

采动地表沉陷全过程预计方法与存在问题分析

崔希民¹, 车宇航¹, MALINOWSKA A², 赵玉玲³, 李培现¹, 胡青峰⁴, 康新亮⁵, 白志辉⁶

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. AGH 科技大学 环境工程与矿山测量系, 克拉科夫 30059; 3. 河北工程大学矿业与测绘学院, 河北 邯郸 056038; 4. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450045; 5. 西山煤电(集团)有限责任公司 地质处, 山西 太原 030053; 6. 冀中能源峰峰矿业集团, 河北 邯郸 056107)

摘要:精确、可靠的开采沉陷预计结果既是井下工作面优化设计、采动损害程度评价的重要依据,也是土地复垦、生态重建设计和老采空区地表再利用稳定性评价的基础。随着实践认识的提高,开采沉陷的研究热点也逐渐从传统的移动稳定的终态预计转向采动地表移动变形的动态预计;当连续 6 个月累计下沉不超过 30 mm 时,则认为传统的采动地表移动已经停止,但随着冒落破碎岩石的压实压密导致的缓慢残余下沉仍将持续,且残余下沉的预计也逐渐引起了研究者的重视。基于采动地表移动规律,将采动地表沉陷移动全过程划分为 2 个阶段:第 1 个阶段是包括初始期、活跃期和衰退期的地表动态移动变形期;第 2 个阶段为衰退期结束后的残余下沉期。针对第 1 个阶段,分析了现有预计方法的优缺点,提出了基于时间函数与概率积分法结合的开采沉陷动态过程预计方法和时空基准,明确指出了只考虑时间而不考虑开采过程进行动态预计、对比验证的错误,强调了终态预计只是动态预计的一个特例,且该动态预计只适用于滞后下沉而不适用于残余下沉的预计。针对第 2 个阶段,顾及冒落破碎岩石压实压密引起的残余下沉量小,基于衰退期下沉与残余下沉的连续性、残余下沉线性衰减性,给出了给定地质采矿条件下地表残余下沉持续时间和年度残余下沉系数表达式,可以定量计算残余下沉期内任一年度的残余下沉、累计残余下沉和未来潜在残余下沉,实现了采动地表沉陷的全过程预计。针对采动地表沉陷全过程预计方法研究现状,分析提出了动态过程预计存在的计算单元划分、不规则工作面、临近工作面相互影响等问题,以及残余下沉预计存在的诸如冒落破碎岩石压实压密系数、煤柱损伤与垮塌影响、预计的计算范围、预计结果的可靠性与不确定度等问题,为后续进一步研究提供了方向参考。

关键词:动态下沉;残余下沉;全过程预计;时间函数;开采沉陷

中图分类号:TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)06-2170-12

Method and problems for subsidence prediction in entire process induced by underground mining

CUI Ximin¹, CHE Yuhang¹, MALINOWSKA A², ZHAO Yuling³, LI Peixian¹, HU Qingfeng⁴,
KANG Xinliang⁵, BAI Zhihui⁶

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. The Faculty of Mine Surveying and Environmental Engineering, AGH University of Science and Technology, Cracow 30059, Poland; 3. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and

收稿日期:2022-01-04 修回日期:2022-02-15 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.FQ22.0009

基金项目:河北省自然科学基金生态智慧矿山联合基金资助项目(E2020402086);国家自然科学基金资助项目(51474217)

作者简介:崔希民(1967—),男,辽宁宽甸人,教授,博士生导师。E-mail:cxm@cumbt.edu.cn

引用格式:崔希民,车宇航, MALINOWSKA A, 等. 采动地表沉陷全过程预计方法与存在问题分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2170-2181.

CUI Ximin, CHE Yuhang, MALINOWSKA A, et al. Method and problems for subsidence prediction in entire process induced by underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2170-2181.



移动阅读

Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 5. Geology Department, Xishan Coal Electricity Group Co., Ltd., Taiyuan 030053, China; 6. Jizhong Energy Fengfeng Mining Group Co., Ltd., Handan 056107, China)

Abstract: Accurate and reliable prediction of mining subsidence is not only the important basis for the optimal design of underground work face and the evaluation of surface mining damage, but also for the design of land reclamation and ecological reconstruction, and the reasonable evaluation of the stability and suitability for old mining surface subsidence areas. With the progress of theoretical study and practice, the research hotspot has been changed from the final static prediction to the progressive surface subsidence with time. Once less than 30 mm of accumulative surface subsidence occurs in six months in the weakening period, the traditional surface movement ends, which indicates stabilized surface. However, under the action of the long-term load for overburden rock strata, the residual surface subsidence will continue with the compactions of broken roof rocks, bed separations, and cracks in overburden, considerable attention has been devoted to the subject of the residual subsidence prediction. Based on the law of mining surface movement, the entire process of mining subsidence is divided into two stages. The first stage is the progressive subsidence including initial, active and weakening periods, and the second stage is named residual surface subsidence after the weakening period. For the first stage, the advances and defects are analyzed and the principle of progressive mining subsidence, which is a combined time function and probabilistic integral method, is given. The spatio-temporal datum of progressive prediction for multi-working face mining is proposed. It must be noted that the progressive prediction and comparison are not sufficient only considering the time without underground mining. The final mining subsidence is a special case of progressive subsidence under the condition of time infinity. That is to say that this method is suitable to predict the delayed subsidence at the end of the weakening period but not suitable to predict the residual surface subsidence after the weakening period. For the second stage, based on the continuity of surface subsidence at the end of the weakening period and the residual subsidence in the first year, and a linear monotonic decrease in the residual subsidence factor because of the smaller residual subsidence, the expressions of duration and annual residual subsidence factor are achieved. The quantitative calculation of the duration and annual residual surface subsidence factor can be carried out under the given geo-mining conditions. From the point of view of the current status for the entire process of mining subsidence prediction, the problems of computational element length, irregular working face, and the mining effect of vicinity working faces for progressive surface subsidence are discussed. The existing problems for residual surface subsidence related to compacting factor for broken rocks, damaged and crushed effect of coal pillars, calculating area for prediction, reliability and uncertainty for prediction, etc. are also proposed and discussed. All those problems can be consulted and remain to be solved in the future.

Key words: progressive subsidence; residual subsidence; entire process prediction; time function; mining subsidence

煤炭作为我国主体能源,在保障国家能源安全、促进经济社会发展的同时,也因大范围、高强度地下开采导致了地面塌陷、积水、建筑物及基础设施损毁,进而诱发了土地退化、生态恶化等一系列环境问题。一般认为,采动地表沉陷的主因是地下开采,与开采方法、顶板管理方法、开采深度、开采厚度、采空区的大小、工作面推进速度等有关;从直接顶、基本顶到上覆岩层是地表沉陷的载体和传递者,岩层结构及其组合决定了覆岩移动变形和破坏特征,间接控制了地表沉陷的范围和程度;而地表沉陷是地下开采活动在地表的直接反映。对于长壁工作面开采、冒落法管理顶板,当深厚比大于30时,上覆岩层一般存在垮落带、断裂带和弯曲下沉带,地表沉陷连续、渐变;当深厚比小于30时,上覆岩层一般不出现弯曲下沉带,地表沉

陷呈非连续特征^[1-3]。

如何采取科学的方法和可行的技术手段,客观预计采动地表沉陷程度和范围,已经引起了国内外学者的广泛关注^[1-8]。传统的采动地表移动变形预计往往都是针对地表移动稳定后的终态预计,但随着研究的深入和认识水平的提高,人们逐渐意识到采动地表的移动变形是一个复杂的时空过程。KRATZSCH^[4]认为,地表各点的移动变形值在开采期间变化明显,移动终止时发生压缩变形的区域,在移动期间可能遭受拉伸,反之亦然。因此,在进行开采设计和选择地面建筑物保护措施时,不仅要考虑移动过程稳定后的终止状态,还必须考虑地表移动变形随时间的发展过程,且地表点的下沉速度与回采工作面的推进速度近似成比例,回采工作面推进速度越快,下沉盆地越平

