

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1030

大块度关键块动态结构力学行为及响应特征研究

刘一扬¹, 宋选民¹, 朱德福^{1,2}, 李 竹³

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 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 221116;
3. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 西部地区采场顶板厚而坚硬, 破断岩块常形成大块度关键块, 围岩稳定性差, 支架响应强烈, 研究块体动态结构力学行为对西部地区采场围岩控制具有重要意义。根据大块度关键块相对回转形成的动态结构建立运动力学分析模型, 按照块体间几何关系推导出挤压面积随回转角的变化关系, 将块体相对回转的动态过程分为 3 个回转阶段。基于“砌体梁”理论推导出不同阶段块体所受挤压力与回转角的关系, 对结构稳定性及力学行为进行分析。结合失稳条件, 以支架工作阻力为响应特征, 找到回转过程中结构最易失稳点, 提出工作阻力确定方法, 并得到现场实证。理论计算结果表明, 在大块度条件下, 随着回转角 θ 的增大, 挤压力 T_1 总体上呈增大的趋势; 当块度 $i < 1$ 时, T_1 随 θ 变化呈二次抛物线规律变化; 而当 $i > 1$ 时, 曲线逐渐表现为线性变化, 且块度越大 T_1 随 θ 变化幅度越小。通过失稳条件分析, 揭示了大块度关键块在回转初期易发生滑落失稳, 而抗回转变形失稳能力较强; 针对块度 i 较大, 结构自稳性弱、支架响应强烈的特点, 需设计合理的支架工作阻力, 分析 3 个回转阶段受力情况, 得出块体处于回转初期与中期的临界角度时最易失稳, 并给出该易失稳状态下工作阻力计算公式。

关 键 词: 大块度关键块; 动态结构; 挤压面积; 稳定性分析; 响应特征

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 03-1019-10

Dynamic structural mechanical behavior and response characteristics of large key blocks

LIU Yi-yang¹, SONG Xuan-min¹, ZHU De-fu^{1,2}, LI Zhu³

(1. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The roof of the stope in the western region is thick and hard. The broken rock often forms large key blocks. The stability of the surrounding rock is poor with leads to strong support response. Thus, investigating the dynamic structural mechanical behavior of blocks is of great significance to the control of stope surrounding rocks in the western region. According to the dynamic structure formed by the relative rotation of key blocks, a kinematic mechanical analysis model is established. In this study, according to the change of geometric relationship between blocks, the relationship between the extrusion area and the angle of rotation is derived, and the dynamic process of the relative rotation of blocks is divided into three rotation stages. Based on the "voussoir beam" theory, the relationship between the extrusion force and the rotation angle of blocks in different stages is deduced, the structural stability and mechanical behavior are analyzed. Combined with the instability conditions, the working resistance of support is taken as the response characteristic, finding the most unstable position of the structure during the turning process, and then a method of calculating support working resistance is developed, and its correctness of the formula is proved by practical cases. The theoretical calculation results show that: with the increase of the rotation angle θ , the extrusion force T_1 generally shows an increasing trend. When the blockness $i < 1$, T_1 increases or decreases in a quadratic parabola with θ change. However, when $i > 1$, the curve gradually shows a linear change. As the blockness is large, the increase rate of T_1 with θ is smaller. From the analysis of instability conditions, it can be revealed that the large key blocks are prone to slip instability in the early stage of rotation, but its anti-rotation deformation instability ability is relatively strong. For the characteristics of large blockness, weak self-stability of the structural and strong response of the

收稿日期: 2019-06-14

修回日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51904200); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题资助项目 (SKLCSRSM19KF019)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51904200) and the Independent Research Projects of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (SKLCSRSM19KF019).

第一作者简介: 刘一扬, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事采矿工程与岩石力学方面的研究工作。E-mail: 1932079749@qq.com

通讯作者: 宋选民, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿工程与岩石力学方面的研究工作。E-mail: xminsong@163.com

support, it is necessary to design a reasonable support working resistance. By analyzing the stress conditions in the three rotation stages, it is found that the most unstable block is at the critical angle between the initial and middle rotation stage. Finally a formula of calculating the working resistance of support is given in the state of instability.

Keywords: large key blocks; dynamic structure; extrusion area; stability analysis; response characteristics

1 引言

我国西部地区煤炭资源储量丰富, 该地区部分煤层顶板厚而坚硬, 且顶板破断岩块为厚短块, 块度较大。当工作面持续推进, 上覆厚硬岩层破断, 难以形成稳定结构, 煤层顶板常沿煤壁切落, 在支架上产生强动压作用, 造成支架压死, 严重影响正常生产^[1-2]。因此, 围绕大块度关键块所成结构的力学行为及以支架工作阻力为响应特征的研究, 对西部地区采场围岩稳定性控制具有重要意义。

针对西部地区煤层覆岩运移规律及其控制, 国内学者进行了大量研究, 取得了丰硕的成果。钱鸣高等^[3-4]根据采场上覆岩层活动规律, 开创性地提出砌体梁力学模型, 并对模型关键块进行了稳定性分析, 建立了砌体梁结构的 S-R 稳定理论, 定量分析了采场上方需控岩层范围。基于砌体梁理论, Li 等^[5]将砌体梁关键块的回转视为定轴转动, 建立了关键块回转速度力学模型, 丰富了矿压理论。侯忠杰^[6]提出地表厚松散层浅埋煤层“组合关键层”理论, 揭示了岩柱滑落失稳是浅埋煤层顶板管理的关键问题。杨治林^[7]应用初始后屈曲理论和突变理论探究浅埋煤层顶板结构的不稳定性态, 研究表明只有合理的开采高度才可保证老顶破断后形成结构的稳定性。付玉平等^[8]针对大采高采场关键块进行了稳定性分析, 给出了关键块承载能力的回归计算公式, 用于预测关键块是否失稳。赵雁海等^[9]按照顶板初次破断时铰接端应力呈指数分布的规律, 通过块体间几何变形推导探究了对称三铰拱的稳定性, 新的公式得出的回转变形稳定区范围较传统结论至少大 12%。王家臣等^[10]根据最小势能原理, 将初次来压破断岩块简化为铰杆结构, 得出了岩块发生回转失稳的极限位置。王方田^[11]、王旭峰^[12]等分别研究了冲沟地貌对浅埋煤层开采的影响, 提出了有效的顶板控制技术, 并给出合理的支架工作阻力计算方法。韩红凯等^[13]针对关键层滑落失稳未压死支架的现象, 提出两种再稳定状态, 确定了防止支架压死的合理采高及支架阻力。

