

# 基于克里格插值的煤矿底板突水系数等值线优化研究

陈 实<sup>1,2</sup>, 刘小明<sup>3,4</sup>, 杨竣皓<sup>1</sup>, 唐 波<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 咸阳 712100;2.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 咸阳 712100;3.西安科技大学 能源学院,陕西 西安 712054;4.神华宁夏煤业集团有限责任公司,宁夏 银川 750011)

**摘 要:**为防治羊场湾煤矿 16 号煤层底板水害,基于《煤矿防治水规定》中提出的煤矿底板突水系数评价方法,以羊场湾煤矿矿区范围内钻孔数据为基础,依据克里格(Kriging)插值法,提出了优化绘制羊场湾煤矿 16 号煤层底板突水系数等值线图的新方法。结果表明:新方法通过优化插值钻孔数据,增加了插值钻孔数量,提高了突水系数等值线图的精度。使用新的插值方法没有增加新钻孔,优化绘制出的羊场湾煤矿 16 号煤层底板突水系数等值线图精确度更高,为羊场湾煤矿底板水害防治提供了技术支持,为今后同类型煤矿底板突水系数等值线图的绘制提供了新思路。

**关键词:**煤矿底板突水;克里格插值;突水系数;水害防治

**中图分类号:**TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)07-0068-07

## Research on contour line optimization of coal floor water inrush coefficient based on Kriging interpolation

CHEN Shi<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoming<sup>3,4</sup>, YANG Junhao<sup>1</sup>, TANG Bo<sup>1</sup>

(1.Northwest A&F University, College of Water Resources and Architectural Engineering, Xianyang 712100, China;

2.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Xianyang 712100, China; 3.School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 712054, China; 4.Shenhua Ningxia Coal Group Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

**Abstract:** In order to prevent and control the water damage to the floor of the No.16 seam in Yangchangwan Coal Mine, the evaluation method for the coal floor water inrush coefficient proposed in the *Coal Mine Prevention and Control Water Regulations* is based on drilling data in the Yangchangwan coal mine area, based on Kriging Interpolation, a new method to optimize the drawing of the contour map of the floor water inrush coefficient of No.16 coal seam in Yangchangwan Coal Mine was proposed. The new method increases the number of interpolated boreholes by optimizing interpolation drilling data, and improves the accuracy of the water inrush contour map. The results show that the new interpolation method does not increase the number of new boreholes, and the accuracy of the isoline chart of the floor water inrush coefficient of the No.16 seam in the Yangchangwan Coal Mine is higher. This provides technical support for the prevention of floor water damage in the Yangchangwan Coal Mine. This will provide new ideas for the drawing of contour maps of the same type of coal mine floor water inrush in the future.

**Key words:** coal mine floor water inrush; Kriging interpolation; water inrush coefficient; coal mine water disaster prevention

## 0 引 言

煤层底板突水是煤矿开采过程中经常发生的一种灾害。煤层底板突水有很多因素,例如水压、水

源、含水层、隔水层、采动效应和导水通道等。目前国内外煤矿防治水工作者通过大量的理论与试验研究,总结出了一系列富有指导意义的理论、经验公式和技术方法<sup>[1-4]</sup>。

收稿日期:2018-01-12;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.07.010

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41602254);中央高校基本科研业务费专项资助项目(2452016179);双一流学科群旱区水文与水资源调控研究资助项目(Z102021853)

作者简介:陈 实(1983—),男,湖北宜昌人,讲师,博士。E-mail:38785899@qq.com

引用格式:陈 实,刘小明,杨竣皓,等.基于克里格插值的煤矿底板突水系数等值线优化研究[J].煤炭科学技术,2018,46(7):68-74.

CHEN Shi, LIU Xiaoming, YANG Junhao, et al. Research on contour line optimization of coal floor water inrush coefficient based on Kriging interpolation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 68-74.

