

宋世杰,王双明,赵晓光,等. 基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法[J]. 煤炭学报,2018,43(S1):87-95. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.3001

SONG Shijie, WANG Shuangming, ZHAO Xiaoguang, et al. Stratification transfer method of the mining subsidence based on the characteristics of layered structure in coal overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1):87-95. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.3011

# 基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法

宋世杰<sup>1</sup>,王双明<sup>2,3</sup>,赵晓光<sup>1</sup>,申涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室,陕西 西安 710065; 3. 陕西省地质调查院,陕西 西安 710065)

**摘要:**煤系覆岩层状结构作为煤炭赋存的显著而重要的地质特点,不仅影响着开采沉陷的发展过程,也决定着沉陷后地表最终形态。以陕北榆神矿区2<sup>-2</sup>主采煤层区域地质赋存条件和小保当井田典型钻孔资料为主要依据,以砂岩层数、砂岩平均厚度、砂泥比等3个覆岩层状结构关键特征为变量,构建了18组覆岩层状结构数值模型。通过数值模拟实验,揭示了它们对下沉系数的影响规律,建立了相应的量化关系。从变形传递叠加的角度,提出了基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法的原理和前提条件,构建了开采沉陷分层传递走向主断面下沉、水平移动与变形预计模型。工程实例验证了该方法较概率积分法具有更高的整体预计精度,可为中国西部煤矿区开采沉陷的防治提供更好的技术支持。

**关键词:**层状结构;分层传递;开采沉陷;预计;榆神矿区

**中图分类号:**TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)S1-0087-09

## Stratification transfer method of the mining subsidence based on the characteristics of layered structure in coal overburden

SONG Shijie<sup>1</sup>, WANG Shuangming<sup>2,3</sup>, ZHAO Xiaoguang<sup>1</sup>, SHEN Tao<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Xi'an 710065, China; 3. Shanxi Provincial Geological Survey Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Layered structure of overburden is a remarkable and important geological characteristic of coal occurrence. It not only affects the development of mining subsidence, and also determines the final shape of surface subsidence. Based on the geological characteristic of 2<sup>-2</sup> coal seam and the representative drilling in the Yushen Coal Mining Area and under the conditions of the same depth and bedrock thickness, 18 simplified models with different types of layered structure of overburden strata were constructed by taking the number of sandstone layers, their average thickness and the sand-shale ratio as variables. Study was made on the influence rule of three characteristics upon the subsidence coefficient through the numerical simulation test, and the corresponding quantitative relationships were constituted. The basic principle and assumed conditions of the stratification transfer method of the mining subsidence based on the characteristics of coal overburden were proposed from the view of transfer and superposition of deformation. The stratification transfer prediction models, including subsidence, horizontal movement and horizontal deformation in the trend

收稿日期:2017-11-09 修回日期:2018-01-29 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41402308);陕西省教育厅科研计划资助项目(14JK1466)

作者简介:宋世杰(1983—),男,山东济南人,副教授,博士。Tel:029-85583188, E-mail:kkkbf@163.com

main section of subsidence basin were constructed. Engineering example verified that this new method has a higher prediction accuracy than the probability integral method, so that it could provide a better technological support for the prevention of mining subsidence in Chinese western coal mining area.

**Key words:** layered structure; stratification transfer; mining subsidence; prediction; Yushen coal mining area

陕北榆神府矿区作为我国储量超十亿吨的巨型煤田之一,其探明储量占全国的12%。近几十年来,随大柳塔、榆树湾、杭来湾等一批特大型现代化矿井陆续建成投产,榆神府矿区原煤总产量几乎以每年 $1\ 000\times 10^4$  t以上的速度递增,成为全国最重要的煤炭资源输出地之一。然而,大规模的开发活动和煤炭资源的赋存特性,使得榆神府矿区地质环境问题日益凸显,其中以开采沉陷最为普遍、最为长期和最为严重<sup>[1-2]</sup>。截止到2016年,仅神木县因采煤形成的塌陷面积就达324 km<sup>2</sup>。榆神府矿区内的开采沉陷不仅造成的地质灾害、河流断流、井泉干枯等现象随处可见,而且引发的塌陷地震时有发生,据统计自2010年至今,榆林市共计发生塌陷地震77次,震级大多都在2.5级以上。目前,开采沉陷问题已经成为煤矿区乃至区域可持续发展的重大制约因素,因此有效控制煤矿区开采沉陷也成为急需解决的重大课题。

研究开采沉陷的影响因素及作用规律,并以此为基础建立科学合理的预计方法是实现有效控制的关键。在开采沉陷主要影响因素及其作用规律研究方面:由于采矿活动是开采沉陷发生发展的直接动因,采矿因素对开采沉陷的影响及其作用规律首先受到关注,相关研究成果主要集中在采厚<sup>[3]</sup>、开采方法与顶板管理办法<sup>[4-5]</sup>、工作面几何尺寸<sup>[6-7]</sup>等方面。随开采沉陷监测工作的大量开展以及对岩移观测资料的深入分析,发现在采矿因素相同而地质因素不同的情况下开采沉陷的发展程度会截然不同。因此,研究地质因素对开采沉陷的影响及其作用规律逐步成为研究热点。目前,相关的研究成果主要集中于褶皱<sup>[8]</sup>、断层<sup>[9-10]</sup>、节理<sup>[11-12]</sup>、构造应力<sup>[13]</sup>、岩土比<sup>[14]</sup>、松散层<sup>[15-18]</sup>、覆岩强度<sup>[17]</sup>等方面。然而,煤作为沉积矿产,其覆岩的层状结构不仅是一个非常显著且重要的地质因素,而且是井下采矿活动效应向上传播的载体。因此,覆岩层状结构及关键特征控制着开采沉陷从地下采空区向上发展直至地表的全过程,也决定着沉陷后地表最终形态。但截至目前,关于煤系覆岩层状结构对开采沉陷影响规律的相关研究在国内外鲜有报道。

