

# 覆岩主关键层运动对地表沉陷影响的 钻孔原位测试研究

朱卫兵<sup>1,2</sup>, 许家林<sup>1,2</sup>, 施喜书<sup>1,2</sup>, 王晓振<sup>1,2</sup>, 刘文涛<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 通过神东矿区补连塔煤矿 31401 工作面内部岩移的地面钻孔原位观测与地表沉陷观测的对比研究, 就覆岩主关键层运动对地表沉陷的影响进行实测研究。研究表明: 厚 47.01 m 的粉砂岩主关键层控制了上覆基岩直至地表的移动变形, 上覆岩层的运动随主关键层破断出现周期性跳跃变化; 受主关键层的控制作用, 地表沉陷测站观测时间间隔长短显著影响了测点的下沉速度曲线, 观测时间间隔越短, 其对应的下沉速度曲线呈现的周期跳跃性变化越强; 观测时间间隔越长, 其对应的下沉速度曲线更为均化。因此, 在浅埋煤层开采中, 为了准确反映地表下沉的动态过程, 应该缩短观测时间间隔, 才能正确掌握采动覆岩内部移动与地表沉陷的内在联系, 推动开采沉陷预计的发展。

**关键词:** 采矿工程; 关键层; 岩层移动; 地表沉陷; 浅埋煤层; 绿色开采

**中图分类号:** TD 163

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)02 - 0403 - 07

## RESEARCH ON INFLUENCE OF OVERBURDEN PRIMARY KEY STRATUM MOVEMENT ON SURFACE SUBSIDENCE WITH IN-SITU DRILLING TEST

ZHU Weibing<sup>1,2</sup>, XU Jialin<sup>1,2</sup>, SHI Xishu<sup>1,2</sup>, WANG Xiaozhen<sup>1,2</sup>, LIU Wentao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Mine Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Based on the contrastive analysis between the in-situ test on interior rock movement and surface subsidence observation at working face No.31401 of Bulianta coal mine in Shendong mining area, the influences of overburden primary key stratum on surface subsidence are researched. The results indicate that the movement and deformation of overburden strata and surface are controlled by the primary key stratum, which is siltstone with the thickness of 47.01 m; and the movement of overburden strata changes periodically with the breakage of primary key stratum. Controlled by the primary key stratum, the subsidence velocity curves of the measuring points are influenced markedly by the measuring interval. The shorter the measuring interval is, the more obvious the periodical jumping change phenomenon of corresponding subsidence velocity curve is. Otherwise, the subsidence velocity curve is more even. Therefore, the measuring interval should be shortened in order to reflect the dynamic process of surface subsidence exactly in shallow coal seam mining; and then the inherent relationship between interior rock movement and surface subsidence can be realized correctly, which can promote the development of surface subsidence prediction.

**收稿日期:** 2008 - 10 - 24; **修回日期:** 2009 - 01 - 11

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 教育部博士点基金资助项目(20070290513); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET - 05 - 0478); 中国矿业大学科技基金资助项目(2006A001)

**作者简介:** 朱卫兵(1978 -), 男, 2001年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事岩层移动与绿色开采方面的教学与研究工作。E-mail: zweibing@163.com

**Key words:** mining engineering; key stratum; rock strata movement; surface subsidence; shallow coal seam; green mining

### 1 引言

岩层控制的关键层理论<sup>[1~20]</sup>自提出以来,已取得长足的发展,实现了矿山压力、岩层移动与地表沉陷、采动煤岩体中水与瓦斯流动研究的有机统一,为煤矿绿色开采技术研究提供新的理论平台。当前,关键层理论已在煤炭行业多个研究领域得到较好的推广应用<sup>[5~9, 16~20]</sup>,并取得了良好的经济效益。煤矿开采引起的地表沉陷与采动覆岩内部移动和破坏过程密切相关,地表沉陷特征是工作面推进过程中岩层移动由下往上传递到地表的最终反映,研究人员<sup>[3, 4, 10, 21, 22]</sup>从不同的角度揭示了地表动态下沉规律,推动了开采沉陷预计的发展。关键层理论通过物理与数值模拟研究结果表明:覆岩主关键层对地表移动的动态过程起控制作用,主关键层的破断将导致上覆所有岩层的同步破断与地表快速下沉,引起地表下沉速度和地表下沉影响边界的明显增大和周期性变化<sup>[3, 4]</sup>。许家林等<sup>[3]</sup>虽然采用了20世纪60年代阳泉一矿岩体内部移动与地表下沉的对比实测资料,但是其观测时间间隔过长,未能捕捉到地表的<sup>最大下沉速度,同时也未能反映地表下沉速度随主关键层周期性破断的变化特征。</sup>