针对大块度条件下支架响应特征的研究, 黄庆享等^[14]基于现场实测和实验室试验, 考虑岩层破断角, 建立了浅埋煤层大采高工作面斜台阶岩梁结构模型, 得出了浅埋煤层合理支护力的计算公式。宋

选民等^[15]通过工业开采与现场观测, 研究了浅埋超长工作面的矿压显现规律, 得出了支架阻力在工作面中部最大且符合以中部为对称轴的抛物线变化关系。许家林等^[16]提出浅埋煤层开采存在 4 种压架类型, 分别分析其致灾机制, 并给出防治对策。尹希文^[17]将开采过程分为两个周期, 提出了支架与围岩双周期动态作用模型。赵毅鑫等^[18]对采场岩层初次破断时发生滑落失稳所产生的冲击动载进行了研究, 给出了动载系数的计算公式。

上述研究提供了西部地区采场顶板破断形成大块度关键块的力学模型, 揭示了岩层移动规律, 为该地区采场围岩控制及丰富煤炭资源的安全高效开采奠定了基础。但相关文献主要研究了块体回转的最终状态, 未能充分考虑块体动态回转过程, 且没有研究回转过程中挤压接触面积随回转角的变化。本文以砌体梁理论为基础, 并根据挤压接触面的变化过程, 将大块度关键块回转运动视为动态过程, 分别建立受力分析模型, 研究其结构的稳定性与平衡范围, 并对支架响应特征进行了合理地分析与计算。

2 大块度关键块的力学行为

2.1 关键块回转运动过程分析

在长臂开采过程中, 基本顶形成结构保护回采空间。一般情况下, 上覆基本顶厚岩层在整层破断时, 易形成大块度的关键块, 且随着工作面不断向前推进, 基本顶经历“平衡、动平衡、再平衡”的过程^[19]。如图 1 所示, 当块体 A 达到极限暴露长度时, 发生破断, 关键块结构由平衡状态进入动平衡状态, 形成了岩块 A 的回转与岩块 B 的反向回转, 直至块体 B 完全触矸, 关键块结构进入再平衡状态。此过程以周期形式循环往复, 形成工作面的周期来压现象。

2.2 力学模型的建立

针对上述基本顶关键块的结构变化过程建立力学模型, 因关键块回转运动处于有限空间, 为方便研究与分析, 将初始状态限制于 $2L$ 内 (L 为关键块长度)。因岩块水平移动量仅为 $100\sim 200\text{ mm}$, 相对于岩块垂直下沉量较小^[20], 故不考虑岩石水平方向的移动。在回转过程中, 由于块体回转速度很小, 来压期间最大值约为 70 mm/h ^[1], 故将其近似

视为平衡状态讨论，且假定两关键块之间无相对滑动趋势。

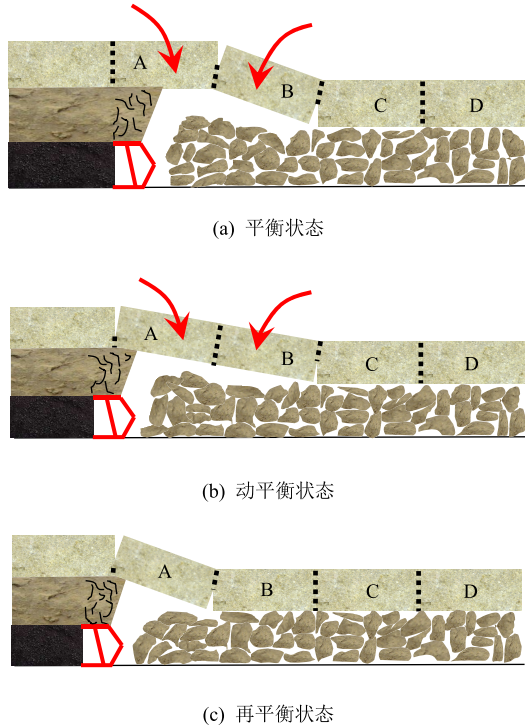


图1 关键块回转动态变化过程图

Fig.1 Dynamic change process of key block rotation

根据基本顶回转运动过程所处位态不同挤压接触面形态不同的条件，将每一个回转运动周期划分为3个不同阶段，分别为回转初期、回转中期及回转末期。

回转初期如图2(a)所示，关键块A刚发生破断，此时块体A、B间为部分面接触，挤压面形态为上部分离，下部挤压接触，即块体间裂缝呈现为上端张开，下端闭合的形态。随着工作面的持续推进，块体A不断回转，块体B随块体A反向回转，接触面积随回转角的增加不断增大，直至两者形成全面接触，合为一体，裂缝完全闭合。图中， h 为关键块高度(m)； L 为关键块长度(m)； α 为块体的最终回转角； a_L 为块体A与左边界的接触面积； a_R 为块体A与块体B的接触面积； q 为关键块载荷层所传递作用力的集度(N/m^2)； G 为关键块的自重(N/m)； O 为块体A与岩层挤压面下 endpoint。

