



移动扫码阅读

李 强,王继仁,杨庆贺.浅埋深煤层开采沉陷预测方法应用及研究[J].煤炭科学技术,2019,47(5):175-181.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.05.028

LI Qiang, WANG Jiren, YANG Qinghe. Application and research on prediction method for mining subsidence in shallow buried deep coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 175 - 181. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.05.028

浅埋深煤层开采沉陷预测方法应用及研究

李 强^{1,2},王继仁¹,杨庆贺¹

(1.辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000;2.黑龙江龙煤矿业控股集团有限责任公司 双鸭山分公司,黑龙江 双鸭山 155100)

摘 要:煤炭资源开采引起的地表沉陷问题一直是绿色开采亟待解决的关键技术问题之一。为了弄清近浅埋条件下工作面回采覆岩垮断及地表沉陷规律,以店坪煤矿 5 号煤层开采面临的实际问题为研究背景,采用理论计算、数值模拟与现场实测相结合的方法,对 5-210 工作面回采条件下地表沉陷规律及其对地表保护区内建筑物的影响进行研究。基于采空区岩体应力-碎胀系数关系和开采沉陷基本原理,建立了地表下沉移动轨迹模型,理论预测工作面开采后的地表下沉规律,其最大下沉量为 2.604 m。利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,建立了工作面回采地表沉陷数值计算模型,并利用 Tecplot 软件进行模拟结果的后期处理,模拟得出的地表沉陷最大值为 2.78 m,最大下沉位于工作面中心位置。依据地表沉陷控制基准,利用几何关系计算得出地表沉陷影响范围及工作面布置的合理边界,将 5-210 工作面布置在+830 m 水平南翼,西与 830 南翼运输巷相通,东至井田边界。并对回采期间地表运移沉陷规律进行了现场实测,利用 GPS 接收机进行 RTK 实时动态观测收集数据,监测结果显示,地表最大下沉量 2.69 m,采空区地表沉陷区域没有影响工业广场上的建筑物的安全。基于理论计算和数值模拟相结合的方法,设计了 5-210 工作面合理位置和空间布局,取得了良好的实践效果,为类似地质条件的采空区地表沉陷预测提供了可靠的依据。

关键词:地表沉陷;碎胀系数;浅埋深煤层;沉陷范围

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)05-0175-07

Application and research on prediction method for mining subsidence in shallow buried deep coal seam

LI Qiang^{1,2}, WANG Jiren¹, YANG Qinghe¹

(1.School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2.Shuangyashan Branch, Heilongjiang Longmei Mining Holding Group Co., Ltd., Shuangyashan 155100, China)

Abstract: The problem of surface subsidence caused by coal mining has always been one of the key technical problems to be solved urgently. In order to clarify the law of overburden strata and surface subsidence of the working face under the condition of shallow buried strata, the practical problems faced by No. 5 coal seam mining were taken as the research background, the combination of theoretical calculation, numerical simulation and field measurement were used to research the laws of surface subsidence rule and its influence on surface buildings protected areas in No.5-210 mining face and its influence on the buildings in the surface protection area were studied. Based on the relationship between the stress-swelling coefficient of the rock mass and the basic principle of mining subsidence, the surface subsidence model was established, and the surface subsidence law after mining was predicted theoretically, with the maximum subsidence of 2.604 m. Using FLAC^{3D} numerical simulation software, the numerical calculation model of surface subsidence in the working face was established, and the post-processing of simulation results is carried out by Tecplot software. The simulated maximum surface subsidence was 2.78 m, and the maximum subsidence point was located at the center of the working face. According to the ground surface subsidence control benchmark, the geometrical relationship is used to calculate the influence range of the surface subsidence and

收稿日期:2019-02-21;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774165)

作者简介:李 强(1967—),男,黑龙江双鸭山人,教授级高级工程师。E-mail:253175278@qq.com

通讯作者:杨庆贺(1995—),男,辽宁朝阳人,硕士。E-mail:993879111@qq.com

the reasonable boundary of the working surface layout. The No.5-210 working face was arranged at the southwing of +830 m working level in the mine field, and it is connected with the belt entry in the south of 830 level in the west and reaches the boundary of the mine field in the east. In addition, the field measurement of surface movement and subsidence during mining was carried out, and the GPS receiver was used to collect real-time RTK data. The monitoring results showed that the maximum surface subsidence was 2.69 m, and the surface subsidence area in the gob did not affect the safety of the buildings in the industrial square. Based on the combination of theoretical calculation and numerical simulation, the reasonable position and spatial layout of No.5-210 working face were designed, and good practical results were obtained, which provides a reliable basis for predicting surface subsidence of gob under similar geological conditions.

