

国家自然科学基金项目(50474029)资助
国家自然科学基金项目(51474218)资助

岩石流变扰动力学效应及 试验装备研究

崔希海 王于琳 李进兰 李振东 邹爱英 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(50474029)资助

国家自然科学基金项目(51474218)资助

岩石流变扰动力学效应 及试验装备研究

崔希海 王于琳 李进兰 李振东 邹爱英 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了作者近几年在岩石流变扰动力学效应及试验装备研究方面所取得的成果与进展。全书共 11 章, 主要包括: 岩石流变扰动效应试验装备的研制、流变扰动效应试验装备的刚度和测量精度分析、岩石单轴压缩蠕变及其扰动效应试验研究、岩石三轴压缩蠕变及扰动效应试验研究、岩石三轴压缩蠕变扰动效应与损伤本构关系研究、岩石蠕变微观破坏 CT 试验、低围压条件下的岩石流变及其扰动效应试验研究、强度峰值后区软化岩石变形及扰动效应研究等。

本书可供岩土工程、采矿工程、隧道工程、工程地质和岩石力学、试验装备开发与制造等研究领域的工程技术人员、科研工作者及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石流变扰动力学效应及试验装备研究/崔希海等著.

徐州: 中国矿业大学出版社, 2015. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2772 - 0

I. ①岩… II. ①崔… III. ①岩体流变学—扰动—力学—研究②岩体流变学—扰动—力学—试验设备—研究
IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 180775 号

书 名 岩石流变扰动力学效应及试验装备研究

著 者 崔希海 王于琳 李进兰 李振东 邹爱英

责任编辑 李 敬 郭 玉

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 11.5 字数 219 千字

版次印次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

前 言

国内外矿产资源的开发已推进到地层深部,20 世纪 90 年代之后,许多矿井的开采深度超过了 1 000 m。前苏联的顿巴斯煤矿采深达到 1 200 m;俄罗斯的煤矿采深已达到 1 400 m;德国煤矿的最大采深达到 1 450 m;比利时的煤矿采深达到 1 415 m;英国的煤矿达到 1 200 m;波兰的煤矿达到 1 100 m。我国的许多煤矿的采深也超过了 1 000 m:沈阳彩龙煤矿采深 1 197 m;开滦集团赵各庄煤矿采深 1 154 m;北票冠山煤矿采深 1 059 m;新汶孙村煤矿采深 1 055 m。另外,我国新探明的煤矿储量有许多深埋在 1 000 m 以下,正在开采的一些新矿井(如兖州煤田的古城煤矿、田庄煤矿等)的开采深度也达到 1 000 m 左右。还有许多矿井虽然采深不大,但煤系岩石特别松软,如龙口矿业集团的北皂、梁家和洼里等煤矿,虽然采深只有 250~400 m 不等,但其巷道和顶板的围岩特别松软,而且极易风化和水解,是典型的软岩巷道。深井巷道、软岩巷道的岩石除了受到高的应力作用外,还受到开采、掘进和运输过程中产生的扰动载荷作用,变形量较大,尤其受扰动影响后会产生更大变形,且变形速度大,稳定性差,支护困难,支护成本高,甚至会造成重大安全事故,已成为困扰生产的技术难题。

这类受扰动载荷的深井巷道和软岩巷道围岩的受力变形的特点是:① 处于接近岩石极限强度的高应力状态,巷道围岩浅部的变形超过了峰值极限强度对应的极限变形,受到扰动载荷时处于极不稳定的变形状态。② 巷道的蠕变收敛量大,变形速度快。如山东龙口柳海煤矿的软岩巷道,断面收敛速度达到每天几十到 200 mm,底鼓量最大达每天近 700 mm。③ 围岩变形对扰动载荷作用极为敏感。如龙矿集团梁家煤矿两平行巷道施工中,第一条巷道施工完成并经过锚喷等支护后,在掘进第二条巷道产生的扰动载荷扰动影响下,第一条巷道就发生大变形与破坏,往往需要进行第二次支护和维修。

