

Stress Field Evolution Effect and Engineering Application
of Stress-Relief Mining in Deep Coal Seam Group

深部煤层群卸压开采 应力场演化效应及工程应用

杨 科/著



深部煤层群卸压开采

 科学出版社

深部煤层群卸压开采 应力场演化效应及工程应用

Stress Field Evolution Effect and Engineering Application
of Stress-Relief Mining in Deep Coal Seam Group

杨科 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以淮南矿区多煤组高瓦斯煤层群卸压开采为研究背景,采用理论分析、实验室试验、模拟试验与现场实测等手段,分析了3种典型工程地质条件下(近距离煤层群卸压开采、多煤组远程上行卸压开采、大倾角煤层群卸压开采)围岩应力场、裂隙场演化特征,对比了同一近距离煤层群不同开采顺序(上行、下行)卸压开采围岩应力场、裂隙场演化特征的异同。在此基础上,阐述了煤层群卸压开采应力裂隙演化的机理,并有效地运用于现场指导,为淮南矿区同类工程地质条件提供借鉴,丰富了煤与瓦斯共采理论。

本书可供从事采矿工程及相关专业的科研及技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部煤层群卸压开采应力场演化效应及工程应用=Stress Field Evolution Effect and Engineering Application of Stress-Relief Mining in Deep Coal Seam Group / 杨科著. —北京: 科学出版社, 2018

ISBN 978-7-03-057737-5

I. ①深… II. ①杨… III. ①煤层群-卸压-煤矿开采-应力场-研究 IV. ①TD823.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第115692号

责任编辑: 刘翠娜 崔元春 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

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>

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年10月第一次印刷 印张: 11 1/4 插页: 4

字数: 260 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

淮南矿区为多煤组高瓦斯煤层群开采，其典型赋存条件为“三高一低”（高地压、高瓦斯压力、高瓦斯含量、低渗透性）。随着开采深度的增加，煤层赋存条件及开采条件日趋复杂，开采煤层面临煤与瓦斯突出的威胁日趋严重。采用卸压开采可有效增加煤层透气性，使相邻高瓦斯突出煤层的瓦斯解析为游离瓦斯，再通过预先布置的巷道和钻孔抽采瓦斯，实现区域治理，从而实现高瓦斯煤层在低瓦斯状态下安全开采。

多年来，众多专家、学者与工程技术人员围绕卸压开采煤与瓦斯共采技术与理论开展了许多研究，在煤岩体加卸载力学特征、采场围岩采动应力演化、近距离煤层群安全开采等方面取得了一系列成果，对推动低渗透性高瓦斯煤层群开采技术的发展起到十分重要的作用。工程实践表明，采动高应力演化作用下煤岩体的强度和变形等力学特征的非线性、围岩结构的不连续性更加明显；卸压开采过程中煤岩体中能量积聚与释放的非线性特征与多因素共同致灾机理更趋复杂。对于多组高瓦斯近距离煤层群煤与瓦斯共采，迫切需要完善的围岩应力场、裂隙场及瓦斯渗流场演化特征基础理论的支持。

本书以淮南矿区多煤组高瓦斯煤层群卸压开采为研究对象，采用理论分析、实验室试验、模拟试验与现场实测等手段，分析了3种典型工程地质条件下（近距离煤层群卸压开采、多煤组远程上行卸压开采、大倾角煤层群卸压开采）围岩应力场、裂隙场演化特征，对比了同一近距离煤层群不同开采顺序（上行、下行）卸压开采围岩应力场、裂隙场演化特征的异同。在此基础上，阐述了煤层群卸压开采应力裂隙演化的机理，并将其有效地运用于现场指导，为淮南矿区同类工程地质条件下的煤层群开采提供借鉴，丰富了煤与瓦斯共采理论。

本书成果是在国家自然科学基金面上项目（51374011）、国家重点研发计划项目（2016YFC0801402）、国家自然科学基金重点项目（51634007）、安徽省重点研究与开发计划项目（1704a0302129）的资助下完成的，凝结了研究团队多年来的科研心血。感谢安徽理工大学采矿实验室提供优质的试验平台及淮南矿区工程技术人员提供现场调研和实测！真诚地感谢本书所引用的参考文献的作者及启迪作者思想的其他国内外学者！

感谢博士后导师袁亮院士、薛俊华教授级高工对作者的悉心指导，从项目立项、试验研究、成果鉴定到本书稿件编写的每个环节无不倾注了两位老师的心血。在此向恩师表示深深的敬意和衷心的感谢！感谢研究团队华心祝教授、李迎富教

授、李志华副教授、刘钦节副教授、陈登红副教授在本书理论分析和试验研究中所做的大量工作。感谢作者的研究生祁连光、闫书缘、陆伟、何祥、窦礼同、刘帅、孙力、许鸣皋、刘千贺、孔祥勇等为本书所做的大量细致、烦琐的工作。