我国对煤层底板突水机理研究比较晚,始于 20 世纪 60 年代,由于水害成为了比较突出的威胁,我们的学者做了大量的科研工作,如今在底板突水研究方面取得了一系列的成果<sup>[5]</sup>。

1964 年,我国学者通过对焦作矿区煤层底板突水案列的分析总结,进而提出了“突水系数”的概念,含水层水压与隔水层厚度的比值,其作为突水预测预报的标准<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 80 年代,我国科学家李白英提出了“下三带”理论,认为煤层底板在采动影响下存在三个带,有完整岩层带、采动底板破坏带和承压水导升带,该理论作为我国在煤层底板突水研究方面的重要成果,同时被广泛运用在矿井安全生产中<sup>[8]</sup>。到 90 年代,刘天仪等<sup>[9]</sup>从力学的角度提出了底板岩体“两带模型”,把底板隔水层段分为底板隔水带和采动导水裂缝带,结合 Coulomb-Mohr 理论和 Griffith 理论分别求出了底板受采动影响的最大破坏深度。钱鸣高等<sup>[10-11]</sup>基于煤层底板岩层的结构特征,提出底板突水机理的关键层理论,其突出了坚硬岩层阻水的作用。许学汉等<sup>[12]</sup>提出的“强渗通道”的理论,认为是否存在突水通道是煤层底板发生突水的关键因素。王作宇等<sup>[13]</sup>运用塑性滑移线场对煤层底板破坏深度进行了研究,提出了“零位破坏和原位张裂”的理论。王经明等<sup>[14]</sup>提出“递进推导”学说,认为裂缝与底板破坏带的相连通时底板承压水进入工作面形成突水。宋景义等<sup>[15]</sup>提出“岩-水-应力关系”说,该学说认为煤层底板突水是由底板含水层、底板隔水层、地应力和采动应力相互作用的结果,使隔水层产生导水裂缝,降低阻水能力,承压水沿导水裂隙进入隔水层,岩体在水软化作用下裂隙进一步扩大,相互作用到一定成都发生突水。到 21 世纪初,施龙清<sup>[16]</sup>基于损伤力学和断裂力学的力学基础将隔水层分为了四个带,即“四个带”理论,给出了计算各个带厚度的公式。罗国煜等<sup>[17]</sup>提出了“突水优势面”的理论,这个理论认为受下部承压水的威胁区域易发生底板突水薄弱区,包括底板隔水层隔水能力薄弱带和底板含水层的强径流带,通常呈带状分布。黎良杰等<sup>[18]</sup>运用相似材料对煤层点突水机理进行研究;徐智敏<sup>[19]</sup>通过底板突水模拟试验,研究煤层底板隔水层破坏的规律和突水特征;冯启言等<sup>[20]</sup>基于 F-PFPA2D 技术,建立底板采动破坏数值模型,对底板的突水机理进行了研究。

目前,突水系数理论得到了较为广泛应用,对评

价和预测煤矿底板突水起到了积极作用,但在实际防治水工作中关于突水系数的计算及分区等方面还存在着一些值得探讨和研究的问题。羊场湾煤矿是宁煤集团重要的生产矿井,该矿主采煤层属于侏罗系煤层,区内侏罗系煤层底部普遍存在有宝塔山砂岩含水层。近年来,羊场湾煤矿所在宁东地区周边多个煤矿发生了宝塔山砂岩含水层底板突水事故,上海庙某矿甚至发生了突水淹井的事故,造成了巨大的经济损失。羊场湾煤矿即将开采的 16 号煤层就位于宝塔山砂岩顶板之上,如何科学的计算 16 号煤层底板的突水系数并对矿区内宝塔山砂岩含水层进行分区,对 16 号煤层的安全回采具有重要意义。本研究基于国家自然科学基金资助的“煤矿顶板疏放水倾斜钻孔定降深的井流计算”项目,在分析羊场湾井田内地质钻孔数据及宝塔山砂岩含水层水位数据的基础上,参照《煤矿防治水规定》要求,改进克里格插值计算方法,对羊场湾煤矿 16 号煤层底板宝塔山砂岩含水层进行突水系数分区,并绘制了更精确的突水系数等值线图。

