

# 砾岩层控制覆岩和地表移动机理分析

栾元重<sup>1</sup>, 郭传超<sup>1</sup>, 于水<sup>1</sup>, 王义昌<sup>1</sup>, 张西步<sup>1</sup>, 栾亨宣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东科技大学, 测绘与空间信息学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>山东科技大学, 机械电子工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2022年2月23日; 录用日期: 2022年3月24日; 发布日期: 2022年3月31日

## 摘要

本文针对砾岩层下3煤开采地表移动与变形值偏小的机理问题, 运用关键层理论确定了山东某煤矿3煤开采厚110 m砾岩层为高位主关键层, 采用UDEEC软件模拟计算了含有砾岩层3煤开采地表下沉和水平移动值, 及砾岩层厚度分别为50 m、100 m、150 m、200 m时不同高度处的岩层下沉值; 分析了位于砾岩层上和砾岩层下及砾岩层内部不同高度岩层下沉值变化规律。又根据砾岩层受开采影响内部岩块能量运移过程, 建立了砾岩层内部能量与体应变、 $\tan\beta$ 间函数模型。研究表明: 砾岩层内部岩块运动过程中体积不断扩展, 阻止了岩层移动向地表移动传播; 开采区域上覆岩体存在多个离层空间, 这些离层空间承担了地表变形当量, 使地表变形值偏小。

## 关键词

砾岩层, 关键层, 地表移动, 数值模拟, 条带开采

# Analysis of the Mechanism of Conglomerate Layer Controlling Overlying Strata and Surface Movement

Yuanzhong Luan<sup>1</sup>, Chuanchao Guo<sup>1</sup>, Shui Yu<sup>1</sup>, Yichang Wang<sup>1</sup>, Xibu Zhang<sup>1</sup>, Hengxuan Luan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022

文章引用: 栾元重, 郭传超, 于水, 王义昌, 张西步, 栾亨宣. 砾岩层控制覆岩和地表移动机理分析[J]. 矿山工程, 2022, 10(2): 103-113. DOI: 10.12677/me.2022.102013

## Abstract

This paper focuses on the mechanism of small surface movement and deformation of coal mining under conglomerate stratum 3. Based on the critical stratum theory, the 110 m thick conglomerate stratum of no. 3 coal mining in Shandong is determined as the high key stratum. UDEC software is used to simulate and calculate the surface subsidence and horizontal movement values of coal mining with conglomerate layer 3, and the strata subsidence values at different heights when conglomerate layer thickness is 50 m, 100 m, 150 m and 200 m respectively. The subsidence values of strata at different heights above and below the conglomerate layer and in the conglomerate layer are analyzed. According to the process of energy migration in conglomerate strata affected by mining, the function models of energy, bulk strain and  $\tan\beta$  in conglomerate strata are established. The results show that the volume of rock blocks in the conglomerate layer expands continuously during the movement process, which prevents the movement of rock strata from moving to the surface. There are multiple separation spaces in the overlying rock mass in the mining area, which bear the equivalent surface deformation and make the surface deformation value smaller.

## Keywords

Conglomerate Layer, Key Layer, Surface Movement, Numerical Simulation, Strip Mining

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤矿开采引起的上覆岩层移动、破坏与覆岩岩层及关键层有关，对上覆岩层局部或全部岩体位移起控制作用的坚硬岩层称为关键层[1] [2]。茅献彪[3]提出了复合关键层的断裂垮距计算方法；缪协兴[4]分析了厚关键层的破断和冒落形式；左建平[5]综合岩层移动理论、力学模型、地表沉陷理论初步确定了煤层上覆岩层整体移动规律；高超[6]分析了关键层对厚煤层综放开采两带高度和地表开切眼处影响覆岩变形规律；于秋鸽[7]基于关键层理论建立了地表偏态下沉模型。目前对关键层破断状态力学特质和地表变形形式分析较多[8] [9]，但对导致地表沉降量偏小覆岩内部机理问题研究较少。本文针对山东某煤矿条带开采地表下沉偏小问题，运用数值模拟、钻孔电视成像、能量转移理论等技术方法揭示了砾岩层控制覆岩和地表变形的覆岩内部机理，解析了厚砾岩层下煤层开采地表变形值偏小的成因，并通过实测数据得到了验证，这为砾岩层下煤层安全开采奠定了理论基础。

