

# 厚松散层内部微变形规律研究

许延春 刘世奇 高玉兵 张旗

(中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院 北京 100083)

**摘要:**为得到厚松散层内部微变形规律,对姚桥煤矿7267工作面采动条件下厚松散层内部变形情况进行探测,分析该工程现象发生的机理。结果表明:厚松散层地层水平方向最大位移为3.65 mm,分层间存在振荡错动;垂直方向上整体表现为压缩状态,最大压缩量为18.67 mm,其中下部含水层疏水压缩,隔水层过水膨胀,整体变形对地表下沉影响较小。应力重新分布和介质随机排列造成层间错动,含水层压缩主要是采动后地层疏水,有效应力增加所致,隔水层膨胀主要是黏土层过水发生水化膨胀的结果。

**关键词:**厚松散层;微变形;水平错动;疏水压缩;过水膨胀

**中图分类号:**TD232      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2014)10-0010-04

## Research on Tiny Deformation Law in Thickness Alluvium

XU Yan-chun, LIU Shi-qi, GAO Yu-bing, ZHANG Qi

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

**Abstract:** In order to obtain tiny deformation law in thickness alluvium, this paper analyzed the deformation in thickness alluvium under the condition of mining in No. 7267 coal mining face of Yaoqiao Coal Mine and analyzed the mechanism for the engineering phenomenon. The results showed that the deformation in thickness alluvium had random varying characteristic and topped out at 3.65 mm in the horizontal direction; the deformation in thickness alluvium was in a compressed state as a whole and topped out at 18.67 mm in the vertical direction, the bottom aquifer hydrophobic compression and aquiclude water-swelling less affected on the ground depression. The stress redistribution and random medium rearrangement caused horizontal movement of layers. The compression of aquifer was mainly caused by hydrophobicity in strata, which made the effective stress increased and the expansion of aquiclude was mainly caused by hydrating swelling of clay layers.

**Key words:** thickness alluvium; tiny deformation; horizontal movement; hydrophobic compression; hydrating swelling

## 0 引言

不经采空区充填处理的煤层被采出后,势必会引起覆岩的移动变形。研究和掌握覆岩移动变形规律对采场和巷道支护、瓦斯抽采与控制、顶板水防控及地表构筑物保护等方面具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。国内外研究学者经过长期研究总结了“横三区、竖三带”的宏观认识,“横三区”能够解释工作面前后支承压力分布变化,指导采场附近支护方式选择;“竖三带”的判断不仅可以掌握瓦斯运移规律,对含水层下采煤顶板突水预防(控制)也具有现实意义。

我国东北、华北、华中以及华东地区为深厚松散层覆盖沉积矿层基地之上的地层结构,厚松散层可以简单地被看作砂、黏土互层的多层结构。砂土层饱含水,但遇贯通裂隙就会疏水压缩;黏土层一般为隔水层,但采动裂隙过水也会软化膨胀。以往的研究成果适用于具有承载强度的岩层结构,具有一定的基岩厚度,简单地把厚松散层看作均匀载荷,如钱鸣高院士提出的砌体梁假说<sup>[6]</sup>和关键层理论<sup>[7]</sup>。在浅部露头区开采时,由于不存在起支撑作用的关键层,甚至没有坚硬基本顶形成砌体梁结构,以上理论研究便不再适用。对于厚松散层,国内外学者更偏向

收稿日期:2014-06-20;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.10.003

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227903)

作者简介:许延春(1963—),男,河北乐亭人,博士生导师,研究员。E-mail:yanchun-xu@163.com

引用格式:许延春,刘世奇,高玉兵等.厚松散层内部微变形规律研究[J].煤炭科学技术,2014,42(10):10-13,23.

XU Yan-chun, LIU Shi-qi, GAO Yu-bing, et al. Research on Tiny Deformation Law in Thickness Alluvium [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 10-13, 23.

