

宽窄条带间隔部分充填的准静态开采实验研究

赵云龙^{1,3}, 潘东江^{2,3}, 王海琳¹, 于怀磊¹, 来海斌¹, 王敏¹

(1. 中国矿业大学 孙越崎学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 以某矿13煤及以上150m岩层作为研究对象, 根据相似模拟原则, 进行平面应力相似模拟实验, 重点分析了煤层开采且充填完成后覆岩达到稳定状态时的位移和应力变化及特点。通过实验分析, 40%宽窄条带间隔充填能显著控制亚关键层基本顶和主关键层的下沉, 从而控制覆岩整体运动, 使其保持准静态状态; 宽窄条带间隔距离小, 形成几何不连续、工程效果连续的80m等效大条带, 均化应力集中, 减轻宽条带承重, 满足充填要求; 层状岩体的“被夹板弯曲”特点, 使得宽窄充填条带上方的岩层相对位移较小, 侧向煤壁达到应力集中峰值, 但不破坏, 满足绿色开采的要求。

关键词 宽窄条带; 部分充填; 关键层; 相似模拟实验

中图分类号 TD823.7 **文献标识码** A **文章编号** 1006-6225 (2015) 06-0010-05

Quasi-static Mining Experiment of Wide and Narrow Strip Interval Stowing

ZHAO Yun-long^{1,3}, PAN Dong-jiang^{2,3}, WANG Hai-lin¹, YU Huai-lei¹, LAI Hai-bin¹, WANG Min¹

(1. Sunyueqi School, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Mining Engineering School, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resource & Safety Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Taking 13th coal seam and 150m rock strata over the seam of a mine as simulation object, plane stress analogue simulation was made to analyze displacement and stress variation characteristic when overlying strata reached stable state after stowing was finished. Results showed that 40% wide and narrow strip interval stowing could obviously control the subsidence of sub-key basic roof and main-key stratum, thus control whole movement of overlying strata and keep it be in quasi-static state. Small wide and narrow strip interval formed equivalent large strip which was geometrical discontinuous but engineering effect was continuous, and homogenized stress concentration reduced wide strip load and met stowing requirement. The characteristic of plywood bend made the relative displacement of rock strata over stowing strip be small, and stress reach summit value but cannot result into failure, which met the requirement of green mining.

Keywords: wide and narrow strip; part stowing; key stratum; analogue simulation experiment

采空区充填开采技术是绿色开采技术的重要组成部分, 尤其是在资源日益紧缺、村镇分布日益密集、交通日益向西部发展的形势下, 其更加受到重视^[1-3]。但是, 随着煤炭市场持续低迷, 较高的充填成本成为制约其发展的瓶颈。针对这一难题, 部分充填方式以绿色开采为指导, 改变充填体结构, 控制围岩运动, 保持围岩稳定, 取得了较大的进步。部分充填相对全部充填而言, 充填量和充填范围仅是采出煤量的一部分, 仅对采空区局部或离层区和冒落区进行充填, 依靠覆岩结构充填体及部分煤柱共同支撑覆岩, 控制开采沉陷^[4], 可以呈现准静态开采特征。按照充填的位置与充填时间的不同, 共有3种部分充填方式: 采空区膏体条带充

填、条带开采冒落区注浆充填、覆岩离层分区隔离注浆充填^[5]。利用部分充填开采方式, 不仅能控制上覆岩层运动, 控制地表沉陷, 还能充分利用资源, 合理使用充填材料, 降低充填成本, 提高资源采出率^[6], 满足绿色开采基本要求。

随着资源与经济关系日益紧张, 传统的充填方式面临严峻的考验, 部分充填作为协调两者关系的技术, 引起诸多专家学者和煤矿企业的关注, 并且在理论和实践上都取得了一定突破。许家林等提出了部分充填开采的概念和三项部分充填开采技术^[7]; 潘卫东等提出充填矸石替换“三下”压煤充填保水采煤技术模式, 在采高3m的条件下, 充填率在75%, 可以保护顶板上方20m以外的含水

收稿日期 2015-04-01

DOI 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2015.06.003

基金项目 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2013CB227904); 2013年国家级大学生创新训练项目(201310290068)

作者简介 赵云龙(1991-), 男, 山西阳泉人, 在读硕士研究生, 从事采矿工程方面的学习与科研工作。

引用格式 赵云龙, 潘东江, 王海琳, 等. 宽窄条带间隔部分充填的准静态开采实验研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(6): 10-14, 30.

