

doi: 10.11799/ce201410047

# 大采高综放面倾向支承压力分布的采厚效应

孔德中, 王兆会, 王颜亮, 范苑

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了确定大采高综放面倾向支承压力分布与采厚的关系, 在现场实测的基础上, 应用弹塑性极限平衡理论计算不同采厚下倾向支承压力峰值点大小、位置; 采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟不同采厚下工作面推进过程中支承压力的动态变化。研究表明: 大采高综放工作面支承压力峰值点大小与一次采厚近似成反比关系, 峰值点距离与一次采厚成非线性正比关系。由于开采扰动, 使得理论计算的结果偏小, 需要对理论计算结果进行修正。

**关键词:** 大采高综放; 倾向支承压力; 采厚效应; 理论分析; 数值计算

**中图分类号:** TD823.4<sup>+</sup>9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2014)10-0165-04

## Mining Thickness Effect of Inclined Support Pressure Distribution in High Cutting Fully Mechanized Top Coal Caving Mining Face

KONG De-zhong, WANG Zhao-hui, WANG Yan-liang, FAN Yuan

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to determine a relationship between an inclined support pressure distribution and a mining thickness of a high cutting fully mechanized top coal caving mining face, based on a site measurement, elastic and plastic limit balance theory was applied to calculate a size and location of the inclined support pressure peaks under different mining thickness. A FLAC<sup>3D</sup> was applied to the numerical simulation on the dynamic variation of the support pressures in a pushing forward process of the coal mining face under different mining thickness. The study results showed that the support pressure peak of the high cutting fully mechanized top coal caving mining face approximately was an inverse ratio relationship to a one passing mining thickness and the peak point distance and the one passing mining thickness were a nonlinear direct ratio relationship. Due to the mining turbulences, the theoretical calculation results were too small and the theoretical calculation results should be corrected.

**Keywords:** high cutting fully mechanized top coal caving mining; inclined support pressure; mining thickness effect; theoretical analysis; numerical calculation

近年来, 随着综合机械化水平的提高, 越来越多的特厚煤层(15~20m)矿井采用大采高综放开采技术。对于大采高综放面, 由于一次采出的煤层厚度较大, 其采场周围支承压力分布与其他采煤方法开采时不尽相同, 而支承压力的峰值位置及大小是决定回采巷道布置和护巷煤柱参数的主要因素。因此, 回采工作面侧向支承压力分布规律的研究, 对确定区段煤柱宽度、合理布置巷道等具有十分重要的意义。文

献[1]对深井特厚煤层综放工作面支承压力分布特征进行了研究, 研究表明: 侧向支承压力峰值出现在采空区后方, 回采期间巷帮煤体垂直应力的变化沿走向可分为应力稳定区、应力升高区、应力峰值区、应力降低区、二次升高区和应力蠕变区; 文献[2]采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟了在煤层开采过程中采场支承压力的动态变化, 得出工作面推进距离和长度及煤层的厚度和埋藏深度对支承压力集中系数和支承压

收稿日期: 2013-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227903); 国家自然科学基金项目(51004109); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM11KFB05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010QZ02)

作者简介: 孔德中(1988-), 男, 河南永城人, 博士, 现从事矿山压力与岩层控制方面的研究, E-mail:1361316170@qq.com。

引用格式: 孔德中, 王兆会, 王颜亮, 等. 大采高综放面倾向支承压力分布的采厚效应[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 165-168.

力峰值点距工作面距离的影响程度；文献 [3-6] 对较薄厚煤层综放面煤壁前方及侧向实体煤的支承压力分布进行了解析，研究得出：支承压力的大小与一次开采煤层厚度均成反比，而支承压力距煤壁的距离与一次开采厚度成正比。综上所述，目前对中厚煤层大采高工作面、厚煤层综放面倾向支承压力分布特征的研究较多<sup>[1-10]</sup>，而对特厚煤层综放工作面倾向支承压力分布特征的研究较少。本文以国投塔山矿 104 工作面为工程背景，采用理论计算、数值模拟结合现场实测分析特厚煤层大采高综放工作面倾向支承压力分布特征，以期确定区段煤柱宽度及合理布置回采巷道和冲击地压防治等提供依据。