研究深井及软岩巷道围岩变形对扰动载荷作用敏感现象的机理发现,当岩石的应力状态接近其强度极限或岩石经过“变形软化”时就会对外部扰动作用变得十分敏感,因此,提出了“岩石流变扰动力学效应”的概念和理论。只有研究清楚“岩石流变扰动力学效应”这一理论问题,才能更科学地进行深井软岩巷道的支护设计。

过去一个时期,岩体流变力学得到了长足发展,形成了一套适于研究岩体流

变的现场观测、室内实验和理论数值模拟分析的体系。在这一发展过程中,岩石试样的实验室流变试验受到研究者的高度重视。从 20 世纪初,F. Adams(1912 年)和 R. Boker(1915 年)等人发表了高压、三轴实验的结果,这些成果中的技术开始成为人们认识岩石试样变形规律的重要手段。从 20 世纪 30 年代至今,D. T. Griggs(1965 年)、J. Handing (1957 年)、H. C. Heard^[8](1982 年)和 M. S. Paterson^[9](1970 年)等人,以及我国的许多科研单位如中国科学院武汉岩土力学研究所、中国地震局地球物理研究所、中国矿业大学、辽宁工程技术大学、同济大学等,先后研发了不同类型的三轴流变实验装置,使人们研究复杂应力状态下的岩石的流变成为可能,但现有研究较少关注到“扰动载荷”对岩石流变的影响,更没有开展“强度峰值后变形软化岩石”在载荷和扰动载荷共同作用下变形规律的研究。

要研究岩石流变扰动力学效应,就必须进行岩石流变扰动力学效应的试验测试;要进行岩石流变扰动力学效应的试验测试,就需要研制相应的试验仪器和设备,现有的一些大型设备如 MTS 试验机能承担部分试验,但设备价格昂贵、试验成本过高且不能长时间对试件加载。基于这一思路和设备现状,开展了“岩石流变扰动力学效应及试验装备研究”课题的研究。课题的研究工作获得了国家自然科学基金资助,项目名称“岩石在强度极限邻域内的扰动蠕变特性试验研究”,项目编号:50474029,起止时间为 2005 年 1 月至 2007 年 12 月;课题也为国家自然科学基金项目“钢管混凝土圆弧拱中性层偏移规律与弯曲破坏机理试验研究”(批准号:51474218)做了前期的理论研究,研究成果获得了相应的国家专利。本书是作者从事“岩石流变扰动力学效应及试验装备研究”课题的研究、承担和参与国家自然科学基金项目“岩石在强度极限邻域内的扰动蠕变特性试验研究”等研究工作成果的集中反映,主要论述了岩石流变扰动力学效应试验装备的研发和成果、岩石流变扰动力学效应试验方法和试验研究成果。

本书由 11 章内容构成:第 1 章为绪论,介绍了“岩石流变扰动力学效应及试验装备研究”课题的研究背景和研究现状;第 2 章介绍了岩石流变扰动力学效应试验装备的研制;第 3 章介绍了岩石流变扰动力学效应试验装备的刚度和测量精度分析;第 4 章介绍了岩石单轴压缩蠕变及其扰动效应试验过程和研究的成果;第 5 章介绍了岩石三轴压缩蠕变试验方法和研究的成果;第 6 章介绍了岩石三轴蠕变扰动效应试验方法、试验过程和研究成果;第 7 章介绍了岩石三轴压缩蠕变扰动效应与损伤本构关系方面的研究成果;第 8 章介绍了岩石蠕变微观破坏 CT 试验设备和试验获得的岩石蠕变微观破坏 CT 图片,并对图片做了损伤力学分析;第 9 章介绍了低围压条件下的岩石流变及其扰动效应试验研究成果;第 10 章介绍了强度峰值后区软化岩石变形及扰动效应试验研究设备、方法和成

