

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0681-06

# 特厚煤层巷道顶板离层关键影响因素模拟研究

严红, 张吉雄, 王思贵, 曹远威

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 煤岩层离层破断是采掘过程中特厚煤层巷道顶板失稳的前兆。研究顶板离层的关键影响因素, 控制现有顶板离层数值和离层区域再生数量是降低离层破断进而有效避免顶板失稳的基础工作。综合现场调研、数值模拟、正交试验及理论分析方法, 对特厚煤层巷道顶板离层监测原理、离层影响因素分类、离层模拟方法及关键离层影响因素进行了详细分析: 1) 离层的影响因素分为3大类(支护参数类、煤岩性质类和巷道结构布置类)和15小类; 2) 详细比较有限元和离散元中离层的模拟计算方法, 确定块体镶嵌系统式离散元软件模拟离层; 3) 基于 UDEC 软件和正交试验设计方法, 对15个离层影响因素创建的50个数值模型进行模拟和计算分析, 得出3大类影响因素程度序列图以及影响离层的6个关键影响因素。

**关键词** 特厚煤层; 离层; 影响因素; 正交试验设计

**中图分类号** TD 823

**文献标志码** A

## Simulation study on key influencing factors to the roof abscission of the roadway with extra-thick coal seam

YAN Hong, ZHANG Jixiong, WANG Sigui, CAO Yuanwei

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** The roof abscission of the coal seam and rock strata is the omen to the final losing stability of the roadway with extra-thick coal seam (RETCS) during the excavation and mining activities. It is a basic research on the key influencing factors of the roof abscission as this study can effectively control the value and regeneration of the roof abscission and decrease the roof abscission occurrence ratio, which can prevent the roof caving accidents. Combined with field observation, numerical simulation, orthogonal test and theoretical analysis methods, the influencing factors of the roof abscission of the RETCS are classified and the simulation methods of the roof abscission and key influencing factors of the roof abscission of the RETCS are analyzed in detail. Finally, the main results are as follows: 1) The influencing factors of the roof abscission are classified into 3 broad categories including supporting parameters, coal seam and parting properties and roadway structural arrangement and 15 concrete types. 2) The simulation and calculation methods between finite element and discrete element are compared and the latter software with block inlay type are determined and chosen. 3) Based on UDEC and orthogonal test, a total of 50 numerical models according to the 15 influencing factors of the roof abscission are

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QNA50); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB13B03); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227905); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0728)

作者简介: 严红(1985—), 男, 四川省南充市人, 博士后, 讲师, 从事煤矿巷道围岩控制方面的研究。

E-mail: linodex@163.com

Tel: 15950689619

built and simulated and 3 categories of influencing sequence chart and 6 key influencing factors are obtained.

**Key words** extra-thick coal seam; roof abscission; influencing factors; orthogonal test

对于采掘过程中易引发垮冒灾害的特厚煤层回采巷道,开展顶板离层关键影响因素研究有利于明晰巷道顶板灾变监测的重点以及指导具体支护方案设计。鞠文君<sup>[1]</sup>给出广义的离层含义并分析了影响离层的 6 个主要因素:地应力、围岩力学性质、围岩结构、锚杆支护参数、巷道断面及护巷煤柱尺寸。B.K. Hebblewhite<sup>[2]</sup>、陆庭侃等<sup>[3]</sup>采用理论分析和现场监测方法得出影响顶板离层的 5 个因素:岩层受拉、岩层间挠度不一致、高水平应力作用、层间力学特性差异、地下水作用因素。陈勇等<sup>[4]</sup>结合旗山煤矿地质条件,并结合数值模拟方法得出顶板离层的 5 个主要影响因素:围岩力学性质、埋深、巷道宽度、直接顶厚度以及侧压系数。张百胜等<sup>[5]</sup>结合 ANSYS 软件模拟了层状顶板离层变形特征。吴德义等<sup>[6-7]</sup>对深部复合顶板离层判据和特征开展了研究。本文在前人研究的基础上,结合特厚煤层巷道地质特征,对离层的影响因素分类、离层模拟方法及关键离层影响因素开展研究。