于运用随机介质原理来解释和计算地层沉降问题, 我国《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》<sup>[8]</sup>中明确规定利用概率积分法对地表移动变形进行预计。学者们普遍认为厚松散层内部移动变形与地表移动变形相似, 加之地表移动变形观测的便利, 大部分学者利用地表移动变形规律来说明厚松散层乃至整个覆岩移动变形规律<sup>[9~11]</sup>, 这其实忽略了厚松散层自身内部的微变形。笔者经多年研究发现, 采动影响下厚松散层内部存在水平和垂直方向的微变形。我国在20世纪末期, 以煤炭科学研究院为首的科研单位引进国外SINCO公司的测斜仪和伸长仪对我国多个矿井进行了岩体内部移动变形测定<sup>[12~14]</sup>, 但由于设备的限制和研究成果的实效性低等原因, 没有对厚松散层内部移动变形规律探测研究的文献。基于此, 笔者对厚松散层内部微变形规律进行探测分析, 以期进一步对第四系隔水层受采动影响下的隔水性能指标进行评价。

## 1 工程背景

姚桥煤矿新东四采区正进行微山湖水体下采煤, 为了评价第四系阻隔地表湖水和第四系上部含水层的可能性, 现场组织施工了第四系内部移动变形观测孔, 钻孔地点确定为正在开采的7267工作面附近, 姚桥煤矿沉降孔地层划分见表1。7267工作面宽度150 m, 观测站附近钻孔煤层厚度3.47 m, 煤层倾角12°, 地面标高+35.45 m, 煤层底板标高-773 m。工作面平均采深804.98 m, 其中, 厚松散层平均厚度173 m, 基岩柱厚度631.98 m。该地点厚松散层与湖床结构类似, 但由于采深大导致第四系变形较小, 从而有利于对钻孔的维护(表1)。

表1 姚桥煤矿沉降孔地层划分

层位	1号钻孔		2号钻孔	
	埋深/m	段长/m	埋深/m	段长/m
一含	29.90	29.90	32.55	32.55
一隔	48.45	18.55	41.55	9.00
二含	63.55	15.10	60.20	18.65
二隔	82.56	19.01	82.90	22.70
三含	92.24	9.68	99.50	16.60
三隔	99.20	6.96	103.30	3.80
四含	108.35	9.15	108.30	5.00
四隔	113.88	5.53	116.10	7.80
五含	131.70	17.82	139.20	23.10
五隔	167.90	36.20	151.60	12.40
六含	173.30	5.40	157.10	5.50

在7267工作面共布置2个观测钻孔, 1号钻孔

距工作面开切眼754 m, 位于工作面中间位置, 钻孔深度200 m; 2号钻孔设计在7267工作面距运输巷120 m, 距开切眼750 m的位置, 钻孔深度200 m。同期在工作面地表布置了移动变形观测站, 工作面推过观测站107 d后, 测定7267工作面中部地表最大下沉量867.5 mm, 最大水平移动量260.25 mm。

## 2 厚松散层内部变形规律分析

### 2.1 水平方向变形规律

本次主要观测地层内部各测点在采动影响前后不同时间段内的运动结果, 观测孔内每隔0.5 m设置1个测点。选取3次观测数据进行分析, 2013年8月15日工作面推进距离钻孔186 m、10月24日工作面过孔226 m、11月9日工作面过孔310 m, 地层随深度变化水平移动曲线如图1所示。

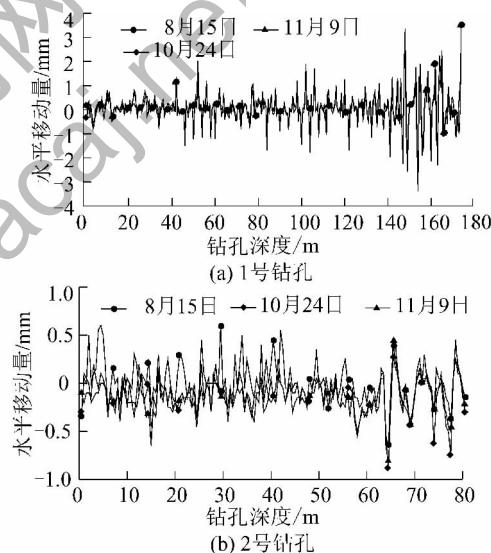


图1 地层随深度变化水平移动曲线

由于2号钻孔套管在81 m处脱节, 造成深部无法观测, 因此仅有80 m以内的数据。通过观察1号钻孔、2号钻孔水平方向移动趋势图可知以下规律。

1) 厚松散层内部存在少量水平移动。观测期间, 1号钻孔地层水平方向最大移动量为3.65 mm; 2号钻孔地层水平方向最大水平移动接近1 mm。地层中特定测点的水平移动量远小于整个厚松散层的水平移动量260.25 mm, 说明松散地层各分层并不是发生大的错动, 而整个厚松散层的变形是各分层变形的累加。

