

# 承压水上采煤底板破坏规律的解析法计算及应用

冯磊<sup>1</sup>, 赵光明<sup>1,2</sup>, 孟祥瑞<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 根据工作面回采过程中其前后方支承压力并考虑底板含水层的水压, 建立支承压力与水压共同作用于底板的力学模型, 以此求解底板任意一点的应力, 与莫尔-库仑准则相结合给出了底板是否破坏的判别依据; 根据孙疃煤矿 1028 工作面地质情况, 理论计算得出底板下 0~20 m 内受采动影响较大; 其破坏由工作面前方 2 m 向采空区方向发展, 破坏深度范围 0~16 m, 最大破坏深度为 16 m。现场采用电阻率测试方法对相对于工作面不同位置处的底板破坏情况进行了探测, 其结果与理论计算相近, 验证了此力学模型理论分析的正确性。

**关键词:** 半无限体; 应力分布; 底板; 破坏分布; 电阻率; 水压

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2011)09-0013-04

## Analysis Calculation on Floor Failure Law of Coal Mining Above Pressurized Water Strata and Application

FENG Lei<sup>1</sup>, ZHAO Guang-ming<sup>1,2</sup>, MENG Xiang-rui<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. State Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the front and rear support pressures during the mining process of the coal mining face and in consideration of the water pressure of the aquifer under the floor, a mechanics model with the support pressure and water pressure jointly effected to the floor was established in order to calculate the stress at the any point of the floor. With the combination with the Mohr-Coulomb Criterion, the judgment basis of the floor failure or not could be provided. According to the geological conditions of No. 1028 coal mining face in Suntuan Mine, the theoretical calculation showed that the strata within 0~20 m depth under the seam floor were highly affected by the mining activities, the failure at 2 meter in the front of the gateway driving face would be developed toward the direction of the goaf, the failure depth scope would be within 0~16 m and the max failure depth would be 16 m. The electric resistance rate test and measurement method was applied at the site to detect the floor failure condition at the different locations of the gateway driving face. The results and the theoretical calculation were closed to each other and could verify the correction of the theoretical analysis for the mechanics model.

**Key words:** semi-infinite body; stress distribution; floor; failure distribution; electric resistance rate; water pressure

煤层开采引起的应力集中会造成底板破坏, 底板应力场及破坏规律的研究是底板承压水突水研究的基础<sup>[1]</sup>。随着煤矿向深部开采, 底板应力及破坏的研究对掌握底板岩层变形、破坏和预测突水具有重要意义。而底板破坏的研究除现场实测和数值模拟的方法外<sup>[2]</sup>, 也可采用解析计算的方法。但很多文献中关于解析计算的方法, 只对工作面前方分布的支承压力进行了简化<sup>[3~4]</sup>, 忽

略了采动过程中工作面后方的恢复区应力及更远处原岩应力和承压水水压的影响, 或把支承压力静力等效成均匀分布力来计算<sup>[5]</sup>。为本文中加入采动过程中工作面后方的恢复区应力及其更远处原岩应力和承压水水压, 同时不对支承压力静力等效, 采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 计算出底板破坏区域的近似范围, 且分析了具体工程实例中底板应力和破坏情况。

收稿日期: 2011-04-17 责任编辑: 曾康生

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-08-0819); 国家自然科学基金资助项目 (50804003); 霍英东青年教师基金基础性研究课题 (121050); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目 (10KF03)

作者简介: 冯磊 (1985—), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 从事采矿系统工程的研究。E-mail: ls\_fenglei@163.com

## 1 力学模型的建立

煤层开采过程中,顶底板应力同步变化,应力变化特征区一一对应<sup>[6]</sup>。底板在支承压力的作用下,水平方向上出现了超前加载压缩区、卸压区和恢复压实区,同时考虑水压的作用,把煤层底板受力情况简化为如图1所示的力学计算模型<sup>[7-8]</sup>。

$$\begin{cases} Q_1(x) = k\gamma Hx/a & (0 \leq x \leq a) \\ Q_2(x) = \frac{(1-k)\gamma H}{l-a}(x-a) + k\gamma H & (a < x \leq l) \\ Q_3(x) = -\gamma Hx/c & (-c \leq x < 0) \\ Q_4(x) = -q & (-c \leq x \leq l) \\ Q_5(x) = \gamma H & (-\infty < x < -c) \\ Q_6(x) = \gamma H & (l < x < +\infty) \end{cases}$$