在开采沉陷预计方法与模型研究方面:随对开采沉陷形成规律认识的不断深化,预计方法与模型也经历了从经验到理论的发展过程<sup>[19-20]</sup>。其中,理论模

型法发展最快,分支最多<sup>[21-25]</sup>。然而,总的来看,上述各种预计方法和模型普遍存在2个问题。以应用最为广泛的概率积分法为例,一是对地质因素考虑不足。仅仅将少数几个简单的、一般的地质因素(如倾角、埋深、覆岩综合硬度等)作为预计参数纳入预计模型中,而忽视了其他重要地质因素,以致该方法的准确性、适用性受到很大限制。二是预计模型本身存在缺陷。地表的沉陷在实际上是整个煤系覆岩中各个岩土层的变形形态与程度自下而上传递、叠加的结果。而概率积分法的预计模型将煤层上覆各岩层和土层视为一个整体,不仅忽视了岩层与土层之间、岩层与岩层之间性质差异,更忽视了各岩土层因性质差异而产生的变形差异,从而导致所得到的预计结果须经过后期人为调整方可使用,而调整的依据则是拐点偏移距这类经验性很强的参数,降低了该方法使用的科学性和便捷性。

鉴于此,研究煤系覆岩层状结构关键特征对开采沉陷的影响规律以及煤系覆岩中各岩(土)层变形传递叠加效应,从“分层”的角度建立一种新的基于岩(土)层间传递效应的预计方法。不仅对于丰富和深化地质因素对开采沉陷影响作用的研究和拓展开采沉陷学科理论体系具有重要的科学意义和理论意义,而且榆神矿区开采沉陷的防控具有重要的指导意义和借鉴意义。

## 1 覆岩层状结构关键特征对开采沉陷的影响规律

### 1.1 榆神矿区2<sup>-2</sup>主采煤层地质赋存特征

2<sup>-2</sup>煤层位于榆神矿区延安组第4段顶部,是该矿区最主要的可采煤层之一,其厚度介于0.26~12.16 m,平均6.50 m。2<sup>-2</sup>煤层埋深一般大于200 m,其覆岩结构可分为3种基本类型,以“沙层-土层-风化层-基岩层”类型分布最为广泛,占全区的65%。2<sup>-2</sup>煤层上覆基岩主要由砂岩和少量泥岩互层结构组成,砂泥比一般为60%~80%,砂岩占绝对优势;砂岩层数随埋深增大而增加,最少5层,最多35层;基岩上覆砂质黏土或红土,平均厚度为20 m,且被均厚30 m的现代风积沙所覆盖。通过对榆神小保当井田多个典型地质钻孔资料解译发现:2<sup>-2</sup>煤层上覆基岩中存在上、下2个特征鲜明的区段,即上部特

征区段为“砂质泥岩-细砂岩”互层结构;下部特征区段为“粉砂岩-细粒砂岩”互层结构(图 1);砂质泥岩一般出现 4 层,平均厚度在 10 m 以上;细砂岩与粉砂岩的平均厚度比较接近,一般介于 9~10 m。

编号	埋深/m	厚度/m	岩性
7	120.47	7.77	砂质泥岩
8	139.43	18.96	细砂岩
9	148.11	8.68	砂质泥岩
10	151.20	3.09	细砂岩
11	158.30	7.10	砂质泥岩
12	159.85	1.55	细砂岩
13	180.05	1.55	砂质泥岩
14	183.10	3.50	细砂岩

(a) 上部“砂质泥岩-细砂岩”

编号	埋深/m	厚度/m	岩性
22	255.01	13.01	粉砂岩
23	270.14	15.13	细砂岩
24	278.80	8.66	粉砂岩
25	298.20	19.40	细砂岩
26	308.08	9.88	粉砂岩

(b) 下部“粉砂岩-细砂岩”



图 1 典型地质钻孔中特征区段示意

Fig. 1 Schematic diagram of characteristic section in typical geological borehole

## 1.2 覆岩层状结构数值模型设计与构建

### 1.2.1 数值模型结构设计

基于对榆神矿区 2<sup>-2</sup> 煤层地质赋存特征和小保当典型地质钻孔资料的综合分析,按照“抓住关键、保留特色、合理简化、逼近原型”的原则,将 2<sup>-2</sup> 煤层覆岩数值模型结构设计为“沙土层-红土层-基岩层-2<sup>-2</sup> 煤层-底板”。其基本几何尺寸设定为:长 1 000 m,宽 250 m,高 265 m;2<sup>-2</sup> 煤层厚 5 m,上覆土层段厚 50 m(其中沙土层厚 30 m,红土层厚 20 m),上覆基岩段厚 200 m,并分为上、下 2 段,上段为“砂质泥岩-细砂岩”互层结构,且固定划分为 4 组旋回,下段为“粉砂岩-细砂岩”互层结构,其旋回组数根据研究需要进行设定。

