



移动阅读

张建民,李全生,张勇,等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6018

ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6018

煤炭深部开采界定及采动响应分析

张建民¹, 李全生^{1,2}, 张 勇¹, 曹志国^{1,2}, 王新中³

(1. 煤炭水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100021; 2. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100021; 3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要: 科学界定深部是深部开采理论发展与技术实践的重要问题, 探讨适于我国煤炭现代开采实践的深部开采界定方法具有重要意义。为此, 综合考虑我国煤矿矿区深部岩石、地下水环境和现代开采方式, 将区域应力场与采动应力场分析相结合, 基于我国地壳浅部、煤矿矿区深部准静水应力状态分析, 进一步研究我国煤矿矿区的深部界定、基于不同矿区煤岩状态(岩性及组合、含水性等)差异的相对深部界定和开采时动态深部区确定方法。研究表明, 原岩初始状态和开采方式共同决定了采动力学状态及变化规律和其他伴生状态变化。基于深部与浅部的力学状态差异, 将深部开采界定为在高地应力环境且具有采动非线性力学响应的煤岩体空间实施的采矿活动; 依据我国煤矿矿区应力场统计变化规律和准静水应力状态分析, 采用平均侧压系数 K_{av} (即: 水平最大主应力和最小主应力的平均值与垂直应力之比) 确定煤矿矿区深部临界深度, 结合我国中东部深部开采实践确定的参考深部临界深度 H_m 为 850 ~ 900 m; 基于不同矿区原岩差异性(岩性及组合、含水性等), 建立了不同初始状态时实际深部临界深度 H_s (简称为视临界深度) 与 H_m 比较模型, 分析发现采动煤层覆岩越软和含水性越强, 其深部临界深度越浅(或“趋浅”), 降低幅度可达 30% ~ 50%; 基于开采“应力拱”现象构建了深部采动应力状态 K_{av} 模型和 H_s 计算方法, 采动响应分析表明: 开采工作面切眼外侧及采场前端局部 H_s 呈变浅→变深→正常的变化特征(或“端部效应”), 工作面中部区域呈变浅趋势(或“趋浅”), 采高越大其 H_s “趋浅”效应越显著, 而随工作面推进距离增加端部效应变小; 东、中、西部典型矿区 H_s 与 H_m 比较表明: 东部矿区 H_s 偏深, 中部矿区深度相近, 西部(陕、蒙等)地下水丰富的矿区偏浅, 在 500 ~ 600 m 即可达到实际深部临界深度, 采深 400 ~ 500 m 时大采高工作面两端外侧局部也可显现深部力学状态。研究基于我国深部岩石力学研究成果和开采条件及现代开采方式, 探讨提出的深部界定方法和结果, 与已有深部开采理论研究与实践成果比较证实, 该方法具有理论合理性和结果可靠性。

关键词: 煤炭开采; 深部界定; 视临界深度; 趋浅效应; 西部矿区

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2019)05-1314-12

Definition of deep coal mining and response analysis

ZHANG Jianmin¹, LI Quansheng^{1,2}, ZHANG Yong¹, CAO Zhiguo^{1,2}, WANG Xinzong³

(1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China; 2. National Energy Investment Group Co., Beijing 100011, China; 3. School of Energy & Mining Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Scientific deep definition, especially the definition method of deep mining suitable for the modern mining

收稿日期: 2019-01-31 修回日期: 2019-04-30 责任编辑: 郭晓炜

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600708)

作者简介: 张建民(1957—), 男, 河北张家口人, 教授级高级工程师。Tel: 010-57337362, E-mail: sh_zhangjm@126.com

practice, is a significant issue in developing the deep mining theory and technical practice. The deep rock, groundwater environment and modern mining methods in coal mining areas were comprehensively considered for the definition of coal deep mining. Based on the analysis of quasi-hydrostatic pressure environment in shallow crust and deep coal mine areas in China, a further study of deep definition of coal mining areas, the relative deep definition in different mining areas with the differences of coal and rock states (lithology and assemblage, water content, etc.), and the determination method of dynamic deep areas in deep mining were focused. The research shows that the coupling action between the initial state of the original rock and the mining mode determines the mechanical response behavior and state of the original rock. The remarkable features of the deep mechanical state are the high stress environment and the non-linear mechanical response characteristics, which are the main causes of the basic state in many states and the associated disasters in deep mining. The deep mining is then defined as a special mining activity in the space of coal and rock mass with high stress environment and non-linear mechanical response. After analyzing the regional tendency of shallow crust and local stress fields of coal mining areas with the depth in China, average lateral pressure coefficient K_{av} (i. e. the ratio of the average value of horizontal maximum principal stress and minimum principal stress to vertical stress) is selected as a basic parameter for the deep criteria of coal mine areas. By combining the deep mining practice in the eastern and middle part of China, the depth of 850–900 m is appropriately considered as reference critical depth of deep coal mining in China (shortly DCM of H_m). Based on the difference of original rock in different mining areas (rock lithology, structure, water content, etc.), a comparison model between H_s (i. e. the actual or visual DCM) and H_m is established, varied with initial protolithic states. Analyzing the relative change of the different mining geological situations, the result reveals that the softer the rock and the stronger the water content, the shallower the visual DCM becomes (or “shallowing”), even the depth reduction up to 30% ~ 50%. Based on the phenomenon of “stress arch” in mining, the K_{av} model and the H_s calculation method are constructed for the description of deep mining stress state. The modeling shows that the local stress and H_s from the cut position of working face to the external section of the propulsion are the characteristic of the “end effect” changes from shallow→deep→normal, and the stress in the central area of working face is in a “lighter” state (or “shallowing”). The higher the mining height, the more pronounced the “lighter” state. The “end effect” tends to be gradually slowed down and weaken with the increase of the propulsion distance. The comparison of the critical depth from the typical mining areas shows that the depth in the eastern mining is deeper than the reference DCM, similar in the central mining area and less in the western mining area rich in groundwater (Shaanxi, Inner-Mongolia), actually so shallow as to 500–600 m. Nevertheless, the local deep mechanical anomaly could be found in the “end effect” area, in the mining depth of 400–500 m with a greater mining height using large-sized modern mining method. Based on the research results of deep rock mechanics and modern coal mining practices, the deep definition methods are proposed and discussed, combined with the characteristics of resource endowment in different mining regions of China and deep mining practice. By comparing with the existing related research and practice results, the method is proved to be rational in theory and its result is reliable. The method is useful to the research and practice of deep coal mining in China.

Key words: coal mining; deep definition; apparent critical depth; shallow effect; west mining area

地球深部是人类未来获取有价资源的主要区域之一。目前,世界上主要矿业大国开采超过千米矿井已有100余座。其中,煤矿深井主要在德国、波兰、俄罗斯、英国、日本、比利时等国家,最大开采深度逼近2 000 m水平^[1]。我国随着浅部资源的逐步开发与枯竭,深部开采亦将进入常态,开采深度也以10~25 m/a的速度延伸,现有超过千米深井达47座,采深1 000~1 100 m,最大达到1 500 m^[2]。

我国深部开采中冲击地压、突水、地热等灾害出

现频率显著增加。据不完全统计,现有150余个冲击地压矿井中具有冲击倾向性的占40%,130余处大型煤矿中一、二级热害矿井超过43%^[3]。为解决深部安全高效开采遇到的理论与实践问题,前人系统研究了深部“三高一扰动”的复杂力学环境、岩体力学特性及工程灾害响应特点^[4],深部岩石大变形和强流变特点^[5],赋存深度对岩石力学行为的影响规律^[6-7],动力失稳的能量特征与判别标准^[8-9],发现了应力场分区破裂化^[10-11]、综放工作面上覆岩宏观

应力壳下低应力区^[12]、应力拱发育高度与采动裂隙发育高度的关系^[13],现场探测证实应力拱拱高与覆岩断裂带上限位置具有较好的对应性^[14]。同时,基于我国地壳浅部和煤矿矿区大量地应力观测结果,统计获得不同尺度应力场侧压系数与深度的线性变化关系^[15-16],典型采动区应力侧压系数的基本关系^[17],为深部开采应力场研究提供了有力支撑。