Key words: surface subsidence; mathematical model; fragmentation coefficient; numerical simulation; subsidence range

0 引言

目前,我国的主要能源是煤炭,据不完全统计,仅国有煤矿的生产矿井“三下”压煤量达到140多亿^[1-3]。随着国家经济的快速发展,煤炭需求量增加,大量的煤炭从地下采出^[4],破坏了岩体内部原有的力学平衡状态,使上覆岩层不同程度地变形和破坏^[5]。当开采面积达到一定范围即一般当采空区的长和宽(沿煤层倾向的水平投影长度)都超过平均采深的0.2~0.3倍时,地表开始移动,起始采场附近的岩层移动和变形将扩展到地表^[1],此时的地表移动和变形将影响到位于开采影响范围内的房屋建筑、工程、河流、及管线,会改变它们原有的状态,甚至破坏^[6-9]。因此,对采空区地表沉陷的研究具有重大的意义。

针对采空区地表沉陷及预测问题,国内外专家开展了大量的研究,并取得了显著的研究成果^[10]。如典型曲线法和剖面函数法^[11-12]、概率积分法^[13-14]、基于连续介质力学方法以及影响函数法等^[15-17]。但由于现场情况多变,这些预测方法适用于某种特定情况,导致预测结果不是很理想,给研究开采沉陷的学者及技术人员带来挑战。但数值模拟只需在计算机上进行,可以施加试验方法达不到的条件。赵卫强等^[18]应用FLAC^{3D}对村庄下充填开采地表沉陷规律进行了研究;郭玉芳等^[19]利用FLAC^{3D}数值模拟分析了厚松散层开采条件下地表移动变形规律;邓小龙等^[20]通过数值模拟确定了采区开采结束后的地表沉陷边界和地表塌陷体积。不过,他们没有结合理论计算与现场实测,仅应用数值模拟预测,结果不具有说服力。为此,笔者以店坪煤矿5-210工作面为工程背景,采用理论计算、数值模拟与现场实测相结合的方法,更加准确地预测采空区地表沉陷范围,为煤炭的开采及房屋建筑的安全提供重要的理论依据。

1 工程背景

5-210工作面位于店坪煤矿工业广场、王家庄

村和店坪村的南面,麻塔村的北面,南岭上村的东面。从西向东依次穿过里沟、闫家沟、柳沟、麻塔梁。东西走向长度1 465 m,倾向长度240 m,煤层近水平、薄基岩、煤厚平均3.1 m,平均埋深200 m,属于浅埋煤层。最低处位于里沟中,标高为+1 075 m,雨季沟内可能有部分积水渗入地表,最高处位于麻塔梁上,标高为+1 223 m。地表沟壑纵横,麻塔梁、走马梁顶部有少量耕地,属丘陵梯田,其余为坡地。因地表附近有工业广场和村庄,需研究5-210工作面回采所引起的地表沉陷是否影响建筑物的稳定性。

2 地表下沉数学模型的建立及计算

2.1 采空区垮落带空间分布

考虑建模需要,根据空间解析几何及岩层移动相关理论,建立地表下沉移动轨迹坐标系,如图1所示。坐标系原点设定于采空区正中央,此处为地表沉陷量最大点,走向方向为 x 轴,沿工作面推进方向为正,反之为负,倾向方向为 y 轴,回风巷方向为正,运输巷方向为负, z 轴为垂直方向下沉量,边界应满足:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$$