层不被破坏^[4]; 王连国、缪协兴采用断裂力学得出了条带煤柱破坏宽度的计算公式^[5]; 邵小平通过研究陕北中小型矿井保水开采煤柱的稳定性, 对合理选择条带宽与煤柱宽提供了借鉴^[6]。目前, 虽然学界在充填方式对于围岩稳定性的影响方面有了一定的研究成果, 但是相对较少^[4], 对于充填度、充填条带的宽度以及充填条带之间的距离和适应性研究也相对较少。本文针对在长壁工作面后方冒落区合理布置宽窄间隔充填条带, 进行平面应力相似模拟实验, 待模型达到稳定状态时, 进行上覆岩层活动规律分析。

1 部分充填理论分析

1.1 工程背景

实验主要以某矿 13 煤作为模拟开挖对象, 研究上覆岩层下沉结果及规律。该矿所处井田地面标高为 +22.4~+23.4m, 处于冲击平原地带, 邻近河流, 地势平坦, 东北部有低矮山丘, 最高点标高为 +126m, 总体趋势为北东高、南西低。全井田共发现 30 条断层, 其中约 80% 的断层落差在 50m 以下, 延展方向以北西西和北西向为主。13 煤层含煤面积 37.04km², 可采面积 36.57km², 大部分赋存标高为 -410~-450m, 煤层厚度 0.77~6.43m, 平均 4.00m, 属结构简单、全区可采的稳定煤层。

由于井田所处地理位置的特殊性, 上覆岩层运动产生裂隙可能贯通断层, 打破含水层水力平衡和引起地表水侵入, 发生矿井突水, 还能造成地表沉陷, 破坏耕地和地面建筑物, 加剧环境污染。因此有必要开展对该矿赋存条件下的宽窄条带间隔充填静态开采实验研究, 控制岩层运动, 保证上覆岩层的整体完整性。

1.2 理论分析计算

在进行平面应力相似模拟实验前, 根据原型与模型的物理力学参数, 首先计算确定基本顶的初次来压步距和充填条带的最小宽度。

1.2.1 基本顶初次来压步距计算

根据模型模拟工作面的情况, 可以将基本顶视为固支梁, 采用断裂计算的方法, 运用如下公式计算固支梁断裂时的极限垮距。

$$L_r = h \sqrt{\frac{2R_t}{q}} \quad (1)$$

$$q = gHa_c \quad (2)$$

式中, L_r 为基本顶断裂时的极限垮距; h 为顶板岩梁底部单层岩层厚度; R_t 为基本顶的极限抗拉强度, 实验测值为 0.5MPa; q 为基本顶上覆载荷,

gH 为基本顶均布载荷, 其值为 10.63MPa; a_c 为应力相似比^[8]。

根据公式 (1), (2) 可以计算出基本顶初次来压步距为 $L_r = 0.37m$, 即模型的极限垮距为 0.37m。

1.2.2 膏体充填条带最小宽度计算

采用极限强度理论, 要保证煤柱稳定, 应当有一定的安全系数, 其值为:

$$F = \frac{s_p}{P_p} \quad (3)$$

式中, F 为安全系数; s_p 为充填条带强度, MPa; P_p 为充填条带承受载荷, MPa。

充填条带承受载荷即为上覆岩层全部重量都由充填条带承担, 根据地质条件, 煤层埋深 450m, 即可计算得出充填条带承受载荷 $P_p = 11.25MPa$, 查阅相关文献, 根据膏体充填体单轴压缩试验得抗压强度为 6.5MPa, 按比涅乌斯基 (Bieniawski) 公式^[10] 计算, 即:

$$s_p = s_m (0.64 + 0.36W_p/h)^n \quad (4)$$

式中, s_m 为立方体的充填强度, MPa; W_p 为充填条带宽度, m; h 为条带采高, m; 当 $W_p/h > 5$ 时, $n = 1.4$, 当 $W_p/h < 5$ 时, $n = 1$ 。