如何确定煤炭开采的深部,前人研究已从多角度给出不同的诠释。“深部”是一种由地应力水平、采动应力状态和围岩属性共同决定的力学状态,深部采煤环境与浅部比较可概括为“三高”(高地应力、高地温、高岩溶水压)和深部岩体工程响应“三强”(强流变性、强湿热、强动力灾害)特点^[18];此时,深部工程岩体具有非线性变化的力学特点,应用现有的线性力学系统理论与技术部分或全部失效,深部工程围岩控制可基于岩体力学特性与工程特性,采用难度系数和危险指数作为稳定性难易程度的评价指标^[19]。深部应力条件下,现有基于弹性理论的煤炭开采理论难以适用^[20]。针对我国煤矿开采中遇到的灾害问题和采动效应影响,综合地质条件、采煤方法、支护方式等,提出深矿井、深矿井类型与临界深度,深矿井的深度上限为 600 ~ 800 m,深井分为 800 ~ 1 200 m 和 1 200 m 以上 2 个亚类^[21]。根据岩石实验结果提出了深部的亚临界深度、临界深度、超临界深度定量分析方法^[22]。还有将地壳应力场特征深度作为确定深部“临界深度”的指标^[23]。

目前,深部开采的界定方式分别从地应力场特征深度、开采绝对深度、开采煤岩体地应力环境、开采引发的灾害程度和方式、巷道支护及维护成本和岩体力学状态等角度,由表及里的诠释了深部开采的特点,提出了深部开采理论与实践的针对性解决方案。然而,深部开采也是在高地应力环境下对煤岩体进行持续施加扰动的过程,原岩初始状态和开采方式共同决定了岩石力学状态及变化规律。笔者基于我国深部岩石力学研究成果和现代开采方式,构建深部开采系统时-空模型,探索性提出深部煤炭开采定义,探讨了适于我国煤炭现代开采实践的深部界定方法和主要影响因素,并结合我国东、中、西部的煤炭资源区域禀赋特点分析深部界定可行性,旨在进一步丰富和完善深部开采理论与方法。

1 煤炭深部开采定义

1.1 煤炭开采系统

煤炭开采是指采用现代采掘装备和开采工艺持续采取(或采动)煤炭的采掘活动。煤炭开采导致采

动区原岩初始状态(应力场、水力场、原岩裂隙等)发生变化,原岩初始状态和开采方式的采动耦合作用决定了采动围岩状态变化规律。根据采动作用空间关系,煤炭开采也可视为由采动源、采动区和矿区区域 3 部分组成的系统。其中,采动源包括动力源(如综采装备)和动力作用区(工作面)要素及作用状态(如采动强度);采动区是采动源作用直接影响区,主要包括岩性组合体、含水层等要素及采动状态(如应力场、水力场);矿区区域是采动影响区外部区域,主要包括区域综合岩性组合体和含水层等要素及原岩状态(如区域应力场和水力场)。采动源与采动区的“采动源-煤岩”之间的持续耦合作用(或采动耦合)实现了煤炭采取,也引发了采动覆岩破坏和地下水与原岩的“水-岩”动态耦合响应,导致采动区应力场及水力场状态发生变化,形成采动状态 S_1 ($0 < t < t_1$ 时);当趋于稳定状态时又形成采动覆岩和地下水的静态耦合关系,形成静态耦合状态 S_2 ($t > t_1$);矿区区域控制着采动区变化状态的边界,代表了采动区采动前($t=0$)初始状态 S_0 (图 1)。

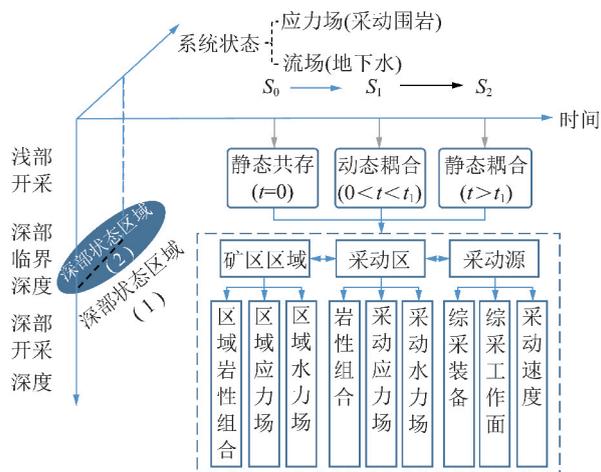


图 1 煤炭开采系统简要结构

Fig. 1 Coal mining system structure

采动耦合作用形成的采动应力持续变化是系统其他状态变化的基础,深部开采作为煤炭开采的特定情形,则是原岩力学状态(静态时)与采动应力响应(动态时)达到深部力学状态时的开采。与浅部开采相比,煤岩体深部力学状态(原岩应力环境及采动力学响应特征)是区分深部开采的关键。因此,选取系统状态中的力学状态作为研究对象,界定深部开采的范围。

为简洁描述煤岩体的力学状态,可将岩石在深部力学状态空间 V_m^* 的状态函数 S_m 表征为

$$\begin{cases} S_m^0 = f_0(x, y, z, \xi, F) |_{V_m^* \subset V_m^*}^{t=0} \\ S_m^t = f_1(x, y, z, \xi, F, C) |_{V_m^* \subset V_m^*}^{t>0} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_m 为任意系统中原岩力学状态空间; F 为原岩参数(包括岩石组分和岩层组合、岩层含水率等); C 为开采工艺参数; t 为系统要素间相互作用时间; S_m^0 和 f_0 分别为未采动时的状态值和状态函数; S_m^t 和 f_t 分别为采动时的状态值和状态函数; ξ 为任意的状态参数; V_m^* 为煤岩采动影响的深部力学状态空间范围。

式(1)提出的 S_m 函数可表征深部力学状态与原岩物理性质、采动源参数、空间位置等参数之间的关系。根据采动耦合作用时间,将深部力学状态分为静态深部力学状态($t=0$)与动态深部力学状态($t>0$)。前者代表了原岩无采动作用时初始力学状态,主要与原岩参数 F 有关,高地应力环境是深部力学状态的静态显现特征;后者则是原岩受持续采动作用时动态力学状态,其采动影响区力学状态不仅与 F 有关,还与采动源参数 C 有关,原岩受采动作用时非线性力学响应是深部力学状态的动态显现特征,也是深部岩体工程显现的强流变性和强动力灾害的致因。

1.2 深部煤炭开采

深部力学状态显现是煤炭开采由浅部进入深部的基本条件,高地应力环境和原岩非线性力学响应是深部力学状态的基本特征。因此,与浅部煤炭开采比较,深部煤炭开采则指在高地应力环境且具有采动非线性力学响应的煤岩体空间的采矿活动。其内涵主要包括:

(1)深部开采是原岩处于深部高地应力状态下的采矿活动。高地应力状态是深部应力状态的基本特征。目前东部主要矿井平均开采深度已达到 800~1 000 m,而西部矿区也由 100~300 m 逐步进入 400~700 m。相对浅部开采,不同区域开采向较大深度转移时逐步进入高地应力环境。此时,原岩应力状态由构造应力为主逐步转向以垂直应力为主,当进入二向等压的三轴压缩应力状态时(或准静水应力状态)进入深部应力状态^[22]。

(2)深部开采是采动煤岩出现显著非线性力学响应特征的采矿活动。采动煤岩非线性响应是深部与浅部力学状态的动态特征差异。深部状态下煤岩力学响应由完全弹性形变过渡到脆塑性形变—塑性流动状态,开采中出现塑性大变形、动力灾害、围岩大规模动力失稳等非线性力学现象。与浅部开采相比,弹性形变、脆塑性形变、塑性形变现象共存,传统线性理论与方法解释困难。

(3)深部开采过程也是采动耦合作用与煤岩力学状态时—空演化过程。采动煤岩初始状态反映了采动煤岩静态属性和力学状态,采动耦合状态反映了煤岩的动态属性和力学状态,采动煤岩力学状态变化