为了检验覆岩主关键层对上覆岩层的控制作用,揭示煤矿采动覆岩移动变形规律,本文首次通过神东矿区补连塔煤矿31401工作面内部岩移钻孔的原位观测,结合地表沉陷观测结果,对比分析研究覆岩主关键层运动对地表沉陷的影响。

### 2 实验工作面条件

补连塔煤矿四盘区南北走向长5.0 km,东西倾向长5.6 km,面积28 km<sup>2</sup>。1<sup>-2</sup>煤为四盘区首采煤层,埋藏深度180~260 m,地表风积沙松散层厚度为5~25 m,基岩厚度为120~190 m,在基岩上部存在厚度不等的砂砾含水层,厚度为30~120 m,单位涌水量为(1.47~32.90)×10<sup>-3</sup> L/(m·s),渗透系数为(2.91~31.4)×10<sup>-3</sup> m/d。勘探结果表明,四盘区内的1<sup>-2</sup>煤赋存稳定、地质构造简单。

31401工作面为四盘区1<sup>-2</sup>煤首采面,工作面倾斜长265.25 m,走向长4 629 m,煤层平均厚度4.6 m,实际采高4.2 m,采用走向长壁综合机械化

采煤,全部垮落法处理采空区顶板。工作面采用JOY公司生产的双柱掩护式液压支架,支架的额定工作阻力为8 670 kN。

为了掌握浅埋煤层采动覆岩运动规律,设计的观测钻孔S18内部岩移钻孔置于31401工作面中部(见图1),在工作面尚未采至内部岩移钻孔位置之前将此钻孔打出,要求施工至1<sup>-2</sup>煤层位置时终孔,深度约为256 m。钻进过程中对基岩段进行全孔取芯,做好岩芯的鉴定描述,对提取上来的每一种岩性均进行RQD值描述,而且一并保留用来进行岩石物理力学参数测试,表1列出了观测钻孔S18内各种砂岩岩样的物理力学参数测试结果。

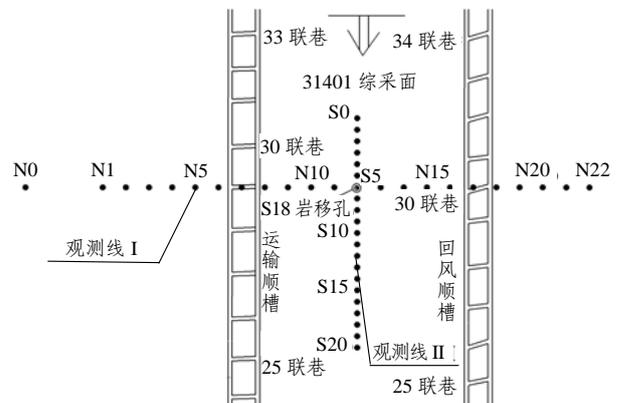


图1 内部岩移观测钻孔S18的平面位置

Fig.1 Plane positions of interior rock movement observation of observation borehole No.S18

表1 各种砂岩的物理力学参数测试结果(观测钻孔 S18)

Table 1 Test results of physico-mechanical parameters of rock in observation borehole No.S18

| 岩性  | 密度<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 抗压<br>强度<br>/MPa | 弹性<br>模量<br>/GPa | 泊松比  | 抗拉<br>强度<br>/MPa | 内摩擦<br>角/(°) | 黏聚力<br>/MPa |
|-----|-----------------------------|------------------|------------------|------|------------------|--------------|-------------|
| 中砂岩 | 2.35                        | 9.56             | 16.0             | 0.32 | 0.238            | 45.0         | 0.91        |
| 细砂岩 | 2.29                        | 7.17             | 15.6             | 0.35 | 0.247            | 43.2         | 0.84        |
| 粉砂岩 | 2.24                        | 9.36             | 16.1             | 0.30 | 0.591            | 47.3         | 2.15        |
| 粗砂岩 | 2.48                        | 20.11            | 15.1             | 0.29 | 0.869            | 51.3         | 4.78        |