式中: x 、 y 为走向和倾向方向变量; a 、 b 为椭圆圆台的基本参数。

下沉移动范围条件:

$$0 \leq x^2/a^2 + y^2/b^2 \leq 1$$

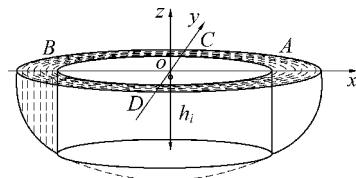


图1 地表下沉移动轨迹坐标系

Fig.1 Surface sinking movement coordinate system

1) 压实稳定区。当地表沉陷点在 $x^2/(l_z/2 - L_{zd} - L_{zs})^2 + y^2/(l_q/2 - L_{qd} - L_{qs})^2 \leq 1$ 范围内时,处于压实稳定区,该区域类似于“椭圆盘”底部,在此范围内地表沉陷量基本一致,其中: l_z 为走向长度,m; l_q 为倾向长度,m; L_{zd} 为走向低应力区

长度, m ; L_{zs} 为走向应力升高区长度, m ; L_{qd} 为倾向低应力区长度, m ; L_{qs} 为倾向应力升高区长度, m 。

2) 载荷影响区。当地表沉陷点 $x^2/(l_z/2-L_{zs}-L_{zy})^2 + y^2/(l_q/2-L_{qz}-L_{qy})^2 \geq 1$ 且 $x^2/(l_z/2-L_{zs})^2 + y^2/(l_q/2-L_{qy})^2 \leq 1$ 范围内时, 处于载荷影响区, 该区域类似于“椭圆盘”的边部, 在此范围内任意一点都可将其等效转化到坐标系 x 、 y 轴上, 如图 2 所示, 转化后可得沉陷点与煤壁水平距离 L 。将转化后的沉陷点与煤壁水平距离 L 代入载荷影响区碎胀系数表达式中, 得出该点所对应的碎胀系数, 最终将其代入地表沉陷表达式中, 得出该点沉陷量。其中: L_{zs} 为走向长度在 z 轴方向上的长度, m ; L_{zy} 为走向长度在 y 轴方向上的长度, m ; L_{qz} 为倾向长度在 z 轴方向上的长度, m ; L_{qy} 为倾向长度在 y 轴方向上的长度, m 。

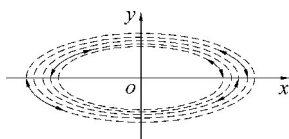


图 2 坐标转换示意

Fig.2 Schematic diagram of coordinate transformation

3) 自然堆积区。当地表沉陷点在 $x^2/(l_z/2-L_{zs})^2 + y^2/(l_q/2-L_{qz})^2 \geq 1$ 且 $x^2/(l_z/2)^2 + y^2/(l_q/2)^2 \leq 1$ 范围内时, 处于自然堆积区, 在此范围内时, 垮落带内岩体并未全部垮落, 靠近煤壁一侧形成残余悬臂梁结构, 支撑上覆砂土层, 在上覆砂土层载荷作用下只产生微弱下沉。

$$k_s = 1.137 - 0.358 \ln \left[h_j \gamma_j + h_s \gamma_s \left(1 - \frac{h_s \tan^2(45^\circ - \varphi_s/2) \tan \varphi_s}{2a} \right) + 0.466 \right] \quad (2)$$

$$k_n = 1.18 - 0.364 \ln \left[h_j \gamma_j + h_s \gamma_s \left(1 - \frac{h_s \tan^2(45^\circ - \varphi_s/2) \tan \varphi_s}{2a} \right) + 0.651 \right] \quad (3)$$

其中: k_s 、 k_n 分别为砂岩、泥岩的碎胀系数; 计算分别为 1.012、1.008。

$$W = M - \sum h_i (k_i - 1) \quad (4)$$

其中: W 为地表沉陷量, m ; M 为煤层开采厚度, m ; h_i 为垮落带各岩层厚度, m ; k_i 为垮落带内各岩层碎胀系数。将压实区垮落带内各岩层碎胀系数及各岩层厚度代入浅埋采空区地表沉陷量表达式 (4)

$$k_s = 1.137 - 0.358 \ln \left\{ q \left[\exp \left(-(L-L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) \left(\sqrt{\frac{k_g}{4EI}} - \sqrt{\frac{k_c}{4EI}} \right) \sin \left((L-L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) - \cos \left((L-L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) + 1 \right] + 0.466 \right\} \quad (5)$$

