

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

深部复合型破坏高应力 软岩巷道支护技术

马春德 著



科学出版社

T10

134



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

深部复合型破坏高应力软岩巷道 支护技术

马春德 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对地下资源深部开采过程中深井软岩巷道易发生剪胀、流变、遇水膨胀等多因素复合型破坏,巷道整体失稳,难以长期有效支护的问题,本书以贵州开阳磷矿深部软岩巷道为研究对象,通过实验室和现场测试的方式研究其在多因素耦合作用下的时间效应(大变形流变)、构造效应(倾斜状层理)以及水理弱化效应(含遇水膨胀矿物成分),并结合数值模拟分析等手段,揭示在多种因素耦合作用下该类巷道独特的地压与变形活动规律、围岩体松动圈的时空演化规律以及整体失稳破坏的力学机制机理,为科学合理支护设计提供可靠理论依据。在此基础上,通过研发一种既具有大变形能力又具有强支护能力,同时可精确控制最大允许变形量的新型协调变形吸能锚杆支护元件,设计出适用于此类巷道支护的新型高效一次耦合支护技术措施与方法。最后通过大规模的现场工业试验和巷道稳定性长期动态监测进行支护方案的效果验证和参数优化,最终形成适用于深井软岩巷道支护的完善体系与经济、高效的技术方法,为高应力与复杂环境下深部软岩矿山的安全、高效开采提供可靠的技术保障。

本书理论联系实际,工程实用性较强,可供地下采矿工程、岩土工程等专业方向的研究人员、工程技术人员、高校师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部复合型破坏高应力软岩巷道支护技术 / 马春德著. —北京: 科学出版社, 2016

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-048623-3

I. ①深… II. ①马… III. ①软岩巷道-巷道支护 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126708 号

责任编辑: 张井飞 黄 敏 韩 鹏 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月 第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 6 月 第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 232 000

POD 定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》 编委会

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰 付小兵 郭坤宇 胡 滨 贾国柱

刘 伟 卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪

万国华 王光谦 吴硕贤 杨宝峰 印遇龙

喻树迅 张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

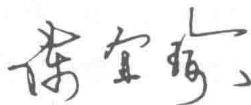
中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过30年的发展，截至2015年底，博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币，资助博士后研究人员5万3千余人，约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的

一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

实践表明：软岩巷道支护难，除了受软岩本身独特物理力学特性和所处的复杂地质力学环境影响外，往往与施工者或工程技术人员对软岩巷道支理论认识不足，对复合型破坏的软岩巷道支护缺乏整体观念和相应的技术手段与措施有关，常常在遇到实际困难时处于被动局面，以致走了不少弯路，给矿山安全生产带来巨大的危害，造成了不必要的人力、物力的浪费。本书从软岩巷道的特征和成因、软岩分类及判别、软岩巷道的维护理论支护技术和方法及巷道监控量测技术等方面进行一些介绍和研究，以期对深部开采中复合型破坏高应力软岩巷道的支护提供有效的解决途径，更好地满足地下软岩矿山安全生产和经济发展的需要。

第1章简要介绍了软岩巷道支护的国内外研究现状，针对国内生产规模最大的磷矿山企业——开阳磷矿深部开采中面临复合型高应力软岩巷道支护技术难题，提出了合理的总体研究思路和解决问题的技术路线。第2章通过开展巷道破坏情况的现场实地调查，掌握了解了开阳磷矿深部矿区的红页岩巷道发生破坏的主要特征和形式，并对其主要变形破坏机制进行了初步分析。第3章阐述了地应力测量对深部矿山安全高效开采的重要意义，并分析说明了高地应力因素是导致开阳磷矿深部软岩巷道难以支护的重要原因之一。本章中使用改造的LUT三维地应力测试系统克服钻孔易变形和岩层中富含地下水等困难对开阳磷矿洋水矿区三维地应力场的分布和变化规律，为后续研究提供了准确、可靠的地应力边界条件。第4章从岩性的角度对该矿主要巷道赋存的典型围岩体——红页岩进行了详细的物理、微观结构、力学及水理特性等多方面测试研究，揭示出红页岩系一种典型的高应力软岩，不但受高应力条件的影响，还受到矿物成分、层理构造、各向异性、水理作用等因素的显著影响，易发生复杂的复合型破坏，其变形破坏机理较为复杂。第5章一方面利用离散元数值模拟软件对深部软岩巷道开挖后围岩应力和位移分布进行了的数值模拟分析计算，揭示了深部软岩巷道围岩变形的发展趋势和规律；另一方面使用自主研发的基于激光测距的大断面巷道收敛变形高效测量装置对新开挖巷道进行了长期的巷道收敛变形的现场监测工作，获得了高应力软岩巷道收敛变形及地压显现规律。研究成果为高应力软岩巷道的安全合理支护设计提供了重要理论依据。第6章使用超声波围岩裂隙探测仪对深部软岩巷道围岩松动圈的