## 1 离层监测原理及影响因素分类

### 1.1 基本原理

煤矿现场对于厚煤层巷道锚杆索支护顶板离层监测普遍采用机械式深浅双基点离层仪。它主要由锚固爪、固定管、测量钢丝绳和刻度尺构成,其中:锚固爪是孔内基点固定部件,由带倒刺的塑料套件组成;深、浅基点分别布置在锚索和锚杆锚固点之上 100~300 mm。顶板离层仪除标明离层刻度外,增加红、黄、蓝 3 种颜色逐级表示顶板离层松动的严重程度。一般认为:蓝色表示顶部松动离层值较小,处于较稳定的状态;黄色表示离层松动已达到警界值;红色则表示顶板离层松动值较大,已进入危险的状态,必须采取处理措施。顶板离层仪器用于监测巷道顶板内部煤岩层的位移变化以及评判顶板支护安全性程度。

尽管煤矿井下使用的离层仪形状多样,功能模块数量不一,但其基本功能核心——对煤岩层离层变形情况监测且监测基本原理不变,即通过巷道服务期间顶板煤岩层变形带动监测点下移。而离层位移发生主要是由于煤岩层间性质、刚(强)度差异或

厚煤层节理发育处受高应力作用导致离层空间扩大<sup>[8]</sup>,因此可通过不同监测点与顶板表面间相对位移以及监测点之间的相对位移反推离层位置和大小,并结合离层数值大小检验顶板支护状况和分析支护方案的合理性。顶板离层仪在煤岩层中基本监测布置结构和原理如图 1 所示。

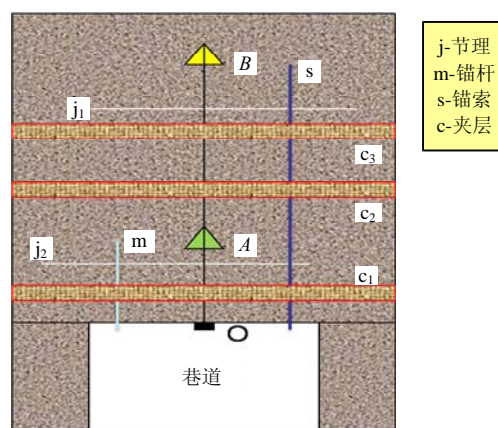


图 1 特厚煤层巷道顶板离层监测原理

Fig.1 Monitoring principle of the roof abscission device

1) 离层仪安装结束,初始煤岩保持稳定,  $A$ ,  $B$  两基点值

$$\text{Data}A = \text{Data}B = 0 \quad (1)$$

2) 监测一段时间,由于夹层与煤性质差异大,在水平和垂直应力作用下弯曲变形特征有较大区别,两者在界面处发生离层;另外,厚煤层中节理裂隙发育,在高水平应力作用下,水平节理在径向方向易产生扩展,从而在煤层内部形成离层空间,此时  $A$ ,  $B$  两基点值发生改变,改变量分别表示锚杆或锚索锚固点以下出现离层现象。

$$\text{Data}A = W_0; \quad \text{Data}B = V_0$$

$A$ ,  $B$  之间离层变化值为

$$S = |\text{Data}A - \text{Data}B| = |W_0 - V_0| \quad (2)$$

3) 随监测时间、顶板受采动影响程度或支护强弱等因素不同,深浅基点离层值变形也不断发生改变,在第  $n$  天深浅基点变形表示为

$$\text{Data}A = W_n; \quad \text{Data}B = V_n$$

$A$ ,  $B$  之间离层变化值为

$$S_n = |\text{Data}A - \text{Data}B| = |W_n - V_n| \quad (3)$$

## 1.2 影响因素分类

特厚煤层巷道支护服务过程中,其顶板下沉主要由离层值和煤岩的碎胀变形值组成。从宏观矿压显现而言表现为弯曲下沉;从厚煤层顶板内部细观变形角度而言则表现为层间分离和节理裂隙径向延伸扩展,即离层现象产生<sup>[9]</sup>,如图2所示。通过对平朔矿区井工煤矿、金海洋集团五家沟煤矿及同煤集团同忻矿多条特厚煤巷离层变形情况的广泛调研发现:特厚煤层巷道顶板离层值悬殊较大,甚至同一巷道不同区域处顶板离层变形值也存在较大区别。而影响离层变形因素很多,总结归纳主要影响因素可由3方面合计15个因素组成,如图3所示。

