

朱建明
徐金海 著
张宏涛

围岩大变形机理及 控制技术研究



科学出版社
www.sciencep.com

围岩大变形机理及控制 技术研究

朱建明 徐金海 张宏涛 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在各类地质灾害中,地下巷道围岩大变形一直是容易造成施工困难、延误工期、增加工程成本,甚至造成工程终止的重要地质灾害。目前地下工程围岩大变形一般可分为三种类型:深部岩体巷道围岩的大变形、开采引起巷道的大变形和膨胀性软岩巷道围岩的大变形。本书主要以地下采矿引起的采场巷道围岩大变形为研究对象,从矿物的微观分析、水理分析及岩石的三轴试验出发,结合受采动影响巷道围岩大变形的变形、力学特征及岩土工程材料大量模糊和不确定的因素等,建立了工程岩体的神经网络本构模型。并通过对采场巷道围岩破碎区、松动区和压缩区的划分,揭示了围岩大变形与上述三个区域的内在关系,提出了适合围岩大变形巷道主次承载区协调作用的支护理论,并将上述支护理论成功地应用到实际大变形巷道支护中。

本书理论联系实际,实用性强,可供从事地下工程、岩土工程、采矿工程、地质工程、国防、水利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

围岩大变形机理及控制技术研究/朱建明,徐金海,张宏涛著. —北京:科学出版社,2010.7

ISBN 978-7-03-028033-6

I. ①围… II. ①朱… ②徐… ③张… III. ①矿山开采:地下开采—围岩变形—研究 IV. ①TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 115665 号

责任编辑:周 炜 王志欣 / 责任校对:李奕莹

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 7 月 第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—2 000 字数:287 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

长期以来,围岩大变形是各种形式地下工程(铁路隧道、公路隧道、矿山巷道、水工隧道、国防和人防工事、市政通道、城市地铁等)在施工过程中遇到的最重要的地质灾害之一。我国在各类地下工程的施工中积累了大量处理围岩大变形的经验,并取得了长足的进步。但由于我国地质条件复杂,随着地下工程开挖规模和深部开采的增加,地下工程发生围岩大变形的灾害事例屡见不鲜,因而围岩大变形一直是困扰地下工程界的一个技术难题。

地下工程与地面工程全然不同,地下工程处在一个特殊变化的地质环境中,由于常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种围岩大变形的力学现象和过程,使地下工程围岩大变形长期处在“经验设计和施工”的局面。该局面与我国迅速发展的地下工程现实极不相称,因此,寻求解决地下工程围岩大变形问题的新理论和新方法已成为地下工程大变形围岩研究的共同目标。

国内外深入开展围岩大变形的研究主要是从 20 世纪初,在一些大型隧道工程中出现了严重软弱围岩大变形问题,在这些地下工程中,围岩大变形经常导致工程施工困难,延误了工期、增加了工程成本,有的甚至造成工程终止。分析上述围岩大变形产生的原因并结合具体变形特征,一般可以将围岩大变形分为如下三种类型:一是深部开采和深部地下工程,由于工程所处的埋深大,导致其岩体自重应力场明显增大;二是由于地下开采活动引起的,导致产生应力场叠加,有的文献称之为工程性软岩或高应力软岩;三是岩体本身强度较低,属于膨胀性软岩大变形。一般指含有黏土高膨胀性矿物、在较低应力水平条件下即发生显著变形的工程岩体。

在地下工程中上述三种类型的围岩大变形其变形机理和支护技术等方面均存在差异,如果不加区分对所有大变形巷道均采用一种支护技术或同一种支护理论指导,实践证明在工程中是行不通的,有的甚至会怀疑有关大变形支护理论和方法,从而导致许多工程陷入被动局面,严重影响工程的正常进行,甚至有的会导致工程被迫终止,由此可见对围岩大变形分类研究是十分必要的。

在地下采矿过程中,上述三种大变形巷道一般均能遇到,由于第一、三种类型的围岩大变形变形机理较为明显,国内外对这两类大变形围岩机理研究较多,形成了较为成熟的支护理论 and 支护方法,而第二种类型的大变形巷道是由于采动产生的复杂应力场作用而导致的围岩大变形,以往对这类巷道的支护一般均套用第一、三种类型的支护理论和方法,导致对此类巷道围岩大变形机理认识不清,没有被重视,许多矿山巷道支护一直处于被动状态,严重地影响了矿山的正常生产,因此,本

书重点研究第二类围岩大变形巷道,并以小官庄铁矿和安家岭二号井工矿为工程背景,研究采动影响下巷道围岩大变形的机理及其支护技术。

本书在撰写过程中得到了北京科技大学任天贵教授、高谦教授、明士祥教授、宋卫东教授,清华大学徐秉业教授,中国科学院地质与地球物理研究所曲永新教授,煤炭科学研究总院康红普博士,中国水利水电科学研究院贺良材博士,小官庄铁矿、平朔煤炭公司有关技术人员等的指导和帮助,在此一并表示衷心感谢,并对研究生周保精、吴剑平、侯跃华、彭新坡等付出的辛勤劳动表示由衷的谢意。此外,本书的研究工作还得到了其他科技人员的支持和参与,并参考了相关的项目研究报告及文献,在此谨向课题组其他有关人员和文献作者表示衷心的感谢!