果;第 11 章对整篇著作的主要成果进行了总结和展望。尽量使本著作成为内容完整、逻辑严密、文理通顺的专著。

本著作的研究成果和整篇书稿主要由山东科技大学崔希海主持并带领团队完成。美国德州理工大学(Texas Tech University)人机工程学(Human Factor)博士王于琳女士承担了试验装备的部分研制工作;山东科技大学李进兰和邹爱英两位高级实验师参加了具体试验工作;潍坊科技学院的李振东同志承担了部分试验数据的处理工作。上述科研人员都为本著作的出版作出了贡献。

在将本著作奉献给广大同仁之际,我要感谢中国矿业大学北京校区高延法教授的热忱指导,感谢山东科技大学刘承论教授、肖洪天教授在学术思想上予以的启迪,感谢山东农业大学范庆忠副教授、王素华副教授以及山东科技大学牛学良副教授的有益探讨与无私帮助,在书中也引用了景德镇陶瓷学院傅志亮副教授的部分研究成果,在此一并表示感谢!正是由于大家的支持才使得本书以今天良好的面貌与广大读者见面。

由于作者水平和研究时间所限,错误和不妥之处在所难免,请读者不吝赐教和批评指正。

崔希海谨识

2014 年 11 月于泰安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的提出	1
1.2 课题的国内外研究现状	2
1.3 课题的研究内容与研究方法	5
第 2 章 岩石流变扰动动力学效应试验装备的研制	7
2.1 岩石流变扰动效应试验装备研制的目的与要求	7
2.2 岩石流变扰动效应试验装备的结构设计	7
2.3 试验装备配套三轴压力箱的结构设计	17
2.4 扰动加载及测量系统的设计选型	19
2.5 本章小结	21
第 3 章 流变扰动效应试验装备的刚度和测量精度分析	22
3.1 岩石试件不发生爆裂的条件及实现的方法	22
3.2 扰动流变试验装备的刚度分析	24
3.3 试验系统测量精度分析	27
3.4 本章小结	30
第 4 章 岩石单轴压缩蠕变及其扰动效应试验研究	32
4.1 岩石蠕变及其扰动效应概述	32
4.2 岩石单轴压缩流变试验方法	33
4.3 岩石单轴压缩流变试验结果与分析	37
4.4 岩石单轴压缩蠕变扰动效应试验方法	45
4.5 岩石单轴压缩蠕变扰动效应试验结果及其分析	47
4.6 岩石单轴压缩蠕变扰动效应的本构方程	51
4.7 本章小结	54

第 5 章 岩石三轴压缩蠕变试验研究	56
5.1 岩石流变试验设备与试验方法	56
5.2 岩石三轴压缩蠕变试验	61
5.3 低围压条件下的三轴蠕变试验研究	65
5.4 本章小结	74
第 6 章 岩石三轴蠕变扰动效应试验研究	75
6.1 岩石三轴蠕变扰动效应试验方法	75
6.2 试验结果及分析	78
6.3 岩石扰动蠕变效应的损伤方程	87
6.4 本章小结	88
第 7 章 岩石三轴压缩蠕变扰动效应与损伤本构关系研究	90
7.1 低围压条件下的岩石三轴剪切蠕变破坏	90
7.2 低围压对软岩力学特性的影响	96
7.3 岩石蠕变扰动效应与损伤的本构关系	98
7.4 本章小结	100
第 8 章 岩石蠕变微观破坏 CT 试验	101
8.1 蠕变损伤微观本构方程	101
8.2 岩石蠕变 CT 扫描试验	105
8.3 岩石在扰动载荷条件下的蠕变微破裂试验	121
8.4 本章小结	123
第 9 章 低围压条件下的岩石流变及其扰动效应试验研究	125
9.1 低围压条件下的岩石流变试验	125
9.2 围压对蠕变参数的影响	131
9.3 低围压条件下的岩石蠕变扰动效应试验	136
9.4 低围压条件下岩石流变扰动效应的本构关系	140
9.5 本章小结	143