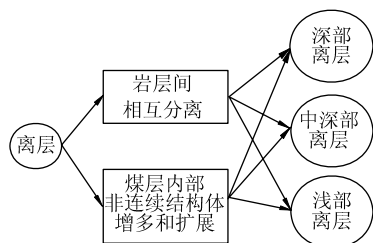


图2 特厚煤层巷道顶板离层形式

Fig.2 Roof abscission types of the RETCS

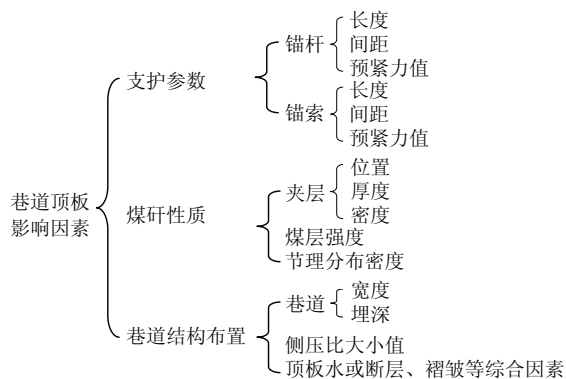


图3 特厚煤层巷道顶板主要影响因素分类

Fig.3 Main influencing factors classification of roof abscission

## 2 离层数值模拟方法

离层模拟研究结果的合理性与数值模拟软件选择密切相关,连续性软件如FLAC<sup>2D/3D</sup>,求解方法为有限元法。对于离层模拟而言,采用FLAC<sup>2D/3D</sup>进行分析时难以避免2个问题:一是支护过程中软弱夹层与其他煤岩体协同变形,即使是无支护状况下,表面围岩也不会出现冒漏现象,而呈整体性变形发展,这与现场有较大区别;二是离层研究过程中,一般需要在应力加载前在岩层交界面处增加节

理面,即Interface面,因此若出现离层现象也是在Interface面处产生,这与现场监测结果相差较大。

有限元中利用节理单元模拟软弱夹层、层面、节理等地质不连续面最早是由R.E.Goodman提出的。它是一段直接接触的平面,承受沿此界面的切向力和法向力,其应力-应变关系可简写为<sup>[10]</sup>

$$\begin{Bmatrix} \tau_s \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta v_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\tau_s$ ,  $\sigma_n$  分别为切向应力及法向应力;  $K_s$ ,  $K_n$  分别为节理的切向及法向刚度;  $\Delta u_s$ ,  $\Delta v_n$  分别为两侧对应点的相对切向及法向位移。

当非线性比较明显,如计算过程中顶板离层空间区域较大时,若再采用连续方法计算或连续性软件模拟,则将出现较大误差。

离散单元法最早由Cundall教授提出,岩块体结构变形过程中将嵌入点位移作用点关系表示为

$$F_n = K_n \delta_n \quad (5)$$

若原剪力为  $F_s^0$ , 则剪力增量为  $\Delta F_s$ , 现有剪切力为:

$$F_s = F_s^0 + \Delta F_s \quad (6)$$

$$\Delta F_s = K_s \delta_s \quad (7)$$

原有块体位移产生的接触脱离、嵌入或切向位移导致相邻块体作用力、位移也发生变化(如图4),根据块体间的应力和位移传递特征,又将进一步影响其他块体。在每一变形时刻内,系统中各块体都有其自身的空间位置和受力状态;并随计算时间增加,块体间相互作用,相应的空间位置也发生变化;当块体不能达到自稳状态时,则出现局部坍塌,并逐级影响相邻块体。

