大倾角煤层安全高效开采方法与关键技术

摘要： 本案例针对我国西部矿区大倾角煤层机械化开采过程中，采动煤岩体力学行为复杂多变，诱发大尺度倾斜采煤空间岩层大范围垮落滑移、飞溅冲击，围岩与装备多维多目标动态控制困难等问题，发明了倾斜层状采动煤岩体力学行为实验测试方法，发现了大倾角采场重力-倾角效应，揭示了关键层区域迁移、承载结构泛化与围岩-装备多维稳定性控制机制。创新了伪俯斜与斜向长壁开采系统，发明了小短壁、长-短壁融合开采方法，研发了多煤层、多区段协同开采方法，提升了大倾角煤层开采安全-产量综合效能。发明了大倾角采场走向-垂向-倾向多维协同控制技术及配套装备，攻克了围岩-装备三维跨尺度动态稳定性控制难题。提出了大倾角煤层安全高效开采方法与关键技术。可作为《学科前沿讲座》《特殊煤层开采技术》等课程及第二课堂创新创业教育的原创型教学案例，通过“理论–方法–技术–装备–实践”五位一体展示，促进本科生树立能源报国的家国情怀和学煤爱煤奉献煤的使命担当，培养解决复杂采矿工程问题能力与创新能力。

关键词： 大倾角煤层、重力-倾角效应、承载结构、开采方法、围岩-装备协同控制

背景信息

案例是沟通理论与实践的桥梁，有助于理论与教学实践紧密结合，弥补单纯理论式教学带来的不足。案例教学（Case-based Teaching，CBT）是一种基于实践经验的启发探究式创新型教学模式，通过具体的实际问题的处理，激发学生学习和思考的兴趣，让学生学会综合运用所学知识解决具体实际问题，有效培养学生的实践、创新能力。面向西部特殊煤层开采需求，亟需建设特色科研成果转化教学案例，推进矿业工程领域本科生培养。

西部是我国煤炭开发的主战场，赋存不同类型的特殊煤层，大倾角煤层作为一类典型的特殊煤层，在新疆、四川、贵州、甘肃等西部省区广泛赋存，约占全国探明储量的20%和全国产量的8%，其中60%以上为焦煤、无烟煤等具有重要工业用途的稀缺煤炭资源，是国际公认的难采煤层，其安全高效开采是保障国家能源安全和区域经济社会发展亟待解决的重大工程问题。大倾角煤层机械化开采过程中，采动煤岩体力学行为复杂多变，诱发大尺度倾斜采煤空间岩层大范围垮落滑移、飞溅冲击；围岩与装备多维多目标动态控制困难，导致数千吨-成百台装备失稳下滑、倾倒挤压，严重制约了该类煤层安全高效开采。为解决上述重大理论与技术难题，依托中国煤炭工业科技创新团队“大倾角煤层安全高效开采理论与技术”，案例负责人在4项国家自然科学基金和4项企业合作项目资助下，围绕倾斜层状采动煤岩体力学行为、装备与围岩协同控制等关键科学与技术问题，经过多年攻关，创新了倾斜层状采动煤岩体力学行为实验与测试方法，发明了适用于变角度、变厚度的大倾角煤层（群）开采新方法，研发了多维度、多尺度围岩协同控制技术与配套装备，大幅提升了安全-产量综合效能，实现了大倾角煤层安全高效开采。相关成果发表论文80余篇，出版专著3部，授权专利30余项，获陕西省科技进步一等奖、中国煤炭工业科技一等奖。

本案例的创建体现了逐次递进的工程逻辑过程。第一，案例首先提出了基于重力-倾角效应的倾斜

负责人简介： 王红伟，西安科技大学能源学院采矿工程系教授，主要从事大倾角煤层开采理论与岩层控制技术研究。

编制说明： 本案例为原创性案例，结合负责人所在团队多年大倾角煤层安全高效开采科研实践与《学科前沿讲座》课程内涵编制，未进行技术性处理，在于向学生教授大倾角煤层安全高效开采科学问题的基础理论、开采方法、关键技术、特种装备、工程实践等。

层状采动煤岩体控制理论。发明了倾斜层状采动煤岩体力学行为系列实验系统与测试方法，研制了可变角、多比例、多维度模拟实验平台，开展了试件尺度、模型尺度、工程尺度下倾斜层状采动煤岩体物理力学性状与行为创新研究，发现了大倾角采场重力-倾角效应，揭示了关键层区域迁移、承载结构泛化特征与围岩-装备系统多维度稳定性控制机制。第二，案例发明了不同埋藏条件的大倾角煤层（群）开采新方法。创新了斜向长壁开采系统，发明了小短壁、长-短壁融合开采方法，研发了多煤层、多区段协同开采方法。第三，案例研发了倾斜回采空间多维度、多尺度围岩与装备协同控制技术。发明了基于不同开采方法的大倾角煤层长壁工作面非线性布置技术、“支架阻力非均衡利用、煤壁超前分区加固、坚硬顶板耦合弱化”的采场围岩稳定性控制技术、工作面全时空域飞矸防控技术。第四，案例研发了适用于倾斜回采空间多维度围岩协同控制的特种装备。研发了时空协同控制的成套智能化装备开发了中心距动态精准调控的大倾角工作面装备集成控制系统，攻克了围岩-装备三维跨尺度动态稳定性控制难题。第五，案例通过川煤集团石洞沟煤矿、太平煤矿工业性实验，验证了可行性。由此，本案例实现了大倾角煤层开采“理论-方法-技术-装备-实践”一体化系统展示。整个案例层次合理，符合采矿工程问题破解逻辑，实现理论与实践、科研与教学、专业与思政的融合，可作为《学科前沿讲座》《特殊煤层开采技术》等专业课程及第二课堂创新创业教育的原创型教学案例，有助于本科生树立能源报国的家国情怀和学煤爱煤奉献煤的使命担当，培养解决复杂采矿工程问题能力与创新能力。

案例正文

一、问题提出

大倾角煤层埋藏地质条件复杂，是国际公认的难采煤层，广泛赋存于我国西部的四川、新疆、甘肃、贵州等省、区，且多为焦煤、无烟煤等我国紧缺和保护性开采的优质煤（种）炭资源。其储量和产量分别占全国总储量和年产量的20%和8%。截至2020年底，埋藏条件相对较好、倾角在35°-55°的大倾角煤层大多已实现走向长壁综合机械化开采，且取得了显著的经济社会效益，为我国区域经济社会发展提供了重要的支撑。但受制于该类煤层复杂的埋藏条件，岩层控制理论研究缺乏系统性，安全可靠的岩层控制技术发展相对滞后，传统单一开采方法与装备已经不能满足国家对安全、产效和作业环境等方面日益提高的标准和要求。

大倾角煤层综合机械化开采过程中，采动煤岩体力学行为复杂多变，诱发大尺度倾斜采煤空间岩层大范围垮落滑移、飞溅冲击；围岩与装备多维多目标动态控制困难，导致数千吨-成百台装备失稳下滑、倾倒挤压，严重制约了该类煤层安全高效开采。必须从岩层控制理论与技术、开采工艺与方法、装备设计与制造等方面开展全方位的创新。为解决上述重大理论与技术难题，案例负责人在 4 项国家自然科学基金和 4 项企业合作项目资助下，围绕倾斜层状采动煤岩体力学行为、装备与围岩协同控制等关键科学与技术问题，提出了重力-倾角效应下倾斜层状煤岩体采动力学行为的控制理论，发明了适用不同条件的大倾角煤层开采新方法，研发了适用不同维度和尺度的围岩稳定控制关键技术与成套装备，并进行了工程应用，为大倾角煤层安全高效开采开辟了新路径。

二、倾斜层状采动煤岩体控制理论

本案例发明了倾斜层状采动煤岩体力学行为系列实验系统与测试方法，研制了可变角、多比例、多维度模拟实验平台，开展了试件尺度、模型尺度、工程尺度下倾斜层状采动煤岩体物理力学性状与行为创新研究，发现了大倾角采场重力-倾角效应，揭示了关键层区域迁移、岩体结构泛化特征与围岩-装备系统多维度稳定性控制机制，奠定了大倾角煤层开采方法与技术突破的理论基础。

（一）开发了Solidworks+3Dmine→Rhino→Griddle的等比例外置建模技术，发明了基于弹塑性理论、块体理论和数理统计理论的数-力映射分析方法，结合动-静力学理论与多尺度数据理论方法，阐明了倾斜层状采动煤岩体应力演化、岩层变形破断及其非连续块体间力学行为。研究发现：大倾角采动煤岩体物理力学性状和行为存在显著的重力-倾角效应，当煤岩层面倾角35°-60°时，煤岩体内应力传递方向发生偏转且偏转量逐渐增大，煤体破坏由压剪破坏转化为近平行于层面的滑移剪切破坏，煤岩体的强度和弹性模量也随之减小；采场围岩采动应力路径演变受层面倾角影响表现为层间非连续传递特征，导致顶板的损伤变形与破坏运动存在明显的区域性和时序性（图1）。

采用大数据分析方法和多尺度数据理论，将由不同载体获得、可以表征为不同矿山压力显现特征的异构数据进行处理，使其转换为能够较真实反映采动煤岩体内在本质属性（力学性状和行为）的结构化数据，通过建立无量纲统一表征模型，对不同尺度（试件-模型-采场）采动岩体应力-载荷和应变-位移等效转换过程和宏观力学性质改变特征进行表征，获得采动岩体力学性状和行为本构关系（因果关系）表征模式。具体如下：

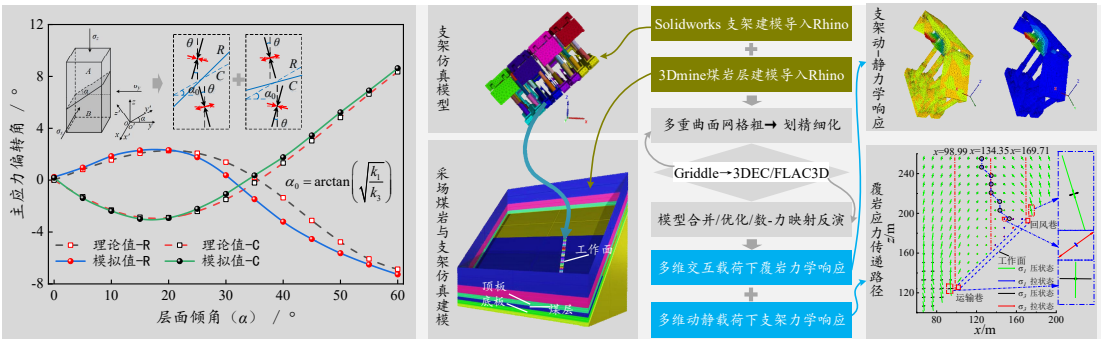


图1 重力-倾角效应下的多尺度煤岩体采动力学行为演化机理

假设宏观尺度应力-应变或载荷-位移等数据取自N个宏观采动岩体，用S_R表示采动岩体的集合，R_i表示单个宏观采动岩体，则有

$$S_R = \{R_i | 1 \le \mathrm{i} \le \mathrm{N}\} \tag{1}$$

$$R_i = <RD_i, ST_i> \tag{2}$$

其中，RD_i是R_i的应力-应变数据集，$RD_i=\{<\sigma_j^i,\varepsilon_j^i>|1 \le j \le M_i\}$，$M_i$是$RD_i$所含数据元素的数量，每个数据元素是由应力-应变或载荷-位移值构成的序偶。ST_i是该采动岩体所关联的细观尺度采动岩体应力-应变或载荷-位移等数据集合，$ST_i=\{T_k^i|1 \le k \le N_i\}$，$N_i$表示$R_i$所关联细观尺度采动岩体的数量。细观尺度采动岩体$T_k^i=\{<\sigma_l^{i,k},\varepsilon_l^{i,k}>|1 \le l \le M_k^i\}$，$M_k^i$是$\mathrm{R_i}$的第$k$个细观尺度采动岩体所含数据元素的数量，每个数据元素同样是由应力-应变或载荷-位移等值构成的序偶。

首先，对任意宏观采动岩体R_i，在数据集RD_i上利用回归分析算法获得应力-应变或载荷-位移等关系函数f_i，对任意细观尺度岩体T_k^i获得应力-应变或载荷-位移等关系函数f_k^i，并令

$$F_i = \{f_k^i | 1 \le k \le N_i\} \tag{3}$$

其次，构造新的样本集$D = \{ < f_i,\ F_i > | 1 \le i \le N\}$，求解$f_i$和$F_i$的关系模型

$$f_i = \Phi(F_i) \tag{4}$$

获得上述模型的核心是将函数f_i和F_i中各函数进行泰勒展开，提取展开式中各多项式的系数，从而实现函数的向量化表示。设f_i泰勒展开式的前n项多项式系数依次是$a_1^i,\ldots,a_n^i$，记向量$\alpha_i=(a_1^i,\ldots,a_n^i)T$。设$f_k^i$泰勒展开式的前n项多项式系数依次是$a_1^{i,k},\ldots,a_n^{i,k}$，记向量$\alpha_k^i=(a_1^{i,k},\ldots,a_n^{i,k})T$。令矩阵$A_i=(\alpha_1^i,\ldots,\alpha_{N_i}^i)$。

