

中国煤矿软岩巷道工程 支护设计 与 施工指南

何满潮 孙晓明 著



科学出版社

www.sciencep.com

中国煤矿软岩巷道工程 支护设计与施工指南

何满潮 孙晓明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在 10 多年来软岩工程力学理论与工程实践研究的基础上,汇集了煤炭、冶金系统软岩巷道工程支护研究理论和实践经验的最新成就撰而成的。本书从现场软岩巷道工程设计施工的实用性出发,明确阐述了软岩的概念及分类,系统介绍了软岩矿井巷道工程支护理论及设计方法,集中体现了中国矿业软岩巷道工程施工的新技术、新方法、新工艺。本书理论依据系统、设计方法可靠、施工技术全面、监测手段完备。

本书可作为从事软岩巷道工程设计与施工的现场工程技术人员和工程管理人员的培训教材,特别是本书中的智能设计系统,既有分析设计的功能,又有自动编写报告的功能,把基层工程技术人员从繁琐的劳动中解放出来,大大提高工作效率。本书也可供高校师生、研究院所及设计部门的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南/何满潮,孙晓明著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-012621-1

I. 中… II. ①何… ②孙… III. ①煤矿开采-软弱岩石-巷道-设计-指南 ②煤矿开采-软弱岩石-巷道-工程施工-指南 IV. TD822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 118680 号

责任编辑:毕 颖 吴伶伶 / 责任校对:张 琪

排版制作:科学出版社编务公司 / 责任印制:安春生 / 封面设计:黄华斌

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2004 年 4 月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 1~3 000 字数: 343 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

软岩问题从 20 世纪 60 年代起就作为世界性难题被提了出来,特别是煤矿软岩问题一直是困扰煤矿生产和建设的重大难题之一。中国煤炭行业每年巷道掘进量约 6000km,其中 10%以上的巷道为软岩巷道。由于多年的开采,浅部易开采的煤炭资源日益减少,所以不得不转向开采深部煤炭资源。随着开采深度的增加,软岩矿井的数量也在不断增多。目前,全国 30 多个矿区存在着软岩巷道支护问题,特别是“九五”期间中国新开发的 10 个能源建设基地中有 8 个都相继出现了软岩巷道支护问题,有些矿井处理不当,建设困难,甚至有的停产停建。每年约 600km 软弱围岩中开掘的巷道,随着开采深度的增加,其支护问题愈趋严重,直接影响煤矿安全生产,危及人身安全。

软岩工程是指与塑性大变形工程岩体有关的岩体工程,如软岩边坡工程、软岩隧道及软岩巷道工程等。软岩工程和其他工程有显著不同,一般的工程重点研究塑性破坏之前的稳定性规律,而软岩工程则是研究进入了塑性破坏状态的软岩和支护体相互作用达到稳定的规律。这正是软岩工程的特色与难度所在。中国煤矿软岩工程技术的发展起始于矿产资源开发工程。20 世纪 50 年代末,煤矿软岩问题在部分矿区开始出现,20 世纪 70 年代有所增加,引起了有关科研、建设部门的重视。到 20 世纪 80 年代,煤矿开采深度日益加大,深井高应力软岩普遍出现,更推动了煤炭系统的软岩研究向纵深层次发展,初步形成了“联合支护理论”和“松动圈理论”等多个学派。20 世纪 90 年代以后,除了煤炭系统又有新的研究成果之外,软岩滑坡问题、软岩隧洞及隧洞群稳定问题、软岩基坑问题的研究也取得了新的进展。作为全国性软岩工程技术研究繁荣的标志是 1995 年中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会的诞生,和 1996 年全国煤矿软岩工程技术研究推广中心的成立,这一切都有力地推动了中国煤矿软岩工程技术的研究,并取得了一系列的科研成果。

然而,由于多年来关于软岩的概念、软岩工程设计等理论问题,国内外尚无定论,给工程应用带来了诸多不便。特别是科技力量的不足、研究手段的简单、软岩巷道设计与施工理论的陈旧,不能满足基建生产单位实践指导的需要,大部分基层生产单位处理软岩问题时,仍处在经验支护状态,盲目性大、针对性差、成功率低,给煤炭安全生产带来危害,延误了工期,造成了大量的资金浪费,严重影响企业经济效益。