### 1 工作面概况

国投塔山矿 104 大采高综放面走向长 1700m，倾向长 150m，工作面标高为 -400 ~ -440m。煤厚 8.5 ~ 14m，平均煤厚为 12m，煤层倾角 0° ~ 3°，为近水平煤层。割煤高度 3.5m，放煤高度 8.5m，采放比 1:2.5。该面煤层稳定，结构复杂，含 2~3 层夹矸，夹矸的岩性为黑高岭质泥岩、灰黑色炭质泥岩、褐色高岭岩。根据钻孔揭露的情况：老顶自上而下为 2 号煤层、岩浆岩、硅化煤、粉砂岩、细砂岩、高岭质泥岩与砂质泥岩等，厚度 12.47 ~ 28.34m；直接顶为泥岩或砂质泥岩，厚度约为 2.46 ~ 6.28m；直接底为泥岩，厚度约为 2.38 ~ 6.42m，基本底为中粗砂岩，厚度约为 23.6m，上下平巷均采用“锚杆+锚索+金属网”支护。

### 2 倾向支承压力的理论分析

#### 2.1 力学模型的建立及求解

综放开采引起的采场侧向支承压力分布情况与其他开采方法不完全相同，为了获得峰值点距离巷帮的位置，建立如图 1 所示的力学模型。

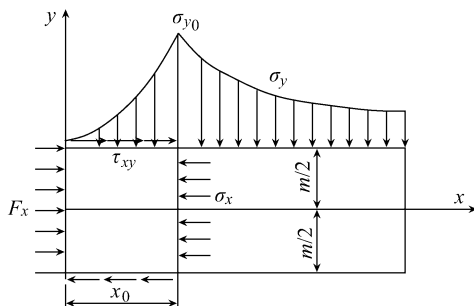


图 1 倾向支承压力分布的力学模型

由图 1 可列平衡微分方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + f_y &= 0 \\ \tau_{xy} &= -(C + \sigma_y \tan \varphi) \\ \sigma_x &= \lambda \sigma_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， $f_x$  和  $f_y$  分别为极限平衡区内煤体在  $x$  和  $y$  方向的体积力， $f_x = 0$ ， $f_y = m\gamma$ ， $m$  为煤层采放厚度， $m$ ； $C$  为煤层与顶底板界面处的黏聚力，MPa； $\varphi$  为煤层与顶底板界面处的摩擦角，(°)； $\lambda$  为侧压系数。

解式(1)得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= B_0 e^{B(x + \frac{C \cot \varphi}{\lambda})} + A \\ \tau_{xy} &= -[C + (B_0 e^{B(x + \frac{C \cot \varphi}{\lambda})} + A) \tan \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， $B_0$ 、 $B$ 、 $A$  为待定常数。

由极限平衡区内  $x$  方向的合力为 0 的特征可得：

$$m\lambda \sigma_y \Big|_{x=x_0} - 2 \int_0^{x_0} \tau_{xy} dx - F_x m = 0 \quad (3)$$

求解式(3)得：

$$\sigma_y \Big|_{x=x_0} = c_1 e^{\frac{2}{m\lambda} x_0 \tan \varphi} - \frac{C}{\tan \varphi} \quad (4)$$

式中， $c_1$  为待定常数。

联立式(1)、(2)、(3)、(4)得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \frac{1}{\lambda} \left( F_x + \frac{C}{\tan \varphi} \right) e^{\frac{m\gamma}{2} \frac{2 \tan \varphi}{m\lambda} + \left( \frac{2 \tan^2 \varphi}{m\lambda} - \gamma \right) y} \\ \tau_{xy} &= -(C + \sigma_y \tan \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将  $y = \frac{m}{2}$ ， $x = x_0$  代入到式(5)中，可以求得极限平衡区的范围：

$$x_0 = \frac{m\lambda}{2 \tan \varphi} \ln \frac{\lambda K \gamma H \tan \varphi + 2C}{2(\lambda C + F_x \tan \varphi)}$$

#### 2.2 力学模型的应用分析

对于 8301 综放面，取煤层采放厚度  $m$  为 12m，侧压系数  $\lambda$  为 0.3，煤层内摩擦角  $\varphi$  为 30°，内聚力  $C$  为 1.6MPa，体积力  $\gamma$  为 25kN/m<sup>3</sup>，支架对煤帮的横向作用力  $F_x$  为 0.25MPa。把参数代入到式中，计算得到峰值点应力集中系数  $K$  为 1.76， $x_0 = 6.46m$ 。

