



移动扫码阅读

夏琪,郝喆,孙杰,等.深部煤层开采地表最大下沉速度的主要影响因素分析[J].能源环境保护,2022,36(5):95-100.
XIA Qi, HAO Zhe, SUN Jie, et al. Analysis of main influencing factors of surface subsidence velocity in deep coal seam mining[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):95-100.

深部煤层开采地表最大下沉速度的主要影响因素分析

夏琪¹,郝喆^{1,*},孙杰¹,越智²,张耀君²

(1.辽宁大学环境学院,辽宁沈阳110036;2.内蒙古仲泰测绘技术有限公司,内蒙古鄂尔多斯017000)

摘要:为研究深部开采下地表最大下沉速度的主要影响因素,本文建立了采深、采厚、覆岩坚固性系数与推进速度下的深部开采地表下沉分析模型,基于正交设计的因素显著性分析与全面设计的因素影响性分析,得到不同工况条件下最大下沉速度的变化规律。结果表明:影响最大下沉速度的主次因素由大到小依次为采厚、推进速度、覆岩坚固性系数、采深;深部开采条件下,采深并非地表下沉速度的重要影响因素;最大下沉速度与覆岩坚固性系数呈负相关,与采厚、工作面推进速度呈正相关。

关键词:深部开采;最大下沉速度;概率积分法;影响因素;地表沉陷

中图分类号:X936

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0095-06

Analysis of main influencing factors of surface subsidence velocity in deep coal seam mining

XIA Qi¹, HAO Zhe^{1,*}, SUN Jie¹, YUE Zhi², ZHANG YaoJun²

(1.College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China;2.Inner Mongolia Zhongtai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: In order to study the main influencing factors of the maximum surface subsidence velocity in deep mining, a surface subsidence analysis model of mining depth, mining thickness, overlying rock firmness coefficient and propulsion speed in deep mining was established. Based on the factor significance analysis of orthogonal design and factor influence analysis of comprehensive design, the variation rule of maximum subsidence velocity under different working conditions was obtained. The results showed that the factors affecting the maximum subsidence velocity ranked from important to unimportant were mining thickness, propulsion speed, overlying rock robustness coefficient, and mining depth. In deep mining, mining depth was not an important factor of the surface subsidence rate. The maximum subsidence velocity was negatively correlated with overlying rock robustness coefficient, and positively correlated with mining thickness and propulsion speed of working face.

Key Words: Deep mining; Maximum sinking speed; Probability integration method; Influencing factor; Subsidence

0 引言

开采引起的地表沉陷是造成矿区生态环境受损的源头,地表沉陷预测和控制问题也一直受到

国家的高度重视,特别是深部开采地表沉陷呈现出与浅部开采不同的时空演化规律,日益成为岩层移动控制领域的研究热点。地表最大下沉速度是矿山开采沉陷参数中的重要组成,地表沉陷最

收稿日期:2022-06-13;责任编辑:金丽丽

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1908222);国家自然科学基金资助项目(51904141);中央引导地方科技发展专项(2021JH6/10500015);辽宁省科技计划项目(2020JH2/10300100)

第一作者简介:夏琪(1998—),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要从事矿区地表沉陷监测领域的研究工作。E-mail:xq2657565000@163.com

通讯作者简介:郝喆(1972—),男,辽宁沈阳人,教授,主要从事矿区地表沉陷监测领域的研究工作。E-mail:haozhe2004@163.com

强烈、地表建构物受损最严重的时期就是地表最大下沉速度出现的前后一段时期,同时超过90%的地表下沉量均发生在以上时期^[1]。因此,开展深部开采地表最大下沉速度主要影响因素的研究,不仅可为地表沉陷预计提供依据,还对大采深绿色矿区的建设具有重要指导意义。