2) 埋深越大水平移动量越大。由图1a可知, 在工作面正上方处, 距地表0~40 m时, 水平各方向都有变化, 但变化不明显。在40~140 m(二含—五

含),地层水平波动变化幅度变大,在-2~2 mm 波动。随着距煤层距离的减小,出现较大的波动变形,整体趋势是埋深越大,距煤层越近,水平变形量越大,对比图 1b 可知具有相似的变化趋势。采动影响覆岩运动是一种类似波的传播过程,地层的不同岩性组合起到阻尼效果,而厚松散层是最好的“阻尼器”,因此厚松散层下部水平移动最为明显。

3) 工作面回采过钻孔后,工作面正上方地层水平移动变化量变化稳定,相邻 2 次观测变化较小。如 2013 年 10 月 24 日和 11 月 9 日的 2 次观测,水平变形量不仅具有相似的变化趋势,且差量变化也不大。2 次观测都是工作面过孔后非充分采动变形期间内,因此水平移动规律一致,符合以往的经验。

## 2.2 坚直方向变形规律

开挖后的地层整体下沉,下沉盆地中的厚松散层可以看做是完全塑性体或不完全离散体,但层状厚松散层在某一坚直剖面上会出现层间压缩或膨胀。这种地层的微变形是由地下水引起的,含水砂层疏水后压缩,黏土层过水后膨胀。在特定地层中埋设沉降环,通过观测环间距离变化就可以判断地层的变形情况。由于厚松散层较厚,选取一含、三含、四含、一隔、三隔、四隔作为典型地层进行分析。厚松散层各层厚度变化曲线如图 2 所示,变形量为正时表示膨胀量,变形量为负时表示压缩量。

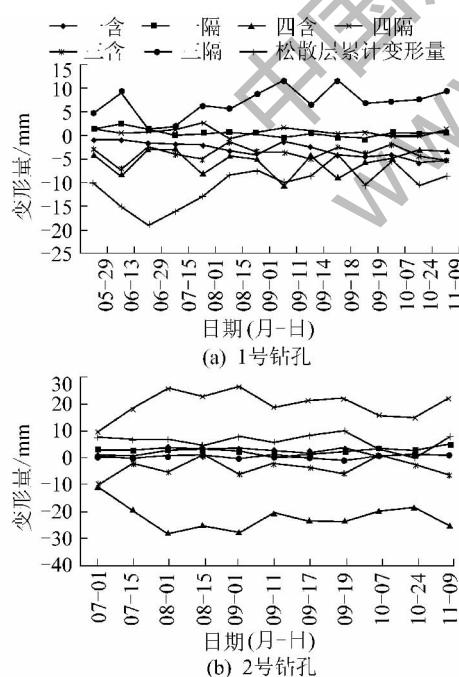


图 2 厚松散层各层厚度变化曲线

由图 2 可知:①厚松散层总体上为压缩状态,变

形量不大。据观测 1 号钻孔松散地层累计压缩量为 18.67 mm,仅占地表下沉量的 2.15%,对地表沉降贡献不大,但厚松散层内部微变形对黏土层隔水性影响巨大。考虑到该区域厚松散层结构总体呈现“砂厚黏薄”的地质基础,以及观测时间段内少雨多蒸发的气候条件,则是厚松散层变薄的条件。②地层厚度变化量上小下大。浅部地层除一含主要受大气降水影响变形较大外,其他地层厚度几乎不变。而三含、四含均为压缩变形,三隔、四隔主要表现为膨胀变形,且数值相对较大,如 1 号钻孔三隔膨胀量最大达 12 mm。