1985 年作者在珲春矿区开始了软岩的研究。此后,在董方庭、陆家梁、王同良、冯豫、郑雨天等中国老一代著名软岩专家和著名大变形力学专家陈至达教授

的指导下,进行了 10 多年的理论与实践研究,运用工程地质学和现代大变形力学相结合的方法,找出了软岩巷道 13 种变形力学机制及其支护力学对策,解决了软岩复合型变形机制转化为单一型的关键技术,建立了软岩大变形力学设计方法,形成了软岩工程力学理论体系。研究成果已推广应用于煤炭、水利、国防等 22 个工程单位 31 项关键工程,推广区域跨越河南、河北、山东、山西、内蒙古、辽宁、广西、云南、广东等多个地区,并已推广应用到国外的软岩巷道工程和软岩边坡工程,取得了显著的经济效益和社会效益,极大地推动了软岩工程领域的技术进步。

为进一步推广软岩工程理论与技术的研究成果,本书以软岩工程力学理论为核心,从现场软岩巷道工程设计施工的实用性出发,明确阐述了软岩的概念及分类,系统介绍了软岩巷道工程支护基本理论,详细阐述了一般软岩巷道工程锚网索耦合支护、软岩硐室及交叉点柔层支护、软岩泵房吸水井集约化设计等软岩巷道工程设计与施工,以及软岩巷道底臃机理及防治对策、软岩巷道施工工艺及质量管理、软岩巷道支护监测技术、软岩巷道锚杆支护智能设计系统,集中总结和反映了 10 年来软岩巷道工程的新技术、新设计、新工艺。本书的出版发行,为中国煤矿从事软岩巷道工程设计与施工的现场工程技术人员、工程管理人员以及从事岩石力学的高校师生、科研院所的研究人员和设计部门的设计人员进行软岩巷道工程支护实践与研究,提供了具有理论与实践意义的参考教材。

本书是本人及所领导的课题组 10 多年来关于软岩巷道工程设计与施工方面最新研究成果的总结。该成果荣获 2001 年度国家科技进步二等奖,列入了 1996-2001 年中国高校重大科技成果,载入了 2002 年度中国首次发布的《科学发展蓝皮书》重大成果篇。本人的研究生孙晓明博士在编写过程中做了大量工作。段庆伟博士后、王树仁博士研究生、曹伍富博士研究生等对本著作也做出了一定贡献。方祖烈教授、董方庭教授、王同良教授级高工、夏家腾教授级高工、薛顺勋高工、聂孟荀编审审阅了全书并提出了许多宝贵意见;本著作的理论研究得到了国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(No.50001402)、教育部科学技术研究重大项目(10405)、国家杰出青年科学基金(No.59825114)和高等学校博士学科点专项科研基金(2000029005)的资助,受到了中国煤炭工业技术委员会的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免存在一些缺点和不足,恳请专家、学者不吝批评和赐教。

何满潮

2003 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 中国煤矿软岩巷道工程的现状及特点	1
1.1.1 中国煤矿软岩巷道工程的现状	1
1.1.2 中国煤矿软岩巷道工程的特点	2
1.2 煤矿软岩巷道工程支护的研究现状	4
1.2.1 软岩巷道工程支护理论的研究现状	4
1.2.2 软岩巷道工程设计的研究现状	8
1.2.3 软岩巷道工程支护技术的发展现状	9
1.3 编写本书的目的及原则	9
1.3.1 编写目的	9
1.3.2 适用范围	10
1.3.3 基本原则	10
1.3.4 应遵守的其他标准	10
第 2 章 煤矿软岩巷道工程支护的基本理论	11
2.1 软岩的概念	11
2.1.1 概述	11
2.1.2 工程软岩的概念	13
2.2 软岩的基本力学属性	14
2.2.1 软化临界荷载	14
2.2.2 软化临界深度	14
2.2.3 软岩两个基本属性之间的关系	14
2.2.4 软化临界荷载与软化临界深度的确定方法	15
2.3 软岩的工程分类体系	16
2.3.1 软岩矿井的分类	16
2.3.2 软岩的分类与分级	17
2.3.3 软岩软化程度的分类	19
2.3.4 软岩巷道工程的分类	20
2.4 软岩的工程力学特性	21
2.4.1 可塑性	21
2.4.2 膨胀性	22
2.4.3 崩解性	23