回转中期如图2(b)所示，关键块A、B为全面接触，裂缝完全闭合，随着工作面的推进，两块体继续相对回转，直至二者接触面下部即将分离，进入下一阶段。

回转末期如图2(c)所示，关键块A、B为部分面接触，挤压面形态为下部分离，上部挤压接触，即块体间裂缝呈现为下端张开，上端闭合的形态。

随着回转运动的进行，接触面积随回转角的增大不断减小，直至块体A回转为块体B的初始形态，一个周期内的关键块相对回转运动结束。在该周期内，块体A的左挤压面面积始终随回转角的不断增大而减小。当块体A前方未破断岩层达到极限暴露长度时，下一个周期的回转运动开始。

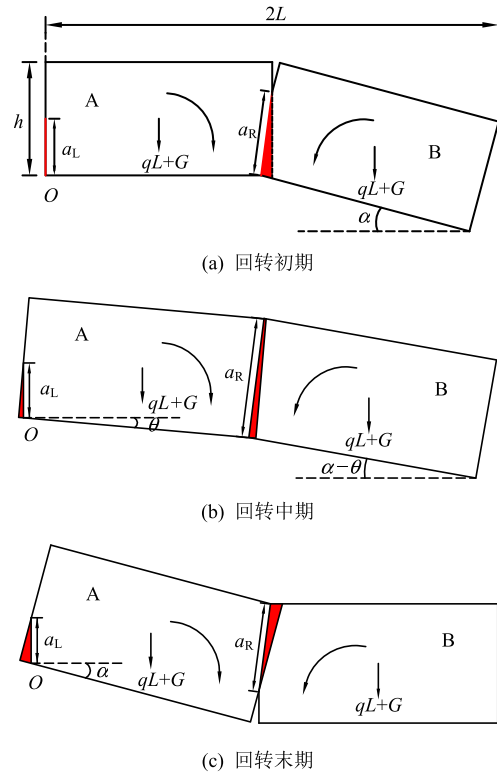


图2 关键块回转动态结构力学模型

Fig.2 Dynamic structure mechanical models of key block rotation

将块体回转阶段即将发生改变时的回转角度定义为临界回转角 β 。当块体回转至 β 时，两块体形态如图3所示。

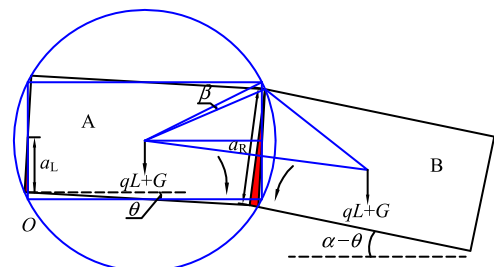


图3 临界角度计算示意图

Fig.3 Diagram of critical angle calculation

通过几何关系可知

$$\beta = \arctan \frac{h}{L} + \frac{\alpha}{2} - \arccos \frac{3L - L \cos \alpha - h \sin \alpha}{2\sqrt{L^2 + h^2} \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

并有

$$\alpha = \arcsin \frac{M - \sum h(K_p - 1)}{L} \quad (2)$$

式中: M 为采高 (m); $\sum h$ 为直接顶岩层厚度 (m); K_p 为直接顶碎胀系数, 一般取为 1.3。

则 3 个回转阶段的回转角范围分别为: $(0, \beta)$ 、 $(\beta, \alpha - \beta)$ 、 $(\alpha - \beta, \alpha)$ 。

2.3 关键块的接触面积

以块体 A 为主要分析对象, 通过几何关系可知块体 A 与左边界的接触面积 a_L 在 3 个回转阶段时均为

$$a_L = \frac{L \cos \theta + h \sin \theta - L}{\sin 2\theta} \quad (3)$$

块体 A 与块体 B 的接触面积 a_R 则需分为 3 种情况, 对应于上述 3 个回转阶段:

(1) 回转角度为 $(0, \beta)$ 时, 有

$$a_{R1} = \frac{L \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) + h \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) - \frac{3L - L \cos \alpha - h \sin \alpha}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}}{\sin(\alpha - 2\theta)} \quad (4)$$

(2) 回转角度为 $(\beta, \alpha - \beta)$ 时, 有

$$a_{R2} = \frac{h}{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)} \quad (5)$$

(3) 回转角度为 $(\alpha - \beta, \alpha)$ 时, 有

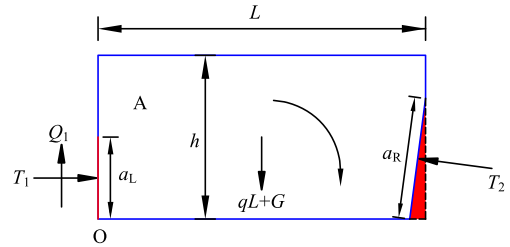
$$a_{R3} = \frac{L \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) + h \sin\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{3L - L \cos \alpha - h \sin \alpha}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}}{2 \sin(2\theta - \alpha)} \quad (6)$$

2.4 关键块回转过程中的受力分析

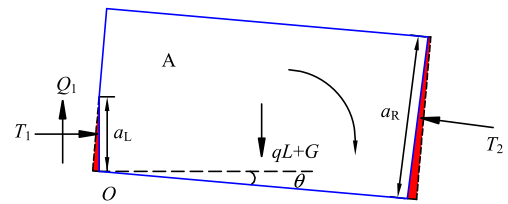
在块体回转过程中, 左挤压力的作用点随回转角的变化不断改变, 由于关键块的接触面为塑性挤压, 因此, 左挤压力作用点取在 $a_L/2$ 处, 右挤压力作用点取在 $a_R/2$ 处^[1], 块体自重与载荷层重量作用于块体重心处。根据上述基本顶关键块所处位态不同, 对 3 个回转阶段进行分析, 其受力状态如图 4 所示, 由力学分析可知, 3 个阶段下力的平衡方程均相同, 为

$$\left. \begin{aligned} T_{1x} &= T_{2x} \cos \frac{\alpha}{2} \\ Q_{1x} &= (qL + G) - T_{2x} \sin \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