根据内部岩移观测的观测钻孔 S18 柱状图可知:此处风积沙厚度为5.5 m,砂砾岩层的埋藏最深处为121.98 m,钻孔实际深度为256.14 m。采用关键层判别软件KSPB计算观测钻孔S18关键层位置<sup>[15]</sup>,判别结果见图2。观测钻孔S18关键层判别

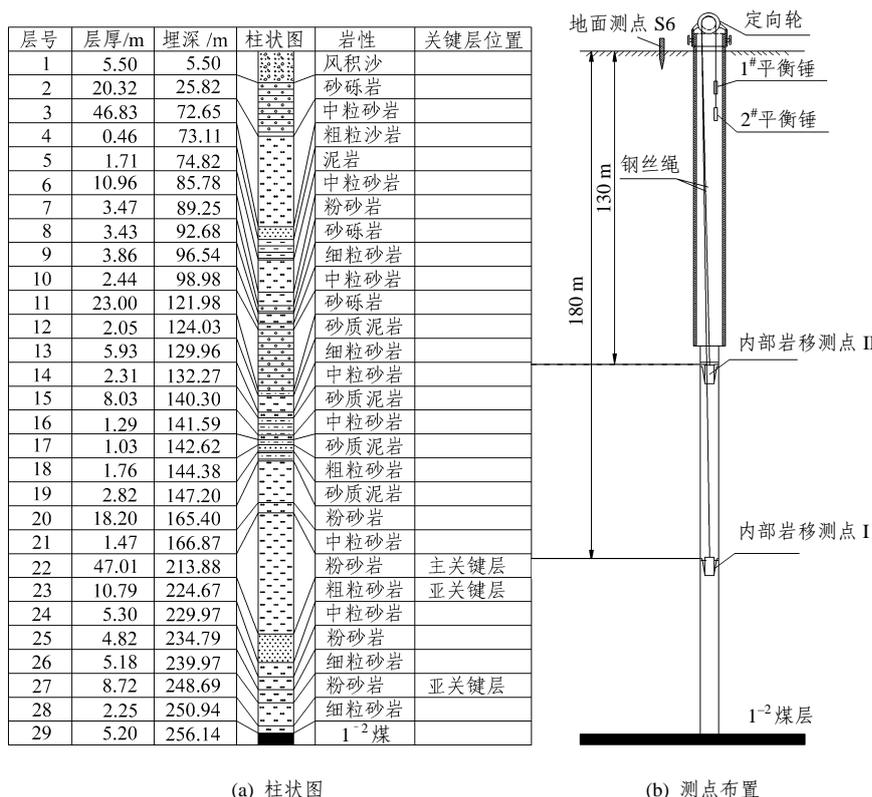


图 2 观测钻孔 S18 关键层判别位置及内部岩移测点布置

Fig.2 Key strata predicted position and measuring points in interior rock movement of borehole No.S18

结果表明：覆岩为多层关键层结构，共有 3 层关键层，与 1<sup>-2</sup>煤间距 37.06 m、厚 47.01 m 的粉砂岩为主关键层。

### 3 钻孔原位测试方案

根据主关键层位置的判别结果，在 47.01 m 的粉砂岩主关键层中以及上部基岩内各布置一个测点，以期了解覆岩内部岩体的相对运动。测点 I 安置在距地面 180 m 处，与 1<sup>-2</sup>煤间距 71 m；而测点 II 安置在距地面 130 m 处，位于主关键层上方，与 1<sup>-2</sup>煤间距 121 m；在观测钻孔 S18 孔口附近埋设了一个地面测点，监测孔口地面的沉降，如图 2 所示。

