文章编号:0253 - 9993(2008)09 - 0961 - 05

错层位巷道布置放顶煤开采关键层的稳定特征

王志强，赵景礼，张宝优，刘鹏程

（中国矿业大学（北京）资源与安全工程学院，北京　100083）

摘　要：通过理论分析错层位巷道布置关键层的稳定特点，发现接续工作面的长度对上一工作面关键层的稳定性有影响. 借鉴已有成熟的关键层理论公式，在计算中采用四边固支薄板并结合固支梁的力学特性，对错层位巷道布置关键层的稳定性进行公式推导，得出关键层跨度的极限临界值. 通过相似模拟实验，验证了错层位巷道相邻工作面关键层稳定的特点. 结果显示，错层位巷道布置随着接续工作面长度的增加造成接续工作面之间公共关键层的位置不断升高，直至地表，多个工作面之间显现出单一超长工作面关键层的特点.

关键词：错层位；巷道布置；关键层；断裂；相似模拟

中图分类号：TD823.49　　**文献标识码**：A

Stable characters of key stratum in stagger arrangement roadway layout top-coal caving mining

WANG Zhi-qiang, ZHAO Jing-li, ZHANG Bao-you, LIU Peng-cheng

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

Abstract: Through the theory analysis on the stable characters of key stratum on the roadway layouts of stagger arrangement, found the effect of the length of the connection working face on the stability of the key stratum of the former working face. Using the theoretical formula of the mature key stratum for reference, a formula derivation was made which use the sheet of the four edges clamped and mechanical properties of fixed beam in calculation on the stability of the key stratum in the stagger arrangement roadway layouts and then got the limit critical value of the span of key stratum. Through the analogous simulation experiment, verified the stable character of the key stratum of adjacent working face in the stagger arrangement roadway layouts. In summary, with the continuation of the increase on the length of the connection working face in the stagger arrangement roadway layouts, the position of the common key stratum which appears the characters of the key stratum in the overlong working face between the connection working face rises constantly and finally arrives the surface.

Key words: stagger arrangement; roadway layouts; key stratum; fracture; analogous simulation

对采场上覆岩层局部活动起控制作用的岩层称为亚关键层，而对直至地表的全部岩层活动起控制作用的岩层称为主关键层[1]. 关键层的破断将导致全部或局部上覆岩层的同步破断，引起较大范围内的岩层移动. 多年来，关键层理论在研究矿山压力等方面发挥了重要作用，并将矿山压力、岩层移动和地表沉陷 3 个学科领域有机地联系起来[2-3]. 目前，关键层理论已在各类地质条件下、各种采煤方法中得到了广泛应用. 错层位巷道布置采煤法自发明至今，已在河北、山西、河南等地广泛推广，但该采煤方法关键层理

收稿日期：2007 - 10 - 11　　**责任编辑**：柴海涛
作者简介：王志强（1980—），男，内蒙古呼伦贝尔人，博士研究生. E - mail：wzhiqianglhm@126.com

论的应用仍在类比传统放顶煤采煤方法. 为此，本文将借助成熟的关键层理论对错层位巷道布置的特点进行研究分析. 为了叙述方便，文中统一称为关键层，不作具体描述.

1 错层位巷道布置及其关键层的动态稳定性

对于既可以分层又可以一次采全高的厚煤层，可以将工作面的区段进风平巷与区段回风平巷分别布置在厚煤层的不同层位，即采用错层位巷道布置采煤法[4-5]，具体布置方式如图 1 所示. 其中，区段进风巷沿底板布置，回风巷沿顶板布置. 区段进风平巷在上一工作面稳定的采空区下掘进.

