

# 深部综采工作面开采过程上覆煤岩体裂隙演化特性

黄文科, 叶青, 贾真真, 汤锦涛

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年12月31日; 录用日期: 2026年1月22日; 发布日期: 2026年3月20日

## 摘要

为了掌握深部综采工作面开采过程上覆煤岩体裂隙演化特性, 优化突出煤层瓦斯治理方案, 本次以9#-101综采工作面为工程背景, 建立了相似模拟试验平台, 通过测定上覆煤岩体应力变化和位移变化, 研究了深部综采工作面开采过程中上覆煤岩体的运动特征、位移变化规律、裂隙演化特性。研究表明: 采空区顶板岩层移动是一个垮落下陷过程, 在靠近煤壁处, 由于顶板没有完全冒落, 存在较多的空洞, 顶板内的裂隙在相当长的时期内存在。煤层上方的冒落带高度大致为0~9 m的高度, 顶板垮落步距约为20 m, 裂隙带的高度在10~28 m的范围。煤壁上方的应力集中区是不断向前迁移的动态变化的区域(远离工作面向煤体深部迁移)。应力集中峰值出现工作面前方4.0~6.1 m范围内, 支撑应力影响范围约为工作面前方15~20 m。工作面后方13~27 m范围内应力积聚下降。随着工作面的推进、采空区冒落范围的不断扩大, 上覆煤岩体裂隙经过了卸压、失稳、起裂、张裂、裂隙萎缩、变小、吻合、封闭的演化过程。这种演化过程直接影响了采空区内瓦斯的解吸、流动及储集。当采空区长度达到143 m左右时, 位于采空区中部的上覆煤岩体裂隙基本被压实, 而采空区两端的上覆煤岩体裂隙发育。最后将研究结果应用于该煤矿高瓦斯突出煤层开采时的瓦斯治理设计, 取得了较好的瓦斯治理效果。

## 关键词

深部综采面, 上覆煤岩体, 裂隙演化特性, 相似模拟, 顶板垮落

## Evolution Characteristics of Overlying Coal-Rock Fractures in Mining Process of Deep Fully Mechanized Mining Face

Wenke Huang, Qing Ye, Zhenzhen Jia, Jintao Tang

School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

## Abstract

To obtain the fracture evolution characteristics of overlying coal-rock strata, and optimize the gas control scheme for outburst coal seams during the mining process of deep fully mechanized mining face, the study took the No.9#-101 fully mechanized mining face as the engineering background and established a similar simulation test platform. By measuring the stress and displacement variations of the overlying coal-rock strata, the movement characteristics, displacement variation laws and fracture evolution characteristics of the overlying coal-rock strata during deep fully mechanized mining were investigated. The research results show that the movement of roof strata in the goaf is a dynamic and continuous process. Because the roof is not completely caved and there are many cavities, fractures in the roof persist for a quite long period. The height of the caving zone above the coal seam is approximately 0~9 m, the roof caving step distance is about 20 m, and the height of the fracture zone ranges from 10 to 28 m. The stress concentration zone above the coal wall is a dynamically changing area that migrates forward continuously (toward the deep coal body away from the mining face). The peak stress concentration occurs in the range of 4.0~6.1 m in front of the mining face, and the influence range of abutment stress is about 15~20 m in front of the mining face. The stress accumulation decreases in the range of 13~27 m behind the mining face. With the advance of the mining face and the continuous expansion of the goaf caving range, the fractures of the overlying coal-rock strata undergo an evolution process of pressure relief, instability, initiation, tensile fracturing, fracture atrophy, reduction, anastomosis and closure. This evolution process directly affects the desorption, flow and accumulation of gas in the goaf. When the length of the goaf reaches about 143 m, the fractures of the overlying coal-rock strata in the middle of the goaf are basically compacted, while the fractures of the overlying coal-rock strata at both ends of the goaf are well developed. Finally, the research results were applied to the gas control design for the mining of high-gas and outburst coal seams in this coal mine, achieving favorable gas control effects.

## Keywords

Deep Fully Mechanized Mining Face, Overlying Coal-Rock Strata, Fracture Evolution Characteristics, Similar Simulation, Roof Caving

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在矿井深部原始煤岩体中，瓦斯处于高压状态并保持相对静止，当煤体被采出后，原始煤岩体暴露于巷道空间，受采空区影响，大范围煤岩体失去稳定支撑，发生松动、裂隙扩展直至整体冒落。原始煤岩体中的高压瓦斯卸压解吸，游离和解吸瓦斯沿孔隙或裂隙通道运移到低压采矿空间，瓦斯的运移轨迹和储集区域与采矿覆岩裂隙演化过程有密切关系[1]-[3]。例如，煤层开采时，其上覆煤岩体会受采动影响，发生移动变形，产生裂隙[4]。随着采煤工作面的推进，上覆煤岩体的应力和变形具有一定的分布特征，并受采动影响，上覆煤岩体的破裂与移动都具有规律性[5]。长期以来，国内外学者主要采用理论建模、数值模拟、相似材料模拟等方法对煤层开采过程的采动裂隙的形成扩展过程、形态特征及煤岩体裂隙场

