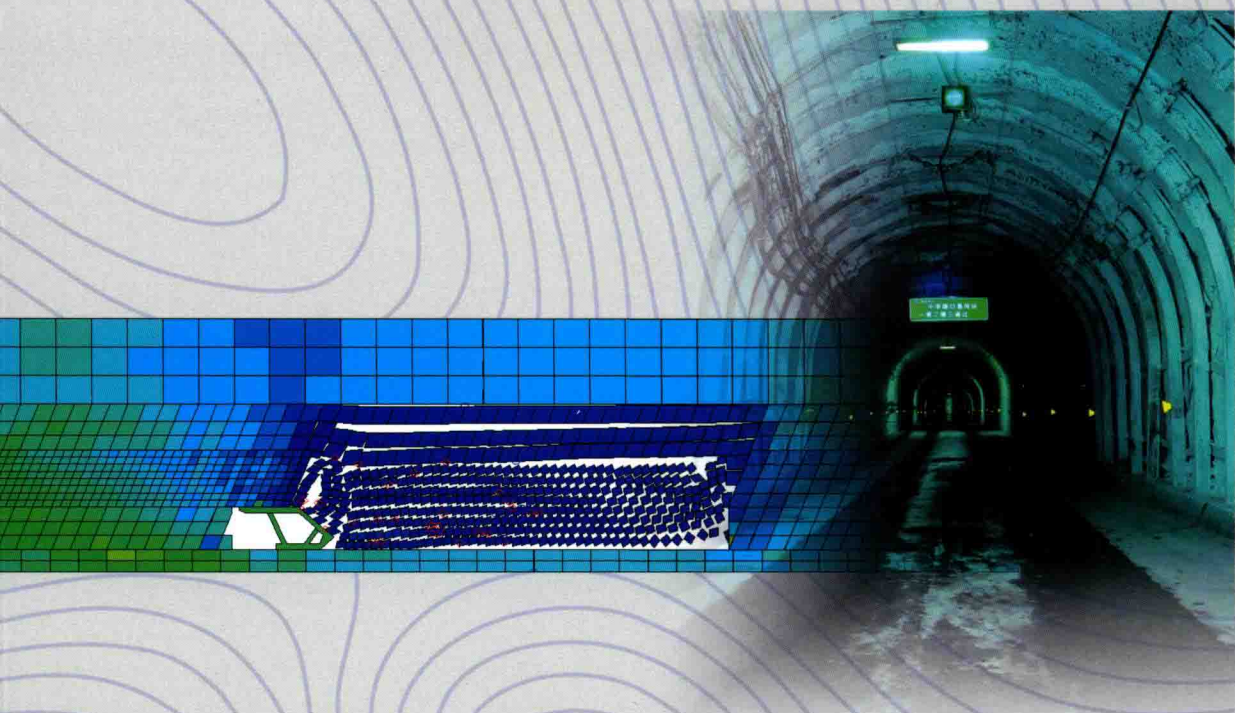




采矿围岩破坏力学与 全空间协同控制实践

左建平 曹光明 孙运江 王金涛 陈 岩 著



科学出版社

采矿围岩破坏力学与 全空间协同控制实践

左建平 曹光明 孙运江 王金涛 陈 岩 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书主要研究我国煤矿开采所涉及的矿山岩体破坏力学及围岩控制问题,具体包括大采高综放工作面三维地应力测试、地应力非连续变形和神经元反演、采动围岩的宏观破坏机理、深基点覆岩移动监测及复合关键层计算方法、实时采动数值模拟分析软件开发及工程应用、建立巷道底臌力学模型及提出相应的防治技术,最终形成大断面软弱破碎巷道全空间桁架锚索协同支护技术。

本书可以作为采矿工程、矿山岩石力学、安全技术与工程、工程力学和岩土工程等专业的的高年级本科生和研究生的高等岩石力学课程辅助教材,也可作为科研及矿山工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

采矿围岩破坏力学与全空间协同控制实践 / 左建平等著. —北京: 科学出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-03-047242-7

I. ①采… II. ①左… III. ①矿山-岩体破坏形态-研究 IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 021945 号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 耕者设计工作室

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 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 450 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国利用煤炭已有几千年的历史，是世界上发现和利用煤炭最早的国家之一。随着采煤技术的进步，我国的煤炭年产量也由 1949 年的 0.324 亿吨逐渐增长到 2014 年的 36.95 亿吨，特别是近十几年煤炭行业经历了一个飞速发展时期。近年来，一些新能源的迅速发展，使得煤炭在我国能源构成中的比例逐渐降低，但根据预测，即便到 2050 年，该比例仍然能达 40%。可见，煤炭在我国工业发展和国民经济发展中的主体地位在近期不会动摇。因此，对于我国采矿工程技术人员来说，如何科学地、安全高效地开发和利用煤炭资源是当前大家所关注的问题。

采矿过程中不仅要保证工作面、运输及通风巷道等围岩稳定和工作安全，还要研究和控制开采对环境的不利影响。如果不进行开采，顶板就不会冒落、地表就不会沉陷、瓦斯和水害就不会析出和流动，也就不会发生瓦斯事故和突水事故。因此，所有的问题都是由采矿开挖引起的，所以工作面和巷道围岩的变形及控制是采矿工程中最关键和最基础的研究内容和技术。

