

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与
工程研究著作 丛书

工程扰动围岩压力拱表征 及其演化机制

◎王树仁 赵雁海 李春柳 吴俊杰 著

非
外
借



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

工程扰动围岩压力拱表征 及其演化机制

王树仁 赵雁海 李春柳 吴俊杰 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对围岩承载理论滞后于工程实践的现状,采用理论分析、室内试验、数值模拟与现场监测相结合的研究方法,对室内岩板断裂铰接成拱过程及其失稳特征、单拱隧道开挖围岩压力拱形成机制及演化特征、连拱隧道分步开挖围岩压力演化及偏态效应、采动覆岩复合压力拱结构演化特征及失稳机制等进行系统研究,得出的相关结论对指导采掘工程扰动围岩稳定性分析与控制以及类似工程实践具有重要的理论意义和工程实用价值。

本书可供从事岩土工程、采矿工程、隧道工程、与地下开挖工程相关的技术人员、科研人员以及高等院校本科生和研究生等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程扰动围岩压力拱表征及其演化机制 / 王树仁等著. —北京: 科学出版社, 2019.9

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-062157-3

I. ①工… II. ①王… III. ①隧道工程-围岩压力-研究 IV. ①U455

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第181157号

责任编辑: 刘宝莉 陈 婕 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 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>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年9月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 300 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭 何满潮

副主编: 康红普 李术才 潘一山 殷跃平 周创兵

秘书长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	陈卫忠	陈云敏	陈志龙
邓建辉	杜时贵	杜修力	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙灵	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	蒋宇静	焦玉勇	金丰年	景海河
鞠 杨	康红普	李 宁	李 晓	李海波
李建林	李世海	李术才	李夕兵	李小春
李新平	廖红建	刘宝莉	刘大安	刘汉东
刘汉龙	刘泉声	吕爱钟	潘一山	戚承志
任辉启	余诗刚	盛 谦	施 斌	宋胜武
谭卓英	唐春安	汪小刚	王 驹	王 媛
王金安	王明洋	王旭东	王学潮	王义峰
王芝银	邬爱清	谢富仁	谢雄耀	徐卫亚
薛 强	杨 强	杨更社	杨光华	殷跃平
岳中琦	张金良	张强勇	赵 文	赵阳升
郑 宏	郑炳旭	周创兵	朱合华	朱万成

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施，国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开：在建、拟建水电工程达 30 多项，大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物，如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等水电站，其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米；锦屏二级水电站 4 条引水隧道，单洞长 16.67km，最大埋深 2525m，是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞；规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m，最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸，许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈，岩爆危险性增加，巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起高度重视，有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如，深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题，高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题，地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题，深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律，等等。这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

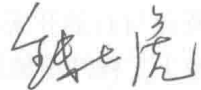
近几年来，863 计划、973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等，对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助，并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研，吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下，这些课题已经取得了很多很好的研究成果，并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行系统的总结，并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》，值得钦佩、支持与鼓励。

该丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果，包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术，考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论，地质超前预报方法与技术，工程

地质灾害预测预报与防治措施, 断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法, 灾害环境下重大工程的安全性, 岩石工程实时监测技术与应用, 岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化, 典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例, 等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设, 岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力, 在工程实践中检验、完善和发展。该丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版, 必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展, 在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近 20 年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高,在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973 计划、863 计划、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩土力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉市与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程研究领域取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 75 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研等领域大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本丛书的策划、组织与出版过程中,得到各专著作者与编委的积极响应;得到各界领导的关怀与支持,特别是中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭教授、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉编辑做了许多烦琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

工程实践表明,地下工程开挖后围岩应力重新分布,荷载传递路径发生改变,围岩为抵抗开挖不均匀变形进行应力自调节而产生压力成拱现象。工程扰动围岩应力自调节成拱现象是其自稳能力的体现。

虽然地下工程中的拱效应现象早已为人们所认识,但由于采掘工程岩体的复杂性、各种施工条件的差异性以及随着工程实践的发展不断出现的新问题,理论滞后于实践的现象十分突出。目前,国内外学者对开挖工程扰动围岩压力拱的定义、成拱条件和失稳判据等,各自表述差异较大,缺乏统一的认识和系统化的成果;对开挖工程扰动围岩周边压力拱的形态描述过于笼统,缺少针对压力拱不同区域形态特征的量化评价;开挖工程扰动围岩压力拱结构自承荷载和传递外载的动态演化机制有待进一步研究。此外,由于采掘工程所处应力状态与加卸载过程密切相关,不考虑开挖卸荷路径的压力拱演变特征与实际情况出入较大的问题,因此,有必要结合实际工程,对采掘工程扰动围岩应力转移变化规律、围岩压力成拱条件、演化特征和主动调控机制等进行深入系统的研究。

