

文章编号: 1000-7598(2014)10-2958-12

薄冲积层下开采地表动态移动规律与特征

唐 君, 王金安, 王 磊

(北京科技大学 金属矿山安全高效开采教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 位于采煤影响区的高压线、输气输油管道、河道等设施对地表动态移动极为敏感。以甘肃某煤矿在金沙河下开采为背景, 通过现场地表移动监测, 获得薄冲积层条件下综放开采地表动态移动变形规律。研究表明: 薄冲积层下综放开采地表具有下沉移动起始期很短、活跃期较长等特点。地表移动活跃期位于工作面前方 110 m 至工作面后方 400 m 范围内, 历时 185 d, 期间地表点下沉量可达到该点总下沉量的 90.7%; 地表移动剧烈期在工作面后方 50 m 至 150 m 范围内, 但剧烈扰动时间相对较短, 历时约 60 d。基于测点下沉曲线为 S 型分布、下沉速度曲线类似为正态分布特点, 建立了考虑开采时间和工作面推进速度因素的地表下沉及下沉速度动态模型, 并追踪刻画了地表测点往复式下沉与水平运动的轨迹。薄冲积层下开采, 地表裂缝更易平行于工作面走向方向发育, 并且随工作面的推进, 地表裂缝具有前移和密集区向工作面外侧小范围扩大的时空特征。

关 键 词: 薄冲积层; 地表移动; 动态规律; 移动轨迹

中图分类号: TD 321+.1

文献标识码: A

Dynamic laws and characteristics of surface movement induced by mining under thin alluvium

TANG Jun, WANG Jin-an, WANG Lei

(Key Laboratory of Education Ministry for Safety and High Efficiency Mining of Metal Mine,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: High-voltage transit lines, gas and petroleum pipelines, riverbeds and other facilities located in mining disturbed zones are extremely sensitive to surface dynamic movement. Based on the case of coal mining under Jinsha river in Gansu province, in-site surface movement monitoring is carried out; and the dynamic law of surface subsidence of fully mechanized top coal caving mining under the thin alluvium is obtained. The study shows that the surface subsidence experiences a very short initial period and a longer active period of movement. The active period of surface movement appears in the range from 110 m in front of the working face to 400 m back of working face, which lasts 185 days and results in 90.7% of the total surface subsidence. The severe period of surface subsidence occurs at 50 m to 150 m in the rear of working face; but the severer movement time is relatively short about 60 days. Based on the sinking curves of the measuring point displaying S-shaped distribution, and the sinking rate curves that are similar to normal distribution, the dynamic model of surface subsidence and sinking rate are established with respect to the mining time and advancing rate. The trajectories of ground measuring points are captured showing the back and forth moving characteristics. The fractures on the surface induced by mining under thin alluvium intend to develop parallel to the mining direction. With the working face advancing, the time and space features demonstrate that the surface fractures move forward and the concentration areas expand to the outside of the mining area.

Key words: thin alluvium; surface movement; dynamic laws; movement trajectory

1 引 言

我国自南水北调、西气东输、西电东送建设开始后, 对高压线、输气管线、河流等穿越采煤影响区问题日益突出。国内外对采煤引起的岩层及地表移动规律有了较深刻地认识, 例如, 国外 Barry 等^[1]

对地下采矿引起的地表下沉类型及其机制进行了比较系统地研究。国内王金庄等^[2], 刘林^[3], 余学义等^[4]对巨厚岩层下开采进行研究, 得出地表沉陷是由上覆基岩和松散层双层介质作用所致, 并且地表移动具有初始期、活跃期短而衰退期较长等特点; 郑志刚等^[5], 滕永海等^[6], 谭志祥等^[7]对综采放顶煤

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB731500); 国家自然科学基金项目(No. U13612034)。

第一作者简介: 唐君, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事地表动态移动规律及断裂岩石蠕变模型研究工作。E-mail: zishuijing8.student@sina.com

开采进行研究,得出此方式下开采地表移动剧烈、下沉盆地陡峭、移动变形集中、导水断裂带异常发育,具体表现为地表下沉系数、主要影响角正切明显偏大等;黄平路等^[8]对复杂地质条件下矿山开采进行研究,得出在采矿之初,地表塌陷主要是由地下水疏干引起的;地表大规模塌陷形成以后,地下采空区的扩大是引起地表塌陷的主要原因,但矿区特殊的地质条件对地表塌陷范围的扩展速度有重要影响;刘玉成等^[9]对煤层埋深与厚度之比较大情况下的地表沉降进行研究,得出在形成矩形采空区的过程中,由上覆岩层移动形成地表下沉盆地的形态和大小主要取决于离地表最近一层主关键岩层的弯曲,且地表的下沉量远远小于关键层岩层厚度的观点。由此可见,地层条件是矿山开采岩层移动的基础,决定着地表塌陷的类型与过程。现如今国内外对薄冲积层下采煤引起的岩层及地表移动的研究尚不充分,特别是地表下沉及变形的动态机制研究有待深入。

天祝煤矿位于甘肃省天祝藏族自治县炭山岭镇,此地区地层有元古界、中生界、新生界 3 层,中生界侏罗纪中统窑街组(J2Y)为本区主要含煤地层。煤系地层走向一般为北 10°~40°西,倾向北东,倾角一般为 9°~18°之间;含煤总层数为 4 层,平均总厚度为 9.94 m,可采煤层 2 层:上层煤及中层煤,局部可采煤层一层(顶层煤)。其中 3229 工作面倾斜长度为 140 m,走向长度为 1 368 m,煤层开采厚度为 6.32 m,平均采深为 360 m。值得注意的是,本区第四系覆盖层较薄,仅为 12 m,主要由表土、冲积砾石及堆积碎石构成(见图 1),并且地表有金沙河流过,3229 工作面距金沙河最近水平距离只有 180 m 左右(见图 2)。

众所周知,地下开采造成覆岩及地表自下而上形成三带,即:垮落带、导水裂缝带和弯曲下沉带^[10],弯曲下沉带主要由第四系冲积层构成,当冲积层较薄时,地表移动变形将会导致导水裂隙带通达至地表。为防止金沙河水沿采动裂隙倒灌到井下,给工作面生产和安全构成严重威胁,文献[11]对该区地下开采覆岩裂隙发育高度进行了分析,文献[12]提出了金沙河防渗四元结构,该结构自下而上依次为:河床加固层、防渗垫层、防渗层及保护层。其中,加固层提高河床强度,减轻因地下采动对河床的影响,保证河床的整体性;防渗垫层防止因河床错动或砾石对防渗层的折损,同时可协调和吸收部分河床局部变形;防渗层主要进行防渗,并具有足够的厚度、强度、耐寒、耐热及耐紫外线老化性能;

防渗保护层防止防渗层直接与水面接触,有固定防渗层、保护防渗层的功能,同时还起到维护河床生态的效果。然而,地表移动变形是一个动态发展过程,防渗结构设计应适应地表动态变形发展。因此,迫切需要对金沙河附近采动影响下的岩层与地表开展动态移动规律研究。这不仅为评价河床防渗工程可靠性提供依据,更为薄冲积层矿区安全开采提供了理论和实践基础。

