

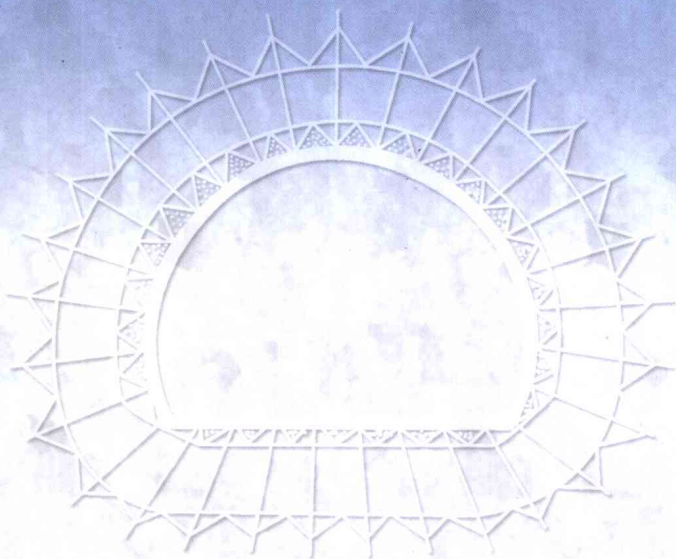
国家自然科学基金项目 (50674083, 50474063)

教育部科学技术重点项目 (106085)

软岩工程支护理论与技术

靖洪文 李元海 赵保太 许国安 编著

Ruanyan Gongcheng Zhihu Lilun Yu Jishu



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(50674083,50474063)

教育部科学技术重点项目(106085)

软岩工程支护理论与技术

靖洪文 李元海 编著
赵保太 许国安

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了软岩工程支护理论和实用技术,内容包括软岩力学性质、荷载确定方法、围岩稳定性影响因素与围岩分类、软岩工程的动态设计、软岩工程的支护技术、软岩工程支护实践以及软岩支护技术的发展方向。本书同时介绍了作者多年来最新的研究成果,尤其是“三锚支护”新技术,对于解决煤矿软岩工程支护难题,效果显著。

本书可供从事软岩工程的设计、管理和科研人员参考,也可作为高校和研究院所的本科生、研究生学习教材。

图书在版编目(CIP)数据

软岩工程支护理论与技术/靖洪文等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2008.6

ISBN 978 - 7 - 81107 - 996 - 8

I. 软… II. 靖… III. 软弱岩石—巷道支护 IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 097280 号

- 书 名 软岩工程支护理论与技术
编 著 靖洪文 李元海 赵保太 许国安
责任编辑 吴学兵
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 9.375 字数 244 千字
版次印次 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

软岩工程支护是当前国内外学术界、工程界甚至政府部门共同关注的煤矿安全重要问题之一,由于软岩引起的矿山井巷的破坏现象非常普遍,严重影响着煤矿生产安全、效率及效益的提高,因此,已引起国内外学术界和相关部门的高度重视。国际岩石力学学会(ISRM)委托日本岩石力学学会于1981年9月在东京召开了国际软岩学术讨论会,1987年12月,中国岩石力学与工程学会在北京召开扩大理事会,组织讨论“岩石力学发展战略”,提出:“软岩巷道支护技术是当前煤炭系统亟待解决的关键问题,是我国岩石力学发展战略的首要任务之一”,“七五”期间国家又将“软岩支护工艺和设备”列为重大科研攻关项目。

从20世纪80年代起,煤矿开采深度日益加大,如新汶矿业集团的开采深度已超过1300 m,深部高应力软岩普遍出现,使得软岩工程支护的理论、技术的研究与开发更加迫切,其中,以中国矿业大学“松动圈支护理论”为代表的软岩支护理论在中国煤矿得到广泛应用。2007年中国矿业大学“深部岩土力学与地下工程”国家重点实验室申报成功,集中体现了国家对深部软岩工程基础研究的重视。

软岩工程的稳定与支护技术密不可分,目前矿山软岩巷道已由过去单一的支护形式,逐步发展为各种多次支护和联合支护形式,如锚带、锚网喷、锚带网架、锚喷网架、钢架、钢筋混凝土等系列技术,特别是近年来锚索、锚注与锚杆的联合支护技术发展十分迅速,已经成为深部矿井软岩巷道支护的重要技术。其独特优点是