当煤层采放厚度为 10m 时，应力集中系数  $K$  为 1.81， $x_0 = 5.42m$ ；当煤层采放厚度为 14m 时，应力集中系数  $K$  为 1.72， $x_0 = 7.49m$ ；当煤层采放厚度为 16m 时，应力集中系数  $K$  为 1.68， $x_0 = 8.50m$ ；当煤层采放厚度为 18m 时，应力集中系数  $K$  为 1.63， $x_0 = 9.49m$ ；当煤层采放厚度为 20m 时，应力集中系数  $K$  为 1.59， $x_0 = 10.47m$ 。

通过以上计算，可以得到大采高综放面倾向支承压力峰值点距离、应力集中系数大小与采厚的关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出，对于某个具体的矿，当煤层埋深一

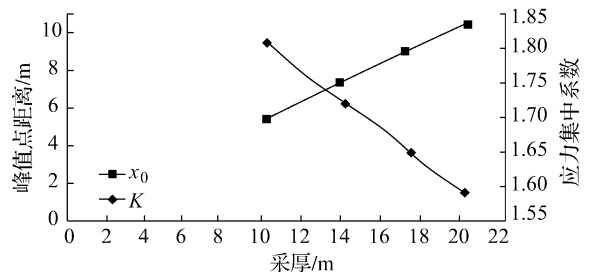


图 2 倾向支承压力与峰值点距离及应力集中系数的关系

定、侧压系数一定、煤层内摩擦角、内聚力为定值时，侧向支承压力峰值位置  $x_0$  与煤层采放厚度  $m$  近似成正比关系，支承压力峰值应力集中系数大小与采放厚度  $m$  近似成反比关系。

### 3 倾向支承压力分布的数值计算

根据国投塔山矿 8301 工作面地质条件采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值分析软件建立模型，模拟不同采厚 (10m、12m、14m、16m、18m、20m) 条件下，巷帮侧倾向支承压力分布特征。

#### 3.1 模型的建立及参数确定

建立如图 3 所示的计算模型，模型长 200m，宽 200m，高 100m，共划分 258586 个节点和 241875 个单元体。模型前后左右和底部为对位移边界进行固定，上部施加 10.5MPa 的均布载荷。数值计算采用的岩层物理力学参数见表 1。

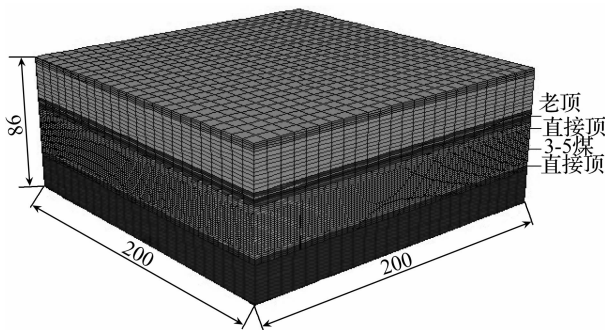


图3 数值计算模型 (m)

表1 岩层的物理力学参数

类别	容重/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )	粘结 力/MPa
中粗砂	2500	8	4	3.17	50	8
粉砂岩	2600	7.98	4.01	3.0	48	6.0
泥岩	2400	5	2.44	1.79	40	4.0
3-5煤	1400	2.42	1.31	0.8	28	1.6
岩浆岩	2420	6.33	2.54	1.3	45	4.2
2煤	1300	2.12	1.12	0.79	30	1.2

#### 3.2 模拟结果分析

为了更形象直观的得到不同采放厚度下大采高综放倾向支承压力分布特征，当工作面推进不同距离时，分别对巷帮侧 60m 内的单元体上的垂直应力进行监测，将监测数值导入到 Excel 中进行处理。从不同采厚条件下倾向支承压力分布处理结果中可以看出：

1) 当工作面自开切眼 5m 处，推进到 10m 时：不同采厚的大采高综放面倾向支承压力峰值点集中系数为 1.30 ~ 1.33，应力降低区为巷帮侧 2m，峰值点距离巷帮侧 4m；此阶段采厚对大采高综放面倾向支承压力分布几乎无影响。随着工作面的推进，当工作面推进到 30m 处：采厚为 10m 的综放面峰值点应力集中系数由 1.31 增加为 1.51，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 6m；采厚为 12m、