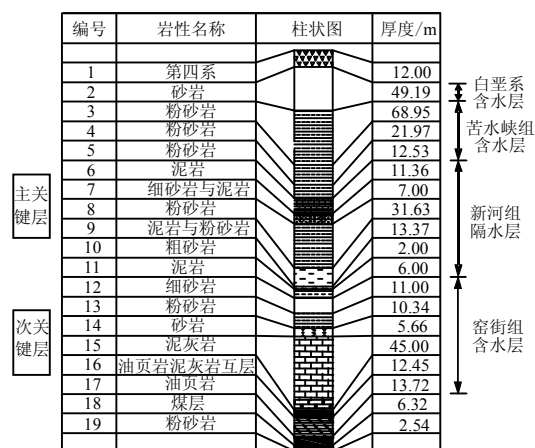


图 1 岩层柱状图

Fig.1 Rock strata histogram

2 观测站布置

为观测地表动态岩移规律与特征,在 3229 工作面分别沿工作面走向和倾向布置了两条观测线。走向观测线上设置了 22 个测点,编号分别是 Z_0 、 Z_1 、... Z_{22} ;倾向观测线设立了 19 个测点,编号分别是 Q_0 、 Q_1 、... Q_{19} 。测线上各测点间距 25 m。3229 工作面地面岩移观测测点布置如图 2 所示。

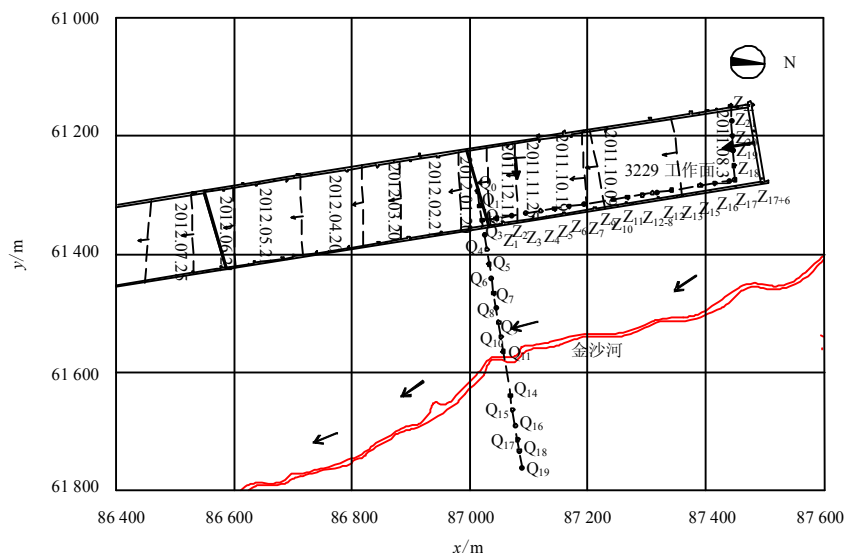
3229 工作面 2011 年 7 月 14 日初采,至 2012 年 11 月 16 日开采结束,期间每月均采用 DTM352C 全站仪监测地表移动变形,共进行了 16 次观测。观测期全面覆盖并反映了采动地表移动变形规律及特征。

(1) 走向方向,随着工作面远离,工作面后方地表下沉趋势逐渐趋于稳定,下沉量逐渐增加,最大下沉点随工作面推进向前推移。当工作面开采 1 000 m 时,采空区内地表累计最大下沉量为 1 493 mm,达到最终总下沉量的 98%。随后地表下沉逐渐趋于稳定(见图 3(a))。地表水平移动基本是朝向工作面推进方向,当工作面开采长度小于 1 000 m 时,地表水平移动有逐月增加的趋势,之后地表移动逐渐趋于稳定(见图 3(b))。

(2) 倾向方向,随着工作面的推进,地表下沉

量逐渐增加,最大沉陷区域始终处于采空区上方。当工作面开采 1 000 m 后,地表下沉逐渐趋于稳定,最终为 1 523 mm。金沙河附近下沉量始终较小,累计下沉量为 8 mm (见图 3 (c))。地表水平移动基本是朝向采空区方向,当工作面开采长度小于

1 000 m 时,地表水平移动有逐月增加的趋势,最大水平移动点位于工作面下山侧外缘 35 m 左右,之后随着工作面的推进,地表水平移动逐渐趋于稳定。金沙河附近水平移动较小,最大水平位移仅为 -19.27 mm、7.89 mm (见图 3 (d))。