与深度、原岩岩性组合和采动源参数都相关。与浅部开采相比,不仅采动煤岩初始状态时处于准静水压力环境为深部开采,而且在开采过程中出现深部力学状态的空间也视为深部区域,此时显现的动态高应力区和煤岩非线性力学响应,也需用深部开采理论与方法解释(图 1)。

因此,根据我国煤矿矿区分布和煤岩体岩性组合特点,可将深部开采划分为中东部深部开采和西部深部开采,前者主要成煤期为石炭—二叠纪,含煤岩系主要是二叠系山西组和石炭系太原组等;后者主要成煤期为侏罗纪,含煤岩系主要是侏罗系延安组。

2 深部判断方法

2.1 判断准则

深部力学状态作为判定开采进入深部的主要标志,并基于实验测定或深部岩石原位测试确定特征深度是深部开采理论研究的重要突破。深部状态是与区域地应力水平、开采地质环境和采动力学行为密切相关,而矿区地应力研究的采样随机性和样本离散性,使矿区范围深部界定具有局限性。基于我国地壳浅部和煤矿矿区应力场变化趋势确定区域深部,同时结合采动区岩性组合特点和采动耦合力学时—空响应变化规律确定采动区深部,从而界定开采是否进入深部是合理的。

我国地壳浅部区域应力场研究主要是基于沉积岩、岩浆岩和变质岩 3 大类岩性的地应力测试数据。其原岩侧压系数 K_H , K_h 和 K_{av} (即:最大水平主应力、最小水平主应力和水平平均主应力分别与垂直主应力之比)与深度间统计分布规律^[15]表明(图 2),浅部 K_h 和 K_H 变化范围较大,意味着局部构造应力为主。随深度增加,实测值相对收敛。当 $K_h=1$ 时, $K_H \approx 1.61$, $K_{av} \approx 1.29$, 深度为 363 m, 随后逐步减少且趋于 0.6 左右;当 $K_H=1$ 时, $K_h \approx 0.61$, $K_{av} \approx 0.80$, 深度达到 3 125 m, 此后逐步趋于稳定值;当 $K_{av}=1$ 时, $K_H \approx 1.25$ 和 $K_h \approx 0.77$, 深度为 768 m。当深度为 1 100 m 时, K_H , K_h 和 K_{av} 的相对变化率已小于 1%。

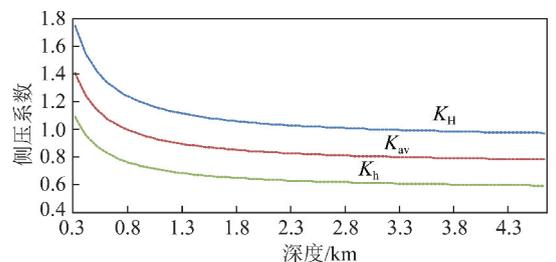


图 2 我国地壳浅部区域侧压系数变化趋势

Fig. 2 Trend of geostress confining pressure in the shallow crust, China

我国煤矿矿区(涵盖东、中、西区域)地应力研究主要是基于煤矿矿区地层的沉积岩组地应力测试数据。获得原岩侧压系数 K_H , K_{av} 和 K_h 与深度变化的统计分析规律^[16]表明(图3),在5 000 m 深度范围内, K_H 始终大于1.0并渐趋于1.31, K_h 始终小于1.0并渐趋于0.74, 而 K_{av} 由始终大于1.0到渐趋于1.03, 在深度850~900 m 时 K_{av} 相对变化已小于 $10^{-4}/m$ 。

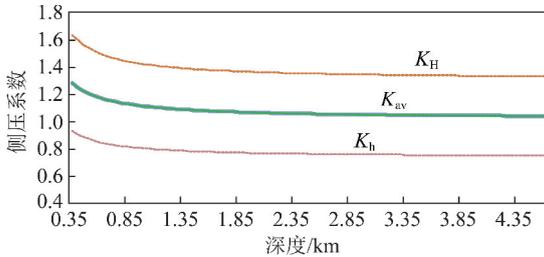


图3 我国煤矿矿区侧压系数变化趋势

Fig. 3 Trend of geostress confining pressure coefficient in coal mining areas, China

地壳浅部区域应力场水平与煤矿矿区的应力场水平相比较,前者的 K_H 和 K_h 在浅部较大,显示水平构造应力较强,总体上反映了地壳浅部沉积岩、岩浆岩和变质岩3大岩类的平均应力场变化特征。煤矿矿区应力场水平普遍大于地壳浅部应力场水平,总体上属于高地应力区,且 K_H 和 K_h 随深度增加逐步趋于相对稳定值, K_{av} 逐步趋近于1.0,总体上代表了我国煤矿矿区煤系地层的平均地应力水平。

由于 K_{av} 综合了原岩三轴应力参数,反映了平均水平应力与垂直应力的关系, $K_{av} \approx 1$ 时近似体现了原岩三轴应力关系处于准静水应力状态。因此,在目前可测和可采深度范围内,基于深部准静水压力环境和 K_{av} 参数作为判断煤炭开采是否进入深部的准则是合理和适用的。同时,参照我国煤矿矿区平均地应力水平和研究矿区煤系地层的局部地应力水平差异性,区别界定深部的具体范围是必要的。

2.2 确定方法

深部力学状态分为静态状态与动态状态,前者是深部原岩状态下基本物理特性的综合显现,后者则是原岩与采动源耦合作用时的动态显现。根据深部判断准则,可基于静态和动态力学状态时 K_{av} 是否达到准静水应力状态确定开采是否进入深部和临界深度。

2.2.1 静态(无开采扰动)深部确定

静态深部是指开采系统为静态时($t=0$)具有深部力学状态显现的区域 V_m^0 , H_m 为深部的临界深度,该区域原岩称为深部原岩。其深部力学状态函数为

$$K_{av}^0 = f_s(x, y, z, \sigma, F) \Big|_{z > H_m} \quad (2)$$

在深部区域 V_m 外原岩应力场以水平构造应力为主,显现为浅部状态;在深部区域 V_m 内的原岩应力场显现为深部准静水应力状态。

静态深部区域界定时,原岩参数 F 是主要影响因素,即原岩成分及物理性质、岩性组合和岩层含水性对界定深部状态有重要影响。依据我国煤矿矿区应力场统计规律,结合东部煤炭开采实践,我国煤矿矿区选择在 $K_{av} \approx 1$ 附近且随深度相对变化约小于 $10^{-4}/m$ 的深度850~900 m 为参考深部临界深度 H_m 。而在具体开采区域符合深部状态的实际深部临界深度 H_s (或视深部临界深度)与采动区原岩和区域岩石组合及物性差异有关。

2.2.2 动态(开采扰动时)深部确定

动态深部是指开采系统为动态时($t>0$),原岩在开采扰动耦合作用时深部力学状态显现(k_{av} 趋近于1.0)的空间区域 V_m ,深部力学状态函数可表达为

$$K_{av}^t = f_s(x, y, z, \sigma, F, C) \Big|_{z > H_m}^{k_{av}=1} \quad (3)$$

深部区 V_m 包括了静态深部区 V_m^0 和动态深部区 V_d ,在 V_m 外侧压参数 $k_{av}>1$ 时,原岩与采动耦合的应力状态显现为浅部状态,应力场以水平构造应力为主;在 V_m 内,原岩物性参数 F 和采动源参数 C 共同决定了应力场状态及深部范围 V_d 。

若设 K_{av}^R 为受区域(指煤矿矿区)应力场控制的原岩应力状态, ΔK_{av}^c 为采动耦合作用产生的采动增量,则采动应力场状态函数(采动影响范围内应力场状态函数) K_{av}^s 为

$$K_{av}^s = K_{av}^R + \Delta K_{av}^c \quad (4)$$

此时, $\Delta K_{av}^c > 0$ 的区域显示浅部力学状态,采动耦合作用区构造应力增强或垂直应力相对下降,以构造应力为主;在 $\Delta K_{av}^c < 0$ 且 $H_s > H_m$ 区域($K_{av}^s(x, y, z) < K_{av}^R(x, y, H_m)$),采动耦合作用出现水平构造应力降低或垂直应力增大现象,局部也可出现符合深部力学状态的区域。