2.2 碎胀系数及地表沉陷量

岩石碎胀系数 K_p 是岩石的碎胀性可用岩石破碎后处于松散状态下的体积与岩石破碎前处于整体状态下的体积之比。岩石破碎以后的体积将比整体状态下增大, 这种性质称为岩石的碎胀性。当顶板垮落到一定高度, 即 $\Sigma h = m/(K_p - 1)$ 时, 就可以完全充填采空区, 其上覆岩层的活动对工作面就没有明显的动压影响。因此, 碎胀系数对工作面顶板管理有重要的意义。根据岩柱法计算应力平稳区垮落岩体应力, 覆岩物理力学参数如下, 砂土层的平均容重 $\gamma_s = 18.5 \text{ kN/m}^3$, 基岩层的平均容重 $\gamma_j = 23.5 \text{ kN/m}^3$, 砂土层厚度 $h_s = 30 \text{ m}$, 基岩层厚度 $h_j = 17 \text{ m}$, 砂土层内摩擦角 $\varphi_s = 27^\circ$ 。

1) 压实稳定区地表沉陷量。将数据代入垮落岩体所受覆岩应力式 (1), 计算出压实区垮落岩体受上覆基本顶及砂土层应力载荷为

$$\sigma_{zp} = h_j \gamma_j + h_s \gamma_s \left[1 - \frac{h_s \tan^2(45^\circ - \varphi_s/2) \tan \varphi_s}{2a} \right] \quad (1)$$

计算得 $\sigma_{zp} = 0.9523 \text{ MPa}$ 。

根据文献 [17] 中全断面沉陷模型理论, 由于煤层近水平, 用走向半长代替 a , 则 $2a = 1465 \text{ m}$ 。选取矿井 5-210 工作面采空区为研究对象, 根据工程类比法确定相关数据, 将压实区垮落带内泥岩层及砂岩层所受应力载荷代入应力-碎胀系数关系式中, 可得出压实稳定区范围内垮落岩体碎胀系数。

中, 得出压实区地表沉陷量 $W = 2.604 \text{ m}$

2) 应力升高区地表沉陷量。将应力升高区裂隙带内基岩以及上覆砂土层对垮落岩体应力与垮落岩体所受自身重力之和, 分别代入砂岩、泥岩应力-碎胀系数拟合公式中, 可得出应力升高区范围内砂岩及泥岩的碎胀系数与采空区边界距离关系式。

$$k_n = 1.18 - 0.364 \times \ln \left\{ q \left[\exp \left(- (L - L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) \frac{\sqrt{\frac{k_g}{4EI}} - \sqrt{\frac{k_c}{4EI}}}{\sqrt{\frac{k_g}{4EI}} + \sqrt{\frac{k_c}{4EI}}} \sin \left((L - L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) - \cos \left((L - L_d) \sqrt{\frac{k_g}{4EI}} \right) \right] + 1 \right\} + 0.651 \quad (6)$$

式中: k_g 、 k_c 分别为垮落岩体、煤层地基系数, GN/m^3 ; L_d 为低应力区长度, m ; E 为基岩弹性模量, GPa ; I 为基岩梁惯性矩, m^4 。

应力升高区随与煤柱距离增大地表沉陷量增大, 当应力升高区覆岩垮落达到基岩层后, 地表沉陷量与煤柱距离关系变化率骤然减小, 最终沉陷量与压实区沉陷量基本保持一致, 约为 2.6 m。

