

晋平煤业充填开采下覆岩变形特征及机理研究

马浩凯

山西襄矿晋平煤业有限公司, 中国·山西 襄垣 046200

摘要: 充填开采作为防止岩层移动和破坏的开采方式, 研究充填背景下岩层的稳定性及破坏机理具有重要意义。论文采用理论分析、数值模拟和现场实测协同的手段, 以晋平煤业 10513 工作面为工程背景, 利用 FLAC3D 对该工作面充填前后岩层的塑性区、位移及主应力差分布特征进行对比。研究结果: 充填采空区后, 工作面回采过程中覆岩剪切塑性区显著减少, 拉伸塑性区没有出现, 顶板位移分布呈现一种“倒漏斗”状, 最大主应力差并没有偏转至充填后的上覆岩层, 致使地面沉陷得到有效控制。

关键词: 充填开采; 破坏机理; 拉伸塑性区; 主应力差

Research on the Deformation Characteristics and Mechanism of Overburden Rock under Filling Mining in Jinping Coal Industry

Haokai Ma

Shanxi Xiangkuang Jinping Coal Industry Co., Ltd., Xiangyuan, Shanxi, 046200, China

Abstract: As a mining method to prevent rock movement and damage, it is of great significance to study the stability and damage mechanism of rock layers under the background of filling mining. The paper adopts a collaborative approach of theoretical analysis, numerical simulation, and on-site measurement. Taking the 10513 working face of Jinping Coal Industry as the engineering background, FLAC3D is used to compare the distribution characteristics of plastic zone, displacement, and principal stress difference of the rock layers before and after filling of the working face. Research results: After filling the goaf, the shear plastic zone of the overlying rock significantly decreased during the mining process of the working face, and the tensile plastic zone did not appear. The displacement distribution of the roof showed a “inverted funnel” shape, and the maximum principal stress difference did not deviate to the overlying rock layer after filling, resulting in effective control of ground subsidence.

Keywords: backfill mining; destructive mechanism; stretching plastic zone; principal stress difference

0 前言

由于煤炭开采引起的地表沉陷, 大大超过了环境容量, 会严重影响地面建筑物与人类活动, 条带开采从传统开采方法做出变革, 尽最大可能减缓煤炭采出对生态环境的影响, 作为常用的下沉控制技术, 可以有效减少地表下沉和变形^[1-2]。采用巷式条带充填开采工艺方法进行工作面煤炭资源的开采, 一方面实现工业废弃物的妥善固化处置, 另一方面充填回采区域资源回收率大于 88%, 实现煤炭资源的高回收率开采; 将采煤与充填分开在不同区域内进行作业, 互不干扰, 大大提高生产效率。

在钱鸣高院士提出的煤炭绿色开采的理念下, 国内外学者针对煤矿充填开采技术工艺、充填材料成本控制及充填效果与性能等问题做了大量研究^[3-4]。瞿群迪^[5]等在对因煤炭开采导致的水土流失、地表沉陷等问题现场勘察后, 拟合了描述此类现象的公式, 并基于该式, 提出了控制地表沉陷的多种方法。王家臣^[6]等利用矸石充填采空区, 通过多种数值模拟方案与相似模拟比较, 提出了支架在充填开采中的重要

作用, 揭示了长壁充填开采下岩层的应力变化规律与移动特征。王金安^[7]等对邢台石膏矿现场塌陷进行研究, 得出了采空区下顶板变形破断的规律, 分析了长时间流变对岩层垮落的重要性。郝庆旺^[8]等基于断裂力学, 对采空区上的岩层裂隙运动规律进行了研究, 利用能量转移与虚位移协同运算, 可以为充填矿物的强度确定提供参考。李永明^[9]等研制了一种以矸石为主体的充填材料, 在急倾斜薄煤层下研究了材料内部水化作用, 定量确定了充填材料的合理参数。