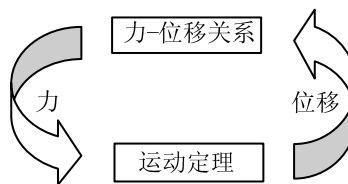


图4 岩块体变形分析循环过程

Fig.4 Deformation analysis circulation process to rock block

巷道顶板离层变形是一种非连续性过程,在掘进或工作面回采过程中顶板岩层之间或煤层内部均可能出现较大的离层空间区域;因此采用连续性模拟分析软件计算顶板离层值与现实情况差距较大。而采用离散型软件,其模拟计算过程和结果与现场更为接近。

3 顶板离层关键影响因素

选择采用正交试验设计对离层影响因素组合方案进行优化设计。同时，为了提高组合方案中影响因素对顶板离层变形的针对性，从支护参数、煤矸性质和巷道结构布置 3 大类分别开展正交试验设计<sup>[11]</sup>，并利用离散型软件 Universal Distinct Element Code (UDEC)对组合方案模拟分析<sup>[12]</sup>，分别得出 3 大类中影响顶板离层的关键因素。

3.1 正交试验设计

分别从支护参数、煤矸性质和巷道结构布置 3 大类中各自挑选出主要影响因素，其中：支护参数类为 6 因素 5 水平，选择  $L_{25}(5^6)$  正交表；煤矸性质和巷道结构布置参数类分别为 5 因素 4 水平和 4 因素 3 水平，选择  $L_{16}(4^5)$  和  $L_9(3^4)$  正交表；且各因素间无交互性，如表 1~3 所列。

表 1 支护参数类主要因素及水平

Table 1 Main factors and levels to supporting parameters type

因 素	水 平				
	1	2	3	4	5
锚杆长度( $X_1$ )/m	1.2	1.6	2	2.4	2.8
锚杆支护间距( $X_2$ )/m	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
锚杆预紧力值( $X_3$ )/kN	20	50	70	90	110
锚索支护长度( $X_4$ )/m	4	6	8	10	12
锚索支护间距( $X_5$ )/m	0	1.2	1.8	2.4	3.0
锚索预紧力值( $X_6$ )/kN	80	120	160	200	240

表 2 煤矸性质类主要因素及水平

因 素	水 平			
	1	2	3	4
夹层位置( $Y_1$ )	锚杆锚固区内	锚杆锚固点上邻近处	锚杆与锚索锚固点之间	锚索锚固点之上
夹层厚度( $Y_2$ )/m	0.1	0.3	0.5	0.7
夹层密度( $Y_3$ )	极大	大	中	小
煤层强度( $Y_4$ )	强	中	弱	极弱
煤层节理分布密度( $Y_5$ )	极大	大	中	小

表 3 巷道结构布置参数类主要因素及水平

Table 3 Main factors and levels to the roadway structural arrangement parameters type

因 素	水 平		
	1	2	3
巷道宽度( $Z_1$ )/m	3	5	7
巷道埋深( $Z_2$ )/m	200	600	1 000
侧压比大小( $Z_3$ )	1.2	2.4	3.2
顶板水或断层、褶皱等综合因素( $Z_4$ )	大	中	小

3.2 优选参数数值模拟分析

利用 UDEC4.0 共计创建 50 个模型，模型长×高=55 m×48 m，本构模型采用 M-C 塑性模型，节理材料模型采用节理面接触-库仑滑移模型。巷道埋深设置为 500 m。结合平朔集团井工二矿典型特厚煤层巷道顶板煤岩参数的测试结果，对模型煤岩层进行赋值，以支护参数类模拟方案为例，建立的初始模型如图 5 所示。其中夹层设置 3 层，厚度分别为 0.7，0.6 和 0.7 m，位于模型  $X$  轴向 20，23.7 和 27.3 m 处； $Y$  轴向根据参数方案中锚杆 2.4 m、锚索 7.5 m 比较，位于锚杆锚固区域内、锚杆索锚固点间和锚索锚固点之上，其中煤层厚度(含夹层)为 17 m。利用 jset 和 crack 命令划分各单层节理。煤岩参数值如表 4 所列。