尽管作者在撰写过程中，认真细致地整理科研资料，用心地选取内容、设计结构层次，但是限于作者的水平，书中难免有不妥之处，恳请有关专家和广大读者批评指正！

杨 科

2018年5月于淮南

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 煤系地层煤岩体工程力学特性	3
1.2.2 多煤层开采覆岩运移与采动应力场演化规律	5
1.2.3 煤与瓦斯共采理论与技术	6
1.2.4 卸压开采煤岩动力灾害发生机理	8
1.3 科学意义	9
第 2 章 近距离煤层群卸压开采应力裂隙演化特征	11
2.1 近距离煤层群工程地质概况	11
2.1.1 近距离煤层群卸压开采工作面布置情况	11
2.1.2 近距离煤层群卸压开采模型	11
2.1.3 主采煤层顶底板物理力学特征	13
2.2 近距离煤层群下行卸压开采应力裂隙演化特征	13
2.2.1 近距离煤层群下行卸压开采应力场演化特征	13
2.2.2 近距离煤层群下行卸压开采裂隙场演化特征	19
2.2.3 近距离煤层群下行卸压开采高应力演化特征	21
2.2.4 下行卸压开采高应力演化特征相似材料试验	23
2.3 近距离煤层群上行卸压开采应力裂隙演化特征	29
2.3.1 近距离煤层群上行卸压开采应力场演化特征	29
2.3.2 近距离煤层群上行卸压开采裂隙场演化特征	35
2.3.3 近距离煤层群上行卸压开采高应力演化特征	38
2.4 小结	39
第 3 章 多煤组远程上行卸压开采应力裂隙演化特征	41
3.1 多煤组煤层群工程地质概况	41
3.1.1 多煤组远程上行卸压开采工作面布置情况	41
3.1.2 多煤组煤层群煤岩结构特征	43
3.1.3 多煤组远程上行卸压开采模型构建	48
3.2 多煤组远程上行卸压开采可行性判断	51

3.3	多煤组上行卸压开采相似模拟试验	52
3.3.1	走向模型应力演化特征	52
3.3.2	走向模型裂隙演化特征	56
3.3.3	走向模型卸压特征	59
3.3.4	倾向模型卸压特征	61
3.4	多煤组上行卸压开采数值模拟试验	65
3.4.1	走向模型应力演化特征	65
3.4.2	走向模型裂隙演化特征	70
3.5	小结	73
第4章	大倾角煤层群开采采场围岩力学特征	75
4.1	大倾角近距离煤层工程地质概况	75
4.1.1	大倾角近距离煤层工作面布置情况	75
4.1.2	大倾角近距离煤层煤岩物理力学参数	76
4.1.3	大倾角近距离煤层开采数值模型	77
4.2	12125 工作面开采围岩力学特征	78
4.2.1	12125 工作面采场围岩应力场特征	78
4.2.2	工作面开采后采场围岩位移场特征	80
4.3	12124 工作面开采围岩力学特征	82
4.3.1	12124 工作面走向段开采围岩应力场特征	82
4.3.2	工作面走向段采场围岩位移场特征	87
4.3.3	工作面旋转综采段开采围岩应力场特征	90
4.3.4	工作面旋转综采段采场围岩位移场特征	97
4.4	小结	101
第5章	煤层群卸压开采应力裂隙演化机理分析	102
5.1	近距离煤层群卸压开采应力裂隙演化机理	102
5.1.1	单一煤层开采采动应力分布规律	102
5.1.2	近距离煤层群下行卸压开采应力场演化特征	104
5.1.3	卸压区演化趋势	106
5.1.4	下行卸压多煤层开采裂隙场演化特征	113
5.1.5	煤层群开采采动裂隙场演化效应	114
5.2	远程上行卸压开采应力裂隙演化机理	119
5.2.1	覆岩变形移动规律	119
5.2.2	顶板岩层应力分布规律	121
5.2.3	采动裂隙动态发育规律	123
5.3	近距离采空区下大倾角煤层开采围岩破坏机理	126
5.3.1	大倾角工作面开采底板破坏深度分析	126

5.3.2 支承压力分布特征	128
5.3.3 12124 工作面煤壁片帮效应	133
5.4 小结	137
第 6 章 工程应用	139
6.1 近距离煤层群卸压开采采场围岩矿压控制	139
6.1.1 采空区下部工作面矿压显现规律	139
6.1.2 围岩稳定性控制技术及应用	144
6.2 多煤组低渗透煤层群煤与瓦斯共采	149
6.2.1 停采线附近覆岩采动应力演化	149
6.2.2 卸压瓦斯抽采量统计	156
6.2.3 关键层破断与卸压瓦斯抽采关系	157
6.2.4 抽采巷道优化布置	163
6.3 小结	166
参考文献	167
彩图	