## 3 厚松散层内部变形机理分析

在厚松散层开采条件下,受采动影响,采场周围岩体、厚松散层中初始应力平衡状态遭到破坏,应力将重新分布,出现拉应力、压应力集中和压应力降低等应力传递现象。这种影响不仅涉及采场附近的岩体,而且还将波及厚松散层直至地表。1 号钻孔位于工作面上方,即下沉盆地中间部位,整体主要受压应力作用,钻孔内部地层出现下沉变形,基岩体移动由地下开采空间按向上沉陷递减规律传播,浅部受采动影响较小,深部地层变形受采动影响较大。2 号钻孔位于工作面附近,厚松散层地层主要受拉应力影响,当拉应力大于岩层极限强度时会产生细观裂隙,跟含水层中的水发生耦合作用,出现了整体细微膨胀的效果,但这种影响很小。

### 3.1 厚松散层水平位移分析

据以往经验可知,采空区形成后,垮落带内岩块重新排列,而上部覆岩集中下沉,在水平方向上,岩层向着采空区中部移动。通过厚松散层内部微变形探测,发现在岩层向着采空区整体移动的大趋势下,各岩层运动轨迹是振荡的,如图 3 所示。分析其原因,主要是由地层内部横向附加应力的重新分布和介质的随机排列造成的。在沉积地层中各分层间水平摩擦力远小于层内黏聚力,当下层牵扯力大于摩擦力时,上下分层便产生错动,当上下分层受到不同

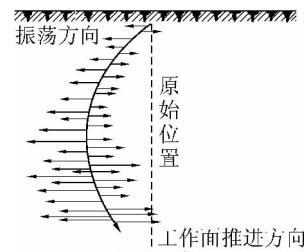


图 3 地层内部水平振荡示意

方向牵扯力时,便产生反方向错动。试验观测发现,这种上下层反方向错动是十分普遍的。

### 3.2 含水层压缩分析

第四系含水层主要成分为砂岩和水,是由固相砂颗粒和液相孔隙水组成的两相介质。含水层中的应力由固相颗粒和液相水共同分担。在采动影响下,含水层中会滋生采动裂隙,采动裂隙具有疏水作用,同时与含水层接触的面容易出现结构弱面,结构弱面处容易发生离层,含水层中的水会顺着采动裂隙向离层处聚集,从而造成含水层中的水分减少,导致厚度的减小。另一方面,当含水层中的水被疏走后,液相水分担的应力也会减小,引起孔压变化。从而导致固相颗粒承担更大的应力,即有效应力增加,导致岩石固结压密,宏观上表现为含水层压缩变形,疏水导致地层压缩造成井筒破裂已经在我国东部矿井屡见不鲜。假设固相砂颗粒和液相孔隙水都具有不可压缩性。则含水层的沉降主要是由于有效应力的增加导致孔隙的减小,疏水后固相颗粒的疏水沉降如图4所示。

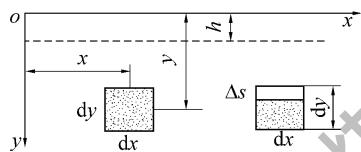


图4 疏水后固相颗粒的疏水沉降示意

在含水层中取一边长为 $dx$ 、 $dy$ 的微小单元体,根据有效应力原理<sup>[15]</sup>,当 $y$ 以上的水全部疏干后,固相颗粒增加的应力为

$$\Delta p = (y - h) \gamma \quad (1)$$

其中: $y$ 为地面至微小单元体的距离,m; $h$ 为地表至水面的高度,m; $\gamma$ 为孔隙水的容重,kN/m<sup>3</sup>。以1号钻孔五含为例,当三隔以下含水层疏水后,水头下降高度为32.5 m(四含、四隔和五含厚度和),取 $\gamma$ 为10 kN/m<sup>3</sup>,计算得 $\Delta p = 325$  kPa,这个力对松散砂层的作用非常明显。据文献[15]还可计算微小单元体的在应力增量 $\Delta p$ 的作用下压缩量 $\Delta s$ 为

$$\Delta s = \Delta p a_v (y - h) \gamma dy / (1 + e) \quad (2)$$

式中: $a_v$ 为固相颗粒的压密系数; $e$ 为固相颗粒的初始孔隙比。

### 3.3 隔水层膨胀分析

煤层开采后,顶部导水裂隙带或弯曲下沉带内均会产生或多或少的采动裂隙,含水层中的自由水会顺着裂隙渗透至隔水层裂隙中,这不但会增加隔水层中水的含量,而且会增加隔水层裂隙与水的接