缓。我国峰峰、焦作、鹤壁、枣庄的现场实测分析结果表明,采动地表最大动态变形小于稳定后的静态变形,动静态倾斜比最大为 89.1%、最小为 20.6%;动静态曲率比最大为 74.7%、最小为 25.4%;动静态水平变形比最大为 87.5%、最小为 37.4%;各矿区动静态变形比变化较大的原因,是受到地质采矿条件的影响^[2,9]。理论研究与实践表明,地表点的动态移动变形时间过程,可根据其变形特征划分为 4 个阶段,如图 1 所示^[10]。

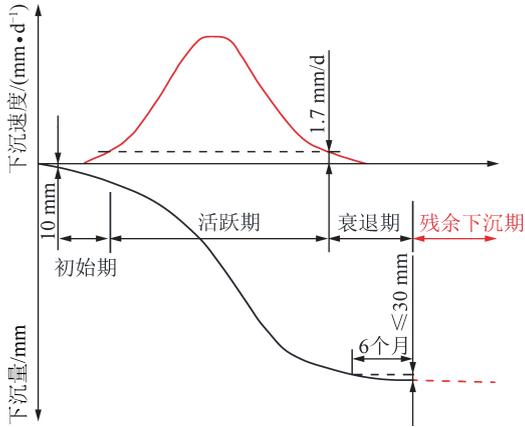


图 1 开采沉陷全过程分期

Fig.1 Periods of entire process for mining subsidence

第 1 个阶段为地表下沉达到 10 mm、下沉速度达到 50 mm/月或 1.7 mm/d 的初始期;第 2 个阶段为下沉速度大于 50 mm/月或 1.7 mm/d 的活跃期;第 3 个阶段为下沉速度小于 50 mm/月或 1.7 mm/d 的衰退期,且当连续 6 个月的地表累计下沉 ≤ 30 mm 时,则表示传统的地表移动结束;第 4 个阶段为残余下沉期,是由冒落破碎岩石、采动离层、断裂裂隙等在上覆岩层载荷的作用下,逐步压实压密而引起地表缓慢下沉。残余下沉依据地质采矿条件的不同,一般会持续几年或几十年;而当采用房柱式等部分开采方法时,在相当长的一段时期内,煤柱会保持相对稳定,但受煤柱风化、地下水浸泡、侵蚀和长期载荷影响,未来数十年后也会出现失稳破坏,导致地表产生突然下沉^[11]。

鉴于采动地表动态移动变形规律和空间分布特征在开采方案优化设计、建构建筑物采动损害评价、土地复垦与生态重建方案设计、老采空区地表再利用的稳定性评价等应用领域的重要性,人们从不同视角,对采动地表动态移动变形时间过程的预计理论、预计模型、计算方法等开展了广泛讨论和探索,产生了基于时间函数的预计理论^[12]、基于流变力学的黏弹性预计模型^[13-15]、相似材料模型实验方法^[16-17]、时间函数与数值模拟相结合等方法^[18-19]。对比分析发

现,由于基于流变力学、相似材料模型、数值模拟等方法因涉及物理力学参数较多,存在应用不够方便的缺点,但能从力学机理、机制上解释岩层与地表移动、破坏产生的原因;而基于时间函数的动态过程预计方法,因模型参数少、参数确定容易,而得到了广泛应用。分析国内外相关文献和研究现状可见,基于时间函数的地表动态移动变形的时间过程研究,还存在时空基准建立不明确,动态预计模型有偏差,时间函数的应用仅仅围绕监测时间而与开采过程相脱节的现象,阻碍了动态预计时间过程理论的工程化应用;此外,如何实现常规移动变形期的动态过程预计与残余下沉预计的有效衔接,也是认识、实践、再认识的过程。本文对长壁开采地表沉陷全过程预计方法及其存在问题展开讨论,以期达到理论与实践相结合,促进该研究领域科学发展的目的。

2 地表动态移动变形时间函数的由来与发展

2.1 Knothe 时间函数

1953 年 Knothe 在分析下沉盆地形成的时间效应中,假设地表点某一时刻 t 的下沉速度 $dW(t)/dt$ 与该点地表最大下沉量 W_0 及时刻 t 的动态下沉 $W(t)$ 之差成比例,即有

$$\frac{dW(t)}{dt} = c[W_0 - W(t)] \quad (1)$$

其中, c 为与上覆岩层物理力学性质有关的时间因素影响系数, $1/a$ 。对式(1)进行积分,当给定初始条件 $t = 0, W(t) = 0$ 后,可得

$$W(t) = W_0(1 - e^{-at}) \quad (2)$$

令时间函数为 $\varphi(t) = 1 - e^{-at}$, 则可得

$$W(t) = W_0\varphi(t) \quad (3)$$

从式(3)可知,当 $t = 0$ 时,时间函数 $\varphi(t) = 0, W(t) = 0$;当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\varphi(t) = 1, W(t) = W_0$, 达到该地质采矿条件下地表最大下沉量。式(1)中 $W_0 = mq \cos \alpha$, 其中, m 为开采厚度, mm; q 为充分采动条件下的地表下沉系数; α 为煤层倾角, ($^\circ$)。分析发现, Knothe 时间函数 $\varphi(t)$ 的取值区间是 $[0, 1]$, 当给定某一预计时刻 t , 就可定量确定该时刻的时间函数值, 从而实现地表下沉的动态预计^[20-21], 并成功用于覆岩注浆的动态下沉效果评估^[22]。

对 Knothe 时间函数进行一阶、二阶导数计算, 其一阶导数代表地表下沉速度, 二阶导数代表地表下沉加速度。理论上, 当 $t = 0$ 时, 下沉速度和下沉加速度应都为 0; 在移动的中间阶段, 下沉速度应从 $0 \rightarrow +\max \rightarrow 0$ 变化, 而下沉加速度应从 $0 \rightarrow +\max \rightarrow 0 \rightarrow -\max \rightarrow 0$ 变化; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 下沉速度和下沉加速度

也应趋向于 0。然而,计算分析发现,Knothe 时间函数虽然可用于预计地表动态下沉,但其下沉速度和下沉加速度的分布规律并不与理论相符,见表 1^[23]。

表 1 Knothe 时间函数特征

Table 1 Characteristics of Knothe time function

t	0	$(0, +\infty)$	$+\infty$
$\varphi(t)$	0	+	1
$d\varphi(t)/dt$	c	+	0
$d^2\varphi(t)/dt^2$	$-c^2$	-	0

2.2 改进的 Knothe 时间函数

针对 Knothe 时间函数存在的弊端和缺陷,多位学者对其进行了改进尝试和探索,以弥补该函数存在的不足。常占强和王金庄^[24]基于地表点的下沉速度达到最大时,地表点的下沉量约相当于该点最大下沉量的一半的假设,取 t 为地表移动时间 T 的一半,且以 $t = T/2$ 为对称,构建 2 个分段的 Knothe 时间函数,并以河北邢台东庞矿 2107 工作面观测数据为例,采用无因次时间下沉曲线进行了预计结果的对比分析。李建^[25]则以地表下沉速度最大时的时刻 t_0 为界,来构建 2 个分段的 Knothe 时间函数,并以河北红旗铁