目前,已有一些研究人员对大采深煤矿区开采沉陷问题开展了科研工作。张海洋等^[2]利用基于Konthe函数与概率积分法的沉陷预计软件对大倾角煤层开采时的地表沉陷规律进行研究;王钰^[3]利用D-InSAR技术监测矿区地表沉陷情况,并基于概率积分法预计开采对周边铁路的影响;许家林等^[4]通过结合数值模拟与工程现场研究发现,深部煤层开采下地表沉陷特征之所以与浅部开采存在差异,是因其覆岩主关键层位置与层数发生了改变;余学义等^[5]、殷和健^[6]、曹鑫^[7]、孙祺钰等^[8]利用FLAC^{3D}、UDEC等模拟软件对不同开采条件下的地表沉陷情况进行分析研究;邓伟男等^[9]、闫伟涛等^[10]通过实测研究的办法分别对深部开采下地表移动参数与沉陷的动静态规律进行分析;Jixiong Zhang^[11]等以某煤矿为例,证明了煤层固废充填技术对地表最大沉陷值的控制作用。

目前有关深部开采下地表沉陷的研究工作,主要是针对具体工程开展下沉值的演化规律分析,但关于下沉速度的探讨还较为缺乏,对深部开采地表最大下沉速度影响因素的分析也尚未见报道。为此,本文以内蒙古自治区鄂尔多斯市红庆河煤矿为研究基础,此煤矿地表属高原侵蚀性低中山地貌特征,多为长臂开采近水平工作面,且各工作面中的煤层在采深、采厚、覆岩类型及推进速度等方面具有差异,因此本文采用概率积分法,考虑采深、采厚、覆岩坚固性系数及推进速度4个因素,通过正交设计与全面设计模型分析得出4个因素对于地表最大下沉速度的主次影响,并分别剖析地表最大下沉速度受各因素影响的规律。研究结果可为深部开采下地表沉陷的分析预测、地表建筑物的保护提供参考依据。

1 理论基础及方案设计

1.1 理论基础

概率积分法是研究地表沉陷的常用方法,它是用积分形式表示出随机形状多工作面开采地表随机点下沉、倾斜、曲率、水平移动和水平变形公式:

$$W(x, y) = \sum_{j=1}^n \iint_{D_j} \frac{W_0}{r_j^2} e^{-\pi \frac{(x-s)^2 + (y-t)^2}{r_j^2}} ds dt \quad (1)$$

$$i(x, y, \varphi) = \sum_{j=1}^n \iint_{D_j} \frac{-2\pi W_0}{r_j^2} \{ [(x-s)\cos\varphi + (y-t)\sin\varphi] e^{-\pi \frac{(x-s)^2 + (y-t)^2}{r_j^2}} \} ds dt \quad (2)$$

$$K(x, y, \varphi) = \sum_{j=1}^n \iint_{D_j} \left\{ \frac{-2\pi W_0}{r_j^2} \left\{ 1 - \frac{2\pi}{r_j^2} [(x-s)\cos\varphi + (y-t)\sin\varphi]^2 \right\} e^{-\pi \frac{(x-s)^2 + (y-t)^2}{r_j^2}} \right\} ds dt \quad (3)$$

$$U(x, y, \varphi) = \sum_{j=1}^n \iint_{D_j} \frac{-2\pi b W_0}{r_j^3} \{ [(x-s)\cos\varphi + (y-t)\sin\varphi] e^{-\pi \frac{(x-s)^2 + (y-t)^2}{r_j^2}} \} ds dt \quad (4)$$

$$\varepsilon(x, y, \varphi) = \sum_{j=1}^n \iint_{D_j} \left\{ \frac{-2\pi b W_0}{r_j^3} \left\{ 1 - \frac{2\pi}{r_j^2} [(x-s)\cos\varphi + (y-t)\sin\varphi]^2 \right\} e^{-\pi \frac{(x-s)^2 + (y-t)^2}{r_j^2}} \right\} ds dt \quad (5)$$

上式中: W_0 为最大下沉值, mm; $W_0 = mq\cos\alpha$; m 为采厚, mm; q 为下沉系数; α 为煤层倾角, °; r 为主要影响半径, m; $r = H/\tan\beta$; H 为采深, m; $\tan\beta$ 为主要影响半径正切; D 为工作面开采范围; n 为工作面个数。通过 dw/dt 便可得到下沉速度 v , mm/d。