本书主要针对我国大采高综放开采所涉及的矿山岩体变形、破坏及围岩控制而展开研究，具有广泛的工程应用背景。尽管有关采矿工程中岩石破坏问题做了很多研究，但本书更希望能从工程力学的角度来探讨采矿围岩变形、破坏及控制。本书的特点是希望准确地获取地应力资料（确定力学边界条件），揭示采动岩石的宏细观破坏机理（室内试验揭示破坏机理），提出计算覆岩移动的复合关键层计算方法（现场试验获取变形规律），开发实时采动数值模拟分析软件（软件开发提供计算力学模型），最终形成一套分析和解决采矿实际工程问题的方法（工程力学实践及应用）。全书分 7 章，第 1 章是绪论，第 2 章介绍大采高综放工作面巷道围岩地应力测试及二维和三维地应力反演分析，第 3 章介绍采动巷道围岩的宏细观破坏机理及理论模型，第 4 章通过现场监测获得大采高综放工作面覆岩移动规律，并提出复合关键层理论的计算分析方法，第 5 章开发能实时模拟采动开挖的不连续变形分析模拟计算方法并开展工程应用，第 6 章和第 7 章针对煤矿实际问题，分别提出大采高综放工作面回采巷道底臃机理，并最终形成一套大断面软弱破碎巷道全空间桁架锚索协同支护技术方法。

本书集成了作者研究团队在采矿岩体力学理论和实践方面的成果，特别是近四年毕业研究生的合作成果，他们是陈立平、于洋、柴能斌、李岳春、林轩、刘连峰、熊国军、李方枢、刘靖、黄亚明、李楷、王兆丰、李蒙蒙等。本书的很多成果主要与山西潞安矿业集团的四个煤矿合作中取得，在此对山西潞安王庄煤矿、五阳煤矿、李村煤矿和常村煤矿的相关领导及技术人员表示感谢。

与本书相关的研究得到国家自然科学基金面上项目（51374215、11572343）、霍英

东教育基金会第十四届高等院校青年教师基金应用课题（142018）、“万人计划”青年拔尖人才、高等学校学科创新引智计划（简称 111 计划）（B14006）、北京市科学技术委员会重大科技成果转化落地培育项目（Z151100002815004）、高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目（201030）、国家重点基础研究发展计划（973 计划）（2010CB732002）的资助，特此表示感谢！同时，我的在读研究生为本书的绘图及校对做了很多辛勤的工作，他们是姜广辉、魏旭、刘敏、吴迪、赵灿、张婷、王廷征等。

在本书的写作过程中，为了让读者们能够更全面地了解本领域的最新进展，我们参考引用了相关领域的大量参考文献，在此对各位文献的作者表示感谢，同时对不慎遗漏标注的文献作者表示歉意。另外，本书主要针对大采高综放开采巷道围岩的变形和破坏展开研究，虽然取得了一些研究成果，但很多成果也只是基于作者的观点而得出的有限认识。限于作者的水平，书中难免存在个人观点，尚有不足之处，敬请各位同行批评指正。

特别感谢我的导师谢和平院士、彭苏萍院士、周宏伟教授和鞠杨教授，是他们把我引入了矿山岩体力学这个引人入胜的研究领域，并且长期以来一直给予学生非常精心的指导和帮助。最后，还要感谢我的妻子左明女士，在研究和写作期间给予了我诸多的谅解、忍耐和支持！

左建平

2016 年 1 月 5 日于矿大力建楼

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 矿山压力与岩层控制理论和技术进展	2
1.1.1 巷道围岩地应力测试	2
1.1.2 巷道围岩破坏行为	3
1.1.3 岩层破断与覆岩移动规律	6
1.1.4 围岩控制理论与技术方法	8
1.2 大采高综放开采围岩破断力学及控制理论方法	9
参考文献	10
第 2 章 大采高综放工作面巷道围岩地应力测试及反演分析	14
2.1 空心包体应力解除测量方法	15
2.1.1 基本介绍	15
2.1.2 测量原理	16
2.1.3 测量步骤	18
2.1.4 主要仪器设备	18
2.2 巷道围岩地应力测试	22
2.2.1 李村煤矿地应力测点选择	22
2.2.2 现场地应力测量	24
2.2.3 岩石弹性常数的确定	28
2.2.4 李村煤矿地应力测试结果	31
2.3 基于非连续变形分析方法的二维地应力反演	33
2.3.1 李村煤矿地质资料分析	33
2.3.2 李村煤矿二维地应力反演模型	34
2.3.3 李村煤矿二维地应力反演分析	36
2.4 基于人工神经网络的三维地应力反演	43
2.4.1 反演区域及反演初始值的选取	43
2.4.2 李村煤矿三维反演地质模型	43
2.4.3 三维模型反演的自变量参数选取及训练样本的培育	45
2.4.4 BP 神经网络的建立及网络的适应性训练	49
2.4.5 网络自适应训练后的准确性检验	52
2.4.6 李村煤矿三维地应力 BP 神经元反演分析	54