## 1 突水系数计算

### 1.1 突水系数理论

20 世纪 60 年代以来焦作矿区发生了多次突水淹井事故<sup>[8]</sup>,在焦作防治水会战中,突水系数及其临界值由中国防治水的科技人员提出,并且借鉴了 20 世纪 50 年代匈牙利学者韦格·弗伦斯提出的底板相对隔水层的概念。早在 20 世纪 20 年代,人们注意到底板隔水层的作用,并从若干次底板突水中认识到,只要底板有隔水层,突水次数和突水量就会减少。在《煤矿防治水规定》中,突水系数定义为煤层底板单位隔水层厚度所承受的水压力,它是带压条件下衡量煤层底板突水危险程度的定量指标<sup>[7]</sup>。

$$T = P/M \quad (1)$$

其中: $T$  为突水系数,MPa/m; $P$  为底板隔水层承受水压,MPa; $M$  为底板隔水层厚度,m。 $T$  应当根据矿区资料确定,为了保证矿井安全生产,一般情况下,在具有构造破坏的地段突水系数大于 0.06 MPa/m 的区域应单独划出,隔水层完整无断裂构造破坏地段突水系数大于 0.1 MPa/m 的区域应单独划出。

### 1.2 克里格插值法

克里格方法(Kriging)是以南非矿业工程师 D. G. Krige (克里格)名字命名的一项实用空间估计技术,是地质统计学的重要组成部分,也是地质统计学

的核心。它是建立在变异函数理论分析的基础上,对有限区域的区域化变量取值进行无偏最优估计的一种方法<sup>[8]</sup>。这种方法和传统的插值方法不同之处在于估计原观测样本数值的时候,不但考虑插值点和邻近有观测数据点的空间位置,还利用已有的观测值的空间分布结构特点,使估计比传统方法更加精准、符合实际。

克里格插值法原理是概率统计与估计理论中无偏、最小方差条件,这个方法实质是距离加权的改进,仍然属于一种线性插值法。

设  $x_1, \dots, x_n$  为区域上的一系列观测点,  $z(x_1), \dots, z(x_n)$  为相应的观测值。区域化变量在  $x_0$  处的值  $z^*(x_0)$  可采用一个线性组合来估计,即

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

式中:  $\lambda_i$  为特定权重系数。

无偏性和估计方差最小被作为  $\lambda_i$  选取的标准,无偏和最优计算公式分别如下:

$$E[z(x_0) - z^*(x_0)] = 0 \quad (3)$$

$$\text{Var}[z(x_0) - z^*(x_0)] = \min \quad (4)$$

其中:  $E[z(x)]$  为数学期望;  $\text{Var}[z(x)]$  为方差。从本征假设出发,可知  $E[z(x)]$  为常数,有:

$$\begin{aligned} E[z^*(x_0) - z(x_0)] &= E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z(x_0)\right] \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) E[z(x_i)] - E[z(x_0)] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

由此可得:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (6)$$

以无偏为前提,克里格方差为最小可求得解待定系数  $\lambda_i$  的方程组为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n C(x_i - x_j) \lambda_i - \mu = C(x_0 - x_j) \quad (j = 1, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $C(x_i - x_j)$  为  $Z(x_i)$  和  $Z(x_j)$  的协方差函数,可由式(7)解出  $\lambda_i$ ,代入(2)即可解得估计值。

### 1.3 突水系数等值线绘制

传统的突水系数等值线图绘制时按照以下步骤:①统计研究区内所有钻孔的深度,找到穿过煤层底板并揭露含水层顶板的钻孔(以下简称揭露钻

孔),并计算这些揭露钻孔位置处隔水层的厚度。②实测或利用插值计算出揭露钻孔处的地下水头,并换算成水压。③利用突水系数公式,计算各揭露钻孔处的突水系数值。④利用插值计算方法绘制研究区的突水系数等值线图。

### 1.4 突水系数等值线图优化绘制方法

由于研究区的煤田地质勘探钻孔往往穿过煤层底板一定距离后就封孔,继续钻进入煤层底板下含水层的钻孔数量较少,仅用这些数量较少的揭露钻孔绘制突水系数等值线图可能会使得绘制的突水系数等值线图与实际情况有较大偏差,特别是在一些地形起伏较大的区域,如果揭露钻孔的分布密度较小,就会造成突水系数精度控制不足,使得绘制的突水系数等值线图与实际情况有较大偏差,用这种精度控制不足的突水系数等值线图开展防治水工作就可能造成误导,威胁矿井安全。①统计研究区内所有钻孔的深度,找到穿过煤层底板并揭露含水层顶板的钻孔,并计算揭露钻孔位置处隔水层的厚度。②统计揭露钻孔处煤层底板与含水层顶板之间的距离,并利用克里格插值计算方法插值计算研究区内所有钻孔位置处隔水层的厚度。③实测或插值计算出所有钻孔处的地下水头,并换算成水压。④利用突水系数公式,计算所有钻孔处的突水系数值。⑤插值计算并绘制研究区的突水系数等值线图。