第 10 章 强度峰值后区软化岩石变形及扰动效应研究	144
10.1 试验方法	144
10.2 软化岩石单轴压缩试验结果及分析	146
10.3 围压对应变软化岩石变形影响研究	148
10.4 低围压条件下应变软化岩石变形扰动效应研究	149
10.5 爆破扰动载荷应变软化岩石变形扰动效应研究	155
10.6 软化岩石变形扰动效应试验结果综合分析	158
10.7 本章小结	158
第 11 章 主要研究成果与结论	160
主要参考文献	163

第1章 绪 论

1.1 课题的提出

国内外矿产资源的开发已经推进到地层深部,煤炭及其他矿产资源的井工开采深度越来越大,进入20世纪90年代之后,许多矿井的开采深度超过了1 000 m。前苏联的顿巴斯煤矿的开采深度达到1 200 m;俄罗斯的一些煤矿采深已达到1 400 m;德国煤矿的最大采深达到1 450 m;比利时的煤矿采深达到1 415 m;英国的煤矿达到1 200 m;波兰的煤矿达到1 100 m。我国的统配煤矿的平均深度大约是450 m,也有许多煤矿开采深度超过了1 000 m,如沈阳彩龙煤矿采深1 197 m,开滦集团赵各庄煤矿采深1 154 m,北票冠山煤矿采深1 059 m,新汶孙村煤矿采深1 055 m。另外,我国新探明的煤矿储量有许多深埋在1 000 m以下,正在开采的一些新矿井(如兖州煤田的古城煤矿、田庄煤矿等)的开采深度也达到1 000 m左右。除了上述采深特别大的矿井之外,还有许多矿井虽然开采深度不大,但其煤系地层岩石特性特别松软,如龙口矿业集团的北皂、梁家和洼里等煤矿,虽然其采深只有250~400 m不等,但其巷道和顶板的围岩特别松软,而且极易风化和水解,是典型的软岩巷道。同样,在交通水利基础工程建设中也会遇到一些软岩隧道、硐室等。上述这些深井中的巷道、软岩巷道等,变形量较大,尤其是受扰动影响后会产生更大变形,稳定性差,支护困难,支护成本高,甚至会造成重大安全事故。这些问题已成为困扰煤矿生产的重大技术难题。

上述深井巷道、软岩巷道围岩的受力变形具有如下共同特点:

(1) 岩石一般处于接近其极限强度的高应力状态,其中巷道围岩浅部的变形往往超过了峰值极限强度所对应的极限变形,其变形处于极不稳定的状态。

(2) 这类巷道的蠕变收敛量大,且变形速度快。如山东龙口柳海煤矿的软岩巷道,其断面收敛速度达到每天几十到200 mm;底鼓量最大达到每天近700 mm。

(3) 巷道变形对抗动载荷作用极为敏感。如龙口矿业集团梁家煤矿两平行

巷道施工中,第一条巷道施工完成并经过锚喷等支护后,掘进施工第二条巷道时,在第二条巷道施工载荷扰动影响下,第一条巷道发生了与之对应大变形与破坏,这样就不得不对第一条巷道进行二次支护和维修。

正是由于上述受力变形特点,深井巷道、软岩巷道的支护变得十分困难,支护成本及维护费用也相当高,这已成为困扰矿业生产的重要技术难题。深井软岩巷道变形对扰动作用敏感这一工程技术难题的本质是当岩石的应力状态接近其强度极限时就会对外部扰动作用变得十分敏感,因此,提出了“岩石流变扰动动力学效应”的概念。只有搞清了“岩石流变扰动动力学效应”这一理论问题,才能更科学地进行深井软岩巷道支护的支护设计。

要研究岩石流变扰动效应,就必须进行岩石流变试验测试;要进行岩石流变试验测试,就必须有相应的试验仪器。基于这一思路,确定了研究课题“岩石流变扰动动力学效应及试验装备研究”。课题的研究工作获得了国家自然科学基金资助,项目名称“岩石在强度极限邻域内的扰动蠕变特性试验研究”,项目编号:50474029,起止时间为2005年1月至2007年12月;课题也为国家自然科学基金项目“钢管混凝土圆弧拱中性层偏移规律与弯曲破坏机理试验研究”(批准号:51474218)做了前期的理论研究。

