

殷伟,张强,韩晓乐,等.混合综采工作面覆岩运移规律及空间结构特征分析[J].煤炭学报,2017,42(2):388-396. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.6017

Yin Wei, Zhang Qiang, Han Xiaole, et al. Overlying strata movement law and spatial structure analysis of fully mechanized mixed mining of backfilling and caving[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 388-396. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.6017

混合综采工作面覆岩运移规律及空间结构特征分析

殷伟¹, 张强¹, 韩晓乐¹, 孙强¹, 巨峰²

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 基于平煤十二矿深部开采面临的排矸量大、辅助运输困难、矿区环境污染以及常规充填面产能不足工程背景, 创新了矸石充填与垮落法混合综采技术并阐述了其技术内涵。采用理论分析、物理相似模拟和现场实测方法系统地研究了混合综采工作面覆岩运移规律和空间结构特征。通过理论分析得到了不同充实率状态下混合综采工作面覆岩空间结构特征; 物理相似模拟结果表明, 混合综采工作面充填段基本顶仅发生弯曲下沉, 而垮落段直接顶垮落、基本顶断裂, 垮落段基本顶平均下沉量是充填段的 4.2 倍, 覆岩空间结构表现出明显的非对称特征。矿压实测数据显示, 充填段采场无明显的来压现象, 垮落段来压现象显著, 初次来压步距约 30 m, 周期来压步距约 22 m, 动载系数达 1.7 左右; 岩层钻孔窥视结果观察到充填段顶板完整, 覆岩空间结构呈现“两带”发育特征; 垮落段覆岩结构呈“三带”发育特征, 混合综采工作面覆岩非对称性空间结构特征显著。

关键词: 混合综采; 矸石充填; 充实率; 覆岩空间结构

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2017)02-0388-09

Overlying strata movement law and spatial structure analysis of fully mechanized mixed mining of backfilling and caving

YIN Wei¹, ZHANG Qiang¹, HAN Xiao-le¹, SUN Qiang¹, JU Feng²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The deep mining faces in No. 12 coal mine in Pingdingshan have an engineering background of a large amount of waste, transportation difficulties, mine environmental pollution and conventional filling surface production capacity. An innovation of fully mechanized mixed mining of backfilling and caving (MMBC) is developed and the characteristics of technology are introduced. By means of theoretical analysis, physical similarity simulation and field measurement, the spatial structure characteristics of the fully mechanized mixed mining coal face are studied systematically. The influence of backfill ratio on the strata spatial structure was theoretically analyzed. The physical simulation results show that in the backfilling section of the mixed mining face, the basic roof only bends and sinks, immediate roof caves, and some basic roof fractures occur in the caving section. The basic roof subsidence in the caving section is 4.2 times the average of that in the backfilling section which shows the obvious characteristics of asymmetry. In-situ measurements show that the stope pressure in backfilling section is not obvious, while it is significant in the caving section. The first weighting step is about 30 m, and the periodic weighting step distance is about 22 m, also the dynamic load

收稿日期: 2016-07-02 修回日期: 2016-10-20 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227905); “青蓝工程”资助项目(苏教师(2014)23号); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51421003)

作者简介: 殷伟(1986—), 男, 江苏淮安人, 博士研究生。E-mail: 13585473630@163.com

coefficient is about 1.7. The rock borehole results show that roof is intact and strata spatial structure shows “two belts” development characteristics in backfilling section; the immediate roof caves, and basic roof breaks in the caving section, overlying structure has the “three zone” development characteristics, which shows the obvious characteristics of asymmetry.

Key words: fully mechanized mixed mining; gangue backfilling; backfill ratio; strata spatial structure

随着煤炭资源持续高强度开发,矿井开采水平不断延深,高瓦斯、高地应力、长运输距离等因素导致开采环境愈发困难。众多矿井深部开采面临产能紧张、保护层排矸量大、矸石辅运紧张、地表无堆积空间和矿区环境污染严重等难题,严重制约矿井可持续发展^[1];固体充填采煤技术^[2-4]因其在岩层移动控制、矸石再利用和生态环境保护等方面的优势得到了迅速发展;但受充填设备和工艺等因素制约,充填工作面充填能力难以匹配采煤能力,导致工作面产能和效率偏低,难以作为矿井主采面维持矿井产量,极大地限制了固体充填技术的大规模推广应用^[5]。鉴于此,中国矿业大学充填采煤课题组将固体充填采煤和传统垮落法综采技术有机结合,提出矸石充填与垮落法混合综采技术^[6-8](以下简称:混合综采):即在同一工作面中同时布置充填段和垮落段,既保留了常规充填工作面消耗矸石的能力,同时延长了工作面长度,提高了充填面产量和效率,成功拓展了固体充填采煤技术应用前景。

研究混合综采工作面覆岩运移特征和空间结构对于混合综采工作面工程设计和安全生产至关重要。混合综采技术应用在国内外尚属首次,目前尚无混合综采覆岩结构和矿压显现方面的研究。国内外学者针对传统综采和固体充填综采岩层控制理论方面做了大量研究。钱鸣高^[9]提出了具有代表性的覆岩结构“砌体梁”理论,认为传统垮落法采场覆岩在推进方向上发生周期性破断,导致工作面周期来压现象,在垂直方向上覆岩层自下而上可分为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带“三带”结构;缪协兴等^[10-12]建立充填采煤“等价采高”模型,通过理论分析和实测分析得出充填采场直接顶的破断现象,实施矸石充填开采可显著降低采场矿压显现剧烈程度;黄艳利等^[12-14]建立了固体密实充填采煤采场覆岩弹性薄板力学模型,得到了控制基本顶不发生破断的临界条件,认为在密实充填的情况下,充填采场覆岩不产生垮落带,仅发生直接顶局部断裂和基本顶弯曲下沉,覆岩只存在弯曲下沉带和裂隙带“两带”结构;张吉雄等^[15-17]提出矸石充填综采与传统综采相比,基本顶的变形特征受充填体、破碎直接顶的支撑作用,其给予支架、煤壁的动载系数将减小,工作面的矿压显现特征不明显。