注: 2011-08-31~2012-07-25 为工作面推进时间

图 2 监测点平面布置图

Fig.2 Layout of measurement point

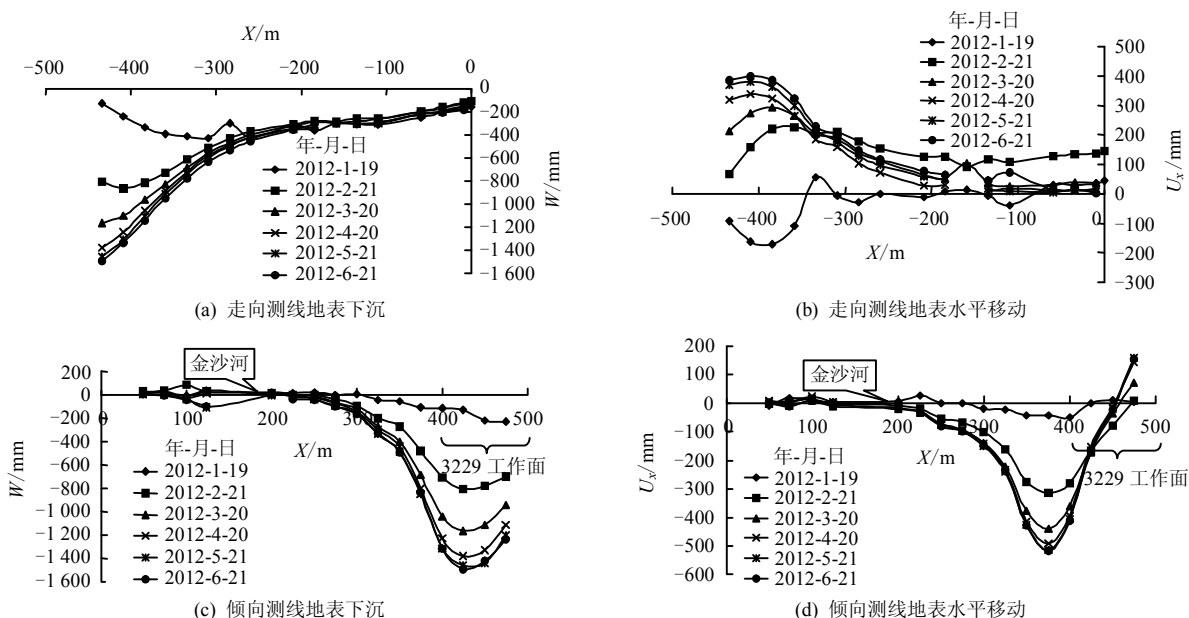


图 3 实测地表移动变形图

Fig.3 Surface movement and deformation curves by in-situ measurement

3 沿走向方向地表动态移动变形特征与规律

地下开采引起的地表沉陷和移动变形是一个复杂的时间和空间过程。为了掌握随工作面开采沿走向方向地表移动和变形的时空变化规律,对工作面

走向测线监测数据进行动态分析,得到沿走向方向地表动态移动变形 Knothe 函数特征以及地表移动动态参数和轨迹。

3.1 地表移动变形动态特征与改进的 Knothe 时间函数

地表沉陷随时间的发展过程可以分为 3 个阶

段, 即地表下沉的初始阶段、发展阶段和衰减阶段^[13-14]。地表下沉的初始阶段下沉量增长缓慢, 下沉速度增加较快, 而地表下沉到发展阶段时, 地表下沉量会有大幅增长, 且增长速度逐渐达到最大。而地表下沉的衰减阶段沉陷变形曲线形态基本不再变化, 下沉量会继续增加, 但增加缓慢, 并且此阶段下沉速度逐渐减小最终趋近于 0。因此, 下沉量动态曲线应呈现为大致 S 型曲线, 下沉速度曲线类似于正态分布曲线。

现场地表岩移监测走向测线上的 Z_0 点, 即倾向测线上的 Q_2 点为测线布置范围内最终下沉量最大点 (见图 3)。图 4(a) 中显示此点地表下沉量及下沉速度随工作面推进的动态变化特征。工作面开采距此点 110 m 左右时, 地表点开始进入活跃期, 但下沉量始终较小。当工作面推过该点 30 m 后, 地表下沉量急剧增加。当工作面推进到过该点 50 m 左右时, 地表下沉进入剧烈期。当工作面推过该点 88 m 时, 该点的下沉速度达到最大, 为 20.6 mm/d, 地表点移动最剧烈, 之后逐渐减小。当工作面推过该点 150 m 左右时, 剧烈期结束。当工作面推过该点 400 m 左右时活跃期结束, 此后地表点进入衰退阶段, 地表沉降逐渐趋于稳定, 沉降速度逐渐趋近于 0。由此可见, 薄冲积层下综采放顶煤开采地表移动初始期很短, 活跃期比较长 (历时 185 d), 地表点的下沉量达到该点总下沉量的 90.7%, 而剧烈期较为显著, 但时间相对较短 (历时约 60 d)。

对薄冲积层下开采地表走向测线上水平移动、变形最大点进行研究, 其移动变形曲线随工作面推进也大致为 S 型, 并且当工作面未推至到此点时, 地表移动变形较小, 地表点水平加速往复运动, 并出现小幅的拉伸变形。当工作面推进至此点 50 m 范围内时, 地表开始向开采工作面方向产生倾斜变形。当工作面开采过该点后, 地表开始向采空区内加速移动并且同期开始产生大幅倾斜变形, 地表进入活跃期。当工作面推进到过该点 200 m 时, 地表水平移动变形速度与倾斜速度同时达到最大, 最大水平移动速度为 3.92 mm/d, 最大水平变形速度为 0.059 mm/m/d, 最大倾斜变形速度为 0.118 mm/m/d。当工作面推进到过该测点 300 m 后, 地表水平移动变形呈现震荡衰减趋势, 当工作面推进到过该点 600 m (约 350 d) 时, 地表点水平移动变形仍出现小幅增加, 而倾斜变形有所减小。地表整个变形过程中剧烈期非常显著, 工作面推进引起的地表水平移动变形相对于倾斜变形更为敏感 (见图 4(b)、(c)、(d))。

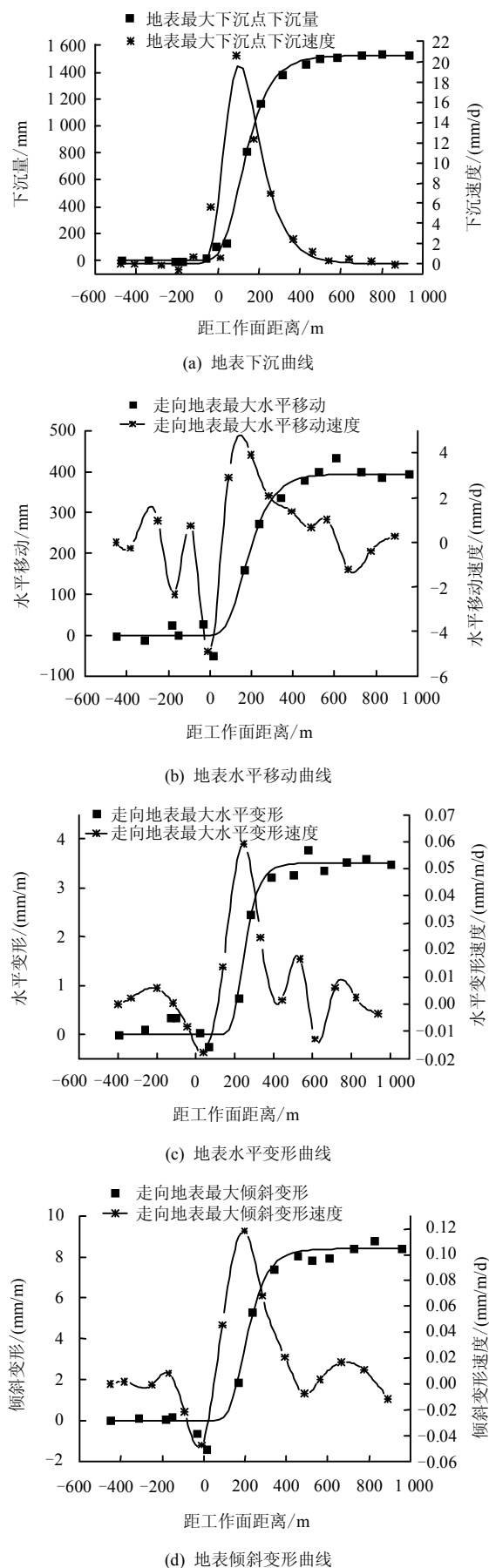


图 4 沿走向地表动态移动变形曲线

Fig.4 Dynamic movement and deformation curves of surface along strike of coal seam