3 深部开采影响分析

3.1 采动覆岩岩性组合影响

含煤沉积地层通常是由一套成因上有共生关系的陆源碎屑岩沉积层组成,多为砂岩、粉砂岩、页岩和黏土岩性,具有显著的互层状组合特征。如淮南煤田二叠纪含煤岩系中砂岩、粉砂岩和泥岩各占34%,9%和50%。神东煤田侏罗纪含煤岩系中,砂岩、粉砂岩和泥岩各占34%,9%和50%。

如设煤田区域应力场确定的区域等效容重和深部临界深度分别为 γ_m 和 H_m ,此时垂直应力为

$\sigma_v(H_m)$ 。当开采区域原岩为水平层状均匀时, γ_i 和 $\Delta H_i (i=1, \dots, n)$ 为各岩层的容重和厚度, σ_v^s 和 H_s 分别为达到深部应力状态的垂直应力和实际深部临界深度。此时, H_s 处原岩垂直应力可表达为

$$\sigma_v^s = \sum_{i=1}^n \gamma_i \Delta H_i \quad (5)$$

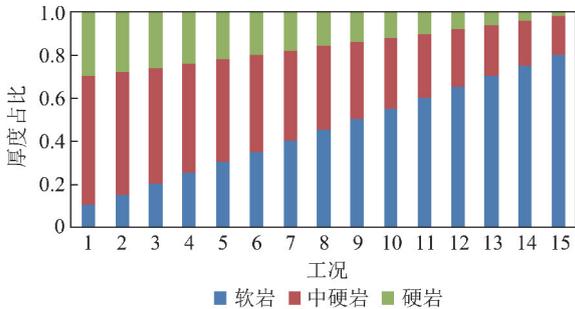
如按岩石工程性质将开采区域岩层简化为软岩、中硬岩和硬岩3层组合, 设开采区域最大水平应力 σ_H 和最小水平应力 σ_h 与区域场相同, 当 $\sigma_v(H_m) = \sigma_v^s$ 时, 应用式(5)时 H_s 与 H_m 有如下关系:

$$\frac{H_s}{H_m} = \gamma_m \left(\sum_{i=1}^3 \gamma_i \alpha_i \right)^{-1} \quad (6)$$

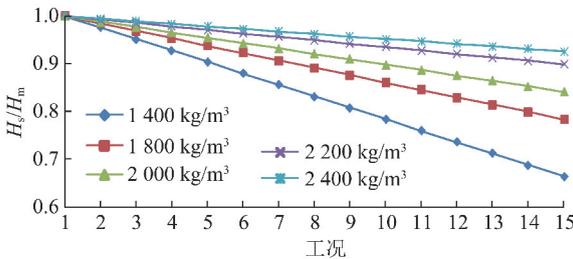
式中, α_i 为第 i 层岩层厚度占 H_s 以上岩层总厚度的比例。

式(6)表明, 实际临界深度 H_s 与 H_m 相比, 受开采区域岩性组合与其物性参数控制。

模拟分析选择典型岩层物性参数^[22], 构建了 H_s 深度以上软岩层、中硬岩层和硬岩层的厚度占原岩厚度比例不同的15种厚度占比变化情景(图4(a))。其中, 软岩厚度占比变化为0.1~0.8, 中硬岩厚度占比0.60~0.18, 硬岩厚度相应占比0.30~0.12; 软岩密度1400~2400 kg/m³, 中硬岩密度2400~2600 kg/m³, 硬岩2800 kg/m³。



(a) 不同类型岩组厚度占采动覆岩厚度比例



(b) 不同岩层密度时 H_s/H_m 变化

图4 不同岩层组合时实际深部临界深度变化

Fig. 4 Actual deep depth with different rock formations

结果表明: 随软岩层密度逐步降低, H_s 趋浅, 且随软岩层厚度占比增加, H_s 趋浅效应显著(图4(b))。如软岩、中硬岩和硬岩的占比关系为0.20 : 0.54 : 0.26时, 随软岩层密度降低, H_s 与 H_m

相比浅2%~5%; 占比为0.40 : 0.42 : 0.18时, 相比浅7%~15%; 而占比为0.65 : 0.27 : 0.08时, 相比浅6%~26%。若以软岩层为主时, H_s 仅为 H_m 的66%, 意味着软岩层对 H_s 影响较大。如以我国煤矿矿区应力场确定的 $H_m = 850$ m 计算, 则实际深部力学状态的深度 $H_s \approx 560$ m, 与文献[22]研究结果相近。

3.2 地下含水层影响

当煤岩体中具有含水层时, 地下水渗流和软化作用(或水化作用)减小了原岩内部黏聚力和摩擦力及原岩抗压强度, 降低了原岩硬度。如煤系地层中常见的砂岩孔隙度5%~25%, 页岩孔隙度10%~30%, 极易发生软化作用。若用软化系数代表岩层损伤程度, 则中硬岩类比硬岩类受损程度更强(表1)。

表1 常见沉积岩类软化系数

Table 1 Softening coefficient of common sedimentary rocks

岩类	饱和极限抗压强度/ 10^5 Pa	软化系数
坚硬岩石	砂砾岩	0.65~0.97
	石英砂岩	0.50~0.97
	石灰岩	0.70~0.90
中硬岩	黏土岩	0.40~0.66
	砂质、碳质页岩	0.24~0.55
	泥岩	0.10~0.50
	泥质钙质砂岩	0.21~0.75
	泥质灰岩	0.44~0.54

考虑到岩石在水化作用影响下受力时容重变化特点^[24], 若设原岩容重与含水岩层容重呈线性关系, ρ_s 为孔隙度; γ_w 为充填物干容重; τ 为容重影响因子, 则含水岩层实际容重 γ_s 可简化为

$$\gamma_s \approx \frac{\gamma_m + \gamma_w \rho_s}{\tau_m} \quad (7)$$

当岩石无水($\gamma_w = 0$)及软化作用时($\tau_m = 1$), $\gamma_s = \gamma_m$; 当岩层含水且受垂直应力作用和水化作用时($\tau_0 < 1, \gamma_w \neq 0$), γ_s 相对增加。

如将采动覆岩原岩层简化为第四系、含水岩层和非含水岩层组合模型(图5(a)), γ_i 和 $\rho_i (i=1, 2, 3)$ 分别为其干容重和孔隙度, 代入(6)则有

$$\frac{H_s}{H_m} = \gamma_m \left(\sum_{i=1}^3 \frac{\gamma_i + \rho_i \gamma_w}{\tau_i} \alpha_i \right)^{-1} \quad (8)$$

式中, H_m 代表深部临界开采深度; γ_m 为区域均匀介质的等效容重; τ_i 为第 i 层容重影响因子。

模拟选择第四系、含水岩层和非含水岩层组合的5种工况(图5(a))及其含水率变化情景(表2), 浅部和中部含水层含水率变化对 H_s 的影响分析表明:

含水层厚度越大和含水性越强, H_s 趋浅效应越显著(图5)。当浅层含水性较弱时($\gamma_w = 10\%$), 当相对厚度由1%增加到21%时, H_s 与 H_m 相比减少5%左右。当含水性较强时($\gamma_w = 20\%$), 随厚度增加, H_s 与 H_m 相比减少10%~12%; 而中部含水性较强时($\gamma_w = 20\%$), 相对厚度由17%增加到50%时, H_s 与 H_m 相比减少12%~23%; 当中部属强含水层时($\gamma_w = 30\%$), 随厚度增加, H_s 与 H_m 相比减少可达到20%~39%。

