前言

1 案例库建设的意义

本科案例教学是指在教师指导下，根据教学目的要求，组织学生对案例进行调查、阅读、思考、分析、讨论和交流等活动，教与学生分析和解决问题的道理方法，在分析解决问题过程中加深对基本原理和概念理解的一种教学方法，其本质是理论与实践相结合的互动教学。案例是进行案例教学法的充分必要条件，可以说案例的数量和质量决定了案例教学法的效果。案例是对一个复杂情景的记录，必须要把这一复杂情景解剖分析再如实复原以使人们能够理解它。”由此可见，相关课程案例库的建设是非常关键和迫切的。

《岩土工程数值分析》作为采矿工程一门必修课程，设置于煤矿开采学、岩石力学和矿山压力与岩层控制、井巷工程等主干专业课学习之后，旨在培养学生利用计算机手段解决采矿工程问题的能力，主要课程内容包括：岩石力学基本实验与测试，巷道、采场、边坡等稳定性分析等方面的数值模拟教学内容。建立该门课程案例库既能实现教学资源共享,有利于教师之间的沟通和交流,教师可以根据自己教学内容和目的有针对性地从案例库中选择案例，又可作为其他教学方法的有益补充，有利于教学质量的提高。案例库的建设将更有利于将不断挖掘典型案例添加其中，使之日渐丰富，成为一个非常宝贵的教学资源。

2 国内外相关案例库建设情况与发展趋势

长期以来，我国许多高校的案例库建设受制于经费保障与配套政策缺位，导致各个学科特别是应用类学科的教学案例呈现出“旧”、“少”、“散”的普遍特征，相对滞后于当下的社会经济与科学技术发展。同时由于各高校间同一学科专业的教学要求不一致，造成案例教学的素材、课时安排有所差异。近年，在教育部坚持“以本为本，四个回归”的内涵指导下，本科课堂教学得到了空前的重视与进步，教学案例库的建设也与之一同取得了长足发展。主要体现在以下方面：一是案例库建设的专项资金得到倾斜落实，对建设过程和教师奖励激励方面形成了有力支撑；二是对教师的专门培训得到了进一步加强，补足了案例库建设的多媒体、网络技术短板，提升了教师开发使用案例的能力效率；三是根据学科、专业的特点，设计案例评估指标体系，运用该指标体系衡量教学案例的优劣，同时也为教师开发案例提供参考，案例的审核、评比均以评估指标体系为准绳。

以采矿工程专业《岩土工程数值分析》课程为例，该课程对于学生的实践能力和逻辑思维能力要求更高，注重实操，然而，各高校在案例选取时多以任课教师或课程团队的科研成果为单一素材，既不利于案例资源共享也容易造成案例教学的系统性差，易形成案例信息“孤岛”，辐射带动作用有限。亟待围绕最新科研与实践成果，构建以“聚焦前沿、取材广泛、系统集成”的教学案例库，以适应行业转型升级背景下的课程教学目标达成与人才培养。

3 本案例库的应用前景与实用价值

采矿工程专业涉及到了采煤方法、设备选型、矿井地质、井巷工程、地表沉陷与岩层

移动、矿井通风与瓦斯防治、矿井防灭火等方方面面的问题，数值模拟方法应用面广，可实现上述各类难题的模拟分析，因此，建设的采矿工程数值模拟案例库可以能将以上问题通盘考虑，有机联系，将对学科其他相关专业课程教学大有裨益。其应用前景十分广阔。

同时，采矿工程是一个综合性和实践性很强的学科，众所周知，先进的教学方法是提高教学质量的重要手段，计算机数值模拟教学，不仅具有通用性强、方便灵活、具有可重复性等特点，而且可以通过采矿工程案例数值试验得到许多在常规实验室试验中难以观测的重要信息，可培养学生基于采矿知识并采用科学方法对复杂矿山工程问题进行模拟预测和分析的能力。采用“多媒体讲授+数值模拟演示+学生实际操作”相结合的多元数值模拟教学案例，不仅可以培养学生利用数值模拟手段解决采矿工程问题的能力，也能丰富和拓展学生知识面，增强学生参与教学活动的主动性、创造性，大幅度提高教学质量。