1952 年波兰学者 Knothe^[15]利用土压实的基本假设进行了地表移动与变形时间过程研究,认为地表下沉速率 $dW(t)/dt$ 与地表最终下沉值 W_0 和某一时刻 t 的动态下沉值 $W(t)$ 之差成比例,即

$$\frac{dW(t)}{dt} = c(W_0 - W(t)) \quad (1)$$

式中: c 为与上覆岩层力学性质有关的时间因素影响系数,其单位为 $1/a$ 。

根据初始时刻边界条件: $t = 0$, $W(t) = 0$, 对式

(1) 积分,可得

$$W(t) = W_0(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$

式(2)就是 Knothe 地表移动动态过程的下沉表达式^[16-17]。但 Knothe 时间函数所描述的地表下沉是一个逐渐衰减的过程,不能反映地表下沉全程变化特征。针对 Knothe 时间函数的不完整性,文献[18]和[19]在原时间函数模型式(2)上加一个幂指数 k , 将其改为如下的形式:

$$W(t) = W_0(1 - e^{-ct})^k \quad (3)$$

式中: k 为待拟合参数。

由于工作面监测与开采同时进行,因此,地表下沉变形与工作面推进距离的关系更为紧密。同时,工作面基本为匀速推进,下沉曲线整体为 S 型,借鉴改进的 Knothe 时间函数,设定拟合曲线函数为

$$W(x) = W_0(1 - e^{-\frac{c(x+s)}{v}})^k \quad (4)$$

式中: x 为测点距工作面的距离; s 为监测点到工作面切眼相对距离; v 为平均开采速度。

将地表下沉最大点的相关参数 $W_0 = 1\ 523\text{ mm}$, $s = 483.7\text{ m}$, $v = 2.93\text{ m/d}$, 代入式(4), 并对图 4(a)地表下沉量随工作面推进的变化曲线进行拟合,得到拟合系数 $c = 0.035$, $k = 1\ 145.24$, $R^2 = 0.998\ 6$ 。

薄冲积层下开采走向测线其他监测点均为 S 型下沉曲线。并且受地表工作面开采制度和开采沉降时间等因素的影响,距离开切眼越远地表沉降越充分,地表下沉曲线 S 型越明显(见图 5)。将其相关参数代入式(4), 对图 5 地表下沉量随工作面推进的变化曲线进行拟合,得到拟合系数见表 1, 由 R^2 数值看拟合效果较好。

对改进的 Knothe 时间函数式(3), 对时间 t 求一阶导数得出下沉速度 V 表达式^[17]:

$$V(t) = W'(t) = W_0 k c e^{-ct} (1 - e^{-ct})^{k-1} \quad (5)$$

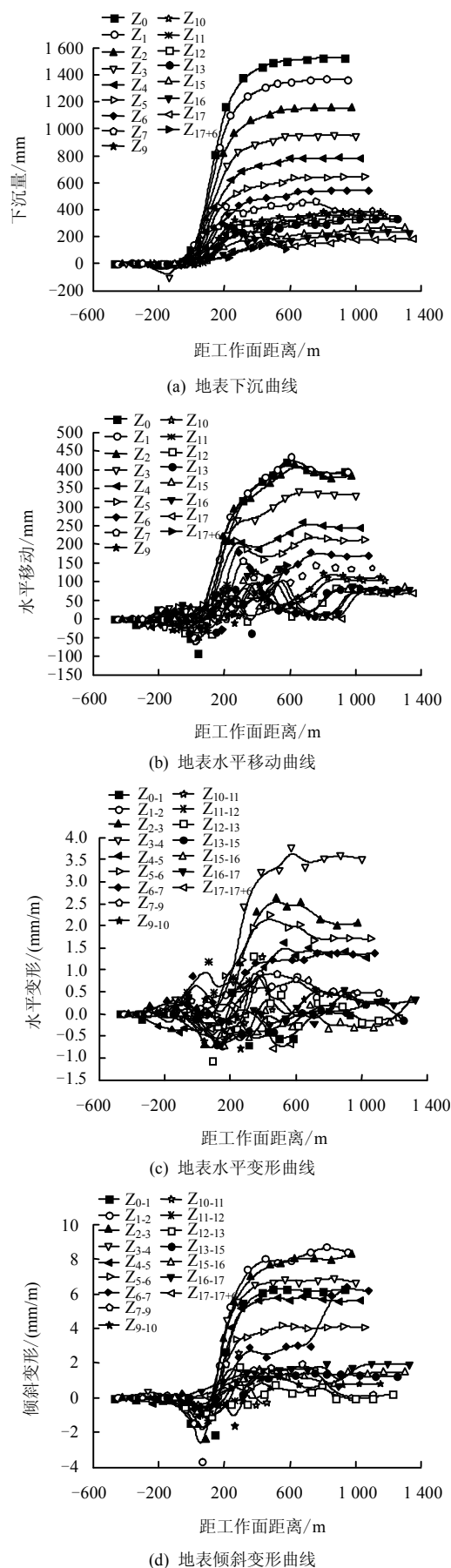


图 5 沿走向地表移动变形曲线
Fig.5 Movement and deformation curves of surface along strike of coal seam

表 1 沿走向地表移动各测点下沉曲线拟合参数
Table 1 Fitted parameters of ground subsidence
along strike of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Z ₀	0.035	1 145.24	0.998 6	Z ₇	0.054	1 686.45	0.958 3
Z ₁	0.033	472.40	0.998 7	Z ₉	0.030	52.04	0.977 6
Z ₂	0.032	298.41	0.999 1	Z ₁₀	0.024	19.30	0.967 8
Z ₃	0.033	263.83	0.994 7	Z ₁₂	0.026	18.98	0.964 3
Z ₄	0.032	198.24	0.997 6	Z ₁₃	0.014	3.88	0.975 6
Z ₅	0.031	136.29	0.992 1	Z ₁₅	0.012	2.08	0.920 9
Z ₆	0.025	44.17	0.994 5				

同理，基于工作面基本为匀速推进，设定下沉速度拟合曲线函数为

$$V(x) = W_0 k c e^{-\frac{x+s}{v}} (1 - e^{-\frac{x+s}{v}})^{k-1} \quad (6)$$

代入上述地表下沉量拟合系数，可得到该点下沉速度随工作面推进变化的拟合曲线与现场监测数据基本吻合，其中最大下沉点速度拟合曲线如图 4(a) 所示。

由于走向测线地表最大移动变形点变形曲线类似于下沉曲线，大致为 S 型（见图 4），基于薄冲积层开采沉降拟合公式（4），提出地表移动变形拟合公式为

$$y = y_0 (1 - e^{-\frac{x+s}{v}})^k \quad (7)$$

式中： y 为监测点移动变形值； y_0 为监测点最终移动变形值。

根据现场实测数据，拟合得到走向测线移动变形最大点拟合系数（见表 2），拟合曲线如图 4(b)、(c)、(d) 所示，拟合效果较好。

表 2 沿走向地表移动变形曲线拟合参数表
Table 2 Fitted parameters of ground movement and
deformation along strike of coal seam

	c	k	R^2
下沉曲线	0.035	1 145.24	0.998 6
水平移动曲线	0.037	2 192.62	0.987 2
水平变形曲线	0.061	566 794.38	0.987 1
倾斜变形曲线	0.045	18 885.16	0.985 7

在走向测线上，地表水平移动、变形曲线均具有 S 型特征，并且随着工作面开采地表测点 S 型特征趋于明显，如图 5 所示。将各监测点相关参数代入式（7）进行拟合，得到其拟合参数（见表 3~5），总体拟合效果较好。Z₇ 之后的局部监测点由于地表本身移动变形量较小，未达到充分采动，因而测量误差对结果本身影响相对较大，测量误差导致曲线 S 型特征不明显。因此，没有进行拟合。