本文基于平煤十二矿背景,介绍混合综采技术内涵及特征,采用理论分析、物理相似模拟和现场实测等方法研究混合综采覆岩运移规律,旨在为类似条件下混合综采工程设计和矿压控制提供借鉴。

1 混合综采技术内涵

1.1 工程背景

平煤十二矿年生产能力 1.3 Mt,共有 3 个开采水平,煤层埋深达 1 000 m。目前一、二水平均已进入残采阶段,急需开采三水平保证矿井产能。三水平主采已₁₅煤层经鉴定属突出煤层,根据《煤矿安全规程》要求及十二矿采动具有突出危险区域规定,最终提出开采已₁₄煤层及其下部 1.4 m 厚岩层共同作为保护层进行卸压开采及矸石不升井充填技术思路,如何兼顾充填与产能已成为矿井可持续发展面临的重大技术难题。基于十二矿深部开采面临的排矸量大、辅助运输困难、矿区环境污染以及充填工作面产能不足工程背景,笔者所在课题组基于充填和产能双重要求创新性地提出了混合综采技术。

1.2 混合综采技术原理

混合综采技术旨在充分发挥充填采煤消耗矸石与传统综采高产高效双重技术优势,该技术在同一工作面中协调布置充填段和垮落段,联合安装充填与采煤设备,将地面堆积或井下排放矸石用于充填段充填。充填段与垮落段分别采用不同的液压支架和顶板管理方式,按照一定工序完成整个混合综采工作面采煤与充填平行作业,其技术原理如图 1 所示。

混合综采技术具有以下显著特征:

(1) 混合综采工作面由充填段和垮落段有机结合而成,总长度达 200 m 以上,可同时满足矿井消耗矸石和单面生产能力的要求;

(2) 混合综采工作面采空区呈现明显分段特点,充填段和垮落段分别采用充填法和垮落法两种截然不同的方式共同管理采场顶板。

由于其特有的部分充填、部分垮落特征,混合综采工作面采场覆岩运移规律及矿压显现必然不同于传统垮落法综采工作面和常规充填工作面,对其展开研究是混合综采工作面工程设计及安全生产的重要前提。

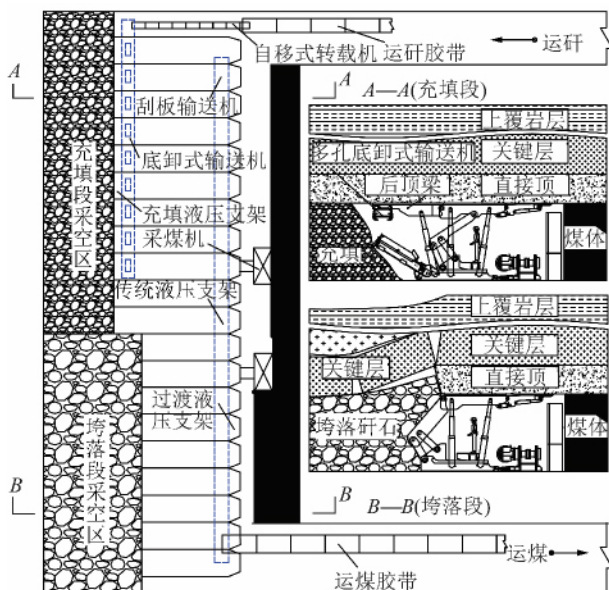


图1 混合综采技术原理

Fig. 1 Schematic diagram of MMBC technique

2 混合综采工作面覆岩空间结构特征

采场矿压显现与覆岩空间结构密切相关^[18-20]。充填采煤与垮落法开采覆岩空间结构及矿压显现差异明显^[12,13]。因采空区独有的混合处理方式混合综采工作面覆岩结构必然表现出特有的规律,本文分别沿走向和倾向研究其覆岩空间结构特征。

2.1 沿走向覆岩空间结构特征

沿走向充填段和垮落段顶板约束不同,导致顶板运动机制差异明显。充填段充填体限制了顶板的下沉及破断,其覆岩空间结构与垮落段差异显著。文献^[6]提出混合综采工作面充填段与垮落段之间存在过渡区域,但范围仅5 m左右,占工作面长度比例极小,借鉴大倾角煤层开采覆岩空间结构研究时沿工作面倾向分上、中、下部分区域研究思路^[21-23],笔者认为研究混合综采工作面沿走向覆岩空间结构时可沿垮落段和充填段分段分析。