综上所述, 学者们对各种煤层条件下, 充填开采后的岩层运动规律、某些特殊地质条件下采空区顶板断裂及充填材料内部水化机理进行了深入研究^[10-11]。论文基于上述研究成果, 以晋平煤业 10513 工作面为工程背景, 揭示了主应力差导致的岩体破坏机理, 详细分析了充填前后工作面上覆岩层的塑性区范围、位移分布与主应力差偏转规律, 通过三者的协同研究, 进一步揭示了最大主应力差引起岩层破坏的机理。

1 工程概况

10513 工作面充填开采区域位于 105 采区, 距离地表大

约 360m。3 号煤层厚度 4.06~6.21m，平均厚度 5.72m，巷道宽为 5m，高 5.6m，留设 10m 煤柱，如图 1 所示。



图 1 工作面布置

工作面直接顶为 10.7m 的细砂岩，向上还分布有 10m 的粉砂岩和 2.6m 的砂质泥岩，直接底为 9m 的细砂岩及 5.3m 的砂质泥岩，见表 1。

表 1 岩层力学参数

岩性	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
粉泥岩	9.3	8.7	8.1	31
煤	6.2	3.7	2.7	27
砂质泥岩	9.2	6.1	7.2	30
细粒砂岩	12.5	6.0	6.9	32

2 充填开采下覆岩变形机理

当充填开采方式下的覆岩受到开采及充填引起的应力扰动，局部必然产生变形，而后出现塑性破坏，岩体在不同应力水平下，会产生因球应力导致的体积变形和偏应力导致的剪切变形，若岩层任意点的某一平面上受到的剪应力超过该点的抗剪强度，该点发生剪切破坏，忽略其体积变形，根据库伦 - 摩尔强度准则的一般形式：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

因开采致使应力重分布，当某一截面上的所受荷载超过强度极限值，则岩体发生破坏。为了进一步分析岩层的破坏机制，经过三角函数代换，将式（1）改写为如下形式：

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \tag{2}$$

式中： σ_3 ——最小主应力； c, φ ——材料的粘聚力和内摩擦角。

在不考虑中间主应力对材料破坏的情况下，根据二维摩尔应力圆，某一点处的最大切应力或较大切应力可由最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 计算得出。因而，考虑最大主应力和最小主应力的差值，对后续的岩层破坏机理分析具有重要研究意义。

3 数值模拟分析

3.1 采场数值模型

本模型根据晋平煤业 10513 工作面地质特征，建立尺

寸为 155m (X) × 200m (Y) × 87m (Z) 的数值模型，如图 2 所示，为了模拟真实的地应力环境，对模型顶部施加一定的垂向载荷及水平构造力，并且限制模型边界位移，底部固支。对于某些砂岩等强度较高的材料采用摩尔库伦模型，对采空区强度较低的充填材料采用应变软化模型。

根据该工作面采用的巷式条带开采方案，工作面回采过程中，按固定的条带宽度开采。回采方向为由开切眼侧向采区运输大巷侧按条带顺序采出实体煤，待回采完成后即准备对遗留的采空区进行充填。对充填前后工作面回采不同距离下的顶板塑性区、位移云图及主应力差云图进行分析，总结变化特征。

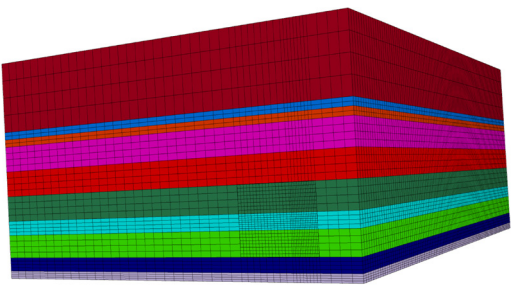


图 2 采场数值模型

3.2 充填前后塑性区分布特征

由图 3 分析可知，当工作面回采 20m 时，上覆岩层出现较少的塑性区，基本位于直接顶范围内，底板也出现部分塑性区，均为剪切破坏。当工作面回采 40m 时，在顶板 10m 位置处，粉砂岩层开始出现塑性剪切破坏区，并且在护巷煤柱帮出现少量的拉伸破坏区，底板塑性区开始向下延伸，当工作面回采 60m 时，上覆岩层剪切塑性区域扩展至最大，在煤柱帮呈现“梯形状”扩展趋势，煤柱侧拉伸破坏区域进一步扩大，底板塑性扩展趋势与顶板较为相似。由图 4，在回采后即充填，工作面回采不同距离下，顶底板及煤柱帮塑性区显著降低，位于直接顶 2m 范围内，对岩层稳定性影响较大的拉伸区并没有出现。