本书得到了北方工业大学出版基金、国家自然科学基金(50874104)、国家青年自然科学基金(50809003)的资助,在此表示感谢!

由于作者水平和能力有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2010年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 深部巷道围岩大变形研究	4
1.3 开采引起巷道围岩大变形的研究	5
1.4 膨胀性软岩巷道围岩大变形的研究	6
1.5 工程背景和实际意义	7
1.6 主要研究思路.....	12
第 2 章 破裂岩矿物晶体化学特性研究	14
2.1 矿岩成分分析.....	14
2.2 破裂岩的微结构和构造	20
2.3 破裂岩的水理性.....	22
2.4 本章小结.....	31
第 3 章 裂隙岩峰后滑移剪膨变形机理研究	32
3.1 引言.....	32
3.2 岩石的三轴压缩试验.....	32
3.3 不同侧压下岩石变形和破坏特征.....	36
3.4 基于三轴压缩试验的岩石破坏准则.....	43
3.5 基于三轴压缩试验的岩石损伤演化方程.....	50
3.6 本章小结.....	58
第 4 章 工程岩体神经网络本构模型及其建立	60
4.1 引言.....	60
4.2 显式本构模型与隐式本构模型的分析.....	64
4.3 人工神经网络 BP 算法和程序实现	69
4.4 神经网络本构模型的应用.....	83
4.5 本章小结.....	90
第 5 章 承压区破裂岩采场巷道围岩变形破坏机理	91
5.1 无底柱分段崩落采场采场支承压力的形成与动态显现.....	91
5.2 承压区采场巷道围岩变形破坏机理.....	94
5.3 巷道围岩渐进破坏规律与主要破坏模式	101

5.4	影响巷道围岩稳定性的主要因素	103
5.5	本章小结	104
第6章	采场巷道主次承载区协调作用支护理论	106
6.1	几种典型的锚杆支护理论评价	106
6.2	主次承载区协调作用理论的基本假设	111
6.3	主次承载区协调作用支护理论的要点	111
6.4	主次承载区协调作用支护理论的实质	113
6.5	主次承载区协调作用支护理论的基本原则	114
6.6	本章小结	115
第7章	主次承载区支护理论力学分析与稳定性评价	116
7.1	圆形巷道非静水应力场主承载区的理论分析	116
7.2	非圆形巷道非静水应力场主承载区的理论分析	124
7.3	点锚式锚杆支护的次承载区及力学分析	127
7.4	全长锚杆支护围岩次承载区及力学分析	133
7.5	主次承载区的协调作用	139
7.6	本章小结	139
第8章	巷道围岩变形机理和支护技术的数值模拟分析	141
8.1	数值计算方法的选择	141
8.2	数值计算模型、基本参数和计算内容	143
8.3	数值计算中时间因素的分析	149
8.4	影响巷道围岩稳定性的因素分析	150
8.5	实际开采条件下的计算分析与验证	161
8.6	本章小结	163
第9章	主次承载区协调作用支护理论关键技术和工程实施	164
9.1	巷道围岩支护设计基本原则	164
9.2	小官庄铁矿采场巷道的围岩分类	165
9.3	基于主次承载区协调作用理论的“一次强化支护技术”	167
9.4	典型试验段巷道支护设计、施工与综合评价	170
9.5	本章小结	174
第10章	露井联采边坡下巷道变形破坏机理分析	176
10.1	巷道围岩的工程地质特性分析	176
10.2	工作面回采对巷道影响分析	180
10.3	巷道围岩地质条件对巷道稳定性的影响	188
10.4	边坡下巷道变形破坏机理分析	189
10.5	本章小结	191

第 11 章 露井联采复合采动影响下巷道围岩控制技术研究	193
11.1 巷道支护设计参数及试验条件.....	193
11.2 受 B401 和 B903 复合采动影响边坡下巷道支护对策研究	197
11.3 受 B402 和 B904 复合采动影响巷道变形控制技术研究	203
11.4 复合采动影响下巷道支护对策.....	212
11.5 本章小结.....	213
参考文献.....	215