本书基于前人研究成果,采用室内试验、理论分析、数值模拟与现场监测相结合的研究方法,针对室内岩板断裂铰接成拱过程及其失稳特征、隧道工程开挖围岩压力拱形成机制及演化特征、连拱隧道分步开挖围岩压力演化及偏态效应、不同开采条件下采动覆岩复合压力拱结构演化特征及失稳机制等进行了系统研究,得出的相关结论对丰富和发展现有围岩承载理论体系、指导采掘工程扰动围岩稳定性分析与控制及类似工程实践具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

在撰写本书的过程中,作者得到了中国科学院院士何满潮教授,中国工程院院士蔡美峰教授,北京科技大学王金安教授,河南理工大学邹友峰教授、杨小林教授、刘希亮教授、顿志林教授、邹正盛教授,浙江科技学院杨建辉教授,青岛理工大学王旭春教授和中铁隧道集团有限公司刘招伟教授级高级工程师的指导;作者指导的研究生徐殿富、王永光、李宁、李春阳等参与了部分内容的撰写;书稿部分实验得到了澳大利亚新南威尔士大学 Paul Hagan、Kanchana Gamage、Hossein Masoumi、程岩、陈建行、张呈国等的支持和帮助;此外,还有许多老师和同事给予了大力支持和帮助,在此一并深表感谢和敬意!

本书的撰写得到了国家自然科学基金项目(51774112; U1810203; 51674190; 51474188; 51074140; 51310105020)、河北省自然科学基金项目(E2014203012)、河北省科技支撑项目(072756183)、河南省科技厅国际合作项目(182102410060;

162102410027)、国家留学基金委访学项目(2010813124)、澳大利亚奋进研究学者项目(4427_2015),以及河南理工大学太行学者和博士基金项目(B2015-67)的支持,在此表示感谢!

同时,本书的撰写参考了大量的相关文献和专业书籍,也向相关作者深表谢意!

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	1
1.1.1 采掘巷道围岩压力拱研究现状	2
1.1.2 采场围岩三维压力拱研究现状	2
1.2 本书主要研究内容	3
第 2 章 层状岩板断裂铰接拱失稳破坏特征	5
2.1 层状岩板断裂铰接拱试验	5
2.1.1 岩板试样及加载装置	5
2.1.2 试验步序及试验过程	7
2.1.3 单层岩板断裂铰接成拱失稳特征	8
2.1.4 双层组合岩板变形破坏失稳特征	11
2.1.5 双层组合岩板断裂失稳破坏模式	14
2.2 岩拱结构承载力学分析	16
2.2.1 工程力学模型	16
2.2.2 竖向荷载与水平反力关系式	17
2.2.3 竖向荷载与水平反力关系曲线	18
2.3 集中荷载作用下单层岩板断裂铰接失稳分析	19
2.3.1 构建计算模型	19
2.3.2 单层岩板模型参数标定	22
2.3.3 单层岩板断裂铰接成拱过程模拟分析	22
2.3.4 单层岩板断裂铰接成拱声发射特征	23
2.3.5 单层岩板断裂铰接拱失稳尺度效应	24
2.4 集中荷载作用下双层岩板断裂铰接失稳分析	25
2.4.1 双层岩板断裂铰接拱失稳特征	25
2.4.2 双层岩板断裂铰接拱失稳过程	26
2.4.3 双层岩板断裂铰接成拱声发射特征	27
2.4.4 双层岩板断裂失稳影响因素分析	29
2.4.5 双层岩板断裂失稳能量耗散特征	30