第1章 概述

1.1 研究意义

《能源中长期发展规划纲要(2004~2020)》提出“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”，2050年煤炭年产量控制在 $30 \times 10^8 \text{t}$ ，煤炭将长期是我国的主导能源^[1]。淮南矿区为高瓦斯煤层群开采^[2,3]，其典型的赋存条件为“三高一低”。随着开采深度的增加，地应力升高、煤层瓦斯压力增大、瓦斯含量增高、渗透性系数降低，开采煤层的煤与瓦斯突出灾害日趋严重。近年来，政府及企业高度重视煤与瓦斯突出灾害，随着瓦斯防治技术的发展，瓦斯事故起数及瓦斯事故死亡人数逐年降低，这表明了煤与瓦斯突出灾害防治技术的可行性与有效性(图 1-1)。但是瓦斯事故死亡人数及瓦斯事故起数仍然在煤矿事故中占很大比例，且居高不下，其历年占比分别达到 30%及 10%左右(图 1-2)^[4]。

同时，瓦斯作为煤炭资源的伴生产物，除了是煤矿重大灾害源和大气污染源，更是一种宝贵的不可再生能源。我国煤层瓦斯储量丰富，埋深在 2000m 以浅的煤层瓦斯储量为 $32 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，与天然气总量相当^[5]，而新一轮全国煤层气资源评价成果，全国煤层埋深 2000m 以浅的煤层气总资源量已经达到 $36.81 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^[6]。实现煤与瓦斯共采，是深部煤炭资源开采的必然途径。煤与瓦斯共采不仅能保障我国经济持续发展对能源的需求，而且将进一步提升我国煤矿安全高效洁净的生产水平，尤其是对优化我国能源结构、减少温室气体排放具有十分重要的意义。