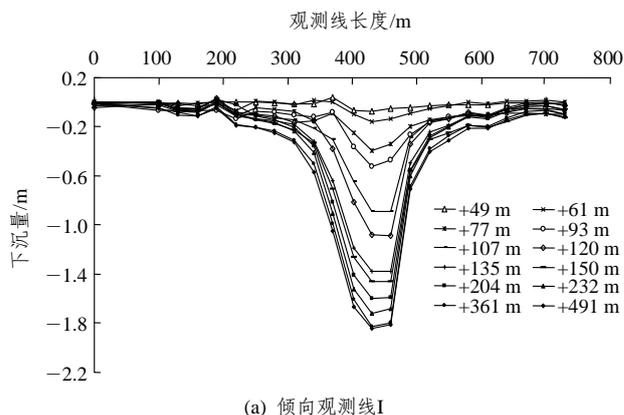
为了掌握采动过程中内部岩移钻孔孔口地面的沉降情况，在观测钻孔 S18 内部岩移钻孔附近，布置了 2 条地表沉陷观测线，见图 1。地面观测线 I 全长 730 m，布置了 23 个测点，测点编号由 N0~N22，其中测点 N12 位于观测钻孔 S18 附近，代表观测钻孔 S18 孔口地面的沉降。测线 I 中除了基点 N0 与测点 N1 之间的间距为 100 m 以外，其余各相邻测点间距均为 30 m。地面观测线 II 全长 300 m，布置了 21 个测点，测点编号为 S0~S20，其中孔口

测点 S6 与测点 N12 重合，观测线 II 中相邻测点间距均为 15 m。

## 4 钻孔原位测试结果分析

### 4.1 地表沉陷实测结果分析

从 2007 年 8 月 5 日~9 月 17 日，对 31401 工作面地表沉陷进行了系统观测，历时 44 d。在 8 月 5 日~9 月 1 日期间累计观测了 27 次，基本上达到每天观测一次的要求。采动期间地面观测线 I，II 的动态下沉曲线如图 3 所示(图中的数值表示 31401 工作面与倾向观测线之间的相对距离，下同)。



(a) 倾向观测线 I

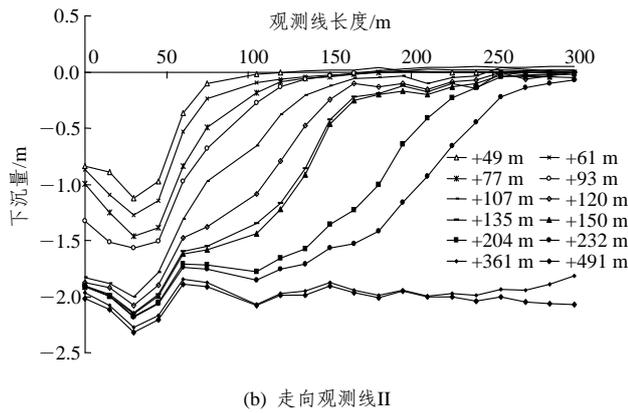


图3 地面观测线 I, II 的动态下沉曲线  
Fig.3 Dynamic subsidence curves of surface measuring lines I and II

由图3可知:补连塔煤矿四盘区31401工作面采后地面最大下沉量为2320mm,对应的区域工作面平均采高为4.2m,则初次采动时地表下沉系数为0.55;最大水平位移量294mm,对应的水平移动系数为0.127;其他地面各项移动变形最大值见表2。

表2 31401工作面采后地面移动变形最大值

Table 2 Maximum values of movement and deformation after mining of working face No.31401

| 采深/m    | 长度/m   | 采动充分程度系数                 | 采厚/m                     | 下沉量/mm                     | 下沉系数 |
|---------|--------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------|
| 256.14  | 265.25 | 1.04                     | 4.2                      | 2320                       | 0.55 |
| 水平位移/mm | 水平移动系数 | 倾斜/(mm·m <sup>-1</sup> ) | 曲率/(mm·m <sup>-2</sup> ) | 水平变形/(mm·m <sup>-1</sup> ) |      |
| 294     | 0.127  | -44.4                    | -1.738                   | -5.32                      |      |

### 4.2 钻孔原位测试结果分析

2007年8月8日,在31401工作面距观测钻孔S18尚有100m时开始进行内部岩移观测,一直持续到9月5日工作面推过距观测钻孔S18处290m时为止,历时29d,工作面平均日推进距为13.5m。每天观测12h,每隔30min记录一次数据,在8月17~22日覆岩运动活跃期间进行24h连续观测。