2.5	固定边界条件岩板断裂失稳破坏特征	33
2.5.1	构建计算模型	33
2.5.2	组合岩板断裂铰接拱失稳破坏过程	34
2.5.3	组合岩板断裂铰接拱失稳破坏特征	35
2.5.4	组合岩板断裂铰接拱失稳影响因素分析	36
第3章	公路隧道围岩压力拱演化特征	40
3.1	隧道围岩压力拱特性	40
3.1.1	隧道围岩压力拱表征	40
3.1.2	建立数值计算模型	41
3.1.3	隧道围岩压力拱尺寸效应	43
3.1.4	隧道围岩压力拱围岩差异效应	44
3.1.5	隧道围岩压力拱应力状态效应	45
3.2	沿隧道轴向分步开挖围岩压力拱分布形态	48
3.2.1	三维数值计算模型	48
3.2.2	静水应力状态沿隧道轴向压力拱分布形态	49
3.2.3	不同应力状态沿隧道轴向压力拱演化特征	51
3.3	隧道围岩压力拱主动调控技术	52
3.3.1	组合锚杆支护尺寸效应	52
3.3.2	不同应力状态组合锚杆支护特性	55
3.3.3	锚杆与锚索联合支护隧道围岩压力拱特征	55
3.4	圆形隧道开挖围岩应力演化热辐射特征	57
3.4.1	热辐射红外成像技术简述	57
3.4.2	热辐射红外成像技术原理	59
3.4.3	圆柱试样单轴压力试验热辐射效应	60
3.4.4	不同围压圆形隧道围岩应力-热辐射试验	66
3.4.5	圆形隧道围岩应力演化热辐射监测及分析	68
第4章	连拱隧道分步开挖围岩压力偏态效应	70
4.1	连拱隧道围岩压力拱演化特征	70
4.1.1	工程概况	70
4.1.2	数值计算模型	71
4.1.3	模拟分析方案	73
4.1.4	连拱隧道分步开挖围岩压力拱演化过程	73
4.1.5	不同工况连拱隧道围岩压力拱演化特征	77
4.2	连拱隧道开挖偏态压力等效荷载计算	81
4.2.1	普氏压力拱围岩荷载计算	82
4.2.2	连拱隧道围岩等效荷载计算	83

4.2.3	隧道围岩等效荷载计算影响因素	85
4.3	连拱隧道偏态压力热红外试验	87
4.3.1	相似模型制作	87
4.3.2	模拟试验步骤	88
4.3.3	台阶法开挖隧道围岩应力热红外特征	89
4.3.4	拓展法开挖隧道围岩应力热红外特征	93
4.4	连拱隧道富水条件下压力拱演化特征	96
4.4.1	计算模型及模拟方案	96
4.4.2	饱水与干燥隧道围岩压力拱演化特征	97
4.4.3	不同埋深连拱隧道围岩压力拱演化特征	101
4.4.4	不同开挖顺序隧道围岩压力拱演化特征	102
4.4.5	不同渗透条件隧道围岩压力拱演化特征	103
第5章	煤层倾角变化采场压力拱演化特征	105
5.1	工程背景	105
5.1.1	工程地质条件	105
5.1.2	主要工程问题	107
5.2	不同工况采场压力拱演化特征	107
5.2.1	采场压力拱边界形态	107
5.2.2	采场三维数值计算模型	109
5.2.3	采面不同推进距离采场压力拱演化特征	110
5.2.4	采动覆岩软硬变化采场压力拱演化特征	113
5.2.5	不同回采速度变化采场压力拱演化特征	115
5.2.6	煤层倾角变化采场围岩压力拱演化特征	116
5.3	层状结构顶板采场压力拱分布特征	118
5.3.1	层状结构采场力学模型	118
5.3.2	数值计算模型及模拟方案	120
5.3.3	顶板发育夹层采场压力拱变化特征	123
5.3.4	受应力状态影响采场压力拱演化特征	127
5.4	采场压力拱力学模型及失稳机制	130
5.4.1	采场压力拱力学模型	131
5.4.2	采场压力拱力学分析	132
5.4.3	采场压力拱破坏模式	133
5.4.4	采场压力拱失稳特征	134
第6章	基岩厚度变化采场压力拱演化特征	137
6.1	工程背景	137
6.1.1	工程地质条件	137

6.1.2	矿压显现特征	139
6.2	采场覆岩破断压力拱演化特征	141
6.2.1	回采过程关键块体压力拱结构	141
6.2.2	关键块压力拱结构稳定性分析	146
6.2.3	回采过程压力拱结构模拟分析	150
6.3	采场覆岩复合压力拱演化特征	154
6.3.1	构建数值计算模型	154
6.3.2	薄基岩复合压力拱演化特征	156
6.3.3	厚基岩复合压力拱演化特征	157
6.4	采场覆岩破断压力拱演化试验	159
6.4.1	伺服控制相似模拟实验台	159
6.4.2	相似模拟试验相似比设计	161
6.4.3	模拟试验方案及材料配比	162
6.4.4	薄基岩破断压力拱演化特征	167
6.4.5	厚基岩破断压力拱演化特征	171
6.5	采场围岩压力拱能量演化特征	175
6.5.1	采场围岩力学模型及应变能计算	175
6.5.2	构建三维数值计算模型	178
6.5.3	采场监测单元的应力及能量变化特征	178
6.5.4	采场压力拱的拱脚应力转移变化特征	181
6.5.5	采场压力拱演化与能量集聚耗散特征	182
第7章	浅埋煤层松软顶板采场覆岩运移特征	187
7.1	煤层赋存条件及采动覆岩质量	187
7.1.1	工作面参数及煤层特征	187
7.1.2	主采煤层及顶底板岩性	187
7.1.3	浅埋煤层界定指标	188
7.1.4	采动覆岩质量评价	189
7.2	浅埋煤层采动覆岩运移规律推断	191
7.2.1	采动覆岩运移规律推断	191
7.2.2	采场覆岩结构及其特点	198
7.2.3	采动覆岩结构概化模型	200
7.2.4	采场围岩与支架作用关系	202
7.3	综采软弱覆岩运移相似模拟试验	205
7.3.1	相似模拟试验基础	205
7.3.2	构建物理试验模型	206