3.3 充填前后位移分布特征

由图 5 可知，充填前工作面不同回采距离下位移分布总体呈现“拱形”状，工作面直接顶中间位置下沉量最大。当工作面回采 20m 时，直接顶下沉量约为 34mm，分布范围约为顶板 1m 位置处，当工作面回采 40m 时，直接顶最大下沉量约为 42mm，分布范围约为顶板 3m 内，当工作面回采 60m 时，直接顶最大下沉量约为 48mm，分布范围约为顶板 4m 内，随着工作面回采距离的增加，顶板拱形位移分布逐渐密集，下沉量逐渐增大，工作面左侧和巷道右侧的位移分布区呈现放射状。由图 6 可知，充填后顶板位移分布呈现一种“倒漏斗”状，当工作面回采 20m、40m、60m 时，不同回采距离下顶板下沉量分别为 27mm、26mm 和 24mm，充填后对顶板控制起到了明显的效果。

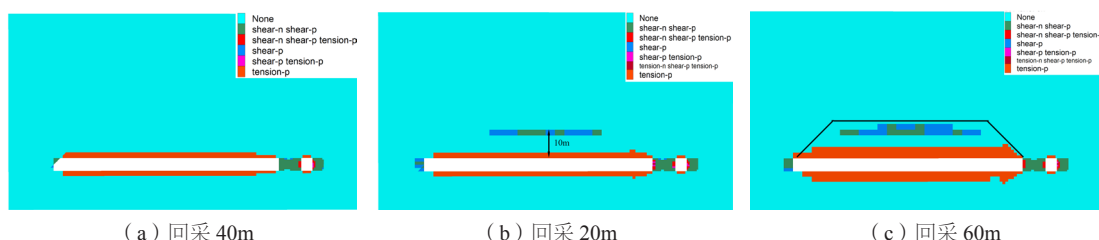


图 3 充填前不同回采距离下塑性区分布图

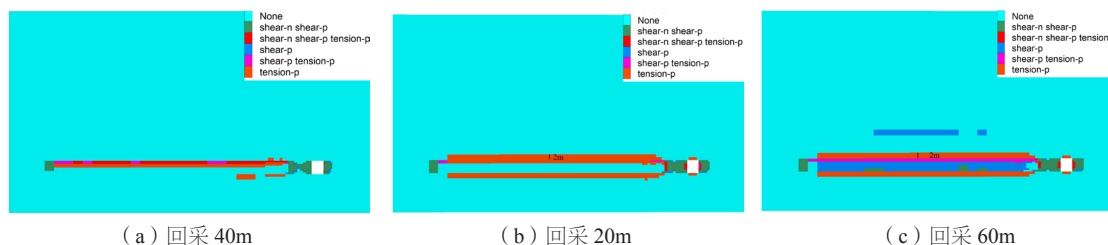


图 4 充填后不同回采距离下塑性区分布图