假定宏观采动岩体R_i的应力-应变或载荷-位移等关系函数f_i泰勒展开式的多项式系数是R_i所关联N_i个细观尺度采动岩体T_k^i的多项式系数的线性组合，通过求解方程$A_i\mu_i=\alpha_i$获得μ_i的解。μ_i是一个N_i维的列向量，称作尺度变换向量，记作$\mu_i=(u_1^i,\ldots,u_{N_i}^i)\mathrm{T}$。以$\sigma_i$和$\varepsilon_i$表示宏观采动岩体$R_i$的应力和应变，$\sigma_{i,k}$和$\varepsilon_{i,k}$表示与之关联的细观采动岩体$\mathrm{T_k^i}$的应力和应变，$f_i$和$F_i$的关系可通过如下四个式子表达

$$F_i = \{f_k^i | 1 \le k \le N_i\} \tag{5}$$

$$f_k^i = \varepsilon_{i,k} \approx \sum_{\mathrm{w}=1}^{\mathrm{n}} a_w^{i,k} (\sigma_{i,k})^{w-1} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} a_1^i \\ \ldots \\ a_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{i,1} & \cdots & a_1^{i,N_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n^{i,1} & \cdots & a_n^{i,N_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^i \\ \ldots \\ u_{N_i}^i \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$f_i = \varepsilon_i \approx \sum_{\mathrm{w}=1}^{\mathrm{n}} a_w^i (\sigma_i)^{w-1} \tag{8}$$

尺度变换向量$\mu_i=(u_1^i,\ldots,u_{N_i}^i)\mathrm{T}$反映了$f_i$和$F_i$的泰勒展开式多项式系数之间的关系。其中，$u_k^i$与第$k$个细观尺度采动岩体$T_k^i$的尺度和测试环境紧密相关，$u_k^i$的值集中反映了细观尺度采动岩体对宏观尺度采动岩体力学性质的贡献程度。

（二）发明了适用于倾斜层状采动煤岩体可变角物理模拟实验平台与测试模型，首次开展了1:20、1:50、1:100倾斜采场全尺寸力学行为三维物理模拟实验，揭示了非完整破断形态下关键层区域迁移-转化与承载结构泛化特征。研究认为：大倾角采场关键层区域沿工作面倾斜方向发生迁移，以工作面中部区域基本顶为基准，分别向下部区域直接顶和上部区域基本顶上位岩层迁移；以关键层破断后岩块为主体形成的承载结构在走向上呈“三铰拱或类三铰拱”形态，在倾向上呈跨层“堆砌-反向堆砌”形态，进而形成了三维非对称多级梯阶状壳体结构，确定了采场顶板非对称关键层区域三维曲面形态（图2）；采场顶板多级梯阶结构失稳与底板非对称破坏、区段煤柱或煤壁局部-整体破坏，存在多尺度链式时空关联性，形成采场围岩承载结构泛化特征，采动过程中承载结构元素通过强弱链转换，易形成围岩链式灾害。验证了大倾角煤层采场尺度煤岩体力学行为具有显著的重力-倾角效应。

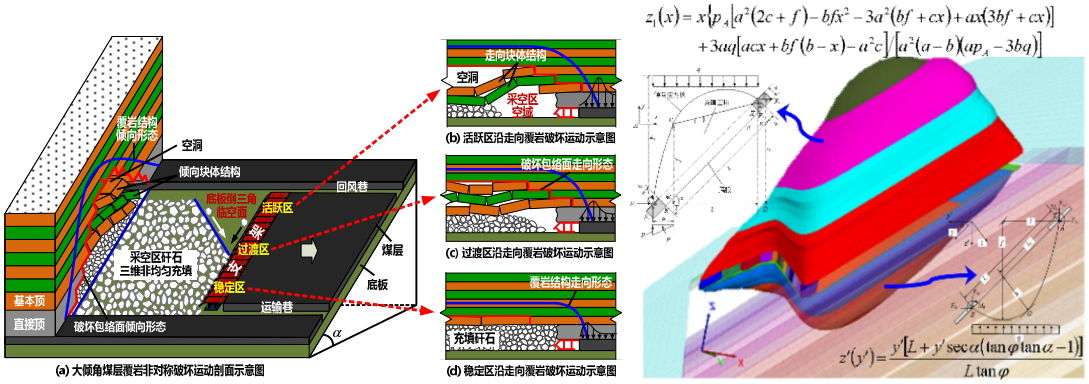


图2 三维非对称多级梯阶状壳体结构与关键层区域迁移转化特征

综合力学与几何方法，开展了大倾角煤层长壁采场顶、底板非对称拱形态分析，给出限定条件下大倾角煤层长壁采场倾向剖面和走向剖面关键岩层三维曲面的定量表征方法。

沿倾斜方向，采场顶板存在非对称应力拱，并建立了力学模型，见图3。考虑到大倾角煤层开采所形成的非对称宏观应力拱壳是自发形成的，且岩土类材料具有抗压不抗拉的特性，因此，可以认为上覆岩层在自我调节的自然垮落中，形成的沿工作面倾斜方向非对称应力拱的力学性态达到了最优的情况，即拱轴线与压力线重合，则由拱的弯矩方程可得拱的合理轴线方程，见式9和式10。最终给出了大倾角煤层顶板非对称拱的合理轴线，见图4。

$$z_1(x)=x\left\{p_A\left[a^2(2c+f)-bfx^2-3a^2(bf+cx)+ax(3bf+cx)\right]\right.$$
$$\left.+3aq\left[acx+bf(b-x)-a^2c\right]\right/\left[a^2(a-b)(ap_A-3bq)\right] \tag{9}$$

$$z_2(x)=\left\{a^2p_A(ac-bf-cx+fx)p_A\right.$$
$$\left.+3xq\left[acx-a^2c+bf(b-x)\right]\right\}\Big/\left[a(a-b)(ap_A-3bq)\right] \tag{10}$$

其中a和f的代数方程为

$$\begin{aligned}&\frac{1}{2}(b-a)\left[(a+b)\sin\alpha-2h\cos\alpha\right]+\left\{a(\lambda-1)\left\{ap_A\left[a(c+2f)-3bf\right]\right.\right.\\&\left.\left.-2q\left(a^2c+2abf-3b^2f\right)\right\}\right\}/\left[2(a-b)(ap_A-3bq)\right]\\&+\lambda\left\{-\frac{1}{2}bc-\frac{(a-b)\left\{ap_A(c+f)-\left[a^2c+b^2f+2ab(c+f)\right]q\right\}}{2a(ap_A-3bq)}\right\}\\&+\frac{1}{2}(a-h\csc\alpha)^2\tan\alpha-\frac{1}{2}(b-a)\left[2f+(b-a)\right]\tan\beta=0\end{aligned} \tag{11}$$

同时，为保证斜拱在水平方向的稳定性，拱脚处的水平约束力应小于拱脚处底层的最大摩擦力和

粘结力之和，即

$$F_{Ax} \le F_{Ay}\tan\varphi + c_0 \tag{12}$$

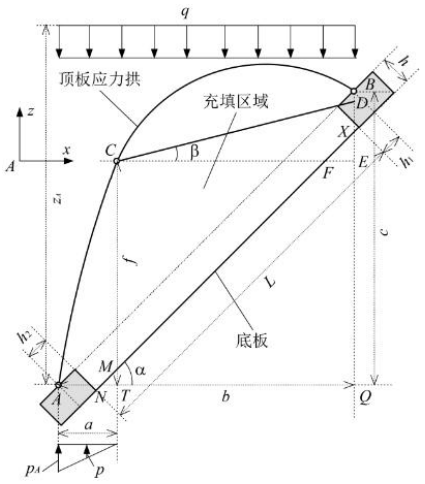


图3 顶板沿倾向非对称应力拱力学模型

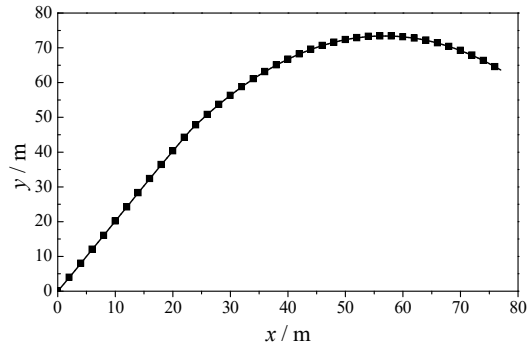


图4 倾向非对称拱合理轴线

底板采动应力场的分布规律和破坏形态均呈现为非对称反拱，且围岩结构存在于围岩裂隙带以外的岩层中，因此结合已有关于顶板围岩拱壳结构的研究思路，可将底板围岩结构沿倾向的力学模型构建为图5所示的非对称反拱AOB。图中，a为煤层倾角，h为拱高，L为跨长（$L=L_0+L_1+L_2$），其中L_0为工作面长度，L_1和L_2分别为上下区段煤柱塑性区宽度)。同时，由于煤层埋深远大于工作面长度在竖直方向的投影，为理论求解方便，将反拱外底板岩层对反拱AOB的作用载荷假设为均布载荷q，并忽略反拱内底板破断岩块及顶板冒落矸石对反拱AOB的作用，见图6。可以看出，底板非对称反拱结构的拱高在倾向中下部区域，且其拱高随着煤层倾角的增大而减小。由于底板采动应力场的分布规律与其破坏形态基本一致，且围岩结构存在于围岩裂隙带以外的岩层中，可以看出，理论计算结果与已有的数值仿真和现场测试结果一致，验证了理论模型的合理性，见图7。

上述反拱AOB的轴线方程为

$$z'(y') = \frac{y'\left[L + y'\sec\alpha\left(\tan\phi\tan\alpha - 1\right)\right]}{L\tan\phi} \tag{13}$$

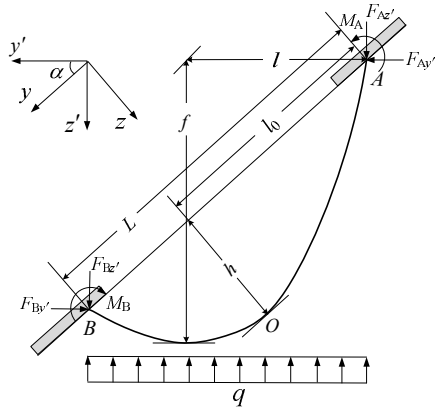


图5 底板沿倾向非对称反拱力学模型

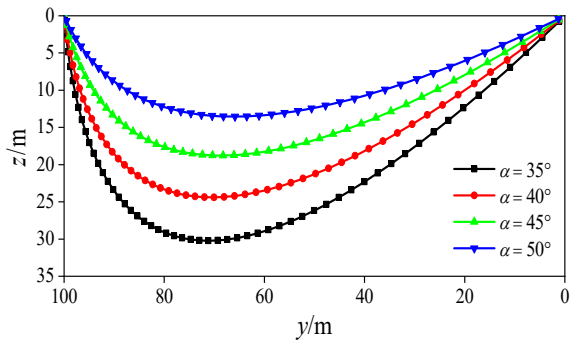


图6 底板沿倾向非对称反拱轴线

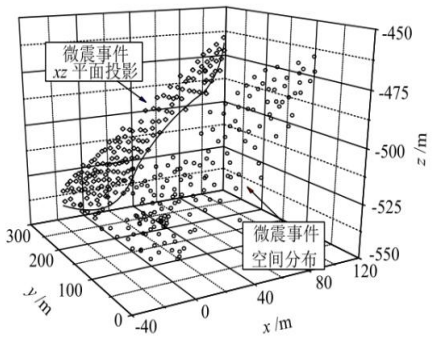
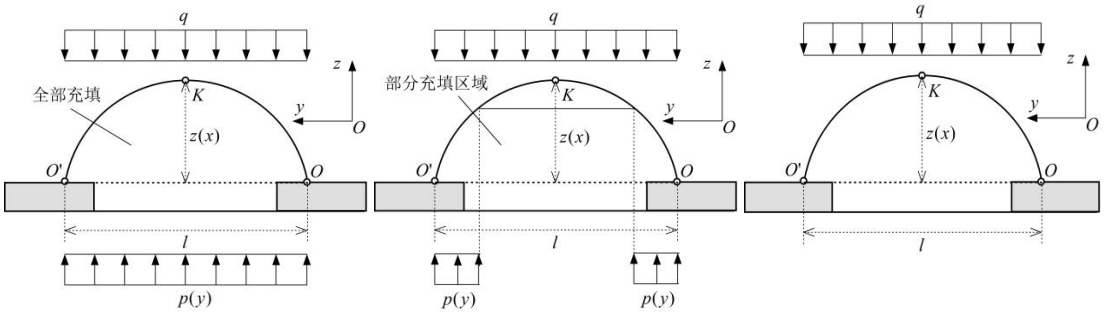