分布进行了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。例如,李树刚等[6]通过相似模拟试验研究了受关键层影响的采动裂隙带的分布特征,首次提出受采动影响的上覆煤岩体裂隙呈现椭抛带的分布形态。雷文杰等[7]数值模拟了煤层开采过程的上覆煤岩体的垮落形状和裂隙带分布,进一步验证了冒落带和裂隙带高度的可靠性。张书金等[8]基于相似材料模拟实验的方法,研究了近距离煤层群双重保护层开采时被保护层的膨胀变形规律。戚灵灵等[9]通过相似模拟试验及现场考察,研究了煤层开采过程中的上覆煤岩体移动变形及裂隙发育过程,发现煤层开采过后,顶板以缓慢下沉为主,未出现大规模垮落,上覆煤岩体移动量最大位置位于倾斜中部略偏上。Cheng [10][11]针对高瓦斯、低渗透性煤层群条件,综合运用理论分析、实验室相似模拟、数值分析和现场实测等研究手段,研究了煤层开采过程的上覆煤岩体应力场、裂隙场以及瓦斯渗流场,初步获得了煤层开采后的上覆煤岩体应力场、裂隙场与渗流场的时空变化规律。刘军采用数值模拟方法研究了煤层开采过程的上覆煤岩体裂隙演化特性,发现了煤层开采后上覆煤岩体应力、裂隙分布及演化规律[12];丁海洋等采用数值模拟的方法获得了远距离煤层群保护层双工作面推进过程中应力场和变形场的演化特征[13];李树清等[14]通过材料相似模拟煤层开采过程的裂隙变化情况,研究发现上覆煤岩体趋于闭合和趋于张开的裂隙形成的瓦斯运移通道随工作面推进而变化;涂敏等[15]、刘三钧等[16]研究了煤层开采过程的上覆煤岩体的应力分布和卸压变形规律,得出了煤层开采时的上覆煤岩体的应力分布特征、卸压范围和变形规律。张勇等[17]通过数值模拟研究得到了煤层开采过程的采动影响下不同区域底板裂隙形成类型。彭永伟等[18]采用钻孔窥视法、测线法和测窗法等综合手段实测研究了天地王坡矿煤层开采过程的上覆煤体采动裂隙发育情况,获得了高强度开采条件下的煤体采动裂隙规律,同时结合数值模拟研究了煤岩体采动裂隙对采动应力分布的影响。邱治强等[19]通过数值模拟研究结果表明,煤层开采后,采场围岩顶底板位移变形明显,使得上覆煤层原有裂隙发生扩展并产生新的裂隙,裂隙集中分布在采场两端,煤层透气性系数显著增大,有利于瓦斯抽采。胡杰等采用数值模拟方法获得了煤层开采过程采场渗透率沿纵向分布规律[20];李丽等探讨了近距离煤层群开采过程的裂隙发育情况,获得了近距离煤层群保护层开采条件下的采场动压影响下的围岩变化与卸压瓦斯解吸运移的时空关系[21]。黄勇等[22]建立了采动扰动过程中应力-渗流变化耦合作用模型,研究结果表明,随着工作面的推进,煤层开采过程的卸压范围扩大,瓦斯流向采空区,结合底板穿层钻孔强化抽采方法可提高瓦斯抽采效率,达到快速消突的目的。徐超等[23]以海孜煤矿为背景,利用FLAC<sup>3D</sup>软件模拟了保护层煤层开采及无关键层时的下保护层开采,发现关键层对被保护煤层的卸压保护效果显著,有助于穿层钻孔抽采上覆远距离煤层的卸压瓦斯。

由于煤层开采涉及的影响因素较多,并且这些因素之间关系复杂,以前的研究工作虽然考虑了开采煤层对于顶底板岩层的卸压增透效应,但是没有系统地将开采煤层和近距离煤层卸压储集和运移规律与采动覆岩移动、裂隙演化过程有机地结合起来;对采场周围的瓦斯富集区不能做出较准确判定。因此,也就不能科学地、完整地、完整地将瓦斯灾害治理工程与采场卸压瓦斯流动规律、瓦斯富集区统一考虑。随着某矿开采深度的逐步延伸,煤层瓦斯含量、瓦斯压力逐步加大,面临瓦斯涌出量激增的严峻形势,特别是该矿的东一采区,由于大量邻近层瓦斯的涌出,造成了综采工作面上隅角瓦斯超限,严重影响了该工作面的安全生产。为此,本次以某矿9#-101综采工作面为研究对象,研究深部综采工作面开采过程的上覆煤岩体裂隙演化特性,探求瓦斯运移规律,为该区域瓦斯治理提供理论依据。

## 2. 矿井概况

某矿东西走向长约2.5 km,南北走向长约5.5 km,根据该矿的矿井瓦斯等级鉴定报告,全矿井相对瓦斯涌出量:CH<sub>4</sub>为8.54 m<sup>3</sup>/t;绝对瓦斯涌出量:CH<sub>4</sub>为45.51 m<sup>3</sup>/min。东一采区的相对瓦斯涌出量:CH<sub>4</sub>

为  $11.32 \text{ m}^3/\text{t}$ ；绝对瓦斯涌出量： $\text{CH}_4$  为  $29.33 \text{ m}^3/\text{min}$ 。该矿井为突出矿井。东一采区共有 8#、9#和 10#三个煤层。其中，8#煤层厚度在 1.8~2.5 m，平均 2.2 m；9#和 10#煤层大部分为合层，中间有 0.25~0.5 m 的夹矸，总厚度平均 3.5 m 左右，其中 10#煤层厚度 2.2 m 左右；8#、9#层间距平均 3.5 m。煤层柱状图如图 1 所示。