(1) 垮落段覆岩空间结构

沿走向垮落段覆岩移动规律与传统综采类似。随着直接顶垮落,基本顶呈暴露状态,可以看作是下部无约束两端固支岩梁,其力学模型如图2所示;在自重及覆岩载荷作用下发生弯曲变形,当暴露长度达到其极限跨距时发生初次破断,相应的采场发生初次来压现象。根据材料力学知识,基本顶初次断裂步距 L_c 计算见式(1):

$$L_c = h \sqrt{\frac{2R_T}{q}} \quad (1)$$

根据式(1)可知,基本顶初次断裂步距由岩体极

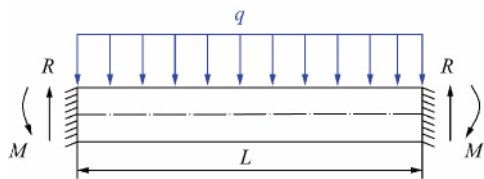


图2 垮落段基本顶力学模型

2 Mechanical model of the main roof in the caved section

限抗拉强度 R_T 、岩层厚度 h 以及上覆等效载荷 q 共同决定;基本顶初次破断后断裂岩块形成“砌体梁”结构,且该结构将经历“稳定—失稳—再稳定”的变化过程^[8]。随着工作面推进,该结构的形成和失稳呈现周期性特征,导致工作面周期来压现象,周期来压步距 L_z 计算见式(2)。综上分析混合综采工作面沿走向垮落段呈现出直接顶垮落,基本顶断裂规律,其覆岩空间结构如图3所示。

$$L_z = h \sqrt{\frac{R_T}{3q}} \quad (2)$$

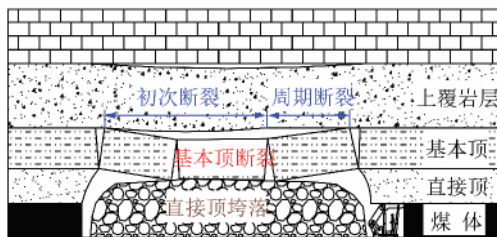


图3 沿走向垮落段覆岩空间结构

Fig. 3 Along-strike spatial structure of the roof in the caved section

(2) 充填段覆岩空间结构

由于充填体限制了覆岩下沉和变形,充填段覆岩空间结构与垮落段差异明显。充填体对上覆岩层运动的抑制程度由充填体的致密性决定,两者之间的相互作用关系通过充实率直观表达^[24]。混合综采工作面充填段充填方案可分为密实充填和自然卸料充填^[8],2种充填方案区别在于充填液压支架后部是否安设夯实机构对充填体充实率进行控制。2种充填方案对应着如下3种充填状态:①充实率极高状态:利用夯实机构使充填物料接顶且经过多次夯实达到致密状态,但该工艺复杂耗时,充填面产量和效率相对偏低。②充实率高状态:利用夯实机构使充填物料接顶即可。该种充填方式充填耗时短,物料能够充满采空区,保证充填量的同时简化了充填工艺,充填与采煤效率协调关系好。③充实率低状态:落料高度只能自然堆积到底卸式输送机下部但无法接顶。该种状态充填能力相对较低,但充填工艺简单,耗时短,效率高。

3种充填状态下覆岩空间结构如图4所示。

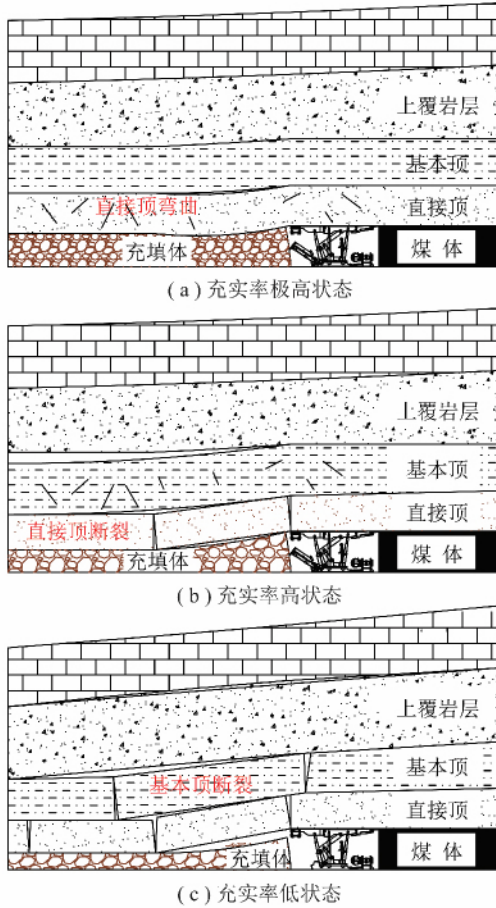


图4 沿走向充填段覆岩空间结构

Fig. 4 Along-strike spatial structure of the roof in the backfill section

第1类结构: 直接顶和基本顶均不破断。直接顶在达到断裂极限跨距之前已经受到充填体的支撑约束,下沉空间有限,仅发生弯曲下沉。基本顶在充填体和直接顶的共同支撑作用下同样仅发生弯曲变形。从矿压角度来说,由于直接顶和基本顶均不断裂,充填段采场没有明显来压现象。

第2类结构: 直接顶破断—基本顶弯曲下沉。由于没有对充填体反复夯实,充实率低于第1种状态,但直接顶仅发生断裂不垮落;基本顶在达到其断裂跨距之前受到下部断裂直接顶和矸石充填体的共同支撑作用,仅弯曲下沉。覆岩基本顶不破断,与垮落段相比采场矿压显现明显缓和。

第3类结构: 直接顶和基本顶均破断。自然落料时充填体松散且不接顶,充实率低。直接顶和基本顶存在足够的下沉空间而相继破断。初次来压和周期来压现象明显,但由于充填体存在相比于垮落段矿压显现依然有所缓和,比上述2种情况剧烈。

基于产能和充填效率原因,要求充填时间短。以平煤十二矿为例,兼顾充填和产能,现场为第3种充填状态,相应地覆岩空间结构以第3类为主。直接顶碎块与

充填体紧密接触且逐渐被压实,将充填体、直接顶断块视为复合弹性地基^[3]。由于超前支承力峰值距离煤壁远小于其影响范围,可将应力增高区忽略^[6-27];鉴于对称,自中点取推进方向一侧分析,以煤壁正上方顶板中点为原点建立坐标轴,沿推进方向为 x 轴,垂直向下为 w 轴,建立充填段基本顶模型如图5所示。