分布特征和演化规律进行了测试研究,并利用围岩松动圈支护理论对深部高应力软岩巷道的变形压力的来源、机理和作用机制进行了分析探讨,为巷道科学合理支护设计提供了重要指导。第7章运用复合型向单一型转化技术方法,提出了一系列解决吸水膨胀、挠曲褶皱型底鼓、高应力破坏等支护难题的方法和手段,并在对最佳支护时间和支护关键部位分析探讨的基础上,研发出的一种适用于高应力大变形岩体支护的波浪式协调变形吸能锚杆。第8章针对矿山原有的支护方案的不足,以前期广泛开展的各项研究成果为依据,提出了适用于该矿深部复合型破坏的高应力软岩巷道的合理支护设计方案,并在新支护方案的现场工业试验印证了良好支护效果。第9章为全书的总结。

本书相关研究内容获得包括国家自然科学基金(51274254)、中国博士后科学基金(2014M552163)及湖南省自然科学基金(2015JJ2172)等多项课题的资助,同时本书编写过程中还得了中南大学李夕兵教授、徐纪成研究员、湖南科技大学王斌副教授、贵州开磷控股(集团)有限责任公司何中国教授级高工等技术人员的无私帮助,在此表示感谢!

希望使用本书的单位和个人多多提出宝贵意见,径寄中南大学高等研究中心,以便再版时修改。

作者

2016年3月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 软岩的定义及分类	3
1.2.2 软岩巷道的主要特征	5
1.2.3 软岩巷道支护理论与支护技术国内外研究现状	6
1.3 开阳磷矿深部井巷支护存在的问题	10
1.4 本书主要研究内容	11
第 2 章 深部软岩巷道破坏情况现场调查与分析	14
2.1 地质条件与巷道破坏现场调查	14
2.1.1 开阳磷矿基本情况概述	14
2.1.2 软岩巷道破坏情况现场调查	14
2.1.3 深部矿区软岩巷道变形破坏特征	18
2.2 所研区域巷道变形破坏的主客观因素	19
2.2.1 客观因素	19
2.2.2 主观因素	20
2.3 所研区域深部巷道底鼓的原因和机理分析	21
2.4 本章小结	22
第 3 章 深部矿区原岩应力场分布规律的测试研究	24
3.1 地应力测量对深部矿山安全高效开采的重要意义	25
3.2 地应力理论及发展概述	26
3.2.1 地应力理论的发展历史	26
3.2.2 影响地应力的主要因素和测量基本原则	28
3.2.3 世界各国地应力测量的研究进展	30
3.2.4 地应力测量在矿山工程中的主要应用	35
3.3 地应力测量方法的选择和确定	36

3.3.1	地应力测量方法的分类与比较	36
3.3.2	测量方法的初步确定	40
3.3.3	孔壁应变解除法的基本原理	41
3.3.4	开阳磷矿地应力测量存在的问题	43
3.3.5	对地应力测量设备的技术改造	44
3.3.6	自制 LUT 三轴应变计探头	48
3.4	矿区原岩应力的现场测试	51
3.4.1	地应力测点的选择确定	51
3.4.2	原岩应力现场测量过程及步骤	53
3.4.3	岩心筒弹性参数测定与计算	57
3.5	三维地应力测量结果与分析	58
3.5.1	专用三维地应力计算程序	58
3.5.2	测点地应力的计算结果	58
3.5.3	矿区主应力的赤平投影图	59
3.5.4	矿区原岩应力场分布规律	60
3.6	本章小结	62
第4章	典型高应力软岩工程力学属性的测试研究	64
4.1	红页岩的矿物成分及微观结构分析	64
4.1.1	页岩的分类	64
4.1.2	红页岩的微观结构描述	66
4.2	红页岩各向异性力学性质测试研究	68
4.2.1	测试的仪器和设备	68
4.2.2	现场取样及试样制备	69
4.2.3	测试内容与测试过程	69
4.2.4	各向异性红页岩试件的测试结果	72
4.3	红页岩水理力学特性的测试研究	73
4.3.1	红页岩吸水性的测试研究	74
4.3.2	浸水时间(或吸水率)对红页岩强度的影响研究	76
4.3.3	红页岩遇水膨胀性试验研究	79
4.3.4	红页岩遇水耐崩解性测试研究	82
4.4	红页岩蠕变特性的试验研究	84
4.4.1	试验方法的选择	84
4.4.2	试验过程	84
4.4.3	试验结果及分析	86