图7 底板沿倾向破坏实测

沿走向方向，建立了采场覆岩对称三铰拱力学模型，见图8，由合理轴线理论可得沿走向应力拱的合理拱轴线方程，见式14，并确定了大倾角煤层开采空间应力拱壳的基本形态。可以看出，沿走向对称应力拱的形态主要受倾向非对称应力拱影响，因此当工作面推进距离远大于工作面长度时，空间应力拱壳两端对称区域的基本形态保持不变。以新疆主焦煤矿井25112大倾角大采高工作面为例，可得倾向非对称应力拱和走向对称应力拱的基本特征。由图9所示倾向非对称应力拱的基本形态可以看出，顶板的最大冒落高度在倾向中上部区域，其位置在倾向距离下拱脚73.9m处。可以看出，沿走向应力拱的拱高和跨长随着x的增大呈现出先增大后减小的趋势，且最大位置位于顶板最大冒落高度处。这些理论分析结果也印证了在大倾角煤层开采中的支架空载、矿压显现不规则等现场观测结果。

$$z(y)=4\frac{z(x)}{l(x)^2}y[l(x)-y] \tag{14}$$



（a）全部充填情况　　（b）部分充填情况　　（c）无充填情况

图8 沿走向应力拱力学模型

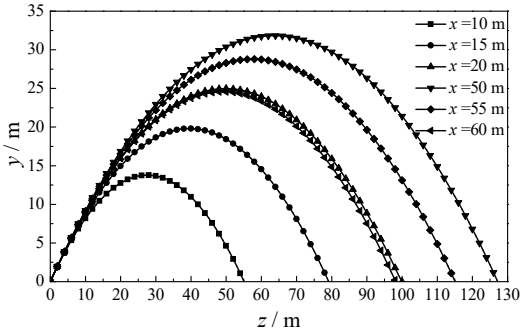


图9 走向对称拱合理轴线

基于上述研究结论，绘制出了大倾角煤层长壁采场宏观拱壳，见图10，基本特征为：

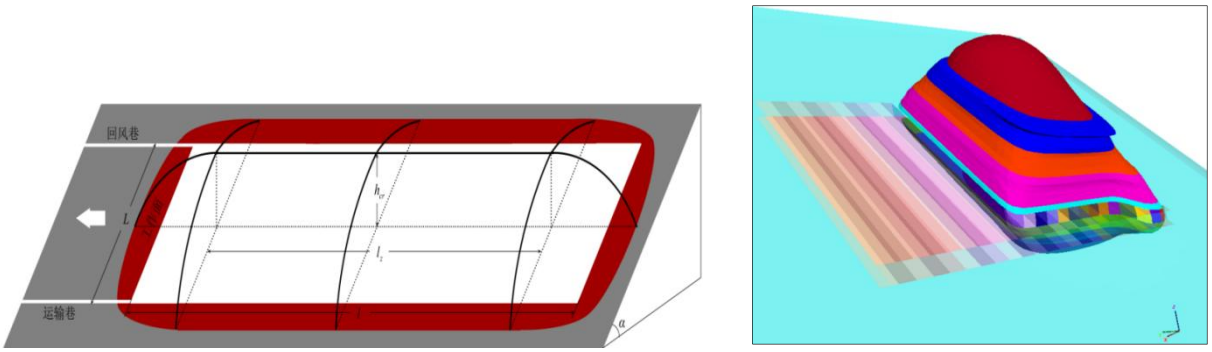
（a）当y<<L时，采场空间仍可视作开挖了一个长度为L、断面宽度为y、高度为h的“非对称倾向巷道”，采场空间围岩结构的倾向“巷道”特征明显。非对称宏观应力拱壳的走向剖面形态为对称拱形，倾向剖面形态为非对称扁平拱。

（b）随着工作推进，采场空间围岩结构的“巷道”特征逐渐减弱。非对称应力拱壳的走向剖面形态仍为对称拱形，但拱高和跨长逐渐增大；倾向剖面形态仍为非对称扁平拱，但扁平率逐渐减小。

（c）当$y=y_{cr}$时，采场空间围岩结构的“巷道”特征完全消失。非对称宏观应力拱壳的最大高度达到临界值z_{cr}，充分采动效应显现，沿走向对称拱形，沿倾向非对称拱形。

（d）随着工作的进一步推进，采场空间围岩结构的“巷道”特征又会逐渐显现。非对称宏观应力拱壳的走向剖面形态由对称拱形演化为对称扁平拱，扁平拱的扁平率逐渐增大，拱高保持为z_{cr}，倾向剖面形态由非对称扁平拱演化为非对称拱形，拱高保持为z_{cr}。

（e）当$y>>L$时，采场空间又可视作开挖了一个长度为y、断面宽度为L、高度为h的“巷道”，采场空间围岩结构的走向“巷道”特征又趋于明显。



（a）基于理论分析的大倾角采场空间曲面　　（b）层间效应下采场关键层空间结构三维曲面

图10 大倾角煤层采场空间结构三维曲面

（三）发明了倾斜开采空间支架-围岩系统数字孪生智能测控平台，研发了具备动-静载响应与位态感知的模型支架，揭示了大倾角长壁采场支架围岩系统多维交互效应和控灾机制。基于大倾角煤层采动煤岩体重力-倾角效应，发现了采场矸石非均匀充填约束效应、底板破坏滑移效应、大范围岩层移动耦合效应，得出了关键层区域迁移及承载结构泛化对支架的施载特征。基于上述结论，建立了垂向“顶板-支架-底板”系统模型、走向“煤壁-支架-矸石”系统模型、倾向“支架-支架”系统模型，给出了工作面不同区域不同维度系统构成元素缺失或成为“伪系统”的时空演化过程及其力学响应规律（图11）。以工作面支架稳定性控制为目标，以合理有效利用重力-倾角效应为核心，提出了大倾角采场多尺度围岩-装备（群）矿压预测与协同控制方法。

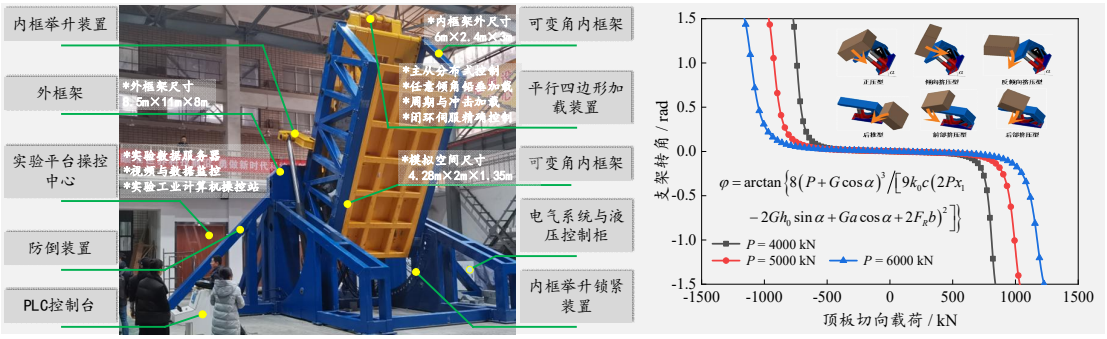
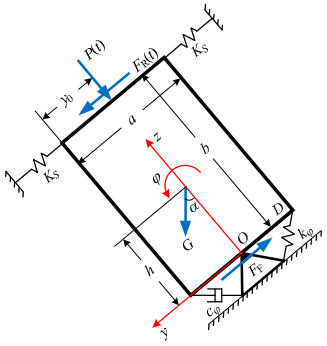


图11 基于数字孪生的围岩-装备力学响应机理及协同控制

采用刚体动力学分析方法，建立了大倾角工作面支架动力学模型，见图12和表1，研究了工作面不同区域内“顶板-支架-底板”系统构成元素缺失或成为“伪系统”的动力学响应机制，得出了空顶、非空顶及顶底板耦合作用下支架力学状态、响应特征。研究表明，在激励载荷的作用下，支架易发生

下沉、转动、滑动和转动+滑动的复合运动，并给出了不同状态的动力学方程，见式15-式18，顶、底板对支架施加的动态载荷作用，并以支架顶梁和底座为载荷传递目标，其中顶板的冲击作用主要以动态载荷沿重力方向的作用为主，对支架顶梁的动态复合作用又可称之为顶板冲击型作用，见图12，分为垂直于顶梁的正压作用和沿工作面倾斜向下的错动作用，该作用下支架易压死或压垮、或者大范围冒顶导致支架整体倾倒；对于底板的动态载荷作用，则主要以底板沿工作面倾向的滑移破坏为主，其对支架底座具有沿垂直底座的瞬间卸载作用和沿工作面倾斜向下的错动作用，亦为复合作用，可称之为底板卸载型作用，该作用下支架易发生甩尾并冲击下方支架。支架间的动态载荷作用以支架侧护板为载荷传递途径，其中支架整体下滑冲击作用主要以动态载荷沿工作面倾向的作用为主，对下支架顶梁、尾梁、掩护梁和底座均具有正压作用，可称之为下滑冲击型作用，该作用下支架亦受到倾向推倒或下方支架整体下滑失稳；沿倾向对下方支架的动态载荷作用，则支架主要以底座下侧为旋转轴向工作面倾斜下方旋转作用与下方支架上，其对下方支架上侧具有瞬间加载作用，可称之为倾倒冲击型作用，该作用下支架易发生倾倒。



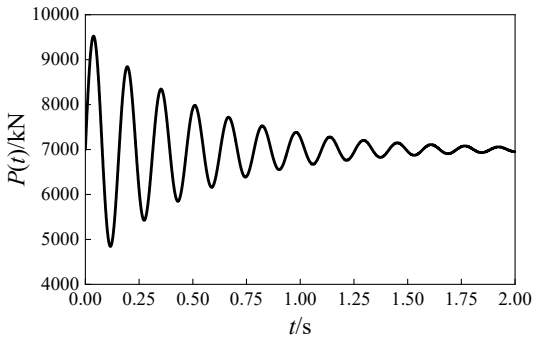


图12 采场支架动力学模型　　图13 支架动力学模型激励载荷

图中，α为煤层倾角，°；a为支架宽度，m；b为支架高度，m；h为支架重心高度，m；GS为支架重量，kN；$P(t)$为工作面顶板对支架法向载荷，即支架工作阻力，kN；FR为工作面顶板对支架切向载荷，即支架与顶板间摩擦力；$\mu 1$为支架与顶板间摩擦系数；FF为支架与底板间的摩擦力，kN；$kS1$和$kS2$分别为支架防倒和防滑千斤顶刚度，kN/m；$k\varphi$为底板等效转角弹性常数；$c\varphi$为底板阻尼系数。

表1 支架动力学模型中相关物理参量

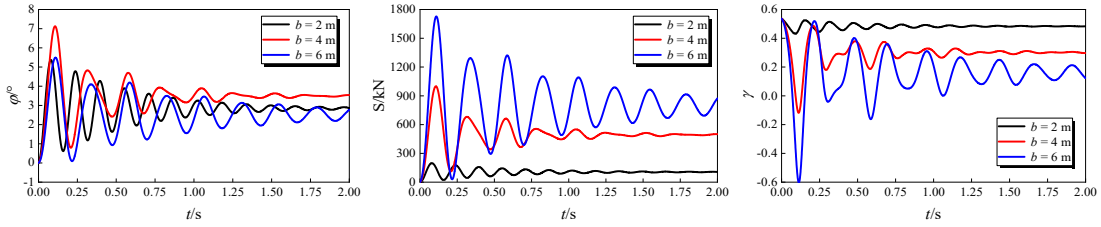
参量	参量名称	参量值
a	支架宽度	1.6 m
b	支架高度	4 m
h	支架重心高度	b/2 m
G	支架重量	15×9.8 kN
k_φ	底板等效转角弹性常数	1.0×10^5kN/m^3
c_φ	底板阻尼系数	1.25×10^5 kN.m^3
k_{S1}	防倒千斤顶刚度	1000 kN/m
k_{S2}	防滑千斤顶刚度	1000 kN/m
μ_1	支架与顶板间摩擦系数	0.3
μ_2	支架与底板间摩擦系数	0.3

由图13-图15可以看出，大倾角工作面“支架-围岩”系统始终处于相互作用、相互制约的动态系统中，当顶板的运移状态发生改变时，其对支架作用载荷的大小、方向和作用点发生改变，支架位态随之发生改变，以适应外部载荷与约束的变化。一般情况下，支架发生下滑的概率较小（不同情况下的下滑系数均小于1），而支架的转动则必然发生，且支架的转动幅度和架间作用力随着顶板法向载荷（支架工作阻力）的减小、顶板切向载荷的增大、顶板偏载程度的增大和采高的增大而增大。

下滑状态下支架动力学方程：

$$m\ddot{y}+y\left(K_S+K_T\right)+\mathrm{Sgn}\left(\dot{y}\right)F_{F\max}=F_{\mathrm{R}}\left(t\right)+G\sin\alpha \tag{15}$$

式中，Sgn($\dot{y}$)为支架滑动时与底板摩擦力的指示函数，当$\dot{y}$大于零时为Sgn($\dot{y}$)=1，当$\dot{y}$小于零时为Sgn($\dot{y}$)=-1。

