导致岩石压缩变形或峰值后的破裂带重新压缩时,将引起渗透性的降低。在国内,李世平^[32,33]、张金才等^[34]、李树刚等^[35]、姜振泉等^[36]、王金安等^[37]、韩宝平等^[38]也对应力-渗流进行了类似的试验研究。

由于单裂隙的渗流特性研究是研究复杂裂隙岩体的基础,只有对单裂隙的渗流特性进行深入了解,才能对裂隙岩体作出进一步研究。因此,单裂隙面渗流-应力耦合特性研究是裂隙岩体渗流场和应力场耦合分析研究的基础和关键环节^[39]。

单裂隙试验中最著名的是裂隙水流立方定律试验,立方定律也是岩体裂隙渗流的基本理论。立方定律描述的渗流规律是以裂隙面光滑、平直且无任何充填为前提的,与天然裂隙面的实际情况并不吻合。因此,许多学者进行了修正,Lomize^[40]、Louis^[41]、Amadei^[42]等通过仿天然裂隙的试验研究,对立方定理进行了修正。周创兵^[43]提出了广义立方定律,能较好反映裂隙渗流特性。

3. 细观力学试验

为了研究岩石类材料的微细观破坏过程和机制,人们发展了各种试验手段和技术,目前运用较多的有:X 射线(X-ray)技术、与 X 射线相结合的 CT(computer tomography)技术、扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)技术等。

X 射线技术的飞速发展,使人们能够对岩石类材料的微细观结构进行深入的认识和理解。目前,X 射线技术已被用于混凝土试样断裂过程的试验研究,并观察到了微裂纹的形成、扩展、空洞萌生和晶体位错等微细观损伤过程。

与 X 射线相结合的 CT 技术是以计算机为基础对测体断层中某种特性进行定量描述的专门技术,它首先被应用于医学诊断中,近年来受到岩土力学界的广

泛关注。1986年日本京都大学寺田等人首先研制成功了室内受压岩样的弹性波CT机^[44],并用该机对受压岩样内部微裂纹发展过程进行了研究^[45]。杨更社等^[46,47]和Kawakata等^[48]利用CT扫描对岩石的初始细观损伤特性进行了试验研究。杨更社等^[49~51]对岩石的损伤扩展进行了CT定量分析。葛修润等^[52]进行了三轴和单轴载荷下煤岩破坏全过程的即时动态CT试验,并引入了初始损伤影响因子,定义了一个基于CT数的损伤变量。陈蕴生等^[53]利用CT图像灰度值均值和灰度分布随应力变化规律分析了细观损伤演化过程和机理。葛修润等^[54]进行了岩石疲劳损伤演化的CT细观试验,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。曹广祝等^[55]通过螺旋CT机以及与其配套的实时三轴加载和渗透压力设备对砂岩进行了各种应力状态下的应变特性试验。

自从Sprunt等^[56]将扫描电镜技术引入到岩石细观结构研究领域以来,已有许多研究成果相继发表。凌建明等^[57,58]利用微加载装置进行了岩石材料在电镜下的即时加载观测。赵永红等^[59,60]对含有预制缺陷的大理岩平板进行了单轴压缩试验,观测并记录了试件表面微破裂的孕育过程,研究了微裂纹扩展与外载大小和方向之间的关系。孙钧等^[61]通过扫描电镜下的一系列加载试验,对三峡花岗岩的细观损伤特性进行了研究。吴立新等^[62]进行了中硬肥煤与坚硬无烟煤的即时压缩扫描电镜损伤扩展规律研究。尚嘉兰等^[63]对单轴压缩状态下香港花岗岩和湖北黄石大理岩试样的微裂纹萌生、扩展、贯通直至破坏的过程进行了试验研究,分析了岩石的细观破坏机制和细观损伤与宏观力学行为之间的对应关系。肖洪天等^[64]研究了岩石微裂纹的闭合、滑移、扩展以及相互作用过程,并给出了微裂纹扩展在各阶段引起的宏观变形。朱珍德等^[65]对高围压高水压下大理岩破坏断裂断口进行了电镜扫描试验。

1.2.4 软岩力学本构模型

为了描述岩石在复杂应力环境中的力学行为,在分析试验结果的基础上,人们基于不同力学理论提出了多种本构模型。本节将对以往的力学模型进行简单回顾。

1. 弹塑性模型

不考虑时间和温度效应,英国科学家Hooke最早发现了材料的变形与引起变形的力成正比,称之为Hooke定律,基于此定律提出的材料应力-应变关系即线弹性本构模型。在应力水平不高时,岩石会表现出弹性响应,此时,Hooke定律是适用的。

孙广忠^[66]和Hoek等^[67]的研究认为,在低应力条件下的完整岩体和高应力条件下完整和裂隙发育完全的岩体可以用连续介质力学方法来处理。而连续介质