能把深部围岩强度调动起来,与浅部支护岩体共同作用,控制巷道稳定性,这将是 21 世纪我国软岩巷道支护的主流方向。

作者早期在董方庭、孙钧等中国老一代著名软岩地下工程专家的指导下,开始了软岩工程的支理论与技术研究。近年来,独立承担了一系列国家相关研究课题和大量来自煤矿企业的软岩科技攻关项目,如国家自然科学基金项目“深埋巷道开挖、破坏、支护平衡演化模型”、“深部巷道围岩变形破坏全过程及其稳定控制机理”以及“深部巷道松软围岩失稳机理与动态叠加支护技术研究”、“构造复杂区域高应力巷道矿压与支护技术研究”、“深井突出三软煤巷及软岩巷道支护机理与技术研究”以及“深部高应力软岩巷道破坏后二次稳定控制机理与技术研究”等煤矿科技攻关课题。其研究成果,尤其是提出的高应力软岩工程“三锚支护”新技术,已推广应用到山东、山西、河南、陕西、四川等多个地区的煤矿软岩巷道支护工程中,解决了大量煤矿支护难题,取得了显著的经济效益和社会效益,为促进中国煤矿软岩工程支护技术进步做出了应有的贡献。

为了给广大从事软岩工程支护的工程设计人员、高校师生、研究人员、管理人员提供一套系统的软岩工程支理论与技术参考教材,本书以软岩工程支护基本理论为出发点,系统阐述了软岩的力学性质、软岩巷道工程荷载确定方法、围岩稳定性影响因素与围岩分类、软岩工程的动态设计、软岩工程的支护技术、软岩工程支护实践及其发展方向,结合作者多年来的基础研究与工程实践,并总结了软岩工程支护技术研究新方法以及以“三锚支护”为代表的多项软岩支护应用新技术。

本书是作者及其课题组多年来最新研究成果之总结,相关研究成果获得了国家安全生产监督管理总局、中国煤炭工业协会、山东省、河南省等多项省部级科技进步成果奖。本书的出版发行,希望能为广大读者提供软岩工程支护技术的理论与实践指南,帮助

前 言

理解软岩工程的基本理论问题,解决生产实践中遇到的工程支护难题。本书的基础研究同时得到了国家科技攻关项目、国家自然科学基金委、教育部科学技术研究重点项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。

限于知识和水平,本书难免存在不足之处,恳请诸位学者、专家不吝赐教。

作 者

2008.4.8

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 问题的提出	1
1.2 煤矿软岩工程的特点	4
1.2.1 地下工程特点	4
1.2.2 煤矿巷道软岩工程的特点	6
1.3 煤矿软岩巷道工程理论的进展与现状	8
1.3.1 地下工程概念进展	8
1.3.2 煤矿软岩工程支护理论进展与现状	10
1.3.3 煤矿软岩工程支护技术进展与现状	16
1.3.4 地下软岩工程设计方法进展与现状	17
1.4 煤矿软岩工程研究内容及方法	23
1.4.1 煤矿软岩工程研究存在的问题	23
1.4.2 煤矿软岩巷道工程研究的方法	25
 第 2 章 地质软岩物理力学性质	31
2.1 软岩的概念	31
2.1.1 地质软岩	31
2.1.2 工程软岩	33
2.1.3 地质软岩与工程软岩的关系	35
2.2 软岩的物理性质	35
2.2.1 软岩的结构特征	35

2.2.2 软岩的水理性质·····	38
2.3 软岩的力学性质·····	43
2.3.1 软岩瞬时加载的力学性质·····	44
2.3.2 软岩的流变力学特性·····	46
2.3.3 软岩的变形与强度特征·····	50
2.4 软岩物理性质与力学性质的关系·····	50
2.4.1 软岩矿物成分与力学性质的关系·····	50
2.4.2 软岩微结构与力学性质的关系·····	51
2.5 软岩的工程特性·····	51
2.5.1 可塑性·····	51
2.5.2 膨胀性·····	52
2.5.3 崩解性·····	53
2.5.4 流变性·····	55
2.5.5 易扰动性·····	57
第3章 软岩巷道工程支护荷载确定方法 ·····	59
3.1 原岩应力场的构成·····	59
3.1.1 重力应力·····	59
3.1.2 构造应力·····	61
3.2 原岩应力确定方法·····	62
3.2.1 现场量测法·····	62
3.2.2 估算法·····	73
3.2.3 浅部原岩应力的变化规律·····	75
3.3 围岩支护荷载的确定·····	79
3.3.1 围岩压力的概念及分类·····	79
3.3.2 围岩松动压力的计算·····	80
3.3.3 围岩变形压力的计算·····	83

