

国家自然科学基金资助项目(51104156, 50574064)

中央高校基本科研业务费专项(2010QNB01)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

压力水作用下 煤岩受载变形特征及稳定性研究

沈荣喜 刘长武 吴秀仪 著

中国矿业大学出版社

国家自然科学基金资助项目(51104156,50574064)

中央高校基本科研业务费专项(2010QNB01)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

压力水作用下煤岩 受载变形特征及稳定性研究

沈荣喜 刘长武 吴秀仪 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对防水煤岩柱长时间经受荷载和水的作用,以及其长期强度和稳定性影响地下工程安全的问题,利用实验室测试、理论分析等研究方法,对煤岩受水和载荷作用下的微结构变化、变形破裂和声电特征,及压力水对煤岩强度和稳定性的影响等方面进行了研究。

图书在版编目(CIP)数据

压力水作用下煤岩受载变形特征及稳定性研究/沈荣喜,刘长武,吴秀仪著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2580 - 1

I. ①压… II. ①沈…②刘…③吴… III. ①煤岩—水压力—研究 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第303695号

书 名 压力水作用下煤岩受载变形特征及稳定性研究

著 者 沈荣喜 刘长武 吴秀仪

责任编辑 杨 廷 徐 玮

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 江苏徐州新华印刷厂

开 本 850×1168 1/32 印张 4.25 字数 99 千字

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

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在矿山开采、交通隧道等地下工程的施工过程中,为防止含水岩层中的水体威胁地下工程的安全,通常在作业空间与水体之间留设防水煤岩柱。受荷载、水体的长期作用,防水煤岩柱会在结构、强度和变形破坏特征等方面产生变化,如果煤岩柱一旦发生破裂形成导水通道,水体将突入作业空间,形成突水事故,造成经济损失及人员伤亡。

随着地下工程施工深度的增加,荷载和水体压力逐渐增大,突水事故的发生可能性及严重程度也随之增大。同时,出于地下工程服务期限考虑,一般要求防水煤岩柱稳定时间为数年至数十年。因此,防水煤岩柱的长期强度和稳定性是决定地下工程安全与否的关键因素。研究压力水作用下受载煤岩的变形规律对于确定防水煤岩柱的合理尺寸及其稳定性、防止地下工程突水事故的发生具有理论意义和工程价值。

在国家自然科学基金项目(51104156,50574064)、中央高校基本科研业务费专项(2010QNB01)和江苏高校优势学科建设工程资助项目的资助下,作者采用实验室测试、理论分析和工程现场应用相结合的研究方法,对煤岩受水(压力水)作用下的内部结构变化、三轴流变特征及流变模型、单轴及三轴受载声发射-电磁辐射响应特征、防水煤岩柱临界尺寸与稳定性等内容进行了研究,希望为我国地下工程突水灾害机理、灾害预测与防治等方面提供有益的借鉴。

全书共6章。第一章介绍地下工程水害的分类和特点。第

第二章研究水对煤岩微结构的影响规律。第三章介绍压力水作用下煤岩三轴流变实验结果,研究压力水作用下煤岩三轴流变特征及规律。第四章探讨压力水作用下煤岩的流变模型,并反演碳质页岩的流变参数。第五章研究压力水作用下煤岩受载的声发射、电磁辐射信号变化特征及压力水对声电的影响规律。第六章分析研究矿井防水煤岩柱的临界尺寸及稳定性。

衷心感谢中国矿业大学王恩元教授、刘贞堂教授,四川大学徐进教授、刘建锋副教授等,对本书提供的无私帮助。感谢四川大学岩土工程省重点实验室、成都理工大学环境与土木工程学院实验中心、中国矿业大学煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室、河北金牛能源股份公司东庞煤矿、黑龙江龙煤集团鹤岗分公司峻德煤矿、北京昊华能源股份有限公司长沟峪煤矿、中国矿业大学出版社等单位的支持与帮助。感谢中国矿业大学煤岩瓦斯动力灾害研究所研究生苑广华、杨胜利、邓晓谦、班擎宇和邱黎明等参与了本书部分实验工作及数据的整理。

本书在撰写过程中参阅了相关文献,在此对文献的作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中尚存疏漏不足之处,敬请读者不吝指正。

