

国家自然科学基金项目 (51704148)

中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目 (SKLCRSM19KF001)

山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目 (MDPC201806)

# 大同矿区煤层群 开采覆岩运动特征与 矿压显现规律研究

朱志洁 著



煤炭工业出版社

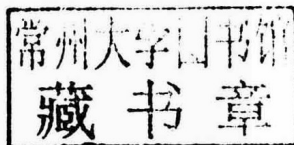
(51704148)

原与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目 (SKLCRSM19KF001)

山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目 (MDPC201806)

# 大同矿区煤层群开采覆岩 运动特征与矿压显现 规律研究

朱志浩 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

### 图书在版编目 (CIP) 数据

大同矿区煤层群开采覆岩运动特征与矿压显现规律研究/朱志洁著. --北京:煤炭工业出版社, 2018

ISBN 978-7-5020-6069-5

I. ①大… II. ①朱… III. ①煤层群—岩层移动—研究—大同 ②煤层群—矿压显现—显现规律—研究—大同  
IV. ①TD823.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 201791 号

## 大同矿区煤层群开采覆岩运动特征与矿压显现规律研究

著 者 朱志洁  
责任编辑 刘永兴 杨晓艳  
责任校对 李新荣  
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
电 话 010-84657898(总编室) 010-84657880(读者服务部)  
网 址 www.cciiph.com.cn  
印 刷 北京虎彩传播文化有限公司  
经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 9<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数 224 千字  
版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷  
社内编号 20181227 定价 45.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

## 内 容 提 要

大同矿区赋存的煤层为侏罗系和石炭二叠系双系煤层，多煤层开采特别是上部侏罗系多煤层采空区下石炭二叠系3-5号特厚煤层开采条件复杂。本书采用理论分析、数值模拟、相似材料模拟和现场探测等方法，对大同矿区综放开采覆岩运动与破坏规律、多煤层开采围岩应力传递规律、坚硬覆岩大结构影响下的矿压显现特征、综放工作面矿压显现规律等进行了研究。

本书可供矿山开采、采矿设计、矿井动力灾害防治等领域的科研人员、工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

# 前 言

目前,大同矿区主要开发的煤田为侏罗系和石炭二叠系煤层共同赋存的双系煤田,上部侏罗系煤层趋于枯竭,下部石炭二叠系煤层可采储量多达300亿吨。石炭二叠系煤层赋存较深,厚度大且结构复杂,顶板和煤层都为坚硬煤岩体。塔山煤矿、同忻煤矿作为开采石炭二叠系煤层的千万吨级主力矿井,在开采过程中遇到了多次强烈矿压显现。仅同忻煤矿8100综放工作面在2011年3月25日至4月6日期间工作面就出现了四次矿压显现。对双系煤层开采顶板运动规律与围岩控制进行研究是实现大同矿区双系煤层安全高效开采的前提和基础,也是建设晋北国家大型煤炭基地的重要保障。

针对大同矿区双系煤层开采、坚硬顶板赋存等复杂开采条件,作者综合运用理论分析、数值模拟、相似材料模拟、微震监测、矿压监测等研究方法,对综放开采的覆岩运动与破坏规律和坚硬顶板覆岩大结构的矿压显现特征进行了深入研究,结合工作面和回采巷道的矿压显现实测,综合确定了多层采空区下、坚硬顶板条件下综放开采覆岩运动特征和矿压显现规律,研究成果可为类似矿井安全高效开采提供理论指导。

辽宁工程技术大学张宏伟教授对本书的撰写给予了大力支持和重要帮助,在此表示衷心感谢。在本书的撰写过程中,辽宁工程技术大学地质动力区划研究所李胜教授、韩军教授、宋卫华教授、霍丙杰副教授、陈莹副教授、兰天伟副教授、荣海博士、付兴博士提出了宝贵意见和建议,李云鹏、赵象卓、吴文达、杨文连等研究生参加了部分实验研究、数据整理等工作,在此表示感谢。同时,还要感谢同煤集团于斌高工、同煤集团同忻煤矿陈涛高工、尚彦文高工等在现场工作中提供的指导和帮助。作者在写作过程中参阅了大量文献资料,在此谨向相关作者表示衷心感谢。本书的主要研究内容是在国家自然科学基金项目(51704148)、中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLCRSM19KF001)、山东科技大学矿山灾害预防

控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目（MDPC201806）支持下完成的，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2018年9月