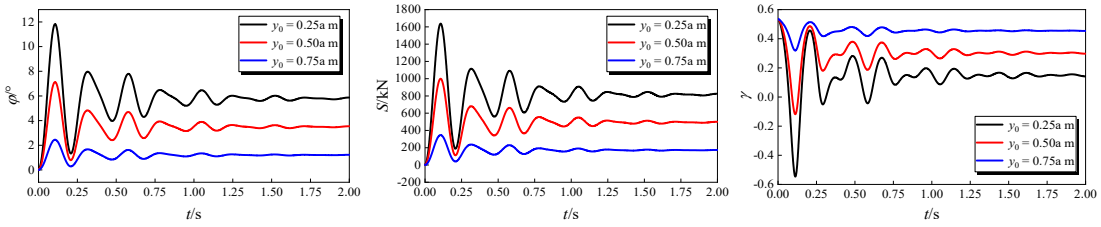


（a）支架转角　　（b）架间载荷　　（c）支架下滑系数

图13 支架下滑动力学响应特征

转动状态下支架动力学响应方程：

$$J_O\ddot{\varphi}+P(t)y_0+c_{F\varphi}\dot{\varphi}+k_{F\varphi}+b^2\sin\varphi K_{\mathrm{S}}=F_{\mathrm{R}}\left(t\right)b+G\sin\left(\alpha-\varphi\right)h-G\cos\left(\alpha-\varphi\right)\frac{a}{2} \tag{16}$$



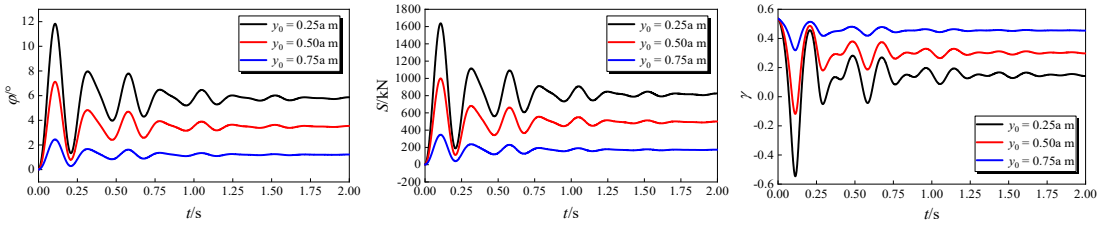
（a）支架转角　　（b）架间载荷　　（c）支架下滑系数

图14 支架转动动力响应特征

下滑+转动支架动力学响应方程：

$$m\ddot{y}+m\ddot{\phi}h+\left(K_S+K_T\right)y+F_{F\max}\mathrm{Sgn}\left(\dot{y}\right)=F_{\mathrm{R}}\left(t\right)+G\sin\alpha-K_Sb\sin\phi \tag{17}$$

$$J_O\ddot{\phi}+P(t)y_0+c_{F\phi}\dot{\phi}+k_{F\phi}+b^2\sin\phi K_{\mathrm{S}}+m\ddot{y}h=F_{\mathrm{R}}\left(t\right)b+G\sin\left(\alpha-\phi\right)h-G\cos\left(\alpha-\phi\right)\frac{a}{2} \tag{18}$$



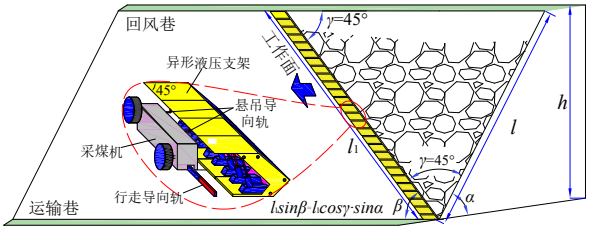
（a）支架转角　　（b）架间载荷　　（c）支架下滑系数

图15 支架下滑+转动动力响应特征

三、大倾角煤层（群）开采新方法

大倾角工作面安全-产量综合效能随倾角增大呈负增长，特别是倾角大于60°后，长壁综采-综放开采综合效能急剧降低。本案例创新了斜向长壁开采系统，有效利用了重力-倾角效应，解决了薄及中厚煤层围岩-装备稳定性控制难题；发明了小短壁、长-短壁融合开采方法，提升了特厚煤层煤壁稳定性及顶煤冒放性，提高了资源回收率；研发了多煤层、多区段协同开采方法，消除了回采空间煤岩群组联动致灾隐患，提升了煤层群与无煤柱开采安全-产量综合效能。

（一）发明了大倾角薄及中厚煤层走向长壁自平衡异形支架斜向长壁开采方法。异形支架俯伪斜开采方法将煤层真倾角和工作面煤炭自溜临界倾角（>31°）有机结合，走向长壁工作面伪俯斜布置（伪俯斜角<20°），采用异形液压支架、特种采煤机和导向输送机动态耦合，降低工作面倾角，大幅度提高围岩-装备系统动态稳定性（图16）。斜向长壁开采方法将煤层真倾角与工作面煤壁稳定、支护系统稳定与飞矸防控有机结合，沿煤层走向和倾向均成一定夹角（45°左右）布置斜向工作面，工作面运输和回风巷呈一定角度倾斜，斜向推进，解决了常规大倾角煤层综采装备稳定性控制难题。



α–煤层倾角 β–工作面真倾角 γ–临界伪斜角 h–垂向段高 l、l1–工作面真倾斜、伪倾斜长度

图16 薄及中厚煤层伪俯斜长壁开采方法

现有倾角大于55°、煤层厚度大于2.0m的大倾角煤层采用传统的工作面伪斜布置方式进行开采时，开采设备的倒滑及煤壁片帮问题不能有效解决。本案例针对现行大倾角工作面伪斜布置方式及工作面设备的弊端进行了改进，提供了一种大倾角煤层临界伪斜角综合机械化开采方法及设备。

1.煤层倾角α>55°时，临界伪斜角的确定：煤层倾角α及伪斜角γ之间的空间几何关系为:

$$l_1\sin\beta=l_1\cos\gamma\cdot\sin\alpha \tag{19}$$

其中l_1为工作面伪倾斜长度，β为伪俯斜工作面的真倾角；

要保证采煤机割下的煤自溜，则伪俯斜工作面的真倾角β应满足

$$\sin\beta>\sin35^\circ=0.574 \tag{20}$$

松散煤体的自然安息角为35°，将（19）代入（20）得:

$$\cos\gamma\cdot\sin55^\circ>0.574 \tag{21}$$

求解得：当γ>45°，因此确定临界伪斜角的大小为45°；

2.临界伪倾斜工作面布置：沿煤层倾斜方向分别掘进回风巷道与运输巷道，上端头超前下端头，上下端头掘通形成伪俯斜工作面，保证上端头超前下端头的距离与伪俯斜工作面真倾斜方向的长度l相等，形成伪俯斜工作面与煤层走向方向呈45°布置；在伪俯斜工作面布置支护装置及采煤设备，进行综合机械化开采。工作面支护装置包括顶梁、底座、导向轨、以及推杆，采煤机沿导向轨行走，导向轨通过推杆固定在底座上，底座底部与伪俯斜工作面的伪斜方向平行，底座与煤壁间的底板自由空间形成溜煤通道。导向轨与工作面伪斜方向平行。工作面支护装置还包括设置在采煤机上的悬臂定向轮，以及设置在顶梁上的悬吊导向轨。回采过程中，采煤机沿导向轨行走割煤，同时悬臂定向轮沿悬吊导向轨行走，采煤机截割下的破碎煤体在重力作用下沿溜煤通道自溜至运输端头并运出。

（二）发明了大倾角特厚煤层长壁综采-短壁综放融合开采方法和小短壁综放开采方法。长壁综采-短壁综放融合开采方法充分利用走向长壁和水平分段布置特点，直线段布置完成特厚煤层长壁综采工序，非直线段布置完成放顶煤工序，多区段间相互配合，提高了倾角35°-75°，厚度8.0-10.0m煤层开采装备稳定性和煤炭回收率。小短壁综放开采方法创新性布置了采掘合一、单一巷道工作面，螺旋钻机超前回收巷旁煤柱，纵横自移式支架回收顶煤，沿空成巷形成工作面“Z”形通风，破解了厚度4-

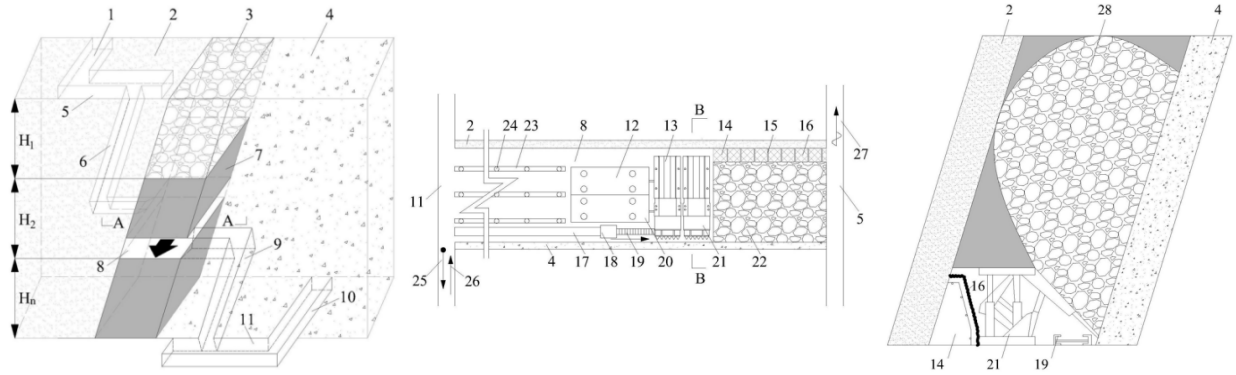
8m大倾角煤层机械化开采难题。

1.工作面系统布置

（1）在一个阶段内将煤层沿倾向划分为若干个水平分段；（2）根据煤层厚度沿煤层底板或全断面布置回采巷道；（3）回采巷道在煤层一边缘依次通过进风斜巷、阶段运输石门与阶段运输大巷联接，形成运煤系统和进风系统；回采巷道在煤层另一边缘依次通过回风斜巷、阶段回风石门与阶段回风大巷联接，形成回风系统；（4）工作面从回风斜巷侧向进风斜巷侧推进的过程中，在回采巷道沿煤层顶板侧采用柔性掩护支架和金属网在采空区中留设沿空回风巷道，形成工作面“Z”型通风（图17）。

2.回采工艺过程

（1）采用煤巷综掘机进行落煤，并通过转载机和带式输送机依次经阶段运输石门和阶段运输大巷运出；（2）沿工作面推进方向布置两台牵引支架，垂直于两台牵引支架横向布置两台放煤支架，两台放煤支架放煤口均位于煤层底板侧；（3）在放煤口下方布置一台刮板输送机，刮板输送机机头通过转载机与带式输送机机尾搭接；（4）放煤前，在工作面回采巷道打深孔对顶煤进行预裂，钻孔超前工作面施工；（5）预裂后，检查墩柱和操作控制阀，然后先拉移第一台牵引支架，再拉移第二台牵引支架，之后以两台牵引支架为支撑，同时向前拉移两台放煤支架，完成一个步距的拉移，接下来先打开第一台放煤支架的放煤机构进行放煤，放三分之一煤后关闭放煤机构，再打开第二台放煤支架的放煤机构进行放煤，放三分之一煤后关闭放煤机构，如此交替反复，当矸石占到放煤量的一半时，停止放煤；（6）放出的顶煤由刮板输送机通过转载机转入带式输送机再依次经阶段运输石门和阶段运输大巷运出。



（a）立体图　　（b）A-A平面图　　（c）B-B断面图

图17 大倾角厚煤层水平分段小短壁综放开采方法的巷道布置图

1-阶段回风大巷；2-顶板；3-上区段采空区；4-底板；5-阶段回风石门；6-回风斜巷；7-放顶煤层；8-工作面回采巷道；9-进风斜巷；10-阶段运输大巷；11-阶段运输石门；12-第一台牵引支架；13-第一台放煤支架；14-工作面沿空回风平巷；15-柔性掩护支架；16-金属网；17-带式输送机；18-转载机；19-刮板输送机；20-第二台牵引支架；21-第二台放煤支架；22-本区段采空区；23-铰接顶梁；24-液压支柱；25-运煤路线；26-新鲜风流；27-污风流；28-破碎煤体

（三）发明了大倾角煤层群组水平分段协调开采方法和多区段煤柱错层护巷开采方法。煤层群组水平分段协调开采方法是在两层煤（间距<10m）内快速掘进回采巷道，通过联络巷形成通风回路，采用4-6m大宽度低位放顶煤液压支架横向布置、履带式支架牵引车纵向移动，工作面采掘合一、采放分离，实现了近距离煤层群（层间距<30m）协调开采（图18）。多区段煤柱错层护巷开采方法是将下区段回风巷与上区段运输巷错位布置，改善了下区段采场顶板非均衡受载，可有效回收6-8m区段煤柱资源，保证了下区段工作面安全开采，实现了大倾角煤层无煤柱开采。

