

# 西部大采高工作面保护煤柱宽度优化研究

解成成<sup>1</sup>, 刘学生<sup>1,2,3</sup>, 范德源<sup>1</sup>, 杨康<sup>1,4</sup>, 宋虎<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

3. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司, 宁夏 银川 750011;

4. 榆林市榆神煤炭榆树湾煤矿有限公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 保护煤柱尺寸一直是三下开采研究的热点问题, 特别是在西部大采高软弱覆岩特厚煤层开采条件下, 其对地表建筑物安全的影响有待进一步研究。以榆树湾井田 20119 工作面为例, 综合利用数值模拟和概率积分法确定了合理保护煤柱宽度, 并进行现场验证。结果表明: 随着煤柱宽度的减小, 地表沿 X 方向的水平移动呈现倒“S”型趋势, 沿 Y 方向的移动呈现倒“U”型趋势, 地表的最大下沉量随煤柱宽度的减小而不断减少; 结合概率积分法对保护煤柱宽度进行预计, 确定优化后的煤柱宽度为 180 m; 对现场村庄进行实时监测, 地表下沉和倾斜值均满足现场施工要求, 验证了保护煤柱宽度的合理性。

**关键词:** 大采高工作面; 数值模拟; 概率积分; 保护煤柱宽度

中图分类号: TD822

文献标志码: A

## Study on optimization of protective coal pillar width on large mining height working face in western China

XIE Chengcheng<sup>1</sup>, LIU Xuesheng<sup>1,2,3</sup>, FAN Deyuan<sup>1,2</sup>, YANG Kang<sup>1,4</sup>, SONG Hu<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. National Energy Group Ningxia Coal Industry Co. Ltd, Yinchuan 750011, China;

4. Yulin Yushen Coal Yushuwan Coal Mine Co. Ltd, Yulin 719000, China)

**Abstract:** The size of protective coal pillars has always been a hot topic in research on mining under buildings, railways and waters. Its impact on the safety of surface buildings, especially under the conditions of large mining height and high-strength soft overburden thick coal seam mining in western China, needs to be further studied. Taking the 20119 working face in Yushuwan well field as an example, this study first determined the reasonable width of protective coal pillars through a combination of numerical simulation and probabilistic integration method and carried out an on-site verification. The results show that as the width of the coal pillar decreases, the horizontal movement of the surface along the X direction shows an inverted “S” trend, and the movement along the Y direction shows an inverted “U” trend, and that the maximum subsidence of the surface decreases with the decrease of the width of the pillar. Then, the probability integral method was used to predict the width of the protected coal pillar.

收稿日期: 2023-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174122, 52374218); 山东省自然科学基金优秀青年基金项目(ZR2022YQ49); 山东省泰山学者青年专家计划项目(tsqn202211150)

作者简介: 解成成(1997—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事矿山岩层控制方面的研究. E-mail: chengXie3911@163.com  
刘学生(1988—), 男, 山东德州人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山岩体力学与岩层控制方面的研究, 本文通信作者. E-mail: xuesheng1134@163.com

The optimized width of the coal pillar was determined to be 180 m. Finally, the real-time monitoring of the on-site village was carried out and the results show that the values of surface subsidence and inclination meet the requirements of the on-site construction, verifying the reasonableness of the protection of the coal pillar.

**Key words:** large mining height working face; numerical simulation; probabilistic integration; protective coal pillar width

我国煤炭探明储量中,建筑物、水体和铁路下压煤量大约 137.9 亿吨,其中建(构)筑物下压煤高达 87.6 亿吨<sup>[1]</sup>,处理建(构)筑物下压煤问题迫在眉睫。我国西部地区赋存广泛的弱胶结覆岩,在高强开采条件下地表下沉较东部更大,地表建筑物的损坏程度也更严重。留设保护煤柱是一种较经济有效的处理方式,但由于地域的不同,我国东部留设的保护煤柱尺寸通常要小于西部地区留设的保护煤柱尺寸。然而留设煤柱宽度过大会造成煤炭资源的浪费,过小则起不到应有的保护作用。因此,如何合理留设建(构)筑物保护煤柱成为研究的热点问题<sup>[2-4]</sup>。

采动地表建(构)筑物损害的主要原因是地表点的移动和变形,为更好认识特定地质条件下地表移动变形规律,学者开展了大量的研究。崔希民等<sup>[5-6]</sup>分析了建筑物结构长度、高度、最大挠度与采动之间的关系并结合现行规范,建立了综合考虑水平变形、建筑物结构长度和挠度比的采动损坏分等定级指标。在地表移动变形预计理论方面,国内学者主要提出了剖面函数法、典型曲线法和概率积分法,其中概率积分法是目前应用最为广泛和接受的方法。姚琦等<sup>[7]</sup>、陈俊杰等<sup>[8]</sup>根据概率积分原理计算出地表最大下沉值、曲率、水平变形等,提出了地表建筑物最佳保护煤柱尺寸和相应的防护措施。韩亚鹏等<sup>[9]</sup>根据地表移动观测站,建立了坐标-时间坐标系并结合概率积分对地表移动变形随时间变化规律进行研究,揭示了采动不同阶段对村庄建筑物的影响。阎跃观等<sup>[10]</sup>通过建立地表与建筑物变形监测网并选取典型地表点与建(构)筑物进行同步观测,得到了建(构)筑物与地表同步下沉且呈线性函数关系。上述研究成果针对建筑物受损面积与地表移动变形的关系取得了较好的效果,为相关工程设计提供了理论依据和可行方法。