4.5	红页岩复合型变形力学机制分析	87
4.6	本章小结	88
第5章	高应力软岩巷道围岩应力与变形的力学分析	90
5.1	马路坪矿深部高应力软岩试验巷道的数值模拟分析	90
5.1.1	数值模拟方法的选择	91
5.1.2	离散元法的基本方程	92
5.1.3	数值模拟计算模型的建立	93
5.1.4	巷道开挖后围岩应力与变形分析	95
5.2	新开挖软岩巷道变形规律的现场测试研究	100
5.2.1	巷道断面收敛位移监测方案	101
5.2.2	巷道表面位移监测结果	106
5.3	本章小结	108
第6章	高应力软岩巷道围岩松动圈分布特性的测试研究	110
6.1	巷道围岩松动圈的概念	110
6.2	基于围岩松动圈支理论论的软岩巷道支护分析	110
6.2.1	巷道支护载荷分析	111
6.2.2	限制剪胀变形对控制围岩松动圈的作用分析	111
6.2.3	巷道支护对象分析	112
6.3	巷道围岩松动圈分布特性的测试研究	114
6.3.1	围岩松动圈测定对巷道支护设计的作用	114
6.3.2	围岩松动圈测试的仪器设备	114
6.3.3	围岩松动圈的现场测试	116
6.3.4	测试结果及分析	118
6.4	本章小结	122
第7章	复合型破坏高应力软岩巷道支护技术研究	124
7.1	软岩巷道支护的基本原理	124
7.1.1	软岩巷道深部围岩力学形态变化	124
7.1.2	软岩巷道支护的总体思路	125
7.2	红页岩巷道支护对井下水的治理措施	126
7.3	层状底板挠曲褶皱性底鼓控制措施	128
7.3.1	层状岩体底鼓的控制方法	128
7.3.2	层状岩体底鼓的控制方法有效性研究	129
7.4	高应力软岩巷道围岩控制技术的研究	137
7.4.1	高应力软岩巷道围岩控制的主要原则和途径	138

7.4.2	最佳支护时间和最佳支护时段的确定	140
7.4.3	支护关键部位耦合支护理论	143
7.5	加固帮、角控制围岩变形破坏技术研究	145
7.5.1	加固帮、角对控制围岩变形破坏的作用	145
7.5.2	巷道围岩帮、角加固的方法	145
7.6	高应力大变形岩体的协调变形吸能锚杆的研制	146
7.6.1	理想高应力大变形岩体支护锚杆的设计思路	146
7.6.2	波浪式协调变形吸能锚杆的设计研发	147
7.6.3	锚杆的弯曲吸能段波形参数的确定方法	149
7.6.4	新型锚杆的加工制作	151
7.6.5	波浪式协调变形吸能锚杆的安装过程	151
7.7	本章小结	153
第8章	工业试验及效果检验	154
8.1	现有支护方式评价	154
8.2	新支护方案的设计	157
8.2.1	新支护方案设计的依据	157
8.2.2	新支护方案的设计	159
8.3	支护参数的选取	160
8.3.1	支护组件在支护体系中的作用	160
8.3.2	锚杆支护参数的确定	161
8.3.3	混凝土喷层参数的选择	163
8.3.4	护网参数的选择	164
8.3.5	光面爆破参数的选择	164
8.4	支护工业试验	165
8.4.1	工业试验方案布置	165
8.4.2	效果检验	165
8.4.3	支护方案及注意事项	168
8.5	本章小结	170
第9章	结论与展望	171
9.1	结论	171
9.2	展望	173
参考文献	174