根据图3中31401工作面地表沉陷的实测结果,结合观测钻孔S18内测点的位移量,整理分析得出内部岩移孔内各测点下沉及下沉速度曲线,见图4。

由于距地面180m处的测点I位于厚47.01m的粉砂岩主关键层中,因此测点I的下沉过程代表了覆岩主关键层的运动特征,距地面130m处的测点II则代表了主关键层上方基岩层的运动特征,孔

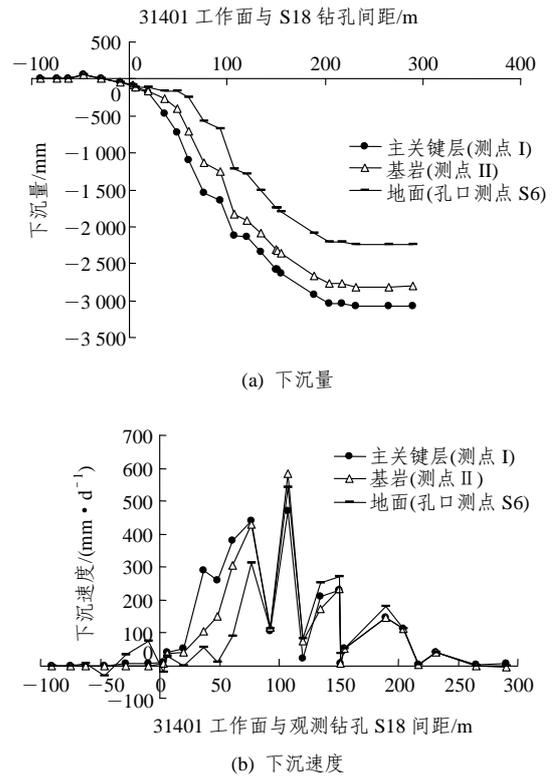


图4 观测钻孔S18内部岩移测点的下沉与下沉速度曲线  
Fig.4 Subsidence and velocity curves of measuring points in interior rock movement in observation borehole No.S18

口孔口测点S6的位移则代表了厚度达120m砂砾岩含水层组的动态沉降。由图4可知:覆岩主关键层在工作面采过钻孔19.65m时受到采动影响开始产生移动变形,当工作面采过钻孔36.6m时,覆岩主关键层的下沉速度由50mm/d增至287mm/d;当工作面采过钻孔76.75m时,覆岩主关键层的下沉量由1103mm迅速增至1554mm,下沉速度则由380mm/d上升为439mm/d;在此过程中基岩段内测点II的下沉量由711mm增至1138mm,下沉速度则由303mm/d增大至427mm/d,测点II的下沉过程与测点I趋于同步。当工作面推过钻孔76.75m时,孔口测点S6在2d内的地面下沉量由168mm增加至580mm,下沉速度则由8mm/d增大至323mm/d,与覆岩主关键层在同一时段达到第一次下沉速度最大值。之后,测点I,II及地面的下沉速度又同时趋于最小值,当工作面采过钻孔107m时,3个测点的下沉速度又同时达到最大值,此后,3个测点的下沉速度数值虽有差异,但对应的下沉速度曲线则出现完全一致的变化趋势。

上述内部岩移钻孔内3个测点下沉与下沉速度曲线形态相一致的结果表明:厚47.01m的粉砂岩

层完全控制了上覆基岩与砂砾岩含水层组的运动, 它是覆岩主关键层, 这与前面的关键层判别结果相一致。

### 5 地表沉陷观测时间间隔对地表下沉曲线特征的影响

传统的地面沉陷观测, 一般要求地面测站的观测时间间隔为 5~15 d, 甚至更长, 未能和采动覆岩关键层结构联系起来, 没有对地表沉陷观测时间间隔长短提出特殊的要求。传统的地表测点动态下沉速度变化与工作面相对位置关系如图 5 所示<sup>[23]</sup>。事实上, 不同的观测时间间隔虽然对地面最终下沉曲线形态分布影响较小, 但是对地表动态下沉速度曲线形态影响较大, 对于浅埋煤层和主关键层较厚而表土层又较薄的开采条件, 观测时间间隔越长, 很可能均化下沉速度曲线, 漏掉地表最大下沉速度。