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	4
<b>2 大同矿区特厚煤层开采条件及煤岩性质测试</b> .....	11
2.1 井田位置与地质概况 .....	11
2.2 采掘布置与工作面概况 .....	14
2.3 基于地质动力环境的冲击地压危险性评估方法 .....	21
2.4 煤岩性质测试及坚硬顶板分析 .....	29
<b>3 大同矿区综放开采覆岩运动与破坏规律研究</b> .....	35
3.1 综放开采覆岩运动规律相似材料模拟研究 .....	35
3.2 综放开采覆岩破坏规律研究 .....	43
3.3 双系煤层开采覆岩运动微震监测研究 .....	56
3.4 大同矿区特厚煤层覆岩破坏与运动特征分析 .....	63
<b>4 大同矿区多煤层开采围岩应力传递规律研究</b> .....	65
4.1 煤柱底板应力传递规律 .....	65
4.2 侏罗系多煤层重叠煤柱底板应力传递规律 .....	72
4.3 侏罗系煤柱影响下的石炭系工作面围岩应力分布规律 .....	79
4.4 双系煤层开采围岩应力传递规律综合分析 .....	88
<b>5 大同矿区坚硬覆岩大结构影响下矿压显现特征</b> .....	91
5.1 坚硬覆岩大结构几何特征 .....	91
5.2 坚硬覆岩大结构运动特征 .....	96
5.3 坚硬顶板覆岩大结构作用下围岩应力演化规律 .....	98
5.4 坚硬覆岩大结构失稳能量传递特征 .....	103
5.5 覆岩大结构对矿压显现的影响 .....	108
5.6 基于模糊综合评判的坚硬顶板工作面矿区显现分级方法 .....	111

<b>6 同忻煤矿综放工作面矿压显现规律研究</b> .....	114
6.1 回采巷道矿压显现规律实测研究 .....	114
6.2 工作面矿压显现规律实测研究 .....	121
6.3 工作面推进速度对矿压显现影响研究 .....	127
6.4 工作面长度对矿压显现影响研究 .....	131
6.5 同忻煤矿矿压显现能量特征分析 .....	135
<b>7 主要成果与展望</b> .....	139
7.1 主要成果 .....	139
7.2 展望 .....	139
<b>参考文献</b> .....	141

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

煤炭作为一种非再生性化石能源资源,在我国工业生产中起着重要作用。我国是能源生产和消费大国,能源生产与消费总量呈逐年上升趋势(表1-1)。然而,我国的能源结构并不均衡,表现为富煤、缺油、少气。受经济发展水平和经济实力的制约,我国的能源生产消费结构仍以煤炭为主体。在我国一次性能源生产和消费中,煤炭所占比重均达到70%。

表1-1 我国能源生产、消费总量及构成

年份	能源消费/ 万吨	占能源消费总量的比重/%			能源生产 总量/万吨	占能源生产总量的比重/%		
		原油	原煤	其他		原油	原煤	其他
1980	60275	20.7	72.2	7.1	63735	23.8	69.4	6.8
1985	76682	17.1	75.8	7.1	85546	20.9	72.8	6.3
1990	98703	16.6	76.2	7.2	103922	19.0	74.2	6.8
1995	131176	17.5	74.6	7.9	129034	16.6	75.3	8.1
2000	146964	22.0	68.5	9.5	138570	16.8	72.9	10.3
2001	155547	21.2	68.0	10.8	147425	15.9	72.6	11.5
2002	169577	21.0	68.5	10.5	156277	15.3	73.1	11.6
2003	197083	20.1	70.2	9.7	178299	13.6	75.7	10.7
2004	230281	19.9	70.2	9.9	206108	12.2	76.7	11.1
2005	261369	17.8	72.4	9.8	229037	11.3	77.4	11.3
2006	286467	17.5	72.4	10.1	244763	10.8	77.5	11.7
2007	311142	17.0	72.5	10.5	264173	10.1	77.8	12.1
2008	620611	16.7	71.5	11.8	277419	9.8	76.8	13.4
2009	336126	16.4	71.6	12	286092	9.4	76.8	13.8
2010	360648	17.4	69.2	13.4	312125	9.3	76.2	14.5
2011	387043	16.8	70.2	13	340178	8.5	77.8	13.7
2012	402138	17.0	68.5	14.5	351041	8.5	76.2	15.3
2013	416913	17.1	67.4	15.5	358784	8.4	75.4	16.2
2014	425806	17.4	65.6	17	361866	8.4	73.6	18
2015	429905	18.3	63.7	18	361476	8.5	72.2	19.3
2016	436000	18.3	62	19.7	346000	8.2	69.6	22.2

2004年6月30日，国务院常务会议讨论并原则通过了《能源中长期发展规划纲要（2004—2020年）》（草案），确定了“以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的新战略”。2007年1月，国家煤炭工业发展“十一五”规划中提出：尽管煤炭在多元化的能源结构中所占比重逐年下降，但在相当长的时期内煤炭在一次能源生产和消费中的主体地位不会改变。2012年3月，国家煤炭工业发展“十二五”规划中提出：国民经济继续保持平稳较快发展，工业化和城镇化进程加快，煤炭消费量还将持续增加。2016年12月，国家煤炭工业发展“十三五”规划中提出：煤炭的主体能源地位不会改变。煤炭占我国化石能源资源的90%以上，是稳定、经济、自主保障程度最高的能源。煤炭在一次能源消费中的比重将逐步降低，但在相当长的时期内，主体能源的地位不会改变。但考虑到调整能源结构、保护环境、控制PM2.5污染等因素的影响，煤炭在一次能源结构中的比重将有所下降。国务院《能源发展战略行动计划（2014—2020年）》中指出，到2020年一次能源消费总量控制在48亿tec左右，煤炭消费总量控制在42亿吨左右。中国工程院《国家能源发展战略2030—2050》报告中提出，2050年煤炭年产量控制在30亿吨。可预测未来几十年内，出于能源资源和能源安全战略考虑，我国的能源结构仍然以煤炭为主体。