7.3.3 采动覆岩运移演化特征	209
7.3.4 采动覆岩支承压力分布	213
7.3.5 采动覆岩结构演化特征	216
第 8 章 结论与展望	219
参考文献	222

第1章 绪 论

工程实践表明,当地下工程开挖后,围岩应力重新分布,荷载传递路径发生改变,围岩为抵抗开挖不均匀变形而进行应力自调节,由此出现了压力拱^[1,2]。虽然地下工程中的拱效应现象早已为人们所认识,但对采掘扰动围岩应力转移变化规律、应力自调节成拱的条件及压力拱演化特征、有效调控机制等方面,仍有待深入研究。

无论是隧道工程还是煤矿巷道掘进,实现巷道稳定都要充分发挥围岩的自稳能力,而围岩应力自调节成拱现象是其自稳能力的体现^[3,4]。如果把巷道围岩视作一种力学结构,我们就能定义压力拱的边界范围、量化分析压力拱的几何形态与力学参数,研究采掘巷道围岩应力自调节成拱条件^[5-8];基于力学平衡和能量原理,弄清压力拱结构自承载和传递外载的关系,主动调控压力拱受力和围岩变形的协调关系,以及保障压力拱结构的稳定,对改善理论滞后于实践的现状、丰富和发展地下工程围岩承载理论具有重要理论意义和工程实用价值^[9,10]。

煤层回采后,采场原岩应力平衡状态被打破,致使采场扰动围岩应力转移变化和重新分布,在采场围岩中形成具有相对稳定的覆岩承载结构^[11-13]。由于回采工作面的围岩应力场呈现为三维空间分布,沿回采工作面走向和倾向重新分布的应力场产生叠加效应,形成采场围岩的三维宏观压力拱壳结构^[14-18]。因此,基于前人研究成果,本书将对采场围岩三维压力拱的形成条件、分布演化特征以及如何人为主动调控等进行深入研究,这对煤层安全开采及丰富矿山压力理论具有重要现实意义。

综上所述,深入研究采掘扰动作用下围岩应力的转移变化规律、围岩压力成拱条件、演化特征和主动调控机制等,可为采场围岩矿山压力控制、煤层安全回采和采掘巷道或隧道围岩支护参数设计等提供理论依据与技术支撑,具有推广和应用价值。

1.1 国内外研究现状

采掘扰动围岩应力转移变化规律、围岩压力成拱条件、压力拱演化特征以及有效调控机制等研究,是涉及采掘工程安全的热点问题,一直受到国内外学者和现场工程技术人员的广泛关注。

1.1.1 采掘巷道围岩压力拱研究现状

Kovari^[19]发现在松散围岩中开挖隧道存在拱效应现象,有人通过试验证实了土拱效应的存在。Bergman等^[20]认为围岩压力拱靠近硐室的顶板。Lang等^[21]认为围岩压力拱存在于远离硐室顶板的上方。上述二者之所以出现矛盾,是由于他们没有明确统一的判别压力拱的方法。2002年,Huang等^[22]提出了平面压力拱上边界和下边界的判别方法。2006年,Li^[23]基于压力拱的概念,对某铁矿松散岩体进行了加固设计。2013年,Kim等^[24]采用理论分析和实验方法,对竖井的侧向压力进行了成拱效应分析等。

20世纪90年代中期以来,我国学者对硐室围岩压力拱进行了研究。例如,2003年,宋宏伟等^[25]认为硐室开挖后,围岩压力拱厚度与硐室埋深、跨度及围岩力学性质有重要关系。2005年,梁晓丹等^[26]对硐室围岩压力成拱原因进行了分析。2008年,喻波等^[27]对隧道围岩的应力状态进行了计算分析,并对压力拱理论及隧道埋深划分等进行了研究。2012年,王迎超等^[28]对深埋隧道的压力拱进行了解析分析,指出隧道开挖后会形成一次压力拱,当围岩出现拉应力时会导致二次压力拱出现。2013年,何本国等^[29]发现在软岩隧道中进行锚注支护,能够促成动态压力拱,有利于控制隧道围岩的稳定性等。