2.4.4	流变性	24
2.4.5	易扰动性	28
2.5	软岩巷道工程变形力学机制	28
2.5.1	物化膨胀型的变形力学机制	29
2.5.2	应力扩容型的变形力学机制	33
2.5.3	结构变形型的变形力学机制	35
2.6	软岩巷道工程支护原理	35
2.6.1	软岩巷道工程支护技术的关键	35
2.6.2	软岩巷道工程支护原则	35
2.6.3	软岩巷道工程支护原理	37
2.6.4	最佳支护时间和最佳支护时段	38
2.6.5	软岩巷道工程关键部位	39
2.7	软岩巷道工程支护设计方法	42
2.7.1	软岩巷道工程非线性大变形力学设计的理论基础	42
2.7.2	软岩矿井总体巷道布局设计原则	49
2.7.3	软岩巷道工程非线性大变形力学设计方法	53
第3章	一般软岩巷道锚网索耦合支护的设计与施工	56
3.1	锚网索耦合支护的概念	56
3.1.1	概念	56
3.1.2	耦合支护的基本特征	57
3.2	锚网索耦合支护原理	58
3.2.1	锚杆围岩耦合支护原理	58
3.2.2	锚网围岩耦合支护原理	61
3.2.3	锚索关键部位耦合支护原理	64
3.3	锚网索耦合支护设计的步骤	65
3.4	锚网索耦合支护设计的内容	66
3.4.1	地质力学评估	67
3.4.2	软岩类型判别	68
3.4.3	耦合对策设计	73
3.4.4	耦合过程设计	76
3.4.5	耦合参数设计	82
3.5	锚网索耦合支护的施工	89
3.5.1	锚网初次耦合支护	89
3.5.2	锚索二次耦合支护	90
3.5.3	反馈设计	91
3.6	应用案例分析	93

3.6.1	工程概况	93
3.6.2	锚网索耦合支护设计	95
3.6.3	应用效果	101
3.7	一般软岩巷道锚网索耦合支护技术特点	101
第4章	软岩硐室及交叉点刚柔层支护的设计与施工	103
4.1	强膨胀软岩预留刚柔层支护的设计与施工	103
4.1.1	强膨胀型软岩巷道变形破坏的特点	103
4.1.2	预留刚柔层支护及其力学原理	104
4.1.3	预留刚柔层支护的设计	105
4.1.4	预留刚柔层支护的施工	106
4.1.5	应用案例	106
4.1.6	预留刚柔层支护的技术特点	109
4.2	高应力软岩预留刚隙柔层支护的设计与施工	109
4.2.1	高应力软岩巷道变形破坏的特点	109
4.2.2	预留刚隙柔层支护及其力学原理	110
4.2.3	预留刚隙柔层支护的设计	111
4.2.4	预留刚隙柔层支护的施工	112
4.2.5	应用案例	113
4.2.6	预留刚隙柔层支护的技术特点	116
4.3	大断面交叉点柔层桁架支护设计与施工	116
4.3.1	大断面交叉点变形破坏特点	116
4.3.2	常规支护存在的问题	120
4.3.3	柔层桁架支护及其力学原理	120
4.3.4	柔层桁架支护设计	123
4.3.5	柔层桁架支护施工	124
4.3.6	应用案例	124
4.3.7	柔层桁架支护的技术特点	127
第5章	软岩泵房吸水井集约化设计与施工	128
5.1	常规设计存在的问题	128
5.2	软岩泵房吸水井集约化设计原理	129
5.2.1	设计指导思想	129
5.2.2	设计原理	129
5.2.3	设计序列	130
5.3	软岩泵房吸水井集约化设计的内容	130
5.3.1	等效设计计算	131
5.3.2	吸水阻力校核	132