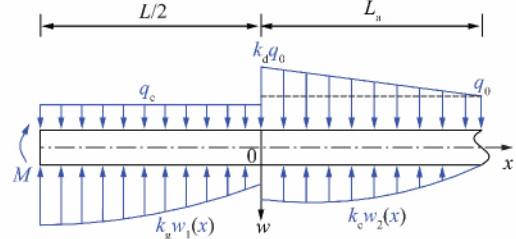


图5 充填段基本顶力学模型

Fig. 5 Mechanical model of the main roof in the backfill section 其中, q_0 为原岩应力; k_d 为超前应力集中系数; q_c 为基本顶覆岩等效载荷; L 为充填体支撑范围; L_a 为超前集中应力影响范围; k_g 为复合弹性地基系数; k_c 为完整直接顶和煤体复合弹性地基系数。其中复合弹性地基系数的计算^[28]为

$$k_g = \frac{k_1 k_2}{h_1 k_2 + h_2 k_1}, k_c = \frac{k_1 k_3}{h_1 k_3 + h_3 k_1} \quad (3)$$

式中, k_1 为破碎直接顶弹性模量; k_2 为充填体变形模量; k_3 为煤体弹性模量; h_1 为直接顶厚度; h_2 为充填体高度; h_3 为煤层厚度。

根据 Winkler 弹性地基梁理论,可以分段得出基本顶受力平衡的微分方程为

$$\begin{cases} E_t I_t \frac{d^4 \omega_1(x)}{dx^4} + k_g \omega_1(x) = q_c & \left(-\frac{L}{2} \leq x \leq 0\right) \\ E_t I_t \frac{d^4 \omega_2(x)}{dx^4} + k_c \omega_2(x) = \\ \left[k_d q_0 - \frac{(k_d - 1) q_0}{L_a} x \right] & (0 \leq x \leq L_a) \end{cases} \quad (4)$$

式中, E_t 为基本顶弹性模量; I_t 为基本顶惯性矩, $I_t = h^3/12$, h 为基本顶厚度。基本顶的挠度方程为

$$\begin{cases} \omega_1(x) = e^{\alpha x} [C_1 \cos(\alpha x) + C_2 \sin(\alpha x)] + e^{-\alpha x} [C_3 \cos(\alpha x) + C_4 \sin(\alpha x)] + \frac{q_c}{k_g} & \left(-\frac{L}{2} \leq x \leq 0\right) \\ \omega_2(x) = e^{-\beta x} [C_5 \cos(\beta x) + C_6 \sin(\beta x)] + \frac{k_d q_0}{k_c} - \frac{(k_d - 1) q_0}{k_c L_a} x & (0 \leq x \leq L_a) \end{cases} \quad (5)$$

式中,特征系数 $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_g}{4E_1I_1}}$, $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_c}{4E_1I_1}}$, $C_1, C_2, \dots, C_6$ 为待求参数。

梁任意处的弯矩、转角、剪力与挠度的关系为

$$\begin{aligned}\theta(x) &= \frac{d\omega(x)}{dx}, M(x) = -E_1I_1 \frac{d^2\omega(x)}{dx^2}, \\ Q(x) &= -E_1I_1 \frac{d^3\omega(x)}{dx^3}\end{aligned}\quad (6)$$

梁在 $x = -L/2$ 和 $x = 0$ 处连续性条件为

$$\begin{cases} \theta_1(-L/2) = 0 \\ Q_1(-L/2) = 0 \\ w_1(0) = w_2(0) \\ M_1(0) = M_2(0) \\ \theta_1(0) = \theta_2(0) \\ Q_1(0) = Q_2(0) \end{cases}\quad (7)$$

联立式(5), (6), (7) 可以求出参数 $C_1, C_2, \dots, C_6$ 值。由于表达式太长和篇幅原因,此处不一一列出。

根据第一强度理论,基本顶不断裂满足式(8):

$$\sigma_{tmax} \leq [R_T] \quad (8)$$

基本顶梁的最大拉应力为

$$\sigma_{tmax} = \frac{6M_{max}}{h_i^2} \quad (9)$$

联立式(8)和(9)可得

$$M_{max} \leq \frac{R_T h_i^2}{6} \quad (10)$$

据此,将前面求得的弯矩和 $C_1, C_2, \dots, C_6$ 各参数值代入式(10) 可以求出基本顶初次垮落极限长度 L_{c1} , 由于表达式太长和篇幅限制,此处省略。

综上所述,垮落段覆岩结构类似于传统综采“三带”特征,充填段则呈现出裂隙带和弯曲下沉带“两带”结构,覆岩同一层位的直接顶岩层在垮落段处于垮落带,在充填段则处于裂隙带或弯曲下沉带;垮落段覆岩基本顶发生周期性断裂,而充填段基本顶则可能断裂或仅发生整体弯曲下沉,充填段矿压显现程度较垮落段较为缓和。

2.2 沿工作面倾向覆岩空间结构特征

由于充填状态以第3种为主,有时兼顾充填量情况下亦可选择第2种状态。分析认为2种充填状态下倾向空间结构如图6所示。

当充实率高时,覆岩倾向充填段基本顶不破断,仅发生整体弯曲下沉;当充实率低时,覆岩倾向充填段基本顶破断,但充填段基本顶断裂块距小于垮落段;垮落段覆岩下沉空间大,裂隙带高度较高。充填