3) 自然堆积区沉陷量。在此范围内, 垮落岩体应力较小, 呈松散堆积状态, 碎胀系数最大, 根据文献[17]中松散堆积区垮落岩体碎胀系数与煤壁位置关系公式:

$$k_z = c \ln(b \sqrt{1 + L^2/a} + \Delta c) + d \quad (7)$$

式中: k_z 为自然堆积区岩石碎胀系数; c 、 d 为回归系数; Δc 为补偿参数。

垮落带内岩体并未全部垮落, 靠近煤壁一侧形成残余悬臂梁结构, 支撑上覆砂土层, 在上覆砂土层载荷作用下只产生微弱下沉。

综上所述, 采空区中部压实稳定区范围内地表沉陷量最大, 达到 2.604 m。

3 地表沉陷 FLAC^{3D} 数值模拟分析

3.1 数值模型构建

根据店坪煤矿 5-210 工作面所处煤层地质条件构建数值模拟计算模型, 模型长 800 m, 宽 400 m, 高 300 m, 矿体埋深平均为 200 m, 矿体厚度为 3.1 m, 工作面长度 240 m, 推进长度 500 m。模型采用 Mohr-Coulomb 计算准则, 选用的岩石力学参数见表 1。模型上表面为应力边界, 煤层上部模拟了 200 m 上覆岩层, 模型上部边界施加载荷为 5 MPa, 模拟上覆岩层自重边界, 约束条件取两侧为限制水平方向位移的滑动支座, 底部为限制垂直方向和水平方向位移的固定支座。模型共划分 126 198 个网格节点, 118 400 个节点等参单元。

3.2 店坪煤矿 5-210 工作面模拟结果

根据上述建立的模拟模型及采场结构参数进行模拟, 得到了店坪煤矿 5-210 工作面采空区地表沉陷的模拟结果如图 3 所示。地表沉陷的最大值为 2.78 m, 实测的地表沉陷值约为 2.69 m, 数值模拟结果与实测值的相对误差为 3.34%。由此可知, 数值

模拟结果与实测结果有良好的耦合性。所以说, FLAC^{3D} 数值模拟方法对于预测地表沉陷是可行的。

表 1 煤岩物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical properties of coal and rock

岩层	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa
石灰岩	48.9	1.77	2.02	40	4.00	2.40
细粒砂岩	65.6	1.40	2.73	42	8.15	4.43
泥岩	56.7	0.93	1.07	35	2.29	1.06
5 煤	14.9	1.10	1.60	38	4.18	1.40

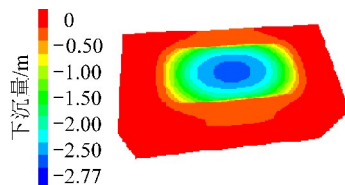


图 3 地表沉陷最大值

Fig.3 Maximum surface subsidence

3.3 地表沉陷范围的预测

将 FLAC^{3D} 数值模拟结果导入 Tecplot 360 软件, 该软件具有强大的数据分析和可视化处理功能, 可以使模拟或者实验结果快速而精准地以图表或者动画的方式显示, 还可以分析复杂数据, 排版多种布局和以专业的图像和动画交流结果, 方便工程师和科研人员在最短的时间内对大量数据进行可视化分析, 为设计和研究提供科学的依据。通过查阅资料获得, 为了满足地表建筑物的稳定以及煤炭开采的安全, 地表沉降控制基准确定为 39 mm, 对模型进行赋等值线并切片, 如图 4 所示。

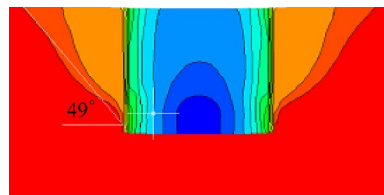


图 4 地表沉陷切片

Fig.4 Surface subsidence section

地表沉陷 39 mm 的位置与采空区边界连线在煤柱一侧和水平线所成夹角大约为 49°, 由于平均埋深为 200 m, 根据几何关系可以算出地表下沉 39 mm 的位置到煤层采空区边界的水平距离是 174 m, 到采空区中心的水平距离是 294 m, 小于工业广场