5.3.3	组合吸水井布置	135
5.3.4	配套吸水管路铺设	139
5.3.5	配套水闸门	140
5.3.6	配套支护设计	143
5.4	软岩泵房吸水井集约化设计技术特点	143
第 6 章	软岩巷道底臃的机理及防治对策	145
6.1	软岩巷道底臃的机理	145
6.1.1	软岩巷道底臃的特征	145
6.1.2	软岩巷道底臃的分类	145
6.1.3	软岩巷道底臃的机理	147
6.1.4	影响底臃的主要因素	154
6.2	软岩巷道底臃支护荷载的确定方法	155
6.2.1	软岩巷道底板的稳定性判别	155
6.2.2	底板支护荷载的确定	156
6.3	软岩巷道底臃的防治方法	159
6.3.1	底臃防治原则	159
6.3.2	防治水措施	160
6.3.3	卸压措施	161
6.3.4	支护措施	161
第 7 章	软岩巷道施工工艺及质量管理	164
7.1	软岩巷道施工基本原则	164
7.1.1	施工程序	164
7.1.2	施工组织设计	164
7.1.3	施工的基本原则	164
7.2	软岩巷道掘进施工方法	165
7.2.1	掘进施工方法分类	165
7.2.2	机掘法	166
7.2.3	钻爆法	166
7.3	锚杆支护	166
7.3.1	锚杆类型	166
7.3.2	树脂锚杆构件及其作用	168
7.3.3	其他常用锚杆	175
7.3.4	锚杆系统	187
7.3.5	锚杆支护的力学指标	188
7.3.6	锚杆支护设计注意事项	189
7.3.7	锚杆支护施工	190

7.4 锚索支护	193
7.4.1 锚索类型	194
7.4.2 锚索结构	194
7.4.3 树脂锚索支护施工	196
7.4.4 注浆锚索的施工工艺	199
7.5 喷射混凝土支护	201
7.5.1 喷射混凝土材料及配合比	201
7.5.2 喷射混凝土的主要工艺参数	204
7.5.3 喷射混凝土支护施工工艺	207
7.6 金属支架支护	211
7.6.1 金属支架类型	211
7.6.2 背帮护顶	213
7.6.3 金属支架施工	214
7.7 其他辅助支护	214
7.7.1 硐体支护	214
7.7.2 弧板支护	216
7.8 施工质量管理与工程验收	216
7.8.1 施工质量管理	216
7.8.2 工程验收	219
第8章 软岩巷道支护监测技术	220
8.1 监测的目的及内容	220
8.1.1 支护监测的目的	220
8.1.2 支护监测的内容	220
8.2 巷道围岩表面位移观测	221
8.2.1 测点布置及安设	221
8.2.2 测量方法	222
8.2.3 测量仪器	222
8.2.4 监测数据处理及应用	224
8.3 巷道围岩深部位移监测	225
8.3.1 监测目的	225
8.3.2 监测仪器及方法	225
8.3.3 监测数据处理及应用	229
8.4 顶板离层监测	232
8.4.1 监测目的	232
8.4.2 监测仪器	232
8.4.3 观测频度	239

8.4.4 监测数据处理及应用	239
8.5 锚杆施工质量监测	240
8.5.1 监测内容及目的	240
8.5.2 锚杆的锚固力检测	240
8.5.3 锚杆荷载观测	246
8.5.4 锚杆施工质量评定	247
8.6 巷道喷层质量监测	248
8.6.1 喷射混凝土层强度检测	248
8.6.2 喷射混凝土层厚度检测	250
8.7 信息反馈	250
8.7.1 数据处理	250
8.7.2 反馈与分析	251
8.7.3 软岩巷道稳定性预测	252
8.7.4 异常数据信息反馈及处理	252
第9章 煤矿软岩巷道支护智能设计系统	253
9.1 系统介绍	253
9.1.1 系统输入数据及结果数据类型	253
9.1.2 系统的安装	255
9.1.3 系统的启动	255
9.1.4 系统的运行	256
9.2 系统运行环境	269
9.3 系统功能特点	269
9.3.1 可视化的界面与多任务的执行	269
9.3.2 简单的操作与安全的运行保障	270
9.3.3 严格的执行控制与友好的用户提示	270
9.3.4 强大的图形绘制功能	270
9.3.5 完备的表格及曲线绘制功能	273
9.3.6 方便快捷的报告自动形成功能	275
参考文献	277