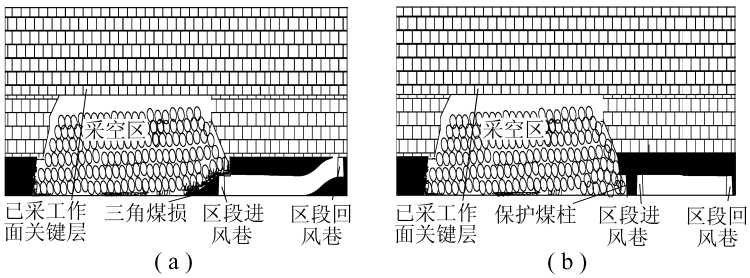


图 1 错层位巷道布置与传统放顶煤采煤法关键层

Fig. 1 Key stratum of the stagger arrangement roadway layout and traditional top-coal caving mining

由图 1（a）可以看出，当首采工作面回采工作结束后，已采工作面关键层对采场上覆岩层活动起控制作用，整个采场形成稳定结构. 出现接续工作面后，区段进风巷上方为垮落的矸石，当接续工作面开始推进时，接续工作面上方顶板不断垮落，导致关键层的跨度不断增加，当跨度增加到一临界状态时，将会断裂并垮落，不再发挥关键层的作用. 这种状况周而复始，直到上方某一岩层对上覆岩层活动起控制作用为止.

由图 1（b）可以看出，传统放顶煤区段间留有保护煤柱，保护煤柱对上方的顶板有一定的支撑作用，保护煤柱的宽度足够时，对顶板提供的支撑力可以保证上方顶板不被破坏，进而保证关键层的跨度不会达到临界值，上一工作面上方的稳定关键层在接续工作面开采过程中不会受到接续工作面的影响.

2 相似模拟试验及其结果分析

2.1 模型设计

以牛儿庄矿 2 号煤层实际生产条件进行相似模拟试验[6]，该矿采用错层位巷道布置采煤法. 工作面所采 2 号煤层，倾角平均为 25°，平均厚度为 5.5 m，工作面长度为 80 m. 煤层直接顶为粉砂岩，平均厚 3.65 m，老顶为细－中粉砂岩，厚 7.65 m；直接底为粉砂岩，厚 9.93 m.

为了达到模型能够与实际相似的目的，必须合理确定模拟实验的相似条件. 本次模拟主要包括几何模拟，模型变形和破坏过程的本构相似以及无因次参数所确定的相似等准则. 相似参数包括几何尺寸 L、容重 γ、运动时间 t、岩层抗压强度等.

采用二维试验台，其尺寸：1 600 mm × 160 mm × 1 300 mm(长 × 宽 × 高)，采用平面应力模型. 设几何相似比 $\alpha_L = 100:1$，密度比 $\alpha_\gamma = 1.5:1$. 根据相似准则给出的公式，得出时间相似比 $\alpha_t = 10$，模拟岩层的密度及强度比见表 1. 工作面布置如图 2 所示.

表 1 相似模拟试验岩层参数

Table 1 Rock parameters of the analogous simulation experiment

层 位	岩 性	模拟抗压强度/MPa	模拟密度/(g · cm^{-3})
1	细砂岩	0.528	1.80
2	粉砂岩	0.347	1.80
3	细砂岩	0.490	1.77
4	粉砂岩	0.293	1.81
5	砂泥岩	0.144	1.84
6	粉砂岩	0.293	1.81
7	中细砂岩	0.285	1.81
8	粉砂岩	0.315	1.81
9	2 号煤	0.093	0.93
10	粉砂岩	0.353	1.81

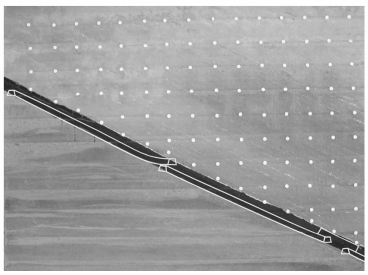


图 2　错层位巷道工作面布置

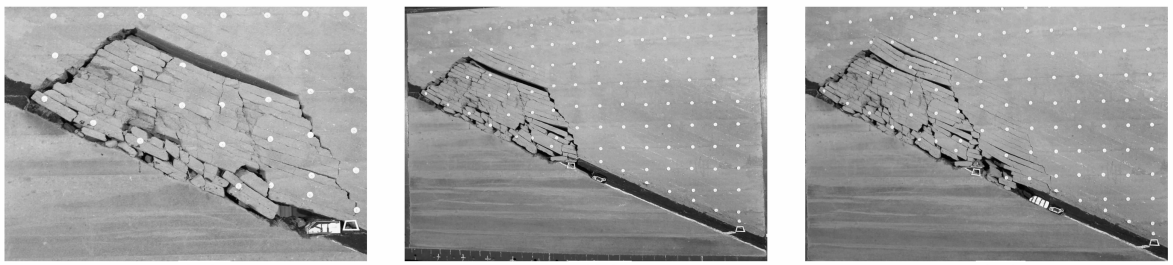
Fig. 2　Working face of the stagger arrange roadway layout

