

煤炭行业青年科学家学术专栏

【院士推荐】我国是采煤大国,开采环境多样。采矿是从自然界获取资源,因此采矿必然影响自然环境(地表沉陷,岩层裂隙场形成导致地下水流失等)。采矿引起的岩层运动对地下工程的稳定性更有直接影响,因此研究采矿就应研究开采引起的岩层运动。我国学者在这方面进行了不少努力,也初步总结出相关的规律。有些研究成果已经处于国际领先水平。本文对岩层移动理论作出了初步的总结和研究。由于我国地质条件复杂多样,开采对环境的影响中所形成的地表沉陷现象有很大差别(平缓式下沉:其中又有高和低潜水位对环境的影响;开裂式和断崖式等),原来对平缓式下沉的估计是用统计数学的办法,而它实质上是力学问题,是关键层破断成巨形块体的非连续运动经过软弱岩散体和沉积岩的平整形成了平缓式下沉。而开裂式沉陷则与黄土层有关,断崖式沉陷显然与关键层的破断失去稳定性有关,因此更是与岩层运动的力学性质有关。为此工作还应该不断深入下去,今后还应继续研究岩层运动规律,为采矿的安全与自然环境协调发展作出贡献,将来在我国必然会形成完整的学派。

钱鸣高
2018.1.12

岩层移动理论与力学模型及其展望

左建平^{1,2},孙运江²,文金浩²,李政岱²

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:随着社会对开采沉陷与生态环境问题日益重视,“科学采矿”势在必行。面对新形势,需要在学习前人研究成果的基础上,进行更系统、深入的研究。首先系统总结了国内外垮落法和充填法处理采空区 2 种情况下的岩层移动理论、优缺点及其适应条件等,重点阐述了关键层理论在岩层移动方面发挥的重要作用。基于采动岩体力学,系统分析了基本顶断裂位置和断裂步距“正态分布”变化的原因。基于采动岩层破断移动的全过程分析和前人的研究成果,提出了充分采动覆岩整体移动的“类双曲线”模型,认为岩层“类双曲线”的焦点位于主关键层位置,该模型通过关键层把砌体梁理论及地表沉陷理论有机联系起来,描述了煤层上覆岩层整体移动规律,是关键层理论的继承和发展。

关键词:岩层移动;采动岩体力学;砌体梁;关键层理论;“类双曲线”模型

中图分类号:TD32;P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0001-11

Theoretical and mechanical models of rock strata movement and their prospects

ZUO Jianping^{1,2},SUN Yunjiang²,WEN Jinhao²,LI Zhengdai²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing social attention on mining induced subsidence and eco-environmental problems, it is imperative to carry out sustainable mining. Facing the new situation, we need to conduct more systematic and in-depth research based on the current research results. In this paper, the rock strata movement theories at home and abroad, their advantages and disadvantages and their application conditions were systematically reviewed when the goaf was controlled by caving method and backfill method. The important role of key strata theory in the theories of rock strata movement and surface subsidence was highlighted. Based on mining induced rock mechanics, the changes

收稿日期:2017-12-12; **责任编辑:**杨正凯 **DOI:**10.13199/j.cnki.est.2018.01.001

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51622404);国家自然科学基金资助项目(11572343);中国矿业大学(北京)越崎杰出学者奖励计划;国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801404);国家“万人计划”青年拔尖人才资助项目(W02070044)

作者简介:左建平(1978—),男,江西高安人,博士,教授,博士生导师。E-mail:zjp@cumtb.edu.cn

引用格式:左建平,孙运江,文金浩,等.岩层移动理论与力学模型及其展望[J].煤炭科学技术,2018,46(1):1-11,87.

ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WEN Jinhao, et al. Theoretical and mechanical models of rock strata movement and their prospects[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 1-11, 87.

of main roof's fracture location and length were analyzed. The model considers that the focus of hyperbola is located on the main key stratum. The hyperbola model integrates the masonry beam theory and the surface subsidence theory organically through key strata theory. In addition, the model describes the overall movement law of the overlying strata in the coal seam. Therefore, the analogous hyperbola model is further development of key strata theory.

Key words: strata movement; mining induced rock mechanics; voussoir beam; key strata theory; analogous hyperbola model

0 引言

煤炭开采引起上覆岩层破断移动,并伴随着一系列的特殊力学现象,从而影响着生产安全和生态环境^[1-4]。因此,探索岩层破断移动规律是科学采矿的基础。近年来,随着社会对开采沉陷造成的生态环境破坏的日益重视,国内外对开采沉陷的研究热度不减。据不完全统计,1996—2016年在国际顶级采矿期刊《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》上发表的开采沉陷方面的论文约148篇^[5];2004—2013年,我国国家自然科学基金委员会共资助开采沉陷类研究项目52项,资助额度2906万元^[6]。对于开采沉陷问题的研究始于19世纪20—30年代,历经约一个世纪的发展,逐渐形成了一门独立的学科分支——开采沉陷学^[7]。

直至20世纪60—80年代,我国在岩层移动和地表沉陷方面才有初步进展。钱鸣高院士等^[8-9]提出了“砌体梁”结构模型,为我国矿山压力与岩层控制的研究奠定了基础。而后又提出关键层理论,为岩层整体移动研究提供了一种统一的思想和方法^[10-11]。刘宝琛院士等^[12]提出了开采沉陷预计的概率积分法。随后贾喜荣等^[13-14]提出了弹性薄板理论;姜福兴等^[15]根据基本顶的坚硬程度分别提出了类拱、拱梁、梁结构;张顶立等^[16]针对综放开采提出了半拱结构;黄庆享等^[17]针对浅部煤层提出了台

阶岩梁结构模型。我国学者在上覆岩层活动规律与采场岩层控制理论研究方向初步形成了自己的体系,对我国采矿岩层移动研究作出了巨大贡献。但形成完整的“采场岩层控制理论”仍然存在很多研究工作有待完善和发展。如开采岩层移动的力学机理解释存在不足,对岩层内部的移动规律解释不细致^[18]。因此,“需要把力学方法与几何学方法结合起来,全面描述开采沉陷的形态和过程^[18]”。

笔者按照“基本顶断裂→关键层理论→地表沉陷”的岩层移动顺序,较为系统回顾了国内外岩层移动理论及模型。重点阐述了砌体梁、关键层理论在岩层移动方面的重要作用。对基本顶断裂位置、长度和形态进行力学分析。基于前人的研究结果,提出了覆岩整体移动的“类双曲线”模型。最后指出未来岩层移动的几个重点研究方向。

1 基本顶破断结构模型总结

为了降低工作面冒顶事故,国内外学者对工作面矿压形成的原因进行了深入思考。国外学者从19世纪60年代至20世纪50年代先后提出了4种经典假说:悬臂梁假说、压力拱假说、铰接岩块假说和预成裂隙假说。虽然各自解释了一定的现象,但都没有完整的力学模型。20世纪80年代,我国钱鸣高院士^[19]基于大量现场矿压观测,发现层状基本顶破断成块状的运动有一定的规律性,可能形成承