1.2 课题的国内外研究现状

“岩石流变扰动效应”属于岩石流变力学的范畴,它反映了处于流变状态的岩石在扰动载荷作用下的流变规律,应该是岩石流变学一个新的研究方向。关于材料流变现象的观察和研究可以追溯到19世纪30年代,人们发现某些材料具有经典固体力学理论无法解释的与时间有关的力学特性:1835年Weber研究抽丝时发现弹性后效现象^[1];1865年Thomson发现锌具有黏性性质,其内部阻力与变形速度不成比例^[2];两年后,Maxwell进一步指出:所有物体的黏性现象都可用一个一阶线性微分方程来描述,并提出了应力松弛的概念^[3];1874年Boltzmann发展了线黏弹性理论,建立了适用于线黏弹性范畴的叠加原理^[4];到20世纪的1910年,C. Andrade等在进行等载荷单轴实验时,观察到材料的蠕变全过程,提出蠕变三阶段的概念;到1916年E. C. Bingham首次提出流变学理论^[5]。

我国的许多著名学者也对岩石流变的发展作出了巨大贡献。李四光根据岩体蠕变现象研究了地壳运动规律^[6];陈宗基从宏观和微观两个方面先后提出了黏土的流变本构方程、二次时间效应和光架结构理论;刘颖研究了黄土流变学^[7]。

随着现代科学技术的不断发展,岩体流变力学也得到了长足发展,逐渐形成了一套适合于研究岩体流变的现场观测、室内实验和理论数值模拟分析的体系。在这一发展过程中,岩石试样的实验室流变试验受到研究者的高度重视。从20世纪初,F. Adams(1912年)和 R. Boker(1915年)等人发表了高压、三轴实验的结果,这些成果中的技术开始成为人们认识岩石试样变形规律的重要手段。从20世纪30年代至今,D. T. Griggs(1965年)、J. Handing(1957年)、H. C. Heard^[8](1982年)和 M. S. Paterson^[9](1970年)等人,以及我国的许多科研单位如中国科学院武汉岩土力学研究所、中国地震局地球物理研究所、中国矿业大学、辽宁工程技术大学、同济大学等,先后研发了不同类型的三轴流变实验装置,使人们研究复杂应力状态下的岩石的流变成为可能。

流变实验按加载方式有:①等应变率加载实验;②等应力蠕变实验;③等应变松弛实验。应变率的控制从开始的人工控制、螺栓加载控制发展到电液伺服控制。测量和读数方式由人工测读逐步发展到模数转换测读和计算机自动测读及记录数据。

流变力学试验按对试样的作用方式又可分为压缩变形实验、剪切变形实验、弯曲蠕变和扭转蠕变实验。目前科研院所和大专院校采用变动应力的梯级加载实验和变动应力途径的实验来研究岩石的流变特性。

人们在研究岩石宏观流变特性的同时,也注重和开展了岩石的微观流变机制的研究。使用偏光显微镜和计算机图像处理系统对岩石晶粒优选方位、晶粒形态、滑移系和微破裂进行统计测定;采用浸蚀技术还可以观察变形岩石的位错状态;用扫描电镜可对岩石表面的微颗粒、微破裂的形态和其他结构进行分析;电子探针的使用,使定量分析晶格扩散组分和扩散蠕变条件成为可能。

在岩石流变理论研究方面,国内外学者做了大量的工作。用于解释岩石微观流变机制的有化学键理论、破裂理论、摩擦理论和微缺陷理论。微缺陷理论认为岩石类材料的流变性质在一定程度上取决于微观线缺陷和面缺陷,而这些缺陷随应力变化而运动。解释岩石材料达到稳态蠕变前的瞬态蠕变理论有 Cottrell 的消耗理论^[10]和 Andrade 的蠕变理论;解释稳态蠕变的则有 Ovovan 理论和 Mott 与 Weerman 的回复理论^[11]。