然而,我国西部地区煤系地层广泛赋存着弱胶结岩层,井下高强度开采产生台阶下沉、地表周期性裂缝等特殊现象,可能导致建构筑物合理保护煤柱宽度发生变化<sup>[11-13]</sup>。开采厚度越大的矿井,留设的保护煤柱尺寸越大。一般认为,岩层与地表移动变形量与开采厚度成正比关系,与开采深度成反比关系,当深厚比小于 30 时,地表可能出现大量的裂隙和塌陷坑等非连续变形<sup>[14]</sup>。根据关键层理论<sup>[15]</sup>,岩层移动的动态过程受控于覆岩关键层的破断运动,地表下沉是关键层与地表相互耦合作用的结果。基于此,以榆树湾煤矿 20119 工作面大采高软弱覆岩地质开采为背景,采用数值模拟方法研究了不同保护煤柱尺寸下地表变形规律,并利用概率积分法和三下开采规范确定了合理保护煤柱尺寸,最后通过对村庄实时监测,验证了理论分析结果的准确性,为类似工作面开采时村庄保护煤柱的留设提供理论借鉴和参考依据。

## 1 工程概况

榆树湾井田位于陕西省榆林市,当前主采  $2^{-2}$  煤层,该煤层埋深 255.33~303.23 m,可采厚度 11.34~12.01 m,平均厚度 11.96 m,煤层倾角  $0\sim 3^\circ$ ,平均  $1.5^\circ$ ,为近水平煤层。根据矿井设计,该煤层采用分层开采方式,上分层煤层厚度 5.0 m,上分层全部采完后再回采下分层。矿井 201 盘区位于井田北部,开采  $2^{-2}$  煤层上分层,本次研究对象 20119 工作面位于 201 盘区西翼,西侧为 20117 采空区。

20119 工作面采用走向长壁全部垮落大采高综合机械化采煤方法,采高 5.0 m,属于西部典型的大采高工作面,工作面倾向长度 249.55 m,走向长度 2 911.8 m,其岩层柱状图如图 1 所示。工作面地表无工业建筑,西部有一村庄,建筑物以砖石、砖混的平房为主,有少量 2 层的砖混结构,房屋长度大多在 8~10 m,少数达到 15 m,村庄与工作面位置关系如图 2 所示。

序号	柱状	岩层	埋深/m	层厚/m	岩性描述
1	[Pattern]	细沙	3.92	3.92	主要由细沙、中沙组成
2		中沙	35.21	31.29	灰黄色、浅黄色, 主要有细沙、中沙组成
3	[Pattern]	红土	132.29	95.08	灰黄色、棕黄色, 主要由红土、亚砂土组成
4		泥岩	145.82	15.53	灰色、深灰色颗粒状黄铁矿, 见滑动面风化强烈
5	[Pattern]	粉砂岩	165.28	19.46	蓝灰色为主, 见有杂质
6	[Pattern]	细粒砂岩	178.40	13.12	灰色以石英长石为主, 局部钙质胶结, 裂隙发育
7	[Pattern]	粗粒砂岩	185.06	6.66	灰色, 成分以长石、石英为主, 分选性差
8	[Pattern]	粉砂岩	189.54	4.48	深灰色, 波状层理为主, 见有小型交错层理, 局部夹细粒砂岩薄层
9	[Pattern]	泥岩	192.72	3.18	灰色、灰白色, 见滑动面夹粉砂岩薄层
10	[Pattern]	粉砂岩	226.35	25.90	灰色, 波状层理, 见植物化石、炭屑, 夹泥岩薄层
11	[Pattern]	粗粒砂岩	239.04	12.69	灰白色巨厚层状, 成分以长石、石英为主
12	[Pattern]	细粒砂岩	259.50	20.46	灰色, 局部钙质胶结, 波状层理
13	[Pattern]	粉砂岩	265.13	5.63	深灰色波状层理为主, 见有小型交错层理
14	[Pattern]	细粒砂岩	267.88	2.75	灰白色, 以长石石英为主, 分选较差, 呈棱角状
15	[Pattern]	砂质泥岩	268.88	1.00	灰色、深灰色, 见植物化石, 含镜煤条带及黄铁矿
17	[Pattern]	2煤	280.84	11.96	无烟煤, 含少量夹矸
18	[Pattern]	粉砂岩	286.01	5.17	灰色、浅灰色, 块状层理, 含炭屑及植物化石
	[Pattern]	细粒砂岩	289.55	3.54	灰色、浅灰色, 长石为主, 层理状

图 1 岩层柱状图

Fig. 1 Rock strata histogram

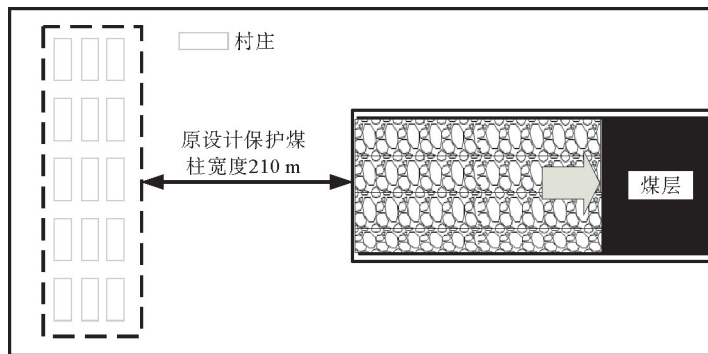


图 2 村庄与工作面位置关系

Fig. 2 The position relation between village and working face

## 2 不同保护煤柱尺寸下地表变形规律

### 2.1 模型建立

根据工程地质条件,采用FLAC<sup>3D</sup>建立数值计算模型,模型尺寸为650 m×250 m×295 m(长×宽×高),采用四面体网格划分,共划分448 000个单元格和538 846个节点,如图3所示。假设模型中岩体符合