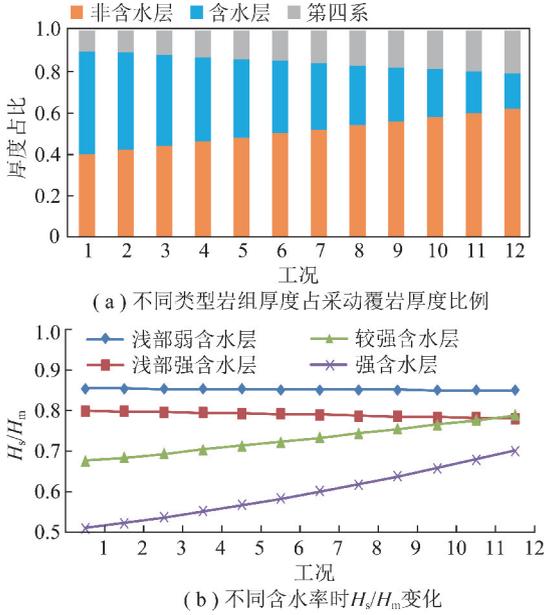


图5 含水层对深部实际临界深度的影响

Fig. 5 Real deep depth variation by influence of aquifer

表2 地下水影响计算模型参量取值

Table 2 Parameters of calculation model for groundwater impact

参数	G1	G2	G3	G4	G5	
第四系松散层	0.1	0.3	0.1	0.1	0	
含水率	含水层	0	0.2	0.3	0	
	非含水层	0	0	0	0	
弱化系数	第四系松散层	0.85	0.70	0.90	0.90	1.0
	含水层	0.95	0.90	0.70	0.50	1.0
非含水层	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

注: 第四系松散层密度为 $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$, 含水层密度为 $2\ 400\ \text{kg}/\text{m}^3$, 非含水层密度为 $2\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

3.3 开采工艺参数影响

以目前开采主流工艺——长壁式综采工艺为例研究开采时对实际深部临界深度的影响。当回采工作面持续推进时, 采动覆岩内部应变能不断积聚、储存、耗散与破坏释放, 在采动能量驱动下原岩经历着失稳—平衡—再失稳—再平衡的持续变化过程, 应力场响应呈现叠合式“应力拱”结构, 传递着上覆岩体

荷载和压力。若将采动覆岩分为拱内体(V_i)和拱外体(V_0)两个区域, 则采动中上覆岩体的持续卸载相当于 V_0 对 V_i 施加一个持续作用的外部力, 且在应力拱界面达到 V_0 外力与 V_i 体应力的平衡。拱内岩体积聚的应变能持续耗散导致原岩不同程度损伤后形成垮落断裂带。此时, 在工作面前、后方和侧翼未采煤层边缘的拱基区外为采场周围区域应力; 在上覆岩层弯曲带和采场周围未采煤岩体内的应力拱壳形态与采场参数有关。应力拱壳面沿工作面倾向对称, 随工作面推进, 复合应力拱区域增大, 拱顶基本控制了垮落断裂带范围。

为研究便利, 设“应力拱”采动模型中煤岩层为水平赋存状态, 区域水平应力场与岩层一致, 且与回采工作面水平围压相同, 采动区在区域应力场可视为一个动态点。应力分区中拱内 V_i 为异常应力区, 拱外 V_0 为正常应力区, 且以工作面开切眼处为参考点(图6)。

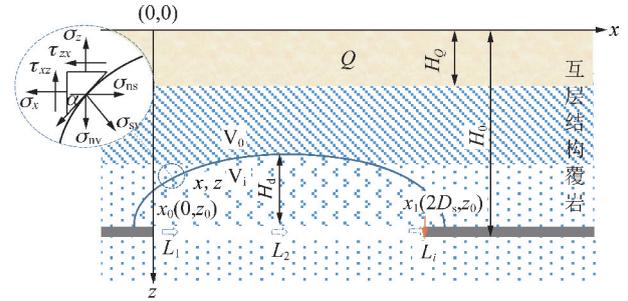


图6 基于应力拱的采动应力场模型

Fig. 6 Mining stress field model based on stress arch

此时, 拱界面(x, z)处单位体积垂直应力 σ_{nv} 与水平应力 σ_{ns} 有如下关系:

$$\begin{cases} \sigma_{ns}(x, z) = \sigma_{ns}^s(x, z) + \sigma_x \\ \sigma_{nv}(x, z) = \sigma_{nv}^s(x, z) + \sigma_z \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ns}^s(x, z) = \sigma_x \sin \alpha + \tau_{xz} \cos \alpha \\ \sigma_{nv}^s(x, z) = \sigma_z \cos \alpha + \tau_{xz} \sin \alpha \end{cases} \quad (10)$$

$$\sigma_n(x, z)^s = \sigma_{ns} \sin \alpha + \sigma_{nv} \cos \alpha = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xz} \sin 2\alpha$$

$$\tau_q(x, z)^s = \sigma_{nv} \sin \alpha - \sigma_{ns} \cos \alpha = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xz} \cos 2\alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{-H_d^2(x - L_{1/2})}{(L_{1/2} + D)^2(z - H_s)}$$

$$z = H_d \sqrt{1 - \frac{(x - L_{1/2})^2}{(L_{1/2} + D)^2}}$$

式中, α 为(x, z)处切角; z 为高度; H_0 为采深; D 为拱

脚至开切眼距离; σ_{ns}^g 为拱体内侧采动作用产生的水平应力异常分量; σ_{nv}^g 为拱体内侧采动作用产生的垂直应力异常分量; τ_q 拱体外侧切应力; $L_{1/2}$ 为半推进距离, L 为工作面推进距离; z 为拱界面任一点的深度; τ_{xz} 为 $x-z$ 平面上拱外界面采动产生的切应力分量; 拱壳长轴为工作面推进距离 $L+2D$, 短轴为导水断裂带高度 H_d 。

考虑到 V_i 内岩体已处于破坏损伤状态, 其内部黏聚力接近于 0, 在 (x, z) 处切应力 τ_q^g 与法向应力 σ_n^g 间关系可近似表达为

$$\tau_q^g = f\sigma_n^g(x, z) \quad (f = \tan \theta)$$

其中, f 为岩石摩擦因数; θ 为摩擦角。解得

$$\tau_{xz} = \frac{(\sigma_z - \sigma_x)(\sin 2\alpha - f\cos 2\alpha) - f(\sigma_z + \sigma_x)}{2f\sin 2\alpha + \cos 2\alpha} \quad (11)$$

进一步解得:

$$K_{av}^s(x, z) = \frac{\sigma_{ns}(x, z)}{\sigma_{nv}(x, z)} = \frac{\sigma_{ns}(x, z)^g + \sigma_x}{\sigma_{nv}(x, z)^g + \sigma_z} = \frac{K_{av}^R(x, z)[1 + Q(x, z)]}{1 + Q(x, z)} \quad (12)$$

$$Q(x, z) = \frac{[1 - F(f, \alpha)](\sin \alpha - \cos \alpha)}{1 + \cos \alpha + F(f, \alpha)\sin \alpha}$$

$$F(f, \alpha) = \frac{(1 - K_{av}^R)(\sin 2\alpha - f\cos 2\alpha) - f(1 + K_{av}^R)}{2f\sin 2\alpha + \cos 2\alpha}$$

式(12)表明, 开采时实际应力状态可视为原岩与采动拱异常的应力状态之和。若设 Q 为采动影响系数, 则 $Q>0$ 时意味着水平方向应力相对变化大于垂直方向应力, H_s 比开采深度 H_0 小, 即视临界深度趋浅; 当 $Q<0$ 时, 垂直方向应力相对变化大, H_s 则相对增加, 即视临界深度趋深。

为获得采动力学异常状态, 依据岩石采动爆裂效应^[25]和传播特点^[26], 设采动应力传播延垂直方向且呈指数衰减趋势, λ 为与岩石性质有关的衰减系数; C_1 和 C_2 分别为 H_0 以上和以下区域; z_1 和 z_2 代表上拱和下拱边界。则 K_{av}^s 可简化为

$$\begin{cases} K_{av}^{C_1}(x, z) = Ae^{-\lambda(H_0-z)} + K_{av}^R(x, z) + B_1 & (z \leq H_0) \\ K_{av}^{C_2}(x, z) = -Ae^{-\lambda(z-H_0)} + K_{av}^R(x, z) + B_2 & (z \geq H_0) \end{cases}$$