根据数值模拟结果, 取 $F = 2.8$, 由公式 (4) 可以反演出条带充填宽度 $W_p = 27.4m$, 根据几何相似比可以得出满足强度条件的模型模拟条带充填宽度为 $W_{min} = 0.27m$ 。

可以分析得知: 在满足强度条件的最小条带宽度下, 两侧采空区宽度大于基本顶极限垮距; 在要求两侧采空区宽度均不大于基本顶极限垮距时, 条带最小宽度是 76m。为节省充填成本, 同时满足条带充填强度要求和基本顶极限垮距要求, 采取宽窄条带间隔充填方式, 即宽条带的宽度为 30m, 窄条带的宽度为 15m, 左右与宽条带各相距 10m。窄条带将采空区宽度限制在极限垮距之内, 并分担宽条带应力, 减轻宽条带的承重, 均化应力集中。同时由于宽窄条带间隔小, 形成几何不连续、工程效果连续的 80m 等效大条带, 满足充填要求。

2 相似模拟实验

2.1 相似原理

为了更直观方便研究煤层上覆岩层的下沉状况, 取 13 煤层以上 150m 岩层作为研究对象, 并将性质相似的岩层合并整理, 通过平面应力相似模型模拟开采及充填过程并作理论分析。平面应力相似模拟实验模型如图 1 所示。模型尺寸为: 宽度×

高度×厚度=2260mm×1500mm×300mm。左右两边界位移受水平约束，下边界位移受垂直约束，上边界以气囊加压，模拟地应力场。为尽可能模拟实际采场现状，根据模型宽度和原型材料的物理力学参数，按照相似原理，选取几何相似比 1：100，模拟实际采宽 226m。

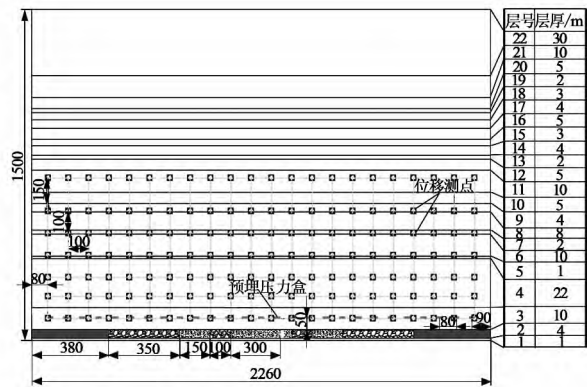


图 1 平面应力相似模拟实验模型

表 1 模型各层材料的物理力学参数

层号	岩性	总层厚/mm	配比	密度/ (t·m ⁻³)	沙子 总重/kg	碳酸钙 总重/kg	石膏 总重/kg	水总 重/kg	模拟材料单轴 抗压强度/kPa	岩石单轴抗 压强度/MPa
1	炭质泥岩	10	455	1900	10.74	1.34	1.34	1.12	758	83.2
2	13 煤	40	773	1900	46.99	4.70	2.01	4.47	670	70.3
3,4,6,8,10,12 14,18,20,22	砂质泥岩	1020	637	1900	1173.68	58.69	136.91	114.10	764	84.7
5 7 16 19	中砂岩	100	537	1900	111.87	6.71	15.66	11.19	797	87.9
13	细砂岩	20	437	1900	21.48	1.61	3.76	2.24	822	94.3
11	花斑状砂 质泥岩	100	637	1900	115.07	5.75	13.42	11.19	764	84.7
9	花斑状泥岩	40	455	1900	42.96	5.37	5.37	4.47	758	77.8
21	粗砂岩	100	773	1900	100.68	16.78	16.78	11.19	802	85.1
15, 17	泥岩	70	755	1900	82.23	5.88	5.88	7.83	703	71.6

2.2.2 膏体充填相似模拟材料优选

要研究部分充填对煤层上覆岩层移动的影响，必须严格控制充填体模拟材料的质量。根据相似原理，以细河沙、碳酸钙粉和石膏粉作为模拟原料，参考李鸿昌所著的《矿山压力的相似模拟试验》^[3]，选择 873，973，1073 三种相似配比，进行充填相似模拟材料优选实验。借助尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的模具，制作充填材料的正方体相似模型，每种配比各 2 组，每组各 3 个，共计 18 个。分别在模型成型 1d 和 28d 后，使用 MTS 单轴压缩试验机进行抗压试验，得到各组模型的单轴抗压强度，详见表 2。