## 2. 地表变形数值模拟

### 2.1. 关键层判定

山东某煤矿砾岩层地层条件位于煤系上覆地层中的侏罗系，平均厚度 110 m，开采区域采用采宽 120 m、留宽 120 m 的宽条带开采方案[10]，布设两个条带工作面，采厚为 5.2 m。开采煤层结构“如图 1”。

根据关键层理论[1] [2]中的刚度判断条件，开采煤层的上覆岩层关键层变形与下部岩层变形是不同步的，假如 1~m 层岩层同步变形，岩层间曲率相同，则第一层将承担 1 m 层的载荷，由关键层理论知：

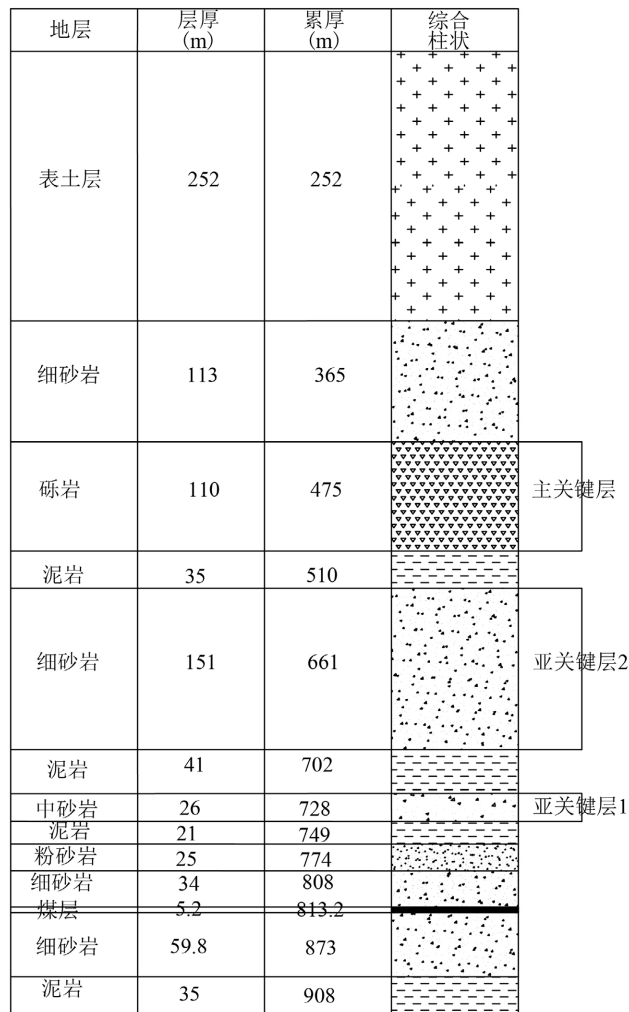


Figure 1. Column diagram of magmatic intrusion area  
图 1. 地层柱状图

$$q_1 > q_i \quad (i = 2, 3, \dots, m) \tag{1}$$

设第  $m + 1$  层为关键层，则第  $m + 1$  层及以上覆岩层不在向下部岩层传递荷载，则：

$$q_{1|m} > q_{1|m+1} \tag{2}$$

公式(2)中两边符号分别表示：第  $m$  岩层与第  $m + 1$  岩层对第一层关键层所产生载荷。其中：

$$q_{1|m} = \frac{E_i h_i^3 \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^m E_i h_i^3} \tag{3}$$

$$q_{1|m+1} = \frac{E_i h_i^3 \sum_{i=1}^{m+1} \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^{m+1} E_i h_i^3} \tag{4}$$

由上面三个公式可得：

$$E_{m+1}h_{m+1}^3 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i > \gamma_{m+1} \sum_{i=1}^m E_i h_i \quad (5)$$