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

地下工程及地下矿山工程的发展面临着掘进技术、支护技术、施工组织和运行管理等方面的技术问题,在施工过程中可能遇到的各种地质灾害预测与防治和支护结构及围岩的合理协调往往是决定工程成败的关键。在各类地质灾害中,地下巷道围岩大变形是一类容易造成施工困难、延误工期、增加工程成本,甚至造成工程终止的重要地质灾害。自 20 世纪 80 年代后期,随着开采深度的增加和开采规模的扩大,地下工程巷道发生围岩大变形灾害的事例屡见不鲜。因此,地下巷道围岩大变形一直是困扰地下工程界的关键难题之一。

关于围岩大变形,目前还没有形成一致和明确的定义。有的学者^[1~3]提出根据围岩变形是否超出初期支护的预留变形量来定义大变形,即在隧道施工时,如果初期支护发生了大于 25cm(单线隧道)和 50cm(双线隧道)的位移,则认为发生了大变形。也有学者^[4]认为,不能从变形量的绝对值大小来定义大变形问题,具有显著的变形值是大变形问题的外在表现,其本质是剪应力导致岩体剪切变形,使岩体发生错动、断裂分离破坏,应以向地下空洞方向产生压、挤、推变形的类型来定义大变形。有关大变形机制的研究,Terzaghi 于 1946 年首次提出了挤出性岩石和膨胀性岩石的概念。挤出性岩石是指侵入隧道(开挖轮廓面)后没有明显体积变化的岩石;膨胀性岩石则是指主要由于膨胀作用而侵入隧道(开挖轮廓面)的岩石。按形成机制将围岩大变形分为两类^[5,6]:一是开挖形成的应力重分布超过围岩强度而发生塑性化,如果介质变形缓慢,就属于挤出,如果变形是立刻发生的,就是岩爆;二是岩石中的某些矿物和水反应而发生膨胀,水和某些(膨胀性)矿物的存在,对于膨胀这种变形是必须的。Anagnostou^[5]认为,可以发生膨胀变形的围岩在开挖时都具有较高的强度,变形主要发生于隧道运营若干年以后,变形一般表现为底鼓,而拱顶和边墙一般保持完好状态。陈宗基认为围岩收敛变形机理应包括塑性楔体、流动变形、围岩膨胀、扩容、挠曲五个方面^[7]。何满潮根据围岩变形破坏特征、特征性矿物、力学作用和特点,将软岩变形破坏机制分为以下三个方面:与深部软岩本身分子结构的化学性质有关、与力源有关、与洞室结构和岩体结构面的组合特性有关^[8,9];将深部软岩(深度大于 500m)按变形力学机制归为三大类:物化膨胀类(I)、应力扩容类(II)和结构变形类(III),以及十三个亚类。

国内外研究围岩大变形主要是以 20 世纪初出现的严重的交通隧道软弱围岩大变形开始。表 1.1 列举了国内外 14 座隧道及地下巷道大变形的基本情况^[10~14]。其中,国外有名的围岩大变形隧道有陶恩公路隧道、阿尔贝格公路隧道、惠那山公路隧道等 5 座;国内比较知名的围岩大变形隧道及地下工程有南昆铁路的家竹箐铁路隧道、金川矿地下巷道及铁山隧道等 9 座^[15]。

表 1.1 国内外部分发生围岩大变形隧道的基本情况

序号	名称	地点和时间	地质简况	工程情况及大变形特征
1	崔家沟铁路隧道	陕西梅七线 (1972 年 11 月)	围岩为泥质页岩和砂质泥岩	1976 年,有 8 段 1680m 的路段发生底鼓,严重地段轨顶抬高 0.136m;1980 年轨顶抬高达到 0.206m,水沟盖板翘起 0.129m;隧底出现 330 余条横向裂缝,最大缝宽 4~8mm
2	堡子梁铁路隧道	宝中线 (1990 年 10 月)	大部分为绿色泥岩,软弱破碎,膨胀率为 46%	堡子梁隧道全长 904m,在掘进过程中坍塌频繁,排架下沉达 1.2m,边墙向中间挤进 0.3~0.4m,拱部剥皮掉块,裂缝宽 50~150mm
3	阿尔贝格公路隧道	奥地利 (1974~1979 年)	千枚岩、片麻岩及深棱岩中的片岩、绿泥石等,抗压强度 1.2~2.9MPa,原始地应力 13MPa	隧道全长 13980m,最大埋深 740m,设计时已吸取了陶恩公路隧道的经验教训,采用加强的支护系统。尽管如此,局部地质不良地段仍产生了 20~35cm 的支护位移,变形初速度达到 4~6cm/d,最大达 11.5cm/d
4	鹧鸪山公路隧道	中国四川 (2000~2003 年)	以薄层状炭质千枚岩为主,岩石硬度小,膨胀率 13%,易风化,地应力 17~20MPa	开挖以后,初期支护以前,围岩一般能够(或者经过局部塌方后)成拱、自稳,变形一般发生在初期支护完成后。围岩变形量较大,持续的时间长。往往表现为初期支护破裂(混凝土)、扭曲(钢拱架),侵入隧道限界最大已达到 300mm,甚至将初期支护彻底破坏,产生大规模塌方
5	关角铁路隧道	中国青藏线 西宁—格尔木段 (1977 年)	泥质片岩,最大埋深 500m 左右	施工期间,隧底上鼓约 1m,两侧边墙内挤很大;通车后不久,隧底便上鼓 30cm,行车中断
6	海代尔引水隧洞	印度 (1979 年)	围岩为浅变质岩,如千枚岩、页岩及各类片岩等	开挖和初期支护 5~6 个月后,混凝土开裂、钢拱架发生严重变形。三年以后(1982 年 11~12 月),当要进行永久衬砌施工时,该洞段的大部分钢拱架再次发生严重变形,隧底隆起 80cm,扭曲的钢架和回填混凝土侵入限界,不得不完全拆除扩挖
7	辛普伦隧道	瑞士 意大利 (1906 年)	围岩为石灰质云母片岩	施工期间,多处发生围岩大变形;隧道在竣工若干年后,强大的山体压力再次引起横通道边墙、拱部和隧底破裂、隆起