边界条件为

$$\begin{cases} K_{av}^{C_1}(x, z_1) = K_{av}^s(x, z_1) \\ K_{av}^{C_2}(x, z_2) = K_{av}^R(x, z_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{av}^{C_1}(x, H_0) = K_{av}^{C_2}(x, H_0) & (z = H_0) \\ K_{av}^{C_2}(x, z) = K_{av}^R(x, z) & (z \geq z_2) \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} K_{av}^{C_1}(x, z) = A[e^{-\lambda(H_0-z)} + e^{-\lambda(z-H_0)} - 2] + K_{av}^R(x, z) \\ K_{av}^{C_2}(x, z) = A[e^{-\lambda(z-H_0)} - e^{-\lambda(z-H_0)}] + K_{av}^R(x, z) \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{其中, } A = \frac{K_{av}^{C_1}(x, z_1) - K_{av}^R(x, z_1)}{[e^{-\lambda(z_2-H_0)} + e^{-\lambda(H_0-z_1)} - 2]}。$$

式中, A 为根据边界条件确定的待定系数; $K_{av}^{C_1}$ 为开采深度 H_0 以上空间的状态函数; $K_{av}^{C_2}$ 为开采深度 H_0 以下空间的状态函数; K_{av}^R 为区域应力场状态函数。

式(13)表明, K_{av}^s 的基本水平由区域应力场决定, 而采动区异常应力状态与采动岩石性质和开采工艺参数有关。参考区域垂直应力场变化统计规律^[16], H_s 有如下关系:

$$\frac{-\Delta K_{av}^z(x, z)}{\Delta z} = \frac{A}{H_s^2}$$

考虑到方向性解得采深 H_0 处的实际力学状态深度为

$$H_s = H_0 \pm \sqrt{\frac{A\Delta z}{|\Delta K_{av}^z(x, z)|}} \quad (14)$$

式(14)表明, 当开采深度为 H_0 (或 H_m) 时, 实际力学状态确定的视临界深度 H_s 与实际应力状态与区域平均应力状态的差异 ΔK_{av}^z 有关。 $\Delta K_{av}^z > 0$ 时意味着实际应力状态趋浅, 对应的异常深度取负值; 反之, 实际应力状态趋深, 对应的异常深度取正值。

模型计算依据式(13)和(14), 选择采动覆岩为均匀介质, 设计不同采深 ($H_0 = 500, 800$ 和 $1\ 200$ m) 与采高 ($H_c = 3, 5, 8, 10$ 和 15 m) 的组合工况, 导水裂隙带高度 $H_d = 15H_c$, 应力拱脚点为工作面开切眼外 $D = 3H_c$ 处。开采工作面宽度 = 300 m, 最大推进距离 $L = 400$ m。参考我国煤矿矿区的平均应力水平确定 ΔK_{av}^R , 分别计算深度 $H_0 - H_c$ 和 $H_0 + 5$ m 处力学状态参数 K_{av}^s , 分析沿开采工作面开采煤层顶部、近煤层底板处力学状态和对应视临界深度变化规律。

3.3.1 不同工况下采动顶板异常响应特点

开采煤层顶部 K_{av}^s 响应变化总体特征是: 在开切眼处至拱脚区, K_{av}^s 变化呈急剧下降—急剧上升—回复区域 K_{av}^R 值, 表明采动时开切眼后端切向应力较大导致覆岩垂直裂隙发育, 工作面推进前端也具有相同“端部效应”; 从开切眼处向开采工作面中心区域, K_{av}^s 缓慢增加, 显示顶部覆岩以构造应力作用为主, 中心区最显著。随采高 H_c 增加, K_{av}^s 异常响应区也向上部和端部外拓; 近煤层底板 K_{av}^s 沿工作面变化与顶板变化趋势相似(图7)。 K_{av}^s 比较表明, 随着采深增加, 实际力学状态总体相对变深。相同采高(3, 8 和 15 m) 时, 采深 800 m 与采深 500 m 的 K_{av}^s 比较, 在开切眼处比值分别为 0.931, 0.926, 0.909, 在工作面中心位置分别为 0.938, 0.933 和 0.918; 不同深度时在开切眼外端均出现局部趋深状态, 不同采高时(3, 8 和

15 m) 分别出现在-20, -40 和-100 m 处, 此时相同采高的 K_{av}^* 之比分别为 0.926 (3 m), 1.004 (8 m) 和 1.036 (15 m), 说明采高增加时局部趋深状态又相对变弱。

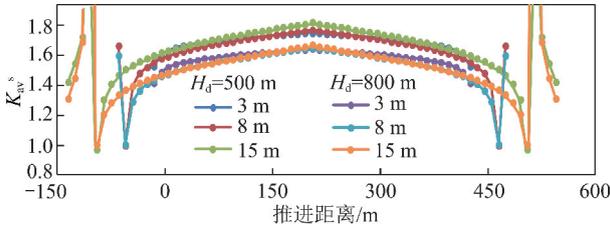


图7 不同开采深度时煤层顶部 K_{av}^* 响应比较

Fig. 7 Response comparison of roof K_{av}^* state at different mining depth

相同采深下不同采高的 H_s 值比较表明, 随采高增加, 实际临界深度 H_s 总体趋浅, 但在开切眼外局部显现深部状态 (图 8)。如采深 $H_0=500$ m 和 $H_c=5$ m 时 H_s 与 $H_c=8, 10, 15$ m 时比较, 开切眼处的 H_s 之比为 1 : 0.979 : 0.969 : 0.949, 工作面中心处 H_s 之比为 1 : 0.984 : 0.976 : 0.960; 而在开切眼外端不同采高时均出现局部力学状态加深现象, 各采高 (5, 8, 10 和 15 m) 的 H_s 与采深之比分别为 1.17, 1.12, 1.22 和 1.14, 出现位置分别为 -40, -60, -70 和 -110 m 处。

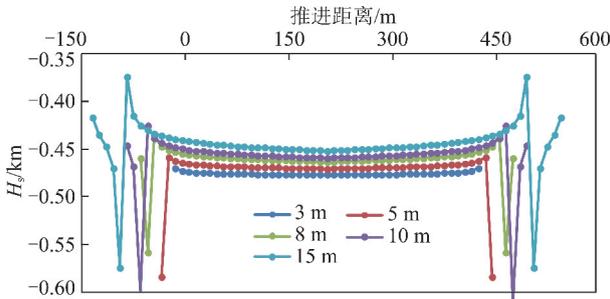
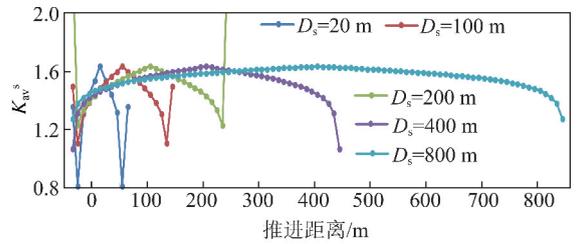


图8 不同采高时 H_s 响应 ($H_0=500$ m)

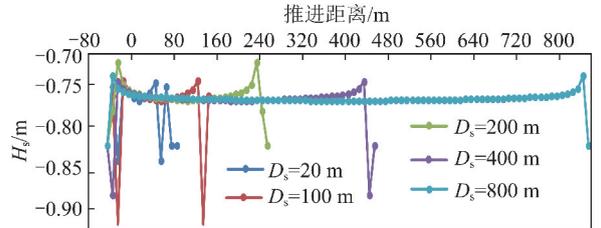
Fig. 8 Visual depth response at different mining heights

3.3.2 工作面推进时煤层顶部 K_{av}^* 变化特点

在相同采深和采高条件下, K_{av}^* 变化表明, 推进距离越小, 其“拱”特征和端部效应越显著, 随着推进距离增加, “拱”趋于平缓且工作面端部效应逐步减弱。当推进距离远大于工作面宽度时, 切眼后端和开采前端拱脚区的 K_{av}^* 变化趋缓 (图 9(a)), 采动端部效应降低; 与 K_{av}^* 变化相对应, 在开采工作面两端附近外延区, 由于局部垂直应力相对增大, 采动应力状态趋深, 视深度 H_s 显著增加。随着推进距离增加, 工作面中间区域采动力学状态趋浅, 表明此区域采动覆岩水平方向构造活动增强, 视深度也降低且趋于平稳 (图 9(b))。



(a) K_{av}^* 响应比较 ($H_0=0.5$ km, $H_c=5$ m)



(b) H_s 响应比较 ($H_0=0.8$ km, $H_c=8$ m)