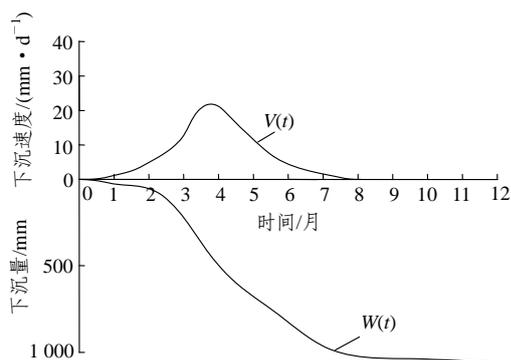
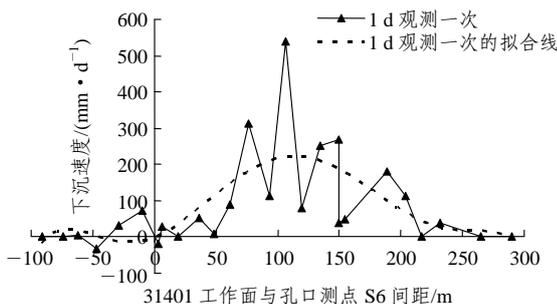


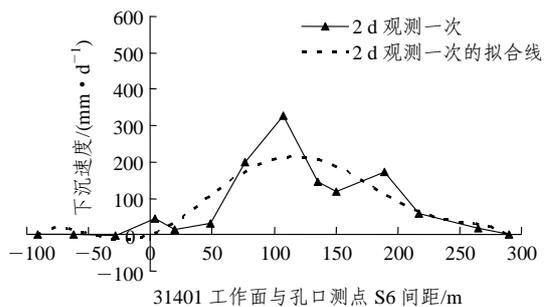
图 5 传统的地表测点下沉速度变化曲线<sup>[23]</sup>

Fig.5 Subsidence velocity variation curves of traditional surface measuring points<sup>[23]</sup>

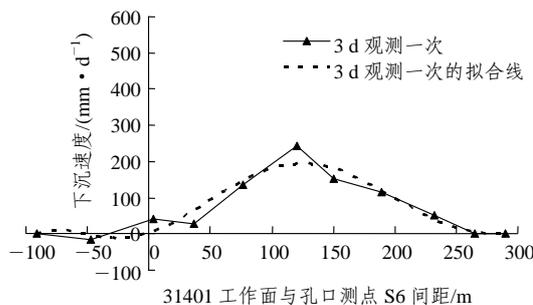
补连塔煤矿 31401 工作面从 8 月 5 日~9 月 1 日期间每天都进行地表沉陷观测, 采用不同的观测时间间隔对走向观测线与倾向观测线的孔口测点 S6 的下沉速度曲线进行对比分析, 如图 6 所示。由



(a) 1 d 观测一次



(b) 2 d 观测一次



(c) 3 d 观测一次

图 6 不同观测时间间隔对应的地表下沉速度曲线

Fig.6 Subsidence velocity curves corresponding with different observation periods

图 6 可知: 地面测站观测时间间隔长短对测点的下沉速度曲线形态有较大影响。观测时间间隔越短, 其对应的下沉速度曲线呈现的周期跳跃性变化越强; 观测时间间隔越长, 其对应的下沉速度曲线更为均化, 与其拟合线越趋于一致。如地面观测时间间隔为 1 d 时, 监测到的地面最大下沉速度为 540 mm/d; 当地面观测时间间隔为 2 d 时, 最大下沉速度则为 326 mm/d; 当地面观测时间间隔为 3 d 时, 最大下沉速度仅为 242 mm/d。显然, 地面观测时间间隔过长时会均化地表下沉速度曲线, 即将主关键层破断瞬间出现的地面急剧下沉均化到整个周期破断过程中, 没有捕捉到地表的极大下沉速度。

地面观测时间间隔短时对应的下沉速度曲线之所以跳跃性变化大, 和覆岩内部岩体的运动密切相关。根据矿压规律的实测结果分析得出覆岩主关键层的周期破断距为 35~60 m。由于该工作面观测期间日推进距普遍为 12~20 m, 显然, 如果观测时间间隔超过一天以上, 就很难捕捉到每一次主关键层周期破断时对应于地表的急剧下沉, 而在主关键层两次周期破断期间, 地面的下沉速度又较小, 只有在观测时间间隔短时才能准确地捕捉到主关键层破断时对应于地表的极大下沉速度, 因此, 需要进一步缩短观测时间间隔。