1.2 方案设计

综合《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》^[12]与研究区煤矿工作面地表岩移参数得到本次研究所需的概率积分参数,见表1。

表1 概率积分参数

Table 1 Probability integration parameters

下沉系数 q	水平移动 系数 b	主要影响角 正切值 $\tan\beta$	最大下沉 角 $\theta/(^\circ)$	拐点偏 移距 S
0.22	0.22	2	88.5	0.2 H

构建不同条件下深部开采分析模型,研究采深、采厚、覆岩坚固性系数及推进速度对地表最大下沉速度的影响。目前,尚未存在公认的“深部开采”定义,国际岩石力学学会将大于500 m采深的开采定义为“深部开采”。梁政国等^[13]认为1 200 m可作为超深部开采与深部开采的界限,因此在

500~1 200 m 之间选取 3 个深部开采水平,分别是 600、800、1 000 m;根据《煤矿安全规程》^[14]对薄煤层、中厚煤层、厚煤层的定义,选取采厚的 3 个水平分别为 1 000、3 000、5 000 mm;按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[15]中对 3 种覆岩类型的区分,设定覆岩坚固性系数的 3 个水平分别对应为软弱(<3)、中硬(3~6)与坚硬覆岩(>6);通过对不同煤矿开采进度总结,设定工作面推进速度 3 个水平分别为 2、4、6 m/d。

2 地表下沉曲线特征分析

首先,以采深 600 m、采厚 3 000 mm、覆岩坚固性系数 3~6,推进速度 4 m/d 为例,开展深部开采地表下沉速度及下沉值的变化规律分析。据概率积分法计算,得到某随机点地表下沉预计曲线见图 1。

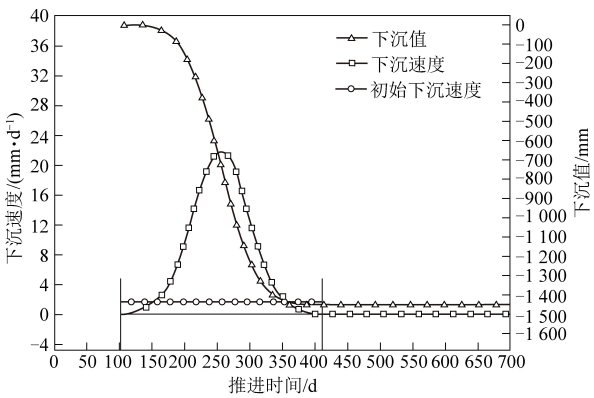


图 1 地表下沉预计曲线

Fig.1 Surface subsidence projection curve

由图 1 可知,在全部地表下沉过程中,该随机点的下沉速度呈现先增后减的趋势,其过程可分为 3 个阶段,加速下沉段、高速下沉段与减速下沉段。开采 102~160 d 为加速下沉段,下沉速度由 0 增长至 1.67 mm/d;开采 160~255 d 为高速下沉段,下沉速度由 1.67 mm/d 增至 21.8 mm/d,后降至 1.67 mm/d;开采 255 d 后为减速下沉段,此时下沉速度由 1.67 mm/d 减至 0 mm/d。

该随机点的下沉值呈现先增大后稳定的趋势。开采 102~410 d 为下沉值不断增大的阶段,下沉值由 0 增长至 1 455 mm,其中开采 160~355 d 为最大下沉速度出现的时间段,也是下沉值增长最剧烈的时间段;开采 410 d 后下沉值趋于稳定,该随机点的地表下沉过程逐渐结束。

3 基于正交设计法的影响因素主次分析

利用正交试验法,研究采深(A)、采厚(B)、覆岩坚固性系数(C)、推进速度(D)对工作面地表下沉最大速度的影响。通过正交表 $L_9(3^4)$ 进行 4 因素 3 水平模拟设计。表 1 为正交设计方案,表 2 为设计结果。

表 2 正交设计方案

Table 2 Orthogonal design scheme

因素	采深(A)/	采厚(B)/	覆岩坚固	推进速度(D)/
	m	mm	性系数(C)	(m·d ⁻¹)
水平 1	600	1 000	<3	2
水平 2	800	3 000	3~6	4
水平 3	1 000	5 000	>6	6