2.2　实验过程

在直接顶分别布置 12 个应变片，首采工作面从回风巷顶部开始布置，应变片间隔为 12.5 cm. 为了在开采过程中精确获取数据，采用放顶煤实验室的 7v14 数据采集器来自动采集压力数据，通过与计算机相接，把数据传输到固定的文件. 准备工作面就绪后，开掘第 1 个工作面，掘进过程中，严格按照时间相似比进行推进. 同时，采用 7v14 型数据采集器来自动采集工作面压力数据.

2.3　试验结果及其分析

由图 3（a）可看出，首采工作面回采工作结束后，工作面上方 25 m 处的中细砂岩层发挥关键层作用，整个垮落带形成一个“拱”形结构.



（a）　（b）　（c）

图 3　首采工作面与接续工作面顶板垮落

Fig. 3　Roof caving of the first and the connection coal mining face

因为区段间取消了区段煤柱，2 个工作面的顶板形成一个整体，接续工作面推进，图 3（a）中工作面上方 25 m 处的关键层跨度不断增大并达到临界值时出现断裂（图 3（b），（c）），断裂高度到达上方的关键层. 实验中发现，随接续工作面长度的增加，上方的关键层始终处于断裂→稳定→断裂的状态. 相似模拟实验获得了大量应力实验数据，经分类整理得到工作面方向支承压力的分布情况，如图 4 所示.

图 4（a）为首采工作面回采结束后支承压力分布，首采工作面布置在 0 ~ 75 m 之间. 其中 0 值是应变片失效造成的结果. 首采工作面回采全部结束并稳定后，在图中 72 ~ 75 m 处布置接续工作面区段回风平巷，避开支承应力峰值区，这与错层位巷道布置区段回风巷处于低应力区的理论分析完全一致. 从图 4（b）可以看出，首采工作面支承压力整体变化趋势没有变化，但工作面支承应力值在增加，原因如前所述，因为接续工作面增长超过首采工作面关键层临界值，关键层断裂，采场垮落高度增加，应变片承担垮落矸石增加所致.

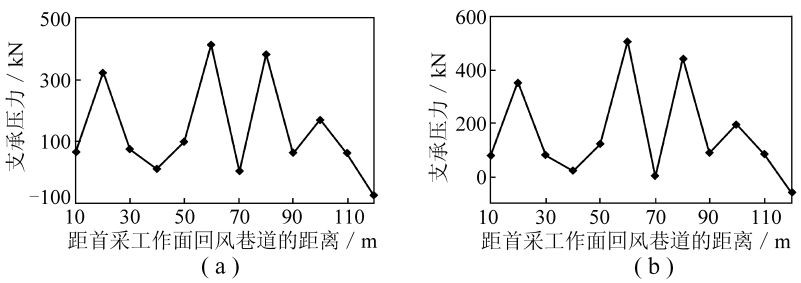
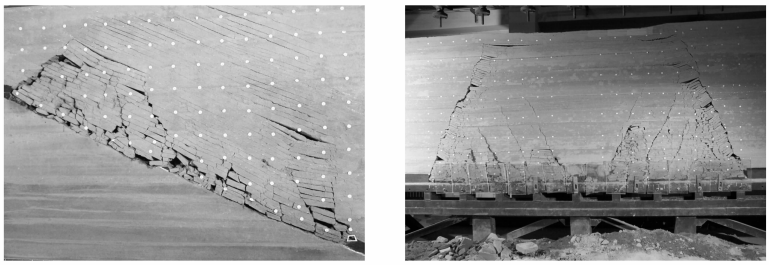


图 4　首采工作面回采结束与接续工作面推进 30 m 顶板支承压力分布

Fig. 4　Roof abutment pressure distribution after roof caving of the first coal mining face and after the connection working face's advancing 30 m

由图 5（a）可看出，接续工作面回采工作结束后，关键层位于工作面上方约 90 m 处. 工作面搭接处上方的岩层也全部出现破坏，2 个工作面形成一个“拱”型垮落带. 实验结果也表明，错层位巷道布置工作面垮落带高度到达地表时，对于地表的下沉是缓慢而且均匀的.