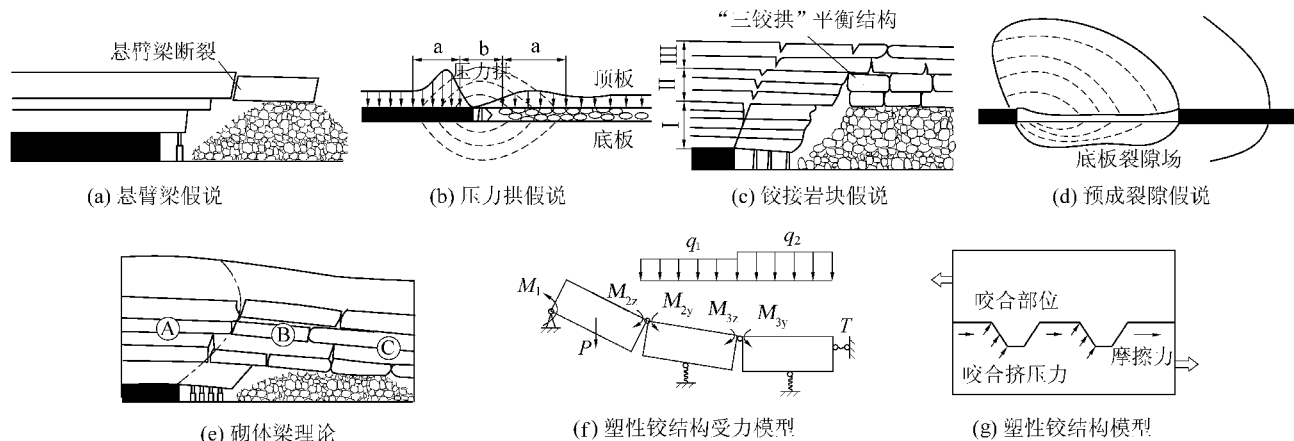


图1 基本顶周期断裂结构模型

Fig.1 The periodic fracture models of main roof

载结构,而此结构形态的改变将表现为工作面矿山压力,故提出了“砌体梁”模型,并采用结构力学方法推导出基本顶破断岩块相互铰接形成结构的力学模型的解,并确定了其稳定条件^[20-24]。该模型解和稳定条件使得工作面各种来压现象(顶板大变形和台阶下沉等)和支护原理得到了合理、充分的解释,为我国矿山压力与岩层控制的研究奠定了基础。各基本顶断裂结构模型见表1和图1,其中,a为应力

增高区;b为应力降低区;I为垮落带;II为裂隙带;III为弯曲下沉带;A为支承压力影响区;B为离层区;C为重新压实区; M_1 、 M_{2x} 、 M_{2y} 、 M_{3x} 、 M_{3y} 为岩块弯矩; q_1 、 q_2 为上覆岩层均布荷载; P 为集中载荷; T 为拉力。左建平等^[25]针对深部岩层受力特征,初步提出关键层破断后局部存在“类塑性铰”结构模型,并进行了受力分析。

表1 基本顶周期断裂结构模型

Table 1 Periodic fracture models of main roof

结构模型	提出时间	提出学者	国家	模型示意	模型简介及其局限性
悬臂梁假说	1867年	舒里兹	德国	图1a	①解释了越靠近煤壁顶板下沉量和支架载荷越小,支承压力和周期来压现象;②对基本顶在工作面前方断裂无法解释,计算所得顶板下沉量和支架载荷与实际相差较大
压力拱假说	1928年	W Hack, G Gillitzer	德国	图1b	①对回采工作面前后的支承压力及工作面处于减压区做出了粗略但却经典的解释;②没有分析拱的力学特性、“支架-围岩”相互作用关系,不能揭示周期来压现象
铰接岩块假说	20世纪50年代初期	库兹涅佐夫	苏联	图1c	①正确地对上覆岩层进行分带,阐述了“支架-围岩”相互作用关系,分析了岩块可能形成的“结构”;②未对铰接岩块间的力学平衡条件进一步探讨
预成裂隙假说	20世纪50年代初期	A·拉巴斯	比利时	图1d	①采用非连续介质理论阐述顶板运动,分析了支架初撑力和工作阻力对顶板控制的作用机理;②不能解释周期来压,不能确定合理支架阻力
砌体梁理论	1981年	钱鸣高等 ^[20-24]	中国	图1e	①基本顶断裂前后在岩体内引起扰动,即在板固定端部形成“反弹”,而在深入一定距离范围则形成“压缩”;②基本顶断裂位置在煤体内,由基本顶断裂到工作面来压存在时间差,可利用该时间差对基本顶来压进行预报;③基本顶板结构呈“O-X”形断裂,仅当基本顶呈横X形破坏时,工作面中部可采用“砌体梁”模型;④解释了工作面各个部位来压的不一致性;⑤探讨了“砌体梁”结构的稳定性,给出其“S-R”失稳判据;⑥定量分析了“支架-围岩”作用关系,给出了计算支架荷载的理论公式
塑性铰结构模型	2014年	左建平等 ^[25]	中国	图1f、图1g	①建立了关键层破断后局部“塑性铰”亚结构模型,其受深部围压影响比较显著;②“类塑性铰”特点:可承受一定的弯矩,且弯矩随咬合部位受力情况而变化;具有一定长度;仅当破断岩块转角较小时作用明显;③“砌体梁”模型引入“类塑性铰”,揭示了“砌体梁”结构稳定的本质

2 岩层控制的关键层理论

20世纪90年代,当时的矿压理论不能对一些关键的矿山压力显现、岩层移动及覆岩离层现象作出统一的相互关联的解释。针对此,钱鸣高院士^[10-11]认为在上覆岩层中存在一些较为坚硬的厚岩层,其对岩体活动全部或局部起决定作用,前者称

为主关键层,后者称为亚关键层如图2所示。

根据关键层的定义可知,基本顶可视为最下部的关键层,最上部的关键层为主关键层。关键层主要特征及其应用。假设将基本顶上部岩层依次记为 S_1 、 S_2 、 S_3 、...,最下部的关键层 S_1 及其上部共有 n 层岩层同步协同变形(图3)。

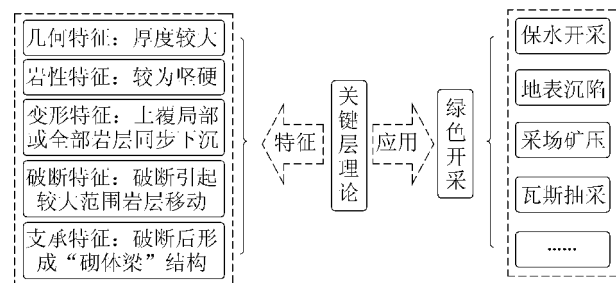


图2 关键层基本特征及其应用

Fig.2 Basic feature of key strata and its application

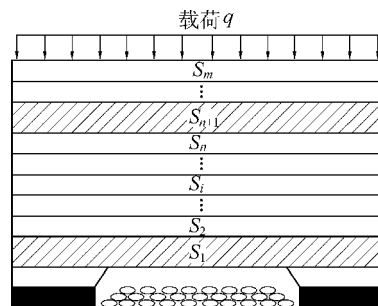
图3 关键层判别模型^[26]