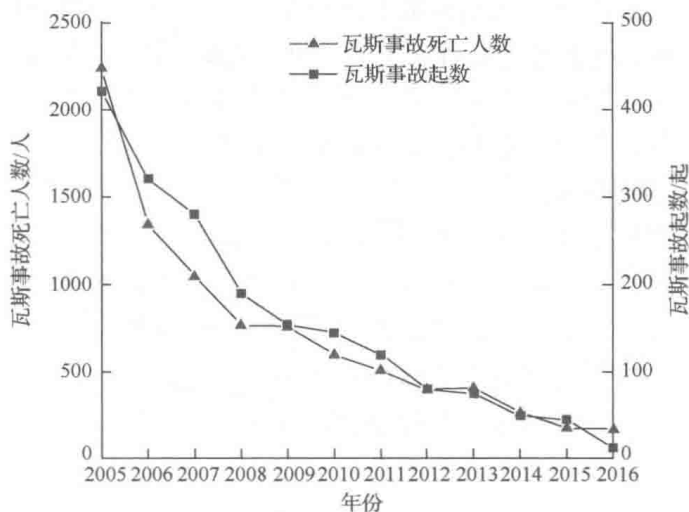


图 1-1 2005~2016 年瓦斯事故总体情况

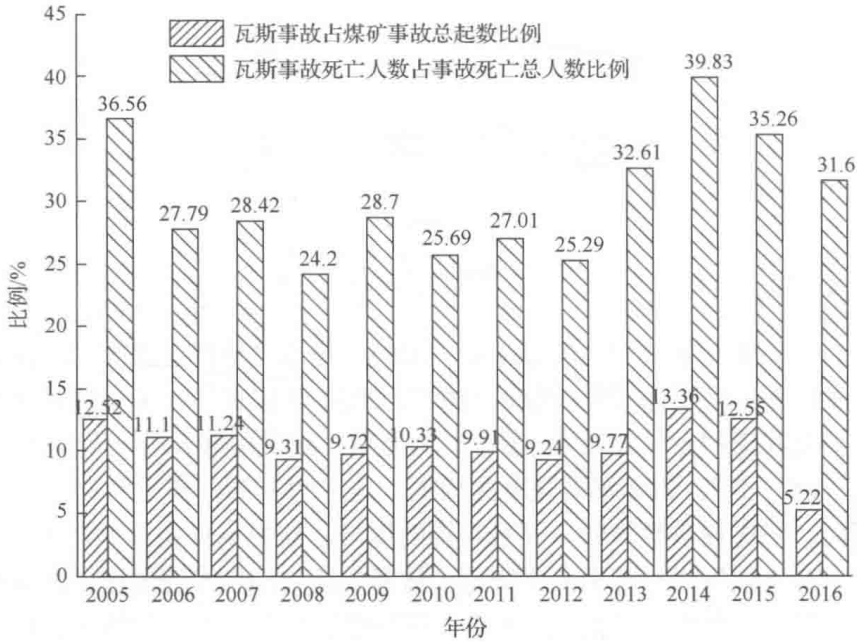


图 1-2 2005~2016 年瓦斯事故占煤矿事故比例总体情况

《煤矿安全规程》(2016 版)规定^[7]: 煤炭开采前必须对开采煤层提前预抽瓦斯, 将瓦斯压力和瓦斯含量分别降到 0.74MPa 和 $8\text{m}^3/\text{t}$ 的安全界限值以下, 否则容易引发煤与瓦斯突出灾害、工作面瓦斯超限甚至瓦斯燃爆事故。在高瓦斯含量、低渗透性煤层群开采条件下, 先开采瓦斯含量低、无突出危险的首采煤层, 由于受到首采煤层开采的影响, 其上下一定区域的煤层将产生卸压作用。煤层开采形成的煤岩体变形、破裂和裂隙伸张, 将大幅度提高煤岩体瓦斯运移的透气性, 产生“卸压增透增流”效应, 形成瓦斯“解吸—扩散—渗流”条件。根据不同区域内煤岩体裂隙分布的不同、瓦斯解吸和流动条件的不同, 采用合理高效的瓦斯抽采方法和抽采系统, 可实现瓦斯资源的高效开采(图 1-3), 不仅解决了卸压煤层瓦斯向首采煤层涌出的问题, 保障了首采煤层安全高效开采, 而且大幅度降低了卸压煤层的瓦斯含量, 消除了煤与瓦斯突出的危险性, 为卸压煤层内实施快速掘进与高效开采提供了安全保障^[8]。

近年来, 随着开采深度和开采强度的增大, 深部煤层群开采出现了采准巷道难支护、顶底板难控制、冲击地压易发生、瓦斯抽采工程布置难实施、煤柱难留设等技术难题, 亟须开展大范围采场围岩采动应力演化机制及采动高应力演化对围岩位移、变形、破坏及裂隙煤岩体能量场演化规律影响的作用机理等方面的基础理论研究, 其对更好地指导深部煤层群的安全高效开采, 实现煤与瓦斯共采、提高资源采出率等方面有着重要的意义。

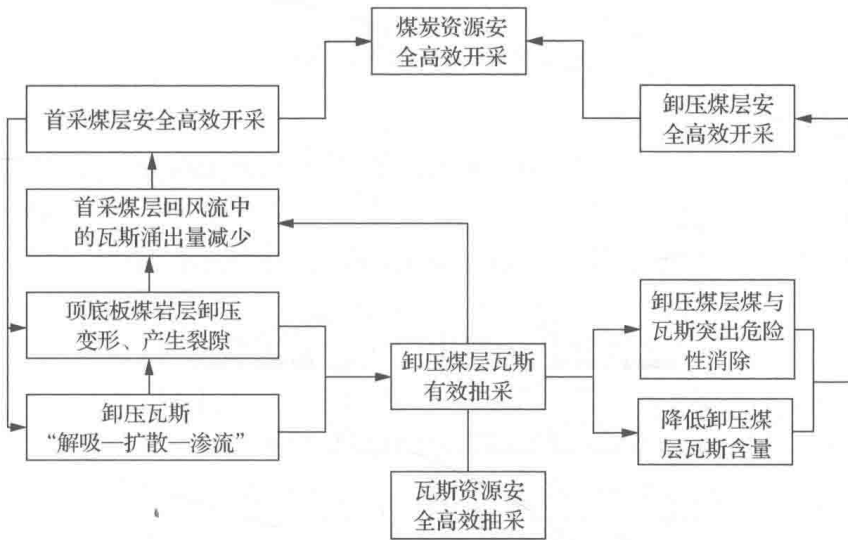


图 1-3 高瓦斯煤层群煤与瓦斯共采体系示意图

1.2 国内外研究现状

深部煤炭资源安全高效开采及开采引起的矿压控制问题是目前国内外采矿及岩石力学界研究的焦点和难点，众多学者应用理论和试验的综合研究方法广泛开展了煤岩体工程力学特性、煤岩体加卸载力学特征、采场围岩采动应力演化、煤层群安全开采等方面的研究，指导了工程实践，发展完善了煤与瓦斯共采理论与技术。

1.2.1 煤系地层煤岩体工程力学特性

煤层在多次采动作用下卸压效果的不同，很大一部分原因是煤岩体受一次采动与多次采动影响后的力学形态显著不同。一般情况下，煤层受多次采动影响后的力学性质将会显著改变。每一次采动对邻近煤层都会产生明显的卸压区及增压区(图 1-4)，使得后续开采的煤层反复承受加卸载，造成每一次采动后煤层内的裂隙分布特征也发生显著变化。研究表明，煤层裂隙结构的变化直接影响煤层的渗流特征及应力敏感性^[9]，导致煤层在多次采动过程中的卸压效果差别很大。同时，由于不同分带内煤岩体裂隙发育的各向异性，卸压后其渗透特性也存在明显的区别。研究煤层群开采过程中煤岩体加卸载过程，掌握应力场、裂隙场演化与分布规律，有利于获取煤层群卸压开采瓦斯运移特征及时空关系，指导工作面及抽采钻孔布置。