第 4 章 软岩工程稳定性影响因素分析与分类	88
4.1 软岩工程围岩稳定性影响因素分析	88
4.1.1 地应力(埋深)的影响	89
4.1.2 岩石强度的影响	89
4.1.3 应变软化程度的影响	92
4.1.4 支护强度、刚度的影响	92
4.1.5 水对软岩稳定性影响	93
4.1.6 施工质量的影响	94
4.2 软岩巷道的围岩稳定性系数	94
4.3 围岩分类概述	95
4.3.1 分类目的与发展	95
4.3.2 分类方法	97
4.4 国内外围岩分类方法	98
4.4.1 单因素单指标分类法	98
4.4.2 多因素复合指标分类法	101
4.4.3 多因素单一综合指标分类法	110
4.5 围岩分类的发展趋势	129
第 5 章 软岩巷道工程支护基本理论	132
5.1 现代支护原理	132
5.2 软岩工程支护原则与对策	134
5.2.1 根据不同压力类型选用不同巷道支护方法	134
5.2.2 改善围岩力学性质,充分发挥围岩自承能力	134
5.2.3 降低围岩应力和先放后让与边让边抗结合	135
5.2.4 消除“环境效应”对岩体强度的不利影响	135
5.2.5 根据围岩压力分布特点选择合理的断面形状	136

5.2.6	通过施工监测动态调整支护设计与参数	136
5.3	应力控制理论	137
5.3.1	躲压	138
5.3.2	钻孔卸压	139
5.3.3	钻孔松动爆破卸压	143
5.3.4	开槽(缝)卸压	150
5.4	围岩加固理论	154
5.4.1	围岩外部支撑	154
5.4.2	围岩内部加固原理	163
5.5	支护—软弱围岩相互作用原理	174
5.6	二次支护原理	178
5.6.1	一次支护存在的问题	178
5.6.2	软岩巷道二次支护原理	181
5.6.3	二次最佳支护时间和最佳支护时段	182
第6章	软岩工程稳定监测技术与动态设计	185
6.1	概述	185
6.2	施工监测技术	185
6.2.1	监测的意义与目的	185
6.2.2	监测的内容与方法	187
6.3	软岩工程动态设计	202
6.4	软岩工程动态支护设计软件	203
6.4.1	系统功能结构	203
6.4.2	知识库与推理机	205
6.4.3	软件系统	208
第7章	软岩工程支护技术	210
7.1	软岩支护结构类型	210

目 录

7.2 围岩外部支护	211
7.2.1 砌碛支护	211
7.2.2 金属支架支护	211
7.2.3 混凝土大弧板支护	212
7.3 围岩内部加固支护	214
7.3.1 传统锚喷支护	214
7.3.2 高强预拉力锚杆支护	216
7.3.3 锚索与锚注支护	229
7.4 软岩联合支护	235
7.4.1 联合支护的概念	235
7.4.2 联合支护的原则	236
7.5 软岩巷道的底鼓及防治	238
7.5.1 底鼓现象	238
7.5.2 底鼓的防治	239
第8章 软岩工程支护实践	244
8.1 高应力破碎顶板煤巷“三锚”耦合支护技术	244
8.1.1 工程概况	244
8.1.2 巷道围岩松动圈测试结果	245
8.1.3 高应力破碎顶板煤巷三锚支护技术 参数设计与确定	245
8.1.4 施工工艺与要求	248
8.1.5 试验效果分析	254
8.2 深部高应力软岩巷道锚注加固技术	255
8.2.1 工程概况	255
8.2.2 加固实施方案	256
8.2.3 支护参数设计	257
8.2.4 施工工艺与要求	258

8.2.5 锚注加固效果	259
8.3 返修巷道锚注与 U 型钢支架联合支护技术	261
8.3.1 工程概况	261
8.3.2 返修巷道围岩变形破坏特点与破坏机理分析	262
8.3.3 返修巷道合理支护结构与参数设计	264
8.3.4 施工工艺与要求	267
8.3.5 支护效果与分析	271
8.3.6 结论与建议	273
第 9 章 软岩工程支护技术展望	275
9.1 软岩工程信息技术	276
9.2 软岩工程测试技术	277
9.2.1 工程岩体结构测试技术	277
9.2.2 工程岩体强度测试技术	278
9.2.3 地应力测试	279
9.3 软岩实验技术	279
9.3.1 软岩 CT 技术	279
9.3.2 软岩工程模拟技术	280
参考文献	281

