

# 采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律研究

张俊英<sup>1,2</sup>, 蔡美峰<sup>1</sup>, 张青<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学研究总院矿山安全技术研究分院, 北京 100013)

**摘要:** 在采空区地表修建建筑, 由于采空区覆岩已经遭到破坏, 在新增荷载的作用下可能引起覆岩的进一步破坏, 从而危及建筑物的安全。采用了相似材料模拟试验和数值模拟方法对采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律进行了系统研究, 得到了采空区地表新增荷载与采空区上方覆岩的相互影响关系。研究表明: 开采前岩体应力基本随深度增加线性增大, 开采后岩体内应力发生了重分布, 地表新增荷载后的地基附加应力分布随深度增加逐渐减小; 通过以地表新增荷载在地基中产生的附加应力相当于开采前地基中原岩应力的 10% 位置来确定地表荷载的影响深度, 研究得到了开采前后不同大小地表荷载的影响深度, 为采空区地表建筑利用提供了理论依据。

**关键词:** 采空区; 地基; 荷载; 附加应力; 影响深度

中图分类号: TD325.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)07-1096-05

**作者简介:** 张俊英(1965-), 男, 河北武安人, 博士后, 从事采矿损害防护技术研究工作。E-mail: zhjy369@163.com。

## Distribution laws of ground stress after newly increased load on surface above mined-out areas

ZHANG Jun-ying<sup>1,2</sup>, CAI Mei-feng<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Mine Safety Technology Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** New buildings exert extra load on the ground surface above mined-out areas and may induce overburden failures. A systematic research on the distribution laws of foundation stress after newly increased load on mined-out areas is performed by use of simulation tests on similar materials and numerical methods. The main findings are as follows: the rock stress increases lineally with the depth before the coal mining, while it has a redistribution after the coal worked-out. The additional stress of the foundation decreases gradually with the depth after the newly increased load on the surface. The influence depth is determined by the foundation additional stress caused by newly added load when it is equal to 10% of the rock stress before the coal mining. The influence depths under different loads on the surface before and after mining are obtained, and the study provides an important theory criterion for surface utilization above mined-out areas.

**Key words:** mined-out area; foundation; load; additional stress; influence depth

## 0 引言

在采空区地表新建建筑, 关系到建筑物的长久安全问题, 因此应进行相关研究后加以推行。一般来说, 煤层开采后, 上覆岩层形成垮落带、裂缝带、弯曲带<sup>[1-2]</sup>。垮落带岩体呈散体和碎裂结构, 岩块间空隙大、连通性好; 裂缝带岩体呈块裂层状结构, 裂缝连通且发育; 弯曲带岩体为较完整的层状结构, 采动破坏轻微。垮落带、裂缝带的岩体内部结构遭到破坏, 而弯曲带的岩层性态改变较小。当在已经开采多年、地表塌陷接近稳定的采空区地表新建建(构)筑物时, 地表新增建筑荷载使地基土中原有应力状态发生变化, 地表建筑荷载将影响到地表以下一定深度, 如果地表建筑荷载的影响深度足以触及到开采所形成的垮落

带、裂缝带时, 就会破坏采空区业已平衡状态而使采空区顶板重新发生移动, 使稳定地表重新沉降, 危及地表新建建筑的安全<sup>[3-4]</sup>。因此, 研究采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律对采空区地表的利用和建筑物的安全有着重要意义。

针对采空区地表修建建筑物及其基础稳定性问题, 国内外学者采用概率积分理论、岩石力学理论和数值模拟技术做了一些相关研究, 并取得一些成果<sup>[3-12]</sup>。但随着社会的进步和经济建设的需要, 越来越多的建

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAB02A17); 煤炭工业科学技术研究指导性计划项目(MTKJ08-041)