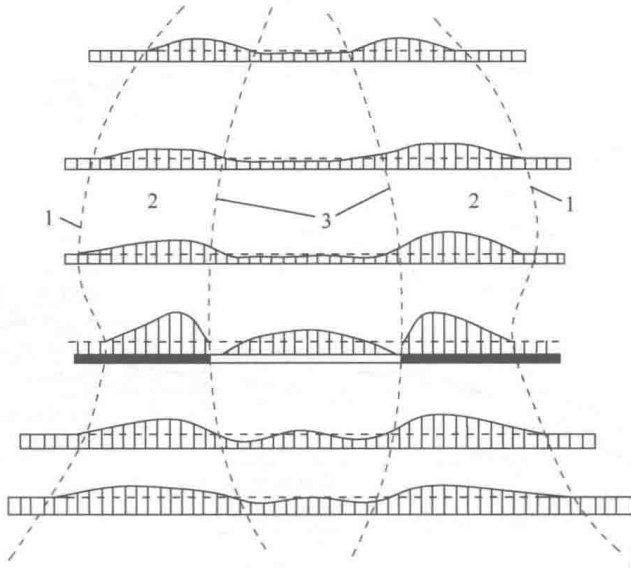


图 1-4 煤层开采时邻近煤层应力分布情况
 1-采动影响带边界；2-支承压力区(增压区)；3-卸压区边界

在煤岩体(石)加卸载力学特征研究方面,国内外学者系统开展了不同加卸载应力路径下煤岩体(石)的强度和变形特征的实验研究,并采用多种分析方法研究获得了煤岩体(石)的强度及变形特征、卸荷效应、力学关系等。然而,由于煤矿现场实验条件尚不允许,煤岩体(石)加卸载力学实验还只能在实验室内完成。

Cai 和 Liu^[10]采用其建立的实时激光全息干涉测量法系统分析了压-剪组合加载过程中岩石裂纹和变形的分布、形态、移动路径和动态演化,揭示了岩石变形破坏特征和机理;尤明庆^[11]通过对岩石试样的加卸载复杂路径试验,获得了岩石试样的力学参数和强度及变形特性;谢红强等^[12]结合岩体变形特性,通过应力-应变试验,推导出异性岩石的损伤演化方程;陈忠辉等^[13]基于岩石微元体强度的韦伯(Weibull)统计分布和库仑准则假定,利用损伤力学方法建立了一个能够很好地反映岩石变形、强度特征与脆化特征的简明岩石三维各向同性损伤模型及弹脆性本构方程;席道瑛等^[14]对砂岩进行了低围压三轴动载疲劳实验,获得了砂岩的波速、模量和疲劳损伤的力学特性及相互间的力学关系;张黎明等^[15]对粉砂岩试样进行了常规三轴加载后保持轴向变形不变的峰前、峰后卸围压试验,得到了峰前、峰后卸围压全过程曲线及其脆性剪切和张剪破坏的特征,且峰前卸围压破坏比峰后卸围压破坏更具有突发性,并有明显的侧向扩容现象;Bagde 和 Petroš^[16]通过对完整砂岩试样的单轴循环加载试验研究发现,加载频率的大小对岩石力学行为有重要的影响,岩石疲劳强度和轴向硬度随着加载频率的增加而降低,岩石在低加载频率和振幅下更容易屈服;杨永杰等^[17]针对循环载荷作用下的煤岩体变形特性,以鲍店矿 3 煤为研究对象,采用 MTS815.03 岩石测试系统对其进行循环加载,

试验结果表明:煤岩体随循环次数的疲劳破坏过程可反映从压密、应变硬化到软化的发展过程,变形可划分为初始变形、等速变形和加速变形3个阶段;Fu等^[18]运用CT成像技术研究了扰动载荷作用下灰绿色泥岩的蠕变破坏和微观破坏演化特性,当岩体轴向载荷接近岩体极限强度时,岩体的微观裂纹和蠕变速率增加,当扰动载荷较低时,岩体进入微观破坏阶段,当扰动载荷较大时,岩体直接进入扰动加速蠕变阶段;Holub等^[19]应用工程地质力学和试验方法,系统分析了砂岩试样的纵波波速、抗压强度、抗拉强度、体积模量、弹性模量、泊松比等物理和力学特性及相互间的力学关联。

由以上研究可知,在煤岩体(石)加卸载力学特征研究方面的主要手段仍是实验室实验,对煤、泥岩、砂岩等煤系地层煤和岩石的系统研究不多,结合开采形成的采动应力演化对煤系地层煤岩体应力环境影响方面的研究较少,尤其是在深部煤层群开采条件下多次开采采动应力演化对煤岩体(石)的载荷和应力环境的影响的研究更少。