矿的观测数据进行验证^[25]。在此基础上,张兵等进一步对分段 Knothe 时间函数进行了优化^[26],分析了优化分段 Knothe 时间函数求参方法^[27],进而研究了地表任意点^[28]、倾向主断面^[29]、走向主断面^[30]的计算模型和算法。ZHANG 等^[31]基于地表点某一时刻 t 动态下沉量 $W(t)$ 的 n 阶导数与该点地表最大下沉量 W_0 及时刻 t 的动态下沉量 $W(t)$ 之差成比例,提出了改进的 Knothe 时间函数。总体上,改进与优化 Knothe 时间函数的目的是为了弥补 Knothe 时间函数在下沉速度和下沉加速度的不足,但也相应地增加了待定参数,例如地表移动总时间 T 和地表点出现最大下沉速度的时刻 t_0 等,从而使得参数确定困难,计算求解变得复杂。

2.3 时间函数的发展

考虑到 Knothe 时间函数、改进的 Knothe 时间函数存在的缺点,学者们纷纷从不同的视角对沉陷动态预计的时间函数开展研究,在基于 S 型曲线都满足沉陷动态预计时间函数构造要求的假设前提下,提出了许多类型各异的时间函数,呈现出百花齐放、百家争鸣的学术局面,较典型的时间函数模型表达形式见表 2。

表 2 时间函数形式及其发展

Table 2 Developments and formations of time function

时间函数	时间函数形式	文献
广义时间函数	$\varphi(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_\tau)}, & t > \tau \\ 0, & t \leq \tau \end{cases}$	[23, 32]
Sroka-Schober 时间函数	$\varphi(t) = 1 + \frac{\xi}{f + \xi} e^{-f(t-t_\tau)} - \frac{f}{f + \xi} e^{-\xi(t-t_\tau)}$	[23, 32]
正态分布时间函数	$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t-t_\tau}{2\sigma}}$	[32-36]
反正切时间函数	$\varphi(t) = p_1 \{ \arctan[p_0(t - p_2)] + \arctan(p_0 p_2) \} / W_0$	[37]
Usher 时间函数	$\varphi(t) = \frac{1}{(1 + ce^{-at})^b}$	[38]
Weibull 时间函数	$\varphi(t) = 1 - e^{-at^k}$	[39]
分段 Weibull 时间函数	$\varphi(t) = \begin{cases} 0.5 [e^{-c(\tau k - t^k)} - \frac{\tau - t}{\tau} e^{-c\tau k}], & 0 \leq t \leq \tau \\ 1 - 0.5 e^{-c(t^k - \tau k)}, & \tau < t \leq T \end{cases}$	[40]
Bertalanffy 时间函数	$\varphi(t) = (1 - be^{-at})^d$	[41]
变异时间函数	$\varphi(t) = 1 - e^{-c(t-t_0)} \frac{H_1^{k/2}}{T^k}$	[42]
Logistic 时间函数	$\varphi(t) = A_2 + (A_1 - A_2) / [t + (t/x_0)^p]$	[43-44]
Gompertz 时间函数	$\varphi(t) = \exp(-e^{-k(t-b)})$	[45]

注:表中的时间函数中包含了多个参数,限于篇幅在此不再赘述参数的含义,感兴趣的读者可查阅对应的参考文献。

分析表 2 中的时间函数可以发现,时间函数的构建形式包括 2 类:一类是在已有 Knothe 时间函数的

基础上通过增加参数,以改进时间函数的形态特征;另一类是通过引入经济学、生态学、人口学中以时间

序列为自变量的生长模型,包括描述增长信息随时间变化的数学模型、生物生长模型等。但新模型建立的物理基础不强,参数的意义不够明晰,参数的确定方法及其适用条件还有待进一步研究。文献分析发现,大多数研究者都是基于预计的动态下沉时间曲线与实测结果进行对比验证,以证明所提出时间函数的有效性,忽略了开采过程这一主要影响因子。图 2 为地面沉陷工程师手册中的典型时间下沉曲线^[46],由于煤矿生产因假期而停产,地表下沉速度减缓,使得实测的时间下沉曲线出现了缓台阶,如图 2 黑线所示,红虚线为工作面连续推进的时间下沉曲线。实际工程应用中,如果仅仅以观测数据的获得时间为自变量,进行时间函数有效性、适用性的拟合验证,未顾及地下开采的推进位置和开采过程,往往会导致预计结果失效。实际上,井下工作面的开采,往往会受到断层等地质构造影响、安全生产条件约束等,不可避免出现持续一定时期的整顿、检修;且受地质采矿条件的限制,工作面的推进也不可能始终保持匀速,这类情况在沉陷动态过程预计中须予以考虑。

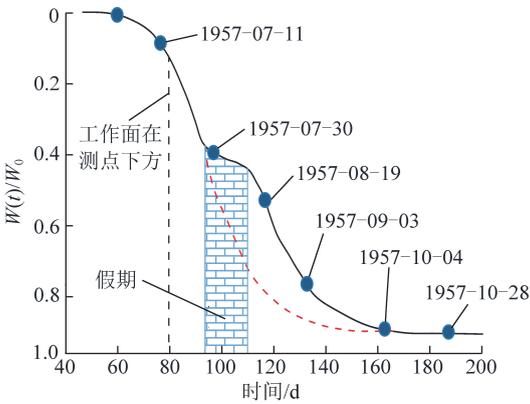


图 2 典型时间下沉曲线

Fig.2 Typical curve of time-subsidence

3 基于时间函数的地表动态下沉预计原理和方法

3.1 采动地表动态下沉的预计原理和方法

3.1.1 单一工作面动态下沉的预计原理

对于图 3(a) 所示的长壁开采工作面,按工作面推进过程可划分为若干个开采单元。假设工作面平均推进速度为 v ,开切眼处的开采时间为某年某月某日,当给定需要预计的时刻为某年某月某日,二者之差即为预计的持续时间 T 。若 $Tv \geq L$, L 为工作面走向长度,则表示整个工作面的开采单元都需要参与动态下沉计算;若 $Tv < L$,则只有靠近开切眼侧的 Tv 范围内的开采单元参与动态下沉计算。

各开采单元对地表下沉盆地的贡献大小取决于该单元开采后的持续时间 t_i 。由于靠近开切眼侧的开采单元经历的采动影响时间长,下沉充分程度大,对整个地表下沉盆地的贡献大;而靠近工作面处开采单元的地表下沉充分程度低,对动态下沉贡献就小。基于叠加原理,各开采单元动态下沉求和,即可获得该预计时刻的地表动态下沉值,以工作面走向方向为例的动态下沉计算原理如图 3(b) 所示。

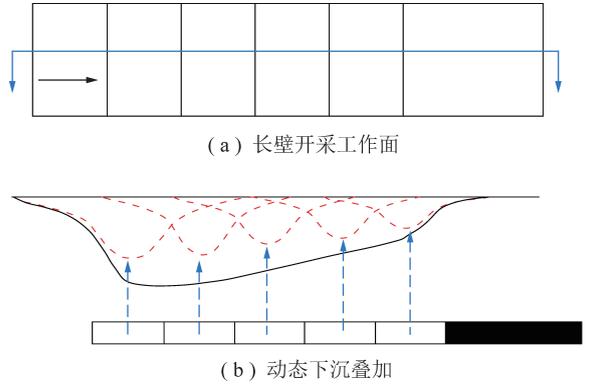


图 3 动态下沉计算原理

Fig.3 Calculating principle of progressive subsidence

3.1.2 动态下沉的计算方法

采动地表动态下沉的计算不仅取决于时间函数的特征完备性,也依赖于预计方法的可靠性,只有二者有机结合才能实现采动地表动态下沉的可靠预计。因概率积分法在我国应用最广,且《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》^[47]中给出了我国主要煤矿区地表移动的角量参数和预计参数,一般都选择概率积分法作为动态预计的基础方法。