### 1.5 常规插值处理(直接插值)和优化厚度插值(间接插值)绘制方法对比

常规插值处理(直接插值)和优化厚度插值(间接插值)绘制方法的对比差异见表 1。

表 1 直接插值和间接插值绘制方法的对比

Table 1 Comparison of direct in interpolation and indirect interpolation

方法	应用 方式	实际应用钻 孔数据/个	钻孔位置	差值结果	整体效果
常规 方法	—	22	分布较疏	变化平缓	一般
优化 方法	厚度 插值	52	分布密集 且均匀	起伏变化明显 精确度高	更符合实际 地质情况

## 2 羊场湾煤矿突水系数等值线图优化

### 2.1 研究区概况

根据地质勘探钻孔资料显示羊场湾煤矿 16 号

煤层底板以下为宝塔山砂岩含水层,岩性主要为河床相沉积的中、粗粒沙岩,底部含有砾石,含水层以裂隙为主,孔隙为辅,裂隙率为 7.6%,孔隙率为 2.5%,合计给水度 10.1%。抽水试验显示该含水层单位涌水量为  $0.293 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  和  $0.415 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,由此确定该含水层富水性为“中等”,预计井田范围内该含水层静储量为  $85\ 055\ 476.29 \text{ m}^3$ 。

羊场湾矿区范围内宝塔山砂岩含水层厚度为  $1.57 \sim 60.10 \text{ m}$ ,平均  $17.36 \text{ m}$ ,静水位标高为  $+1\ 102.84 \text{ m}$ ,16 号煤层底板隔水层厚度为  $0.72 \sim 31.49 \text{ m}$ ,平均厚度  $12.19 \text{ m}$ ,在羊场湾矿区对 16 号煤层底板最大静水压力达到了  $10 \text{ MPa}$ 。

由式(1)可知影响突水系数大小的主要因素是底板隔水层厚度及底板承受的水头压力。16 号煤层底板承压含水层内水头高度大于煤层底板高程是底板突水的必要条件,含水层中地下水可能通过导水通道进入采掘工作面,从而对井下安全生产构成很大的威胁。

### 2.1.1 底板隔水层岩性

组成煤层底板隔水层岩层的岩性不同,阻水能力也不同羊场湾煤矿 16 号煤层顶、底板主要由灰色泥质粉砂岩、灰黑色砂质泥岩、泥岩组成,间夹少量细粒砂岩。厚度一般为  $3 \sim 8 \text{ m}$ ,最大  $14 \text{ m}$ ,平均厚  $5.6 \text{ m}$ ,包括煤层本身平均总厚  $8 \text{ m}$  左右。矿井内分布较稳定,矿井西侧及北侧较厚,东南侧较薄,隔水性能相对较好。该层上下含水层为弱含水层组,含水层之间联系程度较低。

### 2.1.2 含水层水压

含水层水压作为煤层下部的承压水涌入采掘工作面的动力,是底板突水的决定性因素。发生底板突水,下部含水层自由水位必须要高于煤层底板的标高,同时含水层还需要一定的水头压力。在没有人工程活动或地质构造的情况下,只要底板含水层有足够的水头压力,才能破坏隔水层引发的突水事故。水压分为静水压力和动水压力:

1)静水压力:通过水流对岩石软化和有效应力的作用,减小了岩体的整体强度,而且水头压力使隔水层内的裂隙进一步的延伸和扩张,表现在含水层顶板承压水导升发育带的存在。

2)动水压力:动水压力对煤层底板的剪切裂隙和构造裂隙进一步的软化、潜蚀,扩展沟通已有裂隙,减小了底板隔水层的强度。高压水流会冲刷扩大突水通道,致使突水量不断增大。