参考文献	57
第3章 大采高综放工作面巷道围岩宏细观破坏力学	59
3.1 煤岩体的 X 衍射成分分析	60
3.2 煤岩常规荷载破坏力学行为	64
3.2.1 煤样的单轴破坏力学行为	64
3.2.2 岩石单轴压缩力学行为	66
3.2.3 岩石间接拉伸力学行为	68
3.2.4 岩石三轴力学行为	69
3.2.5 常规单轴和三轴岩石破坏模式	73
3.3 岩石的微细观破坏行为	73
3.3.1 弯曲破坏模式及载荷变形曲线	73
3.3.2 岩石的微观结构分析	77
3.4 采动加卸荷岩石破坏试验研究	78
3.4.1 试验样品和实验条件	78
3.4.2 常规三轴及采动加卸载实验方案	79
3.4.3 灰岩的采动加卸荷破坏实验	80
3.4.4 灰岩的常规三轴破坏实验	86
3.4.5 采动卸荷条件下灰岩的宏观断裂	87
3.4.6 采动加卸载速率的影响分析	89
3.5 采动加卸荷条件下岩石破坏的断裂力学分析	94
3.5.1 裂纹亚临界扩展行为	94
3.5.2 裂纹亚临界扩展与卸荷速率的关系	96
3.5.3 裂纹亚临界扩展机理	96
3.5.4 裂纹的应力强度因子研究	97
3.6 采动卸荷岩石破坏的理论模型初探及讨论	99
3.6.1 采动卸荷与常规破坏实验比较	99
3.6.2 采动卸荷破坏应力-应变关系模型	100
3.6.3 考虑尺度的 Gurson 模型	102
3.6.4 不同参数对破坏本构模型的影响分析	103
3.6.5 采动卸荷条件下岩石破坏的本构关系	104
3.6.6 本构模型初步验证及讨论	105
参考文献	108
第4章 大采高综放工作面覆岩移动规律及模型分析	110
4.1 覆岩移动深孔监测介绍	111
4.1.1 深部岩层移动监测介绍	111
4.1.2 监测仪器及方法	111
4.2 巷道围岩移动现场监测结果及分析	113
4.2.1 同孔不同深度岩层的绝对沉降变化量	113

4.2.2 不同孔同一层位岩层的绝对沉降变化量	118
4.2.3 同孔不同深度岩层相对沉降变化量	123
4.2.4 不同孔同一层位岩层的相对沉降量	128
4.3 巷道顶板破碎钻孔电视窥视结果	134
4.4 覆岩移动的复合关键层理论分析	136
4.4.1 覆岩控制中的关键层理论	136
4.4.2 覆岩关键层“悬臂梁”结构运动规律	137
4.4.3 覆岩的三带分析及垮落步距分析	138
4.4.4 覆岩移动的复合关键层分析	140
4.5 地表沉陷观测及分析	145
4.5.1 地表沉陷观测站设置	145
4.5.2 地表沉陷特征	145
4.5.3 覆岩破坏规律研究	147
4.6 覆岩移动的几何学理论分析	149
4.6.1 大采高开采对地表下沉影响	149
4.6.2 地表下沉随时间的变化	150
4.7 覆岩移动的数值分析	154
4.7.1 地质数值模型	155
4.7.2 开采沉陷数值模拟分析与研究	156
4.7.3 地表沉降量与回采的关系	158
4.7.4 有断层和无断层处的沉陷比较分析	159
参考文献	160
第5章 采矿 MDDA 的开发及其在采矿中的应用	162
5.1 不连续变形 DDA 基本理论	163
5.1.1 块体的变形及一阶位移模式	163
5.1.2 总体平衡方程	164
5.1.3 总体平衡方程求解	165
5.1.4 二维单一块体基本公式	166
5.2 采矿实时开挖模拟分析软件 (MDDA) 开发	169
5.2.1 开挖过程分析及基本假设	169
5.2.2 实时开挖在二维 DDA 中的实现	171
5.2.3 改进程序实现简单算例及其理论验证	175
5.2.4 MDDA 软件使用说明	181
5.3 不同应力状态下采动覆岩移动规律及裂隙演化的 MDDA 模拟	184
5.3.1 采动岩层裂隙场模拟数值模型	184
5.3.2 采动岩层数值模型边界条件及单元开挖	186
5.3.3 水平垂直应力比为 2:1 时采动应力场和位移场	189
5.3.4 水平垂直应力比为 1.5:1 时采动应力场和位移场	202

5.3.5	水平垂直应力比为 1:1 时采动应力场和位移场	205
5.3.6	水平垂直应力比为 0.5:1 时采动应力场和位移场	206
5.3.7	水平垂直应力比为 0:1 时采动应力场和位移场	208
5.3.8	典型的采动裂隙场的分布规律	210
5.3.9	不同应力状态下采动覆岩移动及裂隙演化分析与讨论	211
5.4	大采高综放工作面支架-围岩相互作用 MDDA 模拟	212
5.4.1	6203 工作面地质概况及计算模型	212
5.4.2	覆岩移动的运移规律模拟	213
5.4.3	覆岩应力场变化规律	215
5.4.4	覆岩和顶煤移动规律	216
5.5	王庄矿陷落柱塌陷机理的非连续变形模拟研究	219
5.5.1	陷落柱数值模型建立及参数选择	219
5.5.2	倒漏斗型陷落柱的塌陷机理分析	221
5.5.3	柱型陷落柱的塌陷机理分析	222
5.5.4	漏斗型陷落柱的塌陷机理分析	226
	参考文献	228
第 6 章	大采高综放工作面回采巷道底臃机理及模型研究	230
6.1	巷道底臃机理分析	230
6.1.1	巷道变形破坏特征	230
6.1.2	巷道挤压流动底臃机理	232
6.1.3	应力滑移线场模型及分析	233
6.2	底臃滑移线场控制效果数值模拟分析	240
6.2.1	7603 工作面回风巷模型建立	241
6.2.2	底角锚杆对底臃滑移线场的控制效果分析	245
6.3	底臃滑移线场的优化数值模拟分析	261
6.3.1	底臃滑移数值模型建立	261
6.3.2	不同锚固长度对底臃滑移线场控制模拟分析	264
6.3.3	不同预应力对底臃滑移线场控制模拟分析	269
6.4	临近陷落柱巷道加固模型及分析	274
6.4.1	陷落柱形成的简化模型分析	274
6.4.2	临近陷落柱巷道加固段长度的理论模型	275
6.4.3	陷落柱高度对巷道加固影响的数值模拟分析	279
	参考文献	281
第 7 章	大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护技术	283
7.1	大采高综放工作面巷道围岩变形破坏特征	283
7.2	传统预应力桁架锚索支护研究现状	286
7.3	全空间预应力桁架锚索协同支护技术	288
7.3.1	全空间协同支护理念的提出	289