表 3 正交设计结果

Table 3 Orthogonal design results

因素	A	B	C	D	最大下沉速度/(mm·d ⁻¹)
方案 1	水平 1	水平 1	水平 1	水平 1	2.8
方案 2	水平 1	水平 2	水平 2	水平 2	10.6
方案 3	水平 1	水平 3	水平 3	水平 3	15.5
方案 4	水平 2	水平 1	水平 2	水平 3	4.0
方案 5	水平 2	水平 2	水平 3	水平 1	2.5
方案 6	水平 2	水平 3	水平 1	水平 2	21.8
方案 7	水平 3	水平 1	水平 3	水平 2	1.5
方案 8	水平 3	水平 2	水平 1	水平 3	15.0
方案 9	水平 3	水平 3	水平 2	水平 1	5.1
水平 1 结果总和(Ⅰ)	28.9	8.2	39.6	10.4	—
水平 2 结果总和(Ⅱ)	28.2	28.1	19.6	33.9	—

续表					
因素	A	B	C	D	最大下沉速度/(mm·d ⁻¹)
水平 3 结果总和(Ⅲ)	21.6	42.4	24.5	34.4	—
均值 1(K ₁)	9.633	2.733	13.200	3.467	—
均值 2(K ₂)	9.400	9.367	6.533	11.300	—
均值 3(K ₃)	7.200	14.133	8.167	11.467	—
极差(R)	2.433	11.400	6.667	8.000	—
因素主次	B>D>C>A				

由表 2 可知,通过地表最大下沉速度主次影响分析,得 $R_B>R_D>R_C>R_A$,即 4 个因素对地表最大下沉速度的影响主次因素排列为 B(采厚)、D(推进速度)、C(覆岩坚固性系数)、A(采深)。其中, R_A 约为 R_B 的 1/5、 R_D 的 3/10、 R_C 的 9/25,因素 A(采深)相较于因素 B、C、D 对地表最大下沉速度的影响很小,B、C、D 的贡献率达 91.5%。

4 主要因素对地表最大下沉速度影响程度分析

4.1 模拟方案

根据以上主次分析结果,因素 A(采深)对地

表最大下沉速度影响远低于其它三个因素。因此,后续分析不考虑采深变化的影响,仅对因素 B(采厚)、C(覆岩坚固性系数)、D(推进速度)进行全面分析。

将采深固定为 800 m,采厚选择 $B_1=1\ 000\text{ m}$ 、 $B_2=3\ 000\text{ m}$ 、 $B_3=5\ 000\text{ m}$,覆岩坚固性系数选择 $C_1<3$ 、 $3<C_2<6$ 、 $C_3>6$,推进速度选择 $D_1=2\text{ m/d}$ 、 $D_2=4\text{ m/d}$ 与 $D_3=6\text{ m/d}$,进行全面分析设计见表 3。利用概率积分法计算表 3 中 27 个方案,得出不同采厚、覆岩坚固性系数和推进速度下的地表最大下沉速度预测情况。

表 4 全面分析设计表

Table 4 Comprehensive analysis design sheet

序号	采深(A)/m	采厚(B)/mm	覆岩坚固性系数(C)	推进速度(D)/(m·d ⁻¹)
1	A	B ₁	C ₁	D ₁
2	A	B ₁	C ₁	D ₂
3	A	B ₁	C ₁	D ₃
4	A	B ₁	C ₂	D ₁
5	A	B ₁	C ₂	D ₂
6	A	B ₁	C ₂	D ₃
7	A	B ₁	C ₃	D ₁
8	A	B ₁	C ₃	D ₂
9	A	B ₁	C ₃	D ₃
10	A	B ₂	C ₁	D ₁
11	A	B ₂	C ₁	D ₂
12	A	B ₂	C ₁	D ₃
13	A	B ₂	C ₂	D ₁
14	A	B ₂	C ₂	D ₂
15	A	B ₂	C ₂	D ₃
16	A	B ₂	C ₃	D ₁
17	A	B ₂	C ₃	D ₂
18	A	B ₂	C ₃	D ₃
19	A	B ₃	C ₁	D ₁
20	A	B ₃	C ₁	D ₂
21	A	B ₃	C ₁	D ₃
22	A	B ₃	C ₂	D ₁
23	A	B ₃	C ₂	D ₂
24	A	B ₃	C ₂	D ₃
25	A	B ₃	C ₃	D ₁
26	A	B ₃	C ₃	D ₂
27	A	B ₃	C ₃	D ₃