从近年的数据调研来看，由于国民经济的快速发展，我国煤炭开采量和消费量保持迅速的增长势头（图1-1），煤炭的生产和消费也保障了国内生产总值（GDP）不断增长（图1-2），其中发电业与运输业以煤炭为能源依托。长期数据显示，40%铁路运输是煤炭运输，由于煤炭发电机组的增加和火电小时数的增加，对煤炭供应的要求也随之提高。

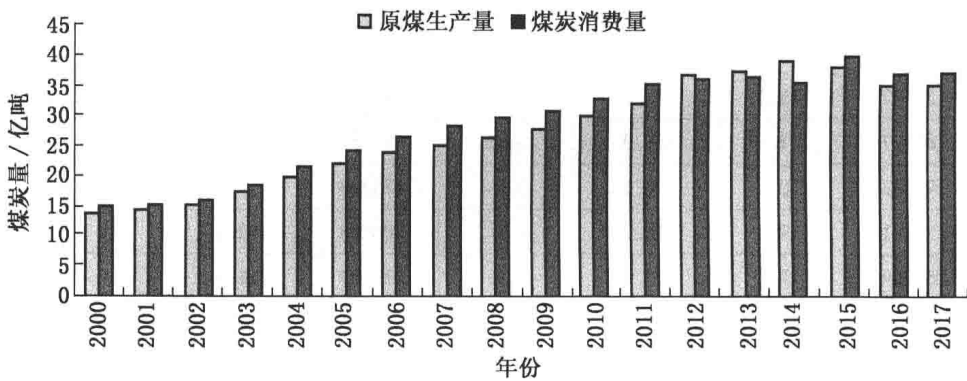


图1-1 我国煤炭生产量和消费量变化

2012年12月，中国煤炭工业协会评审确定我国安全高效矿井共计406处，其中，井工矿392处，露天矿14处。煤炭工业安全高效矿井共计生产原煤11.29亿吨，占全国原煤生产总量的32%。“十一五”以来，大基地、大集团、大型现代化煤矿已经成为全国煤炭生产的主体，安全高效矿井保障了煤炭供应能力，促进了煤炭工业生产力的提高。

2013年，我国已经建成了千万吨级煤矿53处，产量7.3亿吨，占总产量的21.47%，千万吨级矿井对我国的煤炭产量起到了重要的支撑作用。然而，千万吨级矿井在建设生产过程中存在一系列问题。例如：①覆岩垮落高度大、采空区遗煤多、漏风严重，采空区

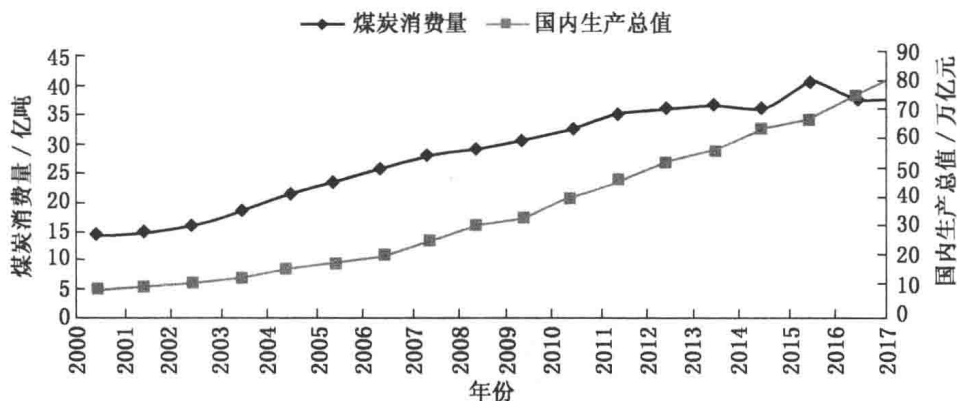


图 1-2 煤炭消费量与国内生产总值 (GDP) 的变化趋势

易自然发火；②工作面采出厚度大，顶板活动空间与基本顶悬臂梁结构的弯矩增大，导致工作面压力增大，液压支架损坏严重；③工作面煤壁高，暴露空间大，煤壁易片帮，煤壁片帮将增大端面距，引起冒顶岩块落入综采工作空间，严重影响工作面的安全生产；④大采高支架高度大，自身稳定性差，易发生支架稳定性事故，甚至会引发大规模倒架；⑤在工作面后方的采空区上部，积聚大量高浓度瓦斯，高浓度瓦斯随着顶煤的冒落涌入工作面，引起工作面瓦斯超限。