7.3.2 支护结构与支护原理	289
7.3.3 全空间协同支护的优越性分析	292
7.4 全空间协同支护方案设计与施工工艺	293
7.5 全空间协同支护数值模拟分析	294
7.5.1 数值计算模型建立	294
7.5.2 巷道顶板预应力场平面分布	295
7.5.3 巷道顶板预应力场三维空间分布	296
7.5.4 巷道围岩塑性破坏区分布	298
7.6 全空间协同支护监测反馈及效果	300
7.6.1 监测目的	300
7.6.2 监测内容	300
7.6.3 监测仪器	300
7.6.4 数据处理及日常监测记录表	301
7.6.5 实施效果	301
参考文献	301

第 1 章 绪 论

能源是国民经济增长、工业发展的驱动力，同时也是人类日常生活中最重要的基本资源。长期稳定的能源供应，是国家经济发展和社会稳定的重要保障。中国是世界上能源消费大国之一，多年来，煤炭在我国一次能源生产和消费结构中的比重始终保持在 70% 左右。在这种旺盛的煤炭需求驱动下，我国煤炭产量急剧增长，2005 年煤炭产量突破 20 亿 t，2009 年煤炭产量突破 30 亿 t^[1]，2014 年煤炭产量达到 38.7 亿 t^[2]，2015 年煤炭产量回落到 36.95 亿 t。受煤炭赋存、开采技术等条件制约，我国煤炭产量可能将面临一个所谓的“产量峰值”。这将会给我国的能源安全带来一定威胁。因此，发展大采高综放开采技术是解决煤炭大规模安全高效开发的技术保障，也是保持国民经济稳定发展的一个重要保障。

综合机械化放顶煤开采已有较长的历史^[3]，早在 20 世纪初，法国、西班牙和南斯拉夫等国仅将其作为复杂地质条件下一种特殊的开采技术；在 20 世纪 40 年代末，苏联、法国、南斯拉夫等国开始正式应用放顶煤技术开采厚煤层。然而，我国真正推动了该项采煤技术的快速发展。我国煤炭资源已探明储量约 1.341 万亿 t，其中厚煤层储量占 44%，每年地下开采的厚煤层煤炭产量占煤炭总产量的 45% 以上^[4]。我国厚煤层开采主要有三种综合机械化采煤方法，即综采放顶煤开采、分层综采和大采高综采。其中，分层开采受煤层厚度变化、自然发火、吨煤成本等诸多因素制约，开采效率较低^[3~7]。与分层开采相比，大采高综采或大采高综放开采对煤层厚度变化适应性强，降低了巷道掘进率，这种采煤方法得到了大面积的推广和应用^[8~10]，取得了巨大的经济效益。大采高一次采全高开采目前最大采高约 7m，无法满足 7m 以上特厚煤层的安全高效开采^[11]。对于 7m 以上厚煤层，尤其是中西部地区 14~20m 的特厚煤层，大采高放顶煤开采是首选的采煤方法。近年来，我国成功开发了大采高综放开采成套技术，并在煤矿成功应用，实现了特厚煤层大采高综放开采工作面年产 1000 万 t 的目标。俄罗斯、土耳其、印度及澳大利亚等国开始引进我国的综放开采技术与装备。

大采高实践表明，良好的支架围岩关系是发挥大采高生产能力的关键。但是大采高工作面出现支架围岩事故的概率加大，处理事故的难度也由于高度大、设备重而加大，大采高围岩控制事故有以下三个特点^[12]：①煤壁片帮引发的端面冒顶；②支架工作阻力不足导致的支架压死及损坏；③支架稳定性事故。要实现良好的支架围岩关系，关键是要掌握大采高采场围岩运动及变形规律，在此基础上，提出围岩控制的对策及措施，这正是大采高围岩控制理论的主要研究内容。