到5-210工作面的水平距离,且工业广场地表沉降值在39 mm之内,所以,店坪煤矿5-210工作面布置是合理的,不影响工业广场的使用。

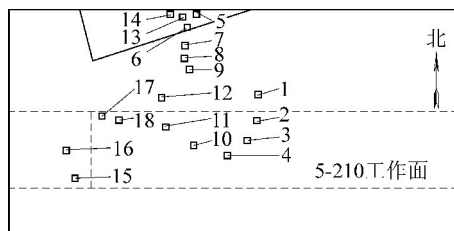
4 工程应用

4.1 5-210工作面位置设计

根据煤矿地质条件 and 生产需求,5-210工作面布置在830水平南翼,为二采区5号煤层第7个回采工作面,西与830南翼运输巷相通,东至井田边界,南北均为实体煤,上部为3-302、3-304采空区,5号煤层与3号煤层层间距55~71 m。

4.2 观测点布置及测试结果分析

结合工作面上方地表实际情况,布置18个监测点,数据采集使用上海华测GPS接收机(标称水平精度 5 ± 1 ppm,垂直精度 10 ± 2 ppm,进行RTK实时动态观测。在距工作面影响范围外1~2 km的开阔地带布设2个控制点,用于每次日常测量时架设基站、重置当地坐标及检核。截取地表等高线图,比例尺为1:750,如图5所示。各测点坐标见表2。



1—18为测点编号

图5 5-210工作面地表岩移测点布置

Fig.5 Layout of measuring points for surface rock movement in No.5-210 working face

2016年6月7日,工作面回采位置接近测试区域,开始监测,2016年12月20日,工作面回采结束;持续对地表沉降变形监测到2017年4月3日,地表测点位移不再发生沉降变形,测试结束。在监测过程中,10号测点位于农田中,未能测得数据,12号测点于2016年10月17日测试时,已经随地表裂缝沉降塌毁,后期无数据。其中,测点1最大沉降量约为0.813 m,测点2最大下沉量为1.032 m。测点3于8月9日后趋于稳定,最大下沉量1.951 m,测点4最大下沉量2.690 m。测点5-8受采动影响较小,测点5下沉量为17 mm,测点6下沉量为19 mm,测点7下沉量为23 mm,测点8下沉量为28 mm。测点9在工作面回采过测点200 m时趋于第一稳定阶段,下沉量为0.2 m,待工作面回采600 m后,趋于最终稳定,此时最大下沉量0.243 m。测点11和测点12两个测点均位于工作面边缘,地表下沉的稳定时间几乎同步,测点12的最终下沉量为0.893 6 m(后期无数

据),测点11的最终下沉量为1.462 m。测点13和14的下沉量为10~15 mm。测点15、测点16、测点17和测点18的最终下沉量分别为1.287、1.132、1.367、1.415 m。

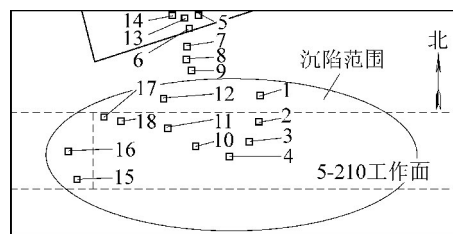
表2 地表测点坐标

Table 2 Surface coordinates

测点编号	X/m	Y/m	埋深/m
1	4 172 644.619	19 509 241.674	1 167.154
2	4 172 580.503	19 509 235.623	1 170.793
3	4 172 522.206	19 509 231.991	1 172.029
4	4 172 472.163	19 509 210.428	1 178.606
5	4 172 883.639	19 509 101.848	1 122.005
6	4 172 830.057	19 509 064.610	1 131.076
7	4 172 773.701	19 509 056.877	1 153.525
8	4 172 734.645	19 509 055.194	1 163.832
9	4 172 671.324	19 509 065.321	1 178.640
10	4 172 503.282	19 509 068.611	1 196.891
11	4 172 524.321	19 508 985.423	1 198.122
12	4 172 606.859	19 508 982.142	1 179.248
13	4 172 867.668	19 509 056.169	1 113.982
14	4 172 886.065	19 509 033.708	1 086.624
15	4 172 372.216	19 508 692.998	1 093.322
16	4 172 444.982	19 508 661.130	1 088.462
17	4 172 533.772	19 508 695.925	1 091.232
18	4 172 525.571	19 508 751.805	1 107.895