1.2.2 多煤层开采覆岩运移与采动应力场演化规律

在多煤层开采覆岩运移规律研究方面,主要采用相似材料模拟试验、现场监测和数值模拟试验等研究方法,获得了多煤层开采覆岩垮落形态、高度等特征。例如,郭文兵等^[20]应用相似理论和光弹性力学模拟试验方法,对多煤层同采条件下采场围岩应力场特点及相互影响关系进行了研究,得出了多煤层开采时采场围岩应力分布规律、应力集中程度及其相互之间的影响范围和影响程度;刘红元等^[21]运用自行开发的岩层破断过程分析(RFPA2D)系统模拟了多煤层开采时岩层的垮落过程;夏筱红等^[22]针对多煤层联合开采的特点和覆岩的工程地质特征,采用工程地质力学模型实验和数值模拟计算,分析了多煤层开采的采动影响及岩层动态断裂机理,得出了有关岩层移动参数和多层煤同采时的应力分布状态;张玉军^[23]采用钻孔冲洗液漏失量观测和钻孔彩色电视系统探测了近距离多煤层开采覆岩破坏高度,其观测到的垮落带高度已与传统意义上的垮落带高度有所区别,应该属于导水裂缝带的严重开裂范围;张志祥等^[24]采用相似材料模拟试验方法,对多煤层开采引起的覆岩移动及地表变形规律进行了研究,获得了随着煤层累计采厚的增加,采空区“三带”(冒落带、裂隙带、弯曲下沉带)覆岩下沉量和采空区地表沉降量、地表倾斜变形、地表水平位移及地表曲率变形都呈增大趋势的规律。

在采动应力演化规律研究方面,李宏艳^[25]、王悦汉等^[26]通过应用数学、力学方法系统分析获得了采场围岩结构特征、采动应力演化规律、支承压力计算公式、采动岩体动态力学模型等研究成果,很好地指导了工程实践。钱鸣高^[27]提出了岩层控制的关键层理论,揭示了采动岩体的活动规律,把采场矿压、岩层移动、地表沉陷等方面的研究在力学机理上有机统一为一个整体,为岩层控制理论的进一

步研究奠定了基础。吴健等^[28]、郝海金^[29]通过实验研究获得了综放工作面的应力分布规律,并应用球壳理论分析得出大采高开采上覆岩层结构力学模型——压力壳-梁结构及其基本力学特征和形态特征。姜福兴等^[30, 31]采用力学方法研究了非充分采动阶段、充分采动阶段工作面推进覆岩破坏过程与支承压力的动态关系。宋振骥等^[32]在大量现场观测的基础上建立并逐步完善了以岩层运动为中心,预测预报、控制设计和控制效果判断“三位一体”的实用矿压理论体系,揭示了岩层运动与采动支承压力的关系。史元伟^[33]视上覆岩层为不同弹性地基上的弹性板(梁),按文克尔假设计算挠曲岩板(梁)的基础反力,提出了回采工作面超前和侧向支承压力的解析估算法。谢广祥等^[34-41]在大量现场实测分析的基础上,对长壁工作面及其巷道围岩的三维力学特征进行了全面、系统、深入的研究,提出了长壁工作面围岩中存在着由“高应力束”组成的应力壳理论;基于对应力壳理论的进一步分析,构建了深部长壁开采采动应力壳演化模型,揭示了采场围岩力学特征的采厚效应、柱宽机制、推进速率响应及减缓动力灾害机理,获得了采动应力和采动裂隙演化的动态效应及应力壳失稳模式;研究认为大部分长壁采煤工作面前方、后方、周边和邻近巷道的矿压显现都受控于应力壳的存在和由其演化发展带来的影响,应力壳的失衡会造成剧烈的矿压现象,合理地调整开采厚度等采场结构参数可改善采场围岩应力的动态平衡,对保护工作面、减小矿压影响和显现有积极作用。伍永平等^[42]基于大倾角煤层开采物理相似材料模拟、数值模拟结果,分析了围岩宏观应力拱壳的力学特征,给出了大倾角煤层开采应力拱壳的稳定性判别准则。

上述研究对煤层群开采过程中采动应力叠加演化及其对围岩位移、变形、破坏等力学特征影响研究较少,特别是近距离煤层群不同卸压开采条件下采动应力场、裂隙场、位移场多次多场演化规律方面仍需要进一步研究。

1.2.3 煤与瓦斯共采理论与技术

工程实践表明,煤与瓦斯共采已成为解决我国煤炭资源开采中灾害频发、大气污染和煤层气资源浪费等问题的重要理论与技术体系,其实质是将传统的单一固体煤炭资源开采转变为在煤炭资源开采的同时,利用煤炭开采过程中产生的采动作用使原渗透率较低的煤层产生卸压释放,从而将瓦斯作为一种资源从煤层中开采出来的技术体系。

袁亮等^[43]建立了低透气性煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体理论体系并为煤与瓦斯共采理论的发展及工程实践提供了一套科学研究方法和工程设计手段;详细介绍了我国煤矿煤与瓦斯共采的主要技术方法与煤矿瓦斯抽采技术及技术装备^[44-47];分析了我国深部煤层煤与瓦斯共采现状及面临的问题,指出了我国深部煤层煤与瓦斯共采的发展对策,认为我国深部煤层应坚持地面和井下相结合的“两条腿走路”的煤与瓦斯共采模式,从基础理论研究、关键技术及装备研发、示范工