### 1.2.2 数值模型类型与构建

根据研究目的和地质原型的基本特征,将砂岩层

数、砂泥比、砂岩平均厚度等 3 个覆岩层状结构关键特征作为变量构建数值模型。其中,砂岩层数取 6, 8, 10, 20, 30, 40 层 6 个类型;砂质泥岩固定取 4 层;砂泥比取值设定为 6:4, 7:3, 8:2 等 3 个类型;细砂岩与粉砂岩的单层厚度按等厚处理。经上述变量排列组合后得到不同类型的覆岩层状结构模型共 18 个,见表 1。

鉴于 FLAC<sup>3D</sup> 数值软件适于模拟大变形且具有强大的数据处理和输出功能,特采用该软件对表 1 中的 18 类数值模型进行三维构建,并设定边界条件,如图 2 所示。数值模型中各类岩土层物理力学参数根据《陕西省陕北侏罗纪煤田榆神矿区小保当二号井田补充勘探地质报告》中实测数据给定,见表 2。

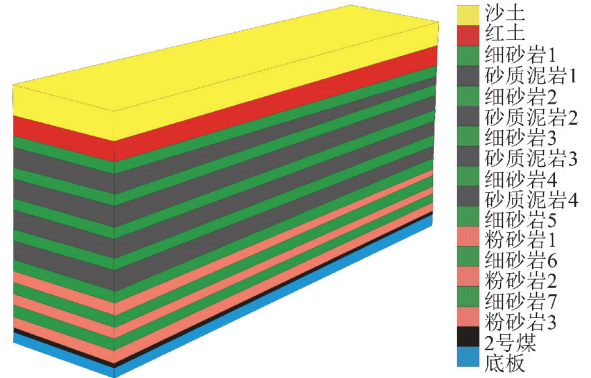


图 2 三维地质模型

Fig. 2 Three-dimensional geological model

### 1.3 数值模拟结果与分析

以 FLAC<sup>3D</sup> 软件为平台,通过逐步开挖的方式模拟开采过程,运用 FISH 语言编写程序对每步开挖产生的地表下沉量进行提取,直至达到充分采动为止,并计算下沉系数。

笔者在文献[26]中提出了“砂层系数”的新概念,不仅具有良好的可比性,而且能更好的反映砂岩的层数对开采沉陷的影响。因此,基于 18 类模型数值模拟实验的结果,建立了砂层系数、砂泥比、砂岩平均厚度 3 个覆岩层状结构关键特征与下沉系数的对应关系,结果如图 3 所示。

由图 3 可知:

(1) 在任意砂泥比条件下,下沉系数都会随砂层系数的增加而增大,且变化过程表现出“迅速增大—缓慢增大—趋于稳定”3 段式特征。当砂层系数 < 65% 时,下沉系数随砂层系数的增加而迅速增大,增大率超过 50%,此时下沉系数对砂层系数的变化非常敏感;当 65% < 砂层系数 < 70% 时,下沉系数随砂层系数的增加而缓慢增大,增大率小于 10%;当砂层系数 > 70% 时,下沉系数随砂层系数的增加而增大的幅

表1 各覆岩层状结构模型的类型与几何特征

Table 1 Types and geometric characteristics of layered structure in coal overburden

编号	砂泥比	砂质泥岩-细砂岩互层				粉砂岩-细砂岩互层			
		细砂岩		砂质泥岩		细砂岩		粉砂岩	
		层数	厚度/m	层数	厚度/m	层数	厚度/m	层数	厚度/m
M1	6:4		20.0			1	20.0	1	20.0
M2			15.0			2	15.0	2	15.0
M3			12.0			3	12.0	3	12.0
M4		4	6.0	4	20.0	8	6.0	8	6.0
M5			4.0			13	4.0	13	4.0
M6			3.0			18	3.0	18	3.0
M7	7:3		23.0			1	20.0	1	20.0
M8			17.5			2	15.0	2	15.0
M9			14.0			3	12.0	3	12.0
M10		4	7.0	4	15.0	8	6.0	8	6.0
M11			4.7			13	4.0	13	4.0
M12			3.5			18	3.0	18	3.0
M13	8:2		27.0			1	20.0	1	20.0
M14			20.0			2	15.0	2	15.0
M15			16.0			3	12.0	3	12.0
M16		4	8.0	4	10.0	8	6.0	8	6.0
M17			5.0			13	4.0	13	4.0
M18			4.0			18	3.0	18	3.0

表2 数值模型中各岩土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and soil layers in numerical model

岩性	饱和单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	泊松比	黏聚力/MPa
沙土层	0.83	21.0	0.3	17.4	37.1	0.30	0.07
红土层	0.83	68.0	0.2	18.4	37.2	0.30	0.79
砂质泥岩	5.34	86.1	0.2	25.3	37.0	0.35	0.76
细砂岩	23.8	4 612	1.1	25.1	40.5	0.27	2.15
粉砂岩	33.5	9 800	1.3	25.5	40.5	0.34	3.05
2 <sup>-2</sup> 煤层	11.4	6 000	0.3	14.6	39.5	0.16	0.60
底板	80.9	35 820	1.9	25.0	39.0	0.16	3.58