柱状图	层厚	累厚	岩石名称	岩性描述
	m	m		
	10.0	10.0	沙质泥岩	灰—深灰色，块状含砂量不均，下部含菱铁质结核
	1.6	11.6	细砂岩	灰色，中厚层状
	6.4	18.0	沙质泥岩	灰色，含植物化石碎片见海豆芽化石
	2.1	20.1	8#煤层	黑色，块状，局部片状，亮煤为主
	0.6	20.7	粉沙岩	灰色，含少量化石
	0.6	21.3	细砂岩	灰色，以石英为主
	3.7	25.0	9-10#煤	黑色、以亮煤为主
	2.0	27.0	砂质泥岩夹煤	灰色，块状，含砂量不均，下部夹亮煤条带

Figure 1. Comprehensive histogram of coal seam in east No. 1 mining area  
图 1. 东一采区煤层综合柱状图

9#-101 综采工作面位于东一采区，机巷风量为  $496 \text{ m}^3/\text{min}$ ，绝对瓦斯涌出量为  $3.47 \text{ m}^3/\text{min}$ 。该工作面为倾斜长壁工作面，倾向长 1500 m，走向长 260 m。9#-101 综采工作面回采过程中，本煤层和邻近层的瓦斯大量涌出，上隅角及回风流瓦斯治理特别困难。

### 3. 煤层开采时上覆煤岩体裂隙演化相似性模拟

本次主要模拟 9#煤层开采过程中的上覆煤岩体垮落动态发展过程，寻找底板和覆岩破裂移动规律，以及随着 9#-101 综采工作面的推进，8#煤层煤体应力和变形分布特征，进而分析煤层开采对合理布置卸压抽放钻孔和消除邻近煤层突出危险性的作用。

#### 3.1. 环形裂隙圈形成的力学分析

煤层顶底板由若干层性质各异的煤岩层组成，当煤体被采出，顶板悬空到一定极限时，直接顶板岩

层垮落，随着工作面的推进，顶板较坚硬的岩层垮落，称为初次来压。以后随着工作面的推进，每隔一定周期关键层垮落一次，工作面也就形成了周期来压。根据开采沉陷学和顶板岩层控制的研究成果，采空区上覆煤岩体存在冒落、离层破断、弯曲下沉“三带”。冒落带经历了冒落、受压、压实过程。离层破断带又称裂隙带，经历裂隙发育、充分发育、压实的过程。当采出面积达一定值后，位于采空区中部的顶板煤岩体裂隙趋于压实，而在采空区四周存在连通的离层裂隙发育区，其形状与老顶岩板破断的“O-X”形类似。由于“O”形圈的存在，人们对采空区卸压瓦斯抽放越来越重视，但如何寻找卸压瓦斯富集区，是高效抽放瓦斯的关键。

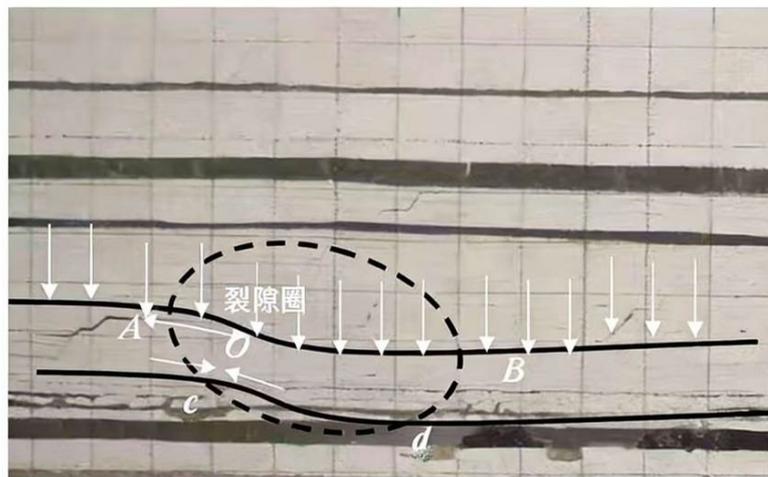


Figure 2. Mechanical mechanism of annular fracture formation  
图 2. 环形裂隙圈形成的力学原理

煤层顶板内瓦斯富集区除了与开采方式、通风方式有关外，还与顶板岩层移动特征有关。根据开采模拟试验和现场观测，采空区四周顶板岩层处在悬空状态，采空区顶板岩层移动是一垮落下陷过程，在靠近煤壁由于顶板没有完全冒落，存在较多的空洞，顶板内的裂隙在相当长的时期内存在。对采空区四周煤壁上覆煤岩体取其一层进行受力分析。图 2 描述了模拟试验的回采工作面回风巷上覆顶板岩层破坏特征。取图中的 AOB 层进行分析，AO 段处在煤岩体中，BO 段处在悬臂位置，并且上面承受一定的荷载，主要来自上覆煤岩体。载荷分布不均匀，以 O 点为中心的一定范围内的载荷接近于零，该层可看作为悬臂梁受力状态。根据岩层破坏特征，该层的底面段因弯曲受岩石层挤压、上面段受拉，同时该岩层还受到剪应力作用，将产生剪裂隙或上面产生张裂隙，这些裂隙大部分与岩层面斜交，自煤壁向采空区方向破断呈  $55^\circ$  向上延伸，沟通上下层面。这些裂隙在相当长时间内不会压实，其诸多裂隙构成的裂隙区边界形似环状圈。其裂隙分为离层裂隙和竖向破断裂隙，前者是随岩层下沉在层与层之间出现的沿层面裂隙，它使煤层产生膨胀变形而使瓦斯卸压，并使卸压瓦斯沿离层裂隙流动；后者是随岩层下沉破断形成的穿层裂隙，它是沟通上、下岩层间瓦斯流动的通道。

