

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0441

深井孤岛工作面巷道围岩采动应力分区演化特征

程利兴^{1,2,3}, 姜鹏飞^{2,3,4}, 杨建威^{1,2,3}, 朱阳涛⁵,
郑仰发^{2,3}, 张 镇^{2,3,4}, 李冰冰⁵

(1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 天地科技股份有限公司开采设计事业部, 北京 100013; 3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;
5. 中煤新集阜阳矿业有限公司, 安徽 阜阳 236153)

摘 要: 针对深井孤岛工作面煤巷大变形问题, 采用现场实测手段研究了回采过程中巷道和采空区应力动态演化规律以及巷道围岩变形破坏演化特征。研究表明: 深井孤岛工作面巷道围岩应力演化与变形破坏具有显著的阶段性特征, 工作面前方大于 250 m 范围, 巷道围岩未受采动影响, 围岩应力变化较小且变形主要集中在底板与煤柱肩窝; 工作面前方 100~250 m 支护结构受力增大, 巷道浅部围岩破碎, 顶底板移近及煤柱内挤变形突出, 巷道出现明显的非对称变形破坏; 工作面前方 100 m 为强烈采动影响阶段, 尤其是在工作面前方 20~22 m 围岩垂直应力与空间主应力变化比较剧烈, 顶底板移近与两帮内挤变形更加突出, 巷道围岩表现出明显的大变形破坏特征。根据采空区应力分区特征分析了顶板覆岩结构的动态演化过程。结合应力与变形破坏演化特征, 提出了巷道支护对策, 以期对深井巷道围岩控制提供一定指导。

关 键 词: 千米深井; 覆岩结构; 大变形; 应力演化; 孤岛工作面

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)12-4078-09

Evolution characteristics of mining-induced stress partition of roadway surrounding rock on working face of deep island

CHENG Li-xing^{1,2,3}, JIANG Peng-fei^{2,3,4}, YANG Jian-wei^{1,2,3}, ZHU Yang-tao⁵,
ZHENG Yang-fa^{2,3}, ZHANG Zhen^{2,3,4}, LI Bing-bing⁵

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining Research Institute Co., Ltd of CCTEG, Beijing 100013, China; 4. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. Fuyang Mining Company Limited, China Coal Xinji Energy, Fuyang, Anhui 236153, China)

Abstract: Aiming at large deformation of roadway on working face of deep island mining, the dynamic evolution law of the stress in roadway surrounding rock and goaf are studied by means of field measurement, and the evolution characteristics of deformation and failure of surrounding rock are analyzed. The results show that the stress evolution and deformation failure of surrounding rock on working face of deep island mining have obvious stage characteristics, when the distance from the working face is more than 250 m, the surrounding rock of the roadway is not affected by mining, so the stress of surrounding rock changes little, and the deformation is mainly concentrated in floor and coal pillar. The stress of the supporting structure is increased obviously in the range of 100~250 m in front of the working face, the shallow surrounding rock of the roadway is broken, and the coal pillar is squeezed and deformed, which causes the roadway to appear the obvious asymmetric deformation and failure. In the range of 100 m in front of the working face, the stage of strong mining influence occurs, especially in the range of 20~22 m in front of the working face, the vertical stress and space principal stress of the surrounding rock change more significantly, the roof and floor moving closer and the both sides of roadway deformation more prominent, which make the surrounding rock of the roadway shows obvious large deformation and failure characteristics. According to the characteristics of stress zoning in goaf, the dynamic evolution process of the covering rock structure is analyzed. Combined with the evolution characteristics of stress and deformation, the reform suggestions of roadway support are proposed to provide some guidance for the control technology of roadway surrounding rock in deep mine.

Keywords: coal mines with depth more than 1 000 m; overlying strata spatial structure; large deformation; stress evolution; island working face

收稿日期: 2020-04-16

修回日期: 2020-06-14

基金项目: 国家重点研发计划(No.2017YFC0603003); 国家自然科学基金青年基金项目(No.51704160); 国家自然科学基金面上项目(No.51774186)。This work was supported by the National Key R&D Program of China(2017YFC0603003), the Young Scholars of National Natural Science Foundation of China(51704160) and the General Program of National Natural Science Foundation of China(51774186)。

第一作者简介: 程利兴, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事煤矿巷道围岩压力及其岩层控制方面的研究。E-mail: chenglixinghpu@163.com