度小于2%,表明下沉系数已趋于稳定。基于非线性拟合,建立了不同砂泥比条件下,下沉系数与砂层系数的量化关系,如式(1)~(3)所示。

当砂泥比=6:4时:

$$q_1 = 0.7431 [1 - e^{-0.268(\lambda - 55.696)}] \quad R^2 = 0.9936 \quad (1)$$

当砂泥比=7:3时:

$$q_1 = 0.7296 [1 - e^{-0.209(\lambda - 55.796)}] \quad R^2 = 0.9921 \quad (2)$$

当砂泥比=8:2时:

$$q_1 = 0.7021 [1 - e^{-0.232(\lambda - 56.187)}] \quad R^2 = 0.9953 \quad (3)$$

式中, $q_1$ 为基于砂层系数的下沉系数预计值; $\lambda$ 为砂层系数,%。

(2)随砂岩平均厚度的增加,下沉系数整体呈现出不断减小的变化规律,其变化过程表现出“迅速减小—趋于稳定”2段式特征。当砂岩平均厚度<15 m时,下沉系数一般大于0.7且呈波动式变化;当15 m<砂岩平均厚度<23 m时,下沉系数随砂岩平均厚度的增大而迅速减小,平均减小率可达42%,此时砂岩平均厚度的变化会引起下沉系数的大幅变化;当砂岩平均厚度>23 m时,下沉系数的变化趋于稳定。基于非线性拟合,建立了下沉系数与砂岩平均厚度的量化关系:

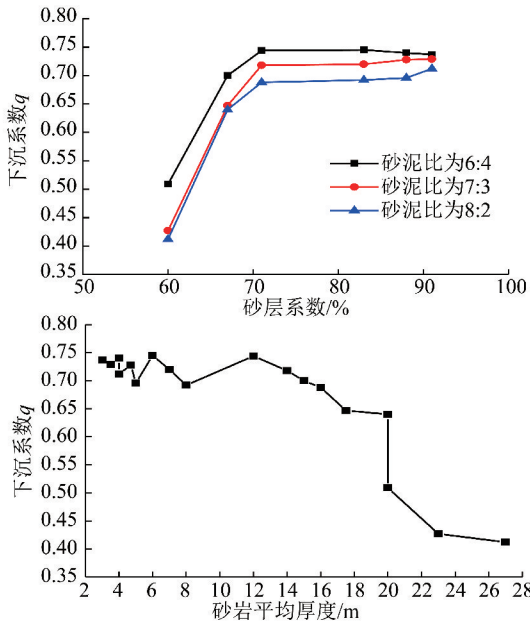


图3 砂层系数和砂岩平均厚度与下沉系数的对应关系

Fig. 3 Corresponding relation between subsidence coefficient and sandstone layer coefficient, average thickness of sandstone layers

$$q_2 = 0.396 + \frac{0.328}{1 + 10^{-0.247(20.082 - c)}} \quad R^2 = 0.9306 \quad (4)$$

式中,  $q_2$  为基于砂岩平均厚度的下沉系数预计值;  $c$  为砂层平均厚度, m。

(3) 在任意砂层系数条件下, 下沉系数都会随砂泥比的增大而减小, 但当砂层系数达到或超过 90% 时, 不同砂泥比所对应的下沉系数表现出明显的趋同性, 表明此时可以忽略砂泥比对下沉系数的影响。

## 2 基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法

### 2.1 基本原理

分层性是煤炭资源赋存的一个非常显著且重要的地质特征, 煤系上覆的各岩(土)层也因沉积作用、矿物成分、颗粒粒度与形状等方面的差异, 产生了各种性质上的差异, 特别是物理力学性质上表现尤为明显。这就导致了在同一地下采煤活动的扰动下, 煤系上覆各岩(土)层产生了不同形态、不同程度的变形移动, 而这些差异化的变形移动通过自下而上的传递叠加, 最终塑造了地表沉陷的形态。因此, 地表的沉陷在实际上是整个煤系覆岩中各个岩土层的变形形态与程度自下而上传递、叠加的结果。

根据钱鸣高院士的“关键层”理论<sup>[27]</sup>, 覆岩中存在一层或多层强度比较大的硬岩层, 其中对整个覆岩的变形起关键控制作用的硬岩层称为主关键层, 因此主关键层的变形形态决定着上覆岩层变形的传递叠

加效应。

笔者认为, 理论上覆岩中岩层的数量决定着地下扰动在覆岩中传递的次数, 也就进而影响着最后作用在地表的叠加效应; 但实际上覆岩中的各类关键层在传递叠加过程中发挥决定性作用。因此, 覆岩中的主关键层不仅是传递叠加的起始点, 更是最大贡献者。

基于上述分析, 笔者提出了基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法的基本原理, 如下:

(1) 基于岩土层的性质差异, 构建煤层覆岩分层的基本框架。土层的性质更接近于非连续介质, 而岩层的性质更接近于连续介质。因此, 从“分层”的角度, 承认煤层覆岩中土层和岩层的性质差异, 并将 2 者分开, 构建煤层覆岩分层的基本框架, 为后续分别进行下沉计算奠定基础。