程建设、政策扶持等方面提高深部煤层煤与瓦斯共采技术的整体水平^[48]。谢和平等^[49]系统分析总结了我国煤与瓦斯共采基础理论与关键技术的研究现状及最新进展。其在基础理论研究方面,重点阐述了采动应力学及瓦斯增透理论的定量评价理论体系。在关键技术研究方面,重点介绍了卸压开采抽采瓦斯技术体系、全方位立体式抽采瓦斯技术体系、深部薄厚煤层瓦斯抽采技术体系的技术组成和最新科研进展。进一步指出了建立煤与瓦斯共采体系面临理论和工程技术的困难与挑战,展望了煤与瓦斯共采未来的发展方向。谢和平等^[50]在综合考虑煤体在不同开采方式形成的支承压力、孔隙压力和瓦斯吸附膨胀耦合作用对损伤裂隙煤体体积改变的影响的基础上,定义了一个新力学量——增透率,来反映单位体积改变下煤体渗透率的变化,推导出了4种增透率的理论表达式,并对工程实例进行数值分析,定量描述了开采过程中覆岩和煤层中增透率的分布和演化,结果表明增透率能够反映开采扰动对煤岩体裂隙网络渗透性的影响,为煤与瓦斯共采工程中的煤层增透效果评价提供了定量指标和科学方法。王家臣^[51]在介绍煤与瓦斯共采技术体系的基础上,分析了煤与瓦斯技术体系的核心问题,指出了卸压煤层内的瓦斯吸附解吸规律、卸压煤岩层内部结构演化规律和卸压煤岩层内瓦斯分布规律是实现煤与瓦斯共采需要解决的最关键、最核心的三大理论问题。李树刚等^[52]建立了考虑采高及第一亚关键层与煤层顶板间距的采动裂隙椭抛带动态演化数学模型,构建了椭抛带中卸压瓦斯渗流—升浮—扩散综合控制模型,分析了椭抛带卸压瓦斯抽采机理,提出了相应的煤与瓦斯抽采技术。谢生荣等^[53]为了解决沙曲矿近距离煤层群开采过程中综采工作面上隅角和回风流中瓦斯浓度超限这一难题,结合从德国引进的千米定向钻机设备,提出了高抽钻孔组和顶板裂隙钻孔组联合抽采瓦斯技术,构建了沙曲矿煤与瓦斯共采技术体系。张农等^[54]提出了深井超前留巷强化钻孔与高位回风巷强化的瓦斯抽采技术,并在朱集矿进行了试验。马念杰等^[55,56]认为深部环境和采矿活动引起的“加载”和“卸荷”效应,会使钻孔围岩出现有利于瓦斯导通的“蝶形塑性区”,蝶叶长度可达钻孔直径的几十倍以上。以钻孔围岩“蝶形塑性区”理论为基础,建立了钻孔塑性区与瓦斯增透圈模型,首次推导出了钻孔增透圈半径解析式。梁冰等^[57]提出了以经济预评价、安全评价、共采效果3部分建立煤与瓦斯共采评价系统,并建立了多层次评价指标体系,构建煤与瓦斯共采模糊综合评判模型。将模糊层次法(FAHP)与层次分析法(AHP)组合赋权,将专家的主观经验与目标区指标的客观反映相结合,建立了模糊综合评判模型,对沙曲矿煤与瓦斯共采进行了综合评价。

上述研究在不同厚硬岩组条件下远程上行卸压开采可行性及煤与瓦斯共采方面的研究较少,尤其是在多煤组煤层群不同开采顺序(上行、下行)卸压开采条件下采动应力场、裂隙场、位移场多次多场演化规律的异同方面仍需要进一步研究。

1.2.4 卸压开采煤岩动力灾害发生机理

卸压开采虽然能在采场围岩一定空间范围内使煤岩体或瓦斯卸压,有利于煤炭资源安全开采及煤与瓦斯共采,但同时也在采场围岩一定空间范围内引起了应力集中,是导致煤岩体动力灾害发生的关键因素之一。近年来,很多学者应用数理统计、损伤断裂理论、能量理论等方法研究了卸压开采采场围岩结构特征及其对巷道围岩稳定性、裂隙煤岩体能量演化的影响与作用机理,发展了煤岩体动力灾害防治理论与技术。