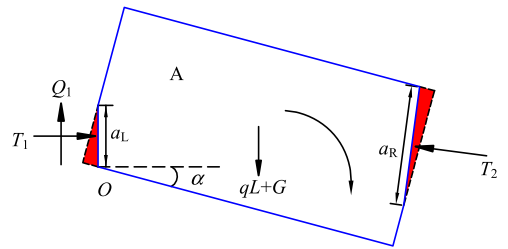
式中: T_{1x} 为第 x 个阶段下块体左接触面上所受的挤压力 (N/m); Q_{1x} 为第 x 个阶段下块体左接触面上所受剪力 (N/m); T_{2x} 为第 x 个阶段下块体右接触面上所受的挤压力 (N/m), 其中 x 取 1、2、3。



(a) 回转初期受力分析



(b) 回转中期受力分析



(c) 回转后期受力分析

图 4 回转阶段受力分析图
Fig.4 Stress analysis of rotation stages

而力矩的平衡方程各自不同, 按照回转阶段的进行顺序, 分别为

$$\left. \begin{aligned} &\frac{1}{2} a_L T_{11} + (qL + G) \frac{L}{2} \cos \theta - \\ &\quad T_{21} \left[\frac{1}{2} a_{R1} + (L - m - n) \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] = 0 \\ &\frac{1}{2} a_L T_{12} + (qL + G) \frac{L}{2} \cos \theta - \\ &\quad T_{22} \left[\frac{1}{2} a_{R2} + (L - m - n) \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] = 0 \\ &\frac{1}{2} a_L T_{13} + (qL + G) \frac{L}{2} \cos \theta - \\ &\quad T_{23} \left[a_{R2} - \frac{1}{2} a_{R3} + (L - m - n) \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $m = a_L \sin \theta$; $n = a_{R1} \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)$ 。

解上述方程组, 可求得左端挤压力分别为

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{(qL + G) \cos \theta \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos(\alpha - 2\theta) \frac{a_{R1}}{L} - \left[2 \sin \theta \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) + \cos \frac{\alpha}{2} \right] \frac{a_L}{L} + 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)} \\ T_{12} &= \frac{(qL + G) \cos \theta \cos \frac{\alpha}{2}}{\frac{a_{R2}}{L} + 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) - \left[2 \sin \theta \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) + \cos \frac{\alpha}{2} \right] \frac{a_L}{L} - 2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) \frac{a_{R1}}{L}} \\ T_{13} &= \frac{(qL + G) \cos \theta \cos \frac{\alpha}{2}}{\frac{a_{R2}}{L} + \cos(\alpha - 2\theta) \frac{a_{R1}}{L} - \left[2 \sin \theta \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) + \cos \frac{\alpha}{2} \right] \frac{a_L}{L} + 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

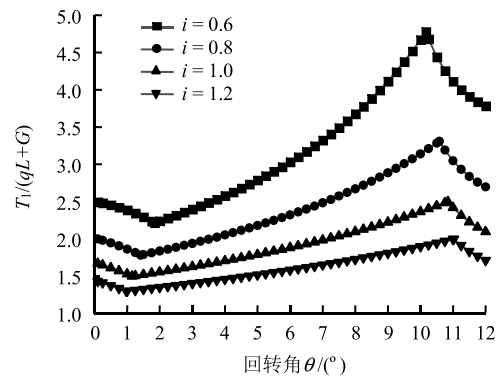
将块度 $i = h/L$ 、 a_L 、 a_R 分别代入式 (9), 即可得 T_1 与 i 、 θ 、 α 三者的关系表达式。

在 3 个回转阶段下, 块体左端剪力 Q_{1x} 与 T_{1x} 的关系为

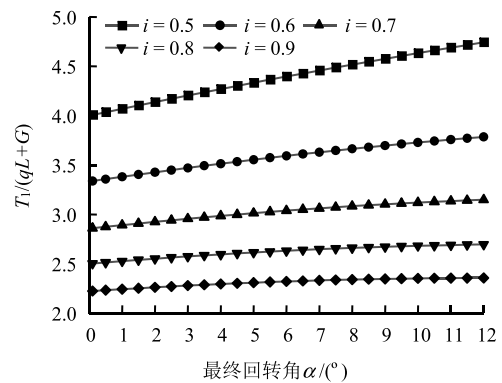
$$Q_{1x} = (qL + G) - T_{1x} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (10)$$

根据以往论著结论及实践测量经验可知^[1], 西部地区所采煤层, 块度 i 较普通地质条件大, 易于形成厚短块, 块度接近于 1, 且最终回转角 α 较大, 可达 12° , 特取 α 为 6° 、 12° , 将 3 个回转阶段下块体左端挤压力 T_1 与回转角 θ 的关系绘于图 5 中。

在 α 一定时, 由图 5(a)、5(b) 可得: ①同一块度下, 回转初期与回转末期所经历的回转角度较小, 块体回转主要体现为回转中期, 因此关键块所受 T_1 随 θ 的增加总体上呈增大的趋势, 而在回转初期与回转末期, T_1 则随 θ 的增大而减小; ②块体的 i 越大, 同一 θ 下块体所受 T_1 越小, 当 $i < 1$ 时, 相同回转角曲线的变化幅度越明显, 在 3 个回转阶段下, 曲线以抛物线形式增加或减小; 而当 $i > 1$ 时, 曲线

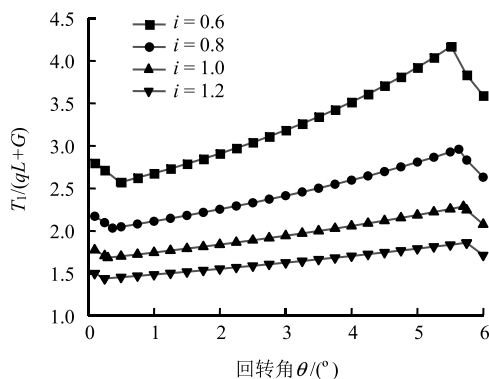


(b) $\alpha = 12^\circ$



(c) $\theta = \alpha$

图 5 挤压力 T_1 与回转角 θ 、最终回转角 α 的变化关系
Fig.5 Relationships of extrusion force between rotation angle and final rotation angle