### 3.2. 实验方案设计

#### 3.2.1. 物理模拟实验设计

1) 相似模型设计：① 本次实验采用二维物理相似模拟实验平台，其规格为长  $\times$  高  $\times$  宽 = 5.0 m  $\times$  2.0 m  $\times$  0.3 m。② 模型采用的相似比为：线比  $\alpha_l = 1/100$ ；容重比  $\alpha_r = 0.6$ ；时间比  $\alpha_t = 1/10$ ；强度比  $\alpha_R = 6/1000$ 。③ 模拟实验选取的相似材料主要有石膏、碳酸钙、河砂、煤粉等，模型铺设时撒云母粉作为分

层弱面。各煤岩层分布及其物理参数见表 1。④ 模型回采时, 在两端各留 0.75 m 煤柱, 模型回采长度为 3.50 m。⑤ 为考察采动作用的情况下, 顶底板煤岩层位移及裂隙场演化关系, 考虑实验条件下采动过程中的应力变化造成的底板位移不明显, 因此, 在第 30 层下铺设一弹力层。通过弹力模拟下部岩层对 9# 煤、岩层下上的挤压应力, 以便于观察明显的底板位移和岩层裂隙。弹簧的弹性模量:  $E = 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。铺设弹簧个数: 15 个。⑥ 鉴于 9# 煤层开采时的上覆煤岩体活动范围(高度方向)较大, 9# 煤层上部岩层重量采用物理相似配重实现均匀加载。

**Table 1.** Table of rock strata distribution and its physical parameters

**表 1.** 岩层分布及其物理参数表

采区	序号	岩性	真厚(m)	累厚(m)	容重( $\text{t/m}^3$ )	抗压强度(MPa)
东一采区	1	沙质泥岩	10.0	175.3	2.5	38.4
	2	细砂岩	1.6	186.9	2.56	60.8
	3	沙质泥岩	6.4	193.3	2.55	38.4
	4	8#煤	2.1	195.4	1.4	20
	5	粉沙岩	0.6	197.5	2.5	38.4
	6	细砂岩	0.6	198.1	2.56	60.8
	7	9#、10#煤	3.7	198.7	1.4	17
	8	沙质泥岩夹煤	2.0	201.4	2.58	38.4

2) 测量方案: ① 测定指标: 测定 9#、10#煤层及 8#煤层的上覆煤岩体的膨胀变形和应力变化规律。② 煤层变形测量: 在 9#、10#煤层顶板中各布置 1 条水平测线分别测量 9#、10#煤层位移, 各测点间距 0.2 m, 模型两端各布置 7 个测点, 共计 28 个位移测点; 在 8#煤层的上覆煤岩体顶、底板中各布置 1 条水平测线分别测量 8#煤层的上覆煤岩体煤层位移, 各测点间距 0.2 m, 模型两端各布置 7 个测点, 共计 28 个位移测点。③ 煤层应力测量: 在 10#煤层中布置 1 条水平测线测定 10#煤层应力变化规律, 模型两端各布置 7 个测点, 共计 14 个应力测点。在 8#煤层的上覆煤岩体中布置 1 条水平测线测定 8#煤层的上覆煤岩体煤层应力变化规律, 模型两端各布置 7 个测点, 共计 14 个应力测点。

3) 测试仪表: 采用电阻应变式微型压力盒测试煤岩体应力分布规律; 采用 YHD-50 电阻式位移传感器测试上覆煤岩体移动; 采用 YJD-27 静态电阻应变仪测试系统测试应变; 采用微机采集测试数据并进行数据处理。