3.2 地表起距与超前影响角

起距反映工作面开采对地表岩移的初始开采长度。实测结果表明，薄冲积层下 3229 工作面开采

起距为 139.7 m，约为采深（ H_0 ）的 0.39 倍。符合我国一般在初次采动时起距为 $(1/4 \sim 1/2)H_0$ 的变化范围^[20]。

表 3 沿走向地表各测点水平移动曲线拟合参数
Table 3 Fitted parameters of ground horizontal
displacement along strike of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Z ₀	0.020	61.74	0.934 5	Z ₃	0.038	1 490.19	0.977 0
Z ₁	0.037	2 192.62	0.987 2	Z ₄	0.050	10 255.64	0.959 5
Z ₂	0.038	2 017.68	0.984 1	Z ₅	0.053	21 037.89	0.925 9

表 4 沿走向地表各测点水平变形曲线拟合参数
Table 4 Fitted parameters of ground horizontal
deformation along strike of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Z ₂₋₃	0.042	12 783.60	0.901 9	Z ₅₋₆	0.058	21 248.84	0.930 0
Z ₃₋₄	0.061	566 794.38	0.987 1	Z ₆₋₇	0.044	4 623.21	0.868 5
Z ₄₋₅	0.043	18 988.63	0.910 2				

表 5 沿走向地表各测点倾斜变形曲线拟合参数
Table 5 Fitted parameters of ground inclination
along strike of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Z ₀₋₁	0.048	21 219.33	0.946 3	Z ₃₋₄	0.051	26 178.67	0.983 2
Z ₁₋₂	0.045	18 885.16	0.985 7	Z ₄₋₅	0.051	21 088.63	0.976 8
Z ₂₋₃	0.042	7 234.84	0.958 4	Z ₅₋₆	0.055	22 929.93	0.980 5

超前影响角大小受采动程度、工作面推进速度和上覆岩层岩性等因素的影响。据实测，该工作面刚开采时地表下沉基本处在采空区正上方，地表下沉传播超前影响范围较小，随工作面推进，超前影响范围稍有增大。当工作面开采 400 m 左右后，影响角最终约为 80°（见图 6）。分析认为，薄冲积层条件下，当开采深度较大、开采速度达到或超过某一定值时，由于距离和时间的的影响，地下开采对地表前方产生沉降的影响传播较弱。因此超前影响范围较小，即停采前塌陷盆地始终位于开采工作面的上方附近。

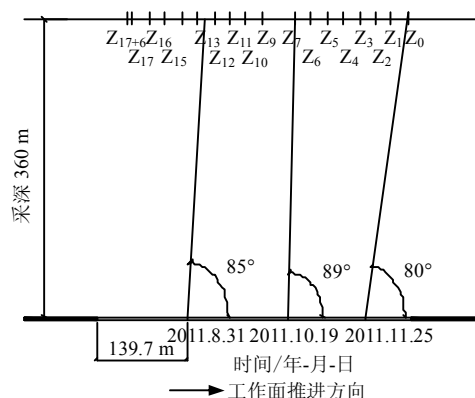


图 6 超前影响角示意图

Fig.6 Schematic of pre-influence angle

3.3 地表测点移动轨迹

地表点从开始移动到剧烈移动,再到逐渐停止,是一个较为复杂的时间、空间过程。根据走向测线测点下沉及水平移动监测数据,捕捉到薄冲积层下开采走向测线地表测点移动轨迹(见图 7)。地表移动变形初期,地表水平方向主要是向工作面前方移动,并产生一定的下沉量。随着工作面开采,地

表开始向工作面后方移动,并迅速产生大量沉降。之后大部分时间是在采空区范围内往复运动。除此以外,沿着工作面推移方向测点从 $Z_{17} \sim Z_1$ (见图 2),地表移动轨迹逐渐趋于简单化、规律化,分析认为主要是由于初始开采时,地表移动范围影响不到 Z_1 点所致。

4 地表沿倾向方向动态移动变形特征与规律

通过对工作面倾向测线监测数据计算,分析薄冲积层下开采的 3229 工作面对金沙河附近地表影响范围和程度,结果表明,沿倾向方向地表动态移动变形同样符合 Knothe 函数特征,地表移动角满足指数函数动态特征。

4.1 地表移动变形动态特征与改进的 Knothe 时间函数

对薄冲积层下开采地表沿倾向测线上水平移动、变形最大点进行研究,当工作面未推进至此点时,地表移动变形较小。当工作面推进至距此点 60 m 范围内时,地表产生小幅倾斜变形,之后随着工作面推进,地表开始水平移动变形。当工作面开采过该点后,地表首先向采空区内加速倾斜变形,之后迅速开始产生大幅水平移动变形,地表进入活跃期。当工作面推进过该点 88 m 时,地表倾斜变形速度首先迅速达到最大为 0.26 mm/m/d;工作面再向前推进 90 m 时,地表水平变形速度也达到最大为 0.10 mm/m/d。当工作面推进到过该点 300 m 后,地表点移动变形逐渐趋于稳定。地表整个变形过程中剧烈期非常显著,水平变形速度增减呈阶梯状,且地表倾斜变形相比于水平移动变形更为敏感(见图 8)。

倾向测线移动变形最大点变形曲线呈 S 型,符合改进的 Knothe 时间函数,依照式(4)和式(7)对薄冲积层下开采倾向地表移动变形曲线进行拟合,获得拟合系数见表 6,拟合曲线见图 8。由 R^2 数值看,拟合效果很好。

薄冲积层下开采,倾向测线其它测点下沉曲线 S 型规律明显,并且随着监测点距离工作面中心逐渐接近,地表最终沉降逐渐变大, S 型曲线趋于拉伸化、稳定化。在水平方向上,地表移动变形曲线类似于走向测点移动变形曲线,呈 S 型或倒 S 型,如图 9 所示。依照式(4)和式(7)进行拟合,拟合结果见表 7~10,拟合效果较好。