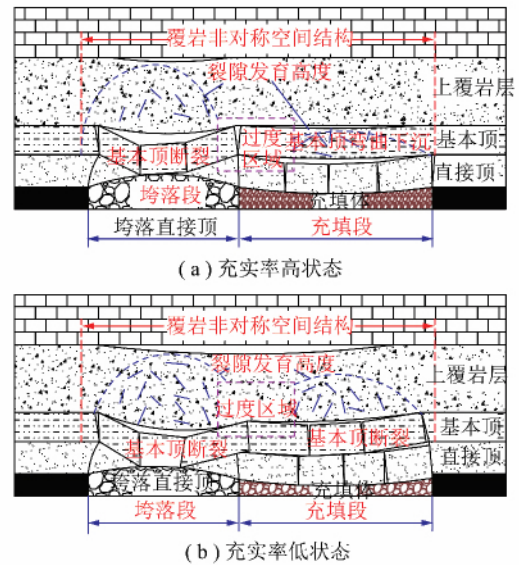


图6 沿倾向覆岩空间结构特征

Fig. 6 Spatial structure of the roof perpendicular to strike direction in the backfill section

段覆岩移动较为缓和,裂隙发育高度较低。充填段和垮落段之间存在过渡区域,其覆岩移动剧烈程度和裂隙发育高度处于两者之间。充实率直接影响混合综采工作面覆岩变形特征,如图6所示混合综采工作面覆岩倾向空间结构呈现出明显的非对称特征,且矸石充填体充实率越高,非对称性特征越明显。

3 混合综采工作面覆岩空间结构物理相似模拟

基于物理相似模拟在研究岩层移动方面的可靠性和直观性,论文通过物理相似模拟实验,进一步分析混合综采工作面倾向覆岩运动规律和空间结构。

3.1 混合综采工作面地质概况

试验原型为十二矿己₁₅采区东翼己₁₅-31010混合综采工作面,煤层埋深约1 000 m,煤厚2.9~3.5 m,平均3.2 m;面长218 m,充填段长120 m,垮落段长98 m。己₁₅煤层柱状及混合综采工作面布置如图7所示。

3.2 物理相似模拟试验模型

模型铺设尺寸为2.5 m × 0.3 m × 1.20 m(长 × 宽 × 高),上部通过加载0.06 MPa等效覆岩载荷;模型底部及两侧边界固定。模型的几何相似比 C_l 为1:100(模型:原型),应力相似比 C_p 为1:167,材料容重相似比 C_γ 为1:1.67。为了保证模拟与原型尽可能相似,充填体相似材料和真实矸石充填体应满足应力应变过程相似^[10,27]。根据相似条件及模拟经验,采用海绵、纸张、泡沫及板材组合相似材料并进行

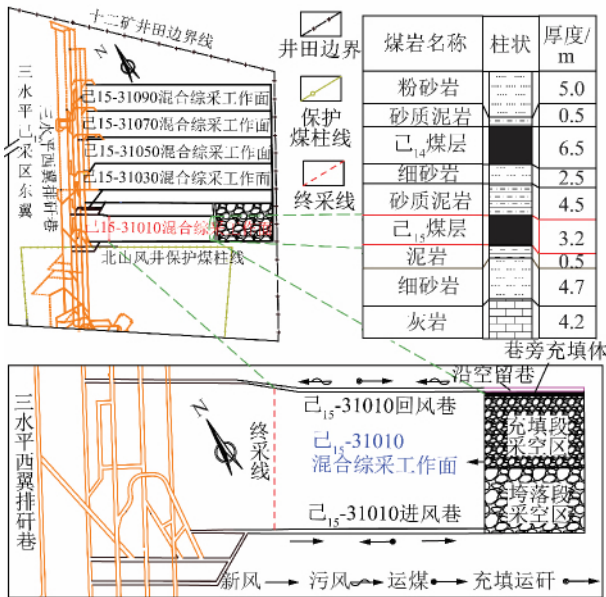


图 7 己 15 煤层柱状及混合综采工作面布置

Fig. 7 Strata histogram and system layout of the working face
压缩实验对比。矸石充填体和相似材料试验结果如图 8 所示。

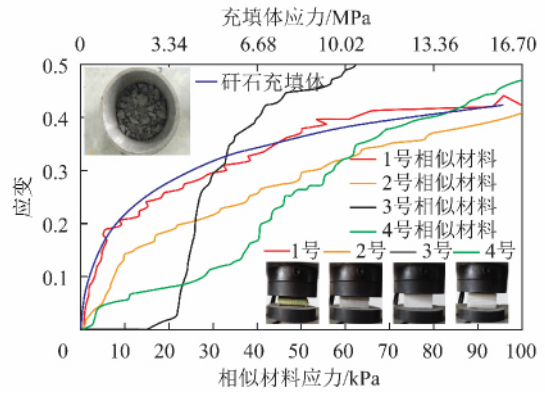


图 8 相似材料与充填体应力应变对比曲线

Fig. 8 Comparison of the stress-strain curves between similar material and in-situ backfill material

分析可知,1 号相似材料在应力相似比条件下与矸石充填体压实特征相似程度较高,故选择其作为模拟材料。1 号相似材料具体组合方案为:1 cm 厚硬海绵+2 cm 厚白纸+0.2 cm 厚木板。试验采用 Vic-2D 型非接触式全场应变测量系统监测模型覆岩位移变化,岩层物理力学模拟参数及材料配比见表 1。

表 1 煤岩层力学性能参数及材料配比

Table 1 Major mechanical parameters of strata and the corresponding proportion of the similar material