14m、16m 的综放面峰值点应力集中系数为 1.47 ~ 1.51，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 8m；采厚为 18m、20m 的综放面峰值点应力集中系数由 1.36 ~ 1.38，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 8m；此阶段采厚开始对倾向支承压力分布产生影响。

2) 工作面开挖 30 ~ 40m 处，初次来压完成后，当工作面推进到 70m、80m 处：采厚为 10m 的综放面倾向支承压力稳定后的峰值点应力集中系数为 1.82，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 6m；采厚为 12m 的综放面应力集中系数为 1.80，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 8m；采厚为 14m 的综放面应力集中系数为 1.73，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 10m；采厚为 16m 的综放面应力集中系数为 1.69，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 14m；采厚为 18m 的综放面应力集中系数为 1.61，应力降低区为巷帮侧 4m，峰值点距离巷帮侧 16m；采厚为 20m 的综放面应力集中系数为 1.59，应力降低区为巷帮侧 6m，峰值点距离巷帮侧 18m。

从以上分析可以得知，大采高综放面侧向支承压力稳定后，煤层采厚越大，峰值应力集中系数越小，峰值点距巷帮侧越远。采厚与大采高综放倾向支承压力极限平衡区的范围成非线性正比关系，如图 4 所示。

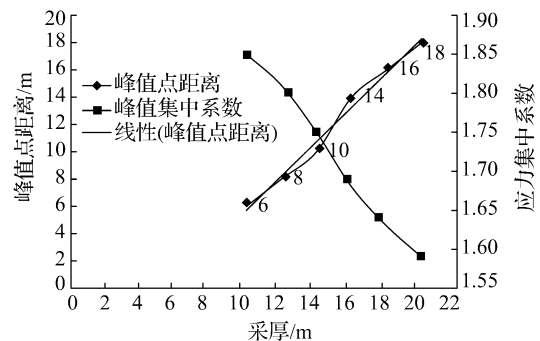


图4 采厚与极限平衡区的关系

### 4 现场实测研究

为了获得回采期间大采高综放面倾向围岩应力分布情况，在国投塔山矿 104 大采高综放面运输平巷与下区段平巷的联巷 20m 内布置 KSE 型钻孔应力计，传感器超前工作面 10m，间隔 2m，观测倾向支承压力在回采期间的变化情况，对现场监测数据整理如图 5 所示。

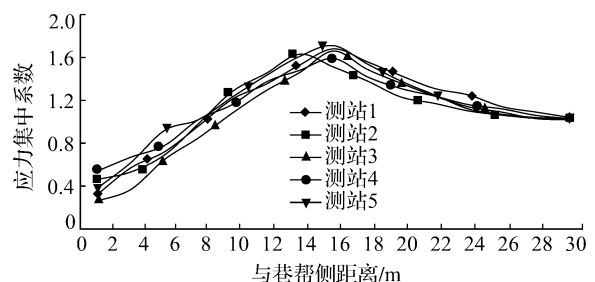


图5 大采高综放面倾向支承压力分布

由图5可见,大采高综放面沿倾向基本上都存在应力峰值,距工作面不同位置处倾向应力峰值基本无变化,峰值点应力集中系数为1.59~1.70,峰值点距离巷道上部8~9m,应力降低区为巷帮侧3~4m。

综合理论分析、数值模拟和现场实测的结果,可以知道数值模拟计算的结果和现场基本吻合,理论计算的结果则比现场实测偏小,这主要是由于开采扰动,使实体煤侧帮产生松动破坏,导致实体煤侧应力向深部转移。因此,需要对理论计算的公式进行修正,结合数值模拟结果与现场实测数据的分析及考虑侧压系数的影响,开采引起的扰动系数取支承压力相对系数 $k = \frac{m}{10} \times 1.1$ ,其中,1.1是采厚10m的煤层的扰动系数。

因此,大采高综放面倾向支承压力极限平衡区的计算公式可进一步修正为:

$$x_0 = \frac{km\lambda}{2\tan\varphi} \ln \frac{\lambda K\gamma H \tan\varphi + 2C}{2(\lambda C + F_x \tan\varphi)}$$