图9 不同推进距离时 K_{av}^* 和 H_s 响应比较

Fig. 9 K_{av}^* and H_s responses at different propulsion distances

分析表明, 煤层开采使工作面开切眼后端和推进方向前端外一定范围煤岩形成局部临界深度趋深状态, 而在工作面上部采动覆岩区则增强了水平构造应力作用, 形成临界深度趋浅效果。

4 深部开采界定实例

上述分析表明, 采动覆岩岩性及岩层组合和地下含水层是影响原岩深部力学状态的主要因素, 煤层开采则对采动区域局部力学状态具有调整作用。为分析简便, 设 H_s 与表征覆岩岩性特征、含水性、开采工艺相关的影响参数 A_s, B_s 和 C_s 均呈线性相关, D_s 为修正因子, 则

$$H_s = \frac{A_s B_s}{D_s} C_s H_m \quad (15)$$

其中, A_s 和 B_s 可由式(6)和(8)分别确定; C_s 为与开采工艺和空间位置相关, 如式(14)分析结果所述; D_s 为因相关参数取值精度和数量局限时经验补偿系数, 可结合现场采动应力现象确定。当 $D_s = C_s = 1$ 时, 代表了局部开采地质条件对深部临界深度的影响, 此时 H_s 为原岩状态时实际深部临界深度, H_m 为煤矿矿区参考深部临界深度。

实例验证选择了几个典型矿区数据 (表 3), 均采用走向长壁后退式综采一次采全高采煤工艺和顶板全部垮落法管理方式。深部临界深度计算中, 区域深部临界深度基于我国煤矿矿区应力场研究确定为 $H_m \approx 850$ m。依据矿区综合地质剖面, 按岩性硬度将采动覆岩划分为软、中、硬 3 类, 同时考虑含水层厚度及含水性, 合成有含水层的 3 层层状组合体。岩层含水性参数参考矿区岩层物性和含水

性测定结果分层处理确定。案例研究中相关含水层的含水性参数参考我国煤田勘探典型区获得的

不同岩性的饱和容重统计结果和岩石含水时的软化系数,取 $D_s = C_s = 1$ 。

表 3 实例分析基础数据

Table 3 Basic data for on-site example analysis

矿区名称	岩性组合、含水层条件描述
王楼矿(东部)	主采煤层为二叠系山西组 3 上煤,煤层厚度平均 3 m,开采深度为 1 183.12 m。覆岩中,软岩主要包括黏土、细砂与泥岩总厚度 502.96 m,占岩层总厚度 42.51%,含水层厚度占比 28.1%;中硬岩主要包括砂质泥岩、中砂岩、粉砂岩,总厚度 383.61 m,占岩层总厚度 32.42%,含水层厚度占比 37.2%;硬岩主要包括细砂岩、辉长岩、砂砾岩,总厚度 296.55 m,占岩层总厚度 25.07%,含水层厚度占比 71.4%
东大矿(山西沁水煤田)	主采煤层二叠系太原组 12 下煤,煤层厚度平均 1.8 m,开采深度为 600 m。煤层覆岩中,软岩主要包括黏土、泥岩,总厚度 109.5 m,占岩层总厚度 18.25%,含水层厚度占比 14.2%;中硬岩主要包括中粒砂岩、粉砂岩,总厚度 372.9 m,占岩层总厚度 62.15%,含水层厚度占比 29.9%;硬岩主要包括细粒砂岩、砾岩,总厚度 118.23 m,占岩层总厚度 19.6%,含水层厚度占比 78.6%。含水层包括:上侏罗统砂砾岩含水层、太原组三灰富含水层、五灰、七灰含水层,其中五灰、七灰为弱含水层
阳煤二矿(山西沁水煤田)	主采煤层为二叠系太原组 15 煤,平均煤厚 4.4 m,开采深度为 595 m。设计工作面走向长 1 309 m,倾向长度 163 m。煤层覆岩中,软岩主要包括泥岩、砂质泥岩、煤与表土,软岩总厚度 518.02 m,占岩层总厚度 87.06%,含水层厚度占比 32.9%;中硬岩主要包括中砂岩,总厚度 46.08 m,占岩层总厚度 7.74%,含水层厚度占比 66.8%;硬岩主要包括细砂岩、砾岩,总厚度 30.9 m,占岩层总厚度 5.2%,含水层厚度占比 68.2%
麦垛山煤矿(宁东矿区)	主采煤层为侏罗纪延安组 2 煤,开采深度为 587.4 m,煤厚 4.3 m,煤层倾角为 10°。煤层覆岩中,软岩主要包括表土、黏土、泥岩、煤,软岩总厚度 128.78 m,占岩层总厚度 21.92%,含水层总厚度 0 m,占软岩层百分比 0;中硬岩主要包括粗粒砂岩、中粒砂岩、粉砂岩,总厚度 321.71 m,占岩层总厚度 54.77%,含水层总厚度 183.02 m,占 56.89%;硬岩主要包括细粒砂岩,岩层厚度为 136.91 m,占岩层总厚度 23.31%,含水层总厚度 81.60 m,占 59.60%
母杜才矿(鄂尔多斯盆地)	主采侏罗纪延安组 3-1 煤,平均煤厚 5.02 m。设计工作面采高 4.8 m,开采深度为 654 m,走向长度 3 500 m,倾斜长度 240 m。煤层覆岩中,软岩主要包括风积砂、湖积物、泥岩、碳质泥岩,软岩总厚度 259 m,占岩层总厚度 39.60%,含水层总厚度 109.5 m,占 42.28%;中硬岩主要包括粗砂岩、中砂岩、粉砂岩,中硬岩总厚度 308.1 m,占岩层总厚度 47.11%,含水层总厚度 209.86 m,占 68.11%;硬岩主要包括细砂岩,硬岩总厚度 86.9 m,占岩层总厚度 13.29%,含水层总厚度 52.24 m,占 60.12%
红庆河煤矿(鄂尔多斯盆地)	主采侏罗纪延安组 3 ⁻¹ 煤,开采深度为 683.4 m,平均煤厚 6.91 m。31101 工作面倾向长度 264 m;顶板覆岩中,软岩主要包括覆盖土、黏土、泥岩、砂质泥岩,总厚度 170.28 m,占岩层总厚度 24.92%,含水层总厚度 96.4 m,占软岩层 56.61%;中硬岩主要包括粗粒砂岩、中粒砂岩、粉砂岩、含粗粒砂岩、含粒中砂岩,总厚度 378.37 m,占岩层总厚度 55.37%,含水层总厚度 306.1 m,占中硬岩层厚 80.9%;硬岩主要包括细粒砂岩、砾岩,占岩层总厚度 19.71%,含水层总厚度 102.3 m,占中硬岩层 75.91%

实际深部临界深度计算与参考深部临界深度比较表明,中东部矿区接近该深度,西部偏小。其中,东部区域样例(王楼煤矿)实际深部临界深度大 8%,中部区域样例(东大煤矿和阳煤二矿)接近深部临界深度,而西部地下水较丰富的样例(麦垛山煤矿、母杜才煤矿和红庆河煤矿)实际临界深度与深部临界深度之比平均为 64%,深度在 550 m 左右(表 4)。

(1)采动覆岩比较表明,王楼煤矿硬岩占比最大(>25%),软岩层占比最小(<43%),东大矿、麦垛山煤矿和红庆河煤矿以中硬岩为主,阳煤二矿以软岩为主(占比 87%),东大矿、麦垛山煤矿、母杜才煤矿和红庆河煤矿均以中硬岩和软岩为主,母杜才煤矿占比最大,软岩层占比为 39.6%。

(2)含水层对比表明,王楼煤矿的含水层占比为 41.9%;中部典型矿井的东大煤矿和阳煤二矿的含水

表 4 典型矿区实际深部临界深度计算比较

Table 4 Comparisons of actual deep critical depth in typical mining areas

矿区名称	计算参数 (A_s, B_s)	视临界深度/m	H_s/H_m
王楼矿	$A_s = 1.115 8, B_s = 0.969 0$	918.3	1.08
东大矿	$A_s = 1.063 5, B_s = 0.960 3$	867.6	1.02
阳煤二矿	$A_s = 1.025 2, B_s = 0.956 4$	833.9	0.98
麦垛山煤矿	$A_s = 0.876 4, B_s = 0.765 2$	572.6	0.67
母杜才矿	$A_s = 0.877 8, B_s = 0.740 5$	555.8	0.65
红庆河煤矿	$A_s = 0.908 2, B_s = 0.672 3$	516.7	0.61