Mohr-Coulomb 准则,详细物理力学参数见表 1,模型四周施加水平位移约束,底部施加垂直边界固定,顶部施加重力约束,考虑边界效应的影响,模型左右两侧各留设 100 m 边界。

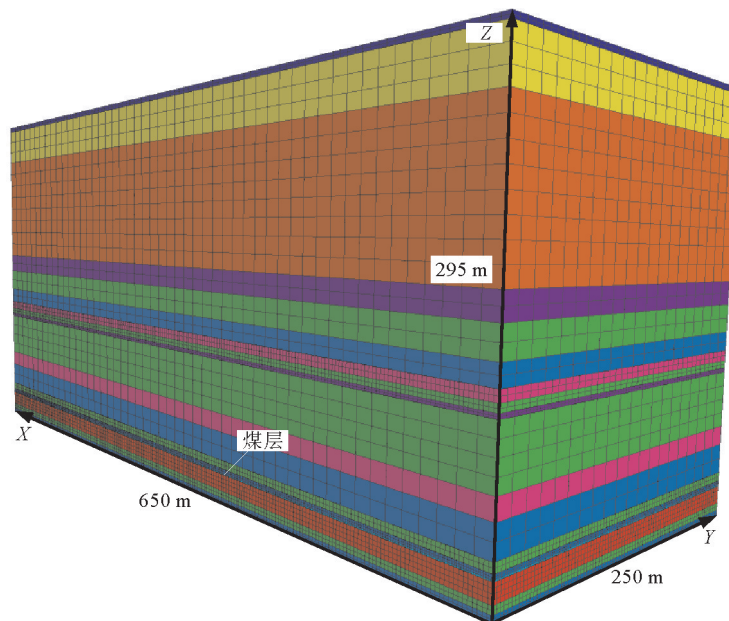


图 3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

表 1 岩体物理力学参数<sup>[16]</sup>

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩层	厚度/m	岩体密度/(kg/m <sup>3</sup> )	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	抗压强度/MPa
细沙	4	1 860	0.016	27	0.30	0.8
中沙	31	1 860	0.016	27	0.30	0.8
红土	95	1 760	0.019	23	0.26	2.1
泥岩	16	2 400	1.200	32	0.20	5.8
粉砂岩	19	2 400	2.800	38	0.20	18.4
细粒砂岩	13	2 500	2.000	35	0.30	10.0
粗粒砂岩	7	2 600	5.000	34	0.20	15.0
粉砂岩	5	2 400	2.750	38	0.20	18.4
泥岩	3	2 400	1.200	32	0.20	5.8
粉砂岩	38	2 400	3.750	38	0.20	18.4
粗粒砂岩	13	2 500	5.000	34	0.22	15.0
细粒砂岩	20	2 500	2.500	42	0.20	10.0
粉砂岩	6	2 600	2.500	42	0.16	36.0
细粒砂岩	3	2 500	2.500	35	0.25	10.0
砂质泥岩	1	2 500	2.160	36	0.15	7.5
煤层	12	1 400	1.000	28	0.31	5.0
粉砂岩	5	2 600	0.680	30	0.23	9.8
细粒砂岩	4	2 500	0.980	30	0.25	9.6

### 2.2 模拟方案

为使模拟结果更加接近真实效果,模型开采宽度采用实际工作面宽度 250 m,走向沿 Y 轴正向开采,推进长度为 250 m(已充分采动),采高为 5 m。分别模拟工作面距离村庄 200、190、180、170 和 160 m,即改变预留保护煤柱宽度,并在地表布置一条由工作面到村庄的测线,观察地表下沉情况,如图 4 所示。