1 引言

深部矿井巷道地应力大、采动影响强烈、围岩大变形以及持续变形时间长等现象比较突出，对深井安全、高产、高效开采带来了巨大的威胁^[1-3]。随开采深度不断加大，巷道围岩所处环境愈加复杂，巷道围岩表现出的强扩容性、持续性大变形等特征将更加突出^[4-7]。深部巷道围岩受采动影响强烈，导致巷道围岩所受的应力越来越大，加速了巷道围岩的大变形失稳。深部巷道围岩是一种复杂力学环境中的非连续地质结构体，高应力、强采动以及持续性大变形导致深部矿井与浅部矿井更具复杂性^[8-9]。由于深部巷道围岩具有较强的流变特性，围岩变形的发展模式和破坏形态是一个动态演化过程，其在时间与空间维度上具有显著的变化特征^[10-11]。按照研究方法不同，国内外学者在理论研究、模拟试验研究以及现场实测等方面对巷道围岩应力演化规律展开了大量研究。何团^[10]、黄庆享^[12]、孟庆彬^[13-14]等通过数值模拟研究了工作面煤体支承压力、塑性区等演化特征，分析了巷道应力分布的主控因素。康红普^[15]研究了采场周围支承压力变化规律，分析了回采工作面超前支承压力分布范围、峰值大小及与工作面的空间位置关系。周钢等^[16]采用应力解除法进行了采动应力监测，深入分析了采动应力演化规律以及最大主应力与支撑压力峰值的空间位置关系。谢广祥^[17]、李杨^[18]、张明^[19]、彭瑞^[20]等研究了底板三维应力以及支护承载结构应力时空演化规律，指出深井巷道围岩变形区域的时空对应关系是造成巷道分段破坏和重复破坏的主要原因。刘金海等^[21]提出长壁采场存在动态和静态两个支承压力，并指出动态支承压力的形成和演化是采场顶板破裂带岩层运动的结果。林健等^[22]通过物理试验研究了不同应力条件下巷道围岩应力演化规律以及围岩拉压交替变化状态。现阶段对于巷道围岩应力的演化规律研究多采用物理试验和数值模拟研究，现场对采动应力变化规律的监测一般多采用常规手段，对采空区覆岩结构运动及顶板空间主应力演化研究较少，导致对深井工作面强采动条件下围岩应力演化规律研究不够全面和深入。

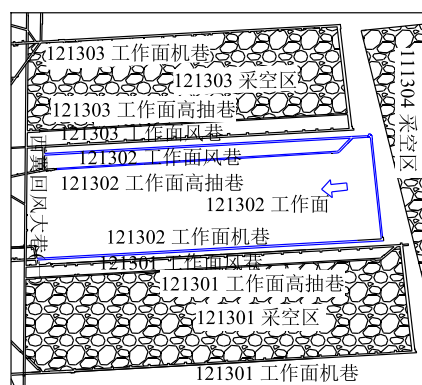
孤岛工作面强采动导致巷道大变形失稳现象频出，成为现阶段巷道支护技术的难题。本文以中煤新集口孜东矿千米深井孤岛工作面运输巷为研究对象，采用多种现场实测数据研究了强采动条件下围岩应力演化规律及大变形破坏演化特征，并提出了巷道支护对策，以期对巷道围岩控制技术提供理

论指导。

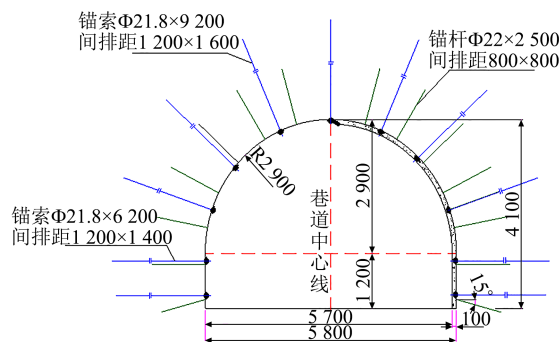
2 工程概况

口孜东矿位于安徽省阜阳市境内，设计生产能力 5.0 Mt/a，服务年限 60.2 a，采用立井开拓，主、副、风井三井筒埋深均超过 1 000 m，目前开采 -967 m 水平，现阶段主采煤层 13# 煤，煤层倾角为 6°~13°。如图 1(a)所示，121302 工作面为典型的三面采空区的孤岛工作面，121302 工作面运输巷为直墙半圆拱形巷道，采用锚网索联合支护，沿空侧煤帮及顶板采用喷浆封闭支护，见图 1(b)。巷道主要揭露的岩层为泥岩、砂质泥岩及细砂岩，泥岩遇水膨胀，巷道变形极快，围岩控制较为困难。

矿井最大垂直应力 σ_v 为 25.12 MPa，最大水平主应力 σ_H 为 21.84 MPa，最小水平主应力 σ_h 为 11.42 MPa，为典型的 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 型应力场，在工作面回采过程中超前采动应力影响较为强烈。由于巷道顶底板岩层以泥岩为主，在高应力作用下井下高温潮湿环境中的巷道围岩出现不同程度的时效变形，主要表现为向巷道断面内收缩变形，导致巷道出现不同程度的功能失效与结构大变形。



(a) 工作面布置



(b) 巷道支护 (单位: mm)