按上式，自开采煤层上方岩层逐层向上计算，并不断重复计算，可得到确定的各个关键层。

经计算位于煤层上方 333 m 处砾岩为主关键层，属于高位关键层；第 5 层和第 7 层为亚关键层，亚关键层 2 位于煤层上方 147 m 处，亚关键层 1 位于煤层上方 80 m 处。

## 2.2. 地表变形数值模拟

为了研究砾岩对地表移动影响规律，采用 UDEC 软件计算对含砾岩地层地表变形值。按采深 900 m、宽 360 m、长 1000 m、煤层倾角为零建立模拟模型，布置两个条带开采工作面，条带采宽 120 m、留宽 120 m，走向长均为 1000 m，煤厚 5.2 m。模拟岩层简化为 13 个，各岩层力学参数“如表 1”所示。

Table 1. Rock physical and mechanical parameters

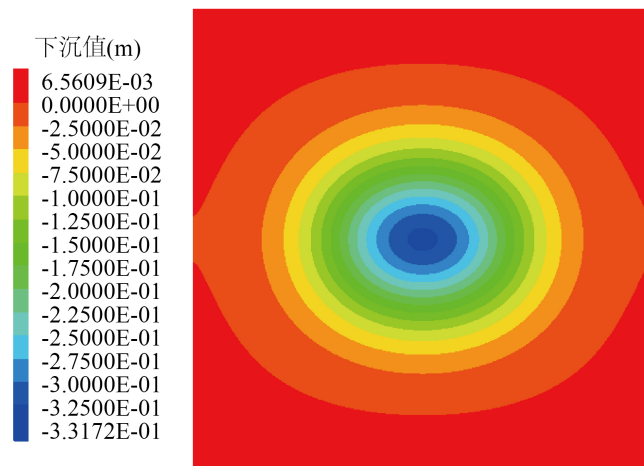
表 1. 岩层物理力学参数表

序号	岩性	厚度(m)	容重 $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	弹性模量 $E/GPa$	抗拉强度 $T/MPa$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/MPa$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
1	表土层	252	20	0.01	0.3	0.3	0.13	24.3
2	细砂岩	113	25	2.4	1.15	0.26	0.26	30.1
3	砾岩	110	28	4.2	3.88	0.21	4.03	36.2
4	泥岩	35	26	1.5	1.2	0.27	2.69	32.6
5	细砂岩	151	25	2.4	2.25	0.25	4.04	34.4
6	粉砂岩	31	23	1.5	2.8	0.28	1.4	31.1
7	中砂岩	36	24	2.2	2.4	0.24	6.28	35.2
8	泥岩	21	26	1.5	0.44	0.28	1.4	32.4
9	粉砂岩	25	23	1.8	2.8	0.26	4.34	31.2
10	细砂岩	34	25	2.4	1.15	0.22	5.68	33
11	煤层	5.2	16	1.2	0.05	0.24	2.41	30.3
12	细沙岩	59.8	25	2.4	1.15	0.25	4.66	33.3
13	泥岩	35	26	1.5	1.2	0.26	3.18	32.5

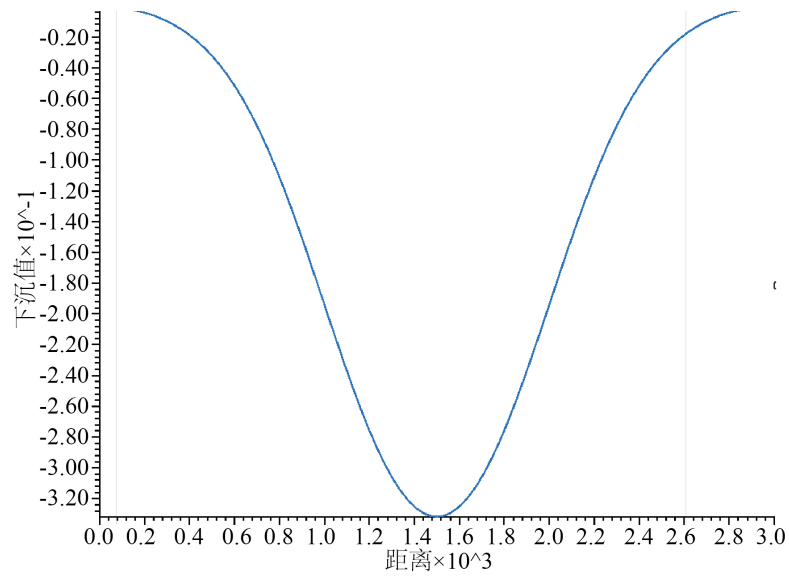
通过模拟计算，地表的 $\text{最大下沉值为 } 331.7 \text{ mm}$ ，水平移动最大值分别为  $128.7 \text{ mm}$  和  $-128.8 \text{ mm}$ ，地表移动云图与曲线图“如图 2”所示。