续表

序号	名称	地点和时间	地质简况	工程情况及大变形特征
8	陶恩公路隧道	奥地利 (1970~1975年)	绿泥石、千枚岩,原始地应力16~27MPa	长6400m,埋深600~1000m。施工时在千枚岩和绿泥石地段发生了大变形,产生了50cm(一般)及120cm(最大)的位移,最大位移速度达20cm/d,是世界上第一座知名的大变形隧道
9	家竹箐铁路隧道	中国 南昆线 (1992~1997年)	泥质砂岩、页岩及煤层煤系地层,原始地应力8.5~16MPa	1995年4~12月底,大变形的范围扩展到长达390m的洞段,拱顶发生240cm的下沉,边墙内移160cm,底鼓80~100cm;钢拱架严重变形,喷层裂开剥落,并与钢架脱离;上半断面高度缩小到不足1m
10	金川矿地下巷道	中国 甘肃 (1969年)	中深变质岩系,包括混合岩、片麻岩、片岩、大理岩。侵入岩有超基性岩、花岗岩及各种岩脉	巷道收敛可达数十厘米甚至1.0m以上,底鼓可达数十厘米甚至更大,变形破坏时间持续数月甚至数年。巷道破坏,钢架严重扭曲甚至折断,喷层开裂和剥离(落),锚杆失效,预制混凝土砌块挤出或塌落,现浇混凝土衬砌破裂和剥离,混凝土底板折断翘起等现象随处可见
11	惠那山公路隧道	日本 (1978~1985年)	断层带,单轴抗压强度1.7~4.0MPa,埋深约400m。地应力10~11MPa	为双洞隧道,在日本中央公路的两官线上。1号隧道于1975年8月建成,全长8300m,是双向行驶的公路隧道。1978年建Ⅱ号隧道,该隧道全长8635m,于1985年建成
12	木寨岭公路隧道	中国甘肃 (2002年)	炭质板岩夹泥岩,局部泥化软弱断层破碎带,埋深约120m	严重地段拱顶下沉量累计达1550mm,在部分地段初期支护进行了二次换拱,特殊地段换拱达4次
13	扯羊隧道	中国四川 凉山州 (1997年)	地表移动变形破碎带	采用常规的支护,围岩变形持续不断。在2003年5~7月拱顶相对下沉73mm,后该段部分段落发生塌方,塌方一直影响至地表,导致地表形成塌陷坑
14	铁山隧道	中国四川 巴彭公路 (1999年9月)	粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹煤层,含少量细-中粒砂岩,为软质岩夹少量硬质岩地层组成	1998年5~9月,隧道西段K140+550.5~K140+608处衬砌混凝土破裂,衬砌中的钢筋被弯曲、剪断;隧道两侧排水沟墙体开裂,出现从边墙底部延伸至拱顶的斜向裂缝;拱顶出现长18m,最宽处约20mm的纵向裂缝,裂缝表面呈压扭性劈裂状;拱腰处后出现一条长10m、宽约2mm的纵向水平裂缝

根据上述工程中大变形实例的研究分析,并结合产生围岩大变形的原因可以将围岩大变形分为以下三种类型:一是深部开采和深部地下工程,由于工程所处的埋深大,导致其岩体自重应力场明显增大;二是地下开采活动引起的应力场叠加,有的文献称之为工程性软岩、高应力软岩或破裂岩等;三是岩体本身强度较低,属于膨胀性软岩大变形。膨胀岩一般指含有黏土高膨胀性矿物、在较低应力水平条件下即发生显著变形的工程岩体。