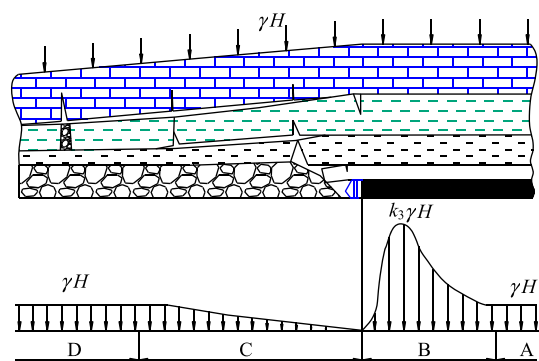
图 1 121302 工作面布置图

Fig.1 Mining face layout of 121302

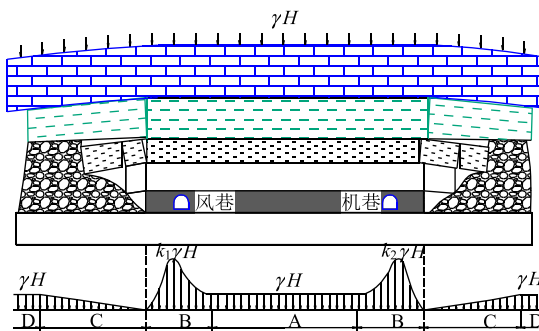
3 孤岛工作面顶板覆岩结构特征与矿压显现

深井孤岛工作面在工作面回采过程中, 后方采空区顶板垮落, 与两侧采空区垮落顶板连在一起形成一个类似 C 形的覆岩空间结构^[23-24], 该结构上覆岩层结构的大面积周期性破断是产生工作面两巷采动影响的主要动力源, 这也是造成孤岛工作面超前支承压力增大引起强矿压显现的主要原因。

如图 2 所示为工作面顶板上覆岩层结构及应力分布特征示意图。随工作面回采上覆岩层 C 型空间结构也在不断向前移动, 后方采空区范围进一步扩大。如图 2(a)所示, 工作面顶板上覆不规则垮落带岩层大部分呈悬空状态, 该部分顶板岩层产生的自重应力传递到工作面前方煤体以及两侧煤柱内, 此时采空区处于应力降低区, 如图 2(a)中 C 区域; 随工作面推进距离加大, 采空区破碎垮落带不断被压实, 上覆岩层自重应力不断转移到采空区内, 导致采空区后方垂直应力逐渐增大, 该部分区域内压力逐渐恢复到接近原岩应力, 如图 2(a)中 D 区域; 工



(a) 工作面前后方应力分布特征



(b) 工作面两巷应力分布特征

A-原岩应力区, B-应力增高区, C-应力降低区, D-应力稳定区

图 2 孤岛工作面应力分布特征

Fig.2 Stress distribution characteristics of island working face

作面后方及两巷顶板岩层在强采动影响下发生大范围破断, 两巷及煤体支承压力急剧增大, 属于应力增高区, 如图 2 中 B 区域; 两巷外侧靠近煤柱侧采空区顶板在采动影响下进一步垮落破断, 充填采空区, 在煤柱外侧一定区域内属于应力降低区, 向采空区深部延伸, 采空区应力逐渐增大, 直至达到上部岩体的自重应力 γH , 并趋于稳定 (γ 为上部岩体平均重度, H 为埋深), 如图 2(b)中 C 和 D 区域。

4 巷道围岩应力演化特征分析

4.1 测站布置

在 121302 工作面运输巷安装矿压动态综合监测分站, 如图 3(a)所示, 安装的监测仪器有锚杆(索)测力计、钻孔应力计、空心包体应变计以及采空区应力计等, 监测工作面回采过程中应力变化特征。其中回采侧钻孔应力计安装深度分别为 3、6、9、12 m, 煤柱侧安装深度为 3、5、6 m, 采空区应力计采用在液压支架底座下方挖槽预埋的方式, 进行采空区应力监测, 空心包体应变计安装在顶板稳定砂岩层中, 安装倾角为 56.2° , 安装角为 -27.1° , 方位角为 151.2° , 如图 3(b)所示。

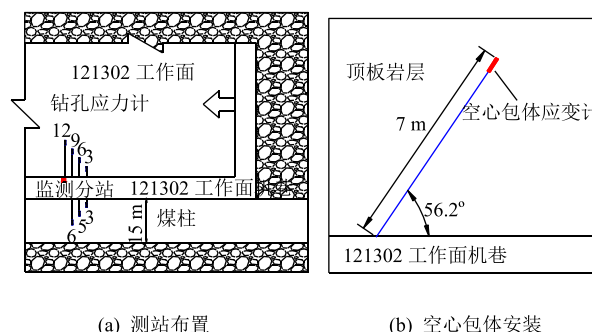


图 3 测站布置图

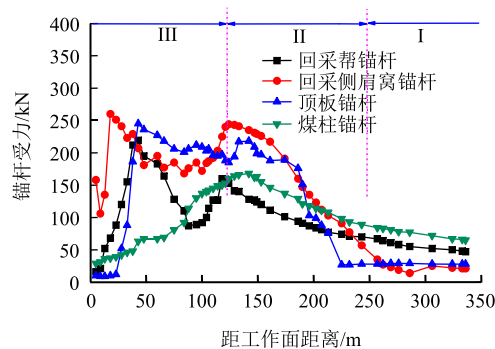
Fig.3 Station layout

4.2 锚杆(索)受力演化规律

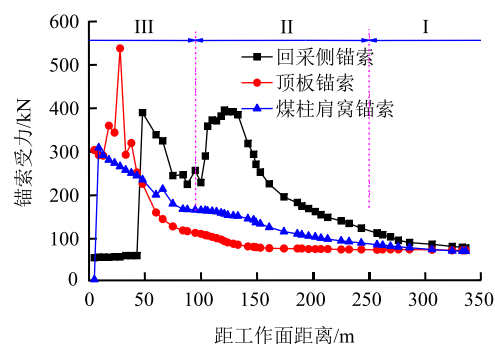
由图 4 可知, 随工作面回采锚杆(索)受力变化均表现出明显的阶段性特征, 按其受力变化情况将其分为 3 个阶段:

阶段 I: 未受采动影响, 锚杆(索)受力变化较小, 煤柱及回采肩窝处锚杆受力比较明显, 回采侧锚索受力较大。阶段 II: 超前采动影响阶段, 回采侧锚杆(索)受力明显增大, 顶板锚杆受力急剧升高, 肩窝锚杆最大受力最为突出, 回采侧锚索受力先增大后减小, 表明采动影响阶段巷道顶板上覆岩层活动加剧, 顶板传递的上覆岩层压力逐渐向两侧煤帮内转移。阶段 III: 该阶段已进入强烈采动

影响阶段, 支护结构受力变化波动较大, 顶板和肩窝锚杆分别在 43 m 和 18 m 达到峰值后迅速衰减; 锚索受力波动变化较为剧烈, 尤其是顶板锚索, 在 28 m 突变点处急剧增大后迅速减小, 回采侧锚索在 48 m 处迅速衰减, 基本处于失锚状态。



(a) 锚杆受力



(b) 锚索受力

图 4 锚杆(索)受力变化

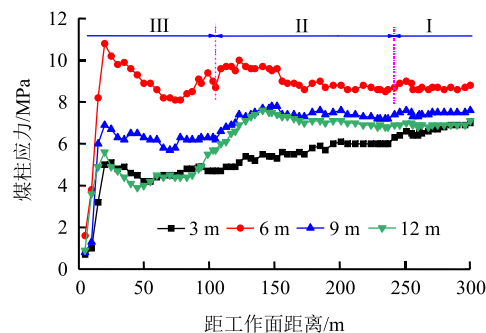
Fig.4 Stress change of anchor rod and cable

由锚杆(索)受力分析可知, 孤岛工作面采动影响范围达到 200 m 以上, 在强烈采动影响阶段矿压显现程度较剧烈, 这是顶板 C 型覆岩空间结构大面积运动结果, 其对工作面巷道造成的破坏程度较大, 随覆岩破断范围进一步加大, 上覆岩层的自重应力与采动产生的次生应力转移到巷道围岩内, 支护结构体受力急剧增大, 但是围岩应力增大必然加剧了围岩的破碎程度, 导致锚杆(索)承载力剧烈变化。

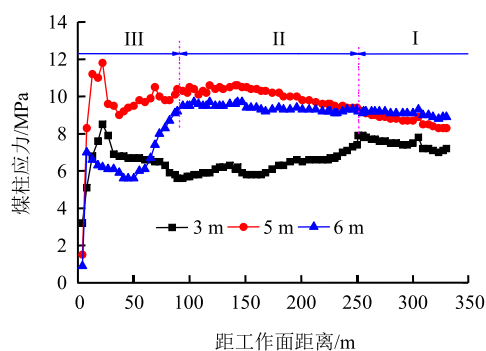
4.3 煤体垂直应力演化规律

121302 工作面煤体受本工作面超前采动影响以及邻近采空区残余应力影响, 巷道两帮煤体内垂直应力具有明显的阶段性变化特征。由图 5 可知, 在阶段 I 内, 距离工作面大于 250 m, 尚未进入采动影响范围, 两帮煤体垂直应力几乎不发生变化; 在阶段 II 中, 受采动影响两帮 3 m 基点煤体应力逐渐减小, 煤柱侧 5 m 基点以及回采侧 6 m 基点应力

增大比较明显, 表明在采动影响下浅部围岩变形破坏较突出; 阶段 III 已进入强烈采动影响范围, 煤体垂直应力变化剧烈, 尤其是回采侧 6 m 基点和煤柱侧 5 m 基点处波动变化较为突出, 随后剧烈衰减。



(a) 回采侧



(b) 煤柱侧

图 5 煤体垂直应力分布特征

Fig.5 Characteristics of vertical stress evolution of coal

综合分析两帮煤体垂直应力分布规律, 在距离工作面 250 m 开始受到明显采动影响, 随工作面推进, 顶板结构周期性破断, 煤柱侧受采动影响较回采侧强烈, 煤体垂直应力基本呈现逐渐增大趋势。但由于深井高应力, 矿井采动影响大, 浅部煤体破碎严重, 承载力与完整程度急剧降低, 导致 3 m 基点处垂直应力衰减明显。两帮煤体垂直应力最大值位于 5~6 m 深度左右, 在工作面前方 20~22 m 范围内达到峰值, 随后迅速衰减。

4.4 采空区垂直应力演化规律

通过在液压支架底座前方埋设采空区应力计观测了采空区顶板岩层垮落压实后应力演化特征。如图 6 所示, 在工作面回采过程中, 顶板破断是一个动态变化过程, 随顶板上覆岩层垮落带不断向前移动, 垮落后的破碎围岩充填采空区, 根据应力变化特征, 将采空区应力演化状态分为缓慢增长阶段、剧烈变化阶段和稳定增长阶段。如图 6 所示, 在工作面推进过程中, 滞后工作面后方 0~5 m 为应力