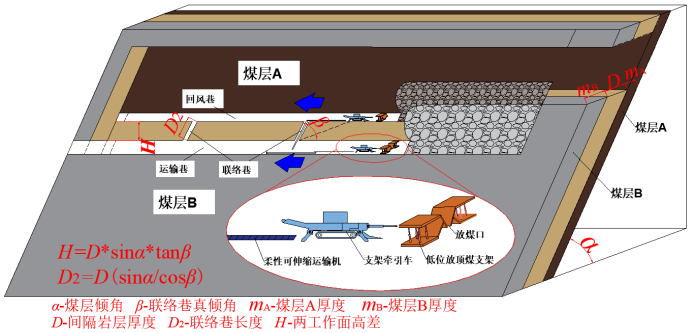


图18 煤层群组水平分段协调开采方法

对于厚度4～12m的大倾角特厚煤层群，该类煤层厚度大、距离近，相邻采场相互影响作用比较明显，采用上述单一煤层开采方法进行上行开采、下行开采、上下同采或联合开采时，容易存在上下煤层开采二次扰动、动压巷道的围岩稳定性难以控制、巷道及工作面的合理错距难以确定、采空区贯通易造成强动力灾害等问题。传统的大倾角采煤方法还存在工序较多、通风效果差、煤炭回收率低、掘进工程量大等缺陷。为解决现有技术中存在的以上不足，本案例提供了一种大倾角近距离特厚煤组水平分段协调开采方法，通过创新工作面布置方式、优化回采装备及回采工艺，以实现对大倾角近距离特厚煤组安全高效协调开采的目的。

在煤层中掘进两条回采巷道分别作为回风平巷和运输平巷，再沿煤层走向每间隔30～50m在回风平巷和运输平巷之间开掘联络巷；然后在回风平巷和运输平巷中分别布置相应的工作面，对煤层协调开采。依据煤层厚度，回风平巷和运输平巷中均可通过设备的布置和支护条件的改变形成以下任意一种类型的工作面：A型工作面：包括布置于回采巷道内的低位放顶煤支架、支架牵引车和可伸缩带式运输机，其中，可伸缩带式运输机沿煤层走向布设；B型工作面：包括于回采巷道内相对布置的两台低位放顶煤支架、支架牵引车和刮板输送机，其中，刮板输送机沿煤层走向布设；煤层回采时，同一回采巷道内：低位放顶煤支架的放煤口与支架牵引车的运煤输入口相对应，支架牵引车的运煤输出口与可伸缩带式运输机或刮板输送机的运煤输入口相对应（图19）。

本案例设计并采用了支架牵引车，进而优化改变了工作面的移架方式：在A、B型工作面中，液压支架数量较少，且布置方向与传统液压支架布置方向不同，所以采用外部设备对液压支架进行移架。因此，本案例设计并引入了支架牵引车这一新设备，用来对低位放顶煤支架进行移架，大大减少了工作面移架工序，减轻了工人的劳动强度。此外，支架牵引车还可以起到装煤、运煤等作用，提高了工作面的机械化程度（图20）。

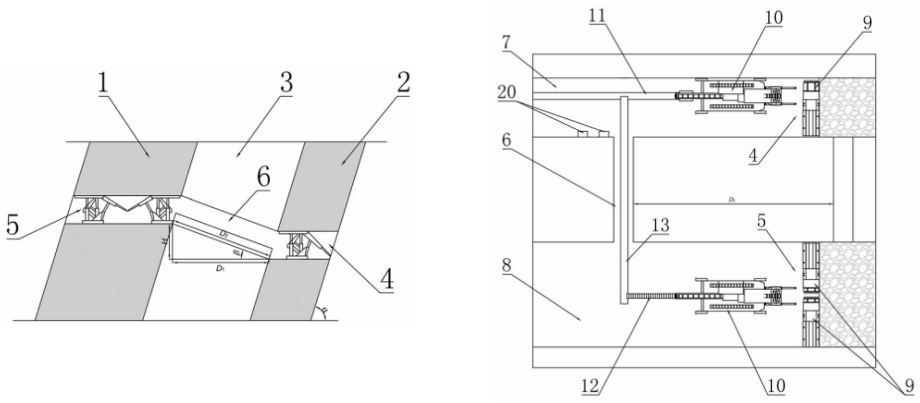


图19 大倾角近距离煤组协调开采示意图

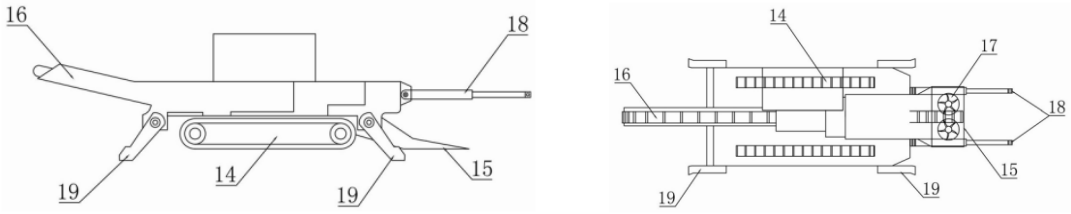


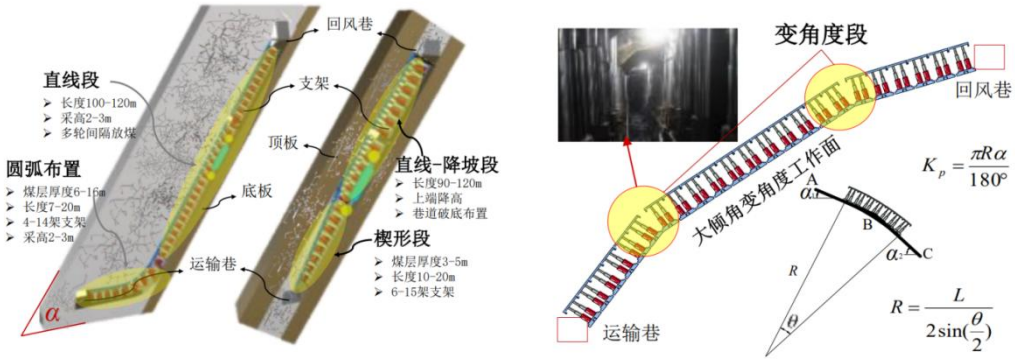
图20 支架牵引车主视图、俯视图

1-上煤层；2-下煤层；3-间隔岩层；4-A型工作面；5-B型工作面；6-联络巷；7- 运输平巷；8-回风平巷；9-低位放顶煤支架；10-支架牵引车；11-可伸缩带式运输机；12-刮板输送机；13-溜槽；14-行走部；15-铲板；16-第一运输机；17-星轮装载机构；18-牵引部；19-支撑腿；20-通风机。

四、围岩与装备多维协同控制技术

大倾角煤层开采存在煤壁-支架-采空区矸石走向系统、顶板-支架底板垂向系统、煤柱-支架群-煤柱倾向系统等多维稳定性控制难题；同时，面临顶底板局部破坏、煤柱失稳、煤壁片帮、大范围岩层失稳及飞矸冲击等多尺度灾害控制难题。本案例以工作面“三机”为核心，充分利用重力-倾角效应对垂向、走向及倾向系统开展控制实践，攻克了多维度、多尺度围岩与装备协同控制难题。发明了大倾角采场走向（煤壁-支架-采空区矸石）、垂向（顶板-支架-底板）、倾向（煤柱-支架群-煤柱）多维协同控制技术及其配套装备，研发了装备单元体自控制、围岩-装备群组联合控制、多空区煤岩体-装备群组协同控制技术，攻克了围岩-装备三维跨尺度动态稳定性控制难题，实现了该类煤层安全高效开采。

（一）发明了基于不同开采方法的大倾角煤层长壁工作面非线性布置技术。在倾向维度上，发明了变角度工作面弧形布置、大采高工作面“楔形”布置、综放工作面变角度布置等特殊布置方式，降低了倾斜下部采场高度（4m降至2m），增加了倾斜下部充填长度（30m增至45m），提升了工作面支护系统受载均衡程度，消除了顶板大范围冲击灾害隐患，提高了顶板控制可靠性（图21）。



（a）端头非线性布置方式　　（b）工作面全长布置方式

图21 工作面非线性布置

（二）发明了“支架阻力非均衡利用、煤壁超前分区加固、坚硬顶板耦合弱化”的采场围岩稳定性控制技术。在倾斜采场空间，针对顶板-煤壁-底板与装备非对称受载及其稳定调控难题，以倾向空间围岩控制为目标，采用“倾斜中部最大、上部次之、下部最小”的工作阻力分区控制方式，采用“加强中上部煤壁监测与控制、超前加固与提升阻力”的煤壁稳定性控制方法，采用“中部基本顶深孔预裂+两巷中深孔切顶+空区深孔探测”的坚硬顶板弱化技术，降低了顶板对煤壁与支架的非均衡作用，提升了煤壁自身及支架对煤壁的约束效应，解决了大倾角采场煤壁非对称抽冒与支架非均衡受载难题（图22）。

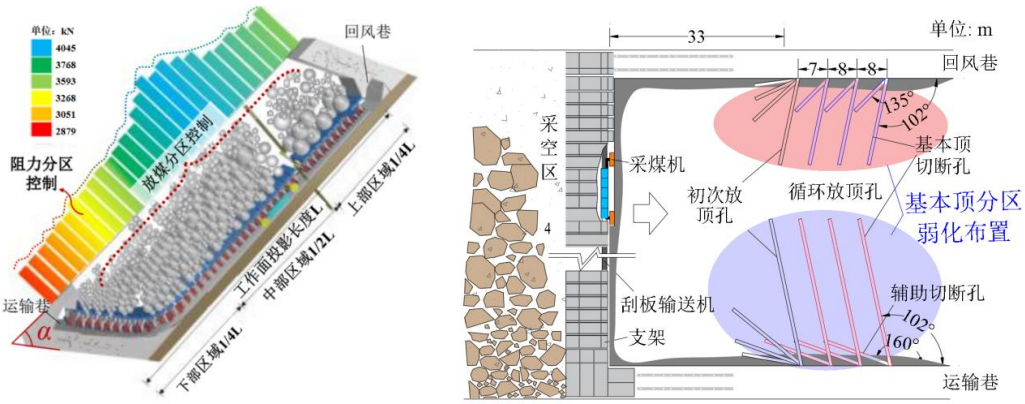
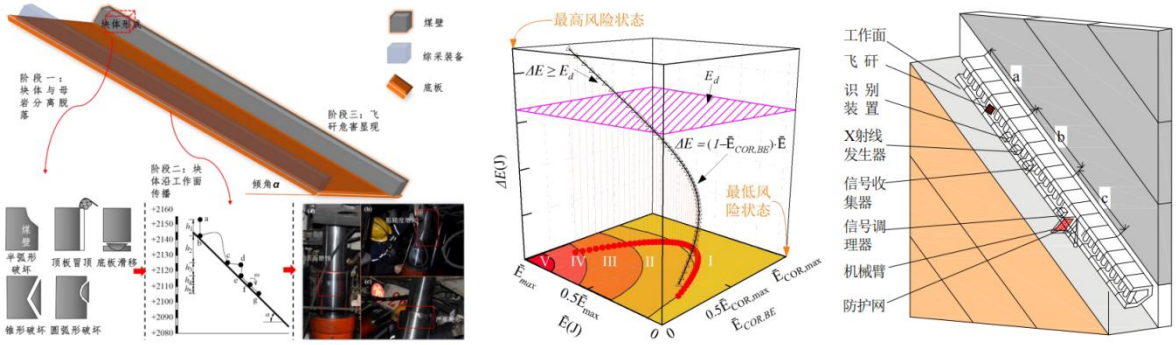


图22 顶板（煤）非对称控制

（三）发明了大倾角煤层长壁工作面全时空域飞矸防控技术。提出了“上部飞矸轨迹阻拦、中部飞矸源头治理、下部飞矸预防二次衍生”分区控制模式；“运动阶段多次碰撞梯阶耗能、碰撞前飞矸与设备柔性隔断阻滞、碰撞时高强材料抑损抗变”分阶段控制方法；发明了“诱导运动模式、限制回弹高度、调控耗能比例”的全过程控制技术，消除了飞矸伤人损物安全隐患（图23）。



（a）飞矸动力损害全过程　　（b）评价模型　　（c）飞矸智能防护系统

图23 全时空域飞矸安全隐患评估方法

五、“三机”装备及智能监测系统

（一）本案例研发了适用于倾斜回采空间多维度围岩协同控制的特种装备。沿垂向，研发了防顶板冲击、支撑能力强（7000kN）、防陷底的大采高液压支架，以及适应伪俯斜布置的平行四边形顶梁和错位立柱的异形液压支架，完善了顶板-支架-底板系统协同控制技术体系；沿走向，研发了高煤壁多级护帮装置、抬底装置以及异形防矸石冲击顶梁及多维挡矸装置，形成了完整的走向煤壁-输送机-支架-矸石协同控制系统；沿倾向，研发了防装备下滑、防支架倾倒、防采煤机跑车的三机系统协同控制装备与技术。实现了围岩-装备多维协同控制（图24）。