大同矿区的千万吨级矿井——同忻煤矿，在开采石炭二叠系煤层中出现了“双系”煤层开采条件下特有的强矿压显现。石炭系 15 ~ 18 m 特厚煤层一次开采引起覆岩顶板大范围破断，且多为厚层坚硬砂岩顶板（分层厚度 > 10 m，普氏硬度系数  $f > 12$ ），断裂步距大、来压强度大。同时，上部对应的侏罗系煤层群具有多层采空区、各类煤柱无规律分布等特点，覆岩空间结构运动对石炭系煤层工作面的矿压显现具有重要影响。

同忻煤矿的强矿压显现主要表现为临空巷道受邻近采空区的影响和临空巷道受邻近采空区和工作面开采的双重影响：

(1) 受邻近工作面开采的影响，临空巷道矿压显现明显，巷道混凝土浇筑的底板被顶起、折断（图 1-3），底鼓量 0.4 ~ 1.5 m，两帮内挤 0.5 ~ 1.0 m，煤柱巷帮破坏更为严重，顶板下沉明显，钢带弯曲变形（图 1-4），部分锚杆、锚索断裂失效。

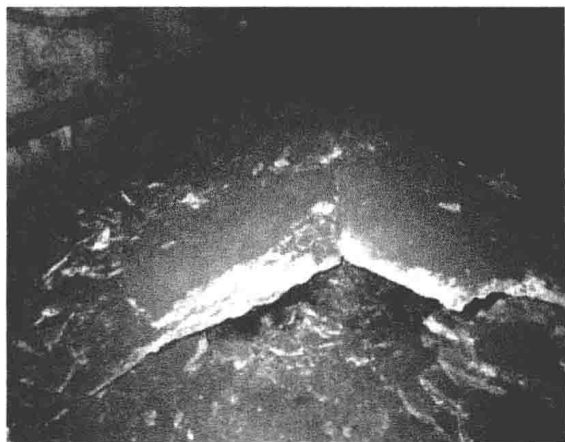


图 1-3 巷道底鼓明显



图 1-4 浆皮脱落、钢带变形

(2) 在邻近采空区和本工作面开采扰动共同影响下, 临空巷道矿压显现强烈。临空巷道底鼓(图1-5)和片帮严重, 临空巷道超前底鼓1.5~1.7 m, 顶板下沉1.3~1.4 m; 锚杆(索)断裂、煤炮响声频繁; 超前压力影响范围大, 临空巷道在超前工作面约100 m范围内变形明显, 在超前工作面30~50 m范围内巷道变形严重, 严重时易引发冲击来压显现(图1-6)。



图1-5 临空巷道超前变形严重

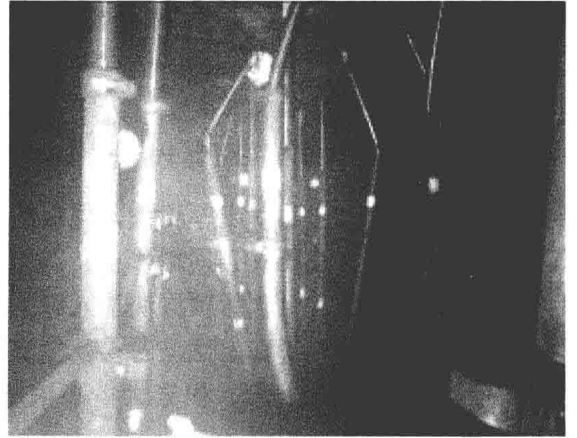


图1-6 单体支柱折损

上述强烈的矿压显现严重影响了同忻煤矿的安全、高效生产。因此, 对综放开采的覆岩运动与破坏规律和坚硬顶板覆岩大结构的矿压显现特征进行了深入研究, 对多层采空区下坚硬顶板条件的综放开采矿压显现规律进行了深入剖析, 为实现石炭系特厚煤层安全高效开采提供了理论指导, 为类似条件的生产矿井提供了借鉴。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 采场覆岩结构理论研究现状

长壁采煤方法推广以来, 上覆岩层运动理论成为采矿科学研究的关键。上覆岩层活动规律理论的发展可分为3个时期: 1960年以前, 对上覆岩层活动规律进行了初步研究, 该时期产生了多个覆岩运动的假说; 1960—1990年, 覆岩运动相关理论进一步发展, 这一时期的相关理论对采矿领域产生了重大影响; 1990年以后, 是上覆岩层活动规律的现代发展时期, 开采条件和开采工艺的进步促进了覆岩控制理论的发展, 代表性理论如下:

(1) 压力拱假说。G. Gillitzer 和 W. Hack 在1928年提出了压力拱假说, 指出工作面开挖后采场覆岩形成了拱形结构, 在煤壁和采空区矸石之间形成了压力拱结构, 该结构承担着上方的岩层重量, 在拱脚处形成了较大的支承压力; 支架的受力是有限的, 仅受拱内围岩的自重应力。该理论对围岩支承应力的存在做出了合理解释, 论证了支架受力远小于上覆岩层重量的原因。但该假说无法对矿压现象进行定量分析, 适应性较差。

(2) 铰接岩块假说。库兹涅佐夫于1954年提出了铰接岩块假说, 该假说认为煤炭采出后覆岩发生破坏, 形成了垮落带和断裂带, 垮落带下部分排列混乱、上部分排列规整。

断裂带的岩块之间形成了铰接结构, 伴随垮落带的运动而规则下沉。该理论描述了采出覆岩破坏的分带情况, 初步提及了可能存在的力学模型和内部结构的力学关系, 为采场顶板控制设计提供了重要依据; 但该理论未涉及铰接状态基本顶形成的条件和支架与岩梁运动间的关系, 未能将采场围岩控制问题提高到定量分析的程度。

(3) 悬臂梁假说。1916 年德国施托克建立了悬臂梁假说, 该理论把顶板抽象为梁, 初次断裂后, 形成了一侧固定于岩体内的悬臂梁结构, 随着悬臂长度的增加, 顶板周期性产生破断, 从而引起工作面周期来压。该理论揭示了工作面前方支承压力的产生及支架受力与顶板下沉的关系。但由于并未查明开采后上覆岩层的活动规律, 仅凭悬臂梁本身计算所得的顶板下沉量和支架载荷与实际所测得的数据相差甚远。

(4) 预成裂隙假说。1950 年 A. 拉巴斯提出了预成裂隙假说, 该理论主要涉及假塑性梁。该假说指出采动岩体形成各种裂隙, 形成了假塑性梁, 采场四周形成了高应力区、低应力区和开采影响区, 并且这 3 个区域与工作面同步向前移动。预成裂隙假说阐明了支承压力是采场超前煤岩发生破坏的主要原因, 认为岩层中两方向的应力差超过岩石强度极限, 围岩就会发生破坏; 但该假说不能合理解释工作面上覆岩层周期性破坏规律, 未得到采场支架需要控制的岩层范围。

(5) “砌体梁”结构模型。我国钱鸣高院士将预成裂隙梁理论和铰接岩块理论相结合, 发展得到了开采后覆岩形成砌体梁式平衡的结构模型, 提出了“砌体梁”理论。该理论推导出了覆岩块体的铰接方式和平衡条件, 为矿山压力控制提供了理论指导。

(6) “传递岩梁”假说。宋振骥等在大量现场观测的基础上, 提出了“传递岩梁”假说。该假说认为, 由于断裂岩块之间的相互咬合, 岩层运动时的作用力无须全部由支架承担。该理论阐明了工作面支承压力与覆岩运动的关系, 得到了“给定变形”和“限定变形”的位态方程。

(7) 关键层理论。1990 年钱鸣高院士在分析上覆岩层结构的形态与受力的基础上, 提出了关键层理论, 该理论认为: 岩层破断时, 上部局部岩层或全部岩层随之发生协调变形, 对部分或全部岩层起控制作用的岩层称为关键层; 该理论为岩层移动与地表沉陷、矿山压力与岩层控制等相关研究奠定了基础, 为绿色开采技术体系研究提供了研究思路。

(8) 岩板及弹性基础梁等理论。卢国志等在传递岩梁理论的基础上, 从传递岩梁承载作用力的方式, 对初次来压与初次断裂步距、周期来压与周期断裂步距的概念进一步明确了, 得到了各个岩梁的运动方程, 进而达到通过调整工作面支护强度来控制断裂位置的目的。

于雷等采用解析法对大采高综放采场基本顶“铰接岩梁”结构的稳定性进行了分析, 得到了“铰接岩梁”关键块的稳定条件, 见式 (1-1) 和式 (1-2)。基本顶关键块体下沉是大采高工作面周期来压显现强烈的原因。

$$Q_c \geq \frac{\rho g(h+h_1)(4h-4l\tan\varphi-5l\sin\theta_1)}{4\tan\varphi+\sin\theta_1} + S \quad (1-1)$$

$$Q_c \geq \rho g l(h+h_1) + S - \frac{3\sigma_c}{20}(h-l\sin\theta_1)\left(h - \frac{1}{2}l\sin\theta_1\right) \quad (1-2)$$

式中  $S$ ——采空区矸石压缩量;