作 者

2014 年 7 月

目 录

前言	1
第一章 地下工程水害分类及特点	1
第一节 地下工程水害分类	2
第二节 地下工程水害特点	3
第三节 不同地下工程的水害研究重点	5
第二章 水对煤岩微结构影响研究	8
第一节 煤块微结构实验系统	9
第二节 煤块微结构实验分析	10
第三章 压力水作用下煤岩三轴流变实验及力学特性	21
第一节 流变实验设备及实验步骤	21
第二节 流变实验结果分析	24
第三节 碳质页岩三轴流变全应力-应变特征	33
第四章 压力水作用下煤岩流变模型	39
第一节 流变理论及模型简述	39
第二节 碳质页岩的流变本构模型	43
第三节 碳质页岩流变参数的反演	57
第四节 碳质页岩流变模型的三维形式	62

第五章 压力水作用下煤岩受载声电特征	67
第一节 煤岩声电测试系统及方案	67
第二节 自然、饱和煤样受载变形及声电特征	73
第三节 压力水对煤样受载变形及声电 特征的影响	79
第四节 水压围压作用下煤样受载变形及声 发射特征	85
第六章 防水煤岩柱临界尺寸分析和计算	95
第一节 防水煤岩柱的分类	95
第二节 防水煤岩柱临界宽度分析	97
第三节 防水煤岩柱临界宽度算例	105
参考文献	108

第一章 地下工程水害分类及特点

在地下工程中,不可避免地要接近、波及、揭露或破坏某些地下含水岩层,例如煤矿开采浅部露头附近的煤层,开采水体下和导水断层附近的煤层,水电站地下厂房开挖,铁路和公路施工越岭隧道。当这些工程的作业场所距离含水岩层较近时,由于开挖或采动的影响,含水岩层与作业场所将形成导水通道,可能导致含水岩层失去原有平衡,岩层中的水体将以各种形式向作业面运动甚至涌出,可能是一般性的滴淋水,也可能是大规模的破坏性的涌出,形成水害,这主要取决于含水岩层的富水性、补给水量和水压的大小,以及地下工程施工过程中对含水层的揭露、贯穿或波及破坏程度。为了防止地下工程施工建设过程中突水事故的发生,一般要在含水岩体的上部或下方,或在导水断层等存在突水可能的区域附近,留设一定厚度或宽度的煤岩柱(不允许开挖和采动),这部分煤岩柱通常称为防水煤岩柱。如果含水体的水压较高,则防水煤岩柱要受压力水的作用,例如承压水体上的防水煤岩柱即是此种情况。

出于地下工程安全的要求,防水煤岩柱需在上覆岩层传递的荷载、水或压力水的长时间作用下保持稳定。在压力水和荷载长时间的的作用下,防水煤岩柱的结构、强度等物理力学性质将发生变化,其稳定性随之发生改变。如果简单把煤岩体看作承受水压的固体,不考虑煤体内部的孔隙、裂隙,也不考虑水对煤体力学性质的影响,例如水对煤块的软化作用和

煤块在承压水长期作用下的流变性,就会导致防水煤岩柱的承载能力低于设计值,一旦防水煤岩柱抗压强度低于含水体的水压,水或压力水将通过破裂煤岩柱突入地下工程的作业场所,形成突水事故,轻者影响正常生产造成经济损失,严重的将危及现场作业人员的人身安全。

此外,其他一些岩土工程在设计、施工及运行维护时,也需考虑承压水(或压力水)对煤岩应力应变、长时强度及稳定性的影响,例如矿山方面的坚硬顶板注水软化,水利方面的高坝坝基软化,引水隧洞围岩稳定,交通方面的海底隧道上部覆岩的稳定等工程,如果处理不好承压水(或压力水)对煤岩强度及稳定性的影响,会导致顶板突然垮落、坝基管涌溃坝、隧道突水等动力灾害的发生。

第一节 地下工程水害分类

由于不同行业或生产领域的作业环境的差异,对地下工程水害的分类也不同。就矿井、隧洞及地铁等地下工程而言,其水害分类可划分为以下几种:

(1) 按突水水源(或突水点)与地下工程位置的不同,可将地下工程水害分成顶部突水、侧向突水和底部突水三类。如果突水点及水源位于地下工程的顶部,为顶部突水;如果突水点(或水源)位于地下工程的四周(例如掘进巷道或隧洞的两帮),为侧向突水;如果突水点位于地下工程的底部,即为底部突水,例如矿山开采中的底板承压水突水灾害。