### 3.2.2. 模拟开挖方案

物理模拟分次进行开挖, 每步开挖 5 m, 分别记录应力变化并测量各位移测点的运动轨迹, 并进行拍照用以分析上覆煤岩体裂隙发育情况。

## 3.3. 实验结果及分析

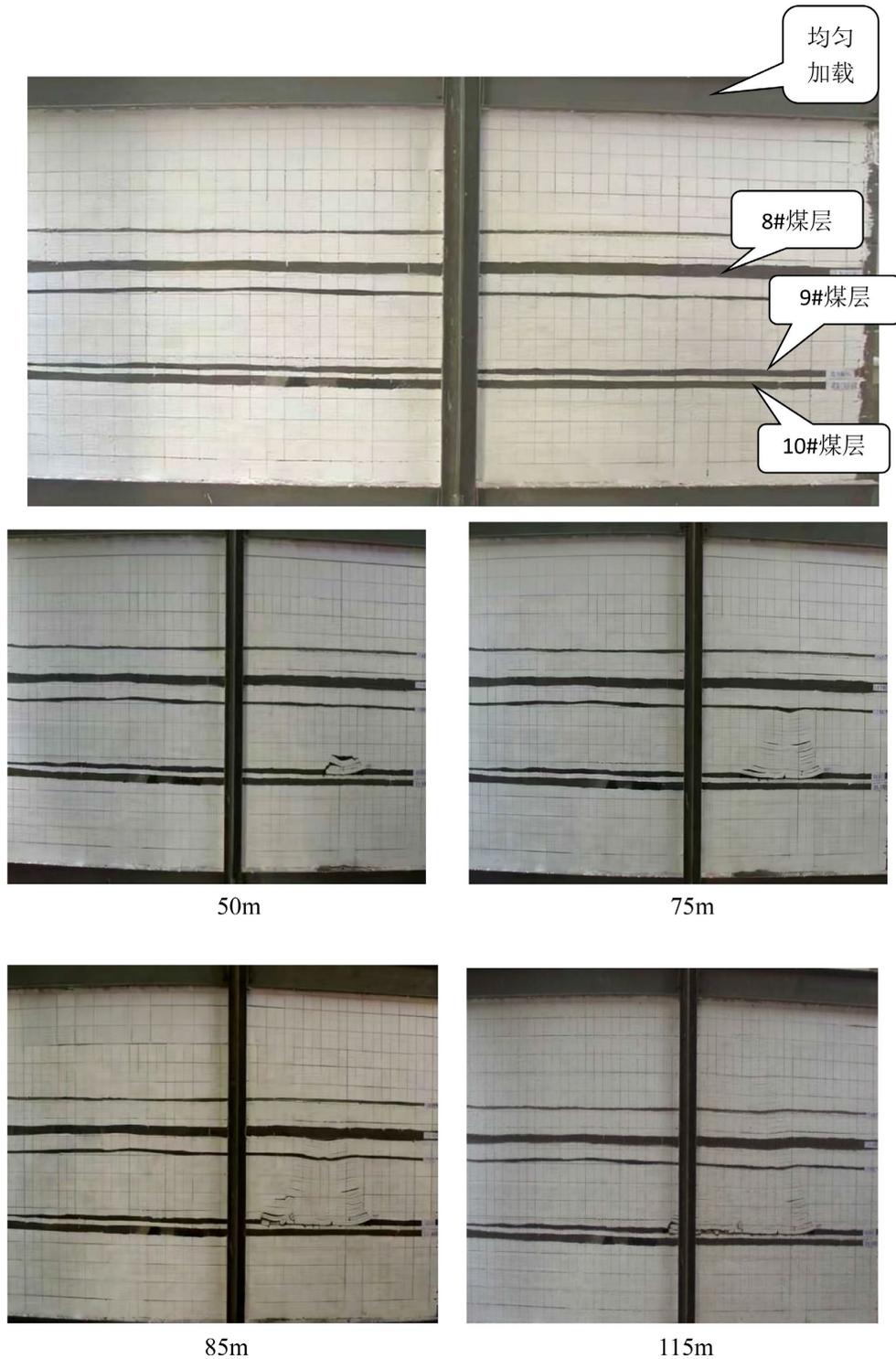
### 回采过程的实验室模拟结果及分析

#### 1) 回采过程的实验室模拟

开挖过程模型全景图, 如图 3 所示。

以 10#煤层底板为水平零点, 取水平位置位于开切眼位置的测点进行分析, 得到各测点的垂直应力和垂直位移随工作面推进的变化曲线图, 分别如图 4、图 5 所示。

由图 3~5 可发现, 在实验室模拟工作面的回采过程中, 随着开采的进行, 顶板上覆煤岩体裂隙区经过了卸压、失稳、起裂、张裂、裂隙萎缩、变小、吻合、封闭的演化过程, 这种演化过程直接影响了采空区内瓦斯的解吸、流动及储集。工作面推进至 75 m, 出现初次来压; 此时, 上覆煤岩体基本呈现对称断裂形态, 产生的裂隙同样对称分布, 因此, 裂隙主要为分布在采空区中部垮落带及断裂带范围内的横向离



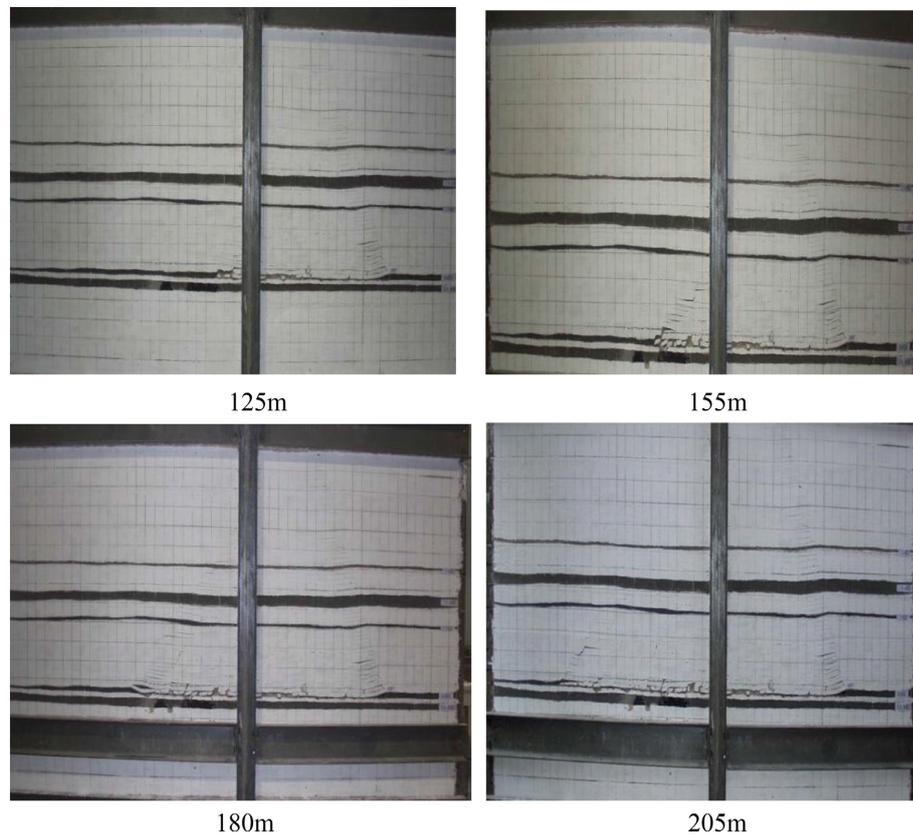


Figure 3. Fracture evolution diagram during model excavation process  
图 3. 模型开挖过程的裂隙演化图