1.2 深部巷道围岩大变形研究

经探明,我国煤炭埋深在 600m 以下和 1000m 以下的储量约占总储量的 73% 和 53%,同时,我国金属矿产开发也在向深部发展,其中,金川镍矿、红透山铜矿等开采深度都已达到了 1000m 以上。此外,国外也有许多类似的地下工程,如德国平均开采深度 900m,最深的伊本布伦煤矿达 1712m;英国平均开采深度 700m,最深达 1200m;波兰平均开采深度 690m,最深达 1300m;俄罗斯的顿巴斯矿区最深达 1400m。

岩体是在地质历史过程中形成的,经受过变形和破坏,具有一定的物质成分和结构并赋存于一定地质环境中的地质体。经历了长期的建造和改造作用后,岩体具有复杂的性态并处于复杂的环境场(应力场、渗流场和温度场)之中,在人类工程经济活动之前,已处于相对的稳态平衡。一般认为,地应力主要来源于岩体的自重应力和水平构造应力^[16]。

开采深度的加大,一方面,使岩体工程处于更复杂的环境场(应力场、温度场和渗流场)之中,仅就地应力而言,深部的原岩应力将更大,开挖卸荷必将导致采场周围的应力场(围岩应力)随之加大;另一方面,深部岩体的变形特征与浅表部有着很大的差别,而且已处于或接近破坏强度。随着工程开挖下移速度的加快,工程活动及由此导致环境场(尤其是地应力场)将以极快的速度和非自然的形式发生改变,将使岩体受到更大强度的应力场作用和产生相应的大变形。据国内外一些观测资料和研究成果,开采深度每增加 100m,巷道顶底板移近量将增加 7.0%^[17]。

早在 20 世纪 70 年代和 80 年代初,国外学者就开始注意对深部开采的研究。1983 年,苏联学者对 1600m 的深井开采进行了专题研究;当时的西德也建立了特大型模拟实验台,专门对 1600m 深井的三维矿压问题进行数值模拟;1989 年,国际岩石力学学会在法国召开“深部岩石力学”专题国际会议,并出版了相关专著。此外其他国家如波兰、英国、印度、日本等都进行过深部开采的研究^[18~21]。

目前对深部岩体巷道围岩大变形的研究进展主要有以下两个方面:①深部岩体的脆延转化。岩石在不同围压下表现出不同的峰后特性,在较低围压下表现为脆性的岩石可以在高围压下转化为延性。研究表明,随深度增加当岩层中压力和

温度达到一定条件时,岩石即发生脆延转化,但其深度还与岩石性质有关。总之,脆延转化是岩石在高温和高压作用下表现出的一种特殊变形性质,如果说浅部低围压下岩石破坏仅伴有少量甚至完全没有永久变形的话,则深部高围压条件下岩石的破坏往往伴随有较大的塑性变形。②深部岩石的流变特性在深部高应力环境中,岩石具有强时间效应,表现为明显的流变或蠕变。研究表明,深部硬岩的流变性,主要是高应力导致其岩体发生流变性,导致巷道支护极其困难,有的巷道最大收缩率曾达到了500mm/月的水平,并且岩石在高应力和其他不利因素的共同作用下,其蠕变将变得更为显著。

我国学者在20世纪80年代末也开始了深部矿井开采方面的研究,“八五”和“九五”、“十五”期间都曾做过大量的工作^[22]。国家“863”、“973”专门立项开展对深部围岩大变形进行研究。近几年来,在深部煤巷的围岩稳定与支护方面取得了一些进展,尤其是在深部煤巷锚杆支护的实用技术方面取得了相当大的进步。例如,钱鸣高院士等通过对深部开采中发生的冲击矿压和突水灾害的统计分析,阐明了深部采动岩体中的关键层活动对冲击矿压和突水事故的关系^[23];侯朝炯等在模型试验和数值分析的基础上,提出了锚杆支护巷道围岩强化理论和复杂条件下煤巷锚杆支护、沿空掘巷等现代采矿与支护等方法,并系统地论述了煤巷高强锚杆动态系统设计方法^[24];张农等针对深井三软煤巷的特点,提出了加固帮角控制围岩稳定、高阻让压支护来限制围岩大变形的支护原理,研究了合理的锚杆支护技术和帮顶锚固方式^[25];李家鳌等对小锚索支护煤巷进行了试验研究;朱浮声、郑雨天研究了锚杆预拉力对巷道顶板下沉量和锚杆的间排距参数设计的影响^[26];康红普研究了煤巷锚杆支护动态信息设计法^[27]。