Fig.3 Key strata distinguishing model

则第 $n+1$ 层岩层 S_{n+1} 为关键层的判别条件为^[10]

$$\begin{cases} (q_n)_1 > (q_{n+1})_1 \\ L_{n+1} > L_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$(q_n)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (2)$$

其中: E_n 、 h_n 、 γ_n 分别为第 n 层岩层的弹性模量、厚度、容重; L 为顶板周期断裂步距。如果第 $n+1$ 层岩层的断裂步距不满足条件 $L_{n+1} > L_1$, 应将第 $n+1$ 层岩层所控制的全部岩层作为载荷作用到第 n 层岩层上部, 重新计算第 1 层岩层的变形和断裂步距。

关键层理论采用力学方法求解采动后岩体内部的应力场和裂隙场改变, 使采场矿压、岩层移动和地表沉陷等方面的研究有机地统一成一个整体, 为岩层移动和采场矿压研究提供了一种统一思想和方法。关键层理论为其后提出的煤矿“绿色开采”和“科学采矿”奠定了理论基础, 因而随后被学术界和工程界普遍接受和广泛应用。

许家林等^[27]研究了关键层对覆岩及地表移动的控制作用, 以及关键层破断块度与表土层厚度对

地表下沉曲线形态的影响: 当表土层较薄或覆岩中有典型的关键层时, 表土层将不能完全消化掉关键层的非均匀下沉, 此时应根据关键层破断后下沉曲线特征来预计地表下沉曲线。另外, 还探讨了覆岩主关键层对地表下沉动态过程的影响: 主关键层的破断将引起地表下沉速度和地表下沉影响边界的明显增大和周期性变化^[28]。并提出将控制覆岩主关键层不破断作为建筑物下采煤设计原则。

3 充填开采岩层移动模型

前面所述的岩层移动模型均为采用垮落法处理采空区条件下所建立的。然而, 对于“三下”压煤问题, 钱鸣高提出了“绿色开采”理念^[29]。充填开采技术是煤矿“绿色开采”的重要组成部分, 其一方面可以减少矸石的排放, 另一方面可以控制岩层移动减缓开采沉陷, 实现建筑物下压煤开采和保护土地资源^[30]。充填开采后的岩层移动规律与常规垮落法处理采空区存在较大差异, 国内外学者针对充填开采顶板运动, 建立了一系列的理论模型, 见表 2 和图 4。

表 2 充填开采岩层移动模型

Table 2 The rock strata movement models of backfill mining

理论模型	提出年份	提出学者	国家	模型示意	模型简介
弹性地基梁模型	1952	A·萨乌斯托维奇 ^[31]	波兰	图 4a	①利用弹性基础梁方法分析了理想条件下水砂充填工作面前后顶板挠曲情况和充填体的垂直应力分布; ②得到了采空区上覆岩层移动变形的波动性下沉剖面方程
条带充填模型	1994	张金才等 ^[32]	中国	图 4b	①将煤层划分成条带形状, 采一条留一条, 并对采空区进行充填, 控制地表移动与变形; ②在确定煤柱合理尺寸时, 必须考虑煤柱上的载荷, 最简单方法为“辅助面积”理论
间隔条带充填模型	2006	许家林等 ^[30]	中国	图 4c	①根据具体覆岩结构与主关键层特征确定合理的条带宽度, 将保证主关键层不破断作为间隔条带充填设计的原则; ②间隔条带充填降低充填成本、提高煤炭采出率
等价采高模型	2010	缪协兴等 ^[33]	中国	图 4d	①等价采高就是充填体经过长期压实后的等量最大开挖高度; ②采用传统岩层移动和地表沉陷分析方法, 由等价采高预计地表最大沉陷量; ③考虑了充填材料的力学性能、充实率和压实率
连续曲形梁模型	2015	刘建功 ^[34]	中国	图 4e	①当采空区密实充填率达到一定条件时, 顶板不断裂, 仅发生弯曲变形, 形成连续的曲形梁; ②建立了充填开采连续曲形梁的二维和三维模型, 阐述了连续曲形梁的几何特征和力学特征, 给出了连续曲形梁形成的力学和几何条件; ③分析了连续曲形梁与关键层之间的量化关系

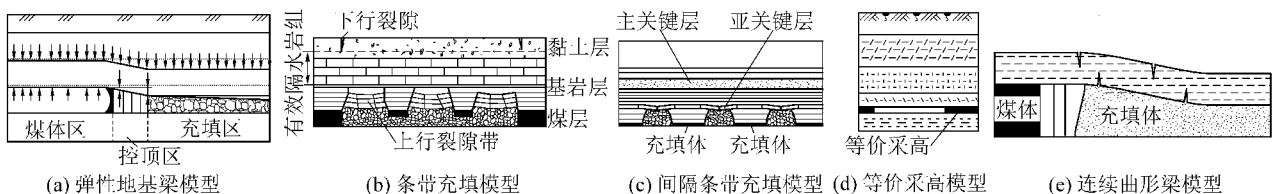


图 4 充填开采岩层移动模型

Fig.4 Rock strata movement models of backfill mining

4 地表移动沉陷理论

开采沉陷预计是评价采动损害程度、选择采动损害控制措施、开采设计优化、土地复垦和地基稳定性评价的基础^[10]。20世纪50—60年代,前苏联、德国、波兰、英国等对开采沉陷问题开展了系统研究,研究成果渐趋深入,提出了一些沉陷预测理论和方法,后来逐渐发展为开采沉陷学^[10,18]。从本质上,目前的开采沉陷理论主要为不考虑岩体特性的唯象学派,如经验方法(典型曲线法、剖面函数法)、数学方法等,没有揭示开采沉陷的力学行为,如图5所示。

其中,极限角法基于岩层的自然斜面角(类似

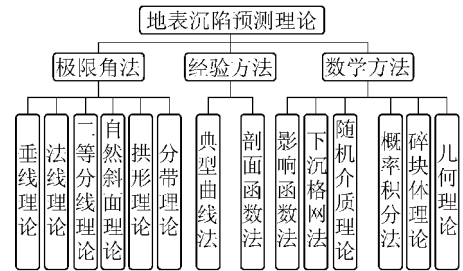


图5 地表沉陷预计理论分类

Fig.5 Classification of mining induced subsidence theories

于现在的移动角)确定地表下沉影响范围,在一定程度上,片面性较强。经验和数学开采沉陷理论的优缺点及其适应条件总结见表3。

表3 沉陷预计方法优缺点及其适应条件

Table 3 Advantages and disadvantages of subsidence prediction methods and their application conditions