## 5 结论

1) 工作面自开切眼到初次来压过程中,随着工作面推进,大采高综放面倾向支承压力峰值点支承压力集中系数逐渐增大,峰值点逐渐向实体煤深部转移。

2) 大采高综放面倾向支承压力极限平衡区大小与采厚近似成非线性正比关系,峰值点集中系数的大小与采厚近似成反比关系。

3) 由于开采扰动,使得煤体侧帮松动破坏,导致应用弹性极限平衡理论计算的结果比现场实测及数值模拟得到的支承压力峰值点距离偏小,需要对理论计算公式进行

修正。

## 参考文献:

- [1] 刘金海,姜福兴,王乃国,等.深井特厚煤层综放工作面支承压力分布特征的实测研究[J].煤炭学报,2011,36(S1):19-21.
  - [2] 司荣军,王春秋,谭云亮.采场支承压力分布规律的数值模拟研究[J].岩土力学,2007,28(2):351-354.
  - [3] 谢广祥.采厚对工作面及围岩应力壳的力学特征影响研究[J].煤炭学报,2006,31(1):6-10.
  - [4] 谢广祥,王磊.工作面支承压力采厚效应解析[J].煤炭学报,2008,33(4):362-363.
  - [5] 谢广祥,杨科,刘全明.综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):546-549.
  - [6] 谢广祥,杨科,常聚才.综放开采煤层支承压力分布规律现场实测分析[J].煤炭科学技术,2006,34(3):1-3.
  - [7] 刘长友,黄炳香,孟祥军,等.超长孤岛综放工作面支承压力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2761-2766.
  - [8] 刘金海,姜福兴,冯涛.C型采场支承压力分布特征的数值模拟研究[J].岩土力学,2010,31(12):4011-4015.
  - [9] 史红,姜福兴.充分采动阶段覆岩多层空间结构支承压力研究[J].煤炭学报,2009,34(5):605-609.
  - [10] 王同旭,刘传孝,王小平.孤岛煤柱侧向支承压力分布的数值模拟与雷达探测研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(S2):2484-2487. (责任编辑 郭继圣)
- (上接第164页)
- 煤炭开采产生的大量矿井水一旦外排很快蒸发损失。为保护水资源,在多年的技术研究和工程实施基础上,掌握了煤炭开采对地下三类水的影响规律,针对传统的“堵截法”保水技术不足,提出了“疏导法”的新保水开采理念,通过一系列研究和工程示范,在采空区储水设施的基础上,攻克了一系列技术难题,研发了煤矿地下水库和煤矿分布式地下水库技术,并成功应用于工程实践。结果表明,该技术适用于神东浅埋深、薄基岩和厚煤层矿区,提供了矿区用水总量的95%以上,保障了矿区科学发展,为我国西部地区煤炭现代开采水资源保护和利用提供了新的技术参考。
- 参考文献:
- [1] 钱鸣高.煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2010,35(4):529-534.
  - [2] 范立民.论保水采煤问题[J].煤田地质与勘探,2005,33(5):50-53.
  - [3] 师本强,侯忠杰.陕北榆神府矿区保水采煤方法研究[J].煤炭工程,2006(1):63-65.
  - [4] 刘洋,石平五,张状路.浅埋煤层矿区“保水采煤”条带开采的技术参数[J].煤矿开采,2006,11(6):6-10.
  - [5] 神华集团.神东矿区水资源保护性采煤技术研究与应[用].北京:神华集团,2008.
  - [6] 神华集团.千万吨矿井群资源和环境协调开采技术[R].北京:神华集团,2009.
  - [7] 神华集团.神东矿区现代化矿井水资源和生态建设研究[R].北京:神华集团,2011.
  - [8] 顾大钊,张建民.西部矿区现代煤炭开采对地下水赋存环境的影响[J].煤炭科学技术,2012,40(12):114-117.
  - [9] 李全生,贺安民,曹志国.神东矿区现代煤炭开采技术下地表生态自修复研究[J].煤炭工程,2012(12):120-122.
  - [10] 顾大钊.煤矿分布式地下水库技术及其应用[C]//第二届“中国工程院/国家能源局”能源论坛,2013.
  - [11] 顾大钊.能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J].中国工程科学,2013,15(4):102-107.
  - [12] 顾大钊.能源“金三角”煤炭开发水资源保护与利用[M].北京:科学出版社,2012. (责任编辑 郭继圣)