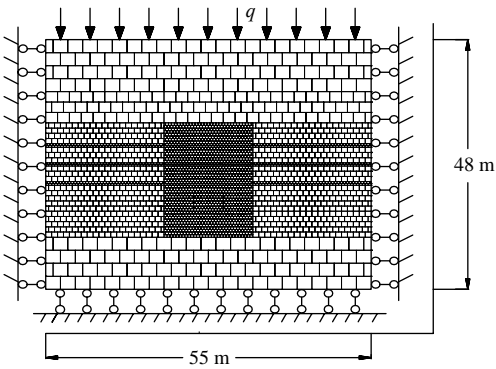


图 5 数值模型初始结构图

Fig.5 Initial structural diagram of the simulation model

表 4 模型煤岩物理力学参数

Table.4 Physico-mechanical parameters of coal seam and rock strata in the model

岩层种类	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏结力/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	抗拉强度/MPa
中砂岩	2 600	3.60	4.80	3.0	32	5.0
细砂岩	2 200	0.78	0.85	1.2	35	0.9
煤	1 300	0.16	0.24	0.5	38	0.4
泥岩	2 000	0.22	0.30	0.3	35	0.1
粉砂岩	2 100	0.32	0.40	0.7	34	0.55

当模型运行至平衡后开挖巷道。特厚煤层巷道宽×高=5.0 m×3.5 m，巷道煤顶(含夹层)为 13.5 m。限于文章篇幅，以煤矸性质类模拟方案为例，主要考虑特厚煤层巷道顶板中夹层位置、夹层厚度、含夹层密度、煤层强度、煤层节理程度共计 5 个因素。对夹层位置主要确定了锚杆锚固区内、锚杆锚固点上 2.5 m 处区域、锚索锚固点下 2.5 m 处区域以及锚索锚固点上 3 m 处区域，巷道埋深 300 m。选择锚杆索支护参数为：顶板锚杆长 2.4 m，预紧力 110

kN, 间距 0.8 m; 煤帮锚杆长 1.7 m, 预紧力 50 kN, 间距 1 m; 锚索长 8 m, 预紧力 160 kN, 间距为 0。

离层不仅发生在物理力学性质具有较大差异的岩和岩(煤)层之间, 在厚煤层内部节理处也易出现离层域, 在扰动应力作用下煤层内部出现离层。在分析离层时记录浅部和深部基点值, 并利用绝对差值作为离层总值进行比较; 模型中特厚煤层巷道开挖支护后, 设置巷道顶板中点垂直以上 0.6 m(A) 和 13 m(B)处两监测点, 待模型运行至 500 时步时, 记录离层变形值, 并将两者之差作为终值进行记录。煤矸性质类中方案 1: 夹层位置为锚索锚固区外 3 m 处; 夹层厚度 0.4 m; 夹层密度极大; 煤层强度大; 煤层节理程度极大。运行 1 000 时步后对应的模拟方案 1 变形和应力图如图 6 所示。

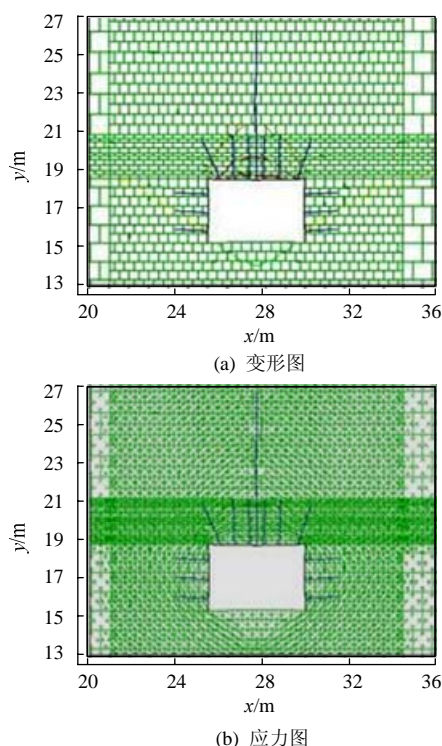


图 6 煤矸性质类方案 1 变形和应力图  
Fig.6 Deformation and stress of scheme No.1 of coal and parting properties parameters type