沉陷预计理论	提出时间	提出学者	国家	优点	缺点	适应条件
典型曲线法	20世纪50—60年代	—	—	基于实测数据建立的曲线,预计误差较小,可表示地表下沉、倾斜、曲率、水平变形在移动盆地主断面内的分布规律	矿区间不能随便套用,实测数据量大,否则无法建立适用于本矿区的典型曲线,不便于数学处理	一般只适用于矩形和近似矩形工作面
剖面函数法	20世纪50—60年代	—	—	典型曲线的函数表示,直观、便于数学分析和求解,分布函数可根据剖面函数计算,不需从典型曲线上量取或从分布系数表上查求	选用剖面函数每个位置的函数值不一定都能与实测值吻合,求得参数可能出现较大的偏差	
影响函数法	1925年	KRATZSCH ^[38]	德国	可不直接基于实际观测结果建立影响函数,函数形式较多	一般假设上覆岩体是均质各向同性材料	适用于形状不规则的工作面
几何理论	1950—1952年	KONTHE ^[39]	波兰	从几何学角度描述地表移动变形规律,使用正态分布的影响函数来表示地表下沉	参数物理意义不明确,很难反映岩层内部的移动规律	适合描述水平及近水平煤层开采引起的地表下沉
随机介质理论	1954年	LITWINISZYN ^[40]	波兰	采用数学方法比较有根据地阐述了岩层移动的一般规律,预测结果可靠,广泛应用于矿山工程的表地移动和变形预计	公式较繁琐,对数学基础要求较高,未考虑岩层力学参数与结构,故对岩层移动力学机理解释不足	适用于水平煤层和不规则工作面,对倾斜煤层和厚松散层覆岩不太适用
下沉格网法	1961年	BRÄUNER ^[41]	德国	对煤层倾角的适应范围更大,不局限于水平煤层,可用于倾斜煤层的沉陷预计	该法预计繁琐、精度低,目前已很少使用	适用于水平、倾斜煤层和形状不规则工作面
概率积分法	1965年	刘宝琛等 ^[12]	中国	基于随机介质理论建立,实现从理论到方法再到应用的发展,数学推导严密,数学表达式比较简单	表达式含积分,初始阶段计算效率低,对岩层移动力学机理解释不足,对岩层内部移动解释不细致	对水平煤层、缓倾斜煤层应用效果较好;对于急倾斜煤层应用效果不佳
碎块体理论	1982年	何国清等 ^[42-43]	中国	岩体被结构面和开采破坏了完整性,将其视为各向异性、可压缩的不连续的随机介质,确定了威布尔分布函数是最佳的影响函数形式	对于岩层岩性差别较大,尤其有坚硬岩层、冲积层条件下,预计误差较大	适应于水平、倾斜煤层和不规则形状的工作面;不适用于急倾斜煤层

目前,我国开采沉陷预计普遍采用刘宝琛院士

的概率积分法(图6)。

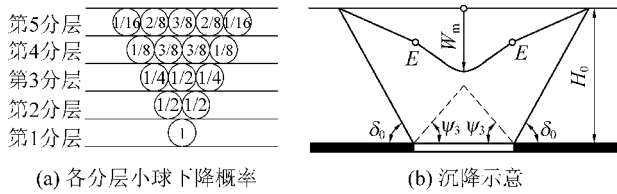


图6 概率积分法原理示意

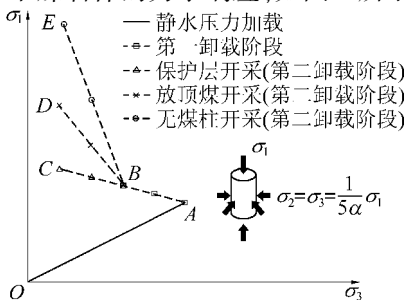
Fig.6 Principle of probability integration method

但近年来，“三下”开采对沉陷预计精度的要求越来越高，概率积分法显得难以适应新的形势^[37]。主要由于采煤沉陷实质上是力学行为，而概率积分法是纯数学的，没有给出明确的力学解释^[18]。这是概率积分法的首创者刘宝琛院士对概率积分法的客观评价，并且他提出“需要把力学方法与几何学方法结合起来，全面描述开采沉陷的形态和过程^[14]”。钱鸣高院士^[19]也认为开采沉陷的本质是力学问题，是块体运动和散体运动综合的结果。我国地域广阔，开采沉陷现象有很大差别，绝不是用一种模式可以解释清楚，可能解决的方向是研究关键层的稳定和破坏规律。

5 采动覆岩破断规律力学分析

5.1 基于采动岩体力学的基本顶断裂位置分析

采动岩体是指随着矿体采出，受到采动应力场影响的那部分岩体^[45]。基本顶之所以发生断裂，其本质原因是地下开采活动破坏了原始应力平衡。工作面前方煤体经历了“原岩应力→加轴压卸围压→同时卸轴压和围压”的应力变化过程。谢和平院士等据此提出了采动岩体力学，并设计了不同开采方式（放顶煤开采、无煤柱开采、保护层开采）采动煤岩体加卸载试验方案^[45-46]，以更真实反映特有采动应力路径下煤岩体的力学响应，如图7所示。



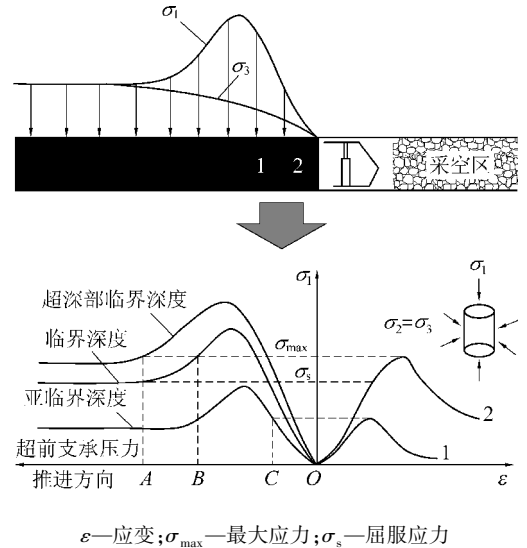
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —第一主应力、第二主应力、第三主应力； α —应力集中系数

图7 工作面前方采动岩体加卸荷应力路径^[47]

Fig.7 Loading-unloading paths simulating mining induced stresses in front of mining face

左建平^[47-49]对不同开采条件下的煤岩组合体进行了大量的力学试验研究。

谢和平院士等^[51]从力学角度，综合考虑应力状态、应力水平和煤岩体性质3方面因素，提出亚临界深度 H_{ser} 、临界深度 H_{er1} 和超深部临界深度 H_{er2} 。3种临界深度条件下工作面超前支承压力与基本顶断裂位置的关系如图8所示，其中工作面前方任意点的支承压力都要经历其前方的应力过程，即如果该点煤体破坏，其与工作面之间的煤体必然发生破坏。根据大量力学试验知，煤岩体抗压强度随着围压的增大而增大，由于工作面前方水平应力沿着推进方向逐渐增大，故煤体越深其破坏的难度越大。图8中假设曲线1为煤体的单轴应力-应变曲线，曲线2为支承压力峰值对应围压条件下煤体的应力-应变曲线。



ϵ —应变； σ_{max} —最大应力； σ_s —屈服应力

图8 基本顶断裂位置与支承压力的关系

Fig.8 Relationship between fracture location of main roof and abutment pressure

根据亚临界深度、临界深度和超深部临界深度的定义，当开采深度达到亚临界深度时，支承压力峰值与工作面之间的煤体发生塑性大变形，基本顶可能在C点与支承压力峰值间某个位置发生断裂；当开采深度达到临界深度时，B点与工作面之间的煤体发生破坏，基本顶将在B点与支承压力峰值间某个位置发生断裂；当开采深度达到超临界深度时，A点与工作面之间的煤体破坏，甚至出现塑性流变，基本顶将在AB间某个位置发生断裂。当基本顶超前破断时，工作面支护强度增大，支护质量要求较高，拱结构容易发生失稳^[51]。当工作面推进到