根据表 3,进行 27 个方案的地表最大下沉速度模拟分析,获取因素 B(采厚)、因素 C(覆岩坚固性系数)与因素 D(推进速度)对地表最大下沉速度的影响程度。

4.2 采厚对地表最大下沉速度的影响

以推进速度为 2 m/d 时为例,得不同覆岩类型下最大下沉速度随采厚变化曲线见图 2。如图 2 所示,开采煤层越厚,地表下沉速度越快。开采厚度与垮落带、导水断裂带高度呈显著正相关,即采厚越大,地表沉陷程度越严重,下沉速度越快。以覆岩坚固性系数 $C_1 < 3$ 为例,采厚 $B_1 = 1\ 000$ mm、 $B_2 = 3\ 000$ mm 与 $B_3 = 5\ 000$ mm 时对应的最大下沉速度分别为 2.5、6.6、10.6 mm/d。不同覆岩坚固性系数下,地表最大下沉速度受采厚的影响程度也不同。以覆岩坚固性系数 $C_1 < 3$ 、 $3 < C_2 < 6$ 、 $C_3 > 6$ 为例,最大下沉速度的变化率排列由快到慢为 C_1 、 C_2 、 C_3 ,即覆岩质地越硬,最大下沉速度受采厚影响程度越弱。

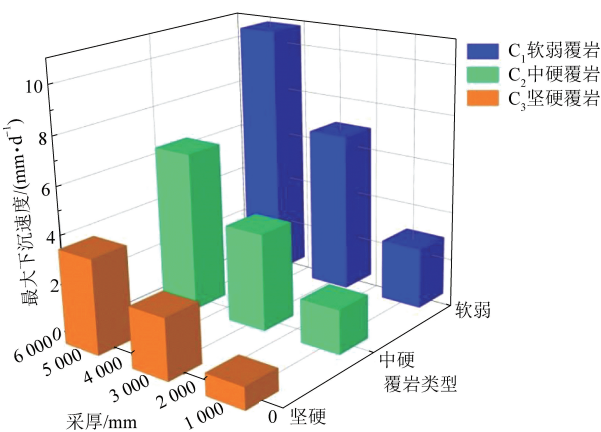


图 2 推进速度 2 m/d 时不同覆岩类型下最大下沉速度随采厚变化曲线

Fig.2 Variation curve of maximum subsidence velocity with mining thickness under different types of overburden when the propulsion velocity was 2 m/d

4.3 覆岩坚固性系数对地表最大下沉速度的影响

以采厚 3 000 mm 时为例,不同推进速度下最大下沉速度随覆岩类型变化曲线见图 3。如图 3 可知,在采厚与推进速度均固定时,地表最大下沉速度与覆岩坚硬程度呈负相关。坚硬覆岩,即覆岩坚固性系数 $f > 6$ 时,覆岩岩性多为中生代地层硬砂岩、硬石灰岩占主体,砂质页岩、页岩与辉绿岩占比较少^[16],此类岩层在开采破裂后碎胀系数增加,会充填局部采空区,进而导致地表下沉变缓慢。以推进速度 $D_1 = 2$ m/d 为例,覆岩类型为软弱、中硬、坚硬时对应的最大下沉速度分别为 6.6、

4.0、2.5 mm/d。不同推进速度下,覆岩坚固性系数对地表最大下沉速度的影响程度也不同。以推进速度 $D_1 = 2$ m/d、 $D_2 = 4$ m/d、 $D_3 = 6$ m/d 为例,最大下沉速度的变化率排列由快到慢为 $D_3 > D_2 > D_1$,即推进速度与最大下沉速度受覆岩坚固性系数的影响程度呈正相关;软弱覆岩至中硬覆岩的变化率均大于中硬覆岩至坚硬覆岩的变化率。