通过对特厚煤层巷道中支护参数类、煤矸性质类以及结构布置参数类共计 50 个不同方案进行模拟, 并对运算结果进行分析整理, 影响特厚煤层巷道离层变形的关键因素主次顺序如图 7~9 所示。

对于支护参数类因素而言(如图 7), 模拟结果显示: 锚杆长度、锚杆间距和锚索间距对特厚煤层巷道顶板离层变形影响显著, 影响最不显著因素为锚索长度。巷道支护过程中, 锚杆长度因素有利于平行锚杆方向控制顶板煤体稳定性, 而锚杆间距大小

决定了顶板表面及锚固整体横向结构稳定性, 锚索间距决定了索锚固点及深浅部煤层集中锚固区域大小。该模拟结果对特厚煤巷顶板安全高效支护起重要作用。因此, 对于支护参数类因素而言, 首先应该确定合理的锚杆长度和间距, 在此基础上, 再分别确定锚索间距、锚杆(索)预紧力和锚索长度以及其他参数值。

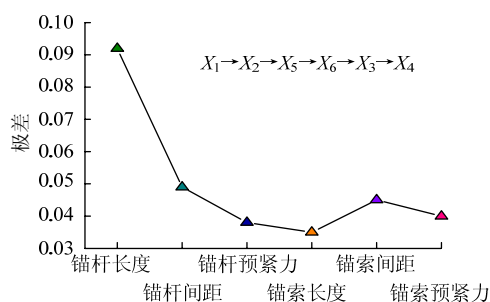


图 7 支护参数类影响因素程度序列图  
Fig.7 Influencing factors degree to supporting parameters type

对于煤矸性质类因素而言(如图 8), 计算分析结果显示煤层节理程度、煤层强度和夹层位置因素对特厚煤层巷道顶板离层变形影响显著。由于顶板主要由厚煤层构成, 煤层性质对离层变形至关重要: 煤层强度越大、煤层节理程度越低, 同一支护方案下顶板离层变形程度相对越小。同时, 煤层中的节理化离层对特厚煤层巷道顶板安全性而言尤为关键; 其次, 夹层位置在夹层类影响因素中起关键作用。总之, 在考虑煤矸性质类因素对厚煤顶离层变形影响时, 首先需要确定煤层强度, 其次是分析煤层节理发育情况, 然后是夹层分布位置及其他因素, 其中煤层强度是影响离层变形最关键因素。

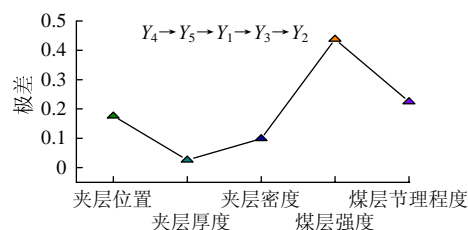


图 8 煤矸性质类影响因素程度序列图  
Fig.8 Influencing factors degree to coal seam and parting properties parameters type

对于巷道结构布置参数类因素而言(如图 9), 模拟结果显示: 巷道埋深是影响特厚煤层巷道顶板离层变形最关键因素, 其次是顶板水或断层、褶皱等综合因素和巷道宽度。埋深在一定程度上决定了巷道围岩地应力大小, 因此选择支护方案时需将巷道



埋深作为关键因素进行考虑；顶板水或断层、褶皱等综合因素弱化了特厚煤顶强度或造成局部高构造应力，从而增加了顶板离层变形量；另外，巷道宽度较大时，顶板离层变形显著。在巷道埋深小，顶板水或断层、褶皱等综合因素影响较弱情况下，设计顶板支护方案时需将巷道宽度放在首要位置进行考虑。