基本顶断裂位置时,可能出现台阶下沉。但当基本顶在工作面后方断裂时,工作面基本不会出现台阶下沉。

传统矿山压力与岩层控制理论认为基本顶大约在超前支承压力峰值位置断裂。基于采动岩体力学可知,传统的基本顶在支承压力峰值位置断裂仅为顶板破断的一种情况。采动岩体力学综合考虑了应力状态和煤岩体力学性质,全面分析了基本顶在不同采深条件下可能在工作面前方的断裂位置。

5.2 基本顶断裂步距“正态分布”及断裂形态分析

矿山岩体是极其复杂的非连续和非均质体,其经历了亿万年的沉积、地质演变和构造运动,覆岩内部存在很多缺陷和结构弱面等,它们可能对岩体的破断起主导作用^[52]。大量现场实测数据表明,工作面周期来压步距并不是恒定不变的,可能是由于基本顶内部随机分布着若干结构弱面,对断裂步距产生影响。基本顶周期断裂步距越大,工作面支架支护强度要求越高。通过对潞安五阳煤矿7605工作面现场实测发现基本顶周期断裂步距位于区间[9, 14]内,呈现出类似“正态分布”的特征,如图9所示。

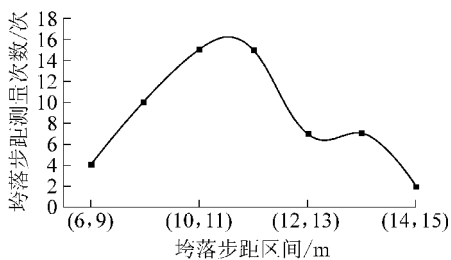


图9 工作面周期来压步距“正态分布”规律
Fig.9 Normal distribution law of main roof's periodic fracture length

6 覆岩整体移动过程及“类双曲线”模型

6.1 采动岩层破断全过程

煤层自工作面开切眼开始,随着工作面的推进,顶板岩层将会沿着推进方向和垂直方向发生破断移动,如图10所示。从图10可知,顶板的破断运动完整过程存在4种典型状态:顶板未垮落、基本顶初次断裂、非充分采动(主关键层未断裂)、充分采动。顶板初次断裂可视为四边固支的板结构;当工作面推进距离达到极限跨度时,基本顶发生“O-X”形初次断裂(横X形、X形或竖X形),并且仅当顶板呈

横X破断时,可将其简化为固支梁或简支梁(图10b);随着工作面的继续推进,基本顶发生周期性断裂,断裂的岩块相互铰接,形成承载结构(图10c),国内外学者提出了铰接岩块假说、砌体梁理论、传递岩梁理论、类拱结构等;在工作面附近的基本顶发生几个周期断裂后,远离采场的主关键层达到极限跨度,也发生“O-X”形初次断裂,根据关键层的定义可知,主关键层的断裂将会引起直至地表的上覆岩层的整体移动,随着工作面继续推进,基本顶和关键层均发生周期断裂,最终达到充分采动状态,覆岩整体移动区呈现出“类双曲线”特征(图10d)。

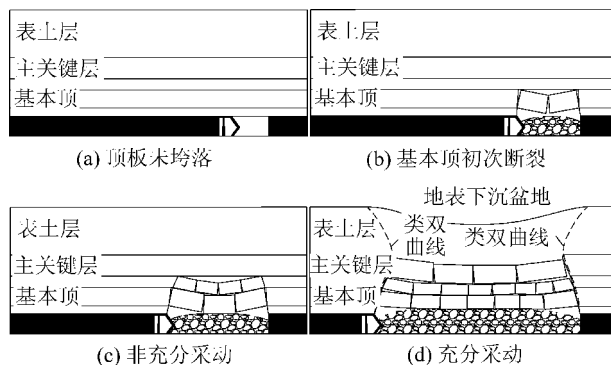


图10 工作面推进过程中岩层移动完整过程

Fig.10 Complete process of rock strata movement with mining face advancing

6.2 覆岩移动的“类双曲线”模型

从表1中可知,传统对工作面附近顶板岩层的破断移动模型均呈“倒漏斗”形(图11);从表3对地表沉陷规律的研究可知,地表都呈“漏斗”形沉降(图12)。通过前面对岩层移动理论的回顾不难发现,目前岩层移动规律的研究主要侧重在2方面,一方面是采场岩层控制主要采用力学方法研究近场基本顶的破断和移动规律,另一方面是地测工程主要采用数学方法研究地表的沉降规律。

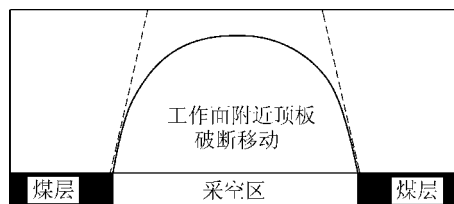


图11 传统工作面附近顶板破断移动模型

Fig.11 The traditional fracture model of bedrock

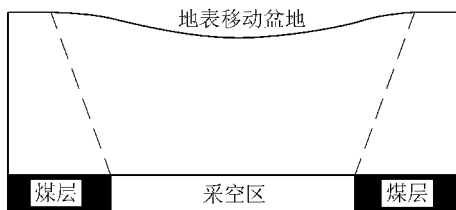
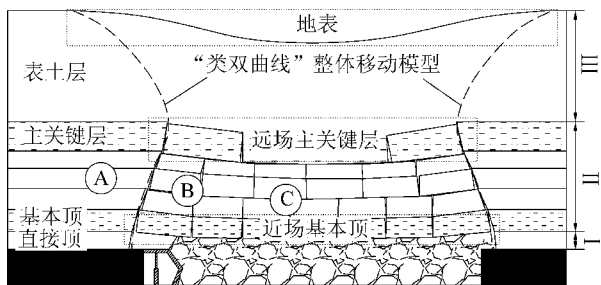


图 12 传统地表沉陷预计模型

Fig.12 Traditional movement model of thick alluvium

刘宝琛院士等^[18]指出“需要把力学方法与几何学方法结合起来,全面描述开采沉陷的形态和过程”。要想准确预测地表沉陷,需要对上覆岩层自下而上的破断运动过程进行力学分析,发展合理的岩层整体移动模型。早期刘天泉院士等^[53-54]从水平和垂直方向提出了岩层移动的“横三区、竖三带”理论,初步阐述了岩层整体破断移动规律,如图 13 所示。随后钱鸣高院士提出的“关键层”理论为“岩层移动”和“地表沉陷”的研究提供了统一思想和方法。



I—垮落带; II—裂隙带; III—弯曲下沉带;