第 1 章 绪 论

煤矿软岩巷道工程是软岩工程的一个主要组成部分。软岩工程是指与塑性大变形工程岩体有关的岩体工程,如软岩边坡工程、软岩隧道及软岩巷道工程等^[1]。由于软岩巷道工程所处的复杂工程地质条件,其支护问题一直是困扰我国煤炭生产的一个主要问题^[2]。

目前,中国原煤年产量为 11 亿吨,位于世界首位。与之配套的巷道掘进量每年约 6000km,其中 10%以上的巷道为软岩巷道^[3]。同时,由于多年的开采,浅部易开采的煤炭资源日益减少,所以不得不转向开采深部煤炭资源。据有关统计表明^[3,4],中国立井深度在 20 世纪 50 年代平均不到 200m,而 90 年代平均已达 600m,相当于平均每年以 10m 的速度向深部发展;生产矿井 1980 年平均深度为 288m,而 1995 年平均深度为 428m,平均年降深为 9.39m。随着开采深度的增加,软岩矿井的数量也在不断增多。从中国北方的内蒙古大雁矿区到南方的广西那龙矿区,从西部的新疆九道岭矿区到东部的山东龙口矿区,从古生代石炭二叠纪的煤系地层逐步发展到中生代侏罗纪煤系地层,以及到新生代第三纪煤系地层,都出现了软岩工程问题。铁矿矿山、非金属矿山、膨润土矿山也出现了软岩问题。因此,软岩工程问题引起岩石力学工程界、矿业开采界的重视和关注。

1.1 中国煤矿软岩巷道工程的现状及特点

1.1.1 中国煤矿软岩巷道工程的现状

1. 地理分布范围广

中国煤矿煤系地层中,具有软岩的矿井分布十分广泛^[5,6]。北起黑龙江、内蒙古,南到广东、广西,东起山东、浙江,西到新疆、青海,具有软岩的矿井遍布全国各主要产煤省区,近半数的矿务局存在软岩矿井,有的矿务局甚至大部分或全部矿井是软岩矿井。据不完全统计^[3],有软岩的矿务局有黑龙江的鹤岗、鸡西,吉林的辽源梅河矿区、通化、舒兰、珲春,辽宁的抚顺、阜新、铁法、沈阳,内蒙古的扎赉诺尔、大雁、平庄,河北的开滦、邢台、邯郸、峰峰,山东的龙口、新汶,河南的平顶山、郑州,江苏的徐州、大屯,浙江的长广,安徽的淮南、淮北,江西的萍乡,湖南的涟邵,四川的芙蓉、松藻,贵州的盘江、水城、六枝,云南的田坝、小龙潭、昭通,广东的茂名,广西的那龙、右江,陕西省的铜川、韩城,甘肃的靖远、华亭、阿干,新疆的乌鲁木齐,宁夏的石嘴山,青海的大通,

以及近期发展起来的几个露天矿如霍林河、伊敏河、元宝山等，还有相当数量的地方矿等。随着中国第三纪新生代煤田的开采及老矿井采深的增加，软岩煤矿的数量和分布范围将会继续增加和扩大。

2. 跨越地质年代长

中国煤矿软岩的赋存，伴随着煤炭沉积的几个主要成煤时代。自古生代石炭二叠纪，中生代的三叠纪、侏罗纪、白垩纪到新生代的第三纪均有软岩赋存。由于生成地质年代不同，受区域构造影响不同，变质程度与成岩胶结作用不同，中国软岩各具特色，并具有明显的时代痕迹。