收稿日期: 2009-05-06

构筑物会建在采空区之上, 给开采沉陷研究和采空区之上建构筑物的安全等诸问题不断带来新的课题和挑战。因此, 本文采用相似材料模拟试验和数值模拟方法对采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律进行了详细研究, 得到了采空区地表新建建(构)筑物时新增荷载与采空区上方覆岩的相互影响关系, 为采空区地表的利用和建筑物的安全提供了重要的理论依据。

## 1 传统计算方法

### 1.1 地基自重应力

地基中岩土层的自重应力为<sup>[13-14]</sup>

$$s_c = g_1 h_1 + g_2 h_2 + \dots + g_n h_n = \sum_{i=1}^n r_i h_i \quad (1)$$

式中,  $s_c$  为地表下任意深度处的竖向自重应力 (MPa),  $g_1, g_2, \dots, g_n$  为地基中自上而下各层土或岩石的重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $h_1, h_2, \dots, h_n$  为地基中自上而下各层土或岩石的厚度 (m)。

地下水水位面也应作为分层的界面, 地下水水位以下的土岩层取浮重度。地下水水位以下如有隔水层, 隔水层面及其下的自重应力应按上覆岩土层的水土总重计算。

### 1.2 地基附加应力

矩形、条形等荷载作用下的地基附加应力<sup>[13-14]</sup>:

$$s_z = K_z P_0 \quad (2)$$

式中  $K_z$  为各种荷载(矩形、方形、圆形、三角形、条形等)下的竖向附加应力系数, 均可由相对关系查表求出<sup>[13]</sup>。 $P_0$  为地表荷载作用于基础底面平均附加压力 (MPa),  $P_0 = P - r_0 D$ ,  $P$  为作用于基础底面处竖向荷载 (MPa),  $r_0$  为基础底面标高以上土层的重度, ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $D$  为基础底面埋深 (m)。

当地表有多个荷载作用时, 计算地基附加应力时应考虑相邻荷载的迭加影响。

正常情况下, 地基附加应力从荷载作用处向其下四周扩散分布; 同一深度处荷载正下方地基附加应力最大, 随着距离中轴线愈远愈小; 沿荷载作用面中心点下轴线随深度愈向下愈小。

### 1.3 地表荷载的影响深度

地基自重应力从地表向下方随着深度增加逐渐增大, 而地基附加应力从荷载作用处向下方随着深度增加逐渐减小。一般当地表建筑荷载在地基中产生的附加应力等于相应深度处地基自重应力的 20% 时, 即可认为地表建筑荷载对该深度处地基产生的影响可忽略不计<sup>[13]</sup>, 但当其下方有高压缩性土或其它不稳定性因素, 如采空区垮落、裂缝带时, 则应计算附加应力直

至地基自重应力 10% 位置处, 方可认为地表建筑荷载对该深度处的地基不产生太大影响。该深度即为地表建筑荷载的影响深度。地表建筑荷载的影响深度随荷载的增加而增大。

## 2 相似材料模拟结果

相似材料模型模拟采深 130 m, 采宽 300 m, 采厚 3.0 m。覆岩主要考虑了表土层、泥岩、砂质页岩、粉砂岩等岩层。在模型上不同位置、深度布设了压力盒<sup>[15]</sup>。模型开采后, 待地表沉降稳定之后在地表不同位置处加载, 开采前后及加载后对压力盒应力均进行了观测。

试验中在模型的不同区域布置了 A, B, C, D 竖线来观测压应力随深度在不同情况(指开采前、开采后及加载后)下的变化情况。用  $x$  来表示模拟的范围, 开采区域处于  $x=190\sim 490$  m。A 线处于  $x=50$  m 位置, 基本上不受开采影响。B 线处于  $x=150$  m 位置, 处于开采区域外侧附近。C 线处于  $x=230$  m 位置, 处于开采区域内侧附近。D 线处于  $x=330$  m 位置, 处于开采区域中央附近。图 1 为 D 线压应力随深度在不同情况下的变化, 图 2 为加载后各竖线附加应力随深度变化(附加应力是指新增荷载后在地基中新增加的应力)。