式中:  $Q_1(x)$  为塑性区支承压力;  $Q_2(x)$  为弹性区支承压力;  $Q_3(x)$  为恢复区支承压力;  $Q_4(x)$  为承压水水压;  $Q_5(x)$ 、 $Q_6(x)$  为原岩应力;  $q$  为水压;  $h$  为含水层至煤层间距;  $k$  为最大集中应力系数;  $\gamma$  为上覆岩层平均容重;  $H$  为煤层埋深;  $a$  为塑性区长度;  $l$  为煤壁前方支承压力长度;  $c$  为应力恢复区长度。

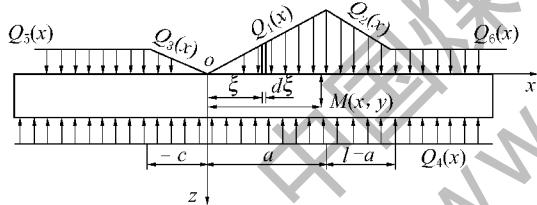


图1 煤层底板应力计算力学模型

## 2 应力的计算

根据弹性力学中半无限平面边界上受分布力作用的问题<sup>[8-9]</sup>,把支承压力和水压看成底板边界所受分布力,计算支承压力  $Q_1(x)$ 、 $Q_2(x)$ 、 $Q_3(x)$ ,承压水水压  $Q_4(x)$  及其原岩应力  $Q_5(x)$ 、 $Q_6(x)$  对底板中任一点  $M(x, z)$  处引起的应力分量。

1) 煤壁前方塑性区内支承压力  $Q_1(x)$  作用于底板的应力分量为

$$\begin{aligned} \sigma_z^{(1)} &= \frac{k\gamma H}{\pi a} \left[ x \left( \arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-a}{z} \right) + \right. \\ &\quad \left. z^3 \left( \frac{1}{x^2 + z^2} - \frac{1}{(x-a)^2 + z^2} \right) - \right. \\ &\quad \left. zx \left( \frac{x-a}{(x-a)^2 + z^2} - \frac{x}{x^2 + z^2} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(1)} &= \frac{k\gamma H}{\pi a} \left[ x \left( \arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-a}{z} \right) + \right. \\ &\quad \left. z \ln \frac{(x-a)^2 + z^2}{x^2 + z^2} + \frac{za(x-a)}{(x-a)^2 + z^2} \right] \quad (2) \\ \tau_{zx}^{(1)} &= \frac{zk\gamma H}{\pi a} \left[ \arctan \frac{x-a}{z} - \right. \\ &\quad \left. \arctan \frac{x}{z} + \frac{za}{(x-a)^2 + z^2} \right] \end{aligned}$$

2) 煤壁前方弹性区内支承压力  $Q_2(x)$  作用于底板的应力分量为

$$\begin{aligned} \sigma_z^{(2)} &= \frac{(k-1)\gamma H}{\pi(l-a)} \left[ x \left( \arctan \frac{x-l}{z} - \arctan \frac{x-a}{z} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{zx(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} - \frac{zx(x-a)}{(x-a)^2 + z^2} + z^3 \left( \frac{1}{(x-l)^2 + z^2} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{1}{(x-a)^2 + z^2} \right) \right] + \frac{(kl-a)\gamma H}{\pi(l-a)} \left[ \arctan \frac{x-a}{z} - \right. \\ &\quad \left. \arctan \frac{x-l}{z} + \frac{z(x-a)}{(x-a)^2 + z^2} - \frac{z(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} \right] \\ \sigma_x^{(2)} &= \frac{(k-1)\gamma H}{\pi(l-a)} \left[ x \left( \arctan \frac{x-l}{z} - \arctan \frac{x-a}{z} \right) + \right. \\ &\quad \left. z \ln \frac{(x-a)^2 + z^2}{(x-l)^2 + z^2} - \frac{zl(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} + \frac{za(x-a)}{(x-a)^2 + z^2} \right] + \\ &\quad \frac{(kl-a)\gamma H}{\pi(l-a)} \left[ \arctan \frac{x-a}{z} - \arctan \frac{x-l}{z} - \right. \\ &\quad \left. \frac{z(x-a)}{(x-a)^2 + z^2} + \frac{z(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{zx}^{(2)} &= \frac{(k-1)\gamma Hz}{\pi(l-a)} \left[ \arctan \frac{x-a}{z} - \arctan \frac{x-l}{z} + \right. \\ &\quad \left. \frac{za}{(x-a)^2 + z^2} - \frac{zl}{(x-l)^2 + z^2} \right] + \\ &\quad \frac{(kl-a)\gamma Hz^2}{\pi(l-a)} \left[ \frac{1}{(x-l)^2 + z^2} - \frac{1}{(x-a)^2 + z^2} \right] \end{aligned}$$