### 2.1.3 宝塔山砂岩含水层勘探情况

通过对羊场湾采掘平面图和羊场湾煤矿柱状资料进行整理,得到 156 个钻孔的地层数据资料。其中 16 号煤层底板含水层数据的钻孔共计 22 个(图 1a),有 16 号煤层但无底板含水层数据的钻孔共计 30 个。

22 个有 16 号煤层底板隔水层厚度的钻孔均分布在羊场湾采区内,而经过厚度插值后得到的 52 个钻孔分布在羊场湾内更广(图 1b)。初步估计插值结果中羊场湾中部到南部区域的差异比较显著,厚度插值后的结果局部更加能反映突水系数的变化规律。如此,在羊场湾煤矿 16 号煤层开采过程中,我们更加能掌握开采点的突水系数大小,提前做好相关防范措施。

## 2.2 传统方法突水系数插值计算与优化计算对比

为了得到 2 种方法更加显著的对比结果,选用了 21 个钻孔中 16 号煤层底板标高最小的 2112 钻孔(其 16 号煤层底板标高为  $-93.05 \text{ m}$ ),提取 2 种等值线图中 2112 钻孔东西方向坐标以及南北方向坐标的突水系数数据。然后对相应的数据做变化趋势图,对突水系数的走势进行分析对比。

按照常规插值处理(直接插值)和优化厚度插值(间接插值)完后生成的突水系数等值线 GRD 中,找到 2112 钻孔横纵坐标的所有点坐标对应的突水系数,统计成表格数据,分别画出其东西方向上突水系数变化趋势图(图 2)以及南北方向上的突水系数变化趋势图(图 3)。

1)直接插值法结果。从图 2 中可以看出通过钻孔突水系数直接插值后,在钻孔 2112 东西方向上突水系数先指数形式增大,然后急促减小,但是整体增幅比较平稳。突水系数最大值接近  $7.0 \text{ MPa}/\text{m}$ ,最小值接近 0。从图 3 中可以看出在钻孔 2112 南北方向上,直接插值得到的突水系数呈“W”形状变化。其突水系数最大值约为  $1.05 \text{ MPa}/\text{m}$ ,最小值约为  $0.15 \text{ MPa}/\text{m}$ 。突水系数整体变化比较平稳。

2)间接插值法结果。从图 4 中可以看出通过钻孔突水系数间接插值后,在钻孔 2112 东西方向上突水系数先增大,然后小范围起伏变化,增大到接近  $5.5 \text{ MPa}/\text{m}$  后开始减小。突水系数最大值接近  $5.5 \text{ MPa}/\text{m}$ ,最小值接近  $0.2 \text{ MPa}/\text{m}$ 。从图 3 中可以看出在钻孔 2112 南北方向上,在钻孔 2112 东西方向上突水系数先微小平稳变化,然后增长后降低,最后