假设一个长壁工作面沿走向方向被划分为 n 个开采单元,第 i 个单元的推进速度为 v_i ,开采的持续时间为 t_i ,则第 i 个单元的走向推进长度为 $L_i = t_i v_i$ 。根据开采的起始时间和给定的预计时间,可确定采动地表动态下沉预计的持续时间为 T ;如果 $\sum t_i < T$,则该工作面的所有开采单元均参与动态下沉计算,

$L = \sum_{i=1}^n v_i t_i$;从第 1 个开采单元到第 n 个开采单元计算的移动持续时间分别为 $T - t_1, T - t_1 - t_2, \dots, T - \sum_{i=1}^n t_i$ 。则第 1 个开采单元的动态下沉为

$$W_1(x, t) = \varphi(T - t_1) [W(x) - W(x - v_1 t_1)] \quad (4)$$

第 2 个开采单元的动态下沉为

$$W_2(x, t) = \varphi(T - t_1 - t_2) [W(x - v_1 t_1) - W(x - v_1 t_1 - v_2 t_2)] \quad (5)$$

第 n 个开采单元的动态下沉为

$$W_n(x,t) = \varphi(T - \sum_{i=1}^n t_i) [W(x - \sum_{i=1}^{n-1} v_i t_i) - W(x - \sum_{i=1}^n v_i t_i)] \quad (6)$$

对于预计时刻,地表的累计动态下沉为

$$W(x,t) = \sum_{i=1}^n W_i(x,t) \quad (7)$$

$W(x)$ 概率积分法的计算公式为

$$W(x) = \frac{W_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{r} x \right) + 1 \right] \quad (8)$$

式中, r 为开采影响半径,m。

式(1)~(7)是针对长壁矩形工作面走向方向主断面的动态下沉计算公式,倾向方向主断面的动态预计方法与走向类同;由走向、倾向主断面的动态下沉可以得到全盆地的地表动态下沉及其分布规律。

当工作面推进速度基本均匀时,可采用工作面的平均推进速度计算,上述公式可进一步简化;基于时间函数的地表动态移动变形预计适合于现代计算机的大规模数据处理,例如 LI 等^[48] 基于 AutoCAD 开发了地表三维动态移动变形预计系统,使用方便。

进一步分析各开采单元的时间函数发现,当 $T \rightarrow \infty$ 时,各开采单元的时间函数 $\varphi(t_i) \rightarrow 1$, 动态下沉的计算结果与终态下沉相同,说明终态下沉预计只是动态下沉预计的一个特例;当达到充分采动条件时,地表的最大下沉等于该地质采矿条件下地表最大下沉 W_0 , 如图 4 所示。这也表明,基于时间函数的地表动态下沉计算方法只适用于包括初始期、活跃期和衰退期的地表动态下沉预计,即可以预计工作面停采后地表动态下沉至终态下沉间的滞后下沉,但不能用于衰退期后的地表残余下沉预计。

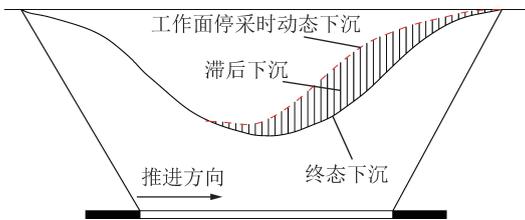


图4 滞后下沉示意

Fig.4 Sketch map of delayed subsidence

3.2 多工作面动态下沉预计

3.2.1 时空基准的建立

根据实际工程需要,采动地表沉陷动态过程预计时可能涉及一个工作面、一个采区、一个矿甚至一个矿区;对于多工作面沉陷动态预计必须建立一个统一的时空基准,包括空间基准和时间基准,涉及动态过程预计的所有工作面必须在该基准框架下进行。

空间基准是指坐标系的统一,可以采用研究区域范围内统一的当地坐标系、独立坐标系或国家坐标系,通过坐标转换,实现各工作面采动影响的叠加,实现空间基准统一的方法与静态的多工作面预计相同。

时间基准是指根据工程实际需要考虑的受采动影响工作面的开采起始时间和动态预计时间。如图 5 所示的研究区域内,有 4 个开采工作面,工作面 1, 2, 3 的走向长度为 1 840 m, 开采深度为 630 m; 工作面 1 的开采起始时间是 2017-09-09, 停采时间是 2018-12-19; 工作面 2 的开采起始时间是 2018-06-12, 停采时间是 2019-09-13; 工作面 3 的开采起始时间 2019-07-08, 停采时间是 2020-10-05; 工作面 4 位于井田边界, 受地质构造影响, 工作面不规则, 暂未开采。地面布设有 2 条相互垂直的观测线, 1 号工作面开采前观测站已经进行了全面观测, 后续按规程要求进行日常观测, 获得了相应的观测数据。

根据地质采矿条件,若要预测 2019-11-15 的地表动态下沉情况,根据采动地表移动的时间过程规律,可判断出地表可能会受到工作面 1, 2 的开采影响,以及按工作面 3 推进速度计算出该工作面推进到的位置,如图 5 中工作面 3 的黑虚线。动态下沉过程从 2017-09-09 开始,计算到 2019-11-15,按受采动影响工作面的各开采单元逐一进行动态下沉预计并叠加计算,可以得到 2019-11-15 的地表动态下沉值;再将计算的结果与该时刻的地表实测数据进行对比,吻合良好方能验证预计方法的有效性和可靠性。

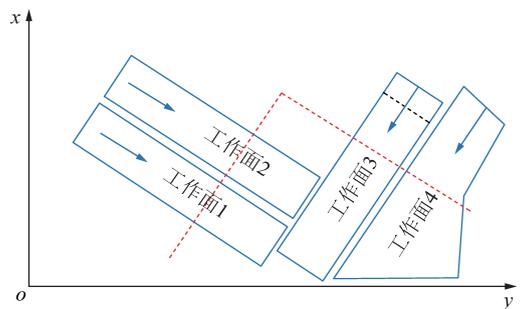


图5 多工作面开采问题

Fig.5 Problems of multi work face mining

3.2.2 动态预计存在的问题与讨论

(1)对于给定的地质采矿条件,时间函数系数在理论上应该对应某个确定的值;但在相同的地层条件下的观测结果显示,工作面推进速度慢则移动时间长、地表下沉缓慢,工作面推进速度快则地表移动时间短、下沉剧烈,表明时间函数系数在给定地质条件下与工作面推进速度密切。对于 Knothe 时间函数,颜荣贵^[49] 分析给出了 4 种基于实测数据的时间系数确定方法,笔者^[21,23] 进一步研究了考虑工作面推进

速度的时间函数系数确定方法,但都不够成熟,仍有待进一步研究。

(2) 根据动态下沉预计原理和方法,动态预计计算开采单元的划分直接影响计算效率和预计精度。单元划分的小,则计算的时间效率低,但计算精度高;若开采单元划分的过大,虽然可提高计算效率,但预计精度难以保证。为此,有学者研究提出以平均开采深度的 1/10 进行单元划分,认为可以保证预计结果的精度^[50];也有学者研究提出,应以周期来压步距划分开采单元^[23]。如何结合开采深度、上覆岩层的结构与组合,合理划分开采单元的大小,仍有待进一步探索。

(3) 如果动态预计涉及到 4 号不规则工作面,应按工作面的推进方向划分开采单元;受不规则工作面的影响,该工作面的动态预计开采单元也是非矩形的;前述的剖面函数则不再适用,而应以影响函数按开采面积的数值积分来代替^[51]。