综上所述,多数学者对巷道围岩压力拱的研究主要局限于二维平面问题,对三维压力拱研究较少;对围岩压力拱的定义、成拱条件和失稳判据等,各自表述差异较大,缺乏统一的认识和系统化的成果;对巷道周边压力拱的形态描述过于笼统,缺少针对压力拱不同区域形态特征的量化评价;巷道围岩自承荷载和传递外载的界限不清,对巷道围岩支护荷载的计算公式过于简化,对指导实际工程的普遍性尚显不足。此外,由于巷道所处应力状态与加卸载过程密切相关,不考虑开挖卸荷路径的压力拱演变特征与实际情况出入较大。因此,有必要结合实际工程,对巷道开挖围岩应力转移变化规律、围岩压力成拱条件、演化特征和主动调控机制等进行拓展和深入系统地研究。

1.1.2 采场围岩三维压力拱研究现状

在粮食堆积到一定高度后,粮仓底部所受的力达到最大值并保持不变,即形成了通常所说的压力拱。1895年,Janssen^[30]应用连续介质模型,对粮仓效应进行了定量解释。1980年,Heyman^[31]提出了砌体拱强度的估算方法。近年来,随着矿山开采强度的快速发展,矿山地压引发的许多安全问题要求人们需应用新的矿山压力理论来指导地下工程设计与安全施工^[32]。

20世纪,我国学者陆续在压力拱矿压理论方面进行研究,并取得了较大进展。1993年,陶连金等^[33]对老顶采场上覆岩层运动进行了模拟分析,提出了传力拱的概念。1996年,马庆云和钟道昌^[34]通过相似材料模拟试验,进行了采场支撑压力分布及其发展规律的研究。2009年,耿养谋^[35]通过模拟采场覆岩应力拱演化过程,发现煤层开采后覆岩压力呈现拱形分布,随着开采范围的增加,压力拱的拱脚不断前移,拱顶呈扩大趋势。2012年,伍永平等^[36]通过相似材料试验与数值模拟计算,进行了大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳受力特征的分析。2013年,谢广祥和王磊^[37]对不同岩性采场围岩应力壳变化特征进行了计算分析。此外,许海涛等^[38]应用有限元方法,进行了大采高综采工作面上覆岩层垮落及应力分布规律的数值模拟分析等。

由于采动覆岩移动及破坏是一个复杂的力学过程,上述研究对煤系地层呈层状构造沉积的特性、叠合岩层之间的岩性差异和岩层之间的几何与力学变化因素考虑不足,对采动应力环境的时间效应、尺度效应等非线性力学行为认识不充分,对三维应力壳拱进行主应力矢量变化定性描述较多,缺少对三维应力壳拱形态参数及其力学行为的量化分析,得出的研究成果尚有待进一步深化和发展。近年来,随着综放技术的进步及开采深度的不断增加,与矿山压力相关的重大灾害逐渐增多。大量矿山重大工程灾害调研结果表明,深入系统地研究采动覆岩结构及其与矿山压力的动态关系,是控制矿山重大工程灾害的关键问题。

可见,虽然国内外学者针对采掘扰动作用下围岩应力转移变化规律、围岩压力拱的形成条件与演化特征等进行了大量的研究,取得了不少研究成果,但由于采掘工程岩体的复杂性、各种施工条件的差异性,以及随着工程实践的发展不断出现的新问题,上述研究尚处于经验摸索阶段,缺少系统化和成熟的科学理论作指导,理论滞后于实践的问题仍十分突出,因此,基于前人研究成果,进行采动围岩压力拱演化特征及主动调控机制的深入研究,可为现场工程实践提供理论支撑和技术依据,具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

1.2 本书主要研究内容

本书采用室内试验、理论分析、数值模拟与现场监测相结合的研究方法,对岩板断裂铰接成拱、采掘扰动巷道及采场围岩压力拱分别进行成拱条件、形态参数表征、力学演化行为和主动调控机制的研究,主要内容如下:

(1)利用岩石力学试验机和自主研发的加载装置,对集中荷载和均布荷载作用下,单层及双层岩板断裂铰接成拱过程及其失稳特征进行试验研究,并应用颗粒流分析程序进行数值模拟验证分析。基于岩板铰接拱结构工程力学模型,推导岩