序号	岩层	实际厚度/m	模型厚度/cm	抗压强度/MPa	模拟强度/kPa	材料用质量/kg			
						砂	碳酸钙	石膏	水
1	粉砂岩	25.0	25.0	16.0	95.83	187.50	11.25	26.25	28.13
2	砂质泥岩	15.0	15.0	14.0	83.84	115.71	5.79	13.50	16.88
3	细砂岩	10.0	10.0	32.0	191.68	67.50	6.75	15.75	11.25
4	泥岩	10.0	10.0	14.0	83.83	77.14	3.86	9.00	11.25
5	细粒砂岩	8.0	8.0	32.0	191.68	54.00	5.40	12.60	9.00
6	泥岩	12.0	12.0	14.0	83.83	92.57	4.63	10.80	13.50
7	粗粒砂岩	6.0	6.0	25.0	149.70	40.50	4.05	9.45	6.75
8	细砂岩	6.0	6.0	35.0	209.58	40.50	4.05	9.45	6.75
9	粉砂岩	5.0	5.0	13.0	77.84	36.00	4.50	4.50	5.63
10	白砂岩	1.4	1.9	40.0	239.52	12.83	1.28	2.99	2.14
11	己 ₁₄ 煤	0.5	1.9	40.0	239.52	50.14	2.51	5.85	7.31
12	砂质泥岩	6.5	6.5	15.0	89.82	16.88	1.69	3.94	2.81
13	细砂岩	2.5	2.5	35.0	209.58	34.71	1.74	4.05	5.06
14	砂质泥岩	4.5	4.5	14.0	83.83	25.20	1.80	1.80	3.60
15	己 ₁₅ 煤	3.2	3.2	9.0	53.89	3.75	0.23	0.53	0.56
16	泥岩	0.5	0.5	16.0	95.80	31.73	3.17	7.40	5.29
17	细砂岩	4.7	4.7	32.0	191.61	30.24	2.27	5.29	4.73

3.3 模拟结果

结合现场实际情况,模型开挖时首先将己₁₄保护层开挖,开挖高度 1.9 m。己₁₅煤层开挖后混合综采工作面倾向覆岩移动和裂隙发育结果如图 9 所示。

由图 9 分析可得:

(1) 充填体限制了顶板下沉,充填段直接顶未发

生垮落,局部断裂。基本顶表现出整体弯曲下沉形态;覆岩无离层现象,裂隙发育程度低,充填段覆岩呈现裂隙带和弯曲下沉带“两带”发育特征。

(2) 垮落段直接顶垮落,覆岩裂隙发育充分,离层现象明显;覆岩自下而上呈现出显著的“三带”特征,对比分析观察到垮落段“三带”发育高度明显高

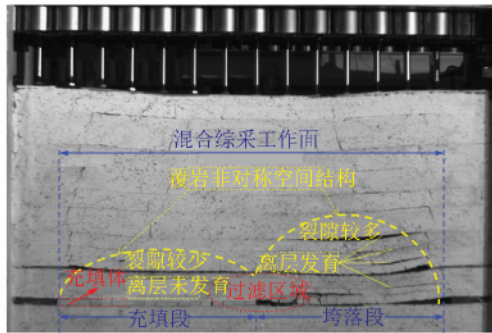


图9 混合综采工作面覆岩移动与裂隙发育模拟

Fig. 9 Photograph showing the strata movement and fracture development in MMBC working face

于充填段“两带”高度。

(3) 混合综采工作面覆岩变形呈现明显的不连续性特征,充填段和过渡段之间存在过渡区域,过渡区域充填段侧基本顶仅发生弯曲下沉,而垮落段侧基本顶则发生破断,破断岩块相互铰接,形成混合综采工作面特有的倾向砌体结构。

(4) 整个混合综采工作面覆岩空间结构呈现出明显的非对称特征,与图 6(a) 理论分析结果相一致。

实验在模型覆岩基本顶中设置测线进一步分析混合综采工作面顶板下沉规律,模型开采完毕后基本顶最终下沉曲线如图 10 所示。

由图 10 分析可知,混合综采工作面充填段基本

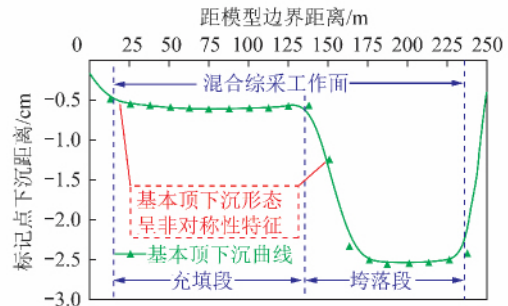


图10 混合综采工作面基本顶下沉曲线

Fig. 10 Subsidence curves of the main roof in MMBC face

顶最大下沉值 0.60 cm,平均 0.56 cm;垮落段基本顶最大下沉值 2.53 cm,平均 2.31 cm;垮落段基本顶平均下沉量值约是充填段的 4.2 倍,纵观混合综采工作面基本顶下沉曲线呈“勺”状,下沉形态表现出明显的非对称特征,与覆岩结构非对称特征相吻合,模拟结果验证了理论分析的正确性。

4 覆岩空间结构实测

为了掌握混合综采工作面矿压显现规律,更好地分析覆岩空间结构特征,沿混合综采工作面共布置 17 台支架工作阻力监测仪。充填段已₁₅-31010 回风巷采用沿空留巷方式保留,利用沿空留巷条件,在巷道向充填段采空区顶板打钻孔,采用 CXK6 型钻孔成像仪观测裂隙发育情况,监测方案如图 11 所示。