古生代软岩多分布在中国华北、华东地区。其特征是以海相沉积为主，岩石的组成多以石灰岩、泥岩、砂质泥岩、页岩为主。岩石结构多以块状、层状为主，一般岩石胶结程度较好。黏土矿物以高岭石(kaolinite)、伊利石(illite)为主，蒙脱石(montmorillonite)一般较少，也有部分岩层含伊-蒙混层，含量多在5%~15%，相对膨胀性稍差。受区域地质构造影响和多次构造影响的叠加，浅部及中深部软岩特征不甚明显，深部多数为高应力破碎软岩。

中生代软岩在大兴安岭以西、阴山以北均有分布。其特征是：岩石以陆相沉积为主，比古生代岩层成岩时间短，受构造破坏影响相对较小，成岩胶结程度较差。黏土矿物以伊利石和伊-蒙混层矿物为主。部分矿区蒙脱石含量较高，可达20%~35%，遇水泥化，有膨胀性。岩石结构多为层状、块状、破碎状结构。

新生代第三纪软岩分布广泛。吉林、内蒙古、辽宁、山东、广东、广西、云南、新疆均有第三纪软岩存在。岩石成岩时间短，胶结程度差，强度低。黏土矿物以蒙脱石为主。一般含量为15%~45%，最高可达70%，岩石亲水性强，有的膨胀性显著，物理化学活性强，风化耐久性差，遇水易解体成软泥。

3. 成因和结构复杂

按成岩情况，中国软岩有沉积形成的厚层状、薄层状、间层状、夹层状软岩，有火成岩低温蚀变及火山灰转化和断层泥状的软岩。其膨胀性、胶结性和物化活性各具特色。

按岩石的结构状态有软弱型、松散型、破碎型及膨胀型软岩。

1.1.2 中国煤矿软岩巷道工程的特点

和铁路、水电、公路等硐室、隧道工程相比，中国煤矿软岩巷道有如下特点：

1. 围岩软, 强度低

煤作为一种沉积矿产, 与沉积岩共生, 而且由于沉积韵律的控制, 煤层顶、底板往往是泥质岩, 其强度一般较低。

2. 膨胀性

煤矿软岩组分中一般含有大量的膨胀性矿物, 岩石强度低, 易风干脱水而产生塑性流变, 尤易遇水变形、崩解、膨胀。煤矿中的一些泥岩属于此种岩类, 是工程中最难处理的一种有代表性的岩体。

3. 深度大, 应力水平高

铁路、水电、公路等硐室、隧道工程多在浅部开挖, 地应力水平较低。然而, 煤矿的开采深度目前多在 500~600m, 超过 1000m 的矿井也越来越多。有些矿井在浅部开采时, 软岩问题并不明显, 但是到了深部以后, 在高应力的作用下, 软岩的大变形、大地压和难支护的现象明显地显露出来。

4. 无可选择性

由于煤系地层的赋存条件、沉积环境以及地质构造应力等的影响, 煤矿软岩问题不可避免。例如, 煤层顶、底板一般是含有大量膨胀性矿物的泥页岩, 由于软岩膨胀而产生的变形破坏在所难免, 要维持巷道围岩的稳定就必须采取相应的支护对策。另外, 矿井开拓超过一定深度后, 软岩问题就更突出。

5. 动荷载作用

由于受到施工扰动、放炮震动、煤层开采等动荷载的作用以及相邻巷道施工和支护效果的影响, 巷道或硐室围岩的受力状况进一步恶化, 加大了支护的难度。

6. 时限性

煤矿不同用途的巷道与硐室, 其服务年限各不相同。对于开拓巷道, 如井底车场、主要大巷等巷道和硐室, 将服务于整个矿井, 服务年限可以是几十年; 采区上、下山等巷道服务于整个采区, 服务年限一般为十几年; 对于采区顺槽, 它只服务于该采面, 服务年限一般为 1 年左右。因此, 煤矿软岩巷道有其明显的时限性。