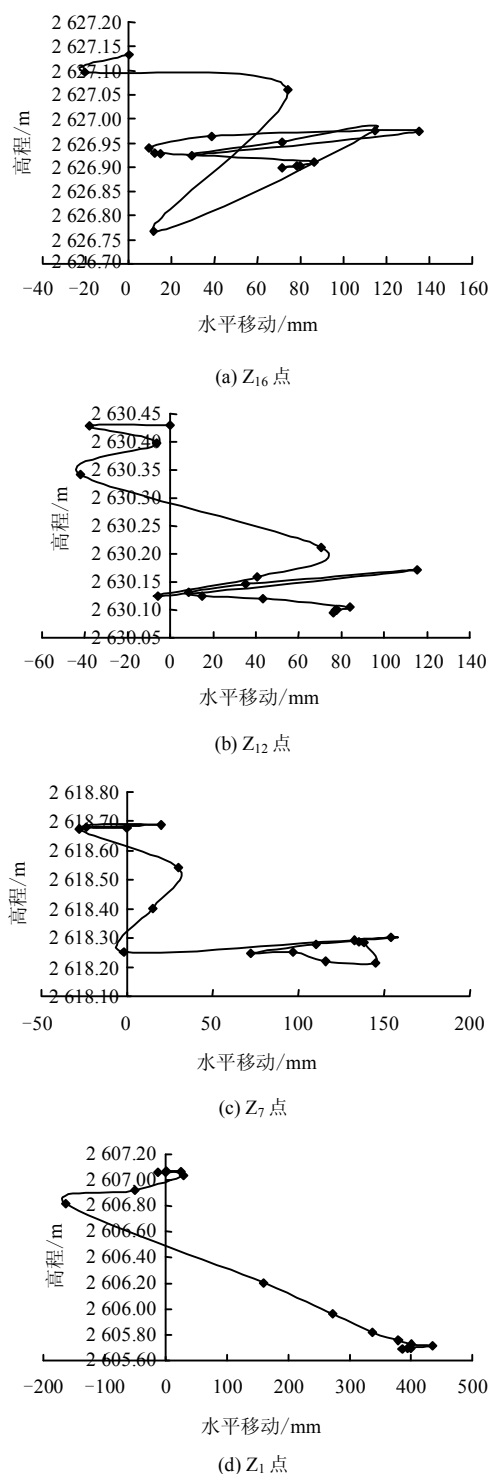
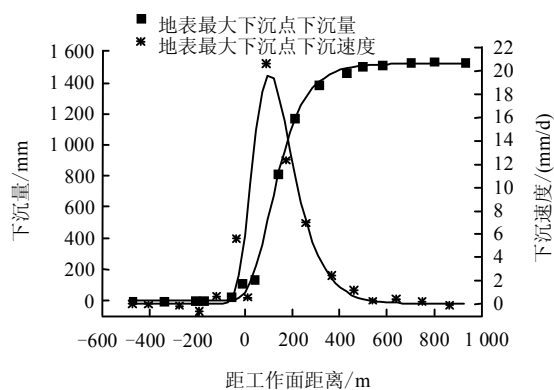
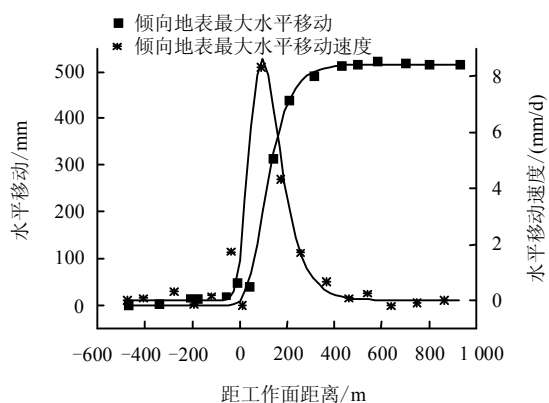


图 7 地表移动轨迹图

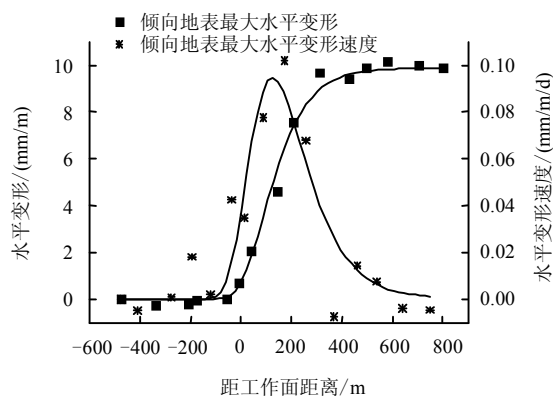
Fig.7 Trajectories of surface movement



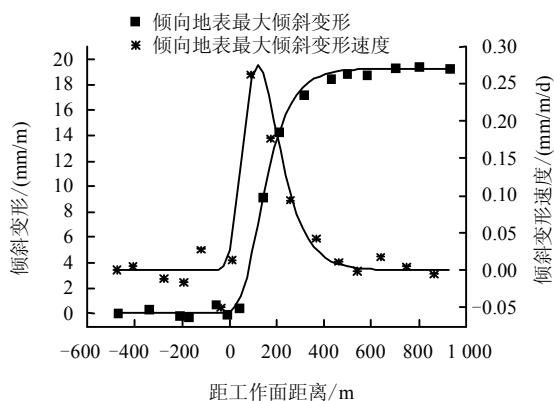
(a) 地表下沉曲线



(b) 地表水平移动曲线



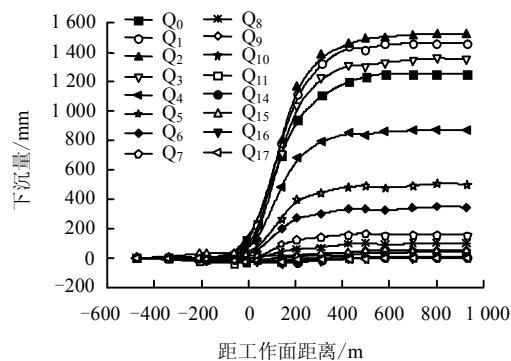
(c) 地表水平变形曲线



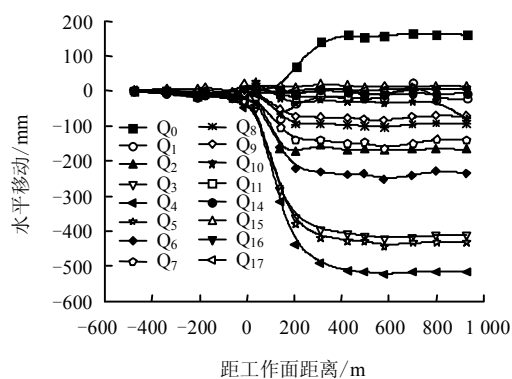
(d) 地表倾斜变形曲线

图 8 沿倾向地表移动变形曲线

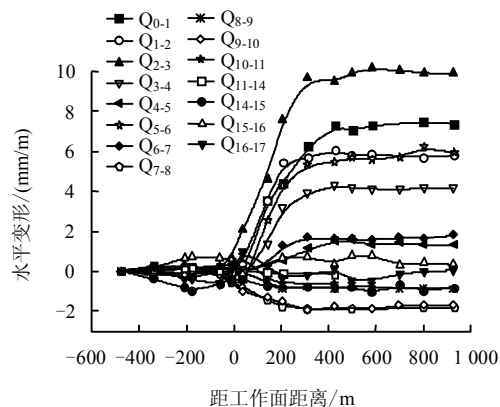
Fig.8 Dynamic movement and deformation curves of surface along inclination of coal seam



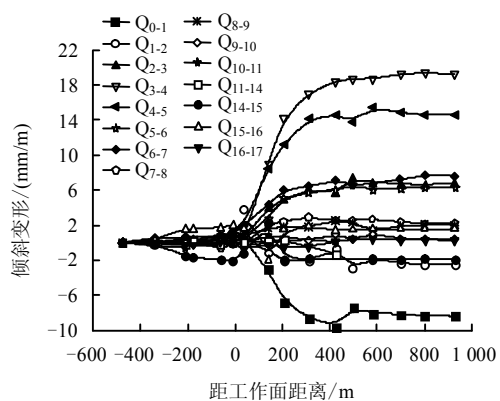
(a) 地表下沉曲线



(b) 地表水平移动曲线



(c) 地表水平变形曲线



(d) 地表倾斜变形曲线

图 9 沿倾向地表移动变形曲线

Fig.9 Movement and deformation curves of surface along inclination of coal seam

参照地表下沉速度拟合公式(6)的形式,得出地表移动变形速度拟合公式为

$$V(x) = y_0 k c e^{-\frac{x+s}{v}} (1 - e^{-\frac{x+s}{v}})^{k-1} \quad (8)$$

将地表移动变形拟合系数代入式(6)和式(8),得到地表移动变形速度随工作面推进变化规律,与现场实测数据总体变化趋势相同,拟合程度较高,基本符合上式。其中,最大移动变形点速度拟合曲线见图8。