在卸压开采围岩结构对巷道布置和稳定性控制方面,蒋金泉等^[58]以新汶矿区为工程背景,深入研究了采动覆岩裂隙亚分带特征、覆岩运动与结构分带特征、上行卸压开采作用效应,建立了上行卸压开采可行程度的评价方法;张立亚等^[59]系统研究了多煤层条带开采中不同采深、不同采宽、不同层间距和上下煤柱的空间位置关系对地表下沉和水平移动的影响规律;方新秋等^[60]采用现场实测、理论分析及数值模拟等研究方法,探讨近距离煤层群回采巷道失稳机制,得出了该条件下巷道位置及煤柱留设参数;吴爱民等^[61]应用不连续变形分析(DDA)方法模拟分析了邻近工作面开采和本工作面开采对上覆岩层及留设小煤柱的变形影响规律,获得了小煤柱巷道在多次动压影响下的变形量、应力分布和破坏范围;朱涛等^[62]针对极近距离煤层开采时下层煤的顶板岩层结构特点,构建了“散体-块体”顶板结构模型,对极近距离煤层下层煤工作面下位直接顶岩层结构的稳定性进行了力学分析,揭示了下层煤开采时端面顶板冒落的机理;刘洪永等^[63]通过引入理想弹脆塑性模型和内切圆准则,在德鲁克-普拉格塑性流动公式的基础上建立了采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的数值计算公式;姜鹏飞等^[64]采用FLAC3D有限差分程序计算分析了煤层回采在不同宽度煤柱条件下顶底板煤岩体中的能量分布情况,发现煤柱宽度对煤柱内部及下部煤岩体能量分布均匀程度有较大影响;张农等^[65]通过物理模拟实验显示上行卸压开采顶板岩层运动状况,分析了不同区域顶板巷道的采动破坏特征和顶板不同区域巷道围岩的裂隙分区特征,并推断出特定条件下上覆岩层采动稳定周期及卸压区顶板巷道维护的基本原则和控制方法;寇建新等^[66]根据SOS微震监测系统监测数据,应用地球物理学、地震学和岩石力学的理论与技术,研究微震事件中震源物理、波动物理场、时空序列规律和时间域与空间域分布特征及其与采矿活动的关系,确定了4种矿震类型和原因。

在裂隙煤岩体失稳机理研究方面,尹光志等^[67,68]采用损伤力学的原理和方法,建立了脆性煤岩的损伤本构模型,对脆性煤岩的损伤力学特性进行了研究,分析了煤层发生冲击地压过程中的能量变化,并提出了冲击地压的损伤能量指数这一新的概念,确定了冲击地压发生的必要条件;邹德蕴等^[69]应用能量传递原理和能

量守恒定律,结合对岩体性状组织损伤弱化的分析,提出了煤岩体发生冲击效应的理论,导出了冲击效应方程;谢和平等^[70,71]提出了冲击地压的分形特征,将分形几何引入冲击地压的研究,使用分形的数目与半径的关系来分析微震事件的空间分布,发现微震事件具有集聚分形结构和特征;秦四清等^[72]用突变理论研究了狭窄煤柱冲击地压失稳过程的机制,导出了失稳的充要力学条件判据及突变时煤柱的突跳量与释放能量的简单表达式,提出了刚度效应-扰动触发响应失稳新理论;赵毅鑫等^[73]在非平衡热力学和耗散结构理论的基础上,研究了冲击地压孕育过程中煤-围岩系统能量耗散特征和系统内熵的变化,初步建立了基于非平衡态热力学的冲击地压失稳判断方法;张黎明等^[74]讨论了目前采用突变理论研究岩体动力失稳存在的问题,由系统在平衡位置做准静态位移时的功、能增量关系式,按能量守恒原理推导出了一个由围岩(I体)与过应力峰后软化岩体(II体)构成的两体系统的平衡方程,建立了两体系统动力失稳的折叠突变模型,给出了岩体动力失稳问题的一般方程,得到了系统失稳前后的变形突跳和系统能量释放的一般表达式。

上述研究对煤层群开采过程中采动应力相互演化及其对围岩位移、变形、破坏等力学特征影响的研究较少,特别是在近距离煤层群和多煤组间不同卸压开采条件下采动应力场、裂隙场、位移场多次多场演化及致灾机理与防控技术方面仍需要进一步研究。

1.3 科学意义

煤岩体的变形破坏及其所受荷载状态、煤岩体动力灾害的发生与煤岩体初始应力环境和多次开采引起的围岩采动应力演化和能量场动态演化密切相关。随着开采深度的增加,高瓦斯、高地温、高地压、高承压水“四高”等极难技术问题日益突出,成为世界性难题。工程实践急需大范围采场围岩采动应力演化特征及采动高应力演化对围岩位移、变形、破坏规律影响的作用机理及能量场动态演化等方面的基础理论支持。一方面,采动高应力演化作用下煤岩体的强度和变形等力学特征的非线性、围岩结构的不连续性更加明显;另一方面,卸压开采过程中煤岩体中能量积聚与释放的非线性特征与多因素共同致灾机理更趋复杂。

深部多煤组煤层群卸压开采条件下采动高应力演化作用下应力场、裂隙场、位移场时空演化规律和裂隙煤岩体能量积聚、释放等演化致灾机理研究方面仍存在着以下3方面的问题。

(1)深部煤系地层赋存条件(如应力环境、岩层结构特征等)对多煤层开采引起的应力场、裂隙场、位移场演化特征的影响作用如何?如何描述深部多煤层开采地质条件与采矿技术条件之间的关系?目前还不清楚。