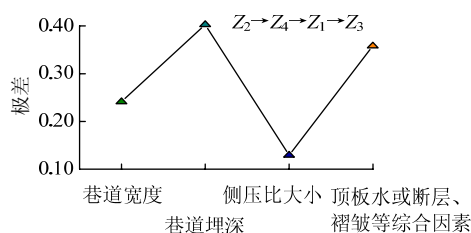


图 9 巷道结构布置参数类影响因素程度序列图

Fig.9 Influencing factors degree to structural arrangement parameters type

## 4 结 论

1) 分析了特厚煤层巷道顶板离层监测的原理，并结合大量现场调研和理论分析将顶板离层的 15 个主要因素分为 3 大类：支护参数类、煤矸性质类和巷道结构布置类。

2) 比较研究了有限元和离散元离层模拟方法，分析了有限元软件中离层模拟中面临的问题，得出离散元模拟特厚煤层巷道顶板离层的合理性。

3) 结合 UDEC 软件模拟和正交试验设计方法，对 3 大类分别建立 3 个正交表和 50 个数值模型，计算分析得出影响特厚煤层巷道顶板离层的 6 个关键因素，分别为支护参数类的锚杆长度和锚杆间距，煤矸性质类的煤层节理度和煤层强度，巷道结构布置类的巷道埋深和顶板水或断层、褶皱等综合因素。

## 参考文献:

- [1] 鞠文君. 锚杆支护巷道顶板离层机理与监测[J]. 煤炭学报, 2000, 25(增刊 1): 58-61.  
JU Wenjun. Monitoring technology for rock bolting engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(Sup 1): 58-61.
- [2] HEBBLEWHITE B K, LU T. Geomechanical behaviour of laminated, weak coal mine roof strata and the implications for a ground reinforcement strategy[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 147-157.
- [3] 陆庭侃, 刘玉洲, 许福胜. 煤矿采区巷道顶板离层的现场观测[J]. 煤炭工程, 2005, 12(11): 62-64.  
LU Tingkan, LIU Yuzhou, XU Fusheng. Field observation of the roof abscission of the roadway in underground coal mines[J]. Coal Engineering, 2005, 12(11): 62-64.
- [4] 陈勇, 柏建彪, 李传坤. 顶板离层主要影响因素分析[J]. 能源技术与管理, 2007, 12(6): 29-31.  
CHEN Yong, BAI Jianbiao, LI Chuankun. Main influencing factors analysis of the roof abscission[J]. Energy Technology and Management, 2007, 12(6): 29-31.
- [5] 张百胜, 康立勋, 杨双锁. 大断面全煤巷道层状顶板离层变形模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 264-267.  
ZHANG Baisheng, KANG Lixun, YANG Shuangshuo. Numerical simulation on roof separation and deformation of full seam roadway with stratified roof and large section[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 264-267.
- [6] 吴德义, 闻广坤, 王爱兰. 深部开采复合顶板离层稳定性判别[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 252-257.  
WU Deyi, WEN Guangkun, WANG Ailan. Discrimination of stability between layers of compound roof in deep mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 252-257.
- [7] 郝英奇, 王爱兰, 吴德义. 深部开采煤巷复合顶板层间离层确定[J]. 广西大学学报, 2010, 35(6): 914-919.  
HAO Yingqi, WANG Ailan, WU Deyi. Determination of the interlayer separation of complex roof in deep coal tunnel[J]. Journal of Guangxi University, 2010, 35(6): 914-919.
- [8] 张农, 袁亮. 离层破碎型煤巷顶板的控制原理[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 34-38.  
ZHANG Nong, YUAN Liang. Control principle of separating and broken roof rock strata in roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 34-38.
- [9] 严红. 特厚煤层巷道顶板变形机理与控制技术[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [10] 周维垣, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 282-343.
- [11] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 77-101.
- [12] Itasca Consulting Group Inc. Universal Distinct Element Code User's Guide[M]. Version 4.0. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2000: 1-56.