按照岩石蠕变特征,可将岩石蠕变划为脆性蠕变、脆延性蠕变和延性蠕变。脆性蠕变是指岩石在脆性域内产生的与时间相关的变形、压实、扩容和沿断层产生的蠕滑等非线性变形过程。R. L. Kranze 的实验指出,脆性蠕变是指常温和高差应力作用下产生的一种相对快速的变形过程,常由瞬态蠕变阶段很快过渡到加速蠕变阶段。脆性蠕变过程对压力敏感,其起因是微观破裂扩展引起的岩

石宏观错断。F. A. Topponnier 和 Brace 采用扫描电镜和声发射技术研究观察了岩石的蠕变过程后指出:低应力作用下的脆性蠕变与微裂纹稳定传播过程有关,但高应力作用下则转变为一种非稳定的裂纹传播扩展过程^[12]。基于这一观点可用体积扩容模式解释和预测岩石脆性蠕变机制和破裂时间。

脆延性蠕变是指岩石宏观变形介于延性流动和脆性破裂之间,并与时间、不同尺度的破裂局部延性流动有关的变形过程。脆延性蠕变对湿度、温度、围压、应变速率、岩石组分都有较强的依存性。关于岩石的脆延性蠕变行为,Paterson、秋本俊一和 Poirier 曾提出过几何软化、结构软化、应变软化等模式^[12-15]。Paterson 又从岩石变形脆延性转变的物理基础提出了岩石的破碎流动和延性过程共同作用引起半脆性蠕变的机理^[16]。在应力场作用下,应变速率的突然增加会使岩石发生脆延性转变,甚至导致岩石的突发性破坏。

岩石的延性蠕变是指延性域中与时间相关的流动变形。延性蠕变主要是以滑移和碎裂流动的形式进行的,当围压增大,达到屈服的微颗粒越来越多,由微颗粒内的滑移提供的应变速率也在增加,微破裂的产生逐渐减少和趋于均匀,密度增加,剪切破坏向碎裂流动过渡,在这些颗粒内部更多的滑移系上将产生屈服,直到在足够多的颗粒内有足够的滑移系都活动起来以满足颗粒间应变相容性条件为止。在这种情况下,颗粒间潜在的不协调,将由微裂隙的相对运动来调节。应变速率越低越容易发生延性蠕变行为。

由于流变行为的不同类型,人们不断地去寻求和建立起不同的理论模型。首先建立起的是描述岩石宏观力学性质、蠕变行为和松弛现象的本构关系,M. Reiner^[17]将此称为宏观流变学。后来又建立了描述岩石复杂力学行为的多元组合模型,Jaeger^[18]认为这种多元组合模型可反映岩石的松弛和滞后特征。Z. Sobotkal^[19]以及袁龙蔚^[20]等在多元组合模型基础上提出了多个上述多元模型组合的谱模型理论,用以描述岩体的复杂流变过程。

人们在研究的过程中也认识到岩石的流变行为是微观世界中的许多复杂过程中的一种综合反应。这就诱使许多科学研究人员从微观世界的物理本质建立宏观的蠕变本构关系,如依据位错理论建立的 Orowan 方程和由反应速率理论建立的 Weertman 方程等。后来人们也研究流动、微破裂和摩擦滑移三者之间的相互关系,E. Rabinowicz 和曾田范宗在摩擦机制的研究中发现接触部塑性流动或破裂对摩擦起控制作用。L. M. Kachanov 研究了蠕变破裂现象。袁龙蔚提出了流变断裂学的观点^[21]。王绳祖指出了岩石流变行为中的流动、微破裂和摩擦滑动三种现象共存的事实^[22,23]。

20 世纪 70 年代以来,Valanis^[24,25]、Bazant^[26,27]等基于唯象学观念,设定一些描述基本状态的内变量,提出了内时本构理论。该理论避开了屈服准则