膏体的单轴抗压强度为 6.5MPa，按照应力比 1：150，膏体充填条带相似模拟材料的要求单轴抗压强度为 0.043MPa，结合表 2，配比为 873 的模型在 1d 后达到的强度较其他模型更符合要

求。所以选择细河沙、碳酸钙粉和石膏粉相似比 873 作为定义原型 (p) 与模型 (m) 之比为比例因子，以 a 表示。定义 l 为长度，g 为容重，s 为位移，c 为应力。对每层模拟岩层，重力相似条件 $a_g = g_m / g_p$ 为常数。几何相似条件 $a_l = l_m / l_p = 1/100$ ，则位移相似条件 $a_s = a_l = 1/100$ 。根据实测，模拟岩体与实际岩体的平均容重之比 $a_g = g_m / g_p = 2/3$ ，则应力相似条件 $a_c = a_l / a_g = 1/150$ 。

2.2 相似材料

2.2.1 煤岩相似材料

相似材料的选取对实验成功与否和准确性起关键作用。根据模拟岩层实际情况，选取煤层上下 22 层岩石作为研究对象，由下向上编号，按照相似原理，用细河沙作骨料，碳酸钙粉和石膏粉作黏结料，确定相似配比，辅

以一定比例的水，制作相似于各岩层的混合相似材料。通过计算和实测得模型各层材料配比、用料量及单轴抗压强度，具体参数见表 1。

表 2 充填相似材料单轴抗压强度

配比	组别	强度 /MPa	
		1d	28d
873	1	0.038	0.132
	2	0.038	0.079
	3	0.057	0.116
973	1	0.068	0.132
	2	0.124	0.105
	3	0.097	作废
1073	1	0.030	0.249
	2	0.030	0.268
	3	0.049	作废

2.3 仪器设备

该实验架的模拟图如图 1 所示。在模型上部均匀放置气囊，利用气泵给气囊充气加压。气泵的加载范围为 0～0.2MPa，补偿加载模拟应力为

0.071MPa, 满足需求。在整个实验过程中, 其余主要仪器设备如下。

(1) 模型铺设制作过程 电子称 1 台 (量程 > 50kg), 用以称料; 材料试件成型模具 (70.7mm×70.7mm×70.7mm) 6 个、振动机 1 台, 用以制作充填体试块, 进行压缩试验, 测量其单轴抗压强度; 材料搅拌机 1 台, 用以搅拌模拟配料, 保证混合均匀; T 型平板锤 2 个, 在模型铺设过程中捣实各层, 避免出现松散层。

(2) 数据及图像采集过程 计算机 1 台, 记录和处理实验数据; 天远三维摄影测量系统 1 套, 通过相机拍照记录各位移测点的下沉量, 并上传到计算机; 压力盒 30 个, 用以记录各时刻压力盒铺设位置的应变; TS3890 程控静态电阻应变仪 1 套, 将压力盒记录的应变数据上传到计算机。

3 实验步骤

完整的平面应力相似模拟实验是一个持续时间长且复杂的系统性工作, 主要包括相似材料的筛选、相似材料配比试验、模型的堆砌上架、位移和应力观测点布置、模型开挖以及数据、图像的采集与整理 6 个部分^[3], 具体的实验步骤为:

(1) 准备好细河沙、碳酸钙粉和石膏粉, 在实验前将细河沙晒干后进行筛分, 去除杂质。

(2) 按照相似配比原理, 选取符合原型材料力学参数的煤岩各层和充填材料的对应配比。

(3) 按照既定配比, 计算确定各岩层所需要的相似材料的量, 在平面应力相似模拟实验架上铺设各层, 同时安设完成模型两端护板和护梁。依据关键层理论^[4], 通过计算, 煤层的最近的基本顶岩层为亚关键层, 厚 10m, 亚关键层上覆岩层厚度为 22m, 且岩性与亚关键层相同, 为主关键层。将预埋压力盒按照图 1 所示, 在铺设过程中埋入指定测量位置: 在距离模型底边界 210mm 处布置压力盒测线, 边界压力盒与模型左右边界均相距 90mm, 压力盒之间距离为 80mm, 共计 27 个。