(a) $\alpha = 6^\circ$

斜率趋近于常数, T_1 逐渐表现为线性变化, 且曲线整体趋向水平, 随 θ 的变化, T_1 的增减幅度不大; ③ T_1 的极大值与极小值分别在 3 个阶段的临界回转角处取得, 且随着 i 的增加, T_1 的极大值与极小值逐渐两侧偏移; ④在块体刚发生断裂 ($\theta = 0^\circ$) 与回转至最终位态 ($\theta = \alpha$) 时, 初始挤压力与最终挤

压力随 i 的增大而减小。

若令 $\theta = \alpha$ ，即当岩块回转至最终状态时，绘出 α 与块体所受 T_1 的变化曲线，如图 5(c) 所示，可得块体终态所受 T_1 随 α 的增大而增大，并随 i 的增大，增长幅度越缓慢；在 α 一定时，随着 i 的增大，块体所受 T_1 越小。此结论与传统砌体梁结论相吻合。

3 大块度关键块回转动态结构稳定性分析

基本顶岩层破断后相互挤压形成结构的稳定性对采场矿压显现有着至关重要的影响。根据砌体梁结构的 S-R 稳定性理论，关键块的失稳主要有滑落失稳与回转变形失稳两种形式。分别讨论这两种失稳形式及其所对应的条件对维护采场围岩稳定与指导正常生产均具有重要意义。

3.1 关键块的滑落失稳分析

在厚短块条件下，采场顶板易发生滑落失稳，主要表现为顶板台阶下沉，沿煤壁切落等现象，进而造成支架压死，影响工作面正常生产。由于采场顶板常沿煤壁发生切落，故重点分析块体 A 左挤压面失稳条件。

由力学分析可知，若要保持结构稳定，则要求挤压面上由挤压力提供的摩擦力大于等于块体所受剪力：

$$T_1 \tan \varphi \geq Q_1 \quad (11)$$

式中： $\tan \varphi$ 为关键块与岩层的摩擦系数，一般取 0.3。将式 (10) 代入式 (11)，整理可得

$$\frac{T_1}{qL + G} \geq \frac{1}{\left(\tan \varphi + \tan \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (12)$$

将 3 个回转阶段下所受挤压力式 (9) 分别代入式 (12)，以 $T_1/(qL+G)$ 为因变量，块度 i 和回转角 θ 为自变量，分别取最终回转角 α 为 6° 、 12° ，将三者关系绘于三维坐标系图 6 中，取滑落失稳的临界平面为 $Z=1/[\tan \varphi + \tan(\alpha/2)]$ ， Z 与最终回转角 α 、摩擦系数 $\tan \varphi$ 有关。

在图 6 中，当 α 一定时，处于 Z 面之上的区域为稳定区域，即结构自身可维持稳定；下方区域则为失稳区域，需要液压支架提供支撑力维持该结构的稳定，防止其出现滑落失稳。在回转角 θ 较小，即关键块刚发生破断时，挤压力 T_1 在 Z 面之下，块体结构无法自身维持平衡；随着 θ 的不断增大， T_1 增至临界平面之上，块体稳定性逐渐增强。因此，

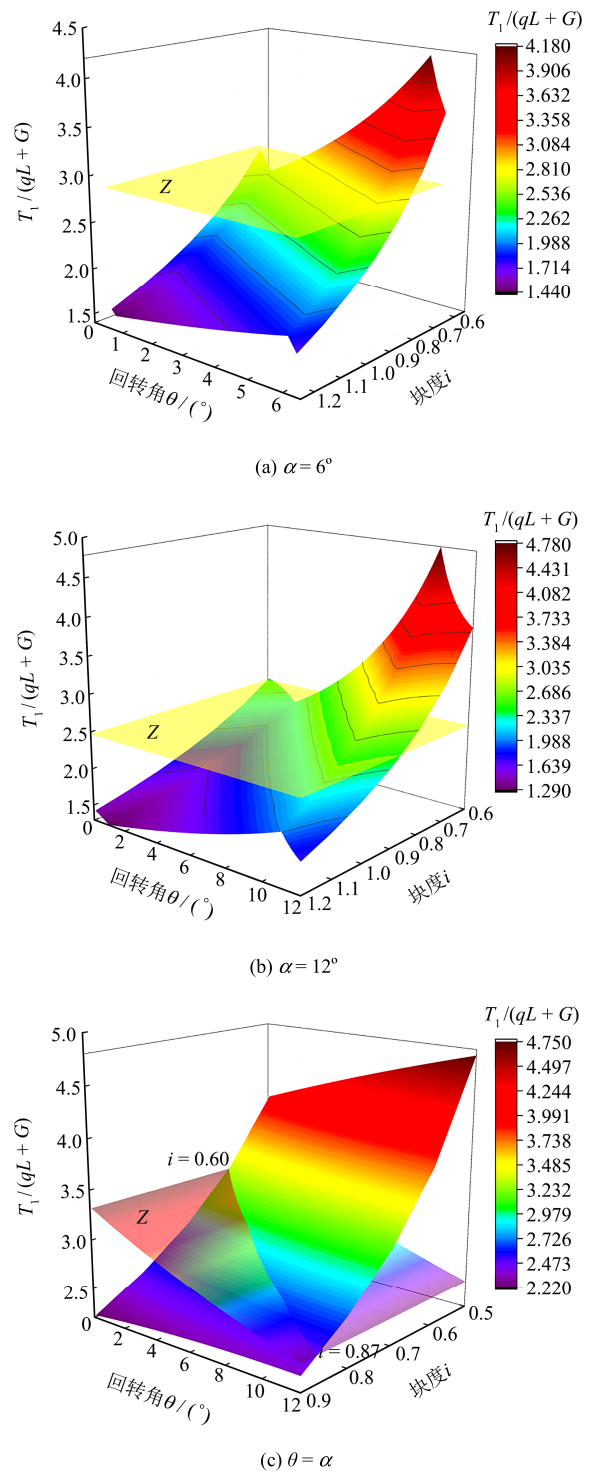


图 6 滑落失稳条件下关键块稳定范围示意图
Fig.6 Diagram of key block stability range under sliding instability condition