(2) 判定岩层中主关键层层位, 并计算其下沉位移曲线。根据钱鸣高院士提出的关键层判别方法<sup>[27]</sup>, 对煤层上覆岩层中的关键层进行判别, 确定主关键层的层位; 根据等效荷载原理, 采用许家林教授提出的基于连续介质的“砌体梁”<sup>[28]</sup> 位移方程近似表征和求解主关键层下沉位移曲线。

(3) 修正下沉系数的取值。通过对下沉系数的修正体现覆岩中层状结构特征、亚关键层、离层等因素对地表下沉位移的影响。基本做法为: 首先运用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中推荐方法计算下沉系数的基础值, 再通过覆岩层状结构关键特征(即砂层系数、砂岩平均厚度、砂泥比)影响下沉系数的基本规律及量化关系对下沉系数进行修正, 进而提高整体计算精度。

(4) 计算地表(土层)下沉位移曲线。以主关键层下沉位移曲线为边界条件, 以修正后的下沉系数为重要参数, 采用基于非连续介质理论的概率积分法求解地表(土层)下沉位移曲线。

### 2.2 前提条件

为了明确该预计方法的适用范围, 特给定以下前提条件: ① 存在关键层, 且主关键层破段移动时符合形成“砌体梁”结构的条件(对于浅埋煤层而言, 应符合形成“短砌体梁”<sup>[29]</sup> 结构条件); ② 煤层倾角一般小于 12°; ③ 各岩层均质、各向同性; ④ 不考虑覆岩中微结构、小构造、地下水。

### 2.3 预计模型

#### 2.3.1 走向主断面下沉预计模型

以基于非连续介质理论的概论积分法下沉预计模型和基于连续介质理论的“砌体梁”位移模型为基础, 在不存在亚关键层或仅考虑主关键层传递叠加效应的条件下, 构建出基于覆岩层状结构特征的开采沉

陷分层传递走向主断面下沉预计模型:

$$W(X) = q_s m \cos \alpha \int_0^L \frac{\sigma(X)}{r} \exp \left[ -\pi \frac{(\eta - X)^2}{r^2} \right] d\eta \quad (5)$$

$$\sigma(X) = 1 - 1 / \left( 1 + e^{\frac{X-0.5l}{a}} \right) \quad (6)$$

$$q_s = (q_1 + q_2 + q_0) / 3 \quad (7)$$

式中,  $X$  为下沉曲线投影到地表的任意点坐标(不考虑拐点偏距), 以采空区边界坐标为坐标原点, 指向采空区为正;  $q_0$  是依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中推荐方法计算的下沉系数;  $q_s$  为修正后的下沉系数;  $l$  为砌体梁断裂块体长度, m;  $m$  为采厚, m;  $\alpha$  为煤层倾角;  $L$  为开采走向长度, m;  $r$  为影响半径, m;  $a$  为与砌体梁块度及煤体刚度有关的系数, 一般取 0.25 $l$ 。

值得注意的是:  $\sigma(X)$  是一个随  $X$  增大而极限为 1 的函数, 故它可以随  $X$  的变化对模型计算结果进行调整。当预计点位于下沉盆地边界附近时,  $X$  的值较小, 可通过  $\sigma(X)$  调节计算结果, 进而缩小预计值与实测值之间的误差, 缩小幅度取决于  $X$  的大小; 当预计点位于下沉盆地中心附近时,  $X$  的值较大,  $\sigma(X)$  取值近似等于 1, 此时该预计模型基本等效于概率积分模型。由此可知, “分层传递” 预计模型不仅可以继承概率积分模型在下沉盆地中心附近的预计精度和优势, 而且可以通过  $\sigma(X)$  的调节, 提高下沉盆地边界附近的预计精度。更重要的是, 由于  $\sigma(X)$  的存在, 当模型完成全部计算后已不再需要根据拐点偏移距对下沉曲线进行平移调整, 从客观上克服和规避了拐点偏移距取值及其误差影响, 故而在分层传递预计模型中  $X$  不考虑拐点偏距<sup>[1]</sup>。

### 2.3.2 走向主断面水平移动与变形预计模型

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中关于走向主断面下沉与水平移动、水平变形的数学关系和计算原理, 构建出基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递走向主断面水平移动与变形预计模型:

水平移动和水平变形分别为

$$U(X) = \sigma(X) b q_s m \cos \alpha e^{-\frac{X^2}{r^2}} \quad (8)$$

$$\varepsilon(X) = \frac{\sigma(X)}{a} b q_s m \cos \alpha \left( 1 - \sigma(X) - \frac{2\pi a X}{r^2} \right) e^{-\frac{X^2}{r^2}} \quad (9)$$

式中,  $b$  为水平移动系数。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

榆树湾井田位于榆神矿区南部, 东西长约

12 km, 南北宽约 13.5 km, 面积 88.9 km<sup>2</sup>。井田主采煤层之一为 2<sup>-2</sup> 煤层, 该煤层平均厚度为 11.62 m, 埋深介于 110 ~ 300 m, 平均 230 m, 倾角 0° ~ 3°。20102 综采工作面作为榆树湾煤矿首采工作面, 采用长壁综采法开采 2<sup>-2</sup> 煤, 其顶板管理办法为全部垮落法。该工作面走向长 5 810 m, 倾向长 250 m, 分两层开采, 上分层采高 5 m。