已有的研究成果对我国发展大采高技术起到一定的推动作用，使我国初步认识到大

采高开采区别于普通采高开采的主要特点,并尝试给出围岩控制措施。由于大采高综采工作面矿压显现和顶板岩层的运动规律有其特殊性,工作面采高较大,使得工作面顶板活动空间增大、基本顶悬臂梁结构的弯距加大,进而使工作面上覆岩层冒落高度、裂隙带高度、工作面超前支承压力及侧向支承压力等发生变化。此外,根据实测资料得知,大采高回采巷道的围岩变形规律与其他回采巷道明显不同,主要原因在于大采高工作面较一般工作面矿压显现剧烈,而回采巷道一般布置在煤层中,由于煤层厚度大,巷道要么留底煤、要么留顶煤,或者是沿顶底板掘进,而这三种方式各有利弊。留底煤时容易造成底臃,留顶煤时顶板不容易支护,而沿顶底板掘进时,巷道高度大、断面不容易控制、支护困难,严重制约大采高工作面安全高产、高效开采。因此,探索大采高综放开采围岩破断机理、运动规律及控制技术,已成为大采高综放开采研究的核心。

1.1 矿山压力与岩层控制理论和技术进展

1.1.1 巷道围岩地应力测试

地应力是造成巷道变形和破坏的主要原因,准确地获取地应力信息就是获取巷道变形和破坏的力学边界条件,它是采矿工程和岩土工程开挖设计与动力灾害防治的重要依据。地应力测量是一项十分复杂的工作,据不完全统计,国内外目前开发了二十多种地应力测试方法及设备^[13]。其中,应力解除法和水压致裂法是2003年国际岩石力学学会主推的两种地应力测试方法^[14]。

地应力最早的测试技术为岩体表面测量技术,Lieurace应用该技术测量了美国胡佛水坝泄水隧洞原岩应力^[15,16]。20世纪50年代,发展出应力恢复测量法和局部应力解除的中心孔测量法;1958年,压磁式应力计开始应用于钻孔应力测量,钻孔应力测量技术快速发展;这些技术被Hast成功应用于斯堪的纳维亚半岛的地应力测试。1962年出现了USBM钻孔变形计;1963年CSIR门塞器面世;1964年南非科学和工业研究委员会(Centre of Scientific and Industrial Research, CSIR)成功研制出钻孔三轴孔壁应变计,三轴孔壁应变计在实际使用中存在一些明显缺陷。20世纪70年代中期由澳大利亚联邦科学和工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)岩石力学部研制的CSIRO型三轴空心包体应变计迅速在世界各国得到推广,目前已成为最主要的地应力解除测量方法。20世纪80年代初期成功研制钻孔水下三向应变计,目前已经有带自动数据采集系统的新型电脑式钻孔三向应变计探头问世。自20世纪60年代以来,水压致裂法已得到广泛运用^[15,16],并且工艺成熟,其可以测量极深的应力值,这是空心包体应力解除法无法达到的。1970年,美国在油气井中用水压致裂法测得了地应力。目前,水压致裂法已成为应用最为广泛的测试方法之一。但其只是一种二维测量方法,并且假设一个方向为钻孔方向,因此水压致裂法通常和空心包体应力解除法共同在工程上使用。

国内方面,李四光教授是中国地应力测量的创始人^[17]。早在20世纪40年代就提出地壳中水平运动为主、水平应力起主导作用的观点。他提出,地壳内的应力活动是以

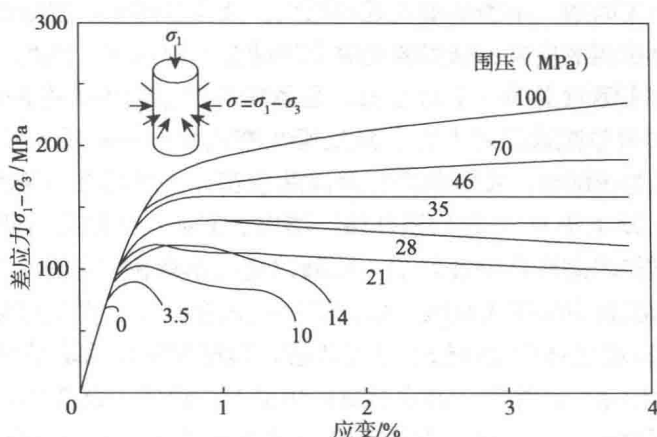
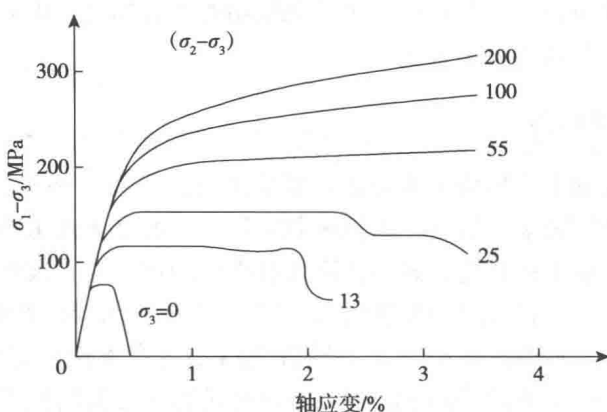
往和现今使地壳克服阻力、不断运动发展的原因；地壳各部分所发生的一切变形，包括破裂，都是地应力作用的反映；剧烈的地应力活动会引起地震。因此，地应力的探测是地质力学具有重大实际意义的一个新方面，是值得予以重视的。在陈宗基^[18]先生的带领下，1964年中国科学院武汉岩土力学研究所在湖北大冶铁矿进行了国内首次应力解除测量，测量深度为-80m，采用在岩石表面贴应变片，然后在应变片周围开圆形槽，实现应力的解除。20世纪60年代后期开始，国内多家单位使用自行研制的压磁式钻孔应力计在地震研究和矿山钻孔中进行了一系列的应力解除测量试验；70年代后期，空心包体应变计和水压致裂法引入我国，取代了压磁式应力计，并逐渐得到广泛应用。蔡美峰^[15]对CSIRO空心包体应变计做了重大改进，包括数据自动记录系统、减少温度效应和岩石弹模及泊松比的计算等，并在金属矿山展开广泛的测试应用。近年来，葛修润和侯明勋^[19]提出了钻孔局部壁面应力解除法和井下机器人，并在部分重大工程中实现了应用，该方法解决了套心应力解除法取心时容易断心的问题。我国目前的地应力测量研究主要应用在地震研究、水利水电、采矿和油田等工程领域，因此准确地获取三维地应力信息对于采矿工程具有重要意义。

