

“采-充-留”协调开采地表移动预测方法

郭俊廷^{1,2}, 戴华阳², 李佳琦², 郭思聪², 王伟³

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
3. 开滦能源化工股份有限公司吕家坨矿业分公司, 河北唐山 063300)

[摘要] 为了提高“采-充-留”协调开采地表移动预测的精度, 通过多元非线性回归分析, 建立了“采-充-留”协调开采地表最大下沉值与垮落法充分采动条件下地表最大下沉值之比与留宽、采宽及充填宽度之间的函数关系, 并对关系式进行可靠性验证。由数值模拟结果回归分析, 得到了“采-充-留”协调开采与全部垮落法开采概率积分法参数间的关系式, 为“采-充-留”协调开采影响预计和方案设计提供了参考。

[关键词] “采-充-留”协调开采; 地表移动预测; 回归分析; 数值模拟

[中图分类号] TD823.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225(2016)02-0045-04

Forecast Method of Surface Movement with Mining Coordinately Mixed with Backfilling and Keeping

GUO Jun-ting^{1,2}, DAI Hua-yang², LI Jia-qi², GUO Si-cong², WANG Wei³

(1. Resource & Safety Engineering School, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Geosciences and Surveying Engineering College, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Lvjiqtuo Mining Branch, Kailuan Energy Chemical Co., Ltd., Tangshan 063300, China)

Abstract: In order to improve forecast precision of surface movement with mining coordinately mixed with backfilling and keeping, functional relation that the ratio of the maximal surface subsidence value with mining coordinately mixed with backfilling and keeping and caving to the maximal surface subsidence value under fully mining to keeping width, mining width and backfilling width was built after multivariate nonlinear regression analysis, and then reliability of functional relation was confirmed. Parameters function between mining coordinately mixed with backfilling and keeping and probability integral method of fully caving mining method was conducted based on numerical simulation, the results referenced for forecast of mining coordinately mixed with backfilling and keeping and design.

Key words: subsidence control technology of caved mining coordinately mixed with backfill mining and setting pillars; surface movement forecast; regression analysis; numerical simulation

“采-充-留”协调开采岩层移动控制方法是一种新的“三下”开采方法, 在山东、河北某些矿区的“三下”开采试验中已取得良好效果。该方法是一种基于极不充分原理, 集条带开采与充填开采优势于一体的新型岩层移动控制方法, 其与条带和充填开采两种方法既有联系又有区别^[1]。“采-充-留”单元有3种开采布置模式: 单侧充填、双侧充填和“充-留”开采。其中“充-留”开采是前两种方式中开采面宽度减小至零的极限模式, “采-充-留”协调开采布置模式见图1。

“采-充-留”协调开采方法与全部垮落法开采引起地表变形机理不同, 因此不能直接采用概率积分法进行预计。目前全部充填开采中常用“等价得地表移动变形的预计公式。因其预计结果与实测

采高”进行地表移动变形预测, 此方法的可靠性有待分析, 且该方法中等价因素较多, 每一因素都可能与实际存在误差, 多因素影响条件下其可靠性难以保证, 且不同充分性开采条件下, 等效厚度并不一致。目前极少有人考虑开采充分性的影响, 仅采用同一等价采高进行预测, 这势必存在较大误差。为了保证“采-充-留”协调开采的预测精度, 有必要对其预测方法进行深入研究。

1 特殊开采中地表移动常用预计方法

目前, 我国地表移动预计中主要采用概率积分法, 该方法是根据岩层移动与碎块体随机移动过程的相似性所建立的物理模型, 经严密的数学推证取接近, 可对任意形状工作面地表任意点进行预计和

[收稿日期] 2015-08-19

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51574242; 51404272)

[作者简介] 郭俊廷(1981-), 男, 河北邯郸人, 中国矿业大学(北京)博士后, 从事矿业工程和特殊开采技术研究。

[引用格式] 郭俊廷, 戴华阳, 李佳琦, 等. “采-充-留”协调开采地表移动预测方法[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 45-48.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2016.02.013