1.3 开采引起巷道围岩大变形的研究

有关由于开采而产生的高地应力围岩挤压性大变形的研究资料表明,许多高地应力环境下发生围岩大变形灾害的实际工程中,并非由于岩体水化膨胀所致,而是因为岩体开挖引起的应力重分布超过岩体强度使岩体不断屈服和破坏的结果。例如,家竹箐公路隧道工程,虽然发生大变形的地层主要为泥岩和泥质砂岩,遇水有一定的膨胀性,但此地段大部分干燥无水或者水量甚少,没有水的参与,也就不会有水化膨胀。而且在无膨胀可能的砂岩和煤层中,也同样有支护大变形的现象,有些还比较严重。所以像家竹箐公路隧道围岩大变形的机制并非围岩膨胀。另外,在金川矿区,除部分片岩和片麻岩外,整个矿区内岩石的强度和弹性模量均较高,属较坚硬岩,对岩石进行的相关试验表明,岩石的遇水膨胀非常微弱,属无膨胀岩。岩石的流变特性也属普通岩石的正常范围,可以认为不具有流变性。在上述高地应力地区经常遇到这类特殊岩体,当其位于地表浅部或低地应力环境时,岩块显示出较坚硬岩特征;而在高地应力环境中,当围压较高时,岩体尚具有较高的

强度和模量(弹性模量或变形模量),当围压较低时,工程岩体则表现出“软岩”特征。目前学术界对之称谓各异,如复杂岩体、挤压岩体、不良岩体和破裂岩体等,有时甚至笼统地称之为软岩。显然,它有别于一般意义上的软岩,而是一种特殊的工程岩体,是由于开采而使其围岩显示大变形的特征。

研究认为,该类软岩巷道围岩的变形破坏机制与其原岩的高地应力状态(原岩应力)及工程岩体的低围压开采引起的压状态(围岩压力)和高应力差相联系^[28]。

当原岩应力较高时,一旦开挖,随即发生内应力释放和回弹,并引起相应的应力调整和变形。巷道开挖卸荷相当于在原岩应力状态上叠加相应反向拉应力,于是工程岩体(尤其是层状和似层状岩体)在类似横弯或纵弯作用下发生挠曲,或者沿结构面发生剪胀滑移变形,岩体强度降低,围岩发生体积膨胀变形(扩容)^[29]。

应力释放引起的回弹和应力调整引起的扩容使岩体中原本闭合的结构面张开滑移,在改变岩体应力状态和强度的同时,也改变了围岩水文地质条件,特别是当工程用水沿张开裂隙渗流,将进一步降低围岩的岩体强度,或者加剧了具有膨胀性岩石的物理化学膨胀和力学膨胀,从而使围岩产生较大的收敛位移,表现为侧墙鼓出、底鼓和顶压等。变形的进一步发展导致巷道破坏失稳,如侧墙内移(侧向张裂、片帮)、尖顶(拱顶剪裂)底鼓和冒顶等。破坏最严重的部位多在拱顶和拱墙交界处,在这些部位常见巷道衬砌剪裂或张裂,钢筋因过大位移而扭曲屈曲甚至钢拱架也被扭曲或剪断的现象。

1.4 膨胀性软岩巷道围岩大变形的研究

Wiesmann 于 1914 年首次研究了瑞士 Hauenstein 隧道的膨胀问题。此后各种各样的分析预测模型被相继提出。Einstein、Grob、Koyari 等提出和采用的简化分析方法都是建立在应变仅沿着隧道底以下的垂直对称轴发生这一假设的基础上的。Wittke、Gysel 及 Frohlieh 等将膨胀问题视为连续介质力学问题,形成完善的应力-应变关系,这些关系和平衡方程及兼容性方程一起构成了解决特定边界和初始条件下膨胀问题的理论框架。

Anagnostou 提出了一个更为完善的膨胀岩模拟和预测的模型。该模型的理论要点主要有以下几点:① 合理的膨胀岩隧道计算模型应该考虑地下水的运动,渗流方程必须和应力分析方程同时考虑。在这样的水-力耦合模型中,位移场取决于水头场,当然也就与边界条件密切相关。由于边界条件的不对称,隧底和拱顶的水头分布应该是不同的,这样就使得在模拟边墙和拱顶稳定时的底鼓现象成为可能。② 应力-应变关系。膨胀可以用满足莫尔-库仑破坏准则的理想弹塑性材料来模拟,但是标准的线弹性或完全塑性的模型不能模拟实际变形的某些重要特征^[30~32]。