(4) 待模型铺设完成并风干 10d 后, 在保证模型稳定的条件下, 两侧间隔拆除护板, 加速风干。风干 15d 后, 保留顶部护板以防止压力偏载, 其余全部拆除, 再风干 3d。等到模型达到强度要求时, 将其一侧表面刷白, 布置位移测点。在距离模型底边界 100mm 处布置第 1 条位移测点线, 边界测点到模型左右边界 80mm, 各测点之间间隔 100mm, 以此布置方法向上每隔 100mm 依次标定 5 条位移测点线, 第 7 条测点线与第 6 条测点线间隔

150mm, 共计 7 条测点线, 154 个测点, 见图 1。

(5) 布置测点完毕后, 开始对模型进行加压至 0.071MPa, 30min 后开挖。根据计算, 最终确定开挖方案为: 两侧留边界煤柱 380mm, 开挖顺序自左向右。当采空区 AB 为 350mm 时, 开始边采边布置第 1 条窄条带 BC, 带宽为 150mm, 继续开采煤层到留场 CD 为 100mm, 布置宽条带 DE 为 300mm。由于模型对称, 宽条带 DE 布置在模型中部, 则模型右侧的采充情况与左侧完全相同, 完成后, 充填度为 40%。开挖完成后的模型局部图见图 2。

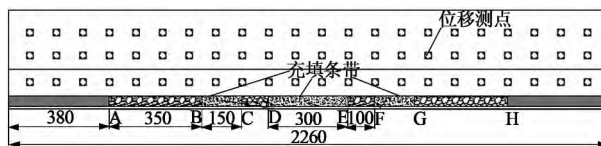


图 2 开挖完成时平面应力相似模型局部

(6) 模型开挖完毕后, 通过位移测点和预埋压力盒对模型的位移和应力进行记录、测量。开挖完成后 60min 后开始测量: 静态电阻应变仪全程记录压力盒应变变化, 摄影测量系统每隔 30min 进行一次测点位移测量, 待模型覆岩运动达到稳定后, 将测得数据与开始测量数据进行比较处理。

4 实验结果及分析

模型测点布置完成后的实照图见图 3, 模型开挖并充填后达到稳定状态时裂隙扩展情况的实照图见图 4。

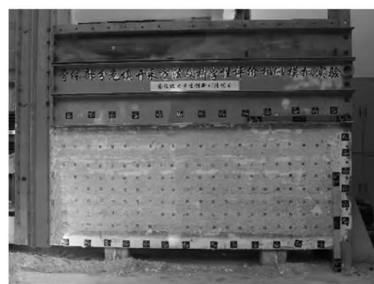


图 3 测点布置完成图



图 4 稳定状态时模型裂隙扩展图

4.1 覆岩位移变化及特点

借助天远三维摄影测量系统, 对充填后模型的

各个测点每隔 30min 进行 1 次位移记录, 当模型模拟岩层运动达到稳定状态时, 根据几何比换算得到各层位移量曲线如图 5 所示。

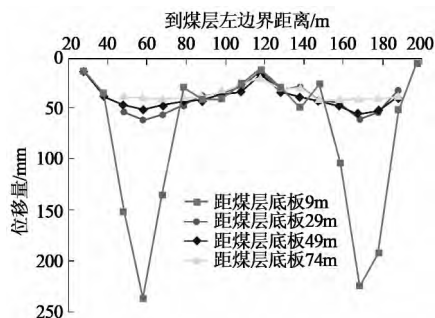


图 5 煤层上方距模型底板不同距离岩层位移曲线

由图 4、图 5 可知, 部分充填开采煤层上覆岩层位移具有如下特征:

(1) 当模型达到稳定时, 裂缝带发育到约 16 倍采高的位置, 垮落角大约为 70° , 以竖向为主。随着裂隙的发育, 模型形成裂缝带与弯曲下沉带, 由于铺设材料硬化、采高小等原因, 冒落带不明显。

(2) 距模型下边界 100mm 的位移测点布置在亚关键层上, 其余测点布置在主关键层及其以上位置。以模型中线将模型划分为左右两个区域, 两侧位移曲线呈对称状。两侧采空区 AB, GH 整体覆岩最大下沉量分布区, 最大下沉量约为 240mm, 最小下沉量基本分布在宽条带 DE 上方, 约为 25mm。