1.1.2 巷道围岩破坏行为

巷道开挖会导致巷道围岩应力重分布，围岩由三向应力状态向二向应力状态转变，导致围岩发生变形甚至破坏。岩石在单轴荷载作用下，通常表现出脆性破裂，并且以劈裂破坏为主；而随着围压的升高，岩石的强度会有所增加，并且破坏模式会逐渐向剪切破坏转变，这已被大量的实验现象所证实^[20]。Paterson和Wong^[21]在室温下对Wombegam大理岩做了试验，证明了岩石随着围压增大由脆性向延性转变的特性，如图1.1所示。当围压超过大约20MPa时，岩石宏观破坏之前的应变增加的非常明显，Paterson把这种应变率从只有百分之几时就发生宏观破裂到能承受更大应变能力的转变叫做脆性—延性转变。由图1.1可知，随着围压的增加，应力-应变曲线的总水平在升高，岩石峰值强度也随之增大。岩石的峰后应力-应变关系发生了明显的变化，即应变值有持续增大的趋势，岩石在低围压表现出来的脆性转化为在高围压下表现出来的延性。而且曲线斜率也越来越陡，即围压越大，应变-硬化的范围和程度也越大，从图1.1中还可看出，岩石的脆—延转化存在一个临界围压值，这是岩石发生脆—延转变的标志。Mogi^[22,23]对Yamaguchi大理岩的实验得出了类似的结果，如图1.2所示。

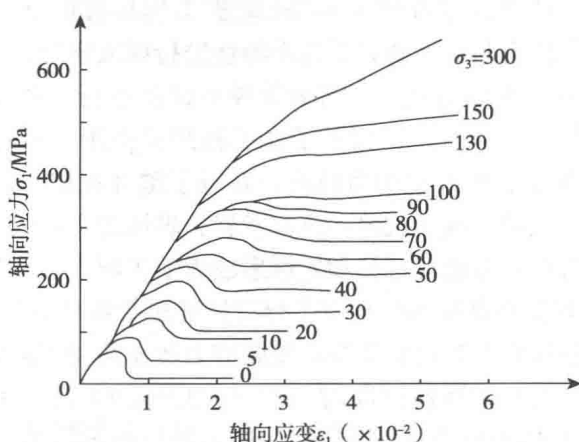
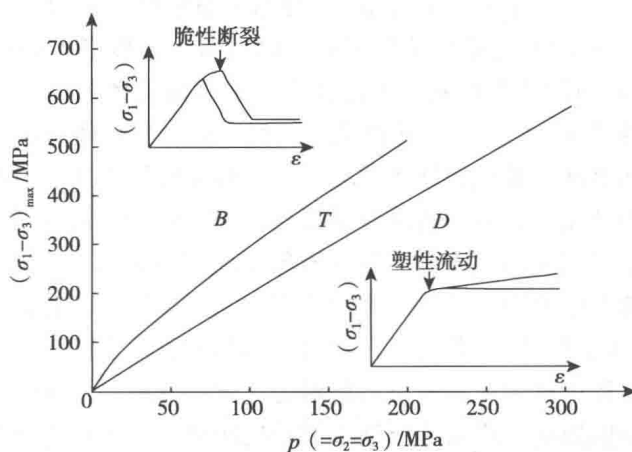
Heard^[24]对脆性—延性转变采取定量的解释，认为如果岩石发生破坏时的应变值达到3%~5%，就可视为岩石发生了脆性—延性转化。而Jaeger和Cook^[25]采取定性的看法，认为只要岩石可以承受永久变形而不失去承载能力，就说岩石处于延性阶段；如果岩石随着变形的增加而承载能力下降，就说岩石处于脆性阶段。

Gowd和Rummel^[26]研究了不同围压下Bunt孔隙砂岩的变形破坏特性，如图1.3所示。从图1.3看出，当轴向应力 σ_1 小于屈服强度 σ_y ，砂岩的变形基本是线弹性的，屈服强度 σ_y 取决于围压的大小。在围压小于90MPa，应力达到峰值应力后随着应变的增加，应力会有所下降，当应力降低到一个残余强度后保持稳定，即随着变形的增加，应力保持稳定。当围压超过100MPa时，砂岩表现出硬化性能。可见在较高的围压下，岩石破坏前

图 1.1 Wombegan 大理岩三轴试验的应力-应变曲线^[21]图 1.2 Yamaguchi 大理岩三轴试验的应力-应变曲线^[22]