## 2.3. 地表移动实测说明

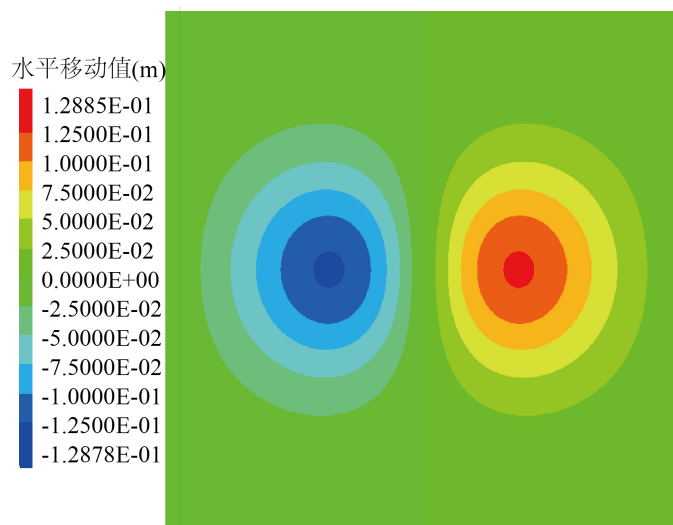
两个宽条带开采工作面开采时，地表沿走向及倾向布设观测钻，平面位移采用网络 CORS 观测技术，用美国天宝 DINI03 型电子水准仪进行垂直位移观测，实测最大下沉值为  $280 \text{ mm}$ ，实测数据与数值模拟计算相吻合，验证了数值模拟计算的可靠性。



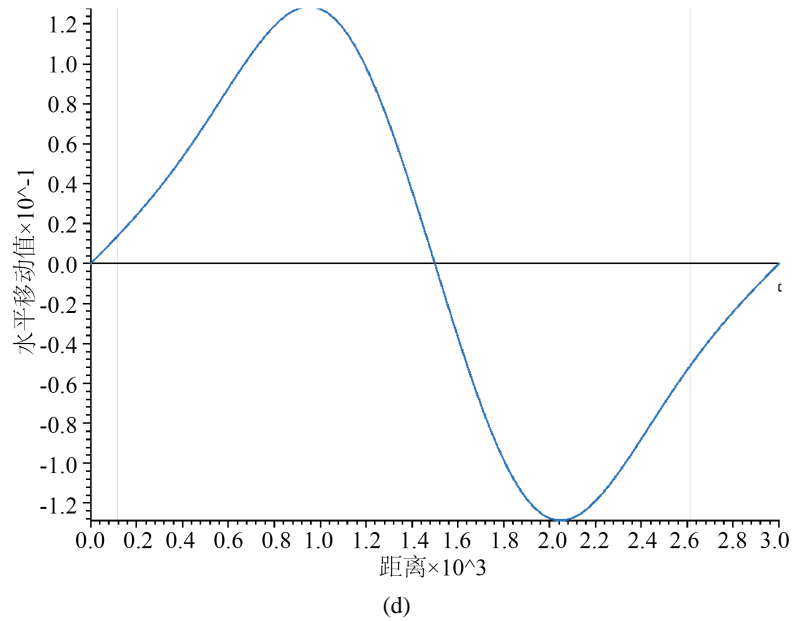
(a)



(b)



(c)