(3) 亚关键层基本顶最大下沉量约为主关键层的 5 倍, 约为采高的 6%。主关键层及上覆岩层位移变化幅度较小, 且均控制在 50mm 位移量范围内, 并由下向上递减。在主关键层作用下, 当沉陷到达地面时, 地表下沉系数在 1.25% 以内, 远小于 6%, 表明关键层有效地控制覆岩运动, 整体性强, 能达控制岩层移动的目的。

(4) 整个开采并充填后的上覆岩层均表现下沉特性, 但宽窄条带 BC, DE, FG 相比较两侧采空区 AB, GH 和宽窄条带间隙 CD, EF, 由于小间隔布置, 具有等效大条带的作用, 使主、亚关键层位移量较小, 出现相对上凸现象, 体现了层状岩体作为“被夹板弯曲”的特征^[4]。

(5) 总体位移分布曲线仍然与传统开采沉陷盆地相类似, 但经过充填, 位移量得到明显优化, 能达到绿色开采的要求。

4.2 覆岩应力变化及特点

煤层开采及充填必然引起采空区围岩应力的重

新分布, 通过预埋在平面应力相似模型内的压力盒, 借助 TS3890 程控静态电阻应变仪对实验模型的应变变化进行记录, 达到稳定状态时, 通过压力盒“应力-应变”关系, 并根据应力比换算, 绘制成如图 6 所示的应力曲线。

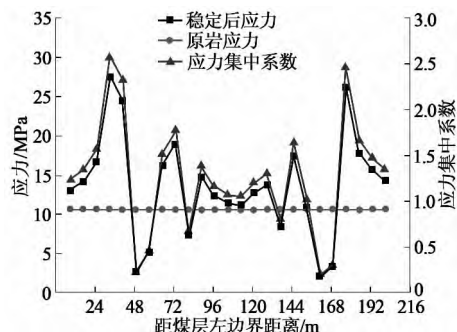


图 6 平面应力相似模型预埋压力盒应力曲线

根据图 6 分析可知, 宽窄间隔条带部分充填开采煤层上覆岩层应力具有如下特征:

(1) 平面应力相似模型达到稳定状态时, 应力对称分布, 且宽条带上的应力值大于窄条带, 约为 11.16 MPa, 达到了弱化应力集中的目的。

(2) 结合图 2, 采空区 AB, GH 空顶距最大, 由于层状岩体的“被夹板弯曲”特征, 达到新的平衡时, 侧向煤壁外侧出现应力集中峰值, 达 27.4 MPa; 宽窄条带靠近两侧采空区边缘也出现应力集中, 窄条带的边界应力集中系数大于宽条带, 应力集中系数差值为 0.39, 在充填过程中要注意窄条带的加固。

(3) 依据刚度理论, 建立层状岩体“被夹板弯曲”的力学模型, 见图 7。根据实测, 煤壁的刚度 K_1 大于充填条带的刚度 K_2 , 在相同形变的条件下, 侧向煤壁的应力集中程度更大, 加上裂隙带垮落角深入煤壁内侧而引起的边角效应的影响, 煤壁外侧出现应力集中峰值, 应力集中系数为 2.53。

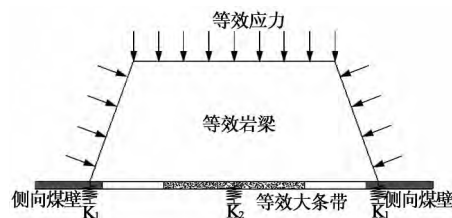


图 7 层状岩体“被夹板弯曲”的力学模型

5 结束语

本实验宽窄间隔条带部分充填度为 40%, 在充填体作用下, 岩层不同位置下沉率不一样, 开采 (下转 30 页)

保了该工作面切眼的顺利施工及煤矿的安全开采。

4 结 论

(1) 根据工作面实际地质情况,采用反射共偏移地震勘探方法对 3404 回采工作面前方 100m 工作范围内的地质构造进行探测,该方法弥补了地面三维地震方法对矿井某些小地质构造定义不准的局限。

(2) 采用小道间距的多次覆盖观测系统的偏移成像地震勘探技术,通过多道接收地震数据,并定义出射线平均速度,将地震时间剖面转化成深度空间剖面,从而压制干扰波,增强有效波,提高了地震资料的信噪比,与陆地声纳技术较相似。