$Q$ ——支架所受的变形压力；

$\sigma_c$ ——块体单轴抗压强度；

$c$ ——支架控顶距；

$\rho g$ ——岩块体积力；

$h$ ——关键块体厚度；

$h_1$ ——直接顶岩块厚度；

$l$ ——关键块体长度；

$\theta_1$ ——关键块体转角；

$\tan\varphi$ ——岩块间摩擦因数。

金洪伟基于上覆岩层结构呈现梁或拱的特征，初步构建了长壁工作面连续开采时覆岩移动的拱-梁组合结构模型，认为采场上方的承载结构整体上呈拱形形状，组成拱的各个岩层的载荷传递方式又具有梁的特征，岩层中存在厚硬关键层对拱的向上发展起着控制作用。陈杰等基于弹性基础梁解析方法，考虑顶板岩梁触矸前的下沉，建立了长壁工作面采空区矸石充填顶板岩梁力学模型，推导了岩梁下沉基本微分方程，分析了矸石充填条件下矿压显现规律及影响因素、岩梁下沉与地表下沉的关系。

李刚等基于 Marcus 简算式，建立了基本顶的板结构力学模型，确定了基本顶初次来压步距影响因素。李肖音等基于板模型对采场顶板破断机理进行了分析，将采场坚硬顶板视为弹性薄板，并考虑采场初次来压和周期来压时特定的边界条件，利用位移变分法从理论上分析了顶板的内力分布规律和破断机理，给出了确定顶板初次和周期垮落步距的理论计算式。张向阳采用顶板剪切梁模型分析了采场基本顶初次来压，确定了基本顶最大等效剪力所在位置，得到了基本顶初次垮落步距的计算公式；当最大等效剪力达到极限值时，基本顶初次来压，且基本顶断裂位置出现在煤层内部。

池秀文等针对多层矿开采的特点，将采场顶板岩层假设为简支梁，推导出顶板最大拉应力与其上方岩层厚度之间的关系式，确定了顶板岩层与其相邻的矿层厚度比对顶板稳定性的影响，可采用极限跨距作为判断顶板稳定的依据。郭敬中等建立了底板隔水层的岩梁力学模型，通过弹性力学分析得出底板隔水层剪应力分布规律，得到了煤层底板突水的力学判据；底板隔水层破断后形成的三铰拱岩块结构是否产生破坏失稳主要取决于底板破断岩块的长高比，长高比越小，抗破坏失稳的能力越强。黄庆亨等通过建立厚砂土层“拱梁”结构数学模型，得出了“拱梁”内的应力分量，给出了厚砂土层破裂的判据和出现拉裂缝的位置，为确定周期性“弧形岩柱”的有关参数提供了依据，为分析工作面顶板压力控制和地表塌陷提供了基础。

(9) 覆岩大结构相关研究。窦林名提出煤矿覆岩的整体空间结构形态，将覆岩空间结构分为“O-X”型、“F”型与“T”型三种基本类型，分析了其矿压特征与规律，讨论了覆岩空间结构演化诱冲机制，分析了“F”“T”型结构对冲击地压的诱导作用。牟宗龙等基于关键层理论，建立了长壁“F”覆岩结构模型和断臂“F”覆岩结构模型，对上覆岩层特征进行了描述，分析了工作面一侧采空覆岩失稳发生冲击地压的力学机制。闫少宏等根据大采高工作面直接顶的概念和判别方法，提出了大采高采场顶板易形成“短悬臂梁-铰接岩梁”结构，确定了大采高工作面支架工作阻力的计算公式，分析了直接顶

及基本顶垮落步距对支架工作阻力的影响。

马其华认为采场覆岩存在大小两个空间结构,即在整个采空区覆岩层中存在一个“板-壳”演化的大空间结构,以及在采空区四周存在一个呈“铰接岩板半拱”演化的空间结构,采场覆岩“O”型空间结构的形成过程实质上是两个空间结构的演化过程。杜晓丽认为工作面推进过程中,上层覆岩形成了环绕采空区的承担重力的岩石压力拱;研究了工作面回采过程中围岩压力拱的形成和演化特征,论述了压力拱作用下矿压对邻近巷道围岩稳定性的影响。杨科以采场围岩为研究对象,全面、系统地研究了宏观应力壳和采动裂隙的演化及其影响因素,得到了应力壳近似分布形态,阐明了层厚效应和采动裂隙演化规律,得到了形态方程各参量及相互间的影响关系、结构失稳准则。解盘石运用砌体梁理论、壳体理论与“R-S-F”动力学控制理论分析了大倾角煤层长壁采场覆岩特有的结构稳定性,并给出了倾斜砌体结构动力学方程和“壳体”稳定性判定条件。

### 1.2.2 采场覆岩运动规律研究现状

高新春等运用相似材料模拟技术,模拟了“三软”厚煤层采场受采动影响后的变化状态,得到了上覆岩层的破坏和运移趋向。郭成英对工作面坚硬特厚煤层上覆岩层运动规律进行了研究,得出了随着工作面的推进,工作面出现顶板来压和顶煤来压两种压力,并且在顶板来压和顶煤来压相互叠加作用下工作面观测强度较高。何江等基于砌体梁理论提出了综放面覆岩运动的双向发展模式,分析了综放面冲击矿压的能量来源和力源。