何满潮等根据变形破坏特征、特征型矿物、力学作用和结构特点,将软岩变形

破坏机制分为三大类十三亚类^[33]。陈宗基对膨胀性软岩巷道开展了深入研究,提出了巷道变形机理包括扩容加上绕曲、塑性楔体向内移动、围岩回弹、内应力释放和围岩膨胀五个方面^[7]。

1.5 工程背景和实际意义

我国目前所遇到的工程大变形主要为地下深部开采和膨胀性软岩导致的,因而对第一种和第三种大变形研究较多,而对由于开采引起的叠加应力导致的大变形研究不多。但是,上述三种类型的围岩大变形中,无论哪种原因引起的大变形其表现均为变形大、岩体破碎、持续时间长(有时在整个服务期)、需要重复支护等。

本书以第二种类型的大变形巷道为主要研究内容,以小官庄铁矿破碎岩体开采产生的高应力区巷道围岩大变形和中煤平朔煤业有限公司安家岭二号井工矿边坡下三条采区巷道受采动影响的围岩大变形为工程背景,对其大变形围岩的破坏机理和支护技术等问题展开研究,并为此类巷道的治理提供对策。

1.5.1 小官庄铁矿采动影响下巷道围岩大变形特点

我国的黑色矿山中,有著名的“二注一店一门”(张家洼、玉石洼、金山店、西石门)难采矿床。这些难采金属矿床开采的困难在于,在采用无底柱分段崩落采矿法的采场巷道中,其进路巷道一直处于动压和多重支撑压力叠加的环境下,使得那些岩性较差的矿床,其进路巷道的维护变得十分困难,其中较为典型的的就是张家洼的小官庄铁矿。

该矿是鲁中冶金矿山公司的骨干矿山,是我国目前大型的地下铁矿之一,其年产量为140万t。该矿床系闪长岩浆浸入,奥陶系灰岩形成的高温热液接触交代矽卡岩型磁铁矿床。在地壳升降过程中,上部灰岩被侵蚀而为继后沉积的巨厚红板岩所取代。矿体走向为 $WE17^\circ$,倾向 $NW73^\circ$,倾角变化较大,但一般较缓($10^\circ\sim 30^\circ$),矿床埋深在400~800m,走向长度2150m,厚度25~50m,矿石平均品位46.42%。矿体中间有一长约1000m的 F_3 断层将矿床分为东、西两个矿体,并置西矿体于东矿体一侧,按赋存标高和勘探线将东、西矿体分别划为东、北和西、南四个采区同时进行开采^[34,35]。

小官庄铁矿矿床埋藏深度为上述几个难采矿床之首,其地应力的影响不可忽视。研究人员通过对其地应力的研究,得出地应力与埋深的关系(图1.1)。

最大主应力: $\sigma_1=1.3\gamma H$;方位 $NW46.5^\circ$,倾角 24° ;最小主应力: $\sigma_3=0.47\gamma H$,方位 $NW228^\circ$,倾角 10° ;垂直方向的应力大小与自重 γH 吻合。

小官庄铁矿顶板为黏土质砂岩(俗称红板岩),固结成岩作用较差,极不稳固,但在采场中碰到较少。矿内有厚2~15m的闪长玢岩和矽卡岩,其产状大致与矿体一致,但形状十分复杂,分支、复合叠现,闪长玢岩分层连续厚大,矽卡岩夹层较

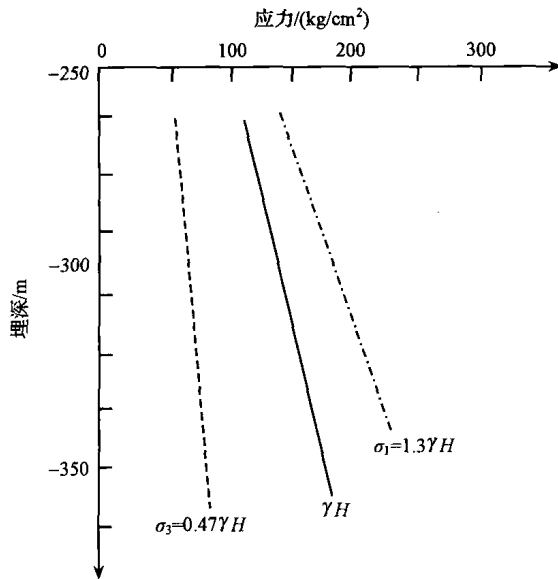


图 1.1 地应力与埋深的关系

分散,多呈块状和条状。由于夹层穿插,使矿岩稳定性极差,且常与小断层伴生,节理裂隙发育,是采场巷道常遇到最难对付的岩性。因此,该矿破裂岩主要是指矽卡岩、蚀变闪长玢岩、矿岩接触带及部分蚀变闪长岩等岩种。