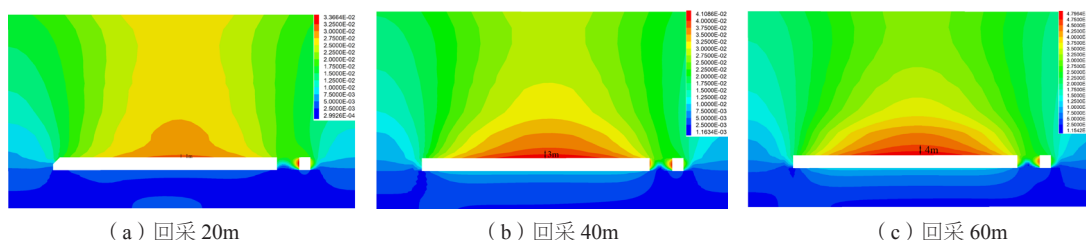


图 5 充填前不同回采距离下位移分布图

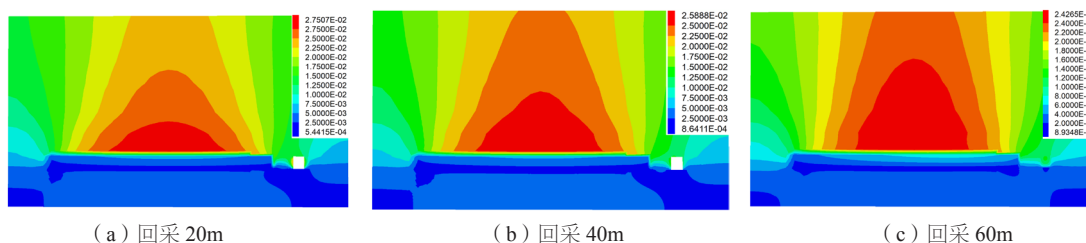


图 6 充填后不同回采距离下位移分布图

3.4 充填前后最大主应力分布特征

由图 7 可知, 当工作面回采 20m 时, 采空区直接顶周围的主应力差约为 4MPa, 分布范围约为顶板 1m 位置处, 最大主应力差位于工作面帮靠近煤柱侧 5m 处, 约为 11.6MPa, 当工作面回采 40m 时, 采空区直接顶周围的主应力差约为 9MPa, 分布范围约为顶板 3m 内, 而煤柱侧的最

大主应力差向采空区顶板偏转, 当工作面回采 60m 时, 最大主应力差已经转向采空区顶板岩层, 周围的主应力差约为 13MPa, 分布范围约为顶板 10m 内。由图 8 可知, 充填后工作面不同回采距离下顶板岩层主应力差约为 8MPa, 最大主应力差并没有转向充填后的上覆岩层, 这是充填后有着显著控制岩层下降效果的本质原因。