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着我国对矿产资源需求的不断增加以及浅部资源的逐渐减少和枯竭,采矿必然向深部开采发展^[1-5]。在金属矿山方面,据不完全统计^[6-9],国内外开采深度超过1000m的金属矿山有近百座,其中以南非最具有代表性。目前,南非绝大多数金矿的开采深度都超过了1000m,其中AngloGold公司的西部深水平金矿采深达到了3700m,West Driefovten金矿的埋藏深度更是达到6000m以上。印度Kolar金矿区的最大采深也已达3260m。俄罗斯克里沃罗格铁矿的开拓深度达到1570m。另外,加拿大、美国、澳大利亚等国的一些金属矿的采深也已超过1000m。近些年,我国的一些地下金属矿山也相继进入深部开采,如金川二矿区开采到1200m以下,铜陵狮子山铜矿采深达1100m,抚顺红透山铜矿已进入900~1100m深度,冬瓜山铜矿深度也达1000m。随着深部开采矿山数量的递增及开采深度的增加,深部矿山事故时常发生^[10],造成了人员和设备的巨大损失。在非金属矿方面,深部开采的类似问题也出现在煤、硫、磷等非金属矿的地下开采中。

与浅部相比,深部岩体赋存于“三高一扰动”的特殊环境中,其中高地应力是最为重要的因素之一^[11-13]。随着矿山开采深度的逐渐增加,地应力的作用表现得越来越明显,如深部高地应力巷道的维护、冲击地压等灾害现象都与地应力有着密切的关系。深部开采中除了要面对硬岩的岩爆灾害外,软岩巷道的支护也是必须要解决的技术难题。软岩巷道围岩在深部高应力条件下表现出显著大变形,工程灾害时常发生,如底鼓、冒顶、围岩大变形流变等;另外,硬岩在深部高地应力的作用下也有脆—延转化的趋势,这些都给深部资源的安全开采带来了相当大的困难。因此,如何解决深部矿山高地应力软岩的支护问题已经成为学术界广泛关注的前沿性课题之一^[14-18]。

软岩巷道支护,一直都是地下井巷工程的难题,在国内外众多的支护专家、学者及工程技术人员的长期不懈努力下,虽然取得了一项又一项的研究成果,但到目前为止,仍然不能说已从根本上解决了问题。我国存在软岩支护问题的地下

金属和非金属矿山分布较广，与浅部开采相比，随着开采深度的逐年增大，原来不难支护的巷道也面临着越来越严重的深井支护难题。

实践表明：软岩巷道支护难除了受软岩本身独特物理力学特性和所处的复杂地质力学环境影响外，往往与施工者或工程技术人员对软岩巷道支护理论认识不足，对复合型破坏的软岩巷道支护缺乏整体观念和相应的技术手段与措施有关，常常在遇到实际困难时处于被动局面，走了不少弯路，严重威胁矿山安全生产，造成了不必要的经济财产损失^[19,20]。本书从软岩巷道的破坏特征、维护理论、支护技术和方法及巷道监控量测技术等方面进行一些介绍和研究，以期对深部开采中复合型破坏高应力软岩巷道的支护提供有效的解决途径，更好地满足地下软岩矿山安全生产和经济发展的需要。

贵州开磷控股（集团）有限责任公司（简称开磷集团）是我国最大的优质磷肥生产基地，目前，其下属的多个地下矿山开采深度达到 600 ~ 800m，主要巷道的支护出现了如下一些问题：原有的支护技术与支护措施有效时间短、效果差，主要运输巷道经常性出现底鼓、片帮、冒顶等现象，支护困难，需要多次返工和维护，总体成本增大对矿山的安全高效开采与经济效益产生了很大的影响。

开磷集团曾经与国内多家科研单位进行过科技攻关合作，以期解决困扰多年的软岩巷道难以有效支护的问题。其间设计提出了多种开挖方式和支护方案，均没有很好地解决巷道围岩发生大变形破坏的问题。究其原因主要在于开磷集团此前从未对矿区的地应力进行过测量，从而无法准确掌握矿区地应力场分布及变化规律，而前期所有的设计只考虑了自重应力或简单乘上侧压系数作为水平构造应力，因此以此为基础进行的计算和数值模拟设计均失去了其真实性的地应力边界条件，那么由此所得到的结论对现场实际施工的指导意义会有多大，效果会有多好就可想而知。因此，开磷集团与中南大学资源与安全工程学院开展技术合作，对整个矿区的地应力分布规律进行测试研究，并在此基础上展开对开阳磷矿洋水矿区深部高应力软岩巷道的支护方法与技术措施的研究。本书就是在这样的基础和背景下进行探索研究的。