对小官庄铁矿的上述岩体,为了研究方便,我们称之为破裂岩体(fractured rocks)。其实对于这类岩体很难用一种比较确切的含义来定义它。因为对于煤矿中目前的软岩,其力学特性都比较明显的岩体,都至今无统一的定义(据文献[18]的不完全统计已有 12 种软岩的定义),因此,对于破裂岩的定义就不言而喻了,但总结这类破裂岩体大多有以下特征^[36~39]。

(1) 矿岩的岩种变化复杂,其中闪长岩和矽卡岩在矿岩中出现较多。小官庄铁矿的闪长岩有蚀变闪长岩和闪长岩。矽卡岩也主要有两种,主要为绿泥石化的矽卡岩,其中岩石的三轴试验表明其具有强塑性,另一种则为氧化了的矽卡岩矿岩接触带。上述矿岩在东部采区中经常遇到,研究表明,其分布无规律性。但在东区经常大面积出现,从而使巷道支护十分困难。

(2) 节理裂隙及断层在东区较为发育。据统计上盘节理密度达到 20~30 条/m,同时节理和裂隙常伴随有泥化的夹层,从而使破裂岩体裂隙间的黏结力进一步降低,特别是在打孔时遇水膨胀,而使其变形加速。

(3) 根据东区采场巷道揭露的情况,大致有三种:一是以节理裂隙岩体为主要形式;二是以“散”而著称,矿山习惯称其为“猪肝石”的蚀变闪长岩或矿岩接触带;三是以强度低为特征,主要是以绿泥石化的矽卡岩为主。

(4) 岩块单轴抗压强度较高,岩体整体强度低。

表 1.2 列出了小官庄矿东区部分矿岩力学参数与破坏特征。

表 1.2 矿岩力学参数与破坏特征^[40]

岩 种	弹性模量 /10 ⁴ MPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	破坏特征	
东 区	红板岩	0.57	0.26	18.53	1.07	脆延性
	矽卡岩	0.59	0.27	20.6~34.2	3.8~5.5	脆延性
	蚀变闪长玢岩	2.23~7.50	0.13~0.39	83.9~157.3	5.8~8.2	脆延性
	蚀变闪长岩	1.21~5.43	0.10~0.17	28.5~116.7	1.8~7.2	脆延性

在小官庄铁矿的矿岩中,最为普遍的主要有两种岩石,即矽卡岩和蚀变闪长玢岩,因此主要针对上述两种岩石进行研究。

研究的采区选为该矿最为难采的 12 线附近 -290m 采场巷道,其应力环境如图 1.2 所示。

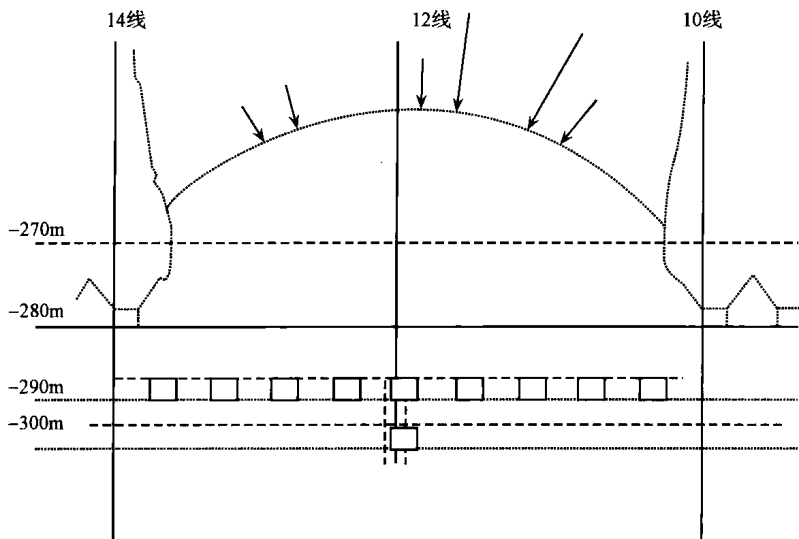


图 1.2 12 线压力叠加状况示意图

小官庄铁矿 12 线承压区由左右两大采空区转移而来的支承压力在此交汇叠加形成的,同时上两分段 -270m、-280m 由于应力大,巷道变形严重,使部分进路放弃了回采,大约有 30 万 t 矿量未能正常采出,如不能采出将变为永久损失;另一方面,上两分段遗留的矿柱使得 -290m 水平的承压区面积进一步扩大,其开采条件更加恶化。因此 -290m 水平 12 线采场具有压力大、岩性差、矿量大等特点,可以说东区 12 线采场是典型的高应力区采场。

研究东区上述巷道围岩大变形的机理及采动技术,对小官庄铁矿采场矿石的安全回采,以及对全矿的高效生产都具有十分重要的意义。