线性增长。其突水系数最大值接近  $1 \text{ MPa/m}$ , 最小

值约为  $0.1 \text{ MPa/m}$ 。

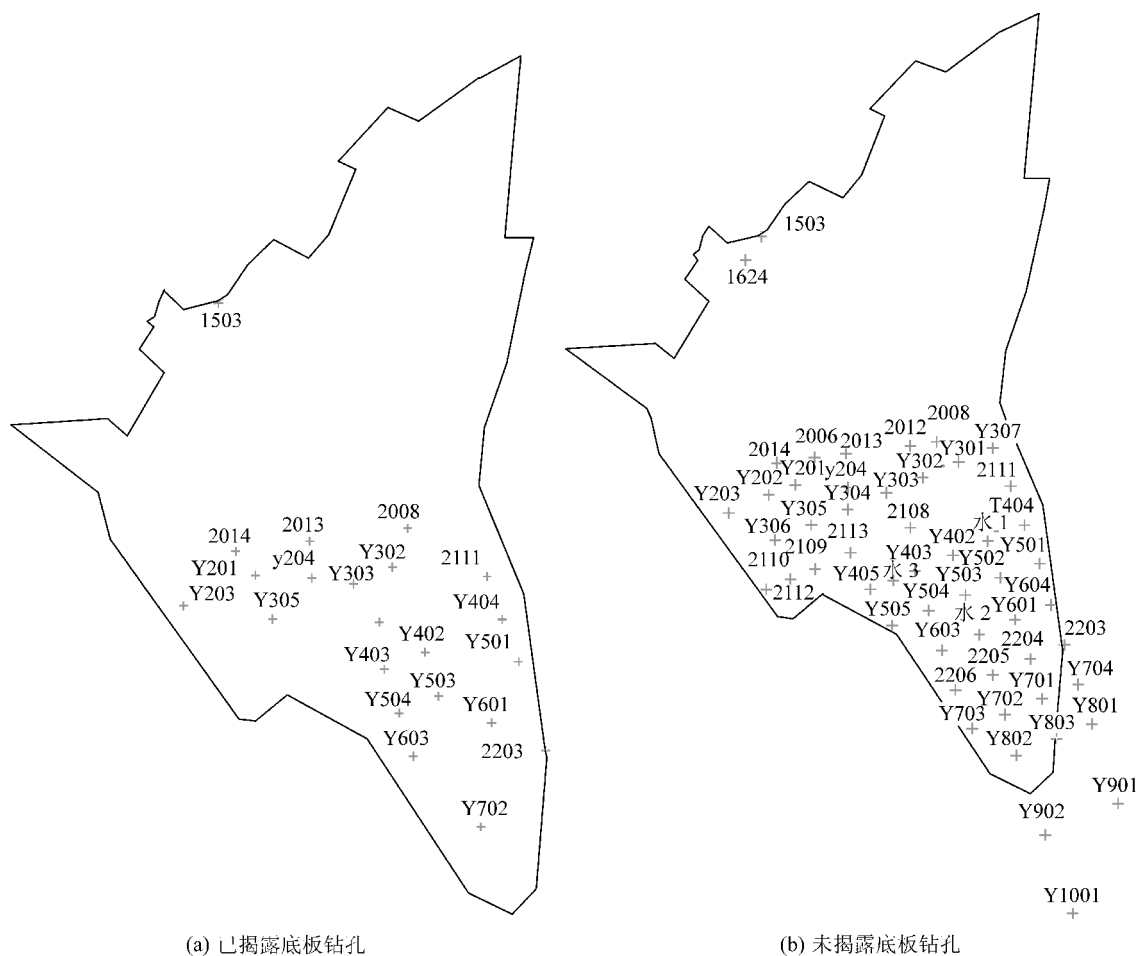


图1 插值钻孔分布

Fig.1 Interpolation drill distribution

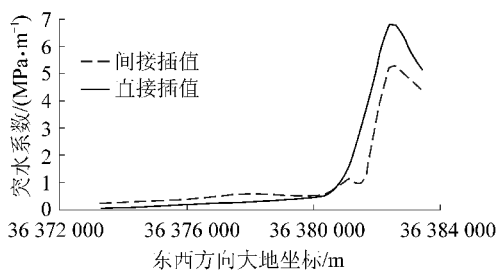


图2 钻孔2112两种结果东西方向突水系数变化趋势图对比

Fig.2 Drilling 2112 two results East - West directional water inrush coefficient scatter plot comparison

### 2.3 两种突水系数变化趋势图的对比

由上两种结果进行变化趋势图比较,可以从最大值大小、最值分布坐标、整体变化趋势以及局部变化趋势分析两种结果的区别。

1) 东西方向突水系数变化趋势图对比。从图2可以看出在东西方向上:①2种变化趋势图最大值所在横坐标位置相近,但大小相差较大,最小值也存

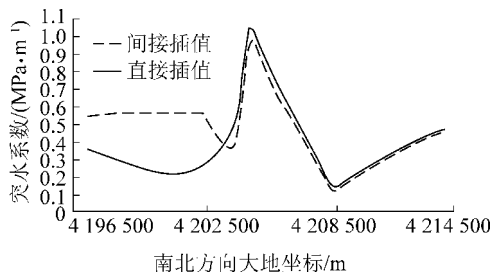


图3 钻孔2112两种结果南北方向突水系数变化趋势图对比

Fig.3 Drilling 2112 two results North-South directional water inrush coefficient scatter plot comparison