触面积。第四系隔水层的主要成分为黏土。黏土中含有大量蒙脱石,其晶胞两面都是羟基层,层间联结是较弱的分子间力,水分子易沿着硅氧层面进入晶层间,使层间距离增大,引起黏土的体积膨胀。当黏土与水接触较近时,会发生表面水化,同时黏土晶体表面直接吸附水分子和通过所吸附的可交换性阳离子间接吸附水分子,导致黏土层水化膨胀。当黏土层面间的距离继续增大时,面吸附能量已经不是主要的了,此后黏土的继续膨胀是由渗透压力和双电层斥力所引起的。蒙脱石膨胀体积应变可表示为<sup>[16]</sup>

$$\varepsilon = (V_1 + V_2) / V_m = \omega \rho_m / (C_m \rho) \quad (3)$$

其中: $V_1$ 为吸水前裂隙内空气的体积; $V_2$ 为吸水后总体积膨胀增加的体积; $V_m$ 为蒙脱石的体积; $\omega$ 为隔水层含水量; $\rho_m$ 为蒙脱石密度; $C_m$ 为蒙脱石含量; $\rho$ 为水的密度。由式(3)可知,蒙脱石膨胀体积应变与黏土层中的含水量成正比。当黏土层中的裂隙发育时,会形成储水空间或导水通道,从而增加了自由水的含量,在裂隙接触面会发生更多的水化膨胀作用,宏观上表现为隔水层的膨胀变形。

## 4 结论

1) 受采动影响,第四系厚松散层内部各层普遍存在少量水平移动。水平移动方向随机,且移动量随距开采煤层距离的减小而增大。

2) 受采动影响,厚松散层内部含水层整体表现为压缩变形,隔水层整体表现为膨胀变形。距开采煤层越近,含、隔水层自身压缩、膨胀量变化越明显。厚松散层的自身变形对地表下沉量贡献甚微。

3) 地层横向附加应力重新分布和介质随机排列造成厚松散层内部层间随机错动;采动裂隙导致含水层疏水降压引起有效应力增大是含水砂层压缩的主要原因;黏土中的蒙脱石水化膨胀作用是隔水层遇水后膨胀的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 彭苏萍,凌标灿,郑高升,等.采场弯曲下沉带内部巷道变形与岩层移动规律研究[J].煤炭学报,2002,27(1):21~25.
- [2] 翟成.近距离煤层群采动裂隙场与瓦斯流动场耦合规律及防治技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [3] 许家林,朱卫兵,王晓振.基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J].煤炭学报,2012,37(5):762~769.
- [4] 许延春,刘世奇.水体下综放开采的安全煤岩柱留设方法研究[J].煤炭科学技术,2011,39(11):1~4.
- [5] 刘维岩.新建矿井厚黄土层条件下覆岩动态破坏规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.

(下转第23页)

药方式,爆破22煤层顶板、集中煤柱、22煤层底板方式。②未探测到集中煤柱范围内爆破设计。钻孔角度设计为垂直工作面向前方仰角30°,孔长68m(其中装药长度为20m,封孔长度为48m),孔垂深34m。采用完全耦合装药方式,爆破22煤层底板。

2)爆破施工工艺及效果评价。集中煤柱爆破所用的炸药为乳胶基质与敏化剂混合,利用BCJ-5M型装药机进行装药;采用BQF-100型封孔器进行封孔,封孔材料为黄土。爆破后约30h,根据地表岩移、裂缝观测结果可知,超前工作面65m范围内22煤层顶板已经断裂、下沉,其中集中煤柱位置地表下沉约0.90m,超前工作面65m处地表下沉约0.35m。爆破治理后过隔离煤柱期间,矿压显现程度较小,说明集中煤柱经预裂爆破处理后,已发生破坏并引发周围部分小煤柱破坏,基本达到预计的爆破预裂效果。

## 4 结 论

1)对31201工作面3次进、出22煤层集中煤柱时出现动载矿压的原因进行了分析,认为工作面31煤层、22煤层双顶板的同步运动才是动载矿压形成的主要原因。

2)通过对微震事件数量和、总能量及位置的多次监测预报,总结得出31煤层周期来压及22煤层动载矿压能量极大值的判定指标,即31煤层周期来压的预警指标为微震事件数量达15个以上,总能量为 $4.2 \times 10^5$ J;22煤层动载矿压的预警指标为微震事件数量达31个以上,总能量为 $8.0 \times 10^5$ J。