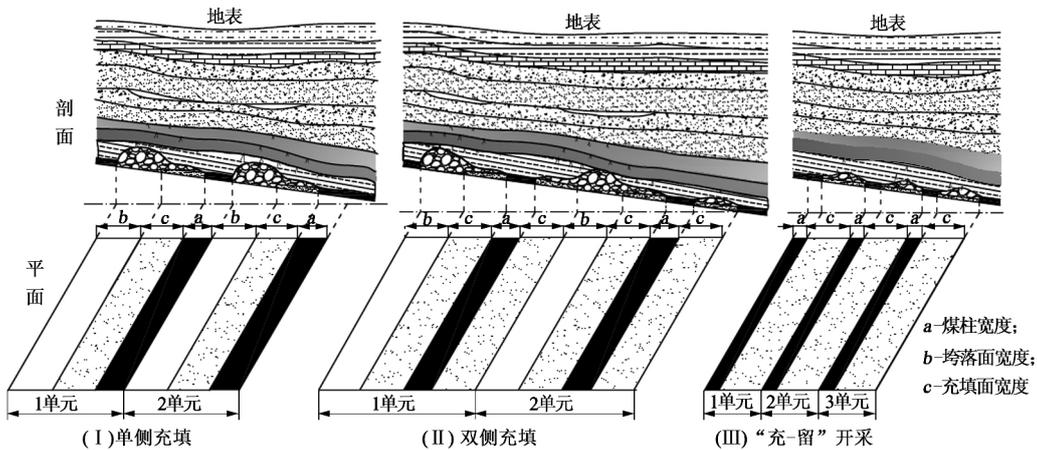


图 1 “采-充-留”协调开采布置模式

易于编程实现，使得概率积分法在地表移动预计中得到普遍应用。

由于概率积分法是基于水平煤层采用垮落法开采，且充分开采条件下所建立的模型，因此对于非充分、极不充分开采以及急倾斜开采条件下的预计存在较大误差，甚至预计值与实测值差别很大^[2-4]。因此，对于条带开采或深部等非充分开采条件下的预计，文献 [3] 引入了开采宽深比与开采沉陷率的波兹曼函数表达式，建立了不同开采程度条件下的地表沉陷预计模型；文献 [4] 研究发现，宽深比小于 1/3 时，离散介质的移动特征可近似采用概率密度函数表达，提出了极不充分采动条件下地表移动变形预测的概率密度函数法；文献 [5] 提出了条带开采条件下采用托板理论进行地表移动的预测方法；文献 [6] 给出了条带开采与全部开采方法概率积分法预计参数间关系。上述方法多基于概率积分法对预计参数进行适当修正或者对预计模型进行修正后进行预测，在实际方案设计和地表影响预测分析中取得了良好的应用效果。

由《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》知，对充填开采时地表沉陷预计多基于实际观测，水砂充填地表下沉系数为 0.13~0.18。根据相关统计，水力密实充填地表下沉系数为 0.05~0.08；矸石自重充填地表下沉系数为 0.45~0.55；矸石带状充填地表下沉系数为 0.55~0.7；条带开采充填地表下沉系数为 0.01~0.04。但以上统计结果均未取得概率积分法其他参数。近年来随着充填材料和工艺的发展，充填开采在许多矿区进行了试验和推广。文献 [7] 提出了固体密实充填开采的“等价采高”理论，其基本方法是将充填开采的煤层等效为薄煤层的开采，采用薄煤层开采岩层移动相关理论研究充填开采条件

下覆岩及地表的移动变形规律。

2 现有方法对“采-充-留”协调开采预测的适用性

目前，条带开采地表移动采用修正参数后的概率积分法，在工程实践中已得到普遍应用和验证，“等价采高”理论在许多文献中也多有报道。这些方法对于“采-充-留”协调开采的适用性有待深入分析。“采-充-留”协调式开采因其存在垮落法开采工作面、留设窄煤柱和柱旁充填 3 种顶板运动管理方法，其移动机理和模式有别于条带开采和全部充填开采。尤其对于柱旁充填体，因其不同于煤柱的主动支撑，也不同于采空区的悬空，因此，其对顶板的支撑作用既不可等效为煤柱，也不能等效为全部开采。