榆树湾 20102 工作面于 2008-04-01 投产, 2009-04-15 工作面推进跨度为 791.4 m, 在走向方向上, 当工作面推进到 294 m 时, 达到充分采动, 非均匀最大下沉量 3 406 mm, 一般最大下沉量为 2 800 ~ 3 000 mm<sup>[30]</sup>。此时走向主断面下沉实测数据见表 3。

表 3 榆树湾煤矿 20102 工作面走向主断面下沉实测值(294 m)<sup>[31]</sup>

监测点坐标	下沉值/mm	监测点坐标	下沉值/mm
-40	28	50	2 570
-20	52	60	2 800
0	264	70	2 907
10	436	80	3 026
20	679	90	3 048
30	1 816	100	3 088
40	2 350		

注: 以采空区边界为坐标原点。

### 3.2 预计参数

“分层传递” 预计模型及概率积分法模型所需基本参数见表 4。

表 4 基本预计参数

Table 4 Predicting Parameters

基本名称	取值
砌体梁断裂块体长度 $l$ /m	35
拐点偏移距 $S$ /m	40
修正后的下沉系数 $q_s$	0.654
基于“三下”采煤规程推荐方法的下沉系数 $q_0$	0.6
砂泥比/%	95
采厚 $M$ /m	5
平均采深 $H$ /m	230
煤层倾角 $\alpha$ (°)	3
影响半径 $R$ /m	100
主要影响角正切值 $\tan \beta$	2.2
达到充分采动距离 $L$ /m	294

注: 砌体梁断裂块体长度可近似采用周期破断距替代取值; 拐点偏移距可根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中的经验公式计算取值。

### 3.3 预计结果与分析

为了有效区分修正下沉系数、改进模型对预计精

度的不同影响,分别对“概率积分法模型+下沉系数  $q_0$ ”、“概率积分法模型+下沉系数  $q_s$ ”和“分层传递理

论模型+下沉系数为  $q_s$ ”3 种情况进行计算,并与实测值进行对比分析,计算结果见表 5,图 4。

表 5 预计结果与误差分析

Table 5 Predicting results and error analysis

监测点	概率积分法模型+ $q_0$			概率积分法模型+ $q_s$			分层传递模型+ $q_s$		
	预计值/mm	绝对误差/mm	误差率/%	预计值/mm	绝对误差/mm	误差率/%	预计值/mm	绝对误差/mm	误差率/%
-40	67.0	39.0	139.30	71.0	43.0	153.57	6.4	21.6	77.14
-20	199.0	147.0	282.70	209.0	157.0	301.92	46.0	6.0	11.54
0	473.0	209.0	79.17	497.0	233.0	88.25	249.9	14.1	5.34
10	677.2	241.2	55.32	711.2	275.2	63.12	506.7	70.7	16.21
20	922.9	243.9	35.92	969.1	290.1	42.72	908.7	229.7	33.82
30	1 202.0	614.0	33.81	1 262.0	554.0	30.51	1 418.0	398.0	21.92
40	1 498.0	852.0	36.26	1 573.0	777.0	33.06	1 937.0	413.0	17.57
50	1 794.0	776.0	30.19	1 884.0	686.0	26.69	2 368.0	202.0	7.86
60	2 073.0	727.0	25.96	2 177.0	623.0	22.25	2 678.0	122.0	4.36
70	2 319.0	588.0	20.23	2 435.0	472.0	16.24	2 877.0	30.0	1.03
80	2 523.0	503.0	16.62	2 649.0	377.0	12.46	2 999.0	27.0	0.89
90	2 681.0	367.0	12.04	2 816.0	232.0	7.61	3 067.0	19.0	0.62
100	2 797.0	291.0	9.42	2 937.0	151.0	4.89	3 105.0	17.0	0.55
平均误差率/%		59.76			61.79			15.29	

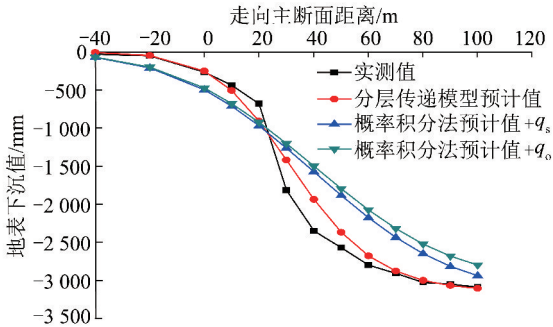


图 4 榆树湾煤矿 20102 工作面走向主断面地表下沉曲线

Fig. 4 Subsidence diagram of the trend main section of 20102 workforce in Yushawan coal mining area

由表 5 和图 4 可知:

(1) 概率积分法在下沉系数修正前、后的预计值与实测值的最大绝对误差分别为 852.0 mm 和 777.0 mm, 最小绝对误差分别为 39.0 mm 和 43.0 mm, 平均绝对误差为 430.61 mm 和 374.64 mm, 平均误差率为 59.76% 和 61.79%。由此可见, 概率积分法的预计误差整体上较大, 特别是在采空区边界附近 ( $[-20, 20]$ ) 的预计误差率可达 80% ~ 90%, 甚至超过 100%; 而在下沉盆地中心附近 (即  $[90, 100]$ ), 预计值的误差率迅速降至 12% 以下, 而且越靠近下沉盆地中心, 误差率越小。表明概率积分法在下沉盆地主断面中心附近具有较高的预计精度, 但在边界附近预计效果不理想。