李化敏等针对大采高综放工作面覆岩运动空间大、扰动强的特点,建立了上位砌体梁-下位倒台阶组合悬臂结构模型,即低位基本顶转化为直接顶成为悬臂结构,高位基本顶形成砌体梁。鞠金峰等通过对神东矿区大柳塔煤矿52304综采工作面开采的现场实测、模拟实验与理论分析,从特大采高综采工作面覆岩关键层“悬臂梁”结构运动对直接顶作用的角度,阐述了端面漏冒的发生机理。蒋金泉等以杨柳煤矿10416工作面高位硬厚岩浆岩条件为背景,建立了高位硬厚岩层三边固支一边简支弹性薄板力学模型,得到了破断跨度的计算式,并根据覆岩破裂形态提出了破断步距的计算方法。

黄继辉等对俯采采场顶板破断运动特征和矿压显现规律进行了研究,建立了俯采采场基本顶初次破断和周期破断力学模型,得出了破断准则和破断步距理论计算式。许猛堂等针对新疆维吾尔自治区巨厚煤层赋存特征及地质条件,对比分析了不同类型巨厚煤层覆岩活动规律,提出并证实了巨厚煤层不同开采厚度导致覆岩结构呈现“破断—铰接稳定—失稳—二次破断”的变化特征,并揭示了覆岩呈现不同结构形态的产生机理。肖家平等采用 UDEC 数值分析软件模拟了上覆岩层力学变化与破坏过程,分析了“三软煤层”上覆岩层运动特点、运移规律及应力分布情况,并利用工程实测对该模拟结果进行了验证。

### 1.2.3 矿压显现规律研究现状

#### 1. 特厚煤层综放开采矿压显现研究现状

闫少宏等将特厚煤层直接顶、基本顶岩层分为“有变形压力岩层”和“无变形压力岩层”,得出了“有变形压力岩层”的空间范围随着大采高综放开采厚度的增大而明显增大,进而引起矿压显现异常强烈。刘金海等通过对新巨龙矿特厚煤层综放工作面支承压力

的监测,得到了煤柱内的面前和面后采动影响范围为 130 m 和 186 m,工作面走向支承压力影响距离为 42.7 ~ 54.2 m。孔令海等采用微地震监测等方法研究了塔山矿,对特厚煤层综放工作面支承压力分布特征、工作面支架载荷与覆岩运动的关系进行了研究,冲击载荷来自于基本顶的破断冲击,基本顶在工作面前方破断并引起其下位岩层断裂,进而在支架上形成冲击载荷。

成云海等以水帘洞矿特厚硬煤层综放工作面为研究对象,建立了采空区侧向上位直接顶“岩—矸”结构、基本顶“岩—梁”结构的覆岩结构模型,确定了工作面侧向矿压显现规律。伍永平等对特厚综放工作面开采的覆岩移动、矿压显现特征进行了研究,得出了特厚坚硬顶煤综放工作面支架载荷较大,工作面存在较为明显的周期来压,上覆岩层及顶煤的高强度是来压显现具有冲击现象的主要原因。谢龙等对不同侧压系数作用下应力波诱发特厚煤层巷道底板冲击的动态响应规律进行了研究,研究表明:特厚煤层在不同侧向压力条件下,底板破坏所需临界水平应力不同,临界水平应力随着侧压系数的增加而线性增加。

刘全明等针对浅埋深中硬特厚煤层的赋存特点,采用数值模拟方法得到了顶板垮落高度及工作面前方支承压力峰值与工作面倾斜长度呈对数增加,其回归方程分别为  $y_1 = 2.0487 \ln x + 8.0406$ ,  $y_2 = 22.844 \ln x + 22.465$ ,工作面超前支承压力随工作面长度和采高的增加而增大。刘宝珠等对唐山矿特厚煤层综放工作面矿压显现规律进行了分析研究,得到了工作面来压呈现高频率、低强度的特征,来压周期性较明显;来压中部来压强度大,上部和下部来压强度小,上部高于下部,具有明显的不一致性。段王拴等采用现场观测和数值模拟分析的方法,研究了坚硬特厚煤层综放工作面覆岩运动与破坏特征,坚硬特厚煤层综放工作面周期来压现象明显,并具有瞬时冲击性载荷特征;工作面支承压力峰值在煤壁前方 10 ~ 15 m 处,支承压力影响范围可达工作面前方 50 ~ 60 m。冯少杰采用数值模拟等方法,对特厚煤层综放开采的导水断裂带高度进行了研究。Nayzar Lin 等对泰国 Mae Moh 煤田的露天矿特厚煤层开采的覆岩运动和围岩应力特征进行了数值模拟分析。