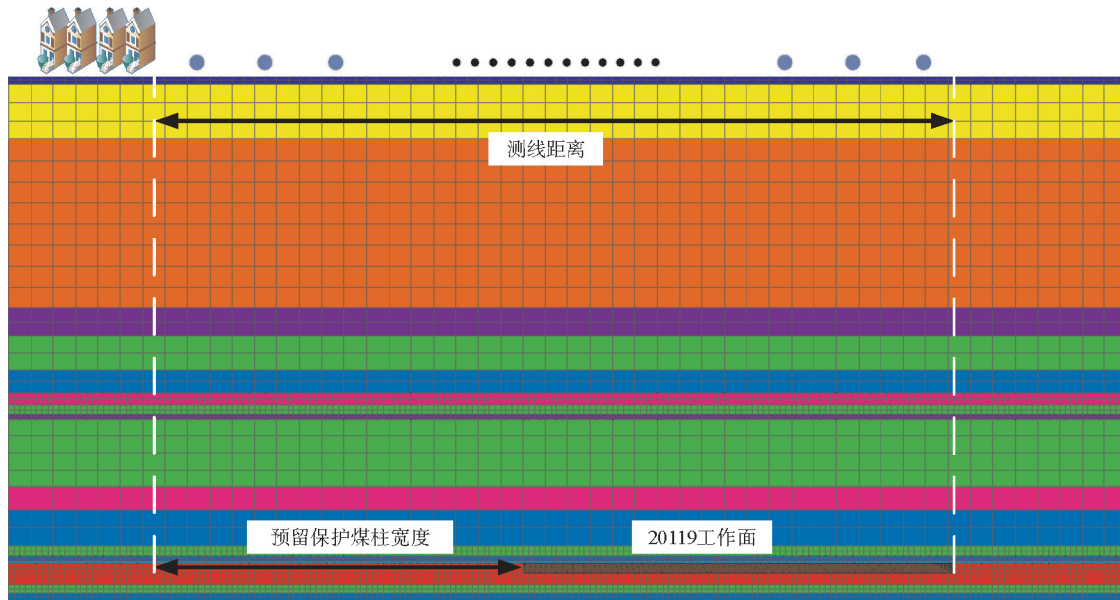


图 4 模型开采示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model mining

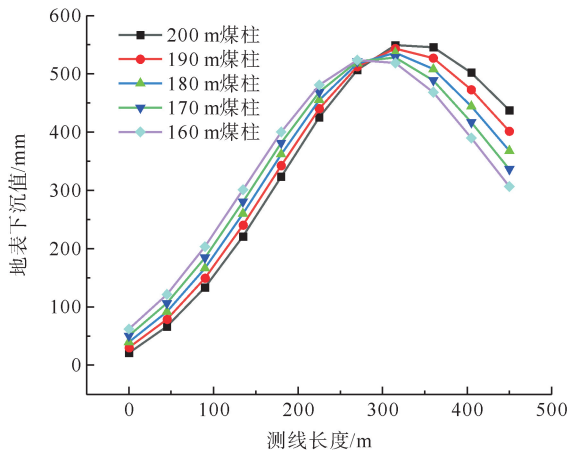
### 2.3 模拟结果与分析

由图 5 所示模拟结果可知,当留设保护煤柱为 200 m 时,地表最大下沉值达到了 549.18 mm,此时村庄所在地表的下沉值为 40.74 mm,沿 X 方向的水平移动为 180 mm。当保护煤柱宽度减小到 190 m 时,地表最大下沉值为 543.29 mm,相比 200 m 保护煤柱减少了 1.08%;村庄所在地表下沉值为 48.00 mm,相比 200 m 保护煤柱上升了 17.8%,X 方向水平移动减少了 4%。随着保护煤柱的宽度减小到 180 m,地表最大下沉值达到了 536.43 mm,相比留设煤柱宽度 200 m 时,地表最大下沉值减少 2.4%,村庄所在地表下沉值增大了 37.48%,水平方向位移下降了 8.1%。随着煤柱尺寸的继续减少,即工作面越靠近村庄位置,村庄所在位置的地表下沉值进一步增大,当留设保护煤柱为 170 m 时,此时村庄所在地表的下沉值已经达到了 64.73 mm,较 200 m 保护煤柱尺寸增大了 58.90%。当煤柱尺寸小于 180 m 时,地表沿 Y 轴方向的水平移动有明显的增大趋势,相比 200 m 保护煤柱,Y 方向的水平移动增加了 164%,当煤柱尺寸减少到 160 m 时,此时村庄所在地表的最大下沉值为 74.44 mm,较 200 m 保护煤柱上升了 82.7%,X 方向水平移动达到了 147.26 mm,下降了 22.23%,Y 方向移动上升了 182.24%。

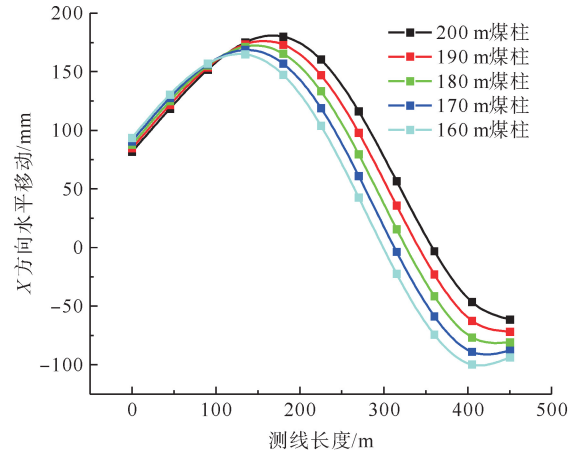
不同保护煤柱尺寸下的地表变形量见表 2。由表 2 和图 5 不同煤柱宽度对地表变形量的影响可知,随着保护煤柱宽度的减小,地表最大下沉值呈现先增大后减小的趋势,随着后续的开采,最大下沉值以工作面中心呈中心对称。X 方向上,随着煤柱宽度的减小呈现先增大后减小再增大的趋势,整体呈倒“S”型,随着煤层的进一步开采,地表沿水平方向的变化趋势形成周期性的循环。Y 方向上,随着煤柱宽度的减小,Y 方向的水平位移也呈先增大后减小的趋势,整体呈现倒“U”型,在工作面中心处下沉值最大,且当煤柱宽度小于 180 m 时,Y 方向出现明显增大的趋势。村庄所在地表在开采初期地表下沉值逐渐增大并达到最大值,随着开采工作面远离村庄,地表的下沉值逐渐趋向定值,地表下沉量几乎不再受工作面的采动影响,此时村庄出现的变形同样达到稳定。如图 6 地表下沉等值线所示,地表出现两个下沉盆地,其中右侧的下沉盆地以中间向两侧延伸,最大下沉值达到了 540 mm,位于左侧的下沉盆地受采动影响较小,最大下