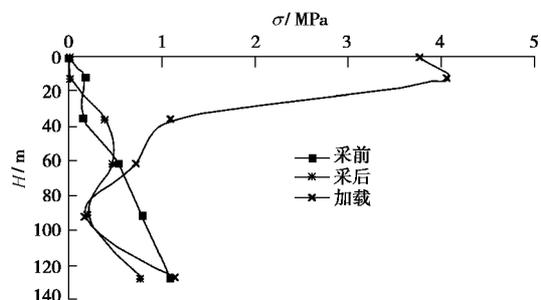


图 1 D 线 ( $x=330$  m) 压应力随深度不同情况变化图

Fig. 1 Variation of compressive stress of D line with depth in different cases

从图 1 中可以看出, 采前的岩体内自重应力基本上为随深度增加而线性增大; 采后的岩体内应力发生重分布, D 线由于处于采空区内部区域, 在深部有明显的卸载现象; 加载后应力浅部最大, 愈往深部变化减小。这些规律与实际比较相符, 开采前岩体保持整体性, 自重应力随深度增加而线性增大; 开采后, 岩体发生了破坏, 有些部位岩层产生离层、有些部位则产生挤压, 致使岩体内应力发生重分布。

从图 2 附加应力变化图上可以看出浅部附加应力最大, 越深越小, 与力学理论基本相符; 荷载大致向下传递深度为 40~60 m。

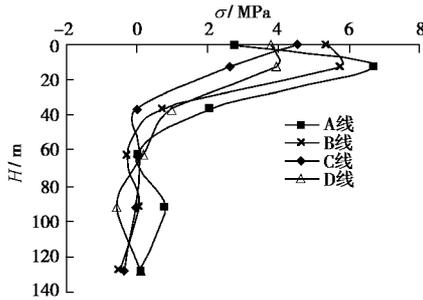


图2 加载后各竖线附加应力随深度变化图

Fig. 2 Variation of additional stress of each vertical line with depth after loading

虽然实测到的附加应力影响深度在 40~60 m 深度处, 距离煤层尚有 70~90 m, 但加载时可以明显看到煤层处垮落带岩体碎块有压密现象, 且向外挤出。说明采空区上方覆岩受开采影响时已产生了严重破坏, 在地表新加荷载的作用下, 破碎岩块可能在较小的外力扰动下就可能产生较大的位移变化, 这一点在采空区地表新建建筑时要引起足够重视。

### 3 有限元数值模拟

建立有限元数值模型, 模拟走向长度 350 m, 深度 140 m, 煤层埋深 123 m, 煤厚 3 m, 地表有 20 m 厚表土层, 岩层为泥岩、粉砂岩等中硬岩性。考虑了对称条件, 左边留 150 m 不采, 右边 200 m 为开采范围。模拟了开采前、开采后、不采煤情况下地表新增不同荷载大小、及开采后在地表不同位置新增不同荷载大小等情况。通过采用不同的岩体物理力学参数来考虑垮落带、裂缝带及弯曲带采动破裂岩体的特性, 按平面应变问题求解。

#### 3.1 沉降规律

开采之前, 首先在模型不同位置上施加荷载, 计算结果表明: 在不开采情况下, 模型不同位置施加相同的荷载, 其结果是一样的。当荷载大小分别为 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5, 0.8 MPa (作用范围 20 m 宽), 在不开采模型上引起的附加沉降分别为 6, 13, 20, 40, 67, 107 mm。随着荷载的增大, 附加沉降线性增大。

模型开采后最终稳定 (考虑采空区地表残余沉降已部分发生) 时的地表最大下沉达到 2673 mm。然后在此基础上于采空区不同位置施加不同大小的荷载, 计算结果见表 1。在不同位置随着荷载增大, 中心点附加沉降也在线性增大, 但荷载作用在采空区不同位置引起的附加沉降是不同的, 在相同荷载大小作用下, 位于采空区中央的附加沉降值最大, 越往采空区外侧该值越小。通过与上面不开采模型比较, 可以看出,