根据现有文献可知，“等价采高”理论在充填开采中已取得了较为广泛的应用，但“等价采高”理论未从根本上揭示全部充填开采条件下地表移动机理，直接将其视为薄煤层开采，因此，其以下问题有待进一步验证^[8]。

(1) 顶板运动存在差异 目前充填还达不到等体积置换开采，充填前顶板已有一定量的变形或破坏，且在充填体压实过程中，覆岩的下沉与薄煤层顶板悬空下沉模式有差异。

(2) 传统覆岩破坏高度未必适用 充填后覆岩结构形态与垮落法开采差异大，用薄煤层开采条件下的垮落带或裂缝带经验公式计算充填开采条件下“三带”高度的可行性有待商榷。

(3) 岩层移动模式的差异 传统岩层移动模式较少考虑煤系地层中岩层结构和岩性的影响，即使提到岩性差异，也仅笼统地概括为坚硬、中硬和软弱岩层。

(4) 预计精度的可靠性有待验证 把等价采

高等效为充填前顶底板移近量、欠接顶量、充填体收缩量和压缩量及其他因素的综合高度, 影响因素多, 其累计误差可能较大。因此, 预计精度的可靠性有待验证。

(5) 参数的可靠性缺乏验证 采用概率积分法预计参数为垮落法开采参数, 因此参数的可靠性缺乏验证。

目前, 地表移动预计方法中还没有一种可采用的方法。由“采-充-留”协调开采的相似模型试验和数值模拟分析可知, “采-充-留”协调开采与全采条件下地表下沉形态相似, 且覆岩的移动可看作上覆介质的随机运动综合作用的结果(也即岩层移动满足随机介质理论), 其特征符合统计学规律, 所不同的是不同开采方式影响程度间的差异。因此, 可通过上述全部开采与“采-充-留”协调开采地表最大移动变形间函数关系, 建立“采-充-留”协调开采地表沉陷的预计处理方法。

3 “采-充-留”协调开采地表移动变形预计方法

3.1 计算公式及可靠性验证

“采-充-留”协调开采中对地表最大下沉的影响因素众多, 诸如“采-充-留”宽度、采深、采厚、岩性及其结构、地层倾角和充填工艺等。由数值模拟和相似材料模型试验结果可知, “采-充-留”协调开采与全部垮落法开采条件下地表下沉曲线变化趋势和分布形态相同。因地表下沉率与开采尺寸的相关性显著, 在充实率 75% 开采条件下, 通过改变采充留尺寸和采深、采厚等因素建立了数十组数值模型, 由“采-充-留”协调开采地表最大下沉值与垮落法充分采动条件下地表最大下沉值相比, 得到 W_m/W_{cm} 。通过多元非线性回归分析建立 W_m/W_{cm} 与留宽 a 、采宽 b 以及充填宽度 c 之间的函数关系为:

$$f(\tau) = \frac{0.46(b+c)/(a+b+c)}{1+e^{-b/(a+1)}} + m \left(1 - \frac{c}{b+c}\right)^{\frac{a+b+c}{a+c}} - n \left(\frac{b+c}{a+b+c}\right)^{-p} \quad (1)$$

式中, $f(\tau)$ 为任意“采-充-留”尺寸与全采垮落法充分采动时地表最大下沉值之比, τ 包含 a, b, c , 且 a, b, c 均不同时为零; m, n, p 为与充填体强度和充填效果有关的系数, 试验拟合值分别为 0.77, 0.17 和 0.445。双侧充填模式开采时, 公式中 c 改为 $2c$ 。