表6 沿倾向地表移动变形曲线拟合参数表
Table 6 Fitted parameters of ground movement and deformation along inclination of coal seam

曲线类别	拟合参数		
	c	k	R^2
下沉曲线	0.035	1 145.24	0.998 6
水平移动曲线	0.045	7 746.50	0.996 6
水平变形曲线	0.031	409.06	0.994 2
倾斜变形曲线	0.039	2 927.16	0.998 3

表7 沿倾向地表各测点下沉曲线拟合参数表
Table 7 Fitted parameters of ground subsidence along inclination of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Q ₀	0.029	271.17	0.999 5	Q ₅	0.034	762.80	0.996 2
Q ₁	0.032	511.01	0.999 5	Q ₆	0.033	713.20	0.995 1
Q ₂	0.035	1 145.24	0.998 6	Q ₇	0.052	39 565.65	0.987 9
Q ₃	0.036	1 376.79	0.999 0	Q ₈	0.028	382.30	0.974 2
Q ₄	0.035	911.28	0.998 6	Q ₉	0.256	657.88	0.828 5

表8 沿倾向地表各测点水平移动曲线拟合参数
Table 8 Fitted parameters of ground horizontal displacement along inclination of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Q ₀	0.036	4 055.27	0.990 2	Q ₆	0.050	9 812.39	0.982 9
Q ₂	0.049	9 332.91	0.954 1	Q ₇	0.050	12 424.17	0.964 6
Q ₃	0.045	5 693.64	0.996 5	Q ₈	0.054	21 278.50	0.957 7
Q ₄	0.045	7 746.50	0.996 6	Q ₉	0.053	18 763.56	0.953 5
Q ₅	0.045	6 533.38	0.996 9				

表9 沿倾向地表各测点水平变形曲线拟合参数
Table 9 Fitted parameters of ground horizontal deformation along inclination of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Q ₀₋₁	0.032	891.04	0.990 4	Q ₅₋₆	0.045	14 228.31	0.986 4
Q ₁₋₂	0.050	1 7096.71	0.996 1	Q ₆₋₇	0.046	24 144.76	0.961 4
Q ₂₋₃	0.031	409.06	0.994 2	Q ₇₋₈	0.037	571.52	0.982 1
Q ₃₋₄	0.048	26 021.67	0.991 5	Q ₉₋₁₀	0.032	216.93	0.978 9
Q ₄₋₅	0.043	21 644.20	0.940 0				

表10 沿倾向地表各测点倾斜变形曲线拟合参数
Table 10 Fitted parameters of ground inclination along inclination of coal seam

测点编号	c	k	R^2	测点编号	c	k	R^2
Q ₀₋₁	0.049	25 930.81	0.979 5	Q ₅₋₆	0.038	2 093.83	0.984 9
Q ₂₋₃	0.027	203.17	0.976 7	Q ₆₋₇	0.023	82.94	0.982 4
Q ₃₋₄	0.039	2 927.16	0.998 3	Q ₇₋₈	0.054	29 114.33	0.917 0
Q ₄₋₅	0.036	1 107.33	0.996 6	Q ₈₋₉	0.020	17.24	0.896 2

4.2 移动角动态变化规律

薄冲积层开采地表下山移动角变化规律如图10所示。随着工作面逐渐开采,地表下山移动角逐渐减小。在工作面未推进到倾向测线时,下山移动角以0.75°/m速度减小,当开采到其下方时,移动角未有改变,当工作面推过该测线时,移动角以0.1°/m速度减小,并于工作面推过倾向侧线500 m左右后趋于稳定,其值在60°左右。下山移动角总体动态变化趋势可用下式表述:

$$\beta(x) = ae^{-\frac{x}{b}} + d \quad (9)$$

式中: β 为下山移动角; a, b, d 为待拟合参数。

拟合得到相关系数 $a=19.236 7$, $b=172.058 11$, $d=59.934 2$, 拟合曲线如图10所示。

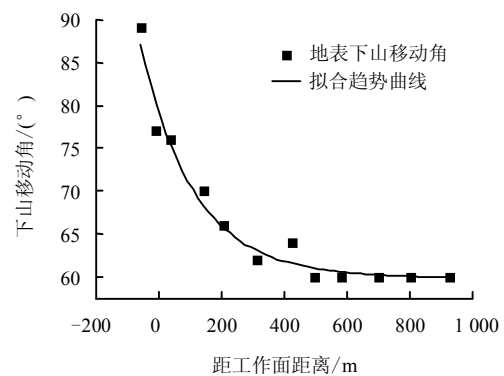


图10 地表下山移动角变化趋势图
Fig.10 Trends of moving angle towards down inclination

5 地表裂缝观测分析

地表变形最直接的后果就是使地表产生裂缝或错动,导致河水倒灌到井下,易造成淹井事故,给工作面生产和安全构成严重威胁。裂缝宽度则与岩土体性质有关。

现场勘测发现,工作面开采600 m左右后,首次在走向和倾向测线附近发现裂缝,如图11所示。在走向方向距工作面后方214 m处,发现倾向裂缝(图中裂缝1),宽度为0.03 m,长度为6 m。之

后随工作面采动裂缝暂无发展。在倾向方向, 距金沙河往西 60~210 m 范围内, 发现走向沉陷裂缝(图中裂缝 2~6), 裂缝宽度在 0.01~0.05 m 之间。裂

缝 2~4 为裂缝密集区, 裂缝长度 3~100 m 不等。随工作面开采裂缝向南发育, 密集区向东有小范围扩大, 裂缝长度增长 100%~233%。

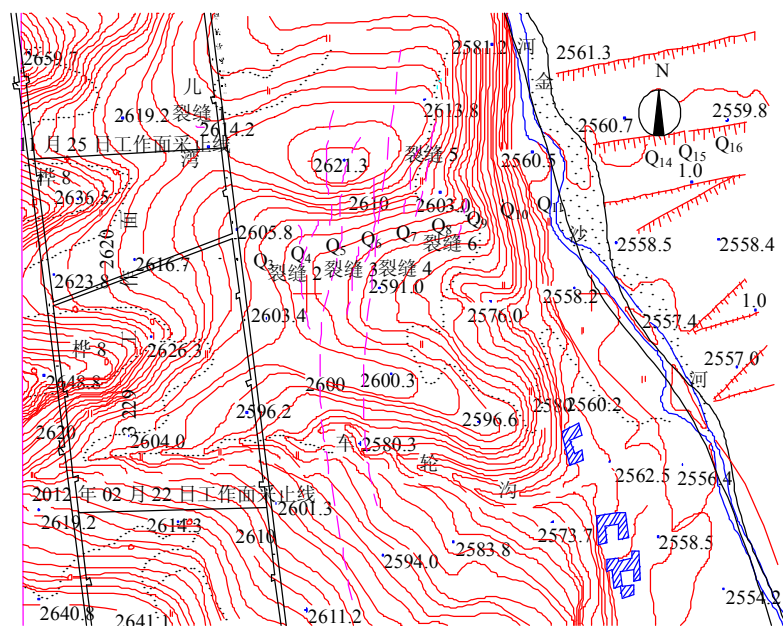


图 11 现场地表裂缝发展位置图
Fig.11 Locations of surface cracks

薄冲积层条件下, 由于开采深度较大, 开采制度较完善, 因此, 工作面走向方向地表水平变形控制在一定范围内, 产生的走向裂缝较少。而在倾向测线方向, 随着工作面开采, 地表从采空区到金沙河附近产生了不均匀沉降及水平移动, 且水平变形较大, 因此, 产生的倾向裂缝较多, 并且裂缝随工作面开采逐渐发育。