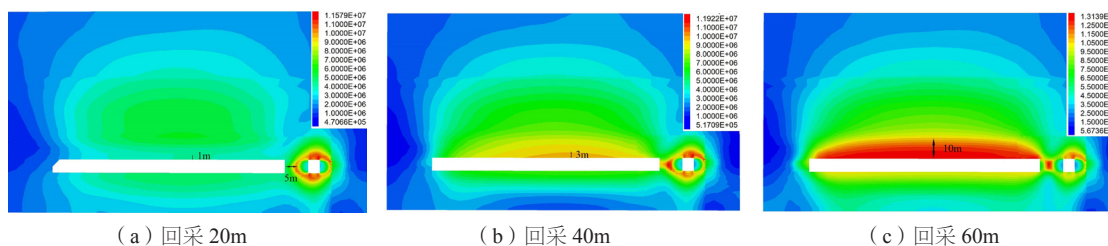


图 7 充填前不同回采距离下主应力差云图

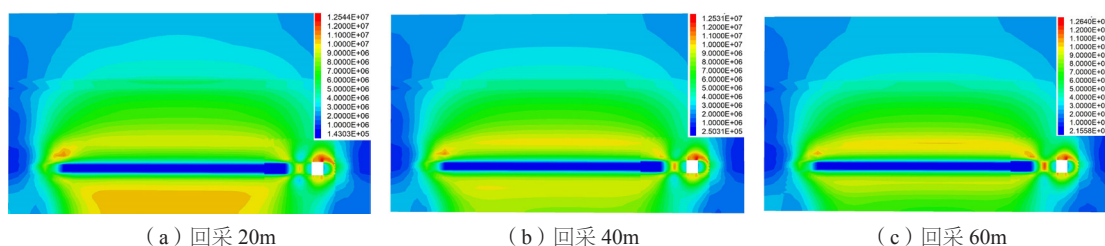
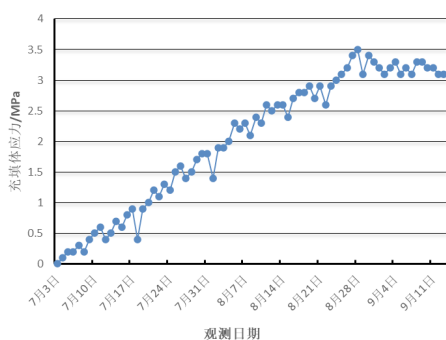


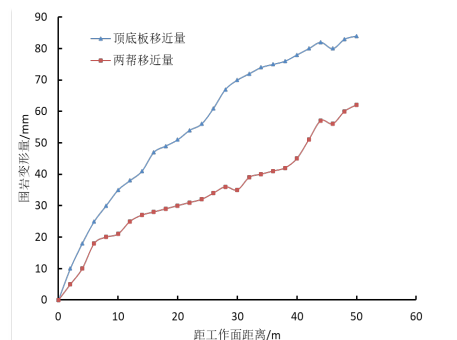
图 8 充填后不同回采距离下主应力差云图

4 现场实测

煤矿开采并充填后充填体支撑原采空区顶板,在充填体内部布置一定数量的充填位移传感器及充填应力传感器,用于评价开采巷道充填后充填体对顶板下沉的控制效果。



(a) 充填体应力变化曲线



(b) 断面巷道变形曲线图

图 9 现场实测数据图

5 结论

当工作面回采 40m 时,充填后的岩层没有拉伸破坏区,工作面回采不同距离下,顶底板及煤柱帮塑性区显著降低,位于直接顶 2m 范围内。

充填后顶板位移分布呈现一种“倒漏斗”状,当工作面回采 20m、40m、60m 时,不同回采距离下顶板下沉量分别为 27mm、26mm 和 24mm。

充填后工作面不同回采距离下顶板岩层主应力差约为 8MPa,最大主应力差并没有转向充填后的上覆岩层,这是充填后显著控制岩层下降的本质原因与变形机理,现场实测表明,10513 工作面的充填开采对顶板控制取得了较好的效果。

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):5-10.
- [2] 周华强,侯朝炯,孙希奎,等.固体废物膏体充填不迁村采煤[J].中国矿业大学学报,2004(2):30-34+53.
- [3] 贾文治.填充开采在煤矿开采中的应用研究[J].山西能源学院学

报,2018,31(1):6-8.

- [4] 祁龙胜.矿井部分充填开采技术分析[J].山西能源学院学报,2017,30(1):4-6.
- [5] 瞿群迪,姚强岭,李学华.充填开采控制地表沉陷的空隙量守恒理论及应用研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2010,25(1):8-12.
- [6] 王家臣,杨胜利,杨宝贵,等.长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟实验[J].煤炭学报,2012,37(8):1256-1262.
- [7] 王金安,李大钟,尚新春.采空区坚硬顶板流变破断力学分析[J].北京科技大学学报,2011,33(2):142-148.
- [8] 郝庆旺.采动岩体的空隙扩散模型与空源作用分析[J].中国矿业学院学报,1988(2):33-39.
- [9] 李永明,刘长友,邹喜正,等.急倾斜薄煤层胶结充填开采合理参数确定及应用[J].煤炭学报,2011,36(S1):7-12.
- [10] 赵江.浅埋煤层上覆砂岩层数对开采沉陷的影响特征研究[J].山西能源学院学报,2018,31(4):4-7.
- [11] 关晋忠.薄煤层半煤岩巷道切顶卸压沿空掘巷技术研究及实践[J].山西能源学院学报,2023,36(4):1-3.

作者简介:马浩凯(1987-),男,中国山西襄垣人。