的应力水平会有所增高,而且围压的增高会使岩石破裂后的应力-应变曲线趋于平缓,峰值应力出现在更大的应变处。这表明,当围压增大到某个临界围压时,岩石将发生脆延转变。因此可以认为,脆性岩石在破坏前基本上是弹性的,但岩石在破坏前内部就有大量的微破裂出现,也就是说岩石在达到破裂强度之前微破裂就已发生。而围压对微破裂有抑制作用,当围压达到一个临界围压值时,微破裂不再出现,此时岩石就出现硬化现象,即随着应变的增加,强度会升高。Kwasniewski^[27]根据大量砂岩的实验数据,对岩石的脆性—延性转化规律进行了深入的研究,系统地研究了脆性—延性转化点临界应力的关系,并分析了岩石应力-应变全程曲线中的第三种状态,即脆性和延性的中间转化态,这个状态既具有脆性破坏的特征,又具有延性变形的性质,提出了存在一个“脆性—延性转化临界围压”,对应到工程中实际上就是临界深度,如图 1.4 所示。

在围压较大的深部环境中,岩石具有很强的时间效应,表现为明显的流变或蠕变特性。Blacic^[28]和 Pusch^[29]在研究核废料处置时,涉及了核废料储存库围岩的长期稳定性和时间效应问题。一般认为,优质硬岩不会产生较大的蠕变变形,但南非工程实践表明,深部环境下即便优质的硬岩同样会产生明显的流变效应^[30,31],这是深部条件下岩

图 1.3 不同围压下 Bunt 砂岩应力-应变关系^[26]图 1.4 砂岩脆性—延性转化中的过渡区^[27]

石力学行为的一大特征。

综上所述,可以得到一些初步的结论:随着围压的升高,岩石破坏前的应力水平会有所增高,峰值应力出现在更大的形变处。当围压低于脆性—延性转变临界围压值时,岩石的承载能力随其应变的增高而降低,而破坏时应变相对较小,岩石的破坏表现为脆性破坏;当围压高于某一临界值时,岩石却能在较大的应变范围内不失去承载能力,且承载能力会有所提高,这时岩石表现出延性性质;岩石的单轴压缩过程同样伴随着体积变化,弹性阶段体积变小,塑性阶段出现扩容现象;在三轴应力下,围压对岩石的扩容起到抑制作用。当围压增加到某一量值时,扩容可能完全被抑制。扩容过程会产生大量的微破裂(岩石内原生微裂纹扩展所致)。它们的关系是围压越大,扩容量越小,微破裂也越少。岩石的脆性破裂随温度和压力变化而变化,至今在确定脆性—延性转换时存在不同的观点,我们总结认为岩石的脆性破裂主要受到内部微结构和微破裂的影响。

采矿工程中,巷道开挖和工作面回采使其围岩应力状态发生变化,且不同的开采方式、不同的开采厚度导致加卸荷路径不同,从而使岩石的破坏模式也有所不同。因此,

研究不同加卸荷路径下的煤岩体力学行为对于采矿工程具有重要意义^[32]。近年来,国内外学者对不同加卸载应力路径下的岩石力学特性进行深入研究,并取得一定的研究成果。吴刚和赵震洋^[33]在三维应力状态下对岩体模型试样进行三种卸荷破坏试验,依据损伤力学理论对试验结果进行分析,揭示了在工程卸荷作用下岩石类材料的声发射特性;陈卫忠等^[34]按照地下工程开挖卸荷特点,开展了脆性花岗岩常规三轴、不同卸载速率条件下峰前、峰后三轴卸围压试验,研究了岩石破坏的全过程并进行了声发射特征分析,探讨了岩爆岩石的变形破坏特征和岩爆形成力学机制,以及基于能量原理的岩爆判据。周小平等^[35]根据损伤断裂力学建立了岩石处于卸荷条件下的全过程应力-应变关系,理论和试验研究发现岩石卸荷破坏所需要的应力比连续加载破坏时小,且卸荷破坏时的变形比连续加载时大;黄润秋和黄达^[36]通过大理岩的室内三轴卸荷试验和破裂断口的 SEM(扫描电镜)细观扫描分析,研究高应力环境中不同卸荷速率下变形破裂及强度特征;纪洪广等^[37]通过在不同应力水平下对岩石试样的加载-卸荷实验,对岩石试件在不同应力状态下受到“加载-卸荷”扰动时的声发射特征进行了试验研究;沈明荣等^[38]通过对红砂岩在不同加载路径条件下的三轴试验,分析了不同加载路径所得的应力-应变曲线及其对岩石的变形影响,发现在不同加载路径条件下,岩石的非线性特性非常明显。左建平^[39]通过 MTS 815 试验机研究了煤岩组合体分级加卸载试验,分级加卸载下煤岩组合体破坏以脆性破坏机制为主,与单轴作用相比,分级加卸载作用下煤岩组合体的破坏更为严重,且破坏强度有所提高,但轴向和环向应变却有所降低,同一循环中的加载与卸载曲线基本不重合,且在多数情况下不会形成闭合环路;卸载曲线与下一个循环的加载曲线通常也不重合,但会形成闭合环路。彭瑞东等^[40]为具体考察试验机刚度对岩石变形测量的影响程度,在两台不同的试验机上进行了岩石的单轴压缩试验,通过对加卸载过程中试验系统及岩石能量变化进行分析,详细研究了试验系统弹性储能对岩石变形测量的影响,进而给出基于试验机刚度的修正计算方法,来确定岩石在测试过程中的变形;刘建锋等^[41]对两组红层泥质粉砂岩在 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统上进行单轴四级循环加卸载试验,得到两组泥质粉砂岩的平均动弹性模量和阻尼比与动应变的相关表达式。