在厚短块条件下，工作面块体刚破断时易发生滑落失稳。

取 $\alpha = \theta$ ，绘出 α 、 i 及 T_1 三者的关系，再于同一三维坐标系内绘出临界平面 Z ，可知，随着 α 的增大，临界平面上方曲面面积增加，即 Z 面上方稳定区域增大，结构越易取得平衡，越不易出现滑落失稳。由图 6(c) 可知，令 $\alpha_{\max} < 12^\circ$ ，在 $i < 0.60$ 时，

即块度较小时, 不论 α 取为何值, 结构均可自身取得平衡; 而当 $0.60 < i < 0.87$ 时, 随着 α 的增大, 块体越难以自身维持平衡, 需要支架提供额外的支撑力保证结构不失稳; 当 $i > 0.87$ 时, 不论 α 取何值, 均必须依靠支架的支撑力才可达到平衡。在块度大时, 关键块不易依靠自身形成稳定结构, 需支架提供较大的支撑力保证结构不失稳, 维护采场安全。

3.2 关键块的回转变形失稳分析

由力学分析可知, 给定摩擦系数, 挤压力越大, 结构越易取得平衡, 但岩石的承载能力有限, 在回转运动过程中, 所受的挤压力及挤压面积随回转角的变化而变化, 当挤压处的应力超过岩石的有效抗压强度时, 块体就会遭到破坏, 结构失去稳定性, 进而发生回转变形失稳。

在上述结构中, 块体左端的挤压面积小于右端挤压面积, 由式(7)可知, α 取值较小, 左右两端挤压力相差不大, 由此可判断, 块体左端稳定即为结构不破坏的条件:

$$\frac{T_1}{a_L} \leq \eta \sigma_c \quad (13)$$

式中: η 为端角挤压系数, 常取0.3; σ_c 岩石抗压强度(MPa), 则 $\eta \sigma_c$ 表示挤压面的有效抗压强度(MPa); T_1/a_L 为挤压面平均挤压应力。

且有

$$qL + G = \rho g(h + h_1)L \quad (14)$$

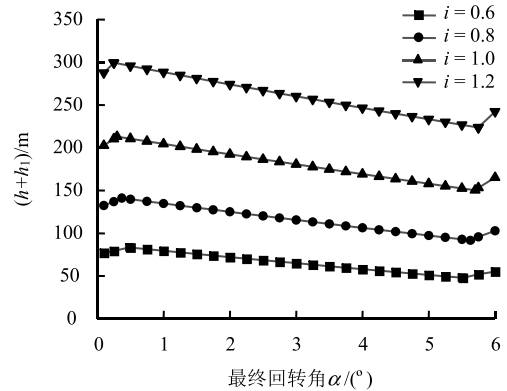
式中: ρ 为岩石密度(kg/m^3); g 为重力加速度(N/kg), 则 ρg 代表岩石重度(N/m^3); $h + h_1$ 为块体自身厚度及上覆载荷层厚度之和(m)。将式(14)及有关参数代入式(13), 分为3个回转阶段, 可得

$$h + h_1 \leq \frac{\eta \sigma_c (\cos \theta + i \sin \theta - 1)}{\rho g \sin 2\theta} \times \frac{qL + G}{T_{1x}} \quad (15)$$

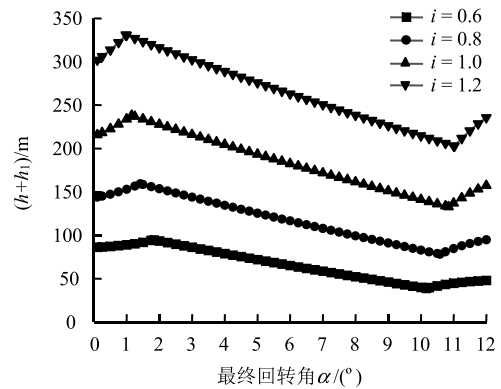
其中, 下标 x 取1时, $\theta \in (0, \beta)$; 下标 x 取2时, $\theta \in (\beta, \alpha - \beta)$; 下标 x 取3时, $\theta \in (\alpha - \beta, \alpha)$ 。

分别取最终回转角 α 为 6° 、 12° , 画出载荷层厚度 $h + h_1$ 随回转角 θ 的变化关系, 如图7(a)、7(b)所示, 图中曲线以下为稳定区域, 当 α 一定时, 随着块度 i 的增大, 稳定区域增大, 结构可承载的岩层厚度增加; 在一个周期的回转运动中, 回转初期可承载岩层厚度呈抛物线形式短暂增加, 在回转中期则近似线性减小, 回转末期再度呈抛物线形式短暂增加, 由于回转初期与回转末期回转角度相较回转中期较小, 故曲线整体呈下降趋势。可知块体在回转运动前期抗回转变形失稳能力相对较强。分析

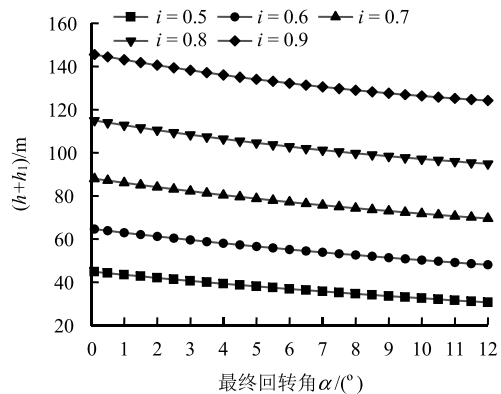
最终状态, 如图7(c)可知, α 越大, 块体的整体承载能力越弱, 越易发生回转变形失稳。此结论也与传统砌体梁结论相吻合。