3) 采空区一侧应力恢复区内支承压力作用于底板的应力  $Q_3(x)$  分量为

$$\begin{aligned} \sigma_z^{(3)} &= \frac{\gamma H}{\pi c} \left[ x \left( \arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x+c}{z} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{zc(x+c)}{z^2 + (x+c)^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(3)} &= \frac{\gamma H}{\pi c} \left[ x \left( \arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x+c}{z} \right) - \right. \\ &\quad \left. z \ln \frac{x^2 + z^2}{(x+c)^2 + z^2} - \frac{zc(x+c)}{(x+c)^2 + z^2} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{zx}^{(3)} &= \frac{z\gamma H}{\pi c} \left[ \arctan \frac{x+c}{z} - \arctan \frac{x}{z} - \frac{zc}{(x+c)^2 + z^2} \right] \end{aligned}$$

4) 底板含水层的水压  $Q_4(x)$  作用于底板的

应力分量为

$$\begin{aligned}\sigma_z^{(4)} &= \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{x+c}{h-z} - \arctan \frac{x-l}{h-z} + \right. \\ &\quad \left. \frac{(h-z)(x+c)}{(x+c)^2 + (h-z)^2} - \frac{(h-z)(x-l)}{(x-l)^2 + (h-z)^2} \right] \\ \sigma_x^{(4)} &= \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{x+c}{h-z} - \arctan \frac{x-l}{h-z} - \right. \\ &\quad \left. \frac{(h-z)(x+c)}{(x+c)^2 + (h-z)^2} + \frac{(h-z)(x-l)}{(x-l)^2 + (h-z)^2} \right] \quad (5) \\ \tau_{zx}^{(4)} &= \frac{q(z-h)}{\pi} \left[ \frac{1}{(x-l)^2 + (h-z)^2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{(x+c)^2 + (h-z)^2} \right]\end{aligned}$$

5) 煤壁后方的原岩应力  $Q_5(x)$  作用于底板的应力分量为

$$\begin{aligned}\sigma_z^{(5)} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x+c}{z} - \frac{z(x+c)}{(x+c)^2 + z^2} \right] \\ \sigma_x^{(5)} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x+c}{z} + \frac{z(x+c)}{(x+c)^2 + z^2} \right] \quad (6) \\ \tau_{zx}^{(5)} &= \gamma H z^2 / [\pi(x+c)^2 + z^2]\end{aligned}$$

6) 煤壁前方的原岩应力  $Q_6(x)$  作用于底板的应力分量为

$$\begin{aligned}\sigma_z^{(6)} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[ \arctan \frac{x-l}{z} + \frac{\pi}{2} + \frac{z(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} \right] \\ \sigma_x^{(6)} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[ \arctan \frac{x-l}{z} + \frac{\pi}{2} - \frac{z(x-l)}{(x-l)^2 + z^2} \right] \quad (7) \\ \tau_{zx}^{(6)} &= -\gamma H z^2 / [\pi(x-l)^2 + z^2]\end{aligned}$$

据弹性力学叠加原理, 把支承压力和承压水水压作用于底板任一点  $M(x, z)$  所引起各个应力分量相加, 即可得  $M(x, z)$  处应力  $\sigma_z$ 、 $\sigma_x$  和  $\tau_{zx}$ 。