A—支承压力的影响区; B—离层区; C—重新压实区

图 13 充分采动覆岩“类双曲线”整体移动模型

Fig.13 Analogous hyperbola model of whole overlying strata after full mining

大量工程实践与研究表明,上覆岩层的岩性对岩层破断运动有很大影响。文献^[55-56]将岩层破断运动和地表沉陷建立起联系,提出了厚松散层覆岩整体移动的“类双曲线”模型,即认为主关键层是覆岩中破坏损伤最少的岩层,如图 14 所示。

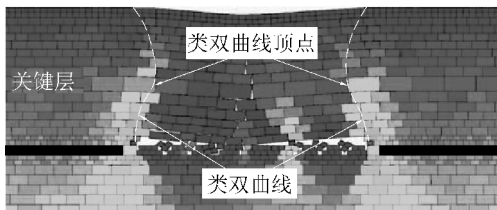


图 14 覆岩“类双曲线”移动 MDDA 模拟结果

Fig.14 The MDDA numerical simulation results of overlying strata movement with thick alluvium

该模型采用力学与数学相结合的方法,考虑到岩层内部的破断移动,使岩层移动和地表沉陷等方面的研究有机地统一成一个整体。岩层移动“类双曲线”模型通过关键层把砌体梁理论及地表沉陷理论有机联系起来,描述了煤层上覆岩层整体移动规律,是关键层理论的继承和发展。文献^[16]采用非连续变形分析软件 (Mining Discontinuous Deformation Analysis, MDDA) 模拟得到了岩层整体移动的“类双曲线”形态(图 14)。戴华阳等^[57]模拟得出了厚黄土层覆岩的“类双曲线”移动形态。前苏联通过现场钻孔监测也发现覆岩内部整体移动是凸向沉陷区的曲线^[58]。我国学者黄庆亨等^[91-92]早期对陕北厚松散层覆岩的垮落移动进行了实测和验证^[91-92],表明下部基岩呈倒漏斗形破断,上部厚松散层呈漏斗形移动,如图 15 所示。这在一定程度上证明了“类双曲线”模型的合理性。

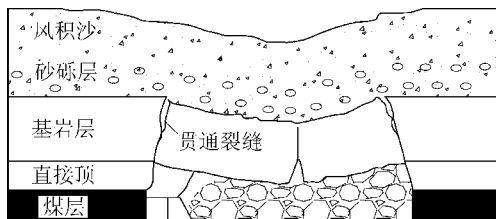


图 15 厚黄土层覆岩垮落移动形态^[59-60]

Fig.15 Caving and movement morphology of overlying strata with thick alluvium

7 岩层移动未来研究重点方向

面对“精准开采”和“科学采矿”的新形势,笔者认为未来可从以下 6 个方面重点开展研究,如图 16 所示。

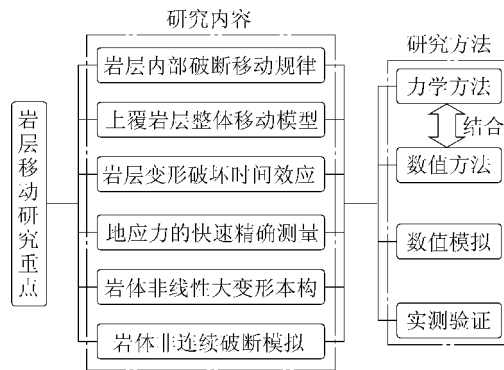


图 16 岩层移动重点研究方向

Fig.16 Key researches of rock strata movement in the future

1)采用力学方法揭示岩层内部的破断移动规律,精准描述开采沉陷的形态和过程。岩层移动的

本质是煤炭开采使得原岩应力破坏,覆岩应力重新分布,导致顶板岩层发生破断移动。

2) 建立合理的覆岩整体移动力学模型,精确预测地表沉陷范围。“三下”开采对沉陷预计精度要求越来越高,并且有些煤田地下埋设很多管线管道。故应探索“采场矿压-覆岩内部移动-地表沉陷”的统一模型^[61]。

3) 岩层破坏移动的时间效应研究。岩层移动随时间变化,最终达到新平衡,这与岩体的流变特性密切相关^[62],故需研究采动岩体流变本构。

4) 地应力的快速精确测量技术。地应力的方向和大小对岩层的破断运动具有直接影响^[63],传统地应力测量手段破坏了原岩应力,测量结果误差较大,故需研发地应力快速精确测量技术。

5) 建立合理的深部岩体非线性大变形本构关系。随开采深度增大,岩体呈现出非线性大变形趋势,应找到适应于深部岩体的本构关系,精确分析深部岩层的破断移动规律。

6) 建立精准的数值模型。岩体破断移动受岩体节理和层面滑移影响^[64-65],应开发非连续变形分析模拟软件^[66],考虑岩体内部的结构弱面、地质构造等,更真实地反映岩层非连续破断运动过程。

8 结 语

本文系统回顾了国内外岩层移动的研究进展,重点阐述了关键层理论在岩层移动中发挥的重要作用。对基本顶断裂位置、长度和形态进行力学分析。基于前人研究,提出了覆岩整体移动的“类双曲线”模型,它通过关键层把砌体梁理论及地表沉陷理论联系起来,是关键层理论的继承和发展。最后指出应采用力学方法揭示岩层移动本质,建立更接近实际的本构关系或数值模型,真实反映岩层移动规律。

我国地域广阔,采矿地质条件复杂多变,很多模型可能是在特定的边界条件下所获得的,加上作者的认识水平有限,若存在总结或评述不当之处,敬请批评、谅解!

参考文献 (References):

- [1] 钱鸣高.岩层控制与煤炭科学开采文集[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [2] 胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.
HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [3] 胡振琪,陈超.风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响与修复[J].矿业科学学报,2016,1(2):120-130.
HU Zhenqi, CHEN Chao. Impact of underground coal mining on land ecology and its restoration in windy and sandy region[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 120-130.
- [4] 李树志.我国采煤沉陷土地损毁及其复垦技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2014,42(1):93-97.
LI Shuzhi. Present status and outlook on land damage and reclamation technology of mining subsidence area in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 93-97.
- [5] 崔希民,邓略中.煤矿开采沉陷预计理论与方法研究评述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):160-169.
CUI Ximin, DENG Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 160-169.
- [6] 陈绍杰,朱旺喜,李军.2004—2013年开采沉陷类国家自然科学基金项目分析[J].山东科技大学学报,2014,33(6):58-62.
CHEN Shaohjie, ZHU Wangxi, LI Jun. Analysis of mining subsidence projects funded by National Natural Science Foundation from 2004 to 2013[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2014, 33(6): 58-62.
- [7] 何国清,杨伦,凌赓娣,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学,1990.
- [8] 钱鸣高,朱德仁,王作棠.基本顶岩层断裂型式及对工作面来压的影响[J].中国矿业学院学报,1986,15(2):9-18.
QIAN Minggao, ZHU Deren, WANG Zuotang. The fracture types of main roof and their effects on roof pressure in coal face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986, 15(2): 9-18.
- [9] 钱鸣高,缪协兴,何富连.采场“砌体梁”结构的关键块分析[J].煤炭学报,1994,19(6):557-563.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [10] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):225-230.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [11] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [12] 刘宝琛,廖国华.煤矿地表移动的基本规律[M].北京:中国工业出版社,1965.
- [13] 贾喜荣,翟英达.采场薄板矿压理论与实践综述[J].矿山压力与顶板管理,1999,16(3):22-25.
JIA Xirong, ZHAI Yingda. The review of ground pressure theory of thin slab in coal mining and its application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3): 22-25.
- [14] 贾喜荣,李海,王青平,等.薄板矿压理论在放顶煤工作面中