1.2 国内外研究现状

在我国地下资源的开发中，许多矿山都面临着软岩工程问题。随着深部开采矿山数量的递增及开采深度的增加，深部矿山事故时常发生，深部高地压与复杂岩性条件下围岩支护已成为安全、高效开采的一个制约瓶颈。究其原因主要是适用于浅部工程的传统力学理论已不能很好地指导深部采矿，缺乏适应于深部环境

的支护技术、采矿工艺和灾害防治体系。据不完全统计,我国的软岩矿山数量多达一二百个,广泛分布在我国各省区。松软岩层的基本特征是松、散、软、弱,相对于坚硬、致密的岩体而言,软岩巷道的支护难度大很多。在软弱破碎岩层中,巷道掘进与支护常常是十分困难的,在巷道竣工不久,就可能严重破坏,需要经常翻修,耗费大量的人力、物力和资金,影响矿井正常运行和企业的经济效益,同时也给矿井安全生产带来巨大的潜在威胁^[21-25]。目前,软岩支护问题引起了世界各方面的关注,已开展了软岩巷道掘进与支护的大量研究^[26-32],在发生单纯膨胀型、流变型或膨胀型破坏软岩巷道的支护技术等方面取得了一定的成绩和经济效益^[33-43]。我国从20世纪80年代末一些高校和研究所也开始了针对深部资源开采的理论和技術方法方面的研究,但是总体来看,我国在深部资源开采方面的研究还十分欠缺,尤其是对深部岩层组织结构、强度、变形、破坏特性的变异以及由此引起的重大事故的机理、预测与防治方面的相关理论问题还缺乏必要的基础研究。但到目前为止,仍然还不能说已根本解决了问题,但对于深部高应力条件下同时发生包含三种破坏类型的复合型破坏的软岩巷道的支护问题的研究则相对较少,它目前已成为一个世界性工程技术难题。因此,有必要对典型软岩及复杂条件下软岩巷道的破坏机理和特性进行研究,以期找到最适合的高效支护方法和工艺。

1.2.1 软岩的定义及分类

1.2.1.1 软岩的定义

目前,在学术界对软岩还没有一个统一准确的定义。国内在井巷掘进与支护领域的专家、学者及工程技术人员都习惯地把“松软岩层”称为“软岩”。相对于坚硬、致密、支护容易的硬岩,其基本特征是松、散、软、弱。松软岩层一般是指强度低、黏结性差、有时遇水膨胀、易风化、自稳能力差的岩层。

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:1990年和1993年,国际岩石力学学会将单轴抗压强度在0.5~25MPa的一类岩石称为软岩。1994年,G. Russo把单轴抗压强度<17MPa的岩石定义为软岩。另外,还有部分学者将 $\sigma_c/\gamma h < 2$ 的岩层称为软岩(式中 σ_c 为单轴抗压强度; γ 为岩石容重; h 为深度)。

2) 描述性定义:长春煤炭科学研究所陆家梁总工程师提出“松软岩层是指那些松散、软弱的岩层”^[44]。原煤炭工业部郑雨天教授等认为“软岩是指软弱、破碎、膨胀、流变、强风化及高应力岩体的总称”^[45-48]。1984年,“煤矿矿山压力名词讨论会”提出“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: 中国矿业大学董方庭教授提出将围岩松动圈大于 1.5m 的围岩称为软岩^[49]。鹿守敏教授提出围岩松动圈大于 1.5m, 并且用常规支护不能适应的围岩称为软岩^[50]。学术界有些学者认为, 松软岩层是指难支护的围岩或需要多次支护, 重复翻修的围岩。

以上各种软岩定义在实际工程应用中有时存在一定的局限性。例如, 对于指标性软岩定义如果巷道等地下工程所处的埋深足够小, 地应力值低, 则单轴抗压强度 < 25MPa 的岩石也不会产生软岩的特性; 与之相反, 如果单轴抗压强度 > 25MPa 的岩石埋深足够大, 地应力值很高, 那么它也可能产生软岩的大变形、支护难等现象。中国矿业大学(北京)何满潮教授依据软岩本质特征, 将其分为地质软岩^[51]和工程软岩两类^[52-55], 前者一般是指单轴抗压强度小于 25MPa 的松、散、软、弱岩层, 其主要特征为岩石矿物颗粒间胶结程度差、孔隙度大, 受节理构造面及风化影响显著或含有膨胀性矿物的复杂地质介质, 如页岩、泥岩、粉砂岩和泥质矿岩等。后者是指在工程力作用下能够产生显著塑性变形和流变特性的岩体。其中的工程力包括构造应力、岩体自重应力、热残余应力、膨胀应力及作用在工程岩体上的各种工程扰动力的总和。对于同一类工程岩石, 在承受较低工程力时可表现为硬岩特性, 而在承受较高工程力时则可能表现为软岩特性。何满潮教授建议在软岩工程中应该用工程软岩的涵义。