第 1 章 概 述

1.1 问题的提出

2007 年中国原煤产量为 25.23 亿 t,居世界首位,与之配套的巷道掘进量每年达 6 000 km,其中 10%以上的巷道为软岩巷道。全国有 30 多个矿区存在着软岩巷道支护问题,如吉林舒兰和辽源梅河、辽宁沈阳、内蒙古平庄、山东龙口和济宁等、安徽淮南和淮北、河南义马、青海大通、贵州六盘水、浙江长广、陕西王石凹以及广东茂名等数百个矿井的开发和建设,都遇到了软岩巷道支护这个技术难题。而且,近年来,随着开采深度的增加,许多原来软岩很少的矿区,如开滦、平顶山、徐州、新纹等矿区深部巷道工程均呈现出软岩工程特征。除了煤炭系统外,冶金矿山系统以及三峡工程、小浪底工程、城市地下工程、道路交通等,均遇到了越来越突出的软岩滑坡、软岩隧洞及隧洞群稳定问题。

在软岩内布置巷道,开挖后围岩变形速度快,持续时间长,变形量大,巷道产生底鼓,稳定性差,极难维护,支护费用直线上升,给煤矿的生产、建设造成很大的损失,甚至有些矿区的软岩巷道(断面 $15 \sim 20 \text{ m}^2$)每米支护成本达 2 万多元。即使这样,有些工程还不得不反复维修,甚至停产待修,严重影响了煤矿的安全生产和经济效益。

理论和实践表明,围岩的力学性质是软岩工程稳定性的重要决定因素,而围岩的变形又是研究围岩性质以及确定支护技术的

重要依据,如松动圈支护理论就是根据巷道围岩变形破裂范围来确定支护方案的。根据众多煤矿井下的观测资料,可归纳出软岩巷道的围岩变形有以下特征:

(1) 变形速度快,变形量大

软岩工程中,围岩变形量大是变形的主要特征,用传统的支护方法一般很难控制其变形。软岩巷道不仅顶板下沉量大和容易冒落,底板也强烈鼓起,并常伴随有两帮剧烈位移。而且一般软岩工程开挖或受其他因素影响后,围岩变形十分迅速。尤其是粘土岩,浸水崩解和泥化引起的底鼓更为严重。因此,防止水的侵蚀和进行底板的治理成为软岩巷道支护的重要问题。

(2) 围岩变形有明显的空间效应

其一表现为围岩与掘进工作面的相对位置对其力学状态的影响,通常在距工作面1倍巷宽以外的地方就基本上不受掘进工作面的制约;其二表现为巷道所在深度不仅对围岩的变形或稳定状态有明显影响,而且影响程度比坚硬岩层大得多。

(3) 围岩变形有明显的时间效应

表现为初始变形速度很快,变形趋向稳定后仍以较快速度产生流变,且持续时间很长,有时达数年之久。如不采取有效的支护措施,则由于围岩变形急剧加大,势必导致巷道失稳破坏。这种变形特性明显地表现出蠕变的三个阶段,即减速蠕变、定常蠕变和加速蠕变。

软岩工程中围岩变形的时间效应可分为以下4种基本模式(见图1-1)。

I——流变稳定模式,也可称为有效支护模式。这种模式的特点是:围岩的变形速度随时间增长

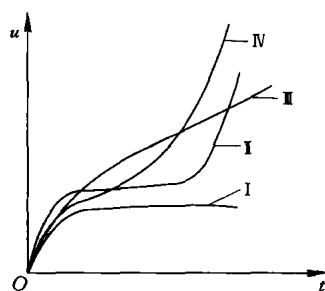


图 1-1 围岩流变基本模式

不断衰减,并逐步趋于零。这是围岩稳定性控制所希望的变形模式。

Ⅱ——流变稳定启动模式。这种模式的特点是:围岩变形速度随时间增长不断衰减,并趋于零。但是,当受到外部作用力或其他环境变化(如水)作用时,围岩变形会再次启动。往往再次启动变形具有突发性和快速不可控制性。

Ⅲ——长期流变模式。这种模式的特点是:在工程开挖后的初期,围岩变形速度较快,经一段时间后变形速度会有所收敛,但变形总不停止。这是软岩工程中最常见的一种模式。

Ⅳ——流变破坏模式。这种变形模式的特点是:围岩变形速度随时间增长不仅不收敛,相反会不断增长,往往是以围岩失稳、工程破坏为结局。这是一种完全失控的围岩变形模式。

此外,软岩巷道的自稳时间短,这主要取决于围岩暴露面的形状和面积、岩体的残余强度和原岩应力。由于上述因素的差异,松软围岩的自稳时间通常为几十分钟到十几小时,有的顶板一经暴露就立即冒落。因此在决定巷道掘进方法和支护措施时必须考虑到巷道围岩的自稳时间。