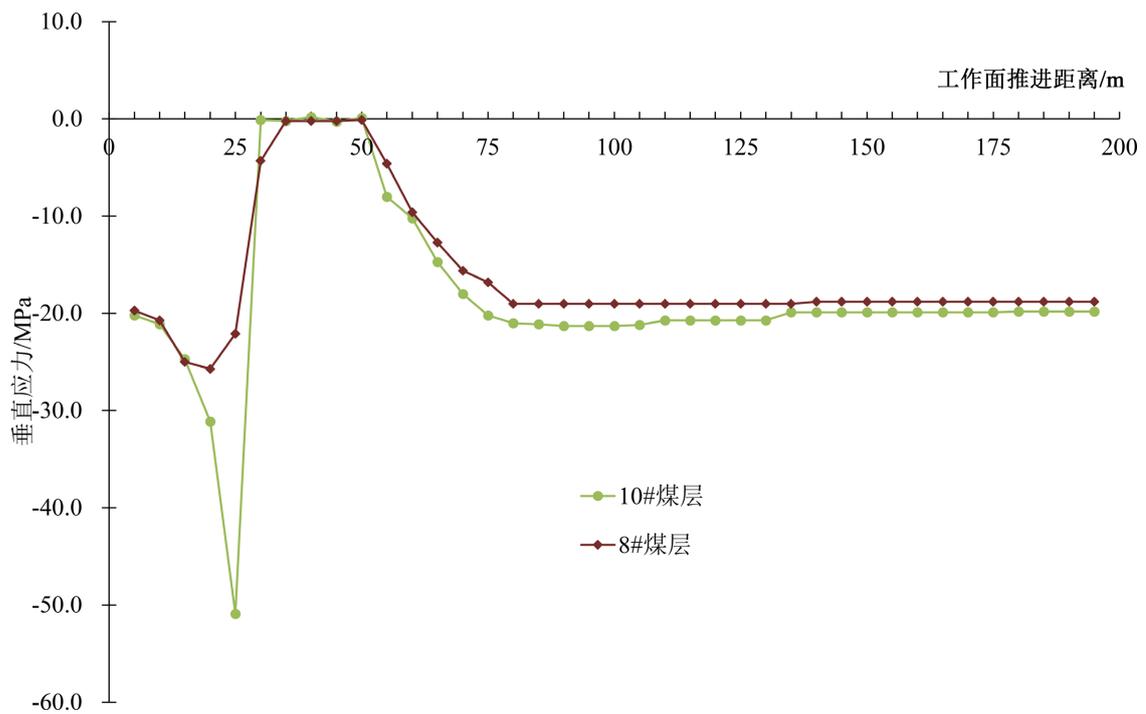


Figure 4. Variation curve diagram of vertical stress at key monitoring points with face advance distance  
图 4. 关键监测点垂直应力随工作面推进距离变化曲线图

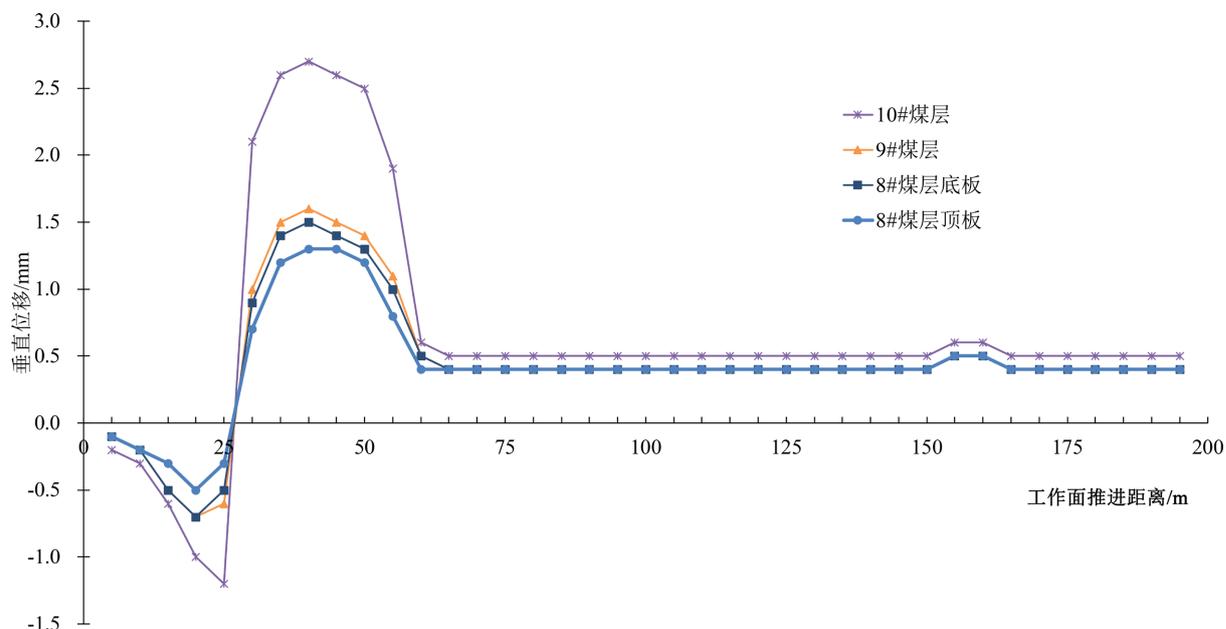


Figure 5. Variation curve diagram of vertical displacement at key monitoring points with face advance distance  
图 5. 关键监测点垂直位移随工作面推进距离变化曲线图