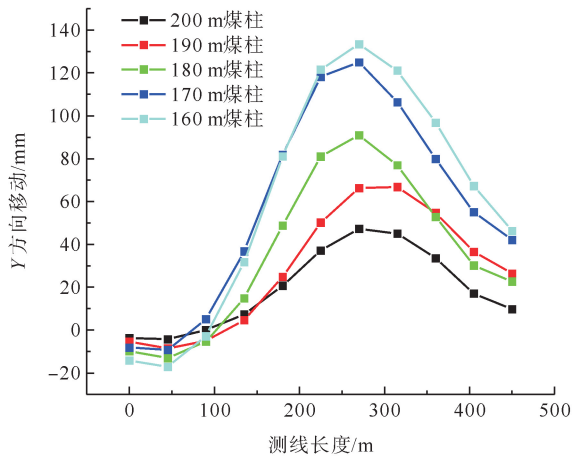
沉值约为 40 mm。



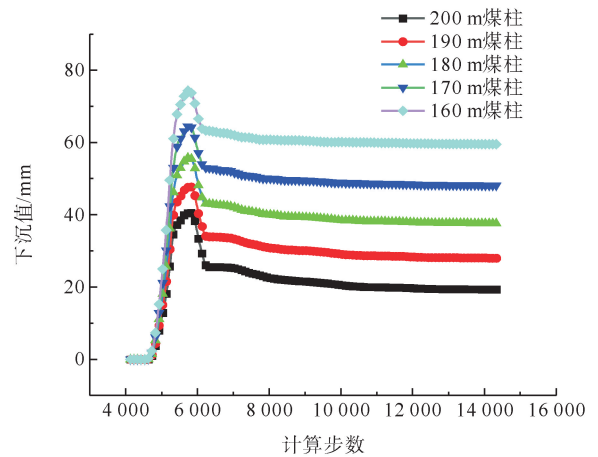
(a) 不同保护煤柱宽度地表下沉曲线



(b) 不同保护煤柱宽度X方向水平移动曲线



(c) 不同保护煤柱宽度Y方向水平移动曲线



(d) 村庄位置下沉值模拟结果

图 5 不同保护煤柱地表变化情况

Fig. 5 Surface changes of different protective coal pillars

表 2 不同保护煤柱尺寸地表变形数值

Table 2 Surface deformation values of different protective coal pillar sizes

煤柱宽度/m	地表最大下沉值/mm	村庄地表最大下沉值/mm	X 方向移动/mm	Y 方向移动/mm
200	549.18	40.74	180.00	47.3
190	543.29	48.00	173.06	66.3
180	536.43	56.01	165.39	91.0
170	528.21	64.73	156.81	125.0
160	518.56	74.44	147.26	133.5

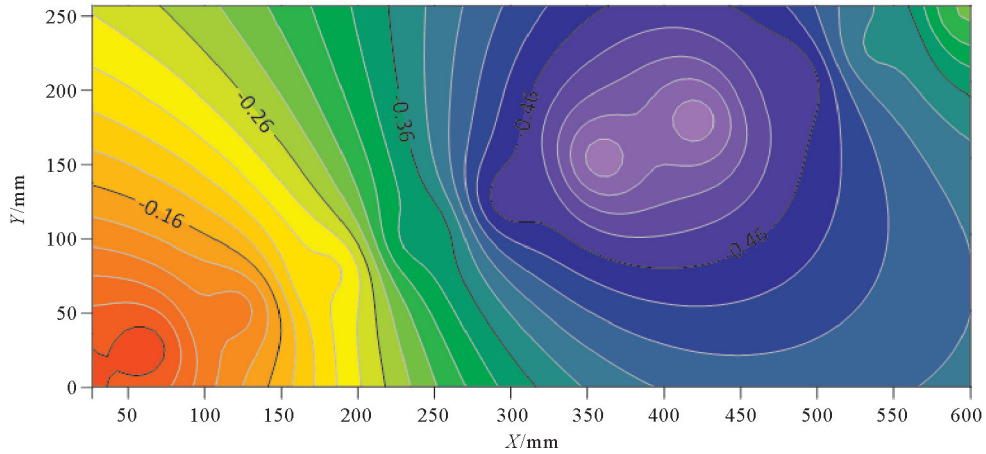


图 6 200 m 保护煤柱时地表下沉等值线

Fig. 6 Contour of surface subsidence when 200 m coal pillar is protected

### 3 合理保护煤柱宽度确定

#### 3.1 地表任意一点变形值计算

在地下煤层采动过程中,地表会产生下沉、倾斜、变形等情况,地表建筑物同样也会产生变形。在我国煤矿区,大多是百姓自建的住宅建筑,且多数为砖混或砖木结构,主要以平房或体积较小的楼房为主。建筑物的损坏评定标准与地表移动变形值通常采用国家制定的三下开采规范<sup>[17-18]</sup>,即矿区建筑物的损坏等级不能高于 I 级,煤层开采所产生的各种移动变形值均应小于或等于受到采动损害的临界变形值,即临界倾斜变形  $i(x) \leq 3 \text{ mm/m}$ 、水平变形  $\epsilon(x) \leq 2 \text{ mm/m}$  以及曲率变形  $K(x) \leq 0.2 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$ 。因此还需要对地表建筑物的倾斜变形、水平变形和曲率进行估计。以地表沿煤层倾向为横轴,以煤层开采边界为纵轴,建立坐标系,如图 7 所示。图中  $L$  表示工作面实际长度,  $l$  表示工作面计算长度,  $S_1$  和  $S_2$  拐点偏移距为  $0.05H$ ,  $H$  为煤层埋深(274 m),  $m$  为煤层厚度(5 m),  $W(x)$  为下沉曲线,  $E$  为地表上任意一点,  $x$  为距最大下沉点水平距离,  $W_0$  为最大下沉值。