性分别为 36.58% 和 34.16%;西部地下水比较丰富的典型矿井麦垛山煤矿、母杜才煤矿和红庆河煤矿含水层占比分别为 45.05%,55.02% 和 73.86%。根据前述分析结论,含水层厚度越大和含水性越强,水化

作用致使 H_s 趋浅效应越显著,因而在上述典型煤矿中,西部矿区的深部临界深度与我国煤矿矿区的参考深部临界深度相比趋浅趋势更明显。

依据采动覆岩和含水层影响分析,结合研究案例,在西部典型矿区(鄂尔多斯盆地北部、宁东矿区等)考虑到软岩层与地下水的共同作用,选择软岩层厚度占比约为40%(A_s 为0.83~0.89),含水层厚度约占35%且有较强含水性(B_s 为0.82~0.68)。如取平均值 $A_s=0.86$ 和 $H_m=850$ m,则达到深部开采力学状态的实际临界深度 H_s 为500~600 m,与实际案例分析结果相近。

5 结 论

(1)科学界定深部是深部开采理论发展与技术实践的重要问题。研究综合考虑我国煤矿矿区深部岩石、地下水环境和现代开采方式,将区域应力场与采动应力场分析相结合,建立煤炭开采系统,其中原岩力学状态是系统的基本状态,高应力环境和非线性力学响应特征是深部力学状态的显著特征,也是深部开采伴生灾害的主要诱因。深部开采可定义为在高地应力环境和具有非线性力学响应的煤岩体空间实施的采矿活动。

(2)基于我国地壳浅部和煤矿矿区准静水压力环境建立了深部煤炭开采的界定准则和方法,依据我国煤矿矿区深部状态变化趋势,选择平均地应力场侧压系数 K_{av} (即:水平最大主应力和最小主应力的平均值与垂直应力之比)作为具体测定指标,结合我国中东部深部开采实践,提出我国煤矿矿区参考深部开采临界深度为850~900 m。

(3)采动覆岩岩性与岩层组合、含水性及开采方式是控制实际深部开采临界深度的主要因素。基于不同矿区原岩差异性(岩性及组合、含水性等)建立的实际深部开采临界深度 H_s 与 H_m 比较模型分析表明,采动覆岩越软和含水性越强,实际深部开采临界深度(或视深部临界深度)“趋浅”越显著,实际减少可达30%~50%。

(4)利用开采“应力拱”现象建立了现代开采条件下 K_{av}^* 和 H_s 分析模型,模拟显示在开采工作面开切眼及推进前端外侧实际力学状态都呈趋深→趋浅→正常的端部跃变特征,采高越大则端部效应越显著;工作面中部实际力学状态呈趋浅特征;随推进距离增加,端部效应越来越弱,当推进距离超过开采工作面宽度后逐步趋缓和趋弱。

(5)我国东、中、西典型矿区实际深部开采临界深度比较研究表明:与我国煤矿矿区获得的参考深部

开采临界深度相比,东部矿区偏深,中部矿区深度相近,西部(陕、蒙等)地下水丰富的矿区偏浅,在500~600 m即可达到实际深部开采临界深度,采深400~500 m时大采高工作面两端外侧局部也显现深部力学状态。

参考文献(References):

- [1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Development in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advanced Mechanics, 2005, 35(1):91-99.
- [2] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1):1-6.
- [3] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):39-46.
- [4] 何满潮.深部开采工程岩石力学现状及其展望[A].第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C].北京:科学出版社,2004:88-94.
HE Manchao. Present Status and prospect of rock mechanics in deep mining engineering[A]. Proceedings of the 8th National Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering [C]. Beijing: Science Press, 2004:88-94.
- [5] 何满潮.深部软岩工程的研究进展与挑战[J].煤炭学报,2014,39(8):1409-1417.
HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1409-1417.
- [6] 周宏伟,谢和平,左建平,等.赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究[J].科学通报,2010,55(34):3276-3284.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping, et al. Experimental study on the influence of depth on rock mechanical parameters[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(34):3276-3284.
- [7] 李鹏波,王金安.煤层上覆岩层力学性质随赋存深度变化试验[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):98-101.
LI Pengbo, WANG Jinan. Experimental study on mechanical properties of overlying strata in coal seam with variation of occurrence depth [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12):98-101.
- [8] 蔡美峰,冀东,郭奇峰.基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):1973-1980.
CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Me-

- chanics and Engineering, 2013, 32(10):1973-1980.
- [9] 黎立云, 谢和平, 鞠杨, 等. 岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3):35-40.
LI Liyun, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental study on the release of strain energy and dissipated energy from rocks[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):35-40.
- [10] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6):1278-1284.
QIAN Qihu, LI Shuchen. Summary of research on rupture phenomenon of surrounding rock division in deep rock mass engineering[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6):1278-1284.
- [11] 王明洋, 宋华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9):1771-1771.
WANG Mingyang, SONG Hua, ZHEN Daliang, et al. Discussion on the divisional rupture mechanism and the definition of “deep” in surrounding rock of deep roadway[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9):1771-1771.
- [12] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3):309-313.
XIE Guangxiang. Fully mechanized caving face and its macroscopic stress shell mechanical characteristics of surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3):309-313.
- [13] 杜锋, 白海波. 厚松散层薄基岩综放开采覆岩破断机理研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7):1105-1110.
DU Feng, BAI Haibo. Mechanism research of overlying strata activity with fully mechanized caving in thin bedrock with thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7):1105-1110.
- [14] 耿养谋. 矿山开采覆岩应力拱演化规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(4):43-48.
GENG Yangmou. Study on evolution law of stress arch of overlying strata in mines[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(4):43-48.
- [15] 王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9):3016-3027.
WANG Yanhua, CUI Xiaofeng, HU Xingping, et al. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements[J]. Chinese Geophysics, 2012, 55(9):3016-3027.
- [16] 李鹏, 苗胜军. 中国煤矿矿区地应力场特征与断层活动性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2):319-329.
LI Peng, MIAO Shengjun. Analysis of the characteristics of in situ stress field and fault activity in the coal mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2):319-329.
- [17] 康红普. 深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):12-17.
KANG Hongpu. Stress distribution characteristics of deep coal mine and surrounding rock control technology of roadway[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9):12-17.
- [18] 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.
- [19] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16):2854-2858.
HE Manchao. Deep conceptual system and engineering evaluation indicators[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2854-2858.
- [20] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2):1-16.
XIE Heping. Research conception and expected results of “Deep rock mass mechanics and mining theory”[J]. Engineering Science and Technology, 2017, 49(2):1-16.
- [21] 胡社荣, 彭纪超, 黄灿, 等. 千米以上深矿井开采研究现状与进展[J]. 中国矿业, 2011, 20(7):105-110.
HU Sherong, PENG Jichao, HUANG Can, et al. Research status and progress of deep mine exploitation over 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 20(7):105-110.
- [22] 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 analysis of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):1-10.
- [23] GAY N C. In situ stress measurements in Southern Africa[J]. Tectonophysics, 1975, 29:447-459.
- [24] 康红普. 水对岩石的损伤[J]. 水文地质工程地质, 1994(3):39-41.
KANG Hongpu. Water damage to rocks[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 1994(3):39-41.
- [25] 张建民, 李全生, 南清安, 等. 基于采爆导水裂隙带确定方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3):39-41.
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, NAN Qingan, et al. Method for determining fracture zone based on detonation[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):39-41.
- [26] 崔新社, 李卫民, 段祝平, 等. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1):76-80.
CUI Xinzhuang, LI Weimin, DUAN Zhuping, et al. Study on the attenuation law of explosive stress wave in isotropic rock[J]. Explosion and Shock, 2001, 21(1):76-80.