3)在31201工作面采取打钻爆破上覆22煤层集中煤柱后,超前工作面65m范围内22煤层顶板已经断裂、下沉,解决了上覆集中煤柱导致工作面应力集中的问题。

4)通过综合运用矿压监测、微震监测、工作面超前预裂爆破等技术手段,石圪台煤矿总结出了一套适合31煤层的动载矿压预测预报及治理技术,对神东矿区相似条件的工作面动载矿压防治工作提供了一定的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 杨光玉,贺兴元.局部煤柱下安全采煤技术[J].煤炭科学技术,2001,29(10):16-19.
  - [2] 张来仁.ZF-4600型支架网下放煤过上分层煤柱开采实践[J].煤炭科学技术,2005,33(6):15-17.
  - [3] 吕梦蛟.神东矿区长壁采场矿压显现规律与支架选型[J].煤炭科学技术,2010,38(11):48-52.
  - [4] 许红杰,邢国富,徐天发.酸刺沟煤矿综放工作面矿压显现异常及控制技术[J].煤炭科学技术,2012,40(7):21-23.
  - [5] 李宏斌,宋选民,刘兵晨.厚松散层覆岩下大采高综采工作面矿压规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(5):55-57.
  - [6] 蓝航.浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J].煤炭科学技术,2014,42(1):9-13.
  - [7] 高登云,高登彦.大柳塔煤矿薄基岩浅埋煤层工作面矿压规律研究[J].煤炭科学技术,2011,39(12):20-22.
  - [8] 朱卫兵.浅埋近距离煤层重复采动关键层结构失稳机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2010:3-11.
  - [9] 王晓振,许家林,朱卫兵,等.走向煤柱对近距离煤层大采高综采面矿压影响[J].煤炭科学技术,2009,37(2):17-21.
  - [10] 鞠金峰,许家林,朱卫兵,等.大柳塔煤矿22103综采面压架机理及防治技术[J].煤炭科学技术,2012,40(2):4-7.
  - [11] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J].煤炭学报,2012,37(2):179-185.
  - [12] 鞠金峰,许家林.倾向煤柱边界超前失稳对工作面出煤柱动载矿压的影响[J].煤炭学报,2012,37(7):1081-1087.
  - [13] 李福胜,张勇,许力峰.基载比对薄基岩厚表土煤层工作面矿压的影响[J].煤炭学报,2013,38(10):1749-1755.
  - [14] 陈苏社.综采工作面上层煤集中煤柱动载矿压控制技术[J].煤炭科学技术,2014,42(6):140-143.
  - [15] 鞠金峰,许家林,朱卫兵,等.近距离煤层工作面出倾向煤柱动载矿压机理研究[J].煤炭学报,2010,35(1):15-20.
  - [16] 鞠金峰,许家林,朱卫兵,等.近距离煤层采场过上覆T形煤柱矿压显现规律[J].煤炭科学技术,2010,38(10):5-8.
- 
- (上接第13页)
- [6] 钱鸣高,缪协兴,黎良杰.采场底板岩层破断规律的理论研究[J].岩土工程学报,1995,17(6):55-62.
  - [7] 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.
  - [8] 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[S].北京:煤炭工业出版社,2000.
  - [9] 刘义新,戴华阳,姜耀东,等.厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(5):117-120.
  - [10] 李德海,许国胜,余华中.厚松散层煤层开采地表动态移动变形特征研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):103-106.
  - [11] 杜锋,白海波.厚松散层薄基岩综放开采覆岩破断机理研究[J].煤炭学报,2012,37(7):1105-1110.
  - [12] 仲惟林.岩体内部的移动变形特点[J].煤炭科学技术,1992,30(2):11-15.
  - [13] 吴侃,周鸣.测定岩体内部移动变形的新型测量系统[J].江苏煤炭,1992(1):25-28.
  - [14] 李发业.对岩体内部移动变形观测手段的比较与认识[J].矿山测量,1994(1):37-39.
  - [15] 刘宝琛,阳军生,张家生.露天开挖及疏水引起的地面沉降及变形[J].煤炭学报,1999,24(1):39-42.
  - [16] 何俊.膨润土水化膨胀行为简化计算[J].河海大学学报,2006,34(3):299-301.