根据许家林等<sup>[3]</sup>中的物理模拟实验, 得出采动期间距切眼 105 m 处地面测点的下沉速度曲线(见图 7(a)), 如果在原始的沉陷观测数据中按次数间隔提取, 即观测时间间隔变长, 此时该测点对应的下沉速度曲线如图 7(b)所示。由图 7 可知, 地表沉陷观测时间间隔加长后, 物理模拟监测到的地面最大下沉速度由 71.4 mm/m 减小到 34.6 mm/m, 下沉速度曲线趋于均化, 与其拟合线越趋于一致, 这与上述实测结果相一致。

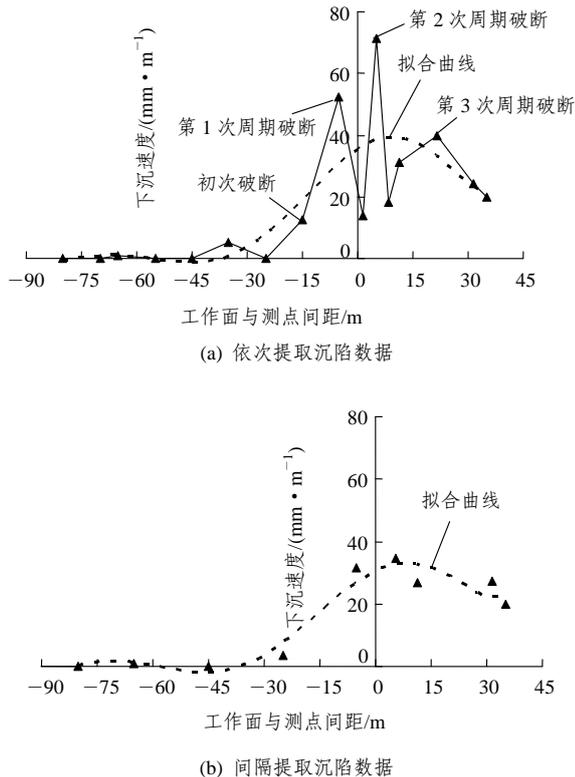


图 7 物理模拟不同观测时间间隔对应的地表下沉速度曲线  
Fig.7 Subsidence velocity curves corresponding to different observation periods with physical simulation

## 6 结 论

(1) 首次运用煤矿现场采动覆岩内部岩移钻孔的原位测试结果, 验证主关键层对上覆岩层运动的控制作用。结果表明: 厚 47.01 m 粉砂岩主关键层完全控制了上覆基岩与砂砾岩层的运动, 基岩与砂砾岩层的运动随着主关键层的破断出现相应的周期性变化。

(2) 现场实测结果表明: 地面测站观测时间间隔长短对地表下沉速度曲线形态有显著影响。传统观测方法中 2 次观测时间间隔过长, 会均化下沉速度, 往往捕捉不到主关键层周期破断对地表下沉

态的影响, 也捕捉不到地表最大下沉速度, 只有观测时间间隔短时才能捕捉到下沉速度的周期跳跃性变化。因此, 对于浅埋煤层和主关键层较厚而表土层较薄的开采条件, 为了准确掌握地表下沉动态过程 and 最大下沉速度值, 当工作面临近和通过地面观测点期间, 应该尽量缩短观测时间间隔, 原则上每天进行一次地表沉陷观测; 当工作面距地面观测点较远时, 则可以放宽观测时间间隔。