(a) $\alpha = 6^\circ$



(b) $\alpha = 12^\circ$



(c) $\theta = \alpha$

图7 载荷层厚度 $h + h_1$ 随回转角 θ 变化关系

Fig.7 Relationships between loaded layer thickness and rotation angle

4 支架响应特征分析

在大块度关键块条件下, 采场顶板块体易发生滑落失稳, 支架处于给定失稳载荷工作状态^[1], 其力源主要由两部分构成: 一是直接顶岩层自重 Q_z ; 该部分岩层断块相互之间无挤压力作用, 无法形成稳定的承载结构, 因此支架承担该部分岩层的全部

重量；二是基本顶滑落失稳所传递的载荷 R 。

4.1 直接顶岩层自重的确定

建立如图 8 所示的支架受力模型，由分析可知

$$Q_z = \rho g \left(\frac{\Sigma h}{2 \tan \gamma} + l_k \right) \Sigma h b \quad (16)$$

式中： γ 为直接顶岩层破断角； l_k 为支架控顶距 (m)； b 为支架宽度 (m)。

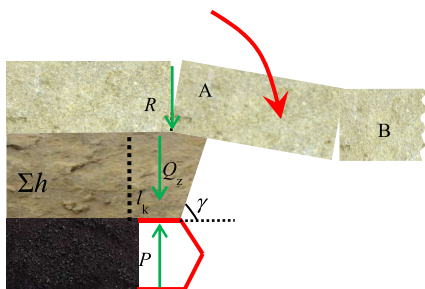


图 8 支架受力模型

Fig.8 Mechanical model of support resistance

4.2 基本顶滑落失稳传递载荷的计算

若要防止基本顶滑落失稳，需满足的条件为

$$T_1 \tan \varphi + R \geq Q_1 \quad (17)$$

代入相关参数可得

$$\frac{R}{qL + G} \geq 1 - \frac{T_1}{qL + G} \left(\tan \varphi + \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (18)$$

将 3 个回转阶段的挤压力表达式 (9) 代入式 (18)，即可得出任意回转角下，为维持结构稳定，防止基本顶滑落失稳，支架需通过直接顶提供的支撑力。

由前文分析可知，挤压力最小值出现在 $\theta = \beta$ 时，即回转初期与回转中期的临界角度，此时结构处于最失稳状态，支架为抵抗滑落失稳需提供的最小支撑力 $R_{\min}$ 最大，若所提拱支撑力小于 $R_{\min}$ ，则结构无法保持稳定。取 $\theta = \beta$ ，将 T_{1x} 的表达式代入式 (18)，整理化简得出

$$\frac{R_{\min}}{qL + G} \geq 1 - \frac{\left(\tan \varphi + \tan \frac{\alpha}{2} \right) \cos \theta \cos \frac{\alpha}{2}}{AB - C + D} \quad (19)$$

其中：

$$A = \cot(\alpha - 2\beta) \quad (20)$$

$$B = \left[\cos \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) + i \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) - \frac{2}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \cos \frac{\alpha}{2} + i \sin \frac{\alpha}{2} \right] \quad (21)$$

$$C = \left[2 \sin \beta \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) + \cos \frac{\alpha}{2} \right] \frac{\cos \beta + i \sin \beta - 1}{\sin 2\beta} \quad (22)$$

$$D = 2 \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) \quad (23)$$

综上所述，可得支架工作阻力 P 计算公式为

$$P = Q_z + R \quad (24)$$

取 $i=1$ ， $\alpha = 5^\circ$ ，代入式 (19)，得出 $R_{\min} \geq 0.41(qL + G)$ 。若按台阶岩梁结构计算，相同参数下可得出的结果为 $R_{\min} \geq 0.38(qL + G)$ ，由此可知，本文公式所求基本顶滑落失稳传递载荷较台阶岩梁的结论大 7.9%。

5 工程实例分析验算

以张家峁煤矿 15201 工作面为工程实例^[14]，对所推导的合理支架工作阻力确定方法进行验算。张家峁煤矿煤系地层见表 1。

表 1 煤系地层表

Table 1 Parameters of coal measure strata

序号	岩石名称	层厚/m	序号	岩石名称	层厚/m
1	细砂岩	4.60	8	细砂岩	1.19
2	粉砂岩	10.62	9	粉砂岩	1.91
3	4 ⁻⁴ 煤层	0.65	10	细砂岩	1.67
4	泥岩	5.95	11	泥岩	1.78
5	粉砂岩	2.78	12	细砂岩	2.60
6	细砂岩	4.36	13	泥岩	2.80
7	粉砂岩	12.39	14	5 ⁻² 煤层	6.10

该工作面开采 5⁻² 煤层，煤层厚度为 6.10~6.35 m，设计采高为 6.0 m。工作面序号为 7 的厚硬粉砂岩为基本顶，厚度为 12.39 m。其下的较薄岩层均为直接顶，厚度为 11.95 m。载荷层厚度为序号 2、7 两层厚硬粉砂岩所夹岩层及 7 号岩层层厚之和，为 26.13 m，岩层重度取 25 kN/m³，选用液压支架型号为 ZY12000/28/63D，支架架宽为 1.75 m，最大控顶距约为 5.5 m，直接顶岩层破断角取为 65°，工作面周期来压步距平均为 15 m。

将上述数据代入式 (16)、(19)、(24)，考虑支护效率，并将支护效率取为 0.9，可得工作面支架工作阻力 P 为 10 620 kN。

根据工作面实测支架平均工作阻力为 10 750 kN，计算结果与实际观测相符，本文所得支架工作阻力确定方法可用于支架选型及支架运行适应性分析并

指导现场生产。

6 结 论

(1) 建立了大块度关键块相对回转运动的动力学结构模型, 将回转运动视为一个动态过程, 根据挤压面形态不同分为3个不同阶段, 给出了块体两端挤压接触面大小在不同阶段时随回转角的变化关系。