1.1.3 岩层破断与覆岩移动规律

20 世纪 50 年代以前,由于受到当时科学技术发展水平的限制,人们对采场上覆岩层结构的认识仅处于假说阶段。德国学者哈克(Hack)和吉里策尔(Gillitzer)于 1928 年提出压力拱假说;苏联学者库兹涅佐夫在 20 世纪 50 年代初提出铰接岩块假说;德国学者施托克于 1916 年提出悬臂梁假说;比利时学者拉巴斯在 1947 年年初提出预成裂隙假说^[4]。

20 世纪 80 年代,钱鸣高^[42~45]院士先后提出了“砌体梁”结构理论和关键层理论。该理论研究认为,基本顶发生破坏是采场各种矿山压力现象的根源。基本顶每次断裂后形成长度接近的岩梁之间会由自由面相互铰接。随着研究的不断深入,逐渐在煤层顶板中形成了关键层假说,以及由冒落带、裂隙带和弯曲下沉带所构成的“上三带”顶板岩层划分方式^[42],如图 1.5 所示。山东科技大学宋振骐^[46]院士基于大量现场观测,提出

了“传递岩梁”理论,该理论认为,老顶岩梁对支架的作用力取决于支架对岩梁运动的抵抗程度,可能存在给定变形和限定变形两种工作方式,并给出支架-围岩关系的表达式,即位态方程。

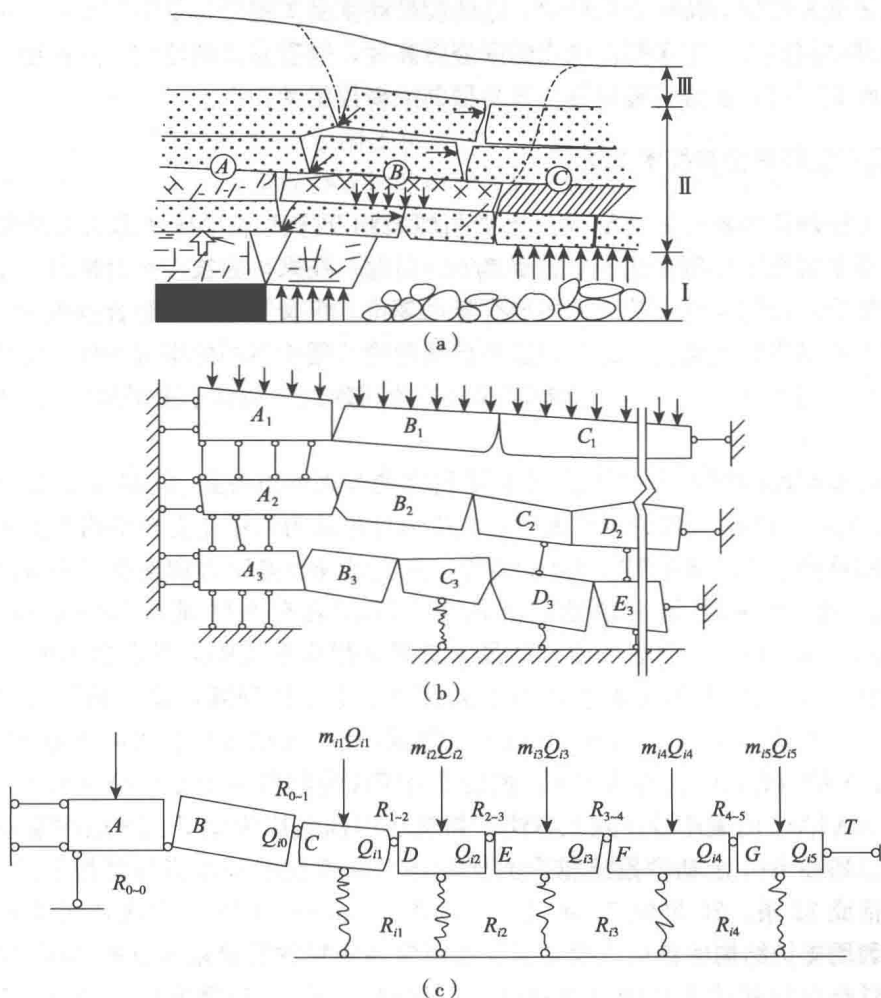


图 1.5 采场上覆岩层中的“砌体梁”结构模型

另外,对于岩层移动的研究,波兰学者李特维尼申等建立了岩层或地表下沉预计的随机介质理论法,后由中国工程院刘宝琛院士和北京科技大学廖国华教授等发展成概率积分法,是目前我国较为成熟且应用最广泛的地表下沉计算方法之一^[47~49]。波兰学者克诺泰(Knothe)和沙乌斯脱维奇(Salustowicz)利用土压密的基本假设对采场上覆岩层和地表变形的时间问题进行了研究,得出公式:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = c(W_k - W(t)) \quad (1.1)$$

其中, W 为地表某点的下沉量; c 为下沉时间系数; W_k 为地表某点当 $t \rightarrow \infty$ 时的最终下沉量; $W(t)$ 为地表某点在 t 瞬间的下沉量。

对于非连续介质体运动的研究,谢和平^[50]提出了损伤非线性大变形有限元法;何