**Figure 2.** Numerical simulation map of surface movement of conglomerate layer. (a) Contour of the subsidence; (b) Surface subsidence curves; (c) Contour of the horizontal displacement; (d) Surface horizontal displacement curves  
**图 2.** 含砾岩层地表移动数值模拟图。(a) 地表下沉云图; (b) 地表下沉曲线图; (c) 地表水平移动云图; (d) 地表水平移动曲线图

### 2.4. 影响因素分析

为了研究开采中采长、采厚、采宽、主关键层厚度对地表沉陷的敏感性影响，进行了正交试验分析。建立了 4 因素 4 水平的正交试验表  $L_{16}(4^4)$  “见表 2”。

**Table 2.** Numerical simulation reference of influencing factors  
**表 2.** 影响因素的数值模拟参考

水平	采长/m	采宽/m	采厚/m	砾岩厚/m
1	800	100	3.2	90
2	900	110	4.2	100
3	1000	120	5.2	110
4	1100	130	6.2	120

根据以上正交试验设计和力学参数，采用数值模拟软件，按正交试验表  $L_{16}(4^4)$  展开了 16 组的数值模拟计算。记录每个方案的判定指标，即地表最大下沉值，“见表 3”。

**Table 3.** Orthogonal test scheme and simulation results  
**表 3.** 正交试验方案及模拟结果

序号	a/m	b/m	h/m	H/m	W/mm
1	1	1	1	1	143
2	1	2	2	2	273
3	1	3	3	3	269

Continued

4	1	4	4	4	266
5	2	1	2	3	156
6	2	2	1	4	299
7	2	3	4	1	308
8	2	4	1	2	306
9	3	1	3	4	168
10	3	2	4	2	335
11	3	3	3	3	331
12	3	4	2	1	337
13	4	1	4	2	179
14	4	2	3	1	349
15	4	3	2	4	340
16	4	4	1	3	345

极差分析法是用来判断控制因素对判定指标影响主次的一种方法，可判定各因素产生的系统响应。对各主控因素极差进行求解“见表 4”，对各因素的极差值进行比较，从而确定地表沉陷因素的敏感性大小。

Table 4. Range analysis of main controlling factors of surface subsidence

表 4. 地表沉陷主控因素极差分析表

W	a/m	b/m	h/m	H/m
$W_\alpha$	951	646	1093	1137
$W_b$	1069	1256	1106	1093
$W_h$	1171	1248	1117	1101
$W_H$	1213	1254	1088	1073
$\bar{W}_\alpha$	237.75	161.5	273.25	284.25
$\bar{W}_b$	267.25	314	276.5	273.25
$\bar{W}_h$	292.75	312	279.25	275.25
$\bar{W}_H$	303.25	313.5	272	268.25
R	65.5	152.5	7.25	16

$W_\alpha$ 、 $W_b$ 、 $W_h$ 、 $W_H$  分别为相对于参数采长、采宽、采厚、主关键层厚度 4 个水平的 4 次地表最大下沉值之和； $\bar{W}_\alpha$ 、 $\bar{W}_b$ 、 $\bar{W}_h$ 、 $\bar{W}_H$  为 4 次地表最大下沉值之和的平均值；R 为各因素的极差值。

根据表 4 中的极差值大小，即  $R_b > R_\alpha > R_H > R_h$ ，确定各主控因素的影响主次顺序为：采宽 > 采长 > 主关键层厚度 > 采厚。通过正交极差分析可知：地表最大下沉值的大小与主关键层厚度因素成负相关的关系，即随主关键层厚度的增大而减小；与采长、采宽、采厚因素成正相关的关系，即随采长、采宽、