### 3 底板破坏的确定

煤层开采以后, 围岩应力产生重新分布, 使得底板产生很大的应力集中与卸压, 考虑到煤层底板岩石多为脆性材料, 其破坏多符合剪切破坏机制。利用式(8)求出  $M(x, z)$  处主应力, 代入 Mohr-Coulomb 准则, 即

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_1 < \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

式中:  $C$  为岩石的黏聚力;  $\varphi$  为岩石内摩擦力。

判断底板一点  $M(x, z)$  处是否破坏, 计算底板不同位置处的破坏情况即可得到其破坏的分布。

### 4 实例计算

以淮北矿业集团孙疃煤矿 1028 工作面开采工艺及现场观测<sup>[3]</sup>选取相关参数:  $k = 2.4$ ,  $a = 10$  m,  $l = 50$  m,  $c = 60$  m, 平均开采深度  $H = 466$  m,  $\gamma = 26.69$  kN/m<sup>3</sup>,  $\varphi = 33^\circ$ ,  $C = 3.5$  MPa, 煤层下距太灰  $h = 58.38$  m,  $q = -6$  MPa。

以此理论计算出工作面前后各 50 m, 底板 25 m 范围内的垂直应力分布, 如图 2 所示。煤体下方浅部应力集中, 深部卸压; 采空区下方浅部卸压甚至出现拉应力, 深部有较低的应力集中。

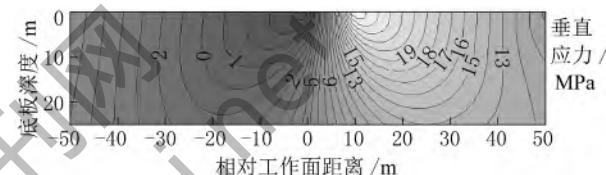


图 2 底板垂直应力分布

根据式(9), 计算出工作面推进到不同位置时底板破坏情况, 得到如图 3 所示的单个椭圆区域的破坏范围: 其距煤壁  $-15 \sim 2$  m 内, 煤壁前方  $0 \sim 2$  m 内破坏至 12 m, 煤壁后方  $7 \sim 9$  m 内破坏深度最大, 值为 16 m。随着工作面的推进, 破坏区域在图 3 中体现为椭圆区域向前移动。而在同种条件下, 忽略原岩应力的计算结果为 15 m。

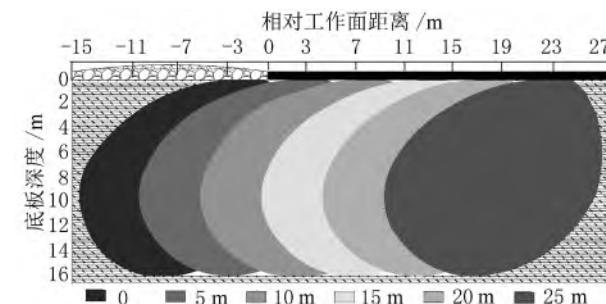


图 3 底板破坏变化

### 5 现场实测

现场实际采用了电阻率 CT 测试方法对底板破坏深度进行了探测。试验地点在 1028 工作面回风巷, 共布置 2 个底板钻孔, 两孔间的水平距离为 5 m。钻孔都布置铜电极。图 4 为分别为钻孔距工作面 31 m、工作面推至钻孔附近和工作面推过钻孔后电阻 CT 的切片图。