在差异;②直接插值整体变化比较平滑,而间接插值起伏变化更加明显,更加符合真实地形变化的规律;③间接插值变化趋势图在东西方向中部的的位置,局部变化细致明显。

2) 南北方向突水系数变化趋势图对比。从图3可以看出在南北方向上:①两种变化趋势图最大值所在横坐标位置相近,但大小存在差异,最小值相

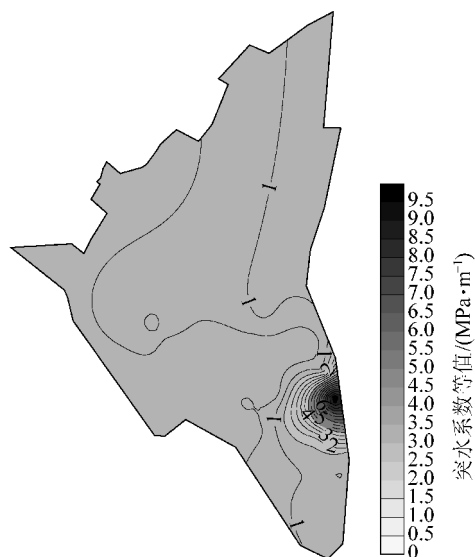


图 4 直接突水系数等值线图

Fig.4 Direct water burst coefficient contour map

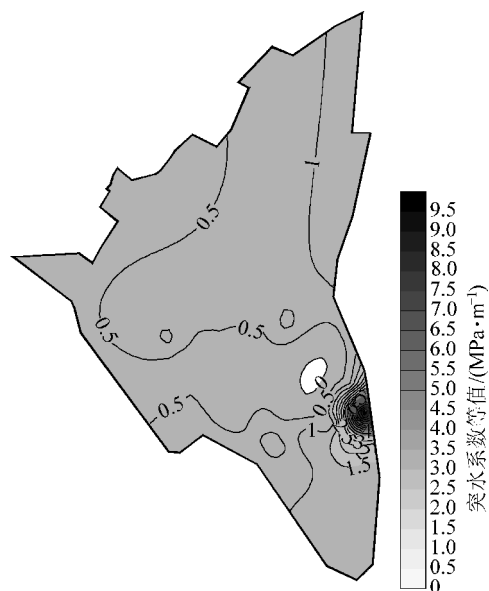


图 5 间接突水系数等值线图

Fig.5 Indirect water burst coefficient contour map

近;②间接插值在靠南方向与直接插值存在较大差异,间接插值所得变化趋势图趋势较为平稳,变化起伏,而直接插值变化曲线过于光滑;③间接插值变化趋势图在最值坐标方向左部的位置,局部变化细致明显。

## 2.4 羊场湾煤矿突水系数等值线图绘制

经过对前期整理得到的数据通过克里格插值方法,分别建立两种突水系数等值线图,从而在直观视觉上能对比出两种方法的差异。

1)常规方法绘制突水系数等值线平面图。由 2014 等 22 个钻孔计算出相应的突水系数,用对应坐标的突水系数对整个羊场湾矿区进行克里格插值得到直接突水系数等值线(图 6)。从图中直观可见突水系数较大(《煤矿防治水规定》中给定正常块的突水系数不大于 0.1),且集中在矿区右下方区域。

2)优化方法绘制突水系数等值线平面图。经过对统计钻孔数据的处理,除 2014 等 22 个钻孔,另外有 2112 等 30 个钻孔有 16 号煤层数据,但是钻孔未打到底板含水层,所以未知其隔水层厚度。由 2014 等 22 个钻孔的隔水层厚度用克里格插值法对矿区插值,得到羊场湾矿区 16 号煤层底板隔水层厚度分布数据。然后通过隔水层厚度分布图找到 2112 等 30 个钻孔对应的隔水层厚度值。最后计算出这 52 个钻孔对应的突水系数,用对应坐标的突水系数对整个羊场湾矿区进行克里格插值得到间接突水系数等值线图(图 4)。