采空区影响范围内的地表在相同荷载大小作用下引起的附加沉降要大于没有开采的地表条件, 而位于采空区中央的地表新增荷载引起的附加沉降要比没有开采的地表增加一倍。

表 1 采空区地表不同位置在不同大小荷载作用下的附加沉降

荷载 /MPa	采空区			
	边界 $x=50$ m	外侧 $x=130$ m	内侧 $x=180$ m	中央 $x=350$ m
0.1	16	19	21	27
0.3	50	58	63	80
0.5	83	97	105	133

注:  $x$  表示模拟的范围 (从左边界 0~350 m), 开采范围  $x=150$ ~350 m, 每处荷载作用范围为 20 m 宽。

模拟结果显示: 荷载位于采空区中央正上方时, 附加沉降值虽大, 但下沉值均匀; 而位于采空区边界上方时, 附加沉降不均匀, 明显位于采空区一侧下沉要大于煤柱一侧, 向采空区一侧偏斜, 因而对新建设施是不利的。因此, 在采空区地表新建建 (构) 筑物时, 必须考虑上述规律。

#### 3.2 应力变化规律

对于开采之前的模型, 以新增荷载产生的附加应力相当于地基自重应力 20% 的位置作为荷载影响深度。当荷载大小分别为 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5 MPa (作用范围 20 m 宽) 时, 影响深度分别为 11, 19, 25, 32, 41 m (如果以附加应力相当于地基自重应力 10% 的位置作为荷载影响深度, 则荷载大小分别为 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5 MPa 时, 影响深度分别为 19, 26, 32, 44, 57 m)。随着荷载的增大, 影响深度非线性增大。

开采之前, 地基自重应力随深度线性增大, 与式 (1) 计算结果一致。开采之后, 地基应力发生了复杂的变化, 采空区不同位置变化也不一样, 图 3 给出了开采前、以及开采后  $x=50, 130, 180, 350$  m 等位置处的地基应力随深度变化图 (开采范围为 150~350 m)。可以看出, 位于采空区外侧煤柱区域 ( $x=130$  m) 应力随深度不断增大, 最深处应力比不采煤时增大了将近 6 倍; 位于采空区内侧区域 ( $x=180$  m) 应力在 40~80 m 深度有所增大, 之下又有明显的减小; 位于采空区中央区域 ( $x=350$  m) 应力在中部一定范围内由压应力变为拉应力。这些规律反应了开采后岩体应力的复杂变化, 与实际情况也能较好地吻合, 随着开采结束时间的延长, 采空区上覆岩体裂隙、离层的逐渐压实或变化, 岩体应力还将发生重分布。

地表施加荷载后在地基中产生的附加应力与荷载大小有关, 相同荷载条件下, 不同位置处的附加应力

分布变化较小, 与式 (2) 计算结果相差不大。图 4, 5 给出了采空区内侧 ( $x=180\text{ m}$ )、中央 ( $x=350\text{ m}$ ) 处地面施加 0.1, 0.3, 0.5 MPa 荷载 (作用范围 20 m 宽) 下地基附加应力随深度变化曲线, 同时还给出了相应位置处开采后地基应力 10% 和开采前地基应力 10% 的变化曲线。

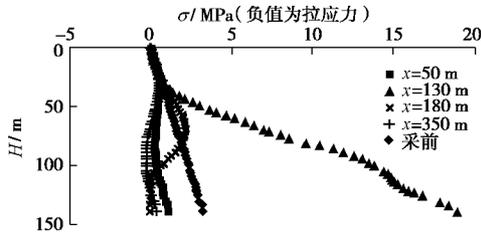


图 3 采前和采后不同位置地基应力随深度分布

Fig. 3 Variation of ground stress at different positions with depth before and after mining