随着能源、交通、国防等行业的迅速发展,全球性地下工程的开发利用势在必行,“21 世纪将是地下工程世纪”。目前军工、冶金、交通、煤炭、水利等各行业地下工程的规模和深度均呈增大趋势,特别是煤炭行业,矿井开采深度还在逐年增加,深部地压越来越突出。目前我国多数煤矿的开采深度已由 20 世纪 50 年代平均不到 200 m 增加到 90 年代的 600 m,相当于平均每年以 10 m 的速度向深部发展;生产矿井 1980 年平均深度为 288 m,而 1995 年平均深度为 428 m,现在已达 500 m 左右,相当于每年以 8~12 m 的速度向更深部发展。据统计,我国已有平顶山、淮南和峰峰等 43 个矿区的 120 座矿井开采深度超过 600 m,已经进入深部开采(Deep Mining)的范畴,其中开滦、北票、新汶、

沈阳、长广、鸡西、抚顺、阜新和徐州等矿区的 25 座矿井开采深度超过 800 m,而开采深度超过 1 000 m 的有开滦矿业集团赵各庄煤矿(1 159 m)、沈阳矿业集团彩屯煤矿(1 197 m)、新汶矿业集团孙村煤矿(1 055 m)和北票矿业集团冠山煤矿(1 059 m)等。因此,可以预计,在今后 10 年内,现有的大部分矿井都将进入深部开采。

深井高应力软岩的普遍出现,进一步推动了煤炭系统的软岩研究向纵深层次发展,产生并形成了以“松动圈理论”和“联合支护理论”等为代表的多个学派。然而,尽管国内外学者对软岩工程进行了大量的科研工作,但是,由于软岩问题研究的复杂性,目前不仅软岩支护设计仍然停留在经验的工程类比和试验基础上,甚至软岩支护的范畴还存在争论,其争论的焦点是:依据岩层天然的基本特征,还是依据围岩变形破坏情况,或是依据巷道支护的难易程度来划分软岩支护的范畴。

1.2 煤矿软岩工程的特点

1.2.1 地下工程特点

地下工程是在岩石或者土体中开挖构筑的结构,所处的环境和受力条件与地面工程有很大不同,因此沿用地面工程的设计理论和方法来解决地下工程问题,显然不能正确地处理地下工程中出现的各种力学现象,当然也不可能由此作出合理的支护设计。

与地面工程相比,地下工程在很多方面具有完全不同的受力特点,主要体现在以下几方面:

(1) 工程受力特点不同

与地面工程先有结构后有荷载不同,地下工程是先有荷载后有结构。地下工程是在自然状态下的岩土地质体内开挖的,因而地下工程开挖之前就存在着地应力环境,这种地质环境对支护结

构设计有着决定性意义。地下工程的地质环境包括地质体的形成及其经历、工程地质和水文地质状况、原岩应力场及地质体的物理和力学特性。

(2) 荷载的不确定性

地面结构的荷载比较明确,一般只由结构来承受,而且荷载的量级不大。与地面结构不同,地下工程上的荷载取决于当地的地应力,但地应力不仅测试困难,而且很难测准。所以,一般地下工程不做地应力量测,这就使地下工程的计算精度受到影响。不仅如此,地下工程周围的地质体不仅会对支护结构产生荷载,同时它本身又是一种承载体。作用在地质体上的原岩应力是由地质体本身和支护共同来承载的,而作用在支护结构上的压力除与原岩应力有关外,还与地质体强度、采用的施工方法和施工时间、支护的形式与尺寸及硐室形状等因素有关。因此,充分发挥地质体自身的承载力是地下支护结构设计的一个根本出发点。

(3) 材料特性的不确定性

地面工程中的材料多为人工材料,如钢材、钢筋混凝土等,这些材料的物理力学参数可通过试件测试获得,而地质体力学参数与试件力学参数往往有很大不同,试件力学参数不能正确反映地质体力学参数,因此,地质体力学参数一般要通过现场测试,不仅难以进行而且不同地段区别很大,这也使地下工程的计算精度受到影响。因此对地下工程来说,只有正确认识地质环境对支护结构体系的影响,才能科学地进行支护结构的设计。

(4) 破坏模式的不确定性

地面结构破坏模式一般容易确定,而地下工程破坏模式一般难以确定,它不仅取决于岩土体结构、地应力环境等,还取决于支护结构安全与否。既要考虑到支护结构能否承载,又要考虑围岩会不会失稳,这两种原因都能最终导致支护结构破坏。支护结构的承载力可由支护材料强度来判断,但围岩是否失稳至今没有准