应当指出, 文献[12]提出的柔性四元防渗结构为开放式梯形断面, 对于平行裂缝有良好的吸收和防御作用。并且薄冲积层下开采产生的地表最大移动变形发生在采空区附近, 金沙河附近移动变形相对较小, 截止到开采完毕, 金沙河最大水平位移仅为 -19.27 mm、7.89 mm, 最大水平压缩变形为 0.605 mm/m, 最大拉伸变形为 0.8 mm/m。在湿润的条件下, 四元防渗结构的防渗层土工膜径向的拉伸强度为 217.8 kN/m, 并且经向断裂伸长率为 288%, 纬向断裂伸长率为 123%, 可见, 文献[12]提出的柔性四元防渗结构能够满足协调和缓冲开采扰动河床变形的要求。

6 结 论

(1) 实测表明, 薄冲积层下放顶煤开采地表下沉移动初始期很短; 活跃期比较长(历时 185 d),

地表点的下沉量达到该点总下沉量的 90.7%; 剧烈期较为显著, 最大下沉速度达 20.6 mm/d, 但剧烈扰动时间相对较短(历时约 60 d)。所有测点下沉曲线均为 S 型分布, 下沉速度曲线类似为正态分布, 参考 Knothe 时间函数, 地表下沉量曲线可表达为式(4); 下沉速度曲线为式(6), 拟合结果与现场实测数据相符。

(2) 薄冲积层下开采, 在工作面未推进到达时, 地表移动变形较小; 工作面开采后, 地表迅速进入活跃期, 并且速度达到最大; 当工作面推进到过 300 m 后, 地表点移动变形逐渐趋于稳定。整个地表移动变形过程中剧烈期非常显著, 并且走向测线地表水平移动变形对工作面的推进更为敏感, 倾向测线地表则为倾斜变形更为敏感。其中, 充分采动的测点移动变形值满足式(7)函数。

(3) 沿着工作面推进方向, 初始开采时地表初始变形阶段主要朝向回采工作面前方做水平和下沉移动, 之后大部分时间是在采空区范围内往复运动。总体来说, 地表点移动是一个较为复杂的时间、空间过程, 在采空区上方表现出移动轨迹的简单化和规律化。

(4) 研究得出薄冲积层放顶煤开采地表移动动态参数。其中, 起动距为 139.7 m, 约为 $0.39 H_0$ 。

超前影响角 80° , 超前影响范围偏小。随着工作面逐渐开采, 地表下山移动角逐渐减小, 其值最终稳定于 60° , 变化规律满足曲线式 (9)。

(5) 薄冲积层下开采, 平行于工作面走向方向的地表裂缝更易发育。随着工作面推进, 地表裂缝前移, 密集区向工作面外侧有小范围扩大, 裂缝沿工作面走向长度发育较快。

就天祝煤矿金沙河床防渗工程而言, 设计的柔性四元防渗结构^[12]可以适应工作面采后地表剧烈变形期的变形速率且满足移动变形的要求。

参考文献

- [1] BARRY H G B, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London: George Allen Unwin, 1985.
- [2] 王金庄, 李永树, 周雄, 等. 巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 18—21.
WANG Jin-zhuang, LI Yong-shu, ZHOU Xiong, et al. Ground movement cause by mining under thick alluvium[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(1): 18—21.
- [3] 刘林. 淮南潘集地区地表沉降初步研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 165—167.
LIU Lin. Study on surface subsidence in Panji mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(2): 165—167.
- [4] 余学义, 李邦帮, 李瑞斌, 等. 西部巨厚湿陷性黄土层开采损害程度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 43—45.
YU Xue-yi, LI Bang-bang, LI Rui-bin, et al. Analysis of mining damage in huge thick collapsible loess of western China mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(1): 43—45.
- [5] 郑志刚, 滕永海, 王金庄, 等. 综采放顶煤条件下动态地表沉陷规律研究[J]. 矿山测量, 2009, (2): 61—62.
ZHENG Zhi-gang, TENG Yong-hai, WANG Jin-zhuang, et al. Dynamic surface subsidence laws under conditions of fully mechanized coal caving[J]. *Mine Surveying*, 2009, (2): 61—62.
- [6] 滕永海, 王金庄. 综采放顶煤地表沉陷规律及机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 264—267.
TENG Yong-hai, WANG Jin-zhuang. The law and mechanism of ground subsidence induced by coal mining using fully-mechanized caving method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(3): 264—267.
- [7] 谭志祥, 王宗胜, 李运江, 等. 高强度综放开采地表沉陷规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 59—62.
TAN Zhi-xiang, WANG Zong-sheng, LI Yun-jiang, et al. Field research on ground subsidence rules of intensive fully mechanized mining by sublevel caving[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(1): 59—62.
- [8] 黄平路, 陈从新, 肖国峰, 等. 复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3020—3024.
HUANG Ping-lu, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, et al. Study of rock movement caused by underground mining in mines with complicated geological conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3020—3024.
- [9] 刘玉成, 曹树刚. 基于关键层理论的地表下沉盆地模型初探[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 719—724.
LIU Yu-cheng, CAO Shu-gang. Preliminary study of surface subsidence model based on theory of key rock stratum[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(3): 719—724.
- [10] 国家煤炭工业局制定. 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, 2010.
- [11] 李翌, 王金安. 金沙河下采煤地表移动变形与导水裂隙带高度预测分析[J]. 中国矿业, 2012, 21(8): 121—124.
LI Zhao, WANG Jin-an. Predictive analysis of ground deformation and water flowing fracture height mining under Jinsha River [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(8): 121—124.
- [12] 王金安, 焦中华, 唐君, 等. 开采扰动河床防渗治理方法[J]. 煤炭学报, 2013, 9, 38(9): 1549—1556.
WANG Jin-an, JIAO Shen-hua, TANG Jun, et al. Anti-seepage control method for mining disturbed riverbed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 9, 38(9): 1549—1556.
- [13] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [14] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形规律与计算方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 211—215.
HUANG Le-ting, WANG Jin-zhuang. Research on laws and computational methods of dynamic surface subsidence deformation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(2): 211—215.