(a) (b)

图 5 回采结束模型与传统放顶煤工作面顶板垮落

Fig. 5 Model of stoping end and roof caving of the traditional top - coal caving working face

本文将另一传统放顶煤相似模拟实验的图片(图 5 (b)) 作为补充资料进行说明对比，传统放顶煤工作面回采结束后，区段煤柱在保持稳定的条件下，其上方顶板基本保持了完整性，工作面各自形成一个“拱”型垮落带，接续工作面之间没有互相影响. 这种形式造成的地表下沉比较剧烈且下沉坡度比较大.

2.4 试验结论

(1) 错层位巷道布置首采工作面回采工作结束后，整个垮落带形成一个“拱”形结构，从所得工作面支承压力分布情况来看，首采工作面支承压力分布与传统放顶煤分布情况相似.

(2) 区段间不存在护巷煤柱，2 个工作面的顶板形成一个整体，接续工作面推进，首采工作面稳定关键层跨度不断增大并达到临界值时出现断裂，断裂高度到达上方新的关键层.

(3) 接续工作面回采工作结束后，工作面搭接处上方的岩层全部出现破坏，2 个工作面形成 1 个“拱”型垮落带.

(4) 接续工作面长度增加造成首采工作面稳定关键层的跨度不断增加，最终导致其垮落，因而，接续工作面形成后，随着上方垮落带的增加，工作面支承压力值增大.

3 稳定关键层条件下关键层长度的计算推导

根据关键层的定义与变形特征，关键层在变形过程中，其上的部分或者全部岩层与其同步变形，但是下部岩层不与之协调变形，因为上部载荷全部由本关键层承担. 若采场上方共有 n 层岩层，自第 1 层岩层起至上方第 m ($m \leqslant n$) 层同步协调变形，第 1 层上承受的载荷集度为

$$q_1(x)\Big|_m = E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^{m} \rho g h_i \Big/ \sum_{i=1}^{m} E_i h_i^3, \tag{1}$$

式中，E_i ($i=1, 2, \cdots, m$) 为第 i 层岩层的弹性模量；h_i ($i=1, 2, \cdots, m$) 为第 i 层岩层的厚度.

根据关键层的定义可知，第 $m+1$ 层岩层成为关键层的刚度判别式为

$$q_1(x)\Big|_{m+1} < q_1(x)\Big|_m. \tag{2}$$

按式 (2) 确定的硬岩层如果满足强度条件，即下层硬岩层的破断距小于上层硬岩层的破断距，即

$$l_k < l_{k+1} \qquad (k = 1, 2, \cdots, j), \tag{3}$$

式中，l_k 为第 k 层的破断距；j 为由式 (2) 确定的硬岩层层数.

按照支撑条件，采场上方关键层模型按照四边固支板[7]计算，即

$$\omega = \frac{7q_m}{128(a^4 + 7a^2b^2 + b^4)D}(x^2 - a^2)^2(y^2 - b^2)^2,$$

式中，q_m 为式 (1) 求得的载荷集度；a，b 分别为工作面推进度和关键层长度；D 为板的抗弯刚度.