4.3 地表沉陷范围以及沉降值

利用FLAC^{3D}构建地表沉陷模型,根据比例尺1:750,将其模拟结果呈现在5-210工作面等高线图上,如图6所示。



1—18为测点编号

图6 地表沉陷范围

Fig.6 Surface subsidence area

测点1—测点4在影响范围内,其中测点4是5-210工作面下沉最大值点,测点5-8在工业广场附近,影响范围之外,测点1—测点8的下沉曲线图7和图8所示。

根据地表沉陷范围图和测点下沉曲线图可知,测点5—测点8在店坪煤矿工业广场上,下沉量稳定且在合理范围之内,不受5-210工作面开采的影响,工作面5-210的布置是合理的。

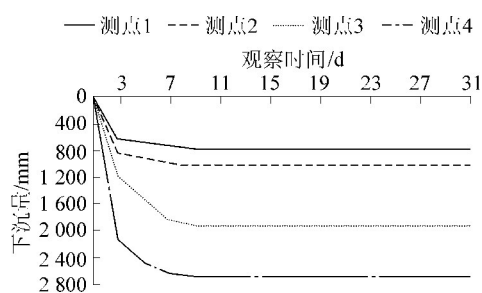


图7 测点1—测点4的下沉曲线

Fig.7 Subsidence curves of measuring points 1—4

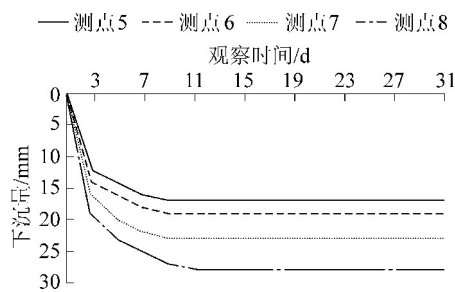


图8 测点5—测点8的下沉曲线

Fig.8 Subsidence curve of measuring points 5—8

5 结 论

1) 利用模拟与计算得出地表沉陷影响范围及工作面布置的合理边界,将5-210工作面布置在830水平南翼,为二采区5号煤层第7个回采工作面,西与830南翼运输巷相通,东至井田边界,南北均为实体煤,上部为3-302,3-304采空区。

2) 通过建立数学模型,对店坪煤矿5-210工作面的地表沉陷进行了理论计算,计算结果为2.604 m;采用FLAC^{3D}数值模拟方法,数值模拟结果为2.78 m,现场实测地表最大下沉量是2.69 m,理论计算、数值模拟与实测结果具有良好的耦合性。

3) 基于理论计算和数值模拟相结合的方法,设计了5-521工作面合理位置和空间布局,取得了良好的实践效果,为类似地质条件的采空区地表沉陷预测提供了可靠的依据。

参考文献 (References):

- [1] 谢东海,冯涛,袁坚,等.采矿方法与地表沉陷预测[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):470-472.
XIE Donghai, FENG Tao, YUAN Jian, *et al.* Prediction of surface subsidence caused by underground mining methods[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(4): 470-472.
- [2] 张吉雄,谔协兴,郭广礼,等.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, MIU Xiexing, GUO Guangli, *et al.* Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.