当采用全部开采方式时, 令 $f(\tau) = 1$; 当煤层未开采时, 令 $f(\tau) = 0$; 当 $c = 0$, a 和 b 均不为零,

即采用条带开采, 在采深为 600m 的煤层采用条带开采时, 若采宽 90m, 留宽 60m, 根据条带开采与全部开采系数间关系可得 $q_{条}/q_{全} = 0.18$, 按公式 (1) 计算可得 $f(\tau) = 0.1812$; 当采宽 100m, 留宽 70m, 则计算结果分别为 0.16 和 0.174。由此可见, 拟合结果与条带经验公式计算一致。

由上述垮落法开采地表最大下沉值与“采-充-留”协调开采地表最大下沉值的关系, 可建立“采-充-留”协调开采地表移动变形的计算公式, 下沉计算公式为:

$$W_m = W_{cm}f(\tau) \quad (2)$$

(1) 拟合优度检验 样本判定系数 R^2 是判断回归超平面拟合优度的指标, $0 \leq R^2 \leq 1$, 其越接近 1 表明拟合程度越高。

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS} = \frac{53.525}{57.790} = 0.926 \quad (3)$$

式中, ESS 为回归平方和; RSS 为残差平方和; TSS 为总离差平方和。

复相关系数 R 表示解释与被解释变量的线性相关度, 反映样本观测值与拟合值间的线性相关度的一个指标。本次回归中 $R = 0.962 = 96.2\%$, $R^2 = 0.926 = 92.6\%$, 表明因变量 $f(\tau)$ 与解释变量间拟合程度和相关程度均较高。

(2) 回归系数的显著性检验 要检验解释变量与因变量 $f(\tau)$ 的线性作用是否明显, 需进行 t 检验。提出假设:

$H_0: \beta_i = 0, (i=1, 2)$ (即 $f(\tau)$ 与自变量间有明显影响)

$$H_1: \beta_i \neq 0, (i=1, 2)$$

假设 H_0 成立, 那么统计量 t_i 服从自由度为 $(n-p-1)$ 的 t 分布, 即:

$$t_i = \frac{b_i - \beta_i}{S(b_i)} = \frac{b_i}{S(b_i)} \sim t(n-p-1)$$

计算得 $t_1 = 6.547$, $t_2 = 83.09$, 均大于在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下查表得到的临界值 $t_{0.025}(849) = 2.245$ 。因此, 拒绝 H_0 假设, 表明 $f(\tau)$ 与包含采充留尺寸与采深的指数表达式间有明显影响。

(3) 回归方程的显著性检验 提出假设:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ (即 $f(\tau)$ 与采充留尺寸、采深不相关)

$$H_1: \beta_i \text{不全为 } 0, (i=1, 2)$$

在 H_0 成立条件下, F 统计量为

$$F = \frac{ESS/p}{RSS/(n-p-1)} = \frac{53.525/2}{4.266/849} = 5326.15$$

在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 查表得临界值

$F_{\alpha}(p, n - p - 1) = F_{0.05}(2, 849) = 3.006$ 。因 $F > F_{0.05}(2, 849) < \alpha$ ，所以拒绝 H_0 ，回归方程线性关系显著。

3.2 预计参数计算公式

根据大量数值模拟结果回归分析，可得到“采-充-留”协调开采与垮落法开采地表移动变形概率积分法预计参数间的关系。

(1) 下沉系数 q_{ccl}

$$q_{ccl} = q_{全} f(\tau) \quad (4)$$

(2) 主要影响角正切 $\tan\beta_{ccl}$

$$\tan\beta_{ccl} = \left(1.074 - \frac{0.1a}{a+b+c} - \frac{0.3c}{a+c} \right) \tan\beta_{全} \quad (5)$$

当开采边界为开采面时，公式(5)中的 c 取值为0，这时与条带开采参数近似相等， $\tan\beta_{采} = (1.076 - 0.0014H) \tan\beta_{全}^{[9]}$ ；若开采边界为充填面时，则公式(5)中的 a 取值为0；其他条件按公式(5)计算。其他两边主要影响角正切取上述两种情况的平均值。