相应的弯矩为

$$M_x = D\frac{\mathrm{d}^2\omega}{\mathrm{d}x^2} = \frac{14q_m(y^2 - b^2)^2}{128(a^4 + b^4 + 4a^2b^2/7)}(6x^2 - 2a^2).$$

岩层断裂时按照固支梁计算，岩层所受正应力达到该处的抗拉极限强度时，岩层将在该处发生断裂，断裂的极限跨距 $L_{\mathrm{IT}} = h_1\sqrt{2[\sigma]/\gamma(h_1 + h_2)}$，其中，$h_1$，$h_2$ 分别为关键层厚度及其承载上覆岩层厚度；

［σ］为关键层极限抗拉强度．［σ］的求值引进横截面抗弯截面系数 W_z，对于板条的截面形状有 $W_z = b'h^2/6$，其中，b'，h 分别为截面宽度与高度，b'取单位宽度．

保证推进方向关键层不发生破断的条件：$\sigma_{max} = M_{max}/W_{max} \leqslant [\sigma]$．结合上述计算公式，得

$$M_{max} \leqslant L_{IT}^2(q_0 + q_m)/6. \tag{4}$$

在式（4）中代入具体表达式可得出 b 的取值范围，即关键层保持稳定的极限跨度临界值．

结合该矿实际岩层的赋存条件，通过式（1）～（3）确定首采工作面回采结束以后，上方 25 m 处粉砂岩层为关键层，其中承受上方各岩层对该层的作用载荷：$q_1 = 244.8$ kPa，$(q_2)_1 = 318.3$ kPa，$(q_3)_1 = 382.3$ kPa，$(q_4)_1 = 337.34$ kPa，$(q_4)_1 < (q_3)_1$．可知，粉砂岩层控制其上方的 2 层岩层．同时确定该岩层所受载荷 382.3 kPa．将各参数代入式（4），得 $b \leqslant 86$ m，即该关键层的跨度超过该数值时将会出现断裂．

4　结　　论

（1）从理论上分析了错层位巷道布置出现接续工作面后 2 个工作面形成一整体，并随接续工作面长度的增加，垮落带的高度也不断增加．

（2）通过相似模拟实验得出，与传统放顶煤采煤法比较，由于工作面搭接部分上方顶板的破坏，工作面之间处于一个垮落带内．关键层随着接续工作面长度的增加周而复始地呈现断裂→稳定→断裂的状态，造成垮落带高度不断增加，从而在工作面显现为支承压力值不断增加．

（3）得出错层位巷道布置关键层极限跨度的临界值计算公式，并得出实际情况下该矿首采工作面稳定关键层极限的跨度值．

参考文献：

［1］　钱鸣高，石平五．矿山压力与岩层控制［M］．徐州：中国矿业大学出版社，2003．
Qian Minggao，Shi Pingwu．Ground pressure and strata control［M］．Xuzhou：China University of Mining and Tehnology Press，2003．

［2］　钱鸣高，缪协兴，许家林．岩层控制中的关键层理论［J］．煤炭学报，1996，21（3）：225－230．
Qian Minggao，Miu Xiexing，Xu Jialin．Study of key strata theory in ground control［J］．Journal of China Coal Society，1996，21（3）：225－230．

［3］　许家林．岩层移动与控制的关键层理论及其应用［D］．徐州：中国矿业大学，1999．
Xu Jialin．Study and application of key strata theory in rock strata movement and its control［D］．Xuzhou：China University of Mining and Tehnology，1999．

［4］　赵景礼．厚煤层全高开采新论［M］．北京：煤炭工业出版社，2004．
Zhao Jingli．Research on new method of full-seam mining for gently inclined thick coal seams［M］．Beijing：China Coal Industry Publishing House，2004．

［5］　赵景礼．厚煤层错层位巷道布置采全厚采煤法［P］．中国专利，ZL98100544．6，2002－01－23．
Zhao Jingli．Full-seam mining method adopted the roadway layout of stagger arrangement［P］．Chinese Patent，ZL98100544．6，2002－01－23．

［6］　崔广心．相似理论与模型实验［M］．徐州：中国矿业大学出版社，1990．
Cui Guangxin．Similarity theory and simulation experiment［M］．Xuzhou：China University of Mining and Tehnology Press，1990．

［7］　付宝连．弯曲薄板功的互等新理论［M］．北京：科学出版社，2003．
Fu Baolian．A new study of the curved panel reciprocal theorem［M］．Beijing：Science Press，2003．