## 参考文献(References):

- [1] 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 key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225 - 230.(in Chinese))
- [2] 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 25 - 29.(MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Advance in the key strata theory of mining rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(1): 25 - 29.(in Chinese))
- [3] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 787 - 791.(XU Jialin, QIAN Minggao, ZHU Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 787 - 791.(in Chinese))
- [4] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122 - 126.(XU Jialin, QIAN Minggao. Study on influence of key strata movement on subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 122 - 126.(in Chinese))
- [5] 朱卫兵, 许家林, 赖文奇, 等. 覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 458 - 462.(ZHU Weibing, XU Jialin, LAI Wenqi, et al. Research on isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 458 - 462.(in Chinese))
- [6] 许家林, 陈稼轩, 蒋 坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 699 - 704.(XU Jialin, CHEN Jiakuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 699 - 704.(in Chinese))
- [7] 屈庆栋, 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对邻近层瓦斯涌出影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 478 - 1 484.(QU Qingdong, XU Jialin, QIAN Minggao. Study on influences of key strata movement on gas emissions of adjacent layers[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 478 - 1 484.(in Chinese)
- [8] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 岩层移动离层演化规律及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 632 - 636.(XU Jialin, QIAN Minggao, JIN Hongwei. Application study on bed separation distribution and development in the process of strata movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 632 - 636.(in Chinese))
- [9] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 基于岩层移动的“煤与煤层气共采”技术研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 129 - 132.(XU Jialin, QIAN Minggao, JIN Hongwei. Study on “coal and coal-bed methane simultaneous extraction” technique on the basis of strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 129 - 132.(in Chinese))
- [10] 许家林, 连国明, 朱卫兵, 等. 深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 686 - 690.(XU Jialin, LIAN Guoming, ZHU Weibing, et al. Influence of key strata on mining subsidence in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 686 - 690.(in Chinese))
- [11] 缪协兴, 茅献彪, 孙振武, 等. 采场覆岩中复合关键层的形成条件与判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 547 - 550.(MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, SUN Zhenwu, et al. Formation conditions of compound key strata in mining overlayer strata and its distrimination[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(5): 547 - 550.(in Chinese))
- [12] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1 289 - 1 295.(MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1 289 - 1 295.(in Chinese))
- [13] 浦海, 缪协兴. 采动覆岩中关键层运动对围岩支承压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 366 - 2 369.(PU Hai, MIAO Xiexing. Effect of the key strata movement in the mining-induced overlying strata on the abutment pressure distribution in surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 366 - 2 369.(in Chinese))
- [14] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中复合关键层的断裂跨距计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 1 - 4.(MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Calculation for fracture span of compound key strata in mining rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 1 - 4.(in Chinese))
- [15] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463 - 467.(XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden layer[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(5): 463 - 467.(in Chinese))
- [16] 许家林, 钱鸣高. 岩层控制关键层理论的应用研究与实践[J]. 中国矿业, 2001, 10(6): 54 - 56.(XU Jialin, QIAN Minggao. Study and application of dominant stratum theory for control of strata movement[J]. China Coal Magazine, 2001, 10(6): 54 - 56.(in Chinese))
- [17] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1 - 4.(MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application to water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [18] 黄庆享, 张沛. 厚砂土层下顶板关键块上的动态载荷传递规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 179 - 4 182.(HUANG Qingxiang, ZHANG Pei. Study on dynamic load distribution on key roof blocks of under thick sandy soil stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 179 - 4 182.(in Chinese))
- [19] 张秀琨, 鲍杰. 密集建筑物下采煤覆岩关键层判定及应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 18 - 21.(ZHANG Xiukun, BAO Jie. Judgment of key layer of covering rock in coal mining under concentrated buildings and its application[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2003, 23(1): 18 - 21.(in Chinese))
- [20] 侯忠杰. 浅埋煤层关键层研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 359 - 363.(HOU Zhongjie. Study on key stratum in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 359 - 363.(in Chinese))
- [21] 于广明, 孙洪泉, 赵建锋. 采矿引起地表点动态下沉的分形增长规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 34 - 37.(YU Guangming, SUN Hongquan, ZHAO Jianfeng. Fractal increment of dynamic subsidence of the ground surface point induced by mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 34 - 37.(in Chinese))
- [22] 姜晨光, 盖玉松, 廖明全, 等. 矿区地表沉陷规律的新认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 162 - 165.(JIANG Chenguang, GAI Yusong, LIAO Mingquan, et al. New knowledge on law of ground sinking in mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 162 - 165.(in Chinese))
- [23] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1991.(HE Guoqing, YANG Lun, LING Gengdi, et al. Mining subsidence sciences[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1991.(in Chinese))