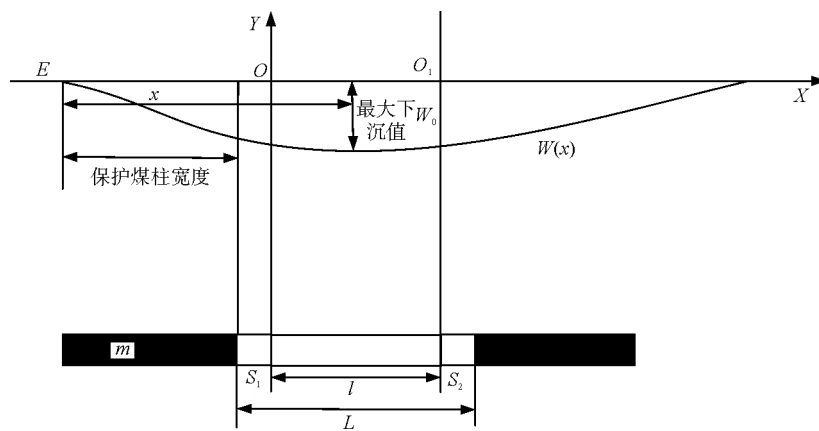


图 7 有限开采地表走向移动和变形计算模型

Fig. 7 Calculation model of surface strike movement and deformation in limited mining

#### 3.2 合理煤柱宽度确定

通过数值模拟可知,当保护煤柱宽度为 200 m 时,地表最大下沉值为 549.18 mm。假设靠近保护煤柱一侧的村庄近似看作一点 E,如图 7 所示,据矿山开采沉陷学<sup>[19]</sup>和概率积分法<sup>[20]</sup>的相关理论,煤层开采时地

表上任意一点的下沉曲线可表示为:

$$W_1(x) = W_0 \left( 1 - \frac{l}{x} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{l} \right) \quad (1)$$

地表的倾斜变形  $i(x)$  为下沉曲线  $W(x)$  的一阶导数, 即:

$$i(x) = \frac{dW(x)}{dx} = \frac{W_0}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (2)$$

式中:  $r$  为主要影响半径,  $r = \frac{H}{\tan \beta}$ ;  $\tan \beta$  为主要影响正切角, 取 2.4。

地表的曲率  $k(x)$  为地表倾斜  $i(x)$  的一阶导数, 即:

$$k(x) = \frac{di(x)}{dx} = -\frac{2\pi W_0}{r^3} \cdot x \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (3)$$

地表水平变形  $\epsilon(x)$  为地表沿水平方向  $u(x)$  的一阶导数, 即:

$$\epsilon(x) = \frac{du(x)}{dx} = -\frac{2\pi b W_0}{r^2} \cdot x \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (4)$$

式中:  $b$  为水平移动系数, 取 0.3。

将相关数值代入式(1)~(4)可得, 保护煤柱宽度为 200 m 时, 村庄所在地表的下沉值为 25.74 mm, 地表的曲率、倾斜变形和水平变形分别为  $0.11 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、1.8 mm/m、1.2 mm/m。同样, 当煤柱宽度为 190、180、170 和 160 m 时, 代入式(1)~(4), 计算结果见表 3。

表 3 地表曲率、倾斜、水平变形情况

Table 3 Surface curvature, tilt, and horizontal deformation

保护煤柱尺寸/m	曲率/( $10^{-3} \text{ m}^{-1}$ )	倾斜变形/(mm/m)	水平变形/(mm/m)	是否符合规范要求
160	0.42	5.7	2.8	否
170	0.28	3.5	2.2	否
180	0.17	2.7	1.8	是
190	0.14	2.2	1.5	是
200	0.11	1.8	1.2	是

由表 3 可知, 当保护煤柱宽度大于 180 m 时, 可以有效保护地面村庄, 建筑物不须维修或简单维修后仍可居住使用。但当煤柱小于 180 m 时, 地表村庄的曲率、水平变形和倾斜变形不符合矿区建筑物损坏规范, 根据三下开采规范, 此时地表村庄处于 II 级损坏状态, 自然砖墙可能会出现较宽的裂缝。因此, 从村庄的安全性和煤炭资源充分开采的合理性考虑, 优化后的村庄保护煤柱的宽度应留设 180 m。

## 4 工程验证

### 4.1 测点布置

根据 3.2 节中确定村庄合理优化保护煤柱宽度为 180 m。因此, 在工作面回采时, 对地表村庄设置位移监测点, 分别选取靠近保护煤柱一侧、中间位置和距离保护煤柱较远位置村庄作为监测点, 分别记为村庄 A、村庄 B 和村庄 C, 测点分别布置在建筑物的两端, 记为  $i_1, j_1, i_2, j_2, i_3, j_3, \dots, i_n, j_n$ , 具体测点布置方式如图 8 所示。其中村庄沉降观测周期可采用下式进行计算<sup>[10]</sup>:

$$T \geq \sqrt{\frac{2m_h K}{v}} \quad (5)$$

式中:  $m_h$  为同一建筑物上两沉降点的高程误差, m;  $K$  为变形值与误差之比;  $v$  为沉降速度, mm/d。



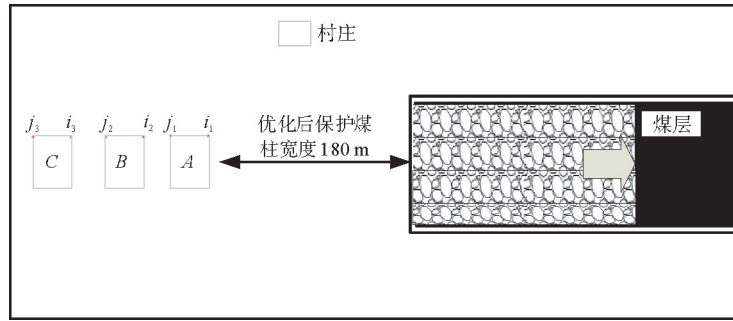


图 8 矿区建筑物监测点设计

Fig. 8 Design of building monitoring points in mining area

### 4.2 实测分析

从工作面回采开始到结束共进行了 8 次观测,当优化后保护煤柱宽度为 180 m 时,对工作面附近村庄进行地表沉降监测,村庄 A 位置的最大下沉值为 34 mm,村庄 B 位置的最大下沉值为 22 mm,村庄 C 位置的最大下沉值为 12 mm,如图 9 所示。