(2) 按突水量的大小,可分为特大型突水、大型突水和小型突水等类型。

(3) 按突水动态特征的不同,分为爆发型突水、缓冲型突

水和滞后型突水。如果水害发生突然迅速,且突水前兆不明显即为爆发型突水;如果水害发生前异常征兆显著,且突水过程较缓慢则为缓冲型突水;发生在地下工程后方的突水为滞后型突水,例如煤矿采煤工作面推进过程中的采空区突水即属于滞后型突水灾害。

(4) 按突水水源性质,地下工程水害可分为天然水源型水害和人为水源型水害。天然水源型水害又可细分为大气降雨型水害、地表水体型水害和地下水源型水害;人为水源型水害集中发生在矿井生产领域,例如煤矿掘进工作面掘进过程中,揭露或沟通以前的老空区积水造成的突水事故。

(5) 按水害发生后造成的人员伤亡和直接经济损失大小,可分为一般型水害、较大型水害、重大型水害和特别重大型水害。参照我国《生产安全事故报告和调查处理条例》,一般型水害指造成3人以下死亡,或者10人以下重伤,或者1000万元以下直接经济损失的水害事故;较大型水害指造成3人以上10人以下死亡,或者10人以上50人以下重伤,或者1000万元以上5000万元以下直接经济损失的事故;重大型水害事故指造成10人以上30人以下死亡,或者50人以上100人以下重伤,或者5000万元以上1亿元以下直接经济损失的事故;特别重大水害事故指造成30人以上死亡,或者100人以上重伤,或者1亿元以上直接经济损失的水害事故。

第二节 地下工程水害特点

结合地下工程的空间大小、复杂程度、服务年限、作业对象和施工环境等因素,地下工程的水害具有以下特征。

(1) 水害事故和水害类型的分布不均匀。

与隧洞和地铁等地下工程相比,矿山地下工程(井下硐室、巷道和采煤工作面等)具有埋深大、空间大、地质条件复杂、受人为扰动影响严重等特点,因此发生水害的次数及严重程度远高于其他地下工程。

据统计,恶性矿井水害以老空区突水最多且危害性最大,我国2006~2010年间,发生老空区突水事故129起,造成971人死亡,约占同期矿井水害总数的92%和死亡人数的90%。该类水害具有以下特点:水害发生突然;涌水量大且破坏性强;水量有限,容易疏干。

隧洞和地铁等交通领域的地下工程则易受大气降水型水害的威胁。其特点为:受大气降水影响,多发于强降雨季节,其致灾性与降雨强度和降雨量基本正相关。

(2) 多发生在地下工程开挖或掘进阶段。

在隧洞和地铁等地下工程的开挖阶段,易受地表水、大气降水等天然水源型水害的影响;而在这些工程的服务使用阶段,主要受大气降水型水害的威胁,例如雨季发生强降水,由于雨量较大造成局部大量积水,如果积水水位高于地下工程入口的高程,积水会突入地下工程,造成水害。

矿山的井巷等地下工程在掘进期间,掘进工作面多发生人为水源型的老空区突水事故;采煤工作面回采期间,则集中发生底板承压水突水型水害事故。

(3) 水害类型不同,灾害严重程度不同。

突水速度快慢、水量大小等特征不同,水害发生后的人员伤亡及经济损失也存在明显的差异。一般来讲,与缓冲型突水相比,爆发型水害发生突然迅速,容易造成重大人员伤亡;突水时水量越大,淹没的区域越大,造成的人员伤亡和设备损毁就越大。突水源水压越高,突水水量就越大,且水害发生就

突然迅速,造成的灾害后果就越严重。在煤炭生产领域,华北型煤田的奥陶纪灰岩水具有水压高、水量大的特点,因此一旦发生奥灰水突水水害,则水害发生迅猛、波及范围大、造成损失也大。

(4) 人为活动影响是水害发生的原因之一。

在地下工程施工之前,由于不受人为开挖或采掘等活动的影响,各类水体保持平衡状态。地下工程施工过程中,围岩结构及原始应力平衡状态被打破,在一定条件下,地下工程与水体之间的导水通道形成后,即发生突水,形成水害事故。因此,此类水害事故中,人为活动是水害发生的直接原因。如矿井掘进工作面老空水突水、采煤工作面底板承压水突水等事故中,人为采掘活动是此类水害发生的直接原因。