1.2 煤矿软岩巷道工程支护的研究现状

中国煤矿软岩巷道的特点,使得软岩巷道支护问题成为困扰中国煤矿生产建设的重大问题之一。由于软岩巷道支护不当而造成的巨大的返修量不仅造成很大的经济浪费,而且使整个矿井生产陷于困境,甚至关闭。据不完全统计,“九五”10个能源建设项目,有8个出现软岩问题(平庄古山、大雁三矿大井、焦作古汉山、鹤壁冷泉、井陉元氏矿、鸡西荣华矿、铁法三台子二井、龙口浏海矿)。全国30多个矿区已相继出现软岩问题。由于软岩问题愈趋严重,直接影响煤矿生产,危及人身安全,因此关于软岩支护问题的研究得到了广泛关注,并取得了大量的研究成果。

1.2.1 软岩巷道工程支护理论的研究现状

1. 国外研究现状

(1) 古典压力理论

20世纪初发展起来的以海姆(A. Haim)、朗金(W. J. M. Rankine)和金尼克(A. H. Иник)理论^[7,8]为代表的古典压力理论认为:作用在支护结构上的压力是其上覆层的质量 γH 。其不同之处在于:海姆认为侧压系数为1,朗金根据松散体理论认为是 $\tan^2(45-\phi/2)^\circ$,而金尼克根据弹性理论认为是 $\mu/(1-\mu)$,其中 μ 、 ϕ 、 γ 分别表示岩体的泊松比、内摩擦角和体积质量。

(2) 坍塌拱理论

随着开挖深度的增加,人们发现古典压力理论在许多方面都有不符合实际之处,于是,坍塌拱理论应运而生,其代表有太沙基(K. Terzaghi)和普氏(M. M. Протоџьяконов)理论^[9]。坍塌拱理论认为:坍塌拱的高度与地下工程跨度和围岩性质有关。太沙基认为坍塌拱形状为矩形,而普氏则认为坍塌拱形状呈抛物线形。坍塌拱理论的最大贡献是提出巷道围岩具有自承能力。

20世纪50年代以来,人们开始用弹塑性力学来解决巷道支护问题,其中最著名的是芬纳(R. Fenner)^[10]公式和卡斯特纳(H. Kasterner)^[11]公式。

(3) 新奥法

20世纪60年代,奥地利工程师L. V. Rabcewicz在总结前人经验的基础上,提出了一种新的隧道设计施工方法,被称为奥地利隧道新施工方法(new austrian tunneling method, NATM),简称新奥法^[12]。

新奥法目前已成为地下工程的主要设计施工方法之一。1978年,米勒

(L. Müller)教授比较全面地论述了新奥法的基本指导思想和主要原则,并将其概括为22条。

1980年,奥地利土木工程学会地下空间分会把新奥法定义为:在岩体或土体中设置的使地下空间的周围岩体形成一个中空筒状支撑环结构为目的的设计施工方法。新奥法的核心是利用围岩的自承作用来支撑隧道,促使围岩本身变为支护结构的重要组成部分,使围岩与构筑的支护结构共同形成为坚固的支撑环。

新奥法自奥地利起源之后,先后在欧洲诸国,特别是在意大利、挪威、瑞典、德国、法国、英国、芬兰等大量修建山地与城市隧道的国家得以应用与发展,然后,世界各国,特别是亚洲的日本、中国、印度;北美的美国、加拿大;南美的巴西、智利;非洲的南非、莱索托以及大洋洲的澳大利亚、新西兰等国都成功地把它应用于一些不同地质情况下的隧道施工之中,并且从最初的隧道施工扩展到采矿、冶金、水力电力等其他岩土工程领域。

虽然新奥法的应用已如此广泛,但不同的应用者对它的解释还存在着许多矛盾^[13-15]。实际工程中存在着一种倾向,就是盲目地把新奥法应用于不适宜的地质条件,从而使这些巷道工程出现这样或那样的问题。这种情况在中国也同样存在,尤其是煤矿,人们对软岩的物理含义和力学性质理解不够、对利用仪器进行巷道变形及荷载测量的重要性认识不足,不仅时常出现不合理地套用新奥法理论来解释煤矿采动影响巷道、极软弱膨胀松散围岩巷道的支护机理,而且也出现过因应用新奥法不当,而造成锚喷或锚喷网支护的巷道大面积垮落、坍塌等事故,导致人力、物力的巨大浪费与损失。