(4) 对于图 5 中 1 号、2 号 2 个邻近工作面,其采动都会影响倾向观测线;如果确定的时间函数及其系数可靠,预计方法可行,经验证 1 号工作面开采的预计结果与该时刻观测结果吻合,则可通过后续预计,有效区分 2 个临近工作面开采对观测线的各自采动影响,进而可以解决长期以来邻近工作面开采对地表下沉叠加影响导致实测结果无法区分的难题。

4 残余下沉的预计方法

4.1 极限残余下沉计算的理论假设

当连续 6 个月地表累计下沉 ≤ 30 mm 时,则认为传统的地表沉陷已经停止,采动地表移动趋于稳定。然而大量的研究表明,碎胀是完整岩体破裂体积增加的故有特性^[52],由于冒落岩石的碎胀性、岩层的断裂、离层等,导致在采空区和上覆岩层中存在大量的空隙。在上覆岩层载荷的作用下,其中的空隙随着压实压密而逐渐减少;理论上,在长期载荷作用下,存在被压实压密到原岩状态的可能^[53],即存在地表极限残余下沉系数 $q_m = 1 - q$;但实际上,冒落破碎岩石又不可能被压缩回原始状态,故地表极限残余下沉系数可以进一步表示为

$$q_m = n(1 - q) \quad (9)$$

式中, q 为地表下沉系数,一般取值 0.6~0.8; n 为与冒落破碎岩石压实程度相关的系数, $0 < n \leq 1$, 当 $n = 1$ 时,则表示冒落破碎岩石被压缩到原岩状态。

4.2 基于连续性、渐变性的残余下沉预计方法

从图 1 可知,采动地表沉陷全过程包括 4 个阶段,而前述的基于时间函数的地表动态下沉预计方法

只适用于初始期、活跃期和衰退期 3 个阶段;若要实现采动地表沉陷全过程预计,则残余下沉必须与衰退期下沉有效衔接。

理论研究与实际观测表明,采动地表残余下沉量小、残余下沉持续时间长,地表残余下沉具有缓慢衰减的特点。假设残余下沉持续时间为 T_r 年,则地表年度残余下沉系数 q_a^i 满足如下 2 个条件^[10]:

$$q_a^1 > q_a^2 > \dots > q_a^{T_r} \quad (10)$$

且残余下沉期内,各年度残余下沉系数之和应等于极限残余下沉系数,即存在

$$\sum_{i=1}^{T_r} q_a^i = q_m \quad (11)$$

假设残余下沉持续时间内的年度残余下沉系数服从线性衰减规律,则第 1 年的残余下沉系数为

$$q_a^1 = q_m T_r / \sum_{i=1}^{T_r} i \quad (12)$$

第 2 年的残余下沉系数为

$$q_a^2 = q_m (T_r - 1) / \sum_{i=1}^{T_r} i \quad (13)$$

同理可得第 T_r 年的残余下沉系数为

$$q_a^{T_r} = q_m / \sum_{i=1}^{T_r} i \quad (14)$$

整理可得,地表年度残余下沉系数可表达为

$$q_a^i = q_m \frac{2(T_r - i + 1)}{T_r(T_r + 1)}, i = 1, 2, \dots, T_r - 1, T_r \quad (15)$$

根据规范,当地表连续 6 个月累计下沉小于 30 mm 时,采动地表下沉的衰退期结束。由此可以推断地表残余下沉期第 1 年的最大残余下沉量小于 60 mm,从而有

$$mq_a^1 \cos \alpha \leq 60 \text{ mm} \quad (16)$$

将式(12)代入式(16),整理可得

$$T_r \geq \frac{mq_m \cos \alpha}{30} - 1 \quad (17)$$

当给定地质采矿条件,利用式(17)可以简便地确定地表残余下沉的持续时间 T_r ;如果式(17)计算的残余下沉持续时间为非整数时,应取大于该非整数的整数。将所确定的 T_r 代入式(15),即可获得该地质采矿条件下残余下沉期内的任一年度残余下沉系数。对于长壁开采工作面,可以借鉴概率积分法,计算出残余下沉期内任一年的地表任意点残余下沉、累计残余下沉和未来潜在的残余下沉。

为分析残余下沉持续时间、年度残余下沉系数与地质采矿条件的关系,现分别选择煤层开采厚度为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 和 4.0 m, 地表下沉系数 q 分别

为 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90 和 0.95, 取冒落破碎岩石的压实程度系数为 $n = 0.5$, 则地表极限残余下沉系数 q_m 分别为 0.15, 0.125, 0.1, 0.075, 0.05 和 0.025, 则计算的地表残余下沉持续时间分布特征如图 6 所示。从图 6 可知, 随着开采厚度 m 的增加, 地表残余下沉持续时间 T_r 随之增大; 随着下沉系数 q 的增加, 地表极限残余下沉系数 q_m 减小, 残余下沉持续时间 T_r 也减小。当取极限残余下沉系数为 $q_m = 0.2$, 不同开采厚度对应的年度残余下沉系数分布如图 7 所示。从图 7 可知, 随着开采厚度 m 的增加, 年度残余下沉系数 q_a^i 的衰减变慢; 对于 1.5 m 的开采厚度, 地表残余下沉持续时间为 9 a, 各年度的残余下沉系数之和等于 q_m , 即 $\sum_{i=1}^9 q_a^i = 0.2$ 。上述分析表明, 笔者建立的年度残余下沉系数计算方法, 较好地解决了采动地表衰

退期与残余下沉期有效衔接的预计问题, 并可实现残余下沉期内任一年的地表残余下沉、某一年之前的累计残余下沉和某一年之后潜在的残余下沉的定量预计。

4.3 实例验证

宁夏国土资源调查监测院于 2015 年 1 月在神华宁夏煤业集团有限责任公司灵新煤矿 051603 工作面布设了 GNSS 监测站, 包括 1 个基准站 LX-1-1 和 2 个工作测站 LX-2-2, LX-2-4, 如图 8 所示。该工作面时间从 2014 年 7 月至 2015 年 6 月, 走向长度 1 531 m, 倾向宽度 273 m, 平均采厚 2.97 m, 煤层倾角 14° , 平均采深 162 m, 第四系松散层厚度为 10 m, 工作面年均推进速度 1 350 m/a。从 2015 年 2 月至 2018 年 7 月, 获得了 154 期沉陷监测数据, 如图 9 所示, 实测地表最大下沉 2 605 mm, 地表下沉初期 1 个月、活跃期 3 个月、衰退期 6 个月, 地表移动持续时间 10 个月, 实测地表最大下沉速度为 108 mm/d, 地表移动剧烈。由于测站建立滞后于开采, LX-2-2 测点只测得了相对下沉, 但总体下沉趋势与 LX-2-4 测点相同。

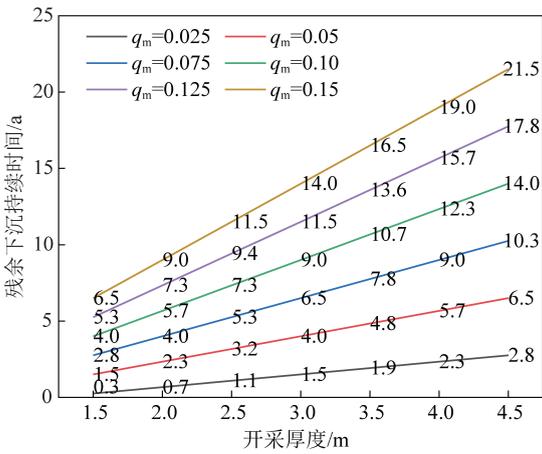


图 6 残余下沉持续时间与开采厚度、极限残余下沉系数的关系

Fig.6 Relationship between duration and mining thickness, extreme residual subsidence factor