(2) 概率积分法在下沉系数修正后的预计效果

较修正前, 最大绝对误差下降了 45 mm, 最小绝对误差上升了 4 mm, 整体预计精度提高了 13%, 但平均误差率却上升了 2%, 这可能是修正后的下沉系数较修正前有所提高, 进而放大了采空区边界附近各点的误差率所致。在下沉盆地中心附近 (即  $[90, 100]$ ), 概率积分法的预计精度在下沉系数修正后较修正前大幅提升 36.8% ~ 48%。由此看出, 修正下沉系数可以提高概率积分法在下沉盆地中心附近的预计精度, 但就整体改进效果不明显。

(3) 分层传递模型的预计值与实测值的最大绝对误差为 413.0 mm, 最小绝对误差分别为 6.0 mm, 平均绝对误差为 120.77 mm, 平均误差率为 15.29%, 整体预计精度较概率积分法在下沉系数修正前、后分别提高了 74.41% 和 75.25%。因此, 相对于概率积分法, 分层传递预计模型具有更高的整体预计精度。发生较大误差的预计点均位于采空区边缘附近, 究其原因, 一是预计模型中  $\sigma(X)$  在该区域对预计值的调节作用变小影响, 二是岩层各向异性、关键层、离层等因素使得该区域的移动变形表现出更明显的非连续性和波动性。此外, 从局部看, 分层传递模型不仅继承了概率积分法在下沉盆地中心附近的预计精度并有所改进, 误差率小于 1%, 而且大幅降低了在采空区边界附近的预计误差, 下降幅度达到 60% 以上。因此, 分层传递预计模型的预计结果更加接近于实测。

## 4 结 论

(1)煤系覆岩层状结构作为煤炭赋存的显著而重要的地质特点煤系,不仅影响着开采沉陷的发展过程,也决定着沉陷后地表最终形态。以陕北榆神矿区 $2^{-2}$ 主采煤层区域地质赋存条件和小保当井田典型钻孔资料为主要依据,构建了18个覆岩层状结构数值模型。通过数值模拟实验,揭示了砂层系数、砂泥比、砂岩平均厚度等3个覆岩层状结构关键特征对下沉系数的影响规律,建立了相应的量化关系。

(2)针对地表沉陷是煤系覆岩中各岩(土)层变形传递叠加的结果这一基本事实,提出了基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法的基本原理和假设条件。在概论积分法下沉预计模型和砌体梁位移模型构建出基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递走向主断面下沉、水平移动与变形预计模型。

(3)工程实例表明:基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法较概率积分法不仅具有更高的整体预计精度,而且大幅降低了在采空区边界附近的预计误差,下降幅度达到60%以上,获得的下沉曲线在形态上更加接近于实测。

## 参考文献 (References):

[1] 宋世杰. 基于关键地矿因子的开采沉陷分层传递预计方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.  
SONG Shijie. Study on the stratification transfer prediction method of the mining subsidence based on the key geological and mining factors[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2013.

[2] 王双明,黄庆享,范立民,等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报,2010,35(1):7-14.  
WANG Shuangming,HUANG Qingxiang,FAN Limin,et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(1):7-14.

[3] 张庆松,高延法,刘松玉,等. 基于粗集与神经网络相结合的岩移影响因素分析与开采沉陷预计方法研究[J]. 煤炭学报,2004,29(1):22-25.  
ZHANG Qingsong,GAO Yanfa,LIU Songyu,et al. Study on rock movement factors analysis and subsidence prediction method based on rough-set theory and artificial neural network[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(1):22-25.

[4] 刘辉,邓略中,何春桂,等. 超高水材料跳采充填采煤法地表沉陷规律[J]. 煤炭学报,2013,38(S2):272-276.  
LIU Hui,DENG Kazhong,HE Chungui,et al. Surface subsidence law of filling with super-high-water material and skip mining[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(S2):272-276.

[5] 滕永海,王金庄. 综采顶煤地表沉陷规律及机理[J]. 煤炭学报,2008,33(3):264-267.

TENG Yonghai,WANG Jinzhuang. The law and mechanism of ground subsidence induced by coal mining using fully-mechanized caving method[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(3):264-267.

[6] 许冬,王临清,吴侃. 任意形状工作面沉陷预计计算方法[J]. 金属矿山,2014,43(5):55-59.  
XU Dong,WANG Linqing,WU Kan. Mining subsidence prediction calculation methods of random shape working face[J]. Metal Mine,2014,43(5):55-59.

[7] 赵晓东,陈阳,蒋建. 任意形状工作面沉陷预测的概率积分法及其应用[J]. 岩土力学,2016,37(12):3387-3392.  
ZHAO Xiaodong,CHEN Yang,JIANG Jian. Probability integral method of arbitrary shape face to predict mining subsidence and its application[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(12):3387-3392.

[8] 孙学阳,夏玉成,白红梅. 褶皱构造对采煤沉陷控制作用的数值模拟[J]. 煤炭学报,2007,32(5):490-493.  
SUN Xueyang,XIA Yucheng,BAI Hongmei. Numerical simulation of control of fold structures on mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(5):490-493.