(2) 在大块度条件下, 对比3个不同阶段下块体左右两端挤压力变化规律可知, 随回转角 θ 的增大, 挤压力 T_1 总体上呈增大的趋势; 当块度 $i < 1$ 时, T_1 随 θ 变化呈二次抛物线规律变化; 而当 $i > 1$ 时, 曲线逐渐表现为线性变化, 且斜率随 i 的增大不断减小, T_1 变化幅度随之减小, 当块体处于终态($\alpha = \theta$)时, 最终回转角 α 增大, T_1 随之增大, 该结论与传统砌体梁结论相吻合。

(3) 通过关键块滑落稳定性分析可知, 大块度关键块在回转初期易于发生滑落失稳, 随 θ 的增大稳定性逐渐增强; 同时, 揭示了在关键块块度较大的情况下, 块体不易依靠自身形成稳定结构, 需要支架提供较大的支撑力维持结构平衡。通过回转变形稳定性分析可知, 块体前期抗回转变形能力相对较强。因此大块度关键块不易出现回转变形失稳, 结构在该种条件下可承载载荷层厚度大。

(4) 结合西部地区煤层顶板大块度关键块结构特征及其滑落失稳条件, 得出块体处于回转初期与中期的临界角度 β 时最易失稳, 并以支架工作阻力为响应特征, 提出工作阻力确定方法, 且得到现场实证。

参 考 文 献

- [1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 143-155.
HUANG Qing-xiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam and longwall mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000: 143-155.
- [2] 赵通. 近距离巨厚坚硬岩层下厚煤层开采顶板的破断失稳机理及控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
ZHAO Tong. Roof fracture instability mechanism and control study of thick coal seams mining for super thick and hard rock in close distance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [3] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力, 岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 84-93.
QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu, XU Jia-lin. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 84-93.
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, HE Fu-lian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in long wall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(6): 557-563.
- [5] LI Zhu, XU Jia-lin, JU Jin-feng, et al. The effects of the rotational speed of voussoir beam structures formed by key strata on the ground pressure of stopes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 108: 67-79.
- [6] 侯忠杰. 地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 127-131.
HOU Zhong-jie. Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 127-131.
- [7] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的不稳定性态[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1341-1345.
YANG Zhi-lin. Instability behavior for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1341-1345.
- [8] 付玉平, 宋选民, 邢平伟, 等. 大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1027-1031.
FU Yu-ping, SONG Xuan-min, XING Ping-wei, et al. Stability analysis on main roof key block in large mining height workplace[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1027-1031.
- [9] 赵雁海, 宋选民. 浅埋超长工作面裂隙梁铰拱结构稳定性分析及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 203-209.
ZHAO Yan-hai, SONG Xuan-min. Stability analysis and numerical simulation of hinged arch structure for fractured beam in super-long mining workplace under shallow seam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 203-209.

- [10] 王家臣, 王兆会. 浅埋薄基岩高强度开采工作面初次来压基本顶结构稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 175-181.
- WANG Jia-chen, WANG Zhao-hui. Stability of main roof structure during the first weighting in shallow high-intensity mining face with thin bedrock[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2015, 32(2): 175-181.
- [11] 王方田, 屠世浩, 张艳伟, 等. 冲沟地貌下浅埋煤层开采矿压规律及顶板控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 877-882.
- WANG Fang-tian, TU Shi-hao, ZHANG Yan-wei, et al. Ground pressure rules and roof control technology for the longwall mining of shallow seam beneath the gully topography[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2015, 32(6): 877-882.
- [12] 王旭锋, 张东升, 张炜, 等. 沙土质型冲沟发育区浅埋煤层长壁开采支护阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 194-198.
- WANG Xu-feng, ZHANG Dong-sheng, ZHANG Wei, et al. Support resistance determination for shallow coal seam longwall mining in sand-soil gullies overlaying mining area[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(2): 194-198.
- [13] 韩红凯, 王晓振, 许家林, 等. 覆岩关键层结构失稳后的运动特征与“再稳定”条件研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 734-741.
- HAN Hong-kai, WANG Xiao-zhen, XU Jia-lin, et al. Study on the movement characteristics and "re-stabilization" conditions of overlying key stratum structure after losing stability[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2018, 35(4): 734-741.
- [14] 黄庆享, 唐朋飞. 浅埋煤层大采高工作面顶板结构分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 282-286.
- HUANG Qing-xiang, TANG Peng-fei. Roof structure analysis on large mining height longwall face in shallow coal seam[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2017, 34(2): 282-286.
- [15] 宋选民, 顾铁凤, 闫志海. 浅埋煤层大采高工作面长度增加对矿压显现的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4007-4012.
- SONG Xuan-min, GU Tie-feng, YAN Zhi-hai. Effects of increasing working face's length on underground pressure behaviors of mining super-high faces under shallow coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 4007-4012.
- [16] 许家林, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1625-1634.
- XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, JU Jin-feng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 1625-1634.
- [17] 尹希文. 综采工作面支架与围岩双周期动态作用机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3072-3080.
- YIN Xi-wen. Double period dynamic mechanism of support and sur-rounding rock in fully mechanized mining face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(12): 3072-3080.
- [18] 赵毅鑫, 王新中, 周金龙, 等. 综采工作面基本顶厚跨比对其初次断裂失稳影响规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 94-104.
- ZHAO Yi-xin, WANG Xin-zhong, ZHOU Jin-long, et al. Influence of main roof thickness-span ratio on the initial cracking induced instability in fully mechanized longwall face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(1): 94-104.
- [19] 钱鸣高, 李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报, 1982, 7(2): 1-12.
- QIAN Ming-gao, LI Hong-chang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure[J]. **Journal of China Coal Society**, 1982, 7(2): 1-12.
- [20] 钱鸣高. 采场上覆岩层岩体结构模型及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 1982(2): 1-12.
- QIAN Ming-gao. A structural model of overlying strata in longwall workings and its application[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 1982(2): 1-12.