采厚的增大而增大。

### 3. 砾岩厚度对覆岩下沉影响分析

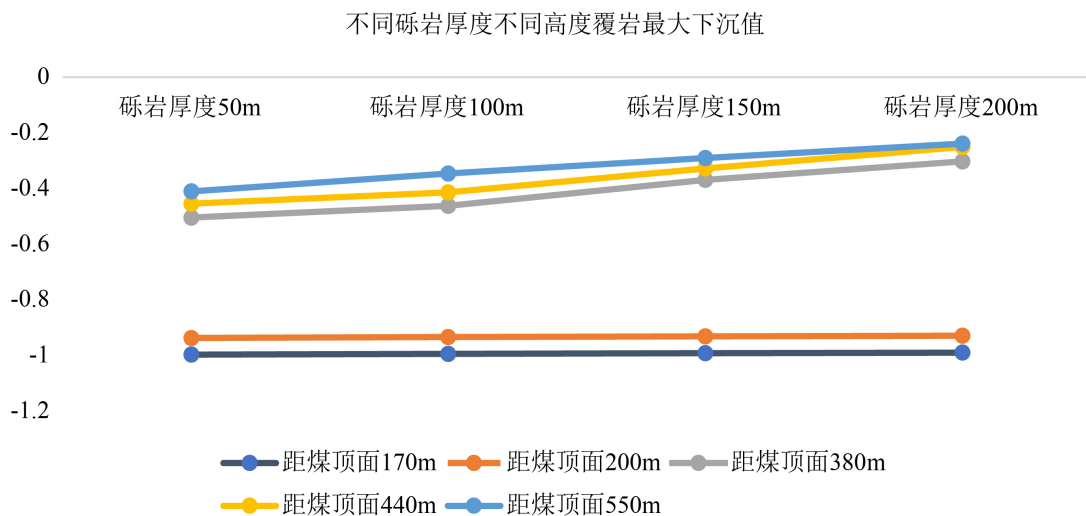
为了揭示宽条带开采不同厚度砾岩作用于覆岩内部岩层下沉机理，砾岩厚度分别按 50 m、100 m、150 m、200 m 进行 4 组数值模拟实验，各组模拟计算方案、岩层参数、边界条件、网格密度均相同。各组实验分别在采空区正上方距煤顶面 170 m、200 m、380 m、440 m、550 m 处建立观测线，表 5 为不同厚度砾岩模拟计算的不同高度岩层处最大下沉值。距煤顶面 170 m、200 m 处岩层位于砾岩下方，距煤顶面 380 m、440 m 处岩层位于砾岩内，距煤顶面 550 m 处岩层位于砾岩上方。

**Table 5.** Table of maximum subsidence values calculated by each group of simulation experiments for different heights of rock formations

**表 5.** 各组模拟实验计算不同高度岩层最大下沉值表

	距煤顶面 170 m	距煤顶面 200 m	距煤顶面 380 m	距煤顶面 440 m	距煤顶面 550 m
砾岩厚度 50 m	0.998	0.938	0.505	0.455	0.411
砾岩厚度 100 m	0.995	0.935	0.463	0.414	0.347
砾岩厚度 150 m	0.993	0.932	0.369	0.328	0.291
砾岩厚度 200 m	0.991	0.930	0.303	0.251	0.239

由图 3 可见，砾层内部及其上部岩层下沉量随着砾岩厚度的增加而减少，砾岩下部岩层下沉量几乎相等，不受砾岩厚度的影响。由各高度观测下沉可见，砾岩厚度越大，砾岩上部岩层下沉量越小，砾岩下部各岩层下沉量不受砾岩所控制。这是由于随着开采工作面推进长度增加，当覆岩破坏波及到砾岩层时，砾岩则对其上部岩层下沉起到屏蔽作用，同时，砾岩硬度大，不易断裂，有效地控制并减缓上覆岩层移动，使地表下沉值偏小，这就是砾岩控制地表变形的机理。



**Figure 3.** Maximum subsidence value of overlying strata at different thicknesses of conglomerate and at different heights from coal seams

**图 3.** 不同砾岩厚度、距离煤层不同高度处覆岩最大下沉值



## 4. 砾岩层能量分析

### 4.1. 关键层钻孔分析

为了研究在煤层开采过程中，关键层内部及与其邻近岩层移动状态，在该区域条带开采工作面开采后，在其上方地表施工了一个钻孔，钻探施工中有漏水现象，说明岩层中存在离层[11]。终孔后超声成像测井显示离层带分布在 252~510 m、551~692 m、693~728 m 处。离层高度 1.1~3.3 m，平均高度为 2.2 m。