- 的应用[J].太原理工大学学报,1999,17(2):179-183.
- JIA Xirong, LI Hai, WANG Qingping, *et al.* Rock slab theory of ground pressure applied in sub-level caving face [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1999, 17(2): 179-183.
- [15] 姜福兴, 宋振骥, 宋扬. 老顶的基本结构形式[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 366-379.
- JIANG Fuxing, SONG Zhenqi, SONG Yang. The basic structures of the fractured main roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 366-379.
- [16] 张顶立, 王悦汉. 综采放顶煤工作面岩层结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 340-343.
- ZHANG Dingli, WANG Yuehan. Analysis of fractured rock stratum structures in fully mechanized caving mining face [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(4): 340-343.
- [17] 黄庆享, 张沛, 董爱菊. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2722-2726.
- HUANG Qingxiang, ZHANG Pei, DONG Aiju. Mathematical model of “arch beam” of thick sandy soil layer movement in shallow seam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2722-2726.
- [18] 刘宝琛, 戴华阳. 概率积分法的由来与研究进展[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 1-3.
- LIU Baochen, DAI Huayang. Research development and origin of probability integral method [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(2): 1-3.
- [19] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.
- QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [20] 钱鸣高. 采场上覆岩层的平衡条件[J]. 中国矿业学院学报, 1981, 10(2): 31-40.
- QIAN Minggao. Conditions required equilibrium of overlying strata at working areas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1981, 10(2): 31-40.
- [21] QIAN M G. A study of the behavior of overlying strata in longwall mining and its application to strata control [C]. Proceedings of the Symposium on Strata Mechanics. Elsevier Scientific Publishing Company, 1982: 13-17.
- [22] 钱鸣高, 李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报, 1982, 7(2): 1-8.
- QIAN Minggao, LI Hongchang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 1982, 7(2): 1-8.
- [23] 钱鸣高. 采场上覆岩层岩体结构模型及其应用[J]. 中国矿业学院学报, 1982, 11(2): 1-11.
- QIAN Minggao. A structural model of overlying strata in longwall workings and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1982, 11(2): 1-11.
- [24] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁的“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994, 11(3): 6-11.
- QIAN Minggao, ZHANG Dingli, LI Liangjie, *et al.* “S-R” stability for the voussoir beam and its application [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1994, 11(3): 6-11.
- [25] 左建平, 魏旭, 杨胜利, 等. 深部岩层渐进破断机理及塑性铰理论研究[C]//煤矿岩层控制理论与技术进展: 33届国际采矿岩层控制会议(中国)论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 41-46.
- [26] 钱鸣高, 石平五, 许家林, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 9.
- [27] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122-126.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Research on the surface movement effects of key stratum movement [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 122-126.
- [28] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 787-791.
- XU Jialin, QIAN Minggao, ZHU Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 787-791.
- [29] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-348.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [30] 许家林, 朱卫兵, 李兴尚, 等. 控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 6-11.
- XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, *et al.* Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 6-11.
- [31] 鲍莱茨基 M, 胡戴克 M. 矿山岩体力学[M]. 于振海, 刘天泉, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1985: 88-97.
- [32] 张金才, 部鑫肖, 冯奎仁. 条带开采煤柱稳定程度的研究[J]. 煤矿开采, 1994(4): 21-25.
- ZHANG Jincai, BU Xinhe, XIAO Kuiren. Study of coal pillar stability in strip mining [J]. Coal Mining Technology, 1994(4): 21-25.
- [33] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong, GUO Guangli. Study on waste filling method and technology in fully mechanized coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [34] 刘建功, 赵家巍, 李蒙蒙, 等. 煤矿充填开采连续曲形梁形成与岩层控制理论[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 383-391.
- LIU Jianguo, ZHAO Jiawei, LI Mengmeng, *et al.* Continuous curved beam formation and strata control theory in coal backfill mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 383-391.
- [35] 陈杰, 杜计平, 张卫松, 等. 研石充填采煤覆岩移动的弹性地基梁模型分析[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 14-19.
- CHEN Jie, DU Jiping, ZHANG Weisong, *et al.* An elastic base beam model of overlying strata movement during coal mining with gangue back-filling [J]. Journal of China University of Mining, 2012, 41(1): 14-19.

- [36] 黄庆享,张文忠.浅埋煤层条带充填隔水岩组力学模型分析[J].煤炭学报,2015,40(5):973-978.
HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong. Mechanical model of water resisting strata group in shallow seam strip-filling mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 973-978.
- [37] 杨伦,戴华阳.关于我国采煤沉降计算方法的思考[J].煤矿开采,2016,21(2):7-9,102.
YANG Lun, DAI Huayang. Thoughts of calculation method of coal mining subsidence in home [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(2): 7-9, 102.
- [38] KRATZSCH I H. Mining subsidence engineering [J]. Environmental Geology & Water Sciences, 1986, 8(3): 133-136.
- [39] KNOTHE S. Observation of surface movements and their theoretical interpretation [J]. Colliery Engineering, 1959 (36): 24-29.
- [40] LITWINISZYN J. Stochastic methods in mechanics of granular bodies [M]. New York: Springer-Verlag, 1974.
- [41] BRÄUNER G. Subsidence due to underground mining. Part 1 [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1974, 11(3): 58.
- [42] 何国清,马伟民,王金庄.威布尔分布函数在地表移动计算中的应用:用碎块体理论研究岩移基本规律的探讨[J].中国矿业学院学报,1982,11(1):15-17.
HE Guoqing, MA Weimin, WANG Jinzhuang. Application of influence function of Weber distribution to the pre-calculation of ground surface movement; a study on the fundamental law of ground movement based on the elastic theory [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1982, 11(1): 15-17.
- [43] 何国清.岩移预计的威布尔分布法[J].中国矿业学院学报,1988,17(1):8-15.
HE Guoqing. The Weber-distribution method for calculating mining subsidence [J]. Journal of China Institute of Mining and Technology, 1988, 17(1): 8-15.
- [44] 钱鸣高,缪协兴.采动岩体力学:一门新的应用力学研究分支学科[J].科技导报,1997(3):29-31.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Mining strata mechanics [J]. Science & Technology Review, 1997(3): 29-31.
- [45] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [46] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067-1074.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [47] 左建平,陈岩,王超.深部煤层岩组破坏力学及模型[M].北京:科学出版社,2017.
- [48] 左建平,刘连峰,周宏伟,等.不同开采条件下岩石的变形破坏特征及对比分析[J].煤炭学报,2013,38(8):1319-1324.
ZUO Jianping, LIU Lianfeng, ZHOU Hongwei, et al. Deformation failure mechanism and analysis of rock under different mining condition [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1319-1324.
- [49] 左建平,谢和平,吴爱民,等.深部煤层单体及组合体的破坏机制与力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):84-92.
ZUO Jianping, XIE Heping, WU Aimin, et al. Investigation on failure mechanisms and mechanical behaviors of deep coal-rock body and combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 84-92.
- [50] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [51] 刘畅,杨增强,弓培林,等.工作面过空巷基本顶超前破断压机理及控制技术研究[J].煤炭学报,2017,42(8):1932-1940.
LIU Chang, YANG Zengqiang, GONG Peilin, et al. Mechanism and control technology of supports crushing induced by main roof's breaking ahead of workface when crossing abandoned roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1932-1940.
- [52] ZUO Jianping, LIU Huihai, LI Hongtao. A theoretical derivation of the Hoek-Brown failure criterion for rock materials [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015 (4): 361-366.
- [53] 煤炭科学研究院北京开采所.煤矿地表移动与覆岩破断规律及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1981.
- [54] 刘天泉.矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J].煤炭学报,1995,20(1):1-5.
LIU Tianquan. Influence of mining activities on mining rockmass and control engineering [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 1-5.
- [55] 左建平,孙运江,钱鸣高.厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J].煤炭学报,2017,42(6):1372-1379.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1372-1379.
- [56] 左建平,孙运江,王金涛,等.充分采动覆岩“类双曲线”破坏移动机理及模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(1):71-77.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WANG Jintao, et al. Mechanical and numerical analysis of “analogous hyperbola” movement of overlying strata after full mining extraction [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 35(1): 71-77.
- [57] 戴华阳,刘继岩,廉旭刚,等.厚黄土层条件下综放开采覆岩破坏数值模拟研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2010,25(3):1-4.
DAI Huayang, LIU Jiyan, LIAN Xugang, et al. Numerical simulation study on overburden rock damage by fully mechanized caving under thick loess layer [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 25(3): 1-4.