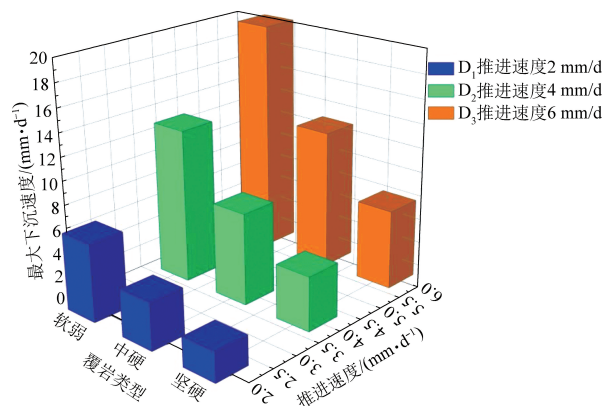


图 3 采厚 3 000 mm 时不同推进速度下最大下沉速度随覆岩类型变化曲线

Fig.3 Variation curve of maximum subsidence velocity with overburden type at different propulsion speeds when the mining thickness was 3 000 mm

4.4 推进速度对地表最大下沉速度的影响

以中硬覆岩情况为例,不同采厚下最大下沉速度随推进速度变化曲线见图 4。如图 4 可知,在采厚、覆岩类型均固定的情况下,最大下沉速度与推进速度呈正相关。以采厚 $B_1 = 1\ 000$ mm 为例,推进速度为 2、4、6 m/d 时对应的最大下沉速度为 1.8、2.6、4 mm/d。不同采厚下,地表最大下沉速度受推进速度的影响程度也存在差异。以采厚 B_1

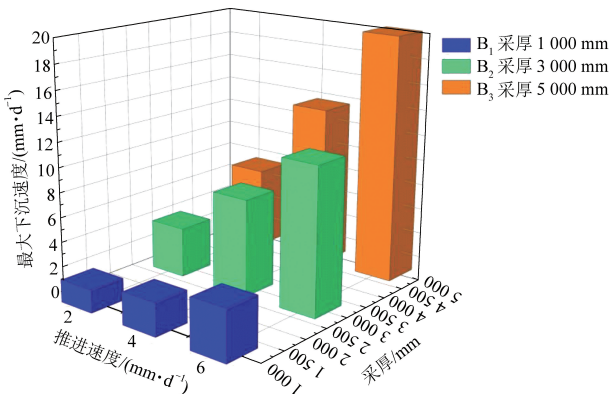


图 4 中硬覆岩时不同采厚下最大下沉速度随推进速度变化曲线
Fig.4 Variation curve of maximum subsidence speed with propulsion speed under different mining thicknesses in medium hard overburden

=1 000 mm、 $B_2=3\ 000\text{ mm}$ 、 $B_3=5\ 000\text{ mm}$ 为例,最大下沉速度的变化率排列由快到慢为 B_3 、 B_2 、 B_1 ,即采厚越大,推进速度影响最大下沉速度的程度越深。

5 结 论

本文通过概率积分法,建立不同采深、采厚、覆岩坚固性系数与推进速度下的深部开采地表下沉分析模型,分析以上因素对工作面最大下沉速度的影响,得出以下结论。

(1)利用正交设计法,建立概率积分计算模型,研究采深(A)、采厚(B)、覆岩坚固性系数(C)与推进速度(D)对工作面最大下沉速度的影响,得出地表最大下沉速度的影响主次因素排列由大到小为采厚、推进速度、覆岩坚固性系数、采深。分析结果显示因素A(采深)对指标影响显著性最差,说明对于超过500 m的深部开采,采深并不是对地表沉陷速度影响的主导因素,这与浅部开采受开采深度影响强烈的特点具有显著区别。