缓慢增长阶段,此阶段直接顶垮落,垮落矸石较为破碎,应力增长缓慢,顶板来压强度小;滞后工作面 5~43 m 为应力剧烈变化阶段,此阶段老顶垮落,滞后 10.5 m 应力增量剧烈增大,随后应力增量出现波动变化,应力持续增长,来压强度明显增大;滞后工作面 43 m 以后,为应力稳定增长阶段,应力缓慢增大,应力增量逐渐减小,采空区垮落矸石逐渐被压实,顶板高位破断岩层产生的应力逐渐转移到采空区垮落矸石上,促使采空区内应力值缓慢增大,直至达到或者接近上覆岩层的自重应力 γH ,最终由应力降低区逐渐转变为应力稳定区。

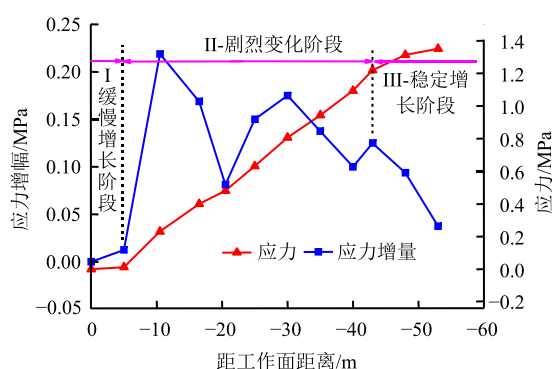


图 6 采空区应力压实阶段演化规律

Fig.6 Evolution law of stress compaction stage in gob

4.5 顶板空间主应力演化规律

图 7 为巷道顶板空心包体应变计监测的空间主应力增量演化特征,在分析中将主应力的变化量称为主应力增量,最大、中间以及最小主应力增量分别用 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 、 $\Delta\sigma_3$ 表示;空间主应力增量方位角和倾角变化如图 8 所示。图中极径表示空心包体应变计安装位置与工作面的距离,极角表示主应力方位角或倾角的变化。

(1) 由图 7 可知,随工作面推进顶板空间主应力增量呈明显阶段性变化特征。阶段 I 内,测点位置与工作面距离大于 200 m,空间主应力增量变化较小;阶段 II 内,进入超前支承压力影响区后,空间主应力增量变化趋势明显增大, $\Delta\sigma_1$ 增长变化趋势最为突出,阶段 I、II 空间主应力增量变化趋势相同;阶段 III 为超前支承压力强烈影响阶段,空间主应力增量变化出现明显差异性, $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 逐渐增大, $\Delta\sigma_3$ 逐渐减小。

(2) 在空心包体应变计安装初期,测点位置还未受到采动影响,钻孔周围应力的调整对空间主应力增量变化影响较小,但对方位角和倾角影响比较显著,如图 8 所示。在阶段 I 内,随空间主应力增

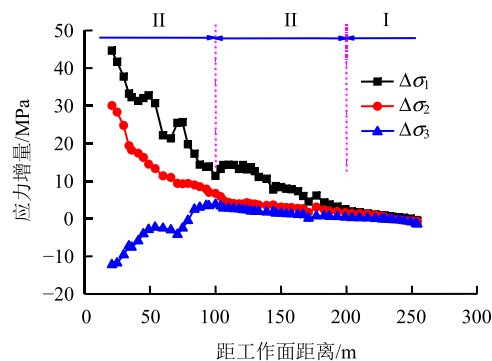
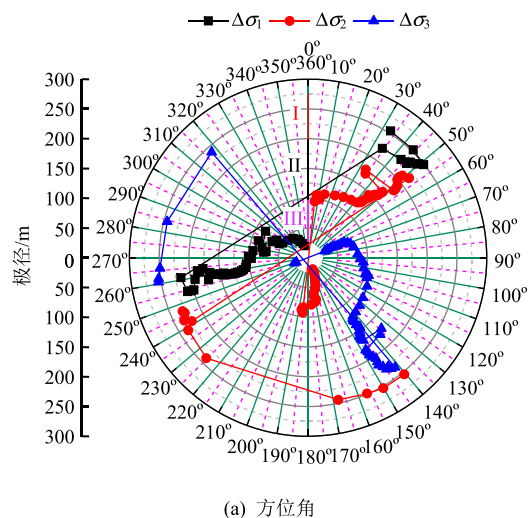
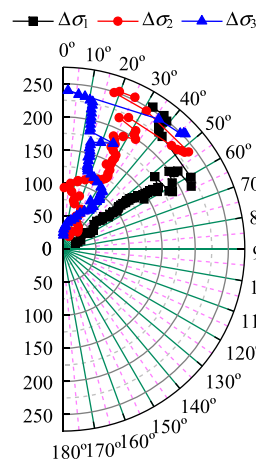


图 7 顶板空间主应力增量变化

Fig.7 Change in principal stress increment of roof space



(a) 方位角



(b) 倾角

图 8 顶板空间主应力增量方位角及倾角变化

Fig.8 Variations of azimuth and inclination of principal stress increment in roof space

量缓慢增大,方位角出现跳跃性变化,其中 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_2$ 偏转较为明显,在这一阶段内空间主应力倾角变化均超过 30° 。阶段 II 进入超前采动应力影响阶段,方位角基本呈现规律性偏转, $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ 倾角均出现明显跳跃性变化。阶段 III 内 $\Delta\sigma_1$ 方位角和倾