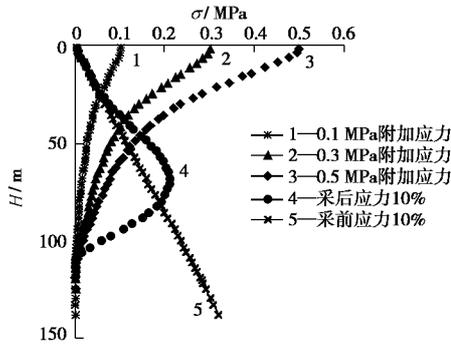


图 4  $x=180\text{ m}$  处不同荷载附加应力随深度变化

Fig. 4 Variation of additional stress under different loads with depth ( $x=180\text{ m}$ )

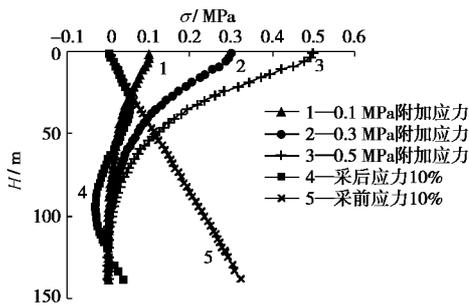


图 5  $x=350\text{ m}$  处不同荷载附加应力随深度变化

Fig. 5 Variation of additional stress under different loads with depth ( $x=350\text{ m}$ )

以地表施加荷载后地基附加应力相当于开采后地基中原岩应力的 10% 和开采前地基中原岩应力的 10% 的位置分别确定了地表荷载的影响深度 (见表 2)。可以看出, 当荷载较大时, 以采后地基应力的 10% 确定的荷载影响深度在采空区中央处也较大, 虽然一定程度上反映了荷载对采空区中央影响较大 (与由荷载引

起的附加沉降在采空区中央也较大是一致的), 但考虑到开采后岩体应力在不同区域分布是不相同的, 随着开采后的时间延续, 在岩层自重的作用下会逐渐压密, 岩体应力逐渐要趋向开采前原岩应力状态, 因此, 采空区地表新增荷载的影响深度以开采前地基应力的 10% 确定是可行的, 也易计算。这样, 采空区不同位置在相同荷载作用下影响深度是一样的, 当荷载分别为 0.1, 0.3, 0.5 MPa 时, 影响深度分别为 26, 44, 58 m。随着荷载增大, 影响深度非线性增大。

表 2 不同位置在不同荷载大小作用下影响深度

Table 2 Influence depths at various positions under different loads

荷载 /MPa	采空区外侧 $x=130\text{ m}$	采空区内侧 $x=180\text{ m}$	采空区中央 $x=350\text{ m}$
0.1	26 m(26 m)	26 m(26 m)	26 m(26 m)
0.3	36 m(44 m)	37 m(44 m)	118 m(43 m)
0.5	41 m(58 m)	46 m(58 m)	118 m(51 m)

注: 括号内数字为以采前地基自重应力 10% 确定的影响深度。

当荷载大小为 0.3 MPa 不变, 但作用范围发生变化时, 荷载的影响深度也相应变化, 结果见表 3。可见随着荷载范围增大, 影响深度也在增大, 而且采空区地表比非采空区地表相同条件下影响深度要大, 因此, 为了有效减小地表新增荷载对采空区上覆岩体的影响, 科学合理地控制建筑物占地面积是较好的方法。当然是在同样荷载条件下, 如拟建 1 栋占地宽 15 m、长 40 m 的建筑物, 可建成 2 栋占地宽 15 m、长 20 m 的建筑物, 2 栋建筑物间需要间隔一定的距离。

表 3 施加荷载范围变化时影响深度

Table 3 Influence depths under different ranges of load

加载范围/m	非采空地表/m	采空区地表/m
20	32	43
40	41	58
80	52	71

注: 荷载大小均为 0.3 MPa。

## 4 结 论

(1) 地表新增荷载后使地基中原有应力状态发生变化, 采用不同方法研究了采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律, 解决了采空区地表新建建 (构) 筑物时新增荷载与采空区上方覆岩的相互影响关系, 为采空区地表建筑利用提供了理论依据。