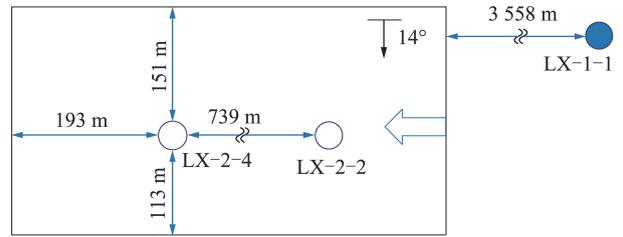


图 8 GNSS 监测站示意

Fig.8 Layout of GNSS monuments

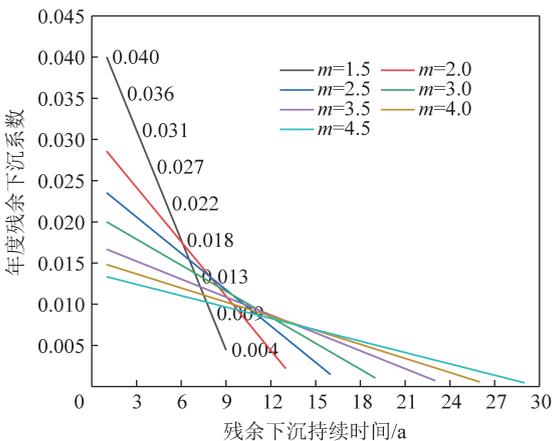


图 7 年度残余下沉系数与开采厚度的关系 ($q_m = 0.2$)

Fig.7 Relationship between annual residual subsidence factor and mining thickness for $q_m = 0.2$

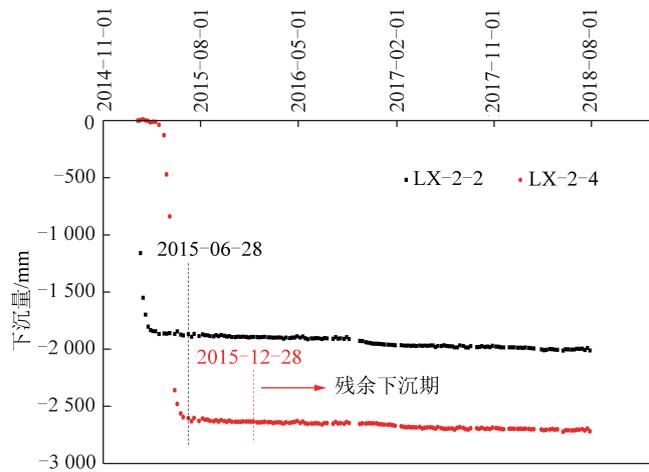


图 9 实测地表下沉-时间曲线

Fig.9 Observed subsidence curves with time

分析 LX-2-4 测点的监测结果可知, 从 2015-06-28—12-28, 连续 6 个月累计下沉为 29.1 mm, 表

明地表移动衰退期结束,残余下沉呈线性衰减。根据最大下沉、开采厚度和煤层倾角,计算可得下沉系数 $q = 0.904$;取 $n = 0.5$,可得极限残余下沉系数 $q_m = 0.048$ 。由式(17)计算可得地表残余下沉持续时间为 $T_r \geq 3.6 \text{ a}$;取 $T_r = 4 \text{ a}$,代入式(15),可得残余下沉期内第 1 年到第 4 年的年度残余下沉系数分别为 0.019, 0.014, 0.010 和 0.005,对应的年度残余下沉量分别为 55, 40, 29 和 14 mm。根据 LX-2-4 测点的监测结果,第 1 年的残余下沉为 29 mm(2015-12-29—2016-12-29),第 2 年的残余下沉为 37 mm(2016-12-29—2017-12-29),第 3 年不足 1 a 的残余下沉为 24 mm(2017-12-29—2018-07-28),实测残余下沉与计算值基本吻合。

2021 年,MODESTE^[54]等采用 InSAR 对法国南部的 Alsace 煤矿区进行了 24 a 的周期性沉陷监测,分析了采矿引起的地表残余下沉随时间的演化过程,发现地表残余下沉量的大小与开采厚度之间存在相关性,这也从侧面验证了本文建立的地表年度残余下沉系数计算方法的正确性。

4.4 残余下沉预计存在的问题与讨论

(1)冒落破碎岩石压实严密系数 n 的取值问题。在一定的地质采矿条件下,地达到充分采动的下沉系数 q 一般小于 1。研究表明,冒落破碎岩石的碎胀性既与岩石类型有关,也随冒落破碎岩块大小、堆积方式及排列特征的不同而变化^[55];理论上,在长期载

荷作用下,破碎岩石有被压回到原岩状态的可能,从而认为极限残余下沉系数 $q_m = 1 - q$,而实际中又不可能被压缩至原岩状态,进而有 $q_m = n(1 - q)$,工程应用时取 $n = 0.5$ 只是一个折中办法。鉴于此,后续应进行冒落破碎岩石碎胀性、压实压密性的理论和实验研究,以给出不同地质采矿条件下岩石碎胀性与压实性的量化结果。

(2)煤柱的影响问题。就长壁开采工作面开采而言,为了通风需要和保证安全开采,也会留设工作面间小煤柱;PENG^[6]通过对比预计结果和实测值发现,多工作面开采沉陷预计时不考虑工作面间煤柱的压缩效应,预计结果与实测值偏差较大。因此,工作面间煤柱的压缩效应与破坏也必须在地表动态移动变形预计和残余下沉预计中予以考虑。

(3)残余下沉预计的计算范围问题。常规的地表沉陷预计以考虑了拐点偏移距影响的地下工作面开采范围为计算范围开展预计,而残余下沉预计针对的是冒落破碎岩石的压实压密过程。就长壁工作面开采而言,由于冒落不充分、顶板悬臂梁的影响等,在工作面周边存在的空隙、空洞多,如图 10(a)所示,而工作面间小煤柱在上覆岩载荷长期作用下会失稳垮塌,对地表残余下沉影响较大,如图 10(b)所示。因此,残余下沉预计的计算范围是按工作面的开采面积计算,还是应包括面间小煤柱,亦或是以工作面间小煤柱为主,还有待进一步研究。

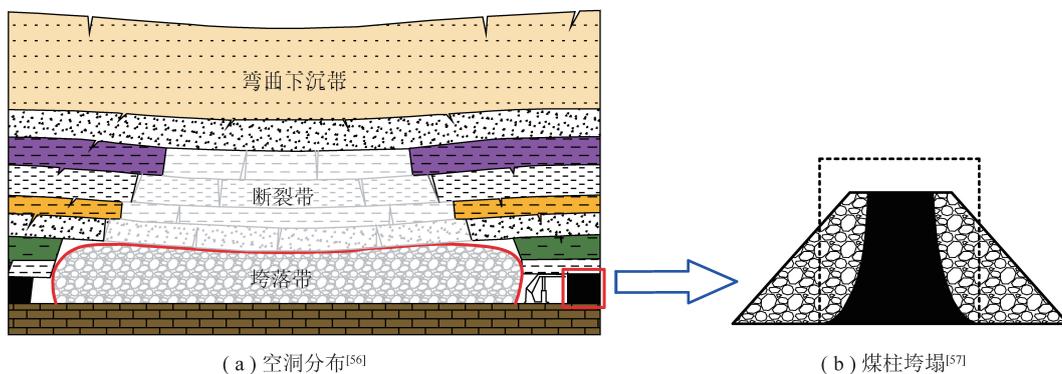


图 10 长壁开采覆岩空洞分布与面间煤柱垮塌

Fig.10 Voids distribution and pillar crushed between longwall working faces

(4)不确定性问题。由于采动地表动态沉陷全过程是一个复杂的时空过程,既受到时间函数模型、预计模型的不完善和预计参数误差的影响^[8],同时由于现有技术条件的限制,对上覆岩层的结构与组合、节理分布、断层与陷落柱等岩性与地质构造的认识还存在一定的不确定性和模糊性,都可能导致基于时间函数的动态预计、残余下沉预计结果的可靠性降低。波兰的 HEJMANOWSKI 和 MALINOWSKA^[58-59]