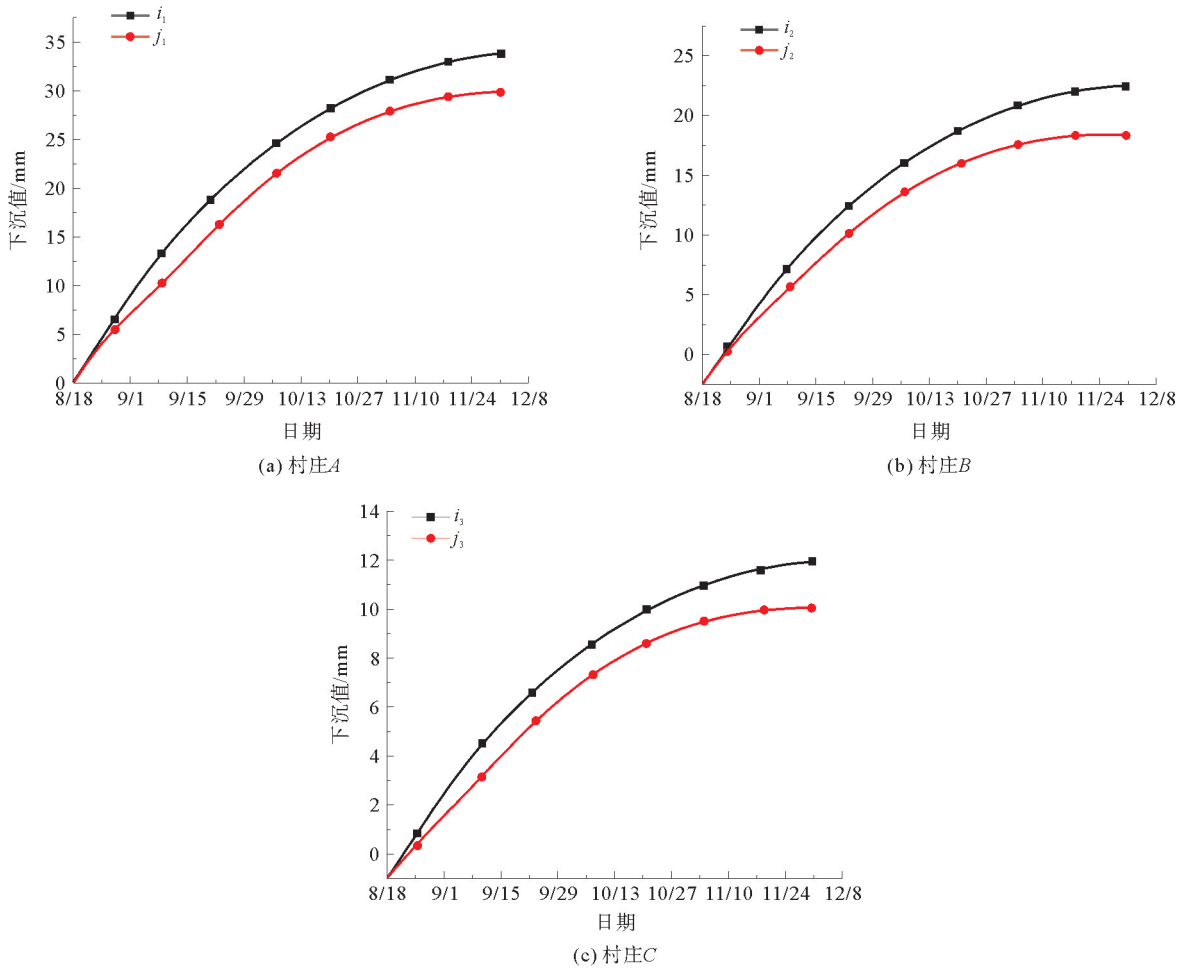


图 9 建筑物监测下沉值

Fig. 9 Monitoring subsidence of buildings

建筑物基础倾斜计算公式:

$$i_{ij} = \frac{W_i - W_j}{L_{ij}} \quad (6)$$

式中: $W_i$ 、 $W_j$  为村庄  $i$ 、 $j$  监测点的下沉值, mm;  $L_{ij}$  为两点之间的水平距离, m。

根据工程地质报告, 矿区建筑物的基本长度在 10 m 左右, 由此计算出 A、B、C 三个村庄监测点的倾斜值分别为 0.4、0.4 和 0.2 mm/m, 均满足三下开采规范要求。由此可得出, 当保护煤柱宽度为 180 m 时, 符合现场开采要求, 满足三下开采条件。

## 5 结论

1) 20119 工作面开采初期, 村庄地表下沉值逐渐增大, 随工作面远离村庄, 地表下沉逐渐趋于稳定; 且随保护煤柱宽度的减小, 村庄地表最大下沉值呈逐渐增大趋势。

2) 根据地表移动和变形计算原理, 确定 20119 工作面合理保护煤柱宽度为 180 m, 现场矿区建筑物监测表明, 村庄最大下沉值为 34 mm, 倾斜值为 0.4 mm/m, 参照我国砖混结构建筑物的损坏等级评判标准, 满足村庄安全要求。