(3) 在对射线平均速度进行定义时,必须要进行工作面基础数据采集工作,目的是获得煤岩体介质的速度参数,继而提高地质成果解释的准确性。可以利用钻孔波速测试方法进行获取,或者根据研究区其他物探资料进行确定。

(4) 反射共偏移地震勘探处理中,由于不需要对原始地震资料进行动校正处理。因此,其保留了原始地震反射波的许多原有特征,即其动力学以及运动学特征,从而提高了地下地质构造的细节再现性。

(上接 14 页)

煤层上覆岩层沉陷系数被控制在 6% 以内,而且通过宽窄充填条带的相互作用,弱化了应力集中,有效支撑覆岩,保证上覆岩层的整体性和完整性,使覆岩保持准静态状态,同时满足经济要求,符合绿色开采的基本要求。然而,这种方法虽然在工艺上能节约大部分成本,但充填材料的质量差,支撑年限受到极大限制,只有采用更高效的充填材料和先进的充填设备,才既能从根本上降低充填成本,又能保证充填体的服务年限,这将是以后研究的重点和必然趋势。

参考文献

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术 [J]. 中国矿业大学学报, 2003 (4): 343-347.
- [2] Zhang Q, Zhang JX, Huang YL. Backfilling technology and strata behaviors in fully mechanized coal mining working face [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012 (2): 151-157.
- [3] 许家林. 煤矿绿色开采 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [4] 许家林,朱卫兵,李兴尚,等. 控制煤矿开采沉陷的部分充

参考文献

- [1] 陆基孟. 地震勘探原理 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1993.
- [2] 段天柱,赵洪月,胡运兵,等. 煤矿掘进巷道地震反射波超前探测技术及应用 [J]. 矿业安全与环保, 2013, 40 (2): 80-82.
- [3] 杨思通,程久龙. 煤巷地震超前探测数值模拟及波场特征研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (10): 1633-1637.
- [4] 张平松,刘盛东,李培根. 井巷煤岩体内构造特征反射波探测技术及应用 [J]. 矿业安全与环保, 2006, 33 (6): 43-46.
- [5] 杨希瑞,刘志文,王 萍,等. 反射共偏移探测技术在提高煤炭采出率中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35 (4): 34-36.
- [6] 李文辉,高 锐,王海燕,等. 深地震反射剖面构造信息识别研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (12): 4138-4146.
- [7] 杨思通. 矿井巷道地震超前探测三维全波场数值模拟与探测方法研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [8] 毛宁波,戴塔根. 地震放像与空间成像、医学成像的交叉与融合 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (4): 643-646.
- [9] 聂鹏飞. 地震勘探噪声压制方法研究与应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [10] 裴志峰. 地震勘探找煤 [J]. 科技信息 (科学教研), 2007 (25): 558.
- [11] 毛惠庚. 二维地震勘探在新疆准东煤田普查中的应用 [J]. 科技信息, 2010 (3): 31-32, 45. [责任编辑: 施红霞]
- 填开采技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006 (1): 6-11.
- [5] 谢文兵,史振凡,陈晓祥,等. 部分充填开采围岩活动规律分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2004 (2): 162-165.
- [6] 潘卫东,季文博. 煤矿井下充填保水开采的技术模式探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 27 (8): 11-17.
- [7] 王连国,缪协兴,王学知,等. 条带开采煤柱破坏宽度计算分析 [J]. 岩土工程学报, 2006 (6): 767-769.
- [8] 邵小平,石平五,王怀贤. 陕北中小矿井条带保水开采煤柱稳定性研究 [J]. 煤炭技术, 2009, 28 (12): 59-61.
- [9] 方新秋,郝宪杰,兰奕文. 坚硬薄基岩浅埋煤层合理强制放顶距的确定 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010 (2): 388-393.
- [10] 许家林,尤 琪,朱卫兵,等. 条带充填控制开采沉陷的理论研究 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (2): 119-122.
- [11] 屠世浩,马文顶,万志军,等. 岩层控制的试验方法与实测技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [12] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [13] 尹光志,李小双,魏作安,等. 边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011 (S1): 2913-2923.
- [14] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 岩层控制的关键层理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. [责任编辑: 徐乃忠]