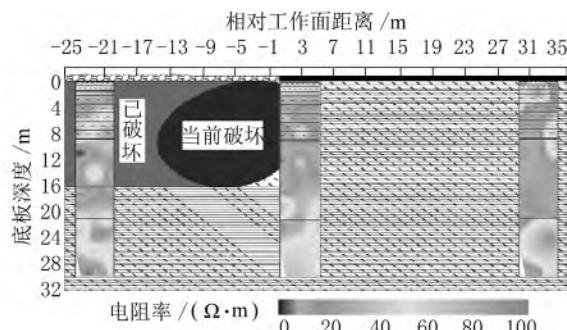


图4 电阻率CT反演切片

分析采动前后钻孔在30 m内的电阻率变化<sup>[10]</sup>，可得出：当钻孔距工作面31 m时，0~15 m内岩层的电阻率值有减小的趋势，表明岩层受采动影响但并未破坏，20~30 m内的岩层电阻率值无明显变化，说明该范围内岩层受采动的影响甚微；当工作面推至钻孔附近，底板0~15 m内岩层电阻率值有起伏，受采动影响发生破坏，而20~30 m内的岩层电阻率值变化较小；当工作面推过钻孔25 m后，底板0~17 m内的岩层电阻率值高低起伏，低阻区呈垂向条带状，表明该段岩层受煤层回采的影响，已经发生破坏，20~30 m内的岩层视电阻率值变化仍较小。分析得出，电阻CT的切片图所反映的底板破坏情况与图4保持一致。

综上所述，孙疃煤矿1028工作面煤层底板在支承压力和底板承压水水压共同作用下，煤层底板的破坏带范围在0~17 m，最大破坏深度为17 m，与解析计算的结果基本一致。而煤层底板下17~30 m内的岩层在回采过程中受采动影响，发生弹性变形，随着工作面的进一步推进，岩层的弹性变形得到恢复。

## 6 结 论

1) 通过建立采动过程中工作面前后方的支承压力及其更远处原岩应力和承压水水压力学模型，解析得到了底板20 m内应力分布较为集中，进一步得到底板破坏分布，最大破坏深度为17 m。

2) 结合对工作面电阻率CT探测结果进行对比，理论计算结果与实测数据具有对应关系。

### 参考文献：

- [1] 高召宁, 孟祥瑞. 采动条件下煤层底板变形破坏特征研究 [J]. 矿业安全与环保, 2010, 37 (3): 7~20.
- [2] 雷贵生, 韩德品. 矿井电法探测工作面底板潜在突水构造

- 的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35 (6): 24~26.
- [3] 孟祥瑞, 徐铖辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (11): 1832~1836.
- [4] 朱术云, 姜振泉, 姚普, 等. 采场底板岩层应力的解析法计算及应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24 (2): 191~194.
- [5] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 96~98.
- [6] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 185~186.
- [7] 虎维岳, 尹尚先. 采煤工作面底板突水灾害发生的采掘抗动力学机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 39 (S1): 3344~3348.
- [8] 王卫军, 侯朝炯, 柏建彪, 等. 综放沿空巷道底板受力变形分析及底鼓力学原理 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (2): 319~322.
- [9] 徐芝伦. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1980.
- [10] 程学丰, 刘盛东, 张平松, 等. 缓倾角煤层开采顶底板破坏特征探测 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (3): 41~43.

(上接第12页)

通过实施冲击矿压综合防治措施，实现了在采深大、高应力、多构造等困难条件下冲击矿压煤层安全开采，共采出煤炭350多万吨，解放下部煤量1600多万吨。京山铁路煤柱下5号煤层开采取得了显著的社会效益和经济效益，同时也为今后开采类似冲击矿压危险煤层积累了宝贵经验。

### 参考文献：

- [1] 窦林名, 赵从国, 杨思光, 等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [2] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [3] 宋继臣, 窦林名, 何江. 峻德煤矿104掘进工作面冲击矿压防治技术 [J]. 矿业安全与环保, 2010, 37 (5): 49~51.
- [4] 牟宗龙, 窦林名, 王江胜. 工作面终采线附近冲击矿压综合防治技术 [J]. 矿业安全与环保, 2010, 37 (1): 51~53.
- [5] 许清起. 上方煤柱下综采面顺槽冲击矿压的防治 [J]. 煤矿开采, 2004, 9 (3): 58~59.
- [6] 曹耀丰, 何富连, 杨彦宏, 等. 断层煤柱区冲击矿压的综合指数预测及注水防治 [J]. 煤矿安全, 2010, 40 (11): 49~51.
- [7] 许正强, 祝晓鸣, 李德喜. 煤柱区域冲击矿压的预报与防治 [J]. 煤炭科技, 2003 (4): 45~47.
- [8] 吴兴荣, 马继新, 井圣泉. 孤岛煤柱工作面冲击矿压的防治实践 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19 (4): 94~96.