## 2. 坚硬顶板条件下矿压显现规律研究现状

曹胜根等运用理论计算、数值模拟方法分析研究了坚硬岩层距煤层不同距离条件及不同支架阻力作用下,采场上覆岩层的运动规律,得到了当煤层上覆为坚硬岩层时(坚硬岩层距煤层 0 m),支承压力集中系数及系统释放的能量最大,坚硬岩层断裂易引起冲击地压。贺广零等建立了采空区煤柱-顶板失稳力学模型,得到了顶板-煤柱系统的失稳力学条件,确定了影响系统失稳的主要因素。李新元等提出了坚硬顶板初次断裂力学结构模型,得到了弹性基础梁的能量计算公式,确定了工作面坚硬顶板断裂前后的能量分布规律。

潘岳等将煤壁前方煤层和直接顶视为弹性地基,在工作面煤壁中央取单位宽度的岩层结构进行研究,建立了覆岩载荷与支架支撑共同作用的坚硬顶板超静定挠度微分方程,得到了周期来压前坚硬顶板的挠度、弯矩表达式。王家臣等通过对直接顶综放工作面的开采过程进行数值模拟分析,得到了直接顶厚度越大,基本顶的初次来压步距越大,越容易引发冲击地压。靳钟铭在已有矿压观测成果的基础上提出了坚硬顶板弹性悬梁结构模型,得到了支架工作阻力计算式 [式 (1-3)],揭示了支架-围岩力学体系的内在联系。

$$P = \frac{1}{2}ql + \frac{h^2(L+l)}{6l(L-l)}\left(R'_p + \frac{q}{5}\right) \quad (1-3)$$

$$q = \frac{E_1 h_1^2 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \cdots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2 + \cdots + E_n h_n^2}$$

式中  $R'_p$ ——基本顶岩层抗拉强度；

$l$ ——支架控顶距；

$q$ ——均布载荷；

$E_n$ ——各岩层弹性模量；

$h_n$ ——各岩层厚度；

$\gamma_n$ ——各岩层容重。

牟宗龙在研究坚硬顶板断裂机制的基础上，应用突变理论和拓扑变换方法，提出了断裂起动过程的突变分析模型，阐明了坚硬顶板断裂和发展机制。徐曾等建立了坚硬顶板下煤柱岩爆的力学模型，得到了岩爆发生准则，给出了顶板变形速率  $y_0$  与岩爆各阶段的关系，确定了比值  $\frac{K}{\lambda_1}$  是定量表征岩爆临近程度的参量。于斌等研究了厚层坚硬顶板的临界失稳条件、失稳方式、影响失稳的因素，以及失稳机理，提出了厚硬顶板爆破预裂减小顶板断裂长度和合理确定支护强度相结合的顶板控制方法。

程家国等采用数值模拟方法对深井高地压坚硬顶板采场围岩特性进行了研究，阐明了不同采深条件下围岩应力的演化特征，得到了深井条件下围岩更容易出现应力集中，工作面需要更大的支护强度。吴洪词等建立了 Winkler 地基的弹性基础板模型，研究了顶板在不同阶段的断裂模式和应力、变形特征，推导出坚硬顶板-煤柱系统失稳的力学判据和数学条件。王平等将坚硬岩层简化为弹性矩形薄板力学模型，分析了上覆坚硬岩层的应力分布规律与垮落特征，研究了孤岛“综放”工作面发生矿震的水平应力突变的力学机理。Nan Li 等采用相似材料模拟方法对坚硬顶板破断的力学机制进行了研究，分析了顶板垮落过程中声发射信号的特征，得到了在地应力和采动应力综合作用下，首先在顶板两端发生了剪切破坏，随后在梁中部产生了弯曲运动，进而引起梁中部的拉伸破坏。在此过程中，声发射信号的周期性特征和演化过程反映了应力状态变化和顶板岩层损伤程度，为预测预报坚硬顶板冲击地压提供了一些思路和借鉴。

### 3. 多煤层开采矿压显现规律研究现状

李志华等采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对比分析了采空区下孤岛工作面矿压显现规律与一般孤岛工作面的差异，在上覆煤层采动影响下，采空区下孤岛工作面相对于实体煤下孤岛工作面矿压显现不明显。谷拴成等通过对神木柠条塔煤矿 N1200 工作面开采过程中上覆岩层中无采空区与有采空区矿压显现规律的研究，得到了与常规工作面矿压显现规律相比，采空区下工作面具有来压强度较大、周期大压与小压交替出现等特点。胡金鉴等采用现场实测和数值模拟方法，研究了近距离煤层上覆煤层对下覆煤层开采时支承压力的影响，得出了煤柱下支承压力和采空区下支承压力的分布特征。

张伟对近距离煤层下行开采过程进行了现场实测，得到了采空区下煤层开采时，工作面采场覆岩将形成整体完整性较差的松散结构，具有来压不明显、动载系数小等特点。龚