## 3 结 语

笔者以羊场湾 16 号煤层的突水系数分布作为研究对象,通过统计 16 号煤层底板含水层钻孔的数据,分别运用常规直接插值方法和优化厚度间接插值方法绘制了羊场湾煤矿 16 号煤层底板突水系数等值线。结果表明,直接插值整体变化比较平滑,而间接插值起伏变化更加明显;羊场湾煤矿矿区突水系数值普遍大于《煤矿防治水规定》要求的正常块突水系数大小 0.1 MPa/m,矿区内局部值接近 5.5 MPa/m;在矿区东南方向突水系数的变化较大,掘进和回采必须进行防治措施。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [3] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定释义[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [4] 国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程释义(防治水部分)[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [5] 武 强,赵苏启,李竞生,等.《煤矿防治水规定》编制背景与要点[J].煤炭学报,2011,36(1):70-74.  
WU Qiang, ZHAO Suqi, LI Jingsheng, et al. The preparation background and the main points of rule of mine prevention and cure water disaster[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 70-74.
- [6] Q WU, M WANG, X WU. Investigations of groundwater bursting

- into coal mine seam floors from fault zones [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 41(4): 557-571.
- [7] 武强, 张志龙, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I: 主控指标体系的建立 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42-47.  
WU Qiang, ZHANG Zhilong, MA Jifu. A new practical method for water inrush evaluation of coal seam floor (Part I): establishment of master control index system [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 2-47.
- [8] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用 [J]. 山东矿业学院学报, 1999, 18(4): 11-18.  
LI Baiying. "Down Three Zone s" in the prediction of water inrush from coalbed floor aquifer - theory, development and application [J]. Journal of Shandong Institute of Mining & Technology, 1999, 18(4): 11-18.
- [9] 张金才, 刘天泉. 论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征 [J]. 煤炭学报, 1990, 15(2): 46-55.  
ZHANG Jincai, LIU Tianquan. Discussion on the coal seams floor destroyed depth and distributing character [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(2): 46-55.
- [10] 黎良杰, 钱鸣高, 闻全, 等. 底板岩体结构稳定性与底板突水关系的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(4): 18-23.  
LI Liangjie, QIAN Minggao, WEN Quan, et al. Relationship between the stability of floor structure and water-inrush from floor [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(4): 18-23.
- [11] 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 keystratum in ground control [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [12] PEI Jingxian, XU Xuehan, LI Jiliang. Thermoluminescence dating of calcite in the gouge off-20 fault at ertan dam site [J]. Science in China, 1985(9): 1000-1008.
- [13] 王作宇, 刘鸿泉. 煤层底板突水机制的研究 [J]. 煤田地质与勘探, 1989, 17(1): 36-39.  
WANG Zuoyu, LIU Hongquan. Study on water inrush mechanism of coal seam floor [J]. Coal Geology and Exploration, 1989, 17(1): 36-39.
- [14] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机理的模拟与观测 [J]. 岩土工程学报, 2000, 21(9): 546-549.  
WANG Jingming. Measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 21(9): 546-549.
- [15] 宋景义, 王成绪. 论承压水在岩体裂隙中的静力学效应 [C]. 西安: 煤科总院西安分院文集(第五集), 1991.
- [16] 施龙青, 韩进. 开采煤层底板“四带”划分理论与实践 [J]. 煤炭学报, 2005, 34(1): 16-23.  
SHI Longqing, HAN Jin. Theory and practice of dividing coal mining-area floor into four-zone [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 34(1): 16-23.
- [17] 罗国煜. 工程地质优势面理论观点概要认识 [J]. 江苏地质, 2008(1): 1-4.  
LUO Guoyu. Summary and understanding of theoretical viewpoints of engineering geological dominant surface [J]. Journal of Geology in Jiangsu, 2008(1): 1-4.
- [18] 黎良杰, 钱鸣高, 殷有泉. 采场底板突水相似材料模拟研究 [J]. 煤田地质与勘探, 1996, 25(1): 33-36.  
LI Liangjie, QIAN Minggao, YIN Youquan. Research on the tests of water inrush from floor simulated by similar materials [J]. Coal Geology and Exploration, 1996, 25(1): 33-36.
- [19] 徐智敏, 孙亚军, 董青红, 等. 隔水层采动破坏裂隙的闭合机理研究及工程应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 613-618.  
XU Zhimin, SUN Yajun, DONG Qinghong, et al. Closing mechanism of mining-induced fracture in coal mine aquifuge and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 613-618.
- [20] 冯启言, 陈启辉. 煤层开采底板破坏深度的动态模拟 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998, 23(3): 71-73.  
FENG Qiyang, CHEN Qihui. Broken depth dynamic simulation of coal mining floor [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1998, 23(3): 71-73.