和正交法则等一系列经典固体力学的概念和方法,可直接描述岩石的变形过程。

在研究岩石流变试验和本构理论的同时,计算岩石力学也在飞速发展。有限元、边界元、有限差分、神经网络、混沌学等都被应用到岩石流变数值分析中。一些商品的分析计算软件如 ANSYS、Flanc、3D- σ 等也获得广泛的应用,取得较好的应用效果。

虽然在岩石流变、蠕变的试验研究和本构关系的研究方面取得了上述较大的成就,但纵观研究的过程、方法和取得的成果,以前的研究方法和成果尚存在如下一些问题:

(1) 流变试验方法中,尚缺乏关于扰动作用对流变影响的研究,而在岩体工程中存在着扰动作用下的岩石蠕变问题。

(2) 由于试验加载系统的限制,测定蠕变数据的试验时间一般比较短,不能描述岩石完整的蠕变过程。

(3) 岩石流变本构关系中没有考虑和涉及描述扰动的变量,也就无法描述岩石蠕变的扰动效应。

1.3 课题的研究内容与研究方法

1.3.1 主要研究内容

(1) 设计研制出“岩石流变扰动效应试验装备”及相配套的“三轴压力箱”。

(2) 进行岩石单轴压缩蠕变及其扰动效应试验,建立岩石单轴压缩蠕变扰动效应的本构方程。

(3) 进行低围压条件下的岩石蠕变及其扰动效应试验,建立低围压条件下岩石蠕变扰动效应的本构关系。

(4) 进行“强度极限后区应变软化岩石”在“单轴”和“低围压条件”下的变形及其扰动效应试验研究。

(5) 岩石三轴压缩蠕变扰动效应与损伤本构关系研究。

(6) 岩石蠕变微观破坏 CT 实验。

1.3.2 研究方法和技术路线

本书拟定的主要研究方法是实验室岩石力学试验,通过试验获取理论研究所需的基础资料,总结分析实验成果和岩石流变规律及其扰动效应,建立起岩石流变扰动效应的本构关系。其技术路线如图 1-1 所示。

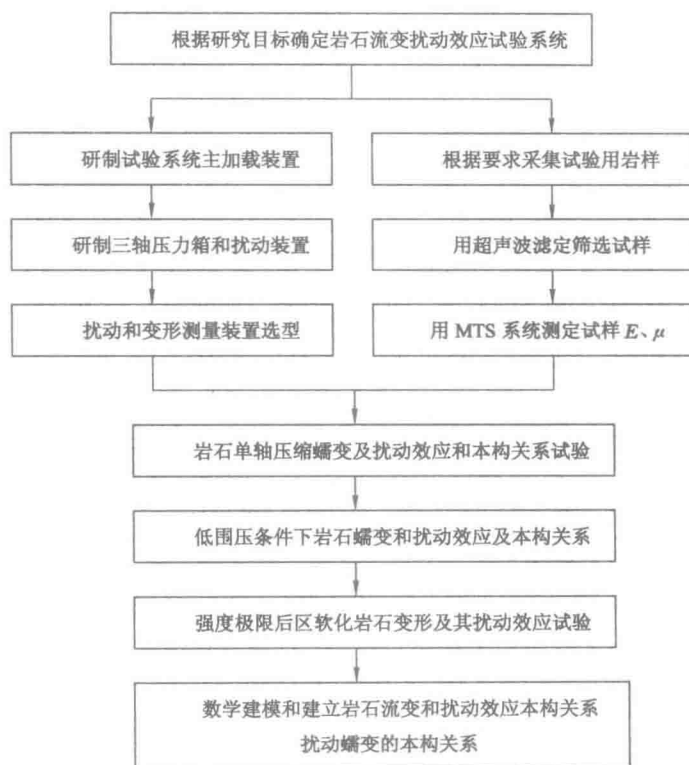


图 1-1 项目研究路线

第2章 岩石流变扰动力学效应试验装备的研制

2.1 岩石流变扰动效应试验装备研制的目的与要求

为进行岩石流变扰动效应试验,完成课题研究技术路线拟定的四种岩石蠕变及其扰动效应试验,岩石流变扰动效应试验装备应满足如下基本要求:

(1) 轴向压力加载系统,能够施加足以使岩石试样达到极限强度的轴向载荷;且在试验过程中轴向载荷能够较高精度地实现分级恒定,即在某一级轴向载荷下,能保持压力稳定不变。

(2) 轴向压力加载系统具有远高于岩石试样的瞬时刚度,以免在加压到试样的“强度极限邻域内”时,试样失稳破坏。

(3) 轴向压力加载系统,加载过程中能实现“过度变形位移控制”,以防止试样的失稳破坏。

(4) 装置能实现围压长期稳定,即在常规三轴压力蠕变及其扰动效应试验过程中,围压应保持较高精度的恒定;加压介质可用液体和气体。

(5) 加载载荷测量系统应具有较高的测量精度和良好的稳定性,要求其标定测量精度达到 0.01N 级。

(6) 试验用应变和位移测量系统应具有较高的测量精度和良好的稳定性,位移测量精度应达到 μm 级,应变测量精度应达到 $\mu\epsilon$ 级(微应变级)。

(7) 试验环境的温度和湿度应保持基本恒定。

(8) 选用的时间测量仪表的相对测量误差 $\frac{\Delta t}{t} < 0.1\%$ 。

2.2 岩石流变扰动效应试验装备的结构设计

2.2.1 岩石流变扰动效应试验装备的整体结构

为满足岩石流变及其扰动效应的试验要求,岩石流变扰动效应试验装备应由如下几个部分组成:

(1) 轴向恒载加压系统:用以实现对试件的轴向恒载长期加压。

(2) 围压恒载三轴压力箱:在整个试验周期内,实现对试样施加恒定的围压,并能够实现对试件的变形测量,即能将变形传感器置于三轴压力箱之内。

(3) 扰动载荷施加系统:能够产生多种形式的扰动载荷,以具备进行岩石流变扰动效应试验的功能。

(4) 变形测试系统:由应变片、应变仪、千分表等组成,能够实现对岩石试件轴向及横向变形的测量。

(5) 载荷测试系统:由钢弦式压力传感器和应变仪测力计等组成,能够实现对岩石试件所加载荷的测量。

岩石流变扰动效应试验装备的整体组成如图 2-1 所示。

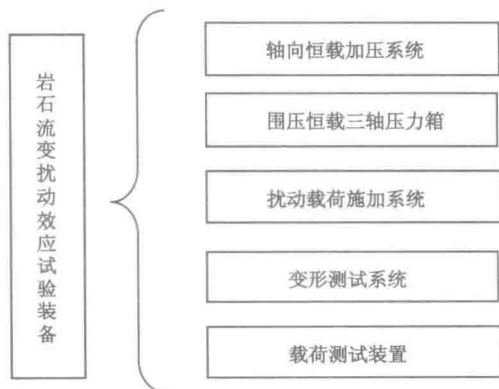


图 2-1 岩石流变扰动效应试验装备的整体组成

2.2.2 岩石流变扰动效应试验装备的设计依据

(1) 岩石试件的极限应力按 $\sigma_0 = 80 \text{ MPa}$ 。

(2) 岩石试件的横断面面积: $A = 3.14 \times 50^2 / 4 = 1\,962.5 \text{ mm}^2$, 设计时按 $A = 25 \text{ cm}^2$ 。

(3) 岩石试样的极限载荷: $P_0 = A \times \sigma_0 = 25 \times 100 \times 80 = 200\,000 \text{ N} = 20 \text{ t}$ 。

(4) 试样轴向长度: $L = 10 \sim 15 \text{ cm}$ 。

(5) 试样在实验室中的最大轴向变形量: $\Delta L_{\max} \leq 1.5 \text{ mm}$ 。

(6) 轴向载荷传感器(压力盒)的直径按 $\phi = 160 \text{ mm}$; 轴向长度按 $L = 120 \text{ mm}$ 。

(7) 应变测量用应变片和应变仪; 位移测量采用千分表。