(2) 开采前岩体应力基本上为随深度增加线性增大, 开采后岩体应力发生了复杂的变化, 加载后的附加应力分布随深度逐渐减小。通过相似材料模型试验和数值模拟得到了岩体应力在开采前、采后及加载过程中的分布规律。

(3)地表新增荷载引起的附加沉降与所处的采空区相对位置有关,位于采空区中央上方时地表新增荷载后附加沉降最大,位于采空区边界上方时附加沉降不均匀,向采空区一侧偏斜。

(4)以地表新增荷载在地基中产生的附加应力相当于开采前地基中原岩应力的10%位置来确定地表荷载的影响深度,模拟结果得到了开采前后不同大小地表荷载的影响深度。

(5)本文模拟条件比较单一,得到的结果仅是初步的,有待今后进一步补充完善。

#### 参考文献:

- [1] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉降学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991. (HE Guo-qing, YANG Lun, LING Geng-di, et al. The study of coal mining subsidence[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [2] 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: 226 - 235. (Coal Industry Bureau of China. The mining code and coal column remain under building, water, railway, shaft and roadway[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [3] 滕永海, 张俊英. 老采空区地基稳定性评价[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 504 - 508. (TENG Yong-hai, ZHANG Jun-ying. Evaluation on stability of building foundation over goafs[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 504 - 508. (in Chinese))
- [4] 张俊英, 王金庄. 采空区地表新建建筑地基稳定性评价技术研究[J]. 矿山测量, 2003(3): 28 - 30. (ZHANG Jun-ying, WANG Jin-zhang. Research on evaluation technique for foundation stability of new building above goaf[J]. Mine Surveying, 2003(3): 28 - 30. (in Chinese))
- [5] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (GUO Guang-li. Deformation and control of building foundation on mine-out areas[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [6] 马金荣, 彭向峰, 丁陈建. 煤矿采空区场地建筑适宜性工程地质研究方法[J]. 煤田地质与勘探, 1996(6): 44 - 46. (MA Jing-rong, PEN Xiang-feng, DING Chen-jian. Engineering geology method of the stability of surface building above mine goaf [J]. Coal Geology & Exploration, 1996(6): 44 - 46. (in Chinese))
- [7] 隋旺华. 开采沉降土体变形工程地质研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999. (SUI Wang-hua. Engineering geological study on soil deformation during mining subsidence[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [8] 郭惟嘉, 王勇义. 采空区上方修建大型建筑物地基稳定性评价[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 57 - 59. (GUO Wei-jia, WANG Yong-yi. Stability evaluation of constructing large-scale building-toft above mine goaf[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S): 57 - 59. (in Chinese))
- [9] 戴兰芳, 苏胜昔, 李文秀. 采空区地表建筑物基础稳定性的 Fuzzy 的测度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1791 - 1794. (DAI Lan-fang, SU Sheng-xi, LI Wen-xiu. Fuzzy measures analysis of stability of building foundation on mine-out areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1791 - 1794. (in Chinese))
- [10] 颜荣贵. 地基开采沉降及其地表建筑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. (YAN Rong-gui. Mining subsidence of foundation and surface building[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995. (in Chinese))
- [11] AMBROZIC T, TURK G. Prediction of subsidence due to underground mining by artificial neural networks[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29: 627 - 637.
- [12] DONNELLY LJ, DE LA CRUZ H, ASMAR I, et al. The monitoring and prediction of mining subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia[J]. Engineering Geology, 2001, 59: 103 - 114.
- [13] 华南工学院, 等. 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 63 - 80. (South China University of Technology, et al. Ground base and foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981: 63 - 80. (in Chinese))
- [14] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 2002. (GB50007 — 2002 Code for design of building foundation[S]. 2002. (in Chinese))
- [15] 张俊英. 地表新增荷载对采空区上方覆岩的影响规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 166 - 170. (ZHANG Jun-ying. The laws of overlying strata influenced by newly increased loads on the surface above work-out areas[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 166 - 170. (in Chinese))