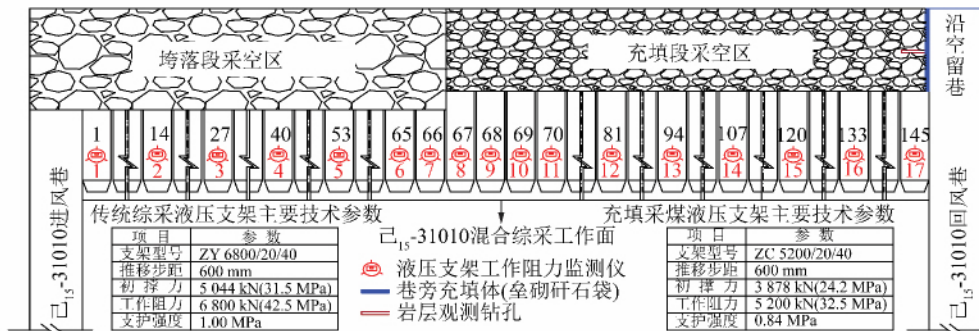


图11 矿压监测设备及钻孔布置方案

Fig. 11 Schematic diagram of the in-situ strata pressure monitoring and borehole drilling

为了对比分析充填段与垮落段采场矿压显现程度,选取具有代表性的 40 号液压支架(垮落段中部)和 107 号支架(充填段中部)工作阻力实测数据,数据整理结果如图 12 所示。

由图 12 分析可知:

(1) 充填段 40 号液压支架支柱压力最大值为 31.81 MPa,最小值为 19.50 MPa,平均值 27.12 MPa。混合综采工作面推进至 87 m 过程中支架压力没有超过其额定工作阻力 32.5 MPa,安全阀无开启现象。充填段采场无明显的初次来压和周期来

压现象。

(2) 垮落段 107 号液压支架支柱压力最大值为 43.56 MPa,最小值为 24.96 MPa,平均 38.12 MPa;综合支架阻力实测和现场观测结果,垮落段直接顶初次垮落步距约 12 m;基本顶初次来压步距约 30 m,支架最大工作阻力 6 980 kN,动载系数约 1.75;周期来压步距约 22 m,支架最大工作阻力 6 850 kN,动载系数约 1.70。

自沿空留巷采空区侧向充填段顶板布置岩层钻孔观测充填段顶板发育情况,同时通过现场垮落段采

空区与巷道交界处观察充填段顶板情况。充填段与垮落段顶板观测结果如图13所示。

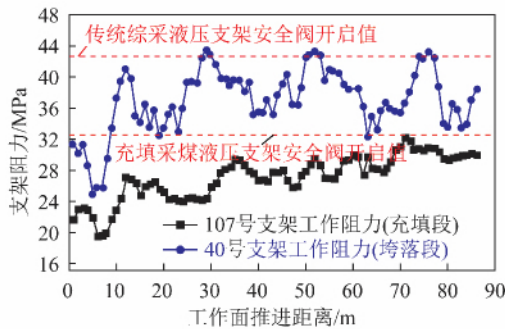


图12 混合综采工作面不同区域支架工作阻力实测
Fig. 12 Measured shield supporting strength in different zones in MMBC face

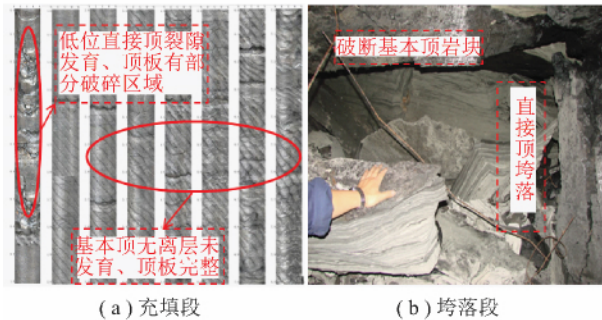


图13 覆岩顶板观测实拍

Fig. 13 Photographs of the overlying strata

图13(a)观测到充填段覆岩仅低位直接顶岩层裂隙发育,局部有破碎现象,基本顶岩层比较完整,覆岩结构表现为仅“两带”发育特征;图13(b)可以观测到明显的直接顶垮落碎块和断裂基本顶岩块,表明垮落带覆岩结构呈现“三带”发育特征,整个混合综采工作面覆岩非对称性结构理论分析结果相一致,进一步验证了混合综采工作面覆岩空间结构非对称特征。

5 结 论

(1) 基于十二矿深部开采面临的排矸量大、辅助运输困难、矿区环境污染以及充填工作面产能不足工程背景,创新性特提出了矸石充填与垮落法混合综采技术,并介绍了其技术原理与特征。

(2) 系统研究了混合综采工作面沿走向和倾向覆岩运动规律,研究表明混合综采工作面不仅不同层位岩层运动形式不同,且同一层位岩层因所处采场倾向位置不同而呈现出不同的运动形式。研究表明充实率越高,覆岩非对称性空间结构特征越明显。

(3) 物理相似模拟结果表明,混合综采工作面沿倾向充填段和垮落段覆岩空间结构差异明显。充填

段覆岩仅“两带”发育;而垮落段则呈现“三带”发育特征且发育高度明显高于充填段;岩层移动观测结果显示混合综采工作面覆岩空间结构呈现出明显的非对称特征。

(4) 现场矿压实测结果表明充填段无明显的来压现象,矿压显现较为缓和;垮落段来压现象显著,初次来压步距约30 m,周期来压步距约22 m,动载系数达1.7左右;岩层钻孔窥视结果验证了整个混合综采工作面覆岩非对称性空间结构特征,与理论分析和物理相似模拟结果相符。

参考文献(References):