基于实测参数具有正态分布的统计规律,采用 Monte Carlo 法,估计了参数的不确定度,并给出了置信水平;基于空间统计分析评价了下沉预计结果的可靠性。这些分析、评价方法值得学习借鉴。

5 结论与建议

(1)依据采动地表移动变形规律,将采动地表沉陷全过程划分为动态移动变形和残余下沉 2 部分;动

态移动变形由传统的初始期、活跃期和衰退期构成,而残余下沉是指衰退期结束后由冒落破碎岩石、离层、断裂裂隙等压实压密而引起的地表缓慢沉陷。

(2)动态移动变形预计可以采用时间函数与概率积分相结合的方法,以各开采单元的动态预计结果按叠加原理进行计算。根据时间函数特性,无论采用何种时间函数形式,当时间 $t \rightarrow \infty$ 时,各开采单元的时间函数 $\varphi(t_i) \rightarrow 1$,动态下沉的计算结果与终态下沉相同,说明终态下沉预计只是动态下沉预计的一个特例,且基于时间函数的地表动态下沉计算方法只适用于初始期、活跃期和衰退期的动态预计,可以计算工作面停采后的滞后下沉,而不能用于残余下沉期的下沉计算。同时,仅考虑时间而忽略实际开采过程的对比验证是不可行的。

(3)动态下沉的预计精度取决于时间系数、预计参数的确定精度,同时受计算开采单元划分大小的影响,目前受上覆岩层性质与组合、工作面推进速度影响的时间参数确定方法及开采单元划分方法还有待进一步研究。当时间系数、单元尺度和预计参数确定合理,通过动态过程预计,可有效区分2个临近工作面开采的各自采动影响,进而解决长期以来邻近工作面开采对地表下沉影响无法区分的难题。

(4)极限残余下沉计算方法的基本假设是在长期载荷作用下,冒落破碎岩石、离层和断裂裂缝有压回到初始原岩状态的可能,但实际又不可能实现,从而建立了地表极限残余下沉系数与地表下沉系数存在 $q_m = n(1 - q)$ 关系,实际应用建议取 $n = 0.5$ 只是折中。后续应加强不同地质采矿条件下岩石碎胀性及压实压密特性的定量研究,以使极限残余下沉系数的确定更科学、依据更充分。

(5)基于衰退期结束年度的下沉与残余下沉期第1年残余下沉的连续性,且残余下沉量小并服从线性衰减规律,可以构建给定地质采矿条件下的残余下沉持续时间及年度残余下沉系数表达式,进而实现残余下沉期内任一年度的残余下沉、累计残余下沉和将来潜在残余下沉的定量计算,为土地复垦与生态重建设计以及老采空区地表建筑场地再利用的稳定性评价等提供技术参数和依据。

(6)由于地表残余下沉的控制因素多,就其预计方法及其分布规律研究而言,目前的研究结果距离实际工程应用还有差距,建议后续进一步加强长壁开采面间煤柱的失稳与破坏、残余下沉预计的计算范围、残余下沉预计结果的可靠性与不确定度等研究,为残余下沉的可信预计提供更详实的技术支持,更好地服务于矿区生态文明建设、人与自然和谐共生和可持续

发展。

参考文献(References):

- [1] 刘宝琛,廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- [2] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1981.
- [3] 中国矿业学院,阜新矿业学院,焦作矿业学院. 矿山岩层与地表移动[M]. 北京:煤炭工业出版社,1981.
- [4] KRATZSCH H. Mining subsidence engineering[M]. New York:Springer-Verlag Berlin Heidelberg,1983.
- [5] 何国清,杨伦,凌婵婷,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1990.
- [6] PENG S S. Surface subsidence engineering [M]. New York:Society of Mining Engineering,1992.
- [7] 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.
- [8] 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):154-163.
CUI Ximin, DENG Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence [J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):154-163.
- [9] 彭小沾,崔希民,臧永强,等. 时间函数与地表动态移动变形规律研究[J]. 北京科技大学学报,2004,26(4):341-344.
PENG Xiaozhan, CUI Ximin, ZANG Yongqiang, et al. Time function and prediction of progressive surface movements and deformations [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2004,26(4):341-344.
- [10] CUI Ximin, ZHAO Yuling, WANG Guorui, et al. Calculation of residual surface subsidence above abandoned longwall coal mining [J]. Sustainability,2020,12(4):1528.
- [11] CUI Ximin, GAO Yongge, YUAN Debao. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China [J]. Natural Hazards,2014,74(2):911-929.
- [12] KNOTHE S. Effect of time on formation of basin subsidence [J]. Archives of Mining and Steel Industry,1953,1(1):1-7 (in Polish).
- [13] YANG Yu, GONG Zhiqiang, LIANG Bing. Dynamic subsidence basins in coal mines based on rock mass rheological theory [J]. Mining Science and Technology (China),2011,21:333-335.
- [14] LI Wenxiu, GAO Chongyang, YIN Xia, et al. A visco-elastic theoretical model for analysis of dynamic ground subsidence due to deep underground mining [J]. Applied Mathematical Modelling,2015,39(18):5495-5506.
- [15] HOU Defeng, LI Dehai, XU Guosheng, et al. Superposition model for analyzing the dynamic ground subsidence in mining area of thick loose layer [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2018,28:663-668.
- [16] YU Guangming, MI Wenrui, WANG Daning, et al. Research on the relationship between the surface dynamic subsidence and overburden separated strata of coal mine and its model [J]. Procedia Engineering,2017,191:196-205.
- [17] ZHENG Ruyun, WU Kan, HAO Gang. Research on dynamic subsid-