- 报,2000,19(5):651-654.
- LI Huamin.Design of roof rock formation along gob - side entry [J].China Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(5):651-654.
- [13] 邹磊,来兴平,王宁波,等.复杂地质条件下急斜厚煤层巷道变形特征[J].西安科技大学学报,2010,30(2):145-149.
- ZOU Lei,LAI Xingping,WANG Ningbo, *et al.* Deformation characteristics of roadway in steep thick seam under complex geological conditions [J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2010,30(2):145-149.
- [14] 曹树刚,王勇,邹德均,等.倾斜煤层沿空留巷力学模型分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2013,36(5):143-150.
- CAO Shugang,WANG Yong,ZOU Dejun, *et al.* Mechanical model analysis of roadway along the roadway in inclined coal seam [J].Journal of Chongqing University: Natural Science Edition,2013,36(5):143-150.
- [15] 李胜,李军文,韩永亮,等.综放工作面沿空留巷支护阻力研究[J].安全与环境学报,2015,15(1):133-136.
- LI Sheng,LI Junwen,HAN Yongliang, *et al.* Study on the supporting resistance of gob-side entry retaining in fully mechanized top coal caving face [J].Journal of Safety and Environment,2015,15(1):133-136.
- [16] 谢文兵.综放沿空留巷围岩稳定性影响分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3059-3065.
- XIE Wenbing.Effects of surrounding rock stability on gob - side entry retaining in fully mechanized caving face[J].China Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(18):3059-3065.
- [17] 谢文兵,殷少举,史振凡.综放沿空留巷几个关键问题的研究[J].煤炭学报,2004,29(2):146-149.
- XIE Wenbing,YIN Shaoju,SHI Zhenfan.Study on several key problems of gob-side entry in fully mechanized top coal caving [J].Journal of China Coal Society,2004,29(2):146-149.
- [18] 贾民,柏建彪,田涛,等.墩柱式沿空留巷技术研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):18-22.
- JIA Min,BAI Jianbiao,TIAN Tao, *et al.* Research on pier-pillar gob-side entry retaining technology [J].Coal Science and Technology,2014,42(1):18-22.
- [19] 陈勇,柏建彪,王襄禹,等.沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J].煤炭学报,2012,37(6):903-910.
- CHEN Yong,BAI Jianbiao,WANG Xiangyu, *et al.* Study and application of support technology in roadway along goaf [J].Journal of China Coal Society,2012,37(6):903-910.
- [20] 王化亮,贾德福.沿空留巷巷旁充填支护技术研究[J].黑龙江科技信息,2015(5):133-136.
- WANG Hualiang,JIA Defu.Research on gob-side entry retaining technology in gob-side entry retaining [J].Heilongjiang Science and Technology Information,2015(5):133-136.
- [21] 鲁印英.沿空留巷巷旁充填体与顶板岩层的相互作用[J].煤炭技术,2008,27(4):57-59.
- LU Yinying.Interaction of roadway filling and roof rock formation along gob - side lane [J].Coal Technology,2008,27(4):57-59.
- [22] DENG Yuehua,TANG Jianxin,ZHU Xiangke, *et al.* Analysis and application in controlling surrounding rock of support reinforced roadway in gob-side entry with fully mechanized mining[J].International Journal of Mining Science and Technology,2010,20(6):839-845.
- (上接第11页)
- [58] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉降工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [59] 黄庆享,祁万涛,杨春林.采场老顶初次破断机理与破断形态分析[J].西安矿业学院学报,1999,19(3):193-197.
- HUANG Qingxiang,QI Wantao,YANG Chunlin.Mechanical analysis and fracture morphology of main roof initial fracturing [J].Journal of Xi'an Mining Institute,1999,19(3):193-197.
- [60] 黄庆享.浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [61] 崔希民,缪协兴.浅议矿山开采沉降学研究内容之延拓[J].矿山压力与顶板管理,2000,17(4):80-83.
- CUI Ximin,MIAO Xiexing.Preliminary discussion on the extension of mining subsidence investigation [J].Ground Pressure and Strata Control,2000,17(4):80-83.
- [62] 崔希民,杨硕.开采沉降的流变模型探讨[J].中国矿业,1996,5(2):52-55.
- CUI Ximin,YANG Shuo.Discussion on rheology models of mining subsidence [J].China Mining Magazine,1996,5(2):52-55.
- [63] 左建平,曹光明,孙运江,等.采场围岩破坏力学与全空间协同控制实践[M].北京:科学出版社,2016.
- [64] 邓喀中,马伟民.开采沉降中的岩体节理效应[J].岩石力学与工程学报,1996,15(4):345-352.
- DENG Kazhong,MA Weimin.Effect of rockmass joints on mining subsidence [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1996,15(4):345-352.
- [65] 邓喀中,马伟民,何国清.开采沉降中的层面效应研究[J].煤炭学报,1995,20(4):380-384.
- DENG Kazhong,MA Weimin,HE Guoqing.Investigation of effect of stratified plane in surface subsidence due to coal mining [J].Journal of China Coal Society,1995,20(4):380-384.
- [66] 左建平,赵洪宝,杨建立,等.大采高综放开采煤岩体冒落规律数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):56-59.
- ZUO Jianping,ZHAO Hongbao,YANG Jianli, *et al.* Analysis and study on falling down law of coal and rock in high cutting fully mechanized top coal caving mining [J].Coal Science and Technology,2013,41(1):56-59.