角变化较小, $\Delta\sigma_2$ 和 $\Delta\sigma_3$ 方位角均发生跳跃性突变, 表明该阶段顶板活动较为强烈。因此, 深井孤岛工作面后方顶板垮落、破断对工作面前方 100 m 范围内顶板影响较为强烈, 导致顶板空间主应力变化急剧增大。

通过现场监测数据分析可知, 工作面巷道围岩应力演化具有明显的分区特征, 距工作面距离大于 250 m 为应力稳定区, 该区域未受超前支承压力影响, 围岩应力随工作面推进变化较小; 距离工作面 100~250 m 为应力增长区, 此时已进入超前支承压力影响区, 巷道围岩应力与巷道支护结构受力明显增大; 距离工作面 100 m 以内为应力剧烈波动区, 此阶段内采动影响程度逐渐增强, 应力变化较为剧烈, 尤其是距离工作面 20~22 m 处围岩应力迅速达到峰值, 并随围岩变形破坏而急剧衰减。

5 巷道围岩变形演化特征及控制对策

5.1 巷道变形破坏演化特征

基于上述工作面回采过程中应力演化特征分析, 巷道围岩变形破坏具有与之对应的阶段性特征, 结合巷道变形破坏程度, 将巷道围岩变形破坏演化过程分为缓慢变形阶段、加速变形阶段和剧烈变形阶段。

(1) 缓慢变形阶段

距工作面距离大于 250 m 时, 巷道围岩变形主要受深井高地应力影响, 由于底板处于无支护状态, 且留有 2~3 m 厚的底煤, 导致底板变形相对突出, 帮部收缩变形量小于顶底板移近量, 煤柱侧肩窝变形较为突出, 是拱形半煤岩巷道围岩控制的难点, 如图 9(a)、9(d)所示。

(2) 加速变形阶段

距工作面 250 m 时开始受到采动影响, 巷道两帮浅部围岩破碎, 蠕变扩容变形加速, 围岩裂隙大量发育, 顶底板移近及煤柱内挤变形突出, 煤柱侧肩窝变形加剧, 喷浆层撕裂、脱落、剪切滑移变形, 锚杆(索)频繁出现破断, 巷道出现明显的非对称变形破坏, 如图 9(b)、9(e)所示。

(3) 剧烈变形阶段

距工作面距离小于 100 m 后, 进入强采动影响范围, 巷道围岩出现明显大变形破坏特征。其中, 底板变形最为突出, 最大变形速度可达 500 mm/d 以上, 需要不断卧底才能满足生产需求, 两帮内挤严重, 单帮变形 600 mm 以上, 巷道喷浆层脱落范围增大, 顶板下沉严重, 需要补打锚索吊梁、架设

立柱等加强支护, 如图 9(c)、9(f)所示。

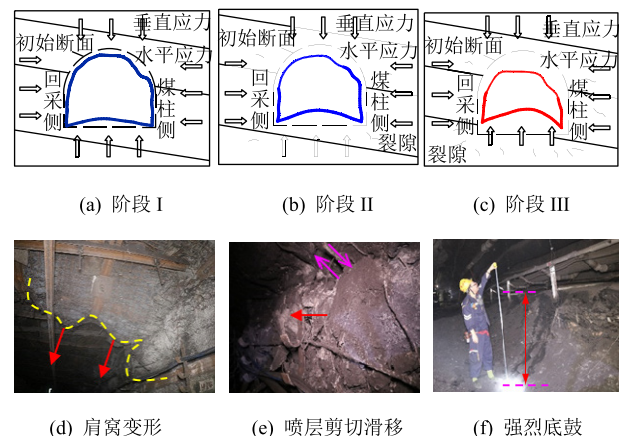


图 9 巷道围岩变形破坏演化特征

Fig.9 Characteristics of deformation and failure evolution of roadway surrounding rocks

5.2 巷道支护对策

根据 121302 工作面巷道围岩应力演化与变形破坏特征, 提出以下几点支护措施。

(1) 优化巷道断面。鉴于半煤岩拱形巷道存在的控制难点, 考虑煤层倾角的影响, 巷道掘进时可采用梯形断面(见图 10), 保持顶板岩层完整性, 降低两帮肩窝及煤岩交界面的变形控制难度, 同时减小了底板留煤厚度, 降低回采阶段底板变形量。

(2) 强化巷道支护。采用高预应力及时主动支护, 减小巷道围岩掘巷期间初期变形, 加强围岩表面喷浆与注浆加固, 尤其是进行深浅孔五花布置交叉注浆加固(深孔为 6 m、浅孔为 3 m), 确保锚杆与锚索锚固端围岩的稳定。回采时缓慢变形阶段受采动影响小可以不进行加强支护; 加速变形阶段受采动影响, 巷道围岩应力增大较快, 巷道两帮及煤柱肩窝等处破断的锚杆(索)进行补打支护, 增大支护强度; 剧烈变形阶段受强烈采动影响, 巷道围岩应力急剧变化, 尤其是顶板来压强烈, 需加强巷道顶板控制, 对顶板下沉突出区域补打锚索、架设立柱等加强支护, 尤其是在距离工作面 20~25 m 范围内要加强超前支护措施, 避免造成巷道围岩失稳破坏。