开采区域上覆岩体存在多个离层空间，这些离层空间承担了地表变形当量，从而导致地表下沉量偏小。

### 4.2. 砾岩层内部能量体应变、 $\tan\beta$ 函数关系

煤层开采过程中，上覆岩体发生断裂、弯曲等破坏，同时也发生着能量转移，根据岩体力学知识[12]，开采过程中砾岩层能量平衡方程可表达为：

$$W = W_0 + W_1 - W_2 - W_3 - W_4$$

式中： $W_0$ —砾岩层载荷对岩层所做的功；

$W_1$ —岩层断裂、弯曲过程所做的功；

$W_2$ —岩层塑性变形消耗的能量；

$W_3$ —岩层节理的能量消耗；

$W_4$ —岩层具有的应变能能量。

砾岩层能量可用 UDEC 软件中 fish 函数对不同岩层厚度计算获得。3 煤与砾岩层间距尺寸是决定砾岩层能量的主要因素。

利用 UDEC 模型，对砾岩层分别施加 35 MJ、39 MJ、43 MJ、48 MJ、51MJ 的能量，模拟得砾岩层体应变及  $\tan\beta$  “如表 6” 所示。

**Table 6.** The relationship table between the energy of the conglomerate layer and the volume strain and  $\tan\beta$   
**表 6.** 砾岩层能量与体应变、 $\tan\beta$  间关系表

能量(MJ)	体应变(m)	$\tan\beta$
35	0.1	2.6
39	0.12	2.5
43	0.15	2.4
48	0.18	2.4
51	0.2	2.4

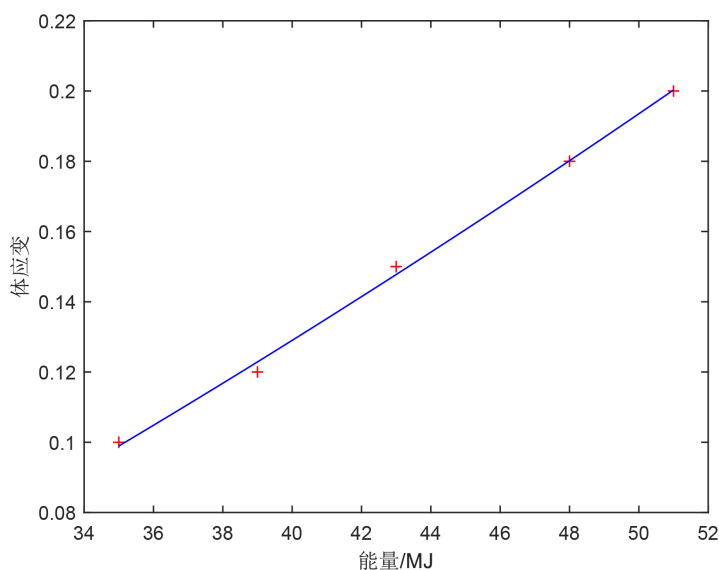
根据表 6 中数据绘制砾岩层能量体应变、砾岩层能量与  $\tan\beta$  的关系曲线“如图 4”、“如图 5”所示。由图可见：对应不同的能量，平均体应变的大小随着能量加大逐渐加大。 $\tan\beta$  值随着能量增长逐渐增大，但增长的幅度不大。当能量达到一定值时， $\tan\beta$  值不再变化。