研究结果对于西部大采高工作面保护煤柱宽度留设设计具有重要参考价值, 但文中只分析了上分层开采时地表沉降变化情况, 待下分层开采时, 留设保护煤柱尺寸还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张建强, 宁树正, 陈美英, 等. 我国煤炭资源开发前景及对策[J]. 地质论评, 2020, 66(增 1): 143-145.  
ZHANG Jianqiang, NING Shuzheng, CHEN Meiyong, et al. Prospects and countermeasures of coal resources development in China[J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 143-145.
- [2] 刘学生, 王新, 谭云亮, 等. 深部超大断面分选硐室群布置方式优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 32-39.  
LIU Xuesheng, WANG Xin, TAN Yunliang, et al. Study on layout optimization of deep super-large section sorting chamber group[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 32-39.
- [3] 高超, 徐乃忠, 刘贵, 等. 村庄等建筑物保护煤柱内巷道布置的沉陷影响研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(12): 116-120.  
GAO Chao, XU Naizhong, LIU Gui, et al. Effect of road-way layout in protective coal pillar on subsidence of buildings such as villages[J]. Coal Engineering, 2019, 51(12): 116-120.
- [4] 陈绍杰, 祝伟豪, 汪锋, 等. 建筑荷载下浅埋长壁老采空区地表移动变形规律与机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4403-4416.  
CHEN Shaojie, ZHU Weihao, WANG Feng, et al. Law and mechanism of surface movement and deformation above shallow longwall abandoned gob under building load[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4403-4416.
- [5] 崔希民, 车宇航, 赵玉玲, 等. 采动地表移动变形与建筑物损坏程度评价的再认识[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 145-153.  
CUI Ximian, CHE Yuhang, ZHAO Yuling, et al. Further discussion on mining deformation and building damage classification[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 145-153.
- [6] 崔希民, 张兵, 彭超. 建筑物采动损害评价研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1718-1728.  
CUI Ximin, ZHANG Bing, PENG Chao. Current status and progress on the estimation of mining-induced building damage[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1718-1728.
- [7] 姚琦, 冯涛, 李石林, 等. 基于概率积分法的煤矿“三下”开采沉陷预计[J]. 煤矿安全, 2012, 43(7): 188-190.  
YAO Qi, FENG Tao, LI Shilin, et al. The subsidence prediction of coal mine “Three Under” mining based on probability integral method[J]. Safety in Coal Mine, 2012, 43(7): 188-190.
- [8] 陈俊杰, 郭延涛, 郭文兵. 采动区建筑物下保护煤柱开采优化设计研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 507-511.  
CHEN Junjie, GUO Yantao, GUO Wenbing. Study on optimum design of protective coal pillar mining under buildings in mining area[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2012, 31(5): 507-511.
- [9] 韩亚鹏, 李德海, 张彦宾, 等. 村庄下开采地表动态移动变形过程及其对建筑物的影响研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(4): 208-

211.

HAN Yapeng, LI Dehai, ZHANG Yanbin, et al. Study on dynamic movement and deformation process of mining under villages and its impact on buildings[J]. Safety in Coal Mine, 2018, 49(4): 208-211.

- [10] 阎跃观, 师晓波, 刘吉波, 等. 矿区地表与建(构)筑物移动变形关系实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 158-165.  
YAN Yueguan, SHI Xiaobo, LIU Jibo, et al. In-site monitoring study on relationship between movement and deformation of surface and buildings in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 158-165.
- [11] 周凯, 于凤海, 谭云亮, 等. 弱胶结厚砾岩层覆岩联动失稳机制及矿压调控研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 2004-2017.  
ZHOU Kai, YU Fenghai, TAN Yunliang, et al. Study on linkage instability mechanism and regulation of ground pressure in weakly cemented overburden with thick conglomerate layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 2004-2017.
- [12] 纪洪广, 孙利辉, 宋朝阳, 等. 西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性控制研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 117-127.  
JI Hongguang, SUN Lihui, SONG Chaoyang, et al. Research progress on stability control of surrounding rock in weakly cemented strata engineering in western China mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 117-127.
- [13] 曹明辉, 刘钊, 王同旭. 断层活化过程及煤柱失稳机理的数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 61-68.  
CAO Minghui, LIU Fan, WANG Tongxu. Numerical simulation study of fault activation process and coal pillar instability mechanism[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(2): 61-68.
- [14] 陈绍杰, 刘瑞, 徐贞社, 等. 不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 38-48.  
CHEN Shaojie, LIU Rui, XU Zhenshe, et al. Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(1): 38-48.
- [15] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [16] 王悦. 榆树湾煤矿保水采煤技术方案研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.  
WANG Yue. Research on the technical scheme of coal mining under water-containing condition in Yushuwan coal mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [17] 徐乃忠, 高超, 刘贵, 等. 采动影响区房屋损害地表移动变形临界值研究[J]. 煤矿开采, 2017, 22(4): 65-69.  
XU Naizhong, GAO Chao, LIU Gui, et al. Study of surface movement deformation critical value of house damage in mining influence area[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(4): 65-69.
- [18] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [19] 郭广礼, 查剑峰. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- [20] 李全生, 郭俊廷, 戴华阳. 基于采动充分性的地表动态下沉预计方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 160-167.  
LI Quansheng, GUO Junting, DAI Huayang. Surface dynamic subsidence prediction method based on mining sufficiency degree[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 160-167.

(责任编辑: 吕海亮)