(4) 应变控制理论

日本山地宏和樱井春辅提出了围岩支护的应变控制理论^[7]。该理论认为:隧道围岩的应变随支护结构的增加而减小,而允许应变则随支护结构的增加而增大。因此,通过增加支护结构,能较容易地将围岩应变控制在允许应变范围内。支护结构的设计则是在由工程测量结果确定了对应于应变的支护工程的感应系数后确定的。

(5) 能量支护理论

20世纪70年代,萨拉蒙(M. D. Salamon)等又提出了能量支护理论,该理论认为^[7,16-18]:支护结构与围岩相互作用、共同变形,在变形过程中,围岩释放一部分能量,支护结构吸收一部分能量,但总的能量没有变化。因而,主张利用支护结构的特点,使支架自动调整围岩释放的能量和支护体吸收的能量,支护结构具有自动释放多余能量的功能。

(6) 数值计算法

目前,数值计算方法的发展日趋成熟^[19-22],如有限单元法、边界元法、离散元法等,以此为理论基础的计算软件大量涌现,如ADINA、NOLM、FINAL、

UDEC、SAP、FLAC 等程序都为广大用户所熟知,这些软件与一些支护理论相结合,在地下工程支护中得到了广泛的应用。

2. 国内研究现状

中国软岩巷道支护系统研究工作始于 1958 年春,北京市西部九龙山向斜北翼安家滩井田西部近向斜长轴处,木支架大巷遇到灰黑色泥岩,发生强烈底臌,后改用五节棚支护,再加底梁,均无效,巷道失稳而报废。自此上报,提出软岩支护难题。后开发辽宁的沈北矿区,在前屯矿建设时出现井口大变形,支护挤裂,无法继续掘进,停工维修,前掘后塌,停掘返修,工程难前进而报废,以致停工数年。此后,该矿区的蒲河矿、大桥矿、平庄矿区红庙矿也出现重大软岩技术事故。为此,煤炭部集中了一些科研院所、高校和设计院的技术力量,在前屯矿二、三井和红庙进行了多种巷道支护形式的试验和测试工作,在巷道断面、支护形式及施工工艺等方面都取得了初步经验。

20 世纪 80 年代以来,与软岩工程相关的全国性会议召开了 20 余次,对地下工程软岩问题的理论研究进入了一个新的阶段。中国煤矿矿压专业委员会软岩分会召集全国的软岩科研、施工、生产各方面的专业人员进行交流,起到了很好的组织、交流、提高作用。特别是 20 世纪 90 年代初,中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会以及全国煤矿软岩工程技术研究推广中心的成立,更为软岩工程理论与技术的交流与推广,创造了良好的条件。

(1) 岩性转化理论

中国著名岩土工程专家陈宗基院士在 20 世纪 60 年代从大量工程实践中总结出岩性转化理论^[23,24]。该理论认为:同样矿物成分、同样结构形态,在不同工程环境工程条件下,会产生不同应力应变,以形成不同的本构关系。坚硬的花岗岩,在高温高压的工程条件下,产生了流变、扩容,并指出,岩块的各种测试结果与掩体的工程设计应有明显的区别。强调岩体是非均质、非连续的介质,岩体在工程条件下形成的本构关系绝非简单的弹塑、弹黏塑变形理论特征。

(2) 轴变论理论

于学馥教授等提出轴变论理论^[25],认为:巷道坍塌可以自行稳定,可以用弹性理论进行分析。围岩破坏是由于应力超过岩体强度极限引起的,坍塌是改变巷道轴比,导致应力重分布。应力重分布的特点是高应力下降,低应力上升,并向无拉力和均匀分布发展,直到稳定而停止。应力均匀分布的轴比是巷道最稳定的轴比,其形状为椭圆形。近年来,于学馥教授等运用系统论、热力学等理论提出开挖系统控制理论^[26,27]。该理论认为:开挖扰动破坏了岩体的平衡,这个不平衡系统具有自组织功能。