隧洞和地铁等工程中发生的大气降水型水害看似是自然灾害,但如果深入分析这些事故的发生原因,则会发现这些工程在防灾设计及应急管理等方面或多或少都存在着不足和缺陷,而这些不足和缺陷是导致此类水害发生的间接原因。

第三节 不同地下工程的水害研究重点

矿井、隧洞及地铁等不同种类的地下工程,所面对的水害类型有显著差异,因此在水害的预防及治理等研究方面也各有侧重。

一、地铁方面的水害研究重点

地铁埋深较浅,一般设计在地表以下十至数十米的第四系松散岩土层(冲击层)中。在地铁的开挖掘进期间,主要受岩土体中的孔隙水、地表水体(如江、河、水库等)和浅部含水

层的威胁,因此在开挖期间多关注这几种水害的预防。例如地铁穿越江河等水系或水量大水压高的含水层时,会采用冻结法对开挖区域周围的岩土体进行冻结,将预挖空间与水源隔开;如果岩土体冻结范围及冻结程度低于设计标准,则在施工期间可能发生水突入开挖空间的事故。

在地铁运营阶段,面临的水害威胁相对较小,一般仅关注大气降水型水害。

二、隧洞方面的水害研究重点

按照隧洞埋藏深度的不同,可分为浅埋隧洞和深埋隧洞。在开挖施工阶段,浅埋隧洞与地铁相似,主要侧重于孔隙水、地表水及浅部含水层的防治;深埋隧洞埋深大,多受岩溶水的威胁,由岩溶水突入施工区域的水害事故是深埋隧洞的主要灾害类型,因此,岩溶水及孔隙水水害的预防是深埋隧洞开挖阶段的重点。

隧洞开挖施工后引起围岩的应力重新分布,改变了围岩的力学特性及水的径流路线,如果开挖时爆破控制不好,或隧洞支护不良,则会导致隧洞围岩局部变形破裂,从而为裂隙水或岩溶水形成渗流通道。隧洞施工后的运行维护阶段,按隧洞用途的不同,水害的研究重点也不同。交通行业用于行车的交通隧道与地铁相似,多关注大气降水型水害。水利行业的引水隧洞则要考虑隧洞内的水流对隧洞构筑体及围岩稳定性的影响,例如大型深埋引水隧洞,由于隧洞内水压高、流速快,则要研究高压水对隧洞围岩强度及稳定性的影响,以保证隧洞在服务期间满足工程设计要求及安全水平。

三、矿井方面的水害研究重点

受矿井水文地质条件、煤层赋存及开采方式的影响,我国矿井主要的水害类型主要集中于四大类:煤层底板高承压水突水、煤层顶板孔隙水透水、采空区溃水及地表水充水。针对上述四种水害,逐渐形成了煤层顶底板采动破坏及突水机理、矿井复杂环境条件下隐伏地质构造及采空区积水范围探查技术、矿井水害监测与预警技术等方面的研究重点。

随着开采深度的增加,矿井含水层中的水压值将越来越大,矿山煤岩在高压力水的长期作用下,其内部结构、变形、强度等物理力学性质及地下工程稳定性如何变化,都是值得深入研究的问题。

第二章 水对煤岩微结构影响研究

岩石是由多种矿物晶粒、孔隙、裂隙及胶结物组成的复合体,在经过亿万年的地质演变和多次复杂的构造运动后,岩石内部及表面都含有不同阶次的随机分布的微观孔隙和裂纹。地球上岩石的成分种类复杂,其分类方法也多种多样。根据形成原因的不同,可将岩石划分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。岩浆岩是岩浆在高温高压下,从地下上升、贯入地壳或喷出地表,冷凝而成的岩石,其显著特点为:颗粒边界起伏大,可以相互嵌入,颗粒之间黏结力大,且结构致密。一般而言,岩浆岩强度较高,易发生脆性破坏,花岗岩和玄武岩为此类岩石的代表。沉积岩是地壳上各种松散物质或化学物质,经过搬运、沉积和成岩作用而形成的岩石,其显著特点为:颗粒之间咬合不紧密,与岩浆岩相比,沉积岩裂隙较大,颗粒较圆,因而颗粒之间易发生相对滑移,砂岩、页岩和泥岩为沉积岩的典型代表。变质岩是在已有岩石的基础上,在高温高压等外环境中经变质而形成的岩石,其显著特点是:宏观上结构致密,但细观上黏结力较小,受载过程中塑性变形较大,板岩和片岩为此类岩石的典型代表。