- ence principles of overburden strata based on similar material simulation [A]. 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science [C]. 2010.
- [18] 刘玉成. 修正的Knothe沉陷模型及FLAC^{3D}模拟开采验证 [J]. 煤矿开采, 2018, 23(5) : 1-4.
LIU Yucheng. Modified Knothe subsidence model and mining verified by FLAC^{3D} simulation [J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(5) : 1-4.
- [19] LI Huaizhan, ZHA Jianfeng, GUO Guangli. A new dynamic prediction method for surface subsidence based on numerical model parameter sensitivity [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233 : 1418-1424.
- [20] 崔希民, 缪协兴, 赵英利, 等. 论地表移动过程的时间函数 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(5) : 453-456.
CUI Ximin, MIAO Xiexing, ZHAO Yingli, et al. Discussion on the time function of time dependent surface movement [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5) : 453-456.
- [21] CUI Ximin, WANG Jiachen, LIU Yisheng. Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(7) : 1057-1063.
- [22] WANG Binglong, XU Jialin, XUAN Dayang. Time function model of dynamic surface subsidence assessment of grout-injected overburden of a coal mine [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104 : 1-8.
- [23] 崔希民, 陈立武. 沉陷大变形动态监测与力学分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [24] 常占强, 王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究——改进的克诺特时间函数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9) : 1496-1499.
CHANG Zhanqiang, WANG Jinzhuang. Study on time function of surface subsidence-The improved Knothe time function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9) : 1496-1499.
- [25] 李建. 红旗铁矿改进 Knothe 时间函数开采沉陷预计模型 [J]. 金属矿山, 2018(3) : 132-136.
LI Jian. Improved Knothe time function mining subsidence prediction model of Hongqi Iron Mine [J]. Metal Mine, 2018(3) : 132-136.
- [26] 张兵, 崔希民. 开采沉陷动态预计的分段 Knothe 时间函数模型优化 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2) : 541-548.
ZHANG Bing, CUI Ximin. Optimization of segmented Knothe time function model for dynamic prediction of mining subsidence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2) : 541-548.
- [27] 张兵, 崔希民, 赵玉玲, 等. 优化分段 Knothe 时间函数求参方法 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(12) : 3379-3386.
ZHANG Bing, CUI Ximin, ZHAO Yuling, et al. Parameter calculation method for optimized segmented Knothe time function [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12) : 3379-3386.
- [28] 张兵, 赵玉玲, 崔希民, 等. 基于优化时间函数的采动地表任意点沉陷动态预计 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10) : 143-149.
ZHANG Bing, ZHAO Yuling, CUI Ximin, et al. Dynamic prediction of mining-induced subsidence for any surface point based on optimized time function [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10) : 143-149.
- [29] 张兵, 崔希民, 赵玉玲, 等. 开采沉陷倾向主断面动态预计模型与算法 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(6) : 1864-1873.
ZHANG Bing, CUI Ximin, ZHAO Yuling, et al. Prediction model and algorithm for dynamic subsidence of inclined main section [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6) : 1864-1873.
- [30] 张兵, 崔希民, 袁德宝, 等. 基于优化时间函数的走向主断面动态预计模型与算法 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7) : 162-168.
ZHANG Bing, CUI Ximin, YUAN Debao, et al. Dynamic prediction model and algorithm of strike main section based on optimized time function [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7) : 162-168.
- [31] ZHANG Lianglian, CHENG Hua, YAO Zhishu, et al. Application of the improved Knothe time function model in the prediction of ground mining subsidence: A case study from Heze City, Shandong Province, China [J]. Applied Sciences, 2020(10) : 3147.
- [32] GONZALEZ-NICIEZA C, ALVARES-FERNANDEZ M I, MENENDEZ-DIAZ A, et al. The influence of time on subsidence in the Central Austrian Coalfield [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2007, 66 : 319-329.
- [33] 张兵, 崔希民, 胡青峰. 开采沉陷动态预计的正态分布时间函数模型研究 [J]. 煤炭科学与技术, 2016, 44(4) : 140-145.
ZHANG Bing, CUI Ximin, HU Qingfeng. Study on normal distribution time function model to dynamically predict mining subsidence [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4) : 140-145.
- [34] 李春意, 高永格, 崔希民. 基于正态分布时间函数地表动态沉陷预测研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(s1) : 108-116.
LI Chunyi, GAO Yongge, CUI Ximin. Progressive subsidence prediction of ground surface based on the normal distribution time function [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(s1) : 108-116.
- [35] 张凯, 胡海峰, 廉旭刚, 等. 地表动态沉陷预测正态时间函数模型优化研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9) : 235-240.
ZHANG Kai, HU Haifeng, LIAN Xugang, et al. Optimization of surface dynamic subsidence prediction normal time function model [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9) : 235-240.
- [36] 贺福帅, 胡海峰, 廉旭刚, 等. 与位置有关正态时间函数模型构建及参数 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(2) : 766-772.
HE Fushuai, HU Haifeng, LIAN Xugang, et al. Construction and parameter of normal time function model related to position [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2) : 766-772.
- [37] NIE L, WANG H F, YAN X, et al. A new prediction model for mining subsidence deformation: The arc tangent function model [J]. Natural Hazards, 2015, 75 : 2185-2198.
- [38] 王玉涛, 刘小平, 毛旭阁, 等. 基于 Usher 时间函数的采空区地表动态沉陷预测模型研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9) : 145-151.
WANG Yutao, LIU Xiaoping, MAO Xuge, et al. Research on prediction model of surface dynamic subsidence of mined-out region based on Usher time function [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9) : 145-151.
- [39] 刘东海, 邓念东, 姚婷, 等. 基于开采沉陷实测数据的 Weibull 时间函数模型参数研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9) :

- 152-158.
- LIU Donghai, DENG Niandong, YAO Ting, et al. Study on parameters of Weibull time function model based on sited measured mining subsidence data [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 152-158.
- [40] 张永胜, 胡海峰, 蔡音飞, 等. 分段 Weibull 时间函数开采沉陷动态预计研究[J]. *太原理工大学学报*, 2021, 52(3): 343-349.
- ZHANG Yongsheng, HU Haifeng, CAI Yinfei, et al. Study on dynamic prediction of mining subsidence with segmented Weibull time function [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2021, 52(3): 343-349.
- [41] 高超, 徐乃忠, 孙万明, 等. 基于 Bertalanffy 时间函数的地表动态沉陷预测模型[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2740-2748.
- GAO Chao, XU Naizhong, SUN Wanming, et al. Dynamic surface subsidence prediction model based on Bertalanffy time function [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2740-2748.
- [42] 郭旭炜, 杨晓琴, 柴双武, 等. 基于变异函数的地表沉陷动态预计模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(9): 159-166.
- GUO Xuwei, YANG Xiaoqin, CHAI Shuangwu, et al. Study on surface subsidence dynamic prediction model based on variogram [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 159-166.
- [43] 李春意, 赵亮, 李铭, 等. 基于 Logistic 时间函数地表动态沉陷预计及优化求参研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(6): 2202-2210.
- LI Chunyi, ZHAO Liang, LI Ming, et al. Prediction of surface progressive subsidence and optimization of predicting model parameters based on the Logistic time function [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(6): 2202-2210.
- [44] 徐洪钟, 李雪红. 基于 Logistic 增长模型的地表下沉时间函数[J]. *岩土力学*, 2005, 26(S0): 151-153.
- XU Hongzhong, LI Xuehong. Time function of surface subsidence based on Logistic growth model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(S0): 151-153.
- [45] WANG Jian, YANG Keming, WEI Xiangping. Prediction of Longwall progressive subsidence basin using the gompertz time function [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02664-z>.
- [46] 英国煤炭局. 地面沉陷工程师手册[M]. 董其逊, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.
- [47] 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.
- [48] LI L, WU K, ZHOU D W. AutoCAD-based prediction of 3D dynamic ground movement for underground coal mining [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2014, 71: 194-203.
- [49] 颜荣贵. 地基开采沉陷与地表建筑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [50] 吴侃, 葛家新, 王玲丁, 等. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [51] 张兵, 崔希民, 赵玉玲, 等. 不规则工作面沉陷预计三角剖分算法研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(9): 280-283.
- ZHANG Bing, CUI Ximin, ZHAO Yuling, et al. Research on triangulation algorithm for subsidence prediction in irregular mining working face [J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(9): 280-283.
- [52] PALCHIK V. Bulking factors and extents of caved zones in weathered overburden of shallow abandoned underground workings [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2015, 79: 227-240.
- [53] YAVUZ H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2004, 41: 193-205.
- [54] MODESTE G, DOUBRE C, MASSON F. Time evolution of mining-related residual subsidence monitored over a 24-year period using InSAR in southern Alsace, France [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2021, 102: 102392.
- [55] PENG S S. Longwall Mining[M]. 2nd ed. Morgantown, WV, USA: Science Press, 2006.
- [56] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3657-3666.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3657-3666.
- [57] YU Yang, DENG Kazhong, LUO Yi, et al. An improved method for long-term stability evaluation of strip mining and pillar design [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 107: 25-30.
- [58] HE JMANOWSKI R, MALINOWSKA A. Significance of the uncertainty level for the modeling of ground deformation ranges [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2016, 83: 140-148.
- [59] HE JMANOWSKI R, MALINOWSKA A. Evaluation of reliability of subsidence prediction based on spatial statistical analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46: 432-438.