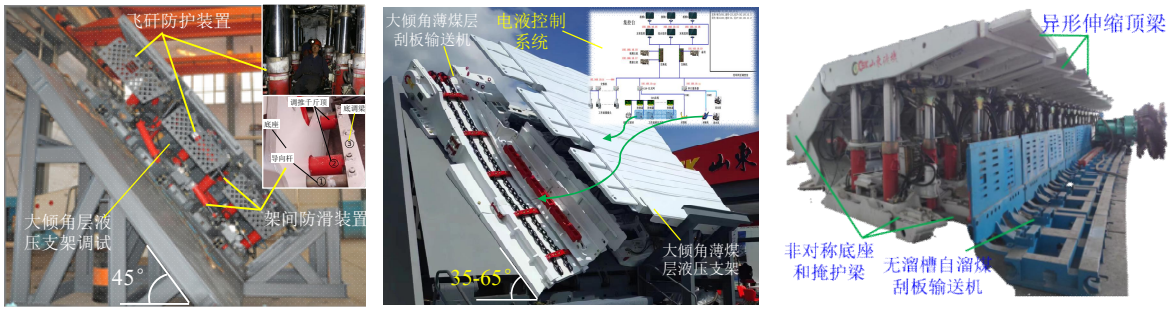


图24 适用不同埋藏条件的大倾角工作面三机装备及协同控制系统

（二）本案例研发了大倾角工作面液压支架监测系统。在液压支架中心距管理方面，为保证支架能够自动跟机动作，严格控制支架的状态始终保持初始调试正常的状态，在移架过程中由于降架后有下滑趋势，需要精确监控支架中心距，避免在自动程序动作中支架状态不正常而影响自动跟机。控制方式采用控制侧护行程来精准反馈支架中心距并根据设定的范围自动调整。因侧推千斤顶为双作用，双安装孔结构，传统内置式行程传感器无法安装。因此，采用柔性拉线位移传感器（图25-图27）。

在液压支架自动充分接顶控制技术方面，大倾角工作面液压支架防滑力主要靠支架本身的支撑力产生摩擦力，自动程序操作后，液压支架需在拉架完成后自动充分完整接顶才能保证足够的支撑力，因此需监测其支撑力是否达到初撑力。通过检测平衡千斤顶压力参数，实现支架联动，保障液压支架顶梁与顶板自动完整接顶。并且电液控制系统具备支架初撑力自动连续补偿功能，当立柱下腔压力降至某一设定值时，支架控制器会自动执行升柱，补压到初撑压力，并可执行多次，保证支护质量。

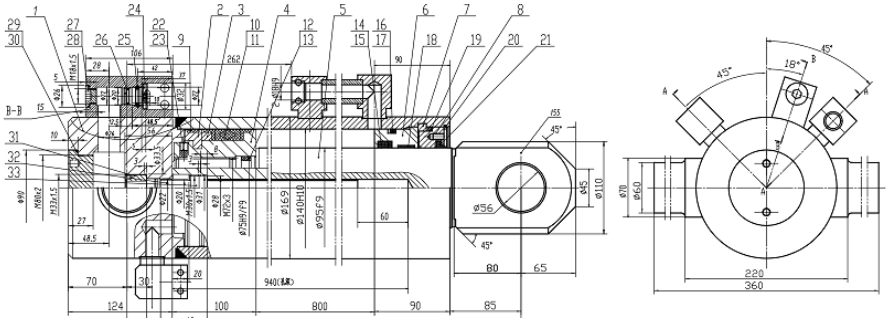


图25 推移千斤顶结构

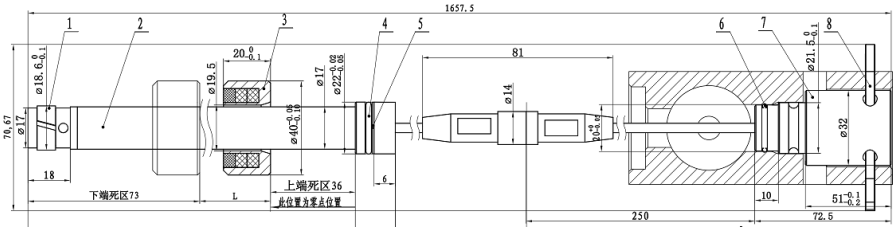


图26 行程传感器结构

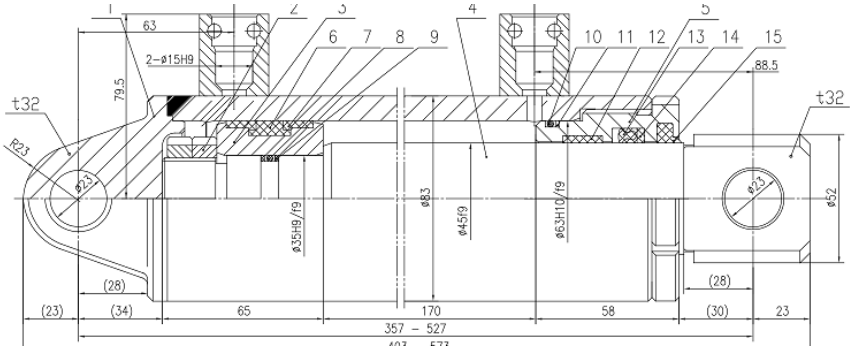


图27 侧推千斤顶结构

（三）本案例针对顺槽设备设计研发了一套顺槽监测系统，用于显示传感器采集的设备温度、流量、压力、报警、故障等信息，并能够根据传感器采集的数据实现故障报警、停机保护功能。该系统配有大容量存储卡记录现场采集的数据，具有电流、功率等曲线分析功能。主要监测如下：

1.刮板运输机驱动部运行状态监控装置。监测点为：减速器润滑油油温、油位，输入、输出轴轴承温度；电动机电机轴伸端和定子绕组温度、冷却水出水口温度、入水口压力、冷却水流量。实现对减速器、电动机的运行状态的实时监测、监控，数据上传。

2.转载机驱动部运行状态监控装置。监测点为：减速器润滑油油温、油位，输入和输出轴轴承温度；电动机电机轴伸端和定子绕组温度、冷却水出水口温度、入水口压力冷却水流量。实现对减速器、电动机的运行状态的实时监测、监控，数据上传。

3.破碎机电动机运行状态监控装置。监测点为：电机绕组温度、电机输出轴轴承温度。实现对电动机的运行状态的实时监测、监控，数据上传。

4.工作面运输机机头、机尾监控装置、工作面转载机监控装置、顺槽监控中心监控主站须通过通信电缆连接在一起，实现内部通信，再采用一个接口与开采自动化系统连接。

5.监控装置通信接口采用RS485接口，通信协议采用MODBUS RTU通信协议。监控装置通过该通信接口将刮板运输机（减速器、电机）、转载机（减速器、电机）的运行状态传给开采自动化系统。

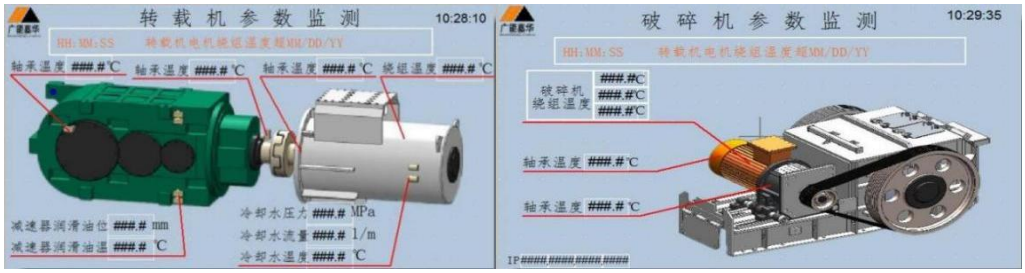


图28 主要显示界面



图29 顺槽监测系统内部

六、工程实践

（一）石洞沟煤矿大倾角工作面液压支架研制

以川煤集团石洞沟煤矿31111大倾角综采工作面为例，在分析和研究国内外现有大倾角煤层开采成套设备存在的优缺点的基础上，结合工作面地质情况与巷道断面尺寸，通过技术方案的审定和参数计算，最终确定成套设备规格型号见表2。

表2 石洞沟煤矿31111工作面成套设备规格型号

序号	配套设备	型 号
1	液压支架	ZY5200/18/48JD
2	采煤机	MG400/990-WD
3	刮板输送机	SGZ800/400
4	端头支架	ZTHJ2800/16/28D
5	转载机	SZZ800/400

工作面设备平面布置如图30所示。

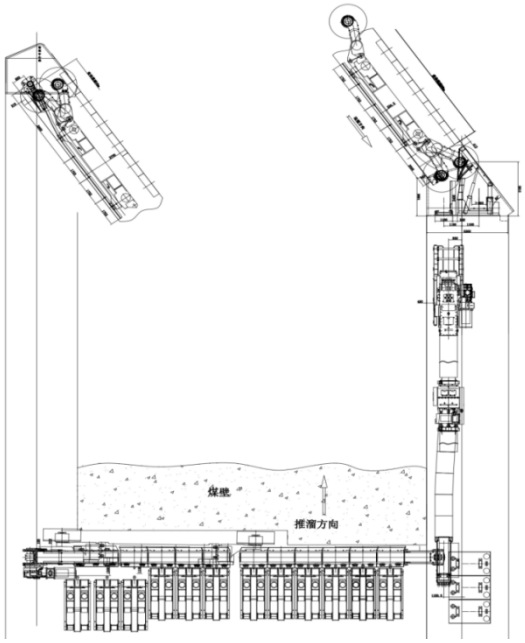


图30 石洞沟煤矿31111工作面平面布置图

1.工作阻力计算

（1）基于“R-S-F”系统动力学控制理论的支架工作阻力确定

支架平均宽度b=1.75m；

支架支护的顶板平均长度（最小和最大支护长度的平均值）l：

$$l=\frac{1}{2}(4.8+5.65)=5.225\text{m} \tag{22}$$

支架支护的顶板最小宽度B_{min}（顶板破断岩块倾向尺度，按2架支架宽度计）：

$$B_{\min}=2b=3.5\text{m} \tag{23}$$

工作面直接顶厚度$\sum H_d$取0.75m；

工作面基本顶厚度$\sum H_b$取7.5m；

支架于顶、底板之间的动摩擦系数μ在0.35-0.42之间；

上覆岩层平均容重v取25kN/m^3；

鉴于石洞沟31111工作面的煤层煤层介于45°-65°之间，按照极小值所得的支架工作阻力大，为此，这里取煤层倾角α=45°；

支架平均支护面积A_a：

$$A_a=lb=5.225\times1.75=9.14375\text{m}^2 \tag{24}$$

工作面动载系数K：

$$K=1+\chi=\frac{\sum H_d+\sum H_b}{\sum H_b}=\frac{0.75+7.5}{7.5}=1.1 \tag{25}$$

顶板破断岩块重量Q_γ（选取直接顶和基本定的总厚度为8.25m）：

$$Q_\gamma=vlb\sum H_d=25\times9.14375\times8.25=1885.9\text{kN} \tag{25}$$

支架质量拟按照25吨计，则其重量Q_s：

$$Q_s=25000\times9.8=245\text{kN} \tag{26}$$

相关设备的预计分摊重量（按采煤机通过时计算）Q_*

$$Q_* = \frac{35000 + 1000 \times 9.8}{4} = 88.2\text{kN} \tag{27}$$

直接顶实际垮落厚度与标定厚度系数η：

$$\eta = \frac{0.7}{0.7} = 1.0 \tag{28}$$

顶板实际垮落岩块与支架质量比ζ：

$$\zeta = \frac{\eta Q_r}{Q_s + Q_*} = \frac{1.0 \times 1885.9}{245 + 88.20} = 5.66 \tag{29}$$

根据前述分析，石洞沟煤矿煤层顶板为III级3类，底板为II类，一般情况下工作面易出现底板破坏滑移。支架和相关设备下滑、倾倒现象会经常出现（错动失稳），故可认为“支架－围岩”系统具有错动和顺向综合失稳特征。

据此，“支架－围岩”系统动态失稳的临界倾角为：

$$\begin{gathered}[\alpha_1] = tg^{-1}(1+3\zeta)\mu = tg^{-1}[(1+3\times5.66)\times(0.35\sim0.42)] = 80.97^\circ \sim 82.46^\circ \\ [\alpha_2] = tg^{-1}(\zeta-1)\mu = tg^{-1}[(5.66-1)\times(0.35\sim0.42)] = 58.49^\circ \sim 62.94^\circ\end{gathered} \tag{30}$$

由于$\alpha \le \min\{[\alpha_1],[\alpha_2]\}$，所以根据“支架－围岩”动态稳定性理论，支架工作阻力为：

$$P = \frac{\eta+1}{\eta}P^* - P^\circ = \frac{\eta+1}{\eta}Q_r\cos\alpha - \frac{1}{\mu}Q_s(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) \tag{31}$$