(2)在全部地表下沉过程中,该随机点的下沉速度呈先增后减、下沉值呈先增加后稳定的趋势。最大下沉速度出现的前后一段时间内,下沉值增长最剧烈。

(3)采厚对工作面最大下沉速度影响最大,与地表最大下沉速度呈正相关。在推进速度固定,覆岩坚固性系数不同时,地表最大下沉速度受采厚的影响程度也不同,覆岩质地越硬,最大下沉速度受采厚影响程度越弱。

(4)地表最大下沉速度与覆岩坚硬程度呈负相关。不同推进速度下,地表最大下沉速度受覆岩类型的影响程度也存在差异,推进速度与最大下沉速度受覆岩坚固性系数的影响程度呈正相关;软弱覆岩至中硬覆岩的最大下沉速度变化率,大于中硬覆岩至坚硬覆岩的变化率。

(5)地表最大下沉速度与推进速度呈正相关。不同采厚下,地表最大下沉速度受推进速度的影响程度也存在差异,采厚越大,推进速度影响最大下沉速度的程度越深。

参考文献

[1] 王昭舜. 陈家沟煤矿大采深综放开采地表移动变形规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020: 57-59.
[2] 张海洋, 李小萌, 孙利辉. 大倾角煤层开采地表沉陷规律研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (6): 108-112.
Zhang Haiyang, Li Xiaomeng, Sun Lihui. Study on surface sub-

sidence law of coal seam mining with large dip angle [J]. Coal Engineering, 2022, 54 (6): 108-112.
[3] 王钰. 基于 D-InSAR 及数值模拟的张双楼矿开采沉陷规律研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2019: 23-42.
[4] 许家林, 连国明, 朱卫兵, 等. 深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (7): 686-690.
Xu Jialin, Lian Guoming, Zhu Weibing, et al. Influence of key strata of overburden in deep mining on surface subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (7): 686-690.
[5] 余学义, 毛旭魏, 鲁楠, 等. 密集建筑物下大采深条带开采研究 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (6): 71-76.
Yu Xueyi, Mao Xuwei, Lu Nan, et al. Study on strip mining with large mining depth under dense buildings [J]. Coal Mining, 2018, 23 (6): 71-76.
[6] 殷和健. 弱胶结覆岩深部开采地表沉陷机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2020: 27-43.
[7] 曹鑫. 唐口煤矿深部充填开采地表变形规律研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2019: 16-42.
[8] 孙祺钰, 吕英华, 陈明浩, 等. 大柳塔煤矿地表沉陷移动变形规律研究 [J]. 煤矿安全, 2021, 52 (11): 205-210.
Sun Qiyu, Lv Yinghua, Chen Minghao, et al. Research on movement and deformation law of surface subsidence in Daliuta coal mine [J]. Coal Mine Safety, 2021, 52 (11): 205-210.
[9] 邓伟男. 寿阳地区不同采深条件下地表沉陷特征研究 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (5): 4-7.
Deng Weinan. Study on the characteristics of surface subsidence under different mining depths in Shouyang Area [J]. Coal Technology, 2022, 41 (5): 4-7.
[10] 闫伟涛, 张朝辉, 陈震, 等. 山区地下深部临近采煤工作面地表沉陷规律研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (4): 44-50.
YAN Weitao, Zhang Zhaohui, Chen Zhen, et al. Study on surface subsidence law of deep underground near coal mining face in mountainous area [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 41 (4): 44-50.
[11] Jixiong Zhang, Qiang Sun, Andy Fourie, et al. Risk assessment and prevention of surface subsidence in deep multiple coal seam mining under dense above-ground buildings: Case study [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2019, 25 (6): 1579-1593.
[12] 胡炳南, 张华兴, 申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017: 35-49.
[13] 梁政国. 煤矿山深浅部开采界划分问题 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2001, 2 (4): 554-556.
Liang Zhengguo. Demarcation of mining boundary in depth and shallow part of coal mine [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001, 2 (4): 554-556.
[14] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016: 211.
[15] 国家安全生产监督管理总局. 建筑物、水体、铁路及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: 34.
[16] 郭增长, 柴华彬. 煤矿开采沉陷学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013: 85.