1.2.1.2 软岩的分类

大量工程实践表明, 科学准确地判断巷道围岩的类型, 评价其在不同地质力学条件下支护的难易程度, 这对于巷道支护参数的选定极其重要^[56-59]。总体上, 国内外工程界通常是依据岩体完整程度和岩石坚固性程度这两个影响工程岩体稳定性的基本共性因素将软岩划分为四大类, 即高应力型软岩、膨胀型软岩、节理型软岩和复合型软岩, 见表 1.1。

表 1.1 软岩工程分类

软岩名称	泥质含量	单轴抗压强度 σ_c /MPa	塑性变形特点
高应力型软岩	≤25%	≥25	在高应力状态下, 沿构造节理面发生滑移破坏; 遇水少量膨胀
膨胀型软岩 (低强度软岩)	>25%	<25	遇水显著膨胀; 在工程力作用下, 易沿硅酸盐黏土矿物发生滑移破坏等
节理型软岩	少含	低~中等	岩石易在工程力作用下沿节理等结构面产生滑移、扩容等塑性变形破坏
复合型软岩	含	低~高	岩石破坏特征表现为上述多种组合的复合型破坏机理

软岩的类型也是多种多样,常见的有火山岩蚀变软岩、泥质软岩、泥质岩与碳酸盐岩的过渡型软岩、泥质岩与碎屑岩过渡型软岩等类型^[60-63]。软岩胶结物的矿物成分主要分为有机质、铁质胶、硅质及弱胶结几种类型。软岩的强度也会随所含胶结物的成分、含量和结晶程度不同而表现出很大的差异,低的只有几兆帕,高的可达几十兆帕^[64-66]。泥岩从耐崩解稳定性角度可分为弱胶结的极不稳定型、中等胶结的不稳定型和强胶结的稳定型三种情况。从膨胀性的角度又可分为不膨胀、弱膨胀、中等膨胀、强膨胀和剧烈膨胀几种情形。

在我国地下资源开采过程中,尤其是煤炭资源开采中,很多矿山都曾经历过软岩工程问题。据不完全统计,全国典型软岩矿山多达数十个,根据地下矿山赋存的工程地质条件分析,广泛分布在我国各省区的软岩矿山可能多达一二百个。

还有许多矿井,原来巷道掘进与支护并不困难,由于开采深度增加,地层压力逐渐的增大,巷道围岩也发生软化,致使巷道掘进与支护也变得十分困难,严重影响了矿山企业的经济效益,同时也给矿井安全生产带来巨大的危害。

我国从20世纪70年代开始,软岩支护问题就引起各方面的关注。许多煤炭行业的专家开展了大量软岩巷道掘进与支护方面的研究工作,也取得了一定的研究成果和经济效果。但到目前为止,仍然还不能说已根本解决了软岩巷道的支护问题。今天我们研究和探索软岩和软岩工程的目的,就是要深入探寻和有效利用它的规律,以便经济高效地解决软岩巷道工程问题。

1.2.2 软岩巷道的主要特征

地下软岩矿山的一项重要工作即是在软岩中开掘各种巷道,巷道成型后最明显的特征就是来压快、地压显现剧烈,巷道难以保持长期稳定,主要有以下几个特征。

(1) 自稳时间短、地压显现快

自稳时间是指巷道在没有采取支护措施的情况下,巷道围岩从暴露初起到开始发生失稳而冒落的时间。已有研究表明:巷道围岩的自稳时间长短除了取决于围岩强度和地压大小两个主要因素外,同时也与巷道所处的空间位置、采所用的掘进方法、巷道的断面规模和形状等因素有关。现有数据显示,部分软岩巷道的自稳时间仅为数十分钟到数个小时,对于自稳时间极短、地压显现明显的软岩巷道,需要及时采取有效即时支护或超前支护,才能保证巷道围岩不发生大规模整体冒落破坏。

(2) 持续变形时间长、速度快、变形总量大

大量的现场实测数据表明,软岩巷道的一个突出特点就是围岩变形持续时间