支架带压移架工作阻力为：

$$P^\circ = P_2^* = \frac{1}{\mu}Q_s(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) \tag{32}$$

将上述各参数代入，可得：

$$\begin{gathered}P^\circ = 554.17 \sim 700\text{kN} \\ P = 1967.07 \sim 2112.87\text{kN}\end{gathered}$$

考虑来压期间的动载效应与底板滑移影响，取影响因子1.7，则有：

$$[P] = 1.7 \times KP = 1.7 \times 1.1 \times (1967.07 \sim 2112.87) = 3678.42 \sim 3951.07\text{kN} \tag{33}$$

由此可得支架处于正常状态时的支护强度为0.22-0.23MPa，工作阻力为1967.07-2112.87kN；来压期间的支护强度为0.4-0.43MPa，工作阻力为3678.42-3951.07kN。

（2）基于物理相似材料模拟实验的支架工作阻力确定

结合已有相关大倾角物理物理相似材料模拟实验结果推算（图31），其正常状态时支架平均工作阻力为3500-3806kN，来压期间支架最大工作阻力为4600kN，初撑支护强度为实际支护强度的75-85%。



图31 大倾角煤层走向长壁开采支架围岩相互作用关系

（3）基于实测法计算的支架工作阻力

根据我国120多个综采工作面所测得的数据统计，III级3类顶板使用掩护式支架时，所需支架工作阻力为2306.85-2813.85kN，换算为支护面积为7.39375m^{2}的掩护支架工作面，支架支护强度为0.312-0.391MPa，来压期间4567.56-5581.32kN，支架初撑支护强度为实际工作阻力的75%-85%。

（4）石洞沟煤矿支架设计工作阻力及支护强度确定

综合上述计算结果可以看出，基于“R-S-F”系统动力学控制理论得出的支架工作阻力为3678.42-3951.07kN、基于传统理论得出的支架工作阻力为7332.71kN、基于已有相关物理相似材料模拟实验得出的支架工作阻力为4600 kN、基于实测法计算的支架工作阻力4567.56-5581.32kN。

基于石洞沟煤矿特殊的地质条件，综合上述计算结果，结合多年来对大倾角工作面液压支架参数确定经验，在确保工作面液压支架的支护效率和支架的可靠性、稳定性的基础上。最终经华荣能源公司专家组研判确定，石洞沟煤矿支架工作阻力为5200kN。

2.液压支架参数及功能

通过三机配套，在确定了采煤机和刮板机后，明确了设备相关参数要求，对支架结构进行了设计。其主要技术指标如表3所示：

表3 ZY5200/18/48JD液压支架主要技术指标

参数	指标
高度	1.8～4.8m
采高	2.6-4.5m
宽度	1.61-1.84m
长度	5.57～7.08m
中心距	1.75m
初撑力	4453KN(P=31.5MPa)
工作阻力	5200kN(P=36.78MPa)
支护强度	0.68～0.73MPa(H=2.6～4.5m)
前端比压	1.35～2.75MPa(H=2.6～4.5m)
操纵方式	电液控自动控制
泵站工作压力	31.5MPa

3.俯伪斜开采支架适应性设计

2014年开始至今，原川煤集团广能公司会同嘉华公司在石洞沟煤矿开展大倾角俯伪斜智能化开采技术及成套装备研究和70°自动化开采技术及成套装备研究；太平煤矿开展了双俯伪斜开采技术研究，实现了大倾角工作面开采的成功；原川煤集团达竹公司开展了大倾角俯伪斜电液控支架技术研究，上述科研项目均取得了一定成果。这为大倾角工作面斜俯伪斜开采工艺，解决工作面飞煤飞矸等问题，提供了理论和实践基础。支架需要适应8°以内俯伪斜布置及开采，对开采设备适应性要求进一步加大。

（1）支架宽度按俯伪斜开采设计。适应俯伪斜布置后支架中心距变小，支架宽度1610-1840mm，防止支架挤架，如图32和表4所示。

表4 俯伪斜布置中心距变动情况表

伪斜角度	0°	3°	5°	7°	8°
中心距变化	1750	1748	1743	1737	1733
超前量	\	92	153	213	244

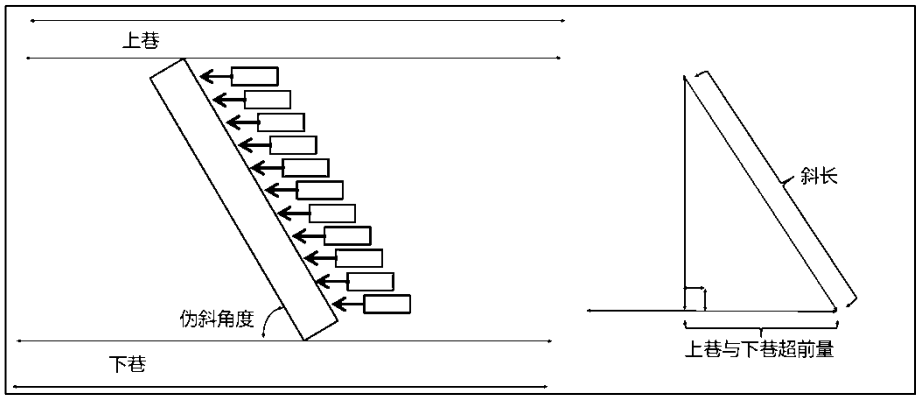


图32 俯伪斜开采示意图

（2）顶梁前端适应俯伪斜变化范围。解决了俯伪斜布置后采煤机割顶梁尖角，又能适应左右工作面互换，且空顶面积只增加0.14m^2，如图33所示。

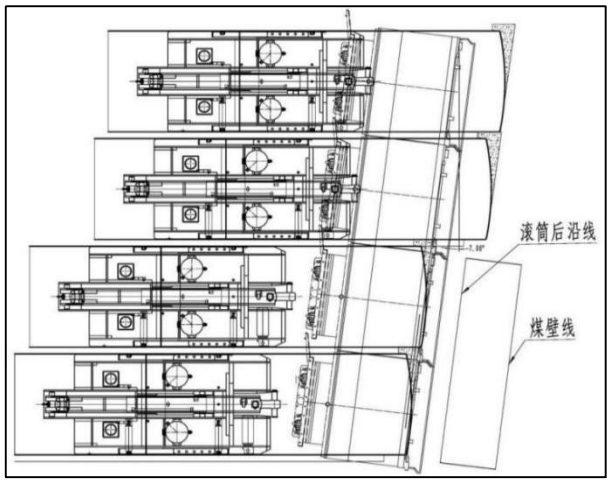


图33 俯伪斜布置空顶情况图

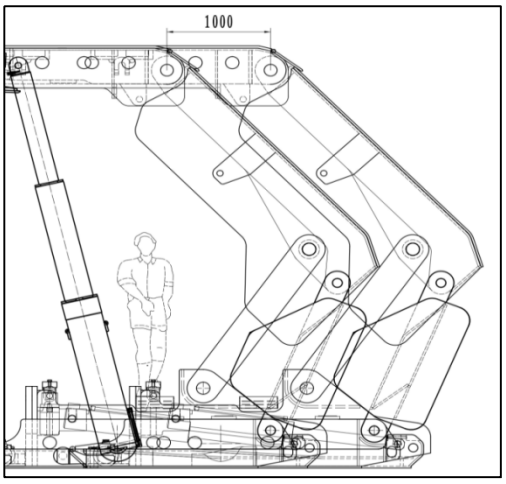


图34 防窜矸示意图

（3）俯伪斜开采防窜矸、漏矸设计。侧护板均加宽设计，满足支架4.5m采高时俯伪斜7°拉架（支架前后错距1.0m）时掩护要求；实现俯伪斜开采防窜矸需求。顶掩铰接处辅助增加顶掩防漏矸挡板，有效的防止矸石从此处漏入支架内，如图34所示。

（4）调架防倒行程适应性设计。优化调架防倒千斤顶布置，可实现了800截深俯伪斜布置后天缸地缸可一次拉架到位，无需二次拉架。（满足伪斜布置7°，前后错距约1m调架需求）

（二）太平煤矿大倾角工作面安全技术及智能化研究

1.设备防倒防滑技术研究

（1）液压支架的防倒防滑技术

为防止支架下滑、倾倒，支架设置了防倒防滑连接座，下方六架共设置5组支架顶梁防倒，底座前防滑、后防滑，其余支架采用防倒防滑交错布置。

①防倒防滑装置技术参数如表5所示。

表5 防倒防滑装置技术参数表

防倒防滑千斤顶	数量	根据工作面需要布置
	形式	普通双作用
	缸径/柱径	125/70mm
	推力/拉力	386/265kN（P=31.5MPa）

②防倒防滑结构形式

支架顶梁设防倒、底座设防滑调架装置，底座设双侧调架梁，有效防止支架倒架和下滑及调架；底座前端过桥上预留调架千斤顶的安装位置。底座布置有后调架千斤顶；顶梁上预留防倒千斤顶的安装位置；支架均可以安装防倒防滑装置。使任意支架都可以作为排头支架，为搬家倒面提供了方便。

采取主动防倒、防滑技术，防倒防滑千斤顶与调架千斤顶分设，防倒防滑采用电液控制，实现支架主动防倒防滑，满足工作面遇断层等特殊情况时调架的需要。为提高大倾角工作面支护系统的稳定性，设置排头支架组，可由5架工作面支架靠附加装置连成整体来组成，确保整个工作面支架的稳定性。排头支架组防倒和防滑装置方案见图35。

（2）刮板输送机的防滑技术

刮板输送机采用主动防滑技术。其功能主要为能主动、有效防止运输机下滑。采用电液控制，推溜拉架时实现联动，确保在工作面设备不下滑，具体见图36。

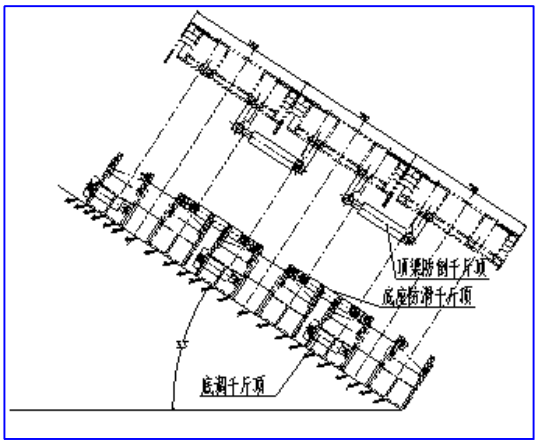


图35 排头支架组防倒和防滑技术方案图

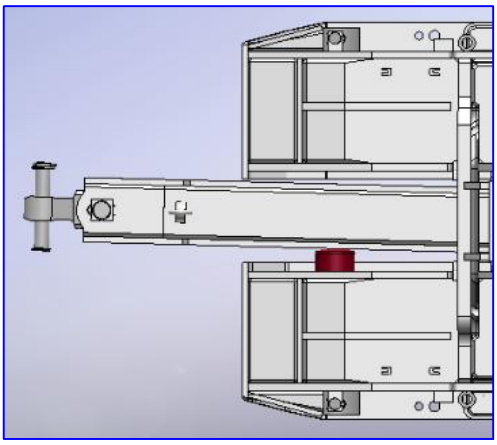


图36 刮板输送机的防滑示意图

2.工作面防飞矸技术研究

（1）工作面支架架前挡矸装置

刚性可伸缩架前挡矸装置安装在刮板输送机上，位于支架前部，活动挡矸板随着千斤顶的伸出和收缩上升或下降；根据采煤工作面需要，升到合适高度，防止采煤过程中煤矸滚入或窜入液压支架内，确保液压支架内人员人身安全和支架内设备安全。架前挡矸装置自动控制根据采煤工艺进行程序设定。当自动“巡检”或采煤时，采煤机滚筒接近前支架执行架前挡矸自动下降程序，滚筒离开后执行升柱程序；移架过程时，提前执行架前挡矸下降程序，拉架完毕后，执行架前挡矸升柱程序。为保证智能化开采工作面支架上相关元器件能检测到采煤机上发出的信号对采煤机进行定位，该套架前挡矸装置采用了挡板+挡板网的结构，具体见图37。

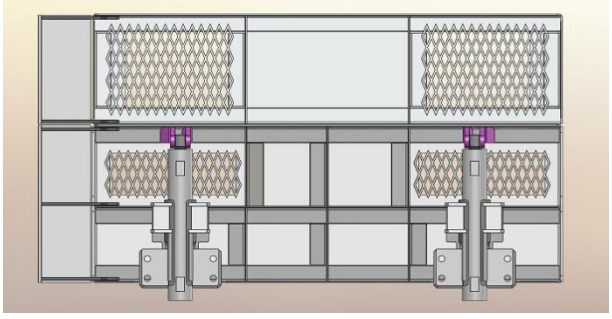


图37 架前挡矸装置示意图

（2）工作面支架架间挡矸装置

在大倾角工作面支架间每个5架设置刚性可伸缩架间挡矸装置。架间挡矸装置分别安装在支架底座单侧和顶梁单侧，防止工作面上部的飞矸对架内人员造成伤害。挡矸装置采用电液控制，处于常闭状态，只有在“人员巡视”时才使用；当人员通行时手动邻架打开，人员通过后及时关闭。架间挡矸装置结构见图38。