- [1] Sun Qiang, Zhang Jixiong, Zhang Qiang, et al. A protective seam with nearly whole rock mining technology for controlling coal and gas outburst hazards: A case study [J]. Natural Hazards, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2512-9.
- [2] 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.
- [3] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395-401.
Zhang Jixiong, Miao Xiexing, Guo Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.
- [4] Zhang Jixiong, Zhang Qiang, Huang Yanli, et al. Strata movement controlling effect of waste and fly ash backfillings in fully mechanized coal mining with backfilling face [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(5): 721-726.
- [5] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵. 充填采煤技术现状与展望 [J]. 采矿技术, 2011, 11(3): 24-30.
Xu Jialin, Xuan Dayang, Zhu Weibing. Backmining technology present situation and prospect [J]. Mining Technology, 2011, 11(3): 24-30.
- [6] 殷伟, 缪协兴, 张吉雄, 等. 矸石充填与垮落法混合综采技术研究与实践 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 26(4): 395-401.
Yin Wei, Miao Xiexing, Zhang Jixiong, et al. Research on mixed mining technology with backfilling and caving methods [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 26(4): 395-401.
- [7] Fang Kun, Zhang Jixiong, Zhang Qiang, et al. Fully mechanised mixed mining technology involving solid backfilling and caving methods in longwall workface [J]. Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, 2016, 5(3): 1-7.
- [8] 张吉雄, 缪协兴, 张强, 等. “采选抽充采”集成型煤与瓦斯绿色共采技术研究 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1683-1693.
Zhang Jixiong, Miao Xiexing, Zhang Qiang, et al. Integrated coal and gas simultaneous mining technology: Mining-dressing-gas draining-backfilling [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1683-1693.
- [9] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学

出版社,2003.

- [10] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤矿压控制原理与支架受力分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 795-801.
Miao Xiexng. Principle of underground pressure control in fully-mechanized coal mining with solid filling and force analysis of mining support [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 795-801.
- [11] 缪协兴, 黄艳利, 巨峰, 等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 863-867.
Miao Xiexing, Huang Yanli, Ju Feng, et al. Strata movement theory of dense backfill mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 863-867.
- [12] 缪协兴, 张吉雄. 矽石充填采煤中的矿压显现规律分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 379-382.
Miao Xiexing, Zhang Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382.
- [13] 黄艳利. 固体密实充填采煤的矿压控制理论与应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
Huang Yanli. Ground control theory and application of solid dense backfill in coal mines [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [14] 黄艳利, 张吉雄, 张强, 等. 充填体压实率对综合机械化固体充填采煤岩层移动控制作用分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 162-167.
Huang Yanli, Zhang Jixiong, zhang Qiang, et al. Strata movement control due to bulk factor of backfilling body in fully mechanized backfilling mining face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 162-167.
- [15] Zhang Qiang, Zhang Jixiong, Kang Tao, et al. Mining pressure monitoring and analysis in fully mechanized backfilling coal mining face: A case study in Zhai Zhen Mine [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1965-1972.
- [16] 张吉雄, 李剑, 安泰龙, 等. 矽石充填综采覆岩关键层变形特征研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 357-362.
Zhang Jixiong, Li Jian, An Tailong, et al. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully-mechanized coal minning technology [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362.
- [17] 张吉雄, 李猛, 邓雪杰, 等. 含水层下矽石充填提高开采上限方法与应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 220-225.
Zhang Jixiong, Li Meng, Deng Xuejie, et al. Method and application of extending mining upper limit under aquifer by gangue backfill mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 220-225.
- [18] 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 Fuxing, Zhang Xingmin, Yang Shuhua, et al. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine [J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2006, 25(5): 979-984.
- [19] 窦林名, 贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 453-460.
Dou Linming, He Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2012, 31(3): 453-460.
- [20] 刘进晓, 景继东, 刘灿伟, 等. 矽石膏体充填采场覆岩空间结构演变规律 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(8): 930-935.
Liu Jinxiao, Jing Jidong, Liu Canwei, et al. Overlying strata spatial structure and its movement law in gangue backfill paste stope [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(8): 930-935.
- [21] 伍永平, 解盘石, 王红伟, 等. 大倾角煤层群长壁采场低位梯阶关键层 [J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(6): 641-645.
Wu Yongping, Xie Panshi, Wang Hongwei, et al. Key lower ladder strata around the longwall mining face area in steeply dipping seam group [J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2014, 34(6): 641-645.
- [22] Lai X P, Sun H, Shan P F, et al. Structure instability forecasting and analysis of giant rock pillars in steeply dipping thick coal seams [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2015, 22(12): 1233-1244.
- [23] 黄建功. 大倾角煤层采场顶板运动结构分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 74-77.
Huang Jiangong. Structural analysis for roof movement for steep coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 74-77.
- [24] Zhang Jixiong, Zhou Nan, Huang Yanli, et al. Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining [J]. Journal of Mining Science, 2011, 47(1): 73-84.
- [25] 李猛, 张吉雄, 姜海强, 等. 固体密实充填采煤覆岩移动弹性地基薄板模型 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2369-2373.
Li Meng, Zhang Jixiong, Jiang Haiqiang, et al. A thin plate on elastic foundation model of overlying strata for dense solid backfill mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2369-2373.
- [26] 李新元, 马念杰, 钟亚平, 等. 坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2786-2793.
Li Xinyuan, Ma Nianjie, Zhong Yaping, et al. Storage and release regular of elastic energy distribution in tight roof fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007, 26(S1): 2786-2793.
- [27] 周楠. 固体充填防治坚硬顶板动力灾害机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
Zhou Nan. Mechanism of preventing dynamic hazards under hard roofs by using solid backfilling technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [28] 张吉雄. 矽石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
Zhang Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology and its engineering application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.