- [3] 徐法奎.我国煤矿充填开采现状及发展前景[J].煤矿开采,2012,17(4):6-7.
XU Fakui. Current status of stowing mining and its development prospect in China[J]. Coal Mining, 2012, 17(4): 6-7.
- [4] 王金喜,李彦恒,孙利辉.采空区地表移动变形预计研究[J].矿业安全与环保,2013,40(5):5-11.
WANG Jinxi, LI Yanheng, SUN Lihui. Predictive study on surface movement and deformation in mined-out Area[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40(5): 5-11.
- [5] 文志杰,景所林,宋振骥,等.采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):52-61.
WEN Zhijie, JING Suolin, SONG Zhenqi, *et al.* Study on coal face spatial structure model and control related dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 52-61.
- [6] 庞会,徐良骥.基于FLAC^{3D}的矿区地表沉陷预测方法研究[J].煤炭技术,2018,37(1):204-206.
PANG Hui, XU Liangji. Research on prediction method of surface subsidence in mining area based on FLAC^{3D}[J]. Coal technology, 2018, 37(1): 204-206.
- [7] 潘红宇,赵云红,张卫东,等.基于Adaboost的改进BP神经网络地表沉陷预测[J].煤炭科学技术,2019,47(2):161-167.
PANG Hongyu, ZHAO Yunhong, ZHANG Weidong, *et al.* Prediction of surface subsidence with improved BP neural network based on Adaboost[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 161-167.
- [8] 徐乃忠,高超,倪向忠,等.浅埋深特厚煤层综放开采地表裂隙发育规律研究[J].煤炭科学技术,2015,43(12):124-128.
XU Naizhong, GAO Chao, NI Xiangzhong, *et al.* Study on surface cracks law of fully mechanized top coal caving mining in shallow buried depth and extra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 124-128.
- [9] 王正忠,孙祥柯,毕玉成,等.依兰矿区古近系软岩地层地表沉陷与覆岩破坏规律研究[J].煤炭科学技术,2018,46(S2):206-209.
WANG Zhengzhong, SUN Xiangke, BI Yucheng, *et al.* Study on surface subsidence and overburden failure law of paleogene soft rock in Yilan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2): 206-209.
- [10] 贺桂成,丁德馨,刘永,等.衡山石膏矿老采区地表沉陷的ANFIS预测[J].采矿与安全工程学报,2012,29(6):877-881.
HE Guicheng, DING Dexin, LIU Yong, *et al.* ANFIS prediction of the surface subsidence of the old goaf of the gypsum mine in Hengshan[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(6): 877-881.
- [11] 崔希民,邓喀中.煤矿开采沉陷预计理论与方法研究评述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):160-169.
CUI Ximin, DENG Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 160-169.
- [12] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉陷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [13] 陈绍杰,朱旺喜,李军.2004-2013年开采沉陷类国家自然科学基金项目分析[J].山东科技大学学报,2014,33(6):58-

62.
CHEN Shaojie, ZHU Wangxi, LI Jun. Analysis of mining subsidence projects funded by national natural science foundation from 2004 to 2003[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2014, 33(6): 58-62.
- [14] 王 宁, 吴 侃, 刘 锦, 等. 基于 Boltzmann 函数的开采沉陷预测模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1353-1356.
WANG Ni, WU Kan, LIU Jin, *et al.* Model for mining subsidence prediction based on Boltzmann function[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1353-1356.
- [15] 王金安, 李大钟, 马海涛. 采空区矿柱-顶板体系流变力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 578-582.
WANG Jinan, LI Dazhong, MA Haitao. Study of rheological mechanical model of pillar-roof system in mined-out area[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 578-582.
- [16] 杨治林. 煤层地下开采地表沉陷预测的边值方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 232-236.
YANG Zhilin. Prediction of surface subsidence in underground mining seam based on the boundary value method [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(S1): 232-236.
- [17] 郝延棉, 吴立新, 戴华阳. 用弹性板理论建立地表沉陷预计模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2958-2962.
HAO Yanmian, HAO Lixin, DAI Huayang. Establishing a ground settlement prediction model with elastic slab theory[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2958-2962.
- [18] 赵伟强, 王子升, 孙 璐. 村庄下充填开采地表沉陷的数值模拟[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2018, 17(1): 29-33.
ZHAO Weiqiang, WANG Zisheng, SUN Luo. Numerical simulation of surface subsidence caused by filling mining under villages[J]. Journal of Beijing Polytechnic, 2018, 17(1): 29-33.
- [19] 郭玉芳, 孟凡迪, 陈俊杰. 厚松散层开采条件下地表沉陷数值模拟分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(6): 103-105.
GUO Yufang, MENG Fandi, CHEN Junjie. Numerical simulation analysis on surface subsidence mining under thick alluvial[J]. Coal Engineering, 2014, 46(6): 103-105.
- [20] 邓小龙, 李丽慧, 谭玉芳. 矿山地下开采诱发地表沉陷的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2018, 49(7): 188-192.
DENG Xiaolong, LI Lihui, TAN Yufang. Numerical simulation of surface subsidence induced by underground mining[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(7): 188-192.