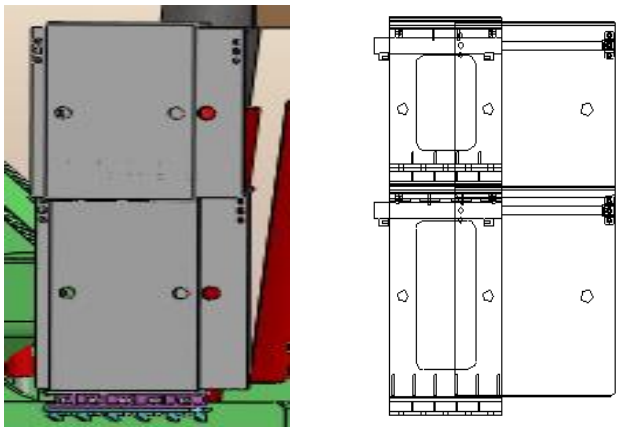


图38 架间挡矸装置示意图

3.工作面薄煤层支架研究

在设计沿用了煤矿大倾角支架设计理念，由于太平煤矿31111工作面属薄煤层，因此取消了伸缩梁、护帮结构，将顶梁设计为超薄箱体结构顶梁。根据太平矿煤层的条件，选用液压支架为大倾角掩护式液压支架，考虑到工作面人员的通过性，最终确定高度为2.5m-2.7m，经计算，其工作阻力为4000kN。则支架型号为ZY4000/12.5/27JD型。

传统的液压支架顶梁普遍采用箱型结构，受力条件好，可承受较大荷载，但截面利用率低，整体空间尺寸较大，除去采煤机和刮板输送机组合后的机面高度尺寸外，过机空间更小，不利于工作面采高的控制，还容易使采煤机因顶板过量下沉被压死而停机。

为此，针对顶梁设计了超薄箱体结构，可以在保证顶板支护可靠的条件下充分利用回采空间，增大过机高度，增大采煤机割顶量，有效地控制工作面的采高，减少采煤机停机事故的发生。同时，通过采用电液控制技术，可以去掉过架管路，减小支架控制部分的外形尺寸，增大支架下方可利用空间，增大智控元件的安装空间。其结构如图39所示。

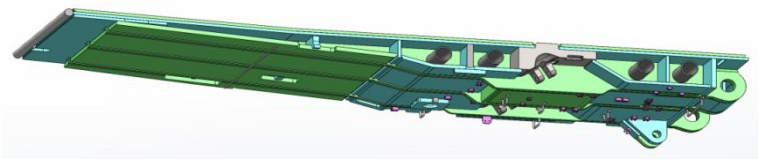


图39 超薄箱体顶梁结构图

同时，由于工业性试验工作面存在一定倾角，考虑到支架存在下滑，支架增设了主动防倒、防滑。支架设置调架防倒装置，任意相邻支架间均可安装调架防倒装置。

4.智能化开采控制技术研究

由工作面顺槽监控中心对开采设备（采煤机、液压支架、刮板运输机、转载机、皮带运输机、支架水处理系统、供配电系统）进行集成智能化控制，使设备自主管理、设备故障智能诊断，确保各设备协调、连续、高效、安全运行，将工人从工作面解放出来，实现工作面少人化，最终实现“无人则

安”的安全、高产高效的采煤方式。各子系统不受开采自动化系统控制，以保证在检修和开采自动化控制系统出现故障时，各子系统能单独开车，确保生产不受影响。

工作面智能化控制系统主要由液压支架电液控制系统、智能化集中控制系统、集中供液系统、采煤机控制系统、运输设备监测系统等组成（图40）。采煤机、刮板机、组合开关、顺槽皮带机集中控制系统等，由电液控的智能化集中控制系统按照智能化的要求进行指挥，实现工作面智能化开采。

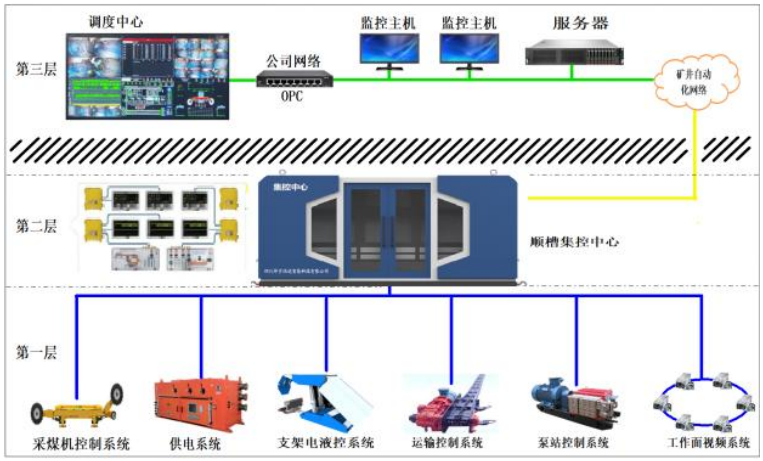


图40 开采智能化控制系统结构模式示意图

结语

本案例聚焦于特殊煤层开采领域的大倾角煤层综采难题，围绕倾斜层状采动煤岩体力学行为、装备与围岩协同控制等关键科学与技术问题，从“理论-方法-技术-装备-实践”系统展示了大倾角煤层安全高效开采方法与关键技术体系，提出了重力-倾角效应下倾斜层状煤岩体采动力学行为的控制理论，发明了适用不同条件的大倾角煤层开采新方法，研发了适用不同维度和尺度的围岩稳定控制关键技术与成套装备，并进行了工程应用。在2020级~2022级采矿工程专业《学科前沿讲座》《矿山压力与岩层控制》等课程教学与第二课堂创新创业教育过程中成功应用。形成以价值塑造为核心的“专业传承、榜样激励、前沿引导”的“思政+科研”案例教学模式和“教促研-研促教-教促学-学促用”应用创新型采矿人才培养路径。通过本案例应用，本科生解决复杂采矿工程问题能力与创新能力提升显著，指导学生获第十九届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛“揭榜挂帅”专项赛全国特等奖、全国高等学校采矿工程专业学生实践作品大赛一等奖7项。促进本科生树立能源报国的家国情怀和学煤爱煤奉献煤的使命担当成效凸显，采矿工程专业毕业生去向落实率93.2%，70%以上到煤炭行业工作，60%以上扎根西部。

案例思考题

1. 大倾角走向长壁采场覆岩关键层区域迁移转化及矿压显现特征？
2. 大倾角工作面“支架-围岩”相互作用关系，如何进行协同控制？
3. 大倾角采场围岩链式灾害类型、形成条件及控制措施？
4. 大倾角特厚煤层综放工作面非线性布置原理及方法。
5. 如何进行大倾角工作面飞矸灾害防治？
6. 大倾角工作面“三机”智能控制难点及实现途径。
7. 大倾角工作面设备如何实现防下滑、防倾倒？
8. 大倾角俯伪斜开采液压支架工作阻力如何计算？

案例使用说明

1.**适用范围**：采矿工程本科生专业教育及机械、土木、电控等相关工科专业本科生的创新创业教育。适用课程包括《学科前沿讲座》《特殊煤层开采技术》《矿山压力与岩层控制》《智慧矿山技术》等。

2.**配套教材**：《智慧矿山技术》案例库

3.**教学目的**：通过案例式教学，掌握“理论-方法-技术-装备-实践”相结合的矿山工程问题破解方法，充分激发学生的学习积极性，了解我国西部大倾角煤层开采前沿技术，树立能源报国的家国情怀和学煤爱煤的使命担当，培养解决复杂采矿工程问题能力与创新能力。

（1）了解倾斜采动岩体应力-载荷和应变-位移等效转换过程和宏观力学性质变化特征。

（2）掌握大倾角煤层多煤层、多区段协同开采方法和围岩-装备多维协同控制技术。

（3）运用动-静力学理论与多尺度数据理论方法，分析采场围岩应力演化与岩层破断特征。

（4）分析大倾角煤层赋存情况，制定开采技术方案，确定开采技术参数，选择合理成套装备。

（5）激发能源报国热情，坚定学煤爱煤奉献煤信念，树立绿色低碳开发理念，提升创新能力。

4.**关键要点**

相关理论：

（1）岩层控制“关键层”理论

（2）大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学

（3）动-静力学理论与多尺度数据理论

关键知识点：

（1）关键层区域迁移转化及倾斜砌体结构

（2）小短壁、长-短壁融合开采方法

（3）多煤层、多区段协同开采方法

（4）围岩与装备多维协同控制技术

关键能力点：

（1）掌握基于弹塑性理论、块体理论和数理统计理论的数-力映射分析方法

（2）掌握大倾角煤层采场围岩与装备协同控制技术

（3）能够进行不同埋藏条件下大倾角煤层开采方法确定和参数优化

（4）明确适用于倾斜回采空间多维度围岩协同控制的特种装备特点

案例分析思路：

（1）提出大倾角煤层采场岩层控制理论

（2）确定不同埋藏条件大倾角煤层（群）开采新方法

（3）掌握大倾角采场围岩与装备多维协同控制技术

（4）选择大倾角工作面“三机”配套设备及智能化监测系统

（5）通过现场工业性试验验证大倾角煤层开采方法与技术的可行性

（6）实现理论-方法-技术-装备-实践的一体化工程创新

5.**教学建议**

（1）时间安排：建议本案例依托课程《学科前沿讲座》在大四第一学期授课。

（2）环节安排：以线上线下混合式教学方式讲授2课时，以项目研讨方式进行小组讨论2课时，给学生充分的自学时间。

（3）学生人数：以二十人左右为宜。

（4）教学方法：理论与实践相结合，案例教学与分组讨论相结合，充分发挥学生的创新性思维。

（5）活动建议：结合全国高等学校采矿工程专业实践作品大赛和中国国际大学生创新大赛，完成大倾角煤层开采特色作品，实现课创赛一体化培养，提升实践创新能力。

6.推荐阅读

（1）伍永平.大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究[M].西安:陕西科学技术出版社,2003.

（2）伍永平,贠东风,解盘石,王红伟,罗生虎.大倾角煤层长壁综采理论与技术[M].北京:科学出版社,2017.

（3）伍永平,郎丁,贠东风,等.我国大倾角煤层开采技术变革与展望[J].煤炭科学技术,2024,52(01):25-51.

（4）伍永平,解盘石,贠东风,等.大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J].煤炭学报,2023,48(01):100-113.

（5）伍永平,贠东风,解盘石,等.大倾角煤层长壁综采:进展、实践、科学问题[J].煤炭学报,2020,45(01):24-34.

（6）伍永平,郎丁.一种急倾斜煤层临界伪斜角综合机械化开采方法[P].陕西省:CN201811345944.7,2019-01-11.

（7）王红伟,焦建强,伍永平,等.一种急倾斜厚煤层水平分段小短壁综放开采方法[P].陕西省:CN202010233002.0,2021-09-28.

（8）王红伟,蒋宝林,赵周妍,等.一种急倾斜近距离特厚煤组水平分段协调开采方法[P].陕西省:CN202111255862.5,2021-12-17.

参考文献

[1] 伍永平,贠东风,张淼丰.大倾角煤层综采基本问题研究[J].煤炭学报,2000,(05):465-468.

[2] 伍永平,刘孔智,贠东风,等.大倾角煤层安全高效开采技术研究进展[J].煤炭学报,2014,39(08):1611-1618.

[3] 解盘石,伍永平,王红伟,等.大倾角煤层长壁采场倾斜砌体结构与支架稳定性分析[J].煤炭学报,2012,37(08):1275-1280.

[4] 解盘石,黄宝发,伍永平,等.大倾角煤层伪俯斜采场围岩运移与支架相互作用规律研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(04):664-679.

[5] 解盘石,张颖异,伍永平,等.大倾角中厚煤层伪俯斜采场顶板破断及其充填实验研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(03):534-542.

[6] 解盘石,吴少港,罗生虎,等.大倾角大采高开采支架动载失稳机理及控制[J].煤炭科学技术,2023,51(02):58-71.

[7] 王红伟,焦建强,伍永平,等.急倾斜短壁综放采场围岩采动应力演化规律[J].采矿与安全工程学报,2024,41(03):462-471.

[8] 王红伟,蒋宝林,闫壮壮,等.大倾角伪俯斜工作面下端头支护阻力研究[J].西安科技大学学报,2023,43(01):28-36.

[9] 王红伟,焦建强,伍永平,等.急倾斜厚煤层短壁综放采场承载结构泛化特征[J].煤炭科学技术,2021,49(11):56-64.

[10] 王红伟,伍永平,焦建强,等.大倾角煤层大采高工作面倾角对煤壁片帮的影响机制[J].采矿与安全工程学报,2019,36(04):728-735+752.