能量与体应变的关系(能量为横坐标  $x$ ，体应变为竖坐标  $y$ )为：

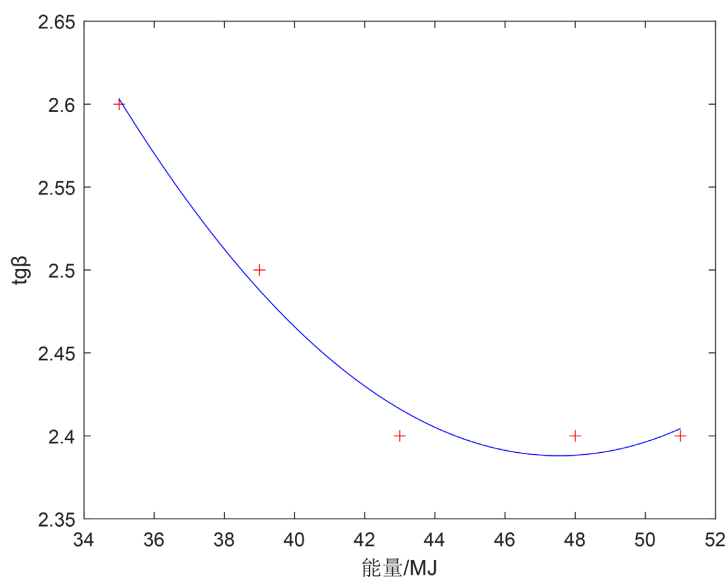
$$y = 2.907 * 10^{-5} x^2 + 0.004x - 0.071$$

能量与  $\tan\beta$  的关系(能量为横坐标  $x$ ， $\tan\beta$  为竖坐标  $y$ )为：

$$y = 0.001 * x^2 - 0.130x + 5.480$$



**Figure 4.** The relationship between energy and volume strain  
**图 4.** 能量与体应变的关系



**Figure 5.** The relationship between energy and  $\tan\beta$   
**图 5.** 能量与  $\tan\beta$  的关系

通过研究揭示了砾岩层通过自身体应变吸收煤层开采引起的覆岩变形，控制了岩层移动向地表的传播，使地表下沉量偏小。

## 5. 结论

1) 根据关键层理论和煤岩层组合，确定了该矿区煤层开采上覆砾岩层为主关键层。模拟了该矿区的开采下沉，并根据正交试验判断出影响因素顺序为采宽、采长、主关键层厚度、采厚。两个宽条带开采区域，实测地表下沉量没有明显突增现象，说明砾岩没有断裂，验证数值模拟计算的可靠性。

2) 模拟计算了不同砾岩厚度, 岩层内部及地表下沉值分布规律。数值模拟表明: 砾岩厚度越大, 砾岩层及其上部岩层下沉量越小, 砾岩层下部岩层下沉量不受砾岩控制。砾岩能够有效控制地岩层断裂向地表传播, 控制砾岩层之上岩层下沉向地表方向发展。

3) 在条带工作面开采后, 其上方地表钻探成像显示: 岩层中存在多个离层承担了地表变形当量。则在主关键层不发会断裂的条件下, 宽条带工作面开采地表变形值偏小, 能够有效地保护地表建筑物。

4) 模拟计算了砾岩层受采动影响自身运移规律, 通过自身应变吸收量煤层开采引起的覆岩变形, 建立了砾岩层能量与体应变、 $\tan\beta$  间定量函数表达式, 揭示厚砾岩内部移动控制了岩层移动向地表传播机理。

综上可知, 本文揭示了砾岩的控制覆岩断裂发育向上传播、减缓地表下沉量的覆岩内部机理, 为村庄下安全开采设计提供了技术依据。

## 基金项目

山东省自然科学基金(ZR2020MD024); 山东省自然科学基金(ZR202103070165)。

## 参考文献

- [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(3): 2-7.
- [2] 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(5): 21-25.
- [3] 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(2): 1-4.
- [4] 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(8): 1289-1295.
- [5] 左建平, 孙运江, 文金浩, 等. 岩层移动理论与力学模型及其展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 1-11+87.
- [6] 高超, 徐乃忠, 何标庆, 等. 关键层对特厚煤层综放开采地表沉陷规律的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 229-234.
- [7] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男, 等. 基于关键层理论的地表偏态下沉影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1322-1327.
- [8] 郝彬彬, 王春红, 洛锋. 基于关键层理论的地表沉陷规律研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(4): 127-129.
- [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.
- [10] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [11] Zhao, J.H., et al. (2020) Distribution Characteristics of Floor Pore Water Pressure Based on Similarity Simulation Experiments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **79**, 4805-4816.
- [12] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 101-104.