[9] 赵海军,马凤山,李国庆,等. 断层上下盘开挖引起岩移的断层效应[J]. 岩土工程学报,2008,30(9):1372-1375.  
ZHAO Haijun,MA Fengshan,LI Guoqing,et al. Fault effect due to underground excavation in hangingwalls and footwalls of faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1372-1375.

[10] 吴志平. 考虑断层影响的煤层开采沉陷三维有限元模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(5):702-705.  
WU Zhiping. Three-dimensional finite element simulation of coal mining subsidence with consideration of faults[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2011,30(5):702-705.

[11] 袁长丰,袁子晋,刘世波,等. 考虑节理几何特征的地表沉陷预计方法[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(4):620-623.  
YUAN Changfeng,YUAN Zijin,LIU Shibo,et al. The prediction method for surface subsidence considering the geometrical characteristics of joints[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2014,31(4):620-623.

[12] 于广明,张春会,赵建锋. 初始节理对岩体内部沉陷范围的影响研究与实验验证[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1478-1482.  
YU Guangming,ZHANG Chunhui,ZHAO Jianfeng. Research and examination-validation of effect of original joints on subsidence range in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(10):1478-1482.

[13] 孙学阳,夏玉成,杜荣军,等. 构造应力与节理耦合对采煤沉陷的控制作用[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(1):126-130.  
SUN Xueyang,XIA Yucheng,DU Rongjun,et al. Control effect of tectonic stress and joint coupling on mining subsidence[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(1):126-130.

[14] 宋世杰,赵晓光,王双明,等. 榆神矿区覆岩岩土比对开采沉陷的影响分析[J]. 煤矿安全,2016,47(5):200-204.  
SONG Shijie,ZHAO Xiaoguang,WANG Shuangming,et al. Influ-



- ence analysis of overburden rock-soil ratio on mining subsidence in Yushen coal mining area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(5): 200-204.
- [15] 左建平, 孙运江, 钱鸣高. 厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1372-1379.  
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1372-1379.
- [16] 张文泉, 刘海林, 赵凯. 厚松散层薄基岩条带开采地表沉陷影响因素研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(6): 1065-1071.  
ZHANG Wenquan, LIU Hailin, ZHAO Kai. Influential factors on surface subsidence in stripe mining under thick unconsolidated layers and thin bedrock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(6): 1065-1071.
- [17] 汤伏全. 西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(S1): 74-78.  
TANG Fuquan. Mining subsidence prediction model in western thick loess layer mining areas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(S1): 74-78.
- [18] SONG Shijie, ZHAO Xiaoguang. Grey correlation analysis and regression estimation of mining subsidence in Yu-Shen-Fu Mining Area[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 10: 1747-1752.
- [19] CUI X M, LI C Y, HU Q F, et al. Prediction of surface subsidence due to underground mining based on the zenith angle [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 60(6): 246-252.
- [20] DÍAZ-FERNÁNDEZ M E, ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ M I, ÁLVAREZ-VIGIL A E. Computation of influence functions for automatic mining subsidence prediction [J]. *Computation Geosciences*, 2010, 14(1): 83-103.
- [21] 蔡音飞, VERDEL Thierry, OLIVIER Deck, 等. 地形影响下的开采沉陷影响函数法优化[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 271-276.  
CAI Yinfei, VERDEL Thierry, OLIVIER Deck, et al. Improving the influence function method to take topography into the calculation of mining subsidence [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 271-276.
- [22] RAFAEL T R, JAVIER T L. Hypothesis of the multiple subsidence trough related to very steep and vertical coal seams and its prediction through profile functions[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2000, 18(4): 289-311.
- [23] TORANÁN J O, RODRÓGUEZ R, RAMÓÁREZ-OYANGUREN P. Probabilistic analysis of subsidence-induced strains at the surface above steep seam mining [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000(37): 1161-1167.
- [24] LVAREZ-FERNA'M I A'Ndez, LEZ-NICIEZA C Gonza', NDEZ-D'Az A Mene'. Generalization of the  $n-k$  influence function to predict mining subsidence [J]. *Engineering Geology*, 2005(80): 1-36.
- [25] 王磊, 郭广礼, 王明柱, 等. 山区地表移动预计修正模型及其参数求取方法[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1070-1076.  
WANG Lei, GUO Guangli, WANG Mingzhu, et al. New method of updating design for model and its parameter to prediction surface movement in mountainous mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1070-1076.
- [26] 宋世杰, 赵晓光, 王双明, 等. 覆岩内砂岩层数对开采沉陷的影响分析与数值模拟[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 41(5): 9-12.  
SONG Shijie, ZHAO Xiaoguang, WANG Shuangming, et al. Analysis on influence of sandstone layer number in overburden strata upon mining subsidence and its numerical Simulation [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2014, 41(5): 9-12.
- [27] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 225-230.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control [J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 225-230.
- [28] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 122-126.  
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 122-126.
- [29] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(6): 581-585.  
HUANG Qingxiang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in longwall face [J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(6): 581-585.
- [30] 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 yushuwan coal mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [31] 胡火明. 近浅埋煤层保水开采覆岩运动模拟研究与实测[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.  
HU Huoming. Simulation research and actual measurements on water conservation mining and overlayer strata movement of thick base rock shallow seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.