层裂隙, 由于采动影响岩层范围小, 此时煤岩体中主要出现高角度裂隙(无中低角度裂隙)发育现象, 高角度裂隙主要分布在工作面及切眼上方, 为纵向断裂裂隙, 该类型裂隙导通低角度横向离层裂隙, 是导致采空区表现出高导、高渗、高透特征的主要原因。工作面推进至 115 m, 出现第 2 次来压, 随着工作面推进距离的增加, 受采动影响而断裂垮落的岩层范围增大, 此时岩层中出现中高角度裂隙, 主要分布在采空区中部上方, 由于 9#煤层厚度小, 上覆煤岩体以挠曲下沉为主, 因此这些中高角度裂隙多为纵向发育的非贯通型裂隙; 随着横向推进距离及纵向煤岩体离层范围的增大, 低角度、水平横向离层裂隙条数稳步增多。工作面推进至 155 m, 出现第 3 次来压, 切眼处的纵向断裂裂隙仍保持较快增长趋势, 靠近采空区处的断裂裂隙增长趋势较之平缓, 水平、低角度横向离层裂隙增长趋势基本保持一致, 中高角度纵向非贯通裂隙增长较慢。由于工作面推进距离的增加, 下位岩层充分移动垮落和压实, 位于采空区中部上方的水平横向离层裂隙、纵向断裂裂隙因断裂岩块的回转张开度逐渐降低甚至再次闭合。由图 3 可以看出, 上覆煤岩体中分布的裂隙总条数随工作面推进距离的增加而增多, 且随工作面推进距离趋近于充分采动, 裂隙发育趋势趋于平缓。9#-101 工作面采动时, 底板中没有出现宏观破坏裂隙, 即底板岩层仅因卸荷后塑性屈服而损伤, 并没有出现宏观破坏现象。

综合上覆煤岩体裂隙分布特征可知, 随着工作面推进距离的增加, 上覆煤岩体裂隙发育程度逐渐升高, 由于采空区中部覆煤岩体垮落压实裂隙闭合, 裂隙发育区集中在距离工作面煤壁及采空区后方煤壁 30~40 m 范围内, 由于采高较小, 上覆煤岩体垮落角较小约为  $60^\circ$ , 若在 9#煤层开采过程中, 对 9#煤层瓦斯进行抽采, 高位钻孔应布置在这一区域且钻孔走向沿垮落角方向, 可取得较好的抽采效果。在 9#煤层开采过程中, 初次来压时, 布置在距离煤层较近岩层中测线上卸压程度最高, 最大应力降低值为 7 MPa, 第 2 次来压(115 m)时, 卸压范围扩大, 卸压程度开始降低, 但仍保持较高的卸压程度, 应力降低值保持在 4 MPa, 第 3 次来压(155 m)时, 采空区中部岩层中应力值迅速恢复至原始应力水平, 采空区两侧仍存在卸压现象, 9#煤层顶板测线最大应力降低值为 3 MPa, 底板测线最大应力降低值为 1 MPa。9#煤层开采过程中, 8#煤层底板出现明显裂隙, 卸压现象明显。

## 2) 工作面回采垮落后的裂隙带分布

由图6可以看出,随着工作面的推进,煤层上方的煤岩体不断垮落,当推进到接近180 m时,煤层上方的冒落带高度大致为0~9 m的高度,顶板垮落步距约为40 m,裂隙带的高度在10~28 m的范围。



Figure 6. Fracture zone distribution diagram after mining face caving  
图6. 工作面回采垮落后的裂隙带分布图

3) 在煤层开采过程中,煤岩体上的应力是动态变化的,即随着工作面的推进,煤壁上方的应力集中区是不断向前迁移的(远离工作面向煤体深部迁移)。应力集中峰值出现在工作面前方4.0~6.1 m的范围,支撑应力影响范围约为工作面前方15~20 m。工作面后方13~27 m范围内应力积聚下降。上覆煤岩体裂隙分布规律:冒落带高度大致为0~9 m,裂隙带高度在10~28 m的范围。

4) 随着工作面的推进,采空区冒落范围的不断扩大,当采空区长度达到143 m左右时,位于采空区中部的上覆煤岩体裂隙基本被压实,而采空区两端的上覆煤岩体裂隙发育。瓦斯储集也经过了通过裂隙流动网络进入裂隙区、集聚、饱和、溢出、压出等运输过程。即环形裂隙圈是动态的,瓦斯运输和储集也是动态变化的。当裂隙区和采空区的瓦斯储集到一定量后,或者裂隙又被重新压实,就出现了裂隙区和采空区的瓦斯“溢出”,进入新鲜风流中。

#### 4. 结论

通过实验室相似模拟实验,本次详细地分析了煤层采动影响下的上覆煤岩体裂缝发育过程、应力分布和裂缝场演化特征,具体结论如下:

1) 采空区四周顶板岩层处在悬空状态,采空区顶板岩层移动是一垮落下陷过程,在靠近煤壁由于顶板没有完全冒落,存在较多的空洞,顶板内的裂隙在相当长的时期内存在。其裂隙分为离层裂隙和竖向破断裂隙,离层裂隙是随岩层下沉在层与层之间出现的沿层面裂隙,它使煤层产生膨胀变形而使瓦斯卸压,并使卸压瓦斯沿离层裂隙流动;竖向破断裂隙是随岩层下沉破断形成的穿层裂隙,它是沟通上、下岩层间瓦斯流动的通道。

2) 随着工作面的推进,采空区冒落范围的不断扩大,顶板覆岩裂隙区经过了卸压、失稳、起裂、张裂、裂隙萎缩、变小、吻合、封闭的演化过程;当采空区长度达到143 m左右时,位于采空区中部的上覆煤岩体裂隙基本被压实,而采空区两端的上覆煤岩体裂隙发育。瓦斯储集,即环形裂隙圈也是动态的。

3) 随着工作面的推进,煤层上方的煤岩体不断垮落,当推进到接近180 m时,煤层上方的冒落带高度大致为0~9 m,顶板垮落步距约为40 m,裂隙带高度在10~28 m的范围。

4) 在煤层开采过程中,煤岩体上的应力是动态变化的,应力集中峰值出现在工作面前方4.0~6.1 m的范围,支撑应力影响范围约为工作面前方15~20 m。工作面后方13~27 m范围内应力积聚下降。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“煤矿采空区垮落煤岩体堆积体区域瓦斯爆炸热冲击动力演化机制及作用模型”(编号:52574241)、“瓦斯爆炸冲击-地应力动静载荷下巷道壁面煤岩体损伤破坏特性及能量耗散研究”(编号:52574242)。

## 参考文献

- [1] Ye, Q., Wang, W., Wang, G. and Jia, Z. (2017) Numerical Simulation on Tendency Mining Fracture Evolution Characteristics of Overlying Strata and Coal Seams above Working Face with Large Inclination Angle and Mining Depth. *Arabian Journal of Geosciences*, **10**, Article No. 82. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2856-9>
- [2] Ye, Q., Jia, Z. and Zheng, C. (2017) Study on Hydraulic-Controlled Blasting Technology for Pressure Relief and Permeability Improvement in a Deep Hole. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **159**, 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.045>
- [3] Ye, Q., Wang, G., Jia, Z., Zheng, C. and Wang, W. (2018) Similarity Simulation of Mining-Crack-Evolution Characteristics of Overburden Strata in Deep Coal Mining with Large Dip. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **165**, 477-487. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.02.044>
- [4] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 岩层控制的关键层理论及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [5] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 259-263.
- [6] 李树刚, 石平五, 钱鸣高. 覆岩采动裂隙椭抛带动态分布特征研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(Z1): 44-46.
- [7] 雷文杰, 冯拥军, 王兆丰等. 有限元强度增加法模拟综放开采覆岩垮落带与裂隙区分布[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 623-627.
- [8] Zhang, S.J., Li, S.Q., Li, S.Q., et al. (2013) Experimental Study Swelling Deformation Law of Minim Seam in Dual Protective Seam of Seam Group. *Coal Engineering*, No. 9, 87-90.
- [9] 戚灵灵, 彭信山, 刘明举. 急倾斜近距离下保护层开采岩层移动相似模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 37-42.
- [10] 程志恒. 近距离煤层群保护层开采裂隙演化及渗流特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [11] Cheng, Z.H., Qi, Q.X., Li, H.Y., et al. (2016) Evolution of the Superimposed Mining Induced Stress-Fissure Field under Extracting of Close Distance Coal Seam Group. *Journal of China Coal Society*, **41**, 367-375.
- [12] 刘军. 煤层群上下保护层开采围岩应力及裂隙演化规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(4): 56-63, 73.
- [13] 丁海洋, 罗文柯, 万芳芳, 等. 上保护层开采双工作面卸压数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2021, 36(2): 54-64.
- [14] 李树清, 何学秋, 李绍泉, 等. 煤层群双重卸压开采覆岩移动及裂隙动态演化的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2146-2152.
- [15] 涂敏, 黄乃斌, 刘宝安. 远距离下保护层开采上覆煤岩体卸压效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(4): 418-421, 426.
- [16] 刘三钧, 林柏泉, 高杰, 等. 远距离下保护层开采上覆煤岩裂隙变形相似模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 51-55, 60.
- [17] 张勇, 张春雷, 赵甫. 近距离煤层群开采底板不同分区采动裂隙动态演化规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 786-792.
- [18] 彭永伟, 齐庆新, 汪有刚, 邓志刚, 李宏艳, 李春睿. 煤体采动裂隙现场实测及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4188-4193.
- [19] 邱治强, 高明忠, 汪文勇, 等. 不同保护层开采模式卸压增透差异性研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(4): 11-15.
- [20] 胡杰, 冯康武, 孙臣, 等. 近距离薄煤层群上保护层开采邻近层卸压瓦斯抽采模式探究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 65-71.
- [21] 李丽, 陈志平, 张以晨, 等. 近距离煤层群开采上保护层被保护层卸压瓦斯治理实践[J]. 安全, 2021, 42(6): 61-68.
- [22] 黄勇, 姚邦华, 袁本庆. 保护层开采卸压瓦斯运移规律及强化抽采技术研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 90-93.
- [23] 徐超, 程远平, 王亮等. 巨厚关键层对远程下保护层开采卸压效果的影响[J]. 煤矿安全, 2012, 43(8): 26-29.