(3) 切顶卸压实现应力转移。由图 10 可知, 121302 工作面实体煤及煤柱作为邻近采空区顶板平衡结构的承载点, 承受较大的支承压力, 加大了巷道变形与维护难度。为降低回采阶段强采动影响, 可运用切顶卸压应力转移技术, 在工作面回采前将煤柱上方坚硬悬顶预裂, 隔断与上方顶板岩层的应力传递, 促使巷道顶板上方高应力向实体煤深部转

移,使其位于低应力区,提高煤柱整体稳定性,降低巷道维护的困难程度。

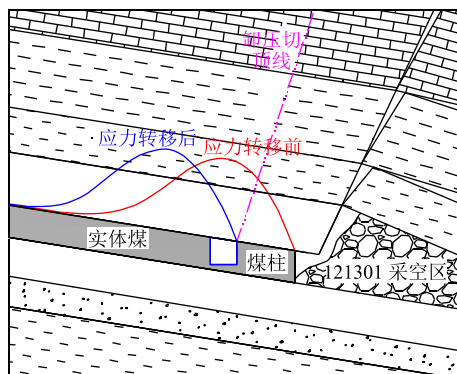


图 10 应力转移示意图

Fig.10 Schematic diagram of stress transfer

6 结 论

(1) 深井孤岛工作面巷道围岩采动应力变化具有明显阶段特征,阶段 I 距工作面距离大于 250 m,工作面巷道围岩应力变化较小;阶段 II 距工作面距离为 100~250 m 范围,采动应力明显增大,尤其是顶板增加明显,造成锚杆(索)受力显著增大;阶段 III 距离工作面小于 100 m,巷道围岩垂直应力与空间主应力变化比较剧烈,表明顶板覆岩空间结构运动对巷道矿压显现较为强烈。

(2) 根据深井孤岛工作面采空区应力变化特征将其分为缓慢增长阶段、剧烈变化阶段和稳定增长阶段,分析了 3 阶段应力变化过程中直接顶、老顶垮落以及采空区破碎矸石压实的动态演化过程,表明深井高应力孤岛工作面直接顶垮落步距较小,老顶破断来压剧烈,应力增长迅速。

(3) 巷道围岩作为应力的主要承载体,与应力变化具有相对应的阶段变化特征,结合巷道变形破坏程度,将巷道围岩变形破坏演化过程分为缓慢变形阶段、加速变形阶段和剧烈变形阶段,并分析了围岩变形破坏演化机理及变化特征。

(4) 根据工作面巷道围岩应力演化与变形破坏特征,提出了巷道断面优化、切顶卸压应力转移以及加强支护等针对性支护改革措施,以期对深井巷道围岩控制提供一定指导。

参 考 文 献

[1] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 83-93.

KANG Hong-pu, WANG Jin-hua. Rock bolting theory

and complete technology for coal roadways[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007: 83-93.

[2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.

XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.

[3] 张辉. 超千米深井高应力巷底部鼓机理及锚固技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

ZHANG Hui. Study on floor heave mechanics and bolting technology for roadways with depth of more than one kilometer and high stress[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2013.

[4] 姜鹏飞, 张剑, 胡滨. 沿空留巷围岩受力变形特征及支护对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 56-62.

JIANG Peng-fei, ZHANG Jian, HU Bin. Mechanical and deformation characteristics of gob-side entry retaining surrounding rock and support methods[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1): 56-62.

[5] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845-864.

KANG Hong-pu, JIANG Peng-fei, HUANG Bing-xiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modificationdestressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. *Journal of China coal society*, 2020, 45(3): 845-864.

[6] 刘传孝, 王龙, 张晓雷, 等. 不同围压下深井煤岩短时蠕变试验的细观损伤机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2583-2588.

LIU Chuan-xiao, WANG Long, ZHANG Xiao-lei, et al. Mesoscopic damage mechanism of coal seam and rock mass in deep field under different confining pressures by short period creep tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 2583-2588.

[7] 康红普, 范明建, 高富强, 等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2227-2241.

KANG Hong-pu, FAN Ming-jian, GAO Fu-qiang, et al.