(3) 最大下沉角 θ_{ccl} 是确定地表最大下沉值位置的主要参数。双侧模式开采时，地表下沉曲线关于开采区域中心对称，最大下沉角为 90° ；单侧模式时，因一侧充填开采，另一侧垮落法开采，造成地表最大下沉偏向垮落法开采面一侧，从而使下沉曲线不对称。“采-充-留”协调开采与全部垮落法开采最大下沉角间的关系为：

$$\theta_{ccl} = \left[1.005 \left(\frac{b}{b+c} \right)^{1.019} + 1.012 \left(\frac{c}{b+c} \right)^{1.105} \right] \theta_{全} \quad (6)$$

(4) 水平移动系数 b_{ccl} “采-充-留”协调开采与全部垮落法开采地表水平移动系数误差较小，约为 ± 0.001 ，两者近似相等，即 $b_{ccl} \approx b_{全}$ 。

在进行“采-充-留”协调开采地表移动变形预计时，可直接将预计区域垮落法开采实测参数经以上关系求取后按概率积分法进行预计即可。

4 结论

地表沉陷预计是“三下”开采的主要研究内容之一，是开展“采-充-留”协调开采的核心技

术理论。通过对现有特殊开采地表移动预计方法的分析，采用回归分析方法得到以下主要结论：

(1) 分析了目前条带开采、充填开采使用地表移动预计方法对“采-充-留”协调开采的适用性。“等价采高”理论的等价因素较多，造成累计误差大，且等价为薄煤层开采其适用性有待商榷。

(2) 通过多元非线性回归分析，在充实率75%开采条件下，建立了“采-充-留”协调开采与垮落法充分采动条件下地表最大下沉值之比与留宽、采宽及充填宽度之间的函数关系，并以此为基础得出不同“采-充-留”尺寸、采深和采厚条件下和全部垮落法开采之间地表移动变形概率积分法预计参数间的关系式，为“采-充-留”协调开采设计提供参考。

[参考文献]

- [1] 戴华阳, 郭俊廷, 阎跃观, 等. “采-充-留”协调开采技术原理与应用 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1602-1610.
- [2] 王金庄, 常占强, 陈 勇. 厚松散层条件下开采程度及地表下沉模式的研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (3): 230-234.
- [3] 戴华阳, 王金庄. 非充分开采地表移动预计模型 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (6): 583-587.
- [4] 郭增长. 极不充分开采地表移动预计方法及建筑物深部压煤开采技术的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2000.
- [5] 吴立新, 王金庄, 刘延安. 建筑物下压煤条带开采理论与实践 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [6] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [7] 缪协兴, 黄艳利, 巨 峰, 等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41 (6): 863-867.
- [8] 郭俊廷. 建(构)筑物下“采-充-留”耦合开采理论研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [9] 何国清, 杨 伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [10] 邓智毅, 郭俊廷, 阎跃观, 等. 厚松散层条件下边界角和移动角求取方法 [J]. 矿山测量, 2011 (1): 61-63.
- [11] 戴华阳, 邓智毅, 阎跃观, 等. 唐山矿深部开采覆岩离层与法向裂缝分布规律研究 [J]. 煤矿开采, 2011, 16 (2): 8-11.

[责任编辑: 施红霞]

(上接98页)

- [2] 杨志强, 杨建华, 石 震, 等. 新型磁悬浮陀螺全站仪 [P]. 中国专利: ZL2010 2 0110125. 7, 2010-10-06.
- [3] 杨志强, 田永瑞, 石 震. 测绘工程类陀螺全站仪精度评定方法 [P]. 中国专利, ZL200810018048. X, 2010-08-18.
- [4] 石 震. GAT高精度磁悬浮陀螺全站仪寻北关键技术及其应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.

- [5] 张国良. 矿山测量学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [6] John A. Rice. 数理统计与数据分析 [M]. 田金方, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 王振龙. 时间序列分析 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.

[责任编辑: 王兴库]