格里菲斯(Griffith)在研究脆性物体破坏时指出:脆性物体的破坏是由物体内部存在的裂隙所决定的,由于物体内部微小裂隙的存在,在裂隙尖端存在应力集中的现象,从而使裂隙扩展,最终导致物体破坏。在煤炭的采掘过程中,人类作业的对象(例如煤层及其顶底板岩层)主要为沉积岩类,其中煤炭

是由古代植物遗体在长期地质作用下逐渐形成的,在压缩破裂过程中大多呈脆性破坏特征。煤块受载后的宏观断裂失稳和破坏与其变形时内部微裂纹、孔隙的分布,以及微裂纹的产生、扩展和贯通密切相关,因此研究煤块内部的微观结构发展变化过程能够反映煤块的宏观破坏过程。本章将从煤块的扫描电镜(Scanning Electron Microscopy,简称 SEM)图像研究入手,分析煤块在干燥状态和泡水状态下微结构发展变化的规律,研究水对煤块微结构的影响。

第一节 煤块微结构实验系统

利用 Hitachi S-3000N 扫描电子显微镜对煤样进行了微结构测试。扫描电子显微镜(SEM)是通过聚焦电子束在试样表面逐点扫描成像的。试样为块状或粉末颗粒,成像信号可以是二次电子、散射电子或吸收电子,其中二次电子是主要的成像信号。由电子枪发射的能量为 $5\sim 35\text{ keV}$ 的电子,以其交叉斑作为电子源,经二级聚光镜及物镜的缩小形成具有一定能量、一定束流强度和束斑直径的微细电子束,在扫描线圈驱动下,在试样表面按一定时间、空间顺序作栅网式扫描。聚焦电子束与试样相互作用,产生二次电子发射(以及其他物理信号),二次电子发射量随试样表面形貌而变化。二次电子信号被探测器收集转换成电讯号,经视频放大后输入到显像管栅极,调制与入射电子束同步扫描的显像管亮度,得到反映试样表面形貌的二次电子像。

扫描电镜具有以下的特点:① 放大倍率高,可从几十倍放大到几十万倍,连续可调,观察样品极为方便。② 分辨率高,分辨率是指能分辨的两点之间的最小距离。SEM 是用电子

束照射试样,目前用 W 灯丝的 SEM 分辨率已达到 3~6 nm,场发射源 SEM 分辨率可达到 1 nm。③ 景深大,景深大的图像立体感强,对粗糙不平的断口试样观察需要大景深,一般情况下,SEM 景深比 TEM(透射电镜)大 10 倍,比光学显微镜(OM)大 100 倍。④ 保真度好,试样通常不需要作任何处理即可以直接进行形貌观察,所以不会由于制样原因而产生假象。这对断口的失效分析及贵重试样的分析特别重要。⑤ 试样制备简单,试样可以是自然面、断口、块状、粉体、反光及透光光片,对不导电的试样需蒸镀一层 10 nm 左右的导电膜。另外,现在许多 SEM 具有图像处理和图像分析功能。SEM 加入附件后,还能进行加热、冷却、拉伸及弯曲等动态过程的观察。

第二节 煤块微结构实验分析

煤块在取样和运输过程中,由于受到人为扰动和损伤,为了观测煤块内部真实的原生结构,因此会对煤样进行处理:对煤样表面已发生变形和损伤的部分进行剥离,选取内部新鲜、受扰动较小的部分制成待测样品。需要注意的是,在整个样品制作过程中必须保护好观察面避免人为污染和二次人为损伤。

利用锯石切割机、磨研机等设备把煤样加工成长宽约 10 mm、厚度为 5 mm 左右的试块。由于煤块导电性差,因此需在观测前对试块进行烘干、真空镀金膜。

为了尽可能减小煤样自身结构差异对观测结果的影响,试块均取自同一煤块。取干燥试块测试分析煤块原生裂隙等微结构的分布情况;其余试块泡水,泡水时间分别为 24 h、