- Deformation and support of rock roadway at depth more 1 000 meters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2227-2241.
- [8] 周辉, 胡善超, 卢景景, 等. 煤矿深井巷道掘进全过程围岩变形破坏原位测试[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3523-3530.
- ZHOU Hui, HU Shan-chao, LU Jing-jing, et al. In-situ measurement of deformation and failure of surrounding rockmass during whole excavation process of deep coal mine roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3523-3530.
- [9] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- XIE He-ping, 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.
- [10] 何团, 黄志增, 李春睿, 等. 特厚煤层综放工作面侧向煤体应力时空演化特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 100-105.
- HE Tuan, HUANG Zhi-zeng, LI Chuan-rui, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of lateral coal stress in fully mechanized top coal caving mining working face in ultra-thick coal seam[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(1): 100-105.
- [11] 张传庆, 刘振江, 张春生, 等. 隐晶质玄武岩破裂演化及破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2487-2496.
- ZHANG Chuan-qing, LIU Zhen-jiang, ZHANG Chun-sheng, et al. Experimental study on rupture evolution and failure characteristics of aphanitic basalt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2487-2496.
- [12] 黄庆享, 曹健, 杜君武, 等. 浅埋近距煤层开采三场演化规律与合理煤柱错距研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 681-689.
- HUANG Qing-xiang, CAO Jian, DU Jun-wu, et al. Research on three-field evolution and rational coal pillar staggered distance in shallow buried closely spaced multi-seam mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(3): 681-689.
- [13] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 极弱胶结地层开拓巷道围岩演化规律与监测分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 572-579.
- MENG Qing-bin, HAN Li-jun, QIAO Wei-guo, et al. Evolution of surrounding rock in pioneering roadway with very weakly cemented strata through monitoring and analysing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(4): 572-579.
- [14] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 大断面软弱破碎围岩煤巷演化规律与控制技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1885-1895.
- MENG Qing-bin, HAN Li-jun, QIAO Wei-guo, et al. Evolution law and control technology of surrounding rock for weak and broken coal roadway with large cross section[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(8): 1885-1895.
- [15] 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 Hong-pu. Stress distribution characteristics and strata control technology for roadways in deep coal mines[J]. **Coal Science and Technology**, 2013, 41(9): 12-17.
- [16] 周钢, 李玉寿, 张强, 等. 陈四楼矿综采工作面采场应力监测及演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1087-1092.
- ZHOU Gang, LI Yu-tao, ZHANG Qiang, et al. Research on monitoring technique and evolution law of the disturbance stress in Chensilou Colliery[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(5): 1087-1092.
- [17] 谢广祥, 李家卓, 王磊, 等. 采场底板围岩应力壳力学特征及时空演化[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 52-61.
- XIE Guang-xiang, LI Jia-zhuo, WANG Lei, et al. Mechanical characteristics and time and space evolution of stress shell in stope floor stratum[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(1): 52-61.
- [18] 李杨. 煤层群开采围岩应力壳时空演化特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- LI Yang. The Study on temporal and spatial evolution characteristics of surrounding rock stress shell for coal seam group mining[D]. Beijing: China University of

Mining & Technology(Beijing), 2017.

- [19] 张明, 姜福兴, 王建超, 等. 超深井多煤层扰动下巷道变形的时空规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 229-237.
- ZHANG Ming, JIANG Fu-xing, WANG Jian-chao, et al. Space-time regularity of roadway deformation under disturbance of several coal seams in ultra-deep mines[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(2): 229-237.
- [20] 彭瑞, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 深井圆巷次生承载结构“时-空”一体化演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 779-786.
- PENG Rui, MENG Xiang-rui, ZHAO Guang-ming, et al. The evolvement law of deep circular roadway secondary bearing structure “time-space” integration[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2016, 33(5): 779-786.
- [21] 刘金海, 姜福兴, 朱斯陶. 长壁采场动、静支承压力演化规律及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1815-1827.
- LIU Jin-hai, JIANG Fu-xing, ZHU Si-tao. Study of dynamic and static abutment pressure around longwall face and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1815-1827.
- [22] 林健, 王洋, 杨景贺, 等. 不同围压巷道开挖应力场演化规律模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2313-2319.
- LIN Jian, WANG Yang, YANG Jing-he, et al. Simulation studies on stress field evolution of roadway excavation under different confining pressures[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(10): 2313-2319.
- [23] 王鹏飞, 冯国瑞, 赵景礼, 等. 长壁工作面巷顶沿空掘巷围岩应力分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3395-3405.
- WANG Peng-fei, FENG Guo-rui, ZHAO Jing-li, et al. Investigation of stress of surrounding rock mass of gob-side entry under gob of a longwall panel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3395-3405.
- [24] 姜福兴, 张兴民, 杨淑华, 等. 长壁采场覆岩空间结构探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 979-984.
- JIANG Fu-xing, ZHANG Xing-min, YANG Shu-hua, et al. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 979-984.

上接第 4077 页

- [4] YANG Min, SUN Qing, LI Wei-chao, et al. Three-dimensional finite element analysis on effects of tunnel construction on nearby pile foundation[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2011, 18: 909-916.
- [5] 黎春林, 缪林昌. 盾构隧道施工土体扰动范围研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 759-766.
- LI Chun-lin, MIAO Lin-chang. Determination of the range of shield tunneling-induced soil disturbance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 759-766.
- [6] 刘时鹏, 施建勇, 雷国辉. 基于 SMP 准则柱孔扩张问题相似解[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 99-104.
- LIU Shi-peng, SHI Jian-yong, LEI Guo-hui. Similarity solutions of cylindrical cavity expansion based on SMP criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 99-104.
- [7] 肖昭然, 张昭, 杜明芳. 饱和土体小孔扩张问题的弹塑性解析解[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1373-1378.
- XIAO Zhao-ran, ZHANG Zhao, DU Ming-fang. An elastoplastic closed-form approach of cavity expansion in saturated soil based on modified Cam clay model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1373-1378.
- [8] 徐志英. 岩石力学[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1993: 111-113.
- XU Zhi-ying. Rock mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1993: 111-113.
- [9] 常士骠, 骆苏民. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 159-160.
- CHANG Shi-biao, LUO Su-min. Geology engineering handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 159-160.