《岩土工程数值分析》课程一直是采矿工程、岩土工程专业学生的必修课程。随着现代计算机技术的发展。采用先进的教学手段和教学方法是提高教学质量的重要手段。采用数值仿真模拟手段利用计算机对采矿过程进行数值模拟再现和试验，不仅具有通用性强、方便灵活、具有可重复性等特点，而且可以通过数值试验得到许多在常规实验室试验中难以观测的重要信息，作为采矿工程专业实验教学的重要补充。以西安科技大学重点实验室采矿工程实验教学为例，利用多元数值仿真实验方法对采矿工程岩石力学实验与巷道、采场相关实验进行教学，使学生参与教学活动的主动性、创造性大为增强，加深了学生的对采矿工程专业知识的认识。

因此，采矿工程数值模拟案例教学与课程较强的实践属性适配性强，是实现知识内容由“实践-理论-实践”迁移应用的有效衔接，对学生的实操能力、逻辑思维、创新意识培养具有重要的支撑作用。因此，建立系统全面的教学案例库十分必要。此外，聚焦西部煤炭资源开发中的岩层控制问题，梳理该领域数值模拟实践成果与课程知识内容的对应衔接关系，建立知识点匹配，应用场景融合的科研教学转化案例库，对强化提升课堂教学效果，达成人才培养目标具有重要意义。

4 案例库建设方案

根据西安科技大学矿业工程学科的特色优势研究方向，聚焦西部煤炭资源开发中的矿山岩层运移、冲击地压、边坡失稳、结构破坏、巷道破坏失稳、固液耦合、固气耦合、动力分析问题，结合课程教学中的关键知识内容，拟建设以下科研教学转化案例库，如表 1 所示。

表 1 “科研-教学”案例关系对照表

特色科研方向	科研成果案例	对应教学内容
复杂难采煤层开采	1 复杂煤层开采围岩空间结构运动规律	复杂数值建模、顶板参数确定与边界条件确定
	2 复杂煤层长壁围岩宏观应力演化规律	数值模型尺寸确定、应力反演分析
	3 复杂煤层开采装备与围岩系统动力学响应特征	支架建模、动力学分析和耦合分析

	4 煤层群协同开采工艺优化及顶板导水特征分析	模型开挖程序设计、空区充填参数确定、流固耦合分析
	5 急倾斜煤群重复采动巷道变形破坏及支护	复杂模型边界确定、变形破坏特征分析
浅埋煤层开采	1 浅埋煤层开采矿山压力显现规律	简单模型条件下力与位移综合分析
	2 浅埋煤层采场基本顶结构演化特征分析	岩层垮落动态模拟与分析方法
	3 浅埋煤层密集孔切顶成巷优化方案效果验证	巷道支护与全采动周期受载特征
	4 浅埋近距离煤层群开采边坡稳定性分析	边坡建模与边坡稳定性模拟方法
	5 浅埋煤层超长大采高工作面覆岩运动规律	大尺寸模型建模方法及边界条件设置
矿区动力灾害预防	1 急倾斜采动煤岩损伤及运移规律	损伤煤体建模与仿真分析
	2 急斜特厚煤层群开采动力灾害发生机理	煤岩体动静力分析与程序识别
	3 冲击倾向性煤样破坏特征分析	小尺度试件精细建模与分析
	4 急斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定	采动模型动力分析与爆破参数确定
	5 急倾斜煤层顶煤冒放性及瓦斯运移分析	散体流建模与气固耦合模拟

岩土工程数值分析科研转化本科教学案例

第一部分：复杂难采煤层开采

一、科研项目基本信息

背景信息：本案例库在 5 项国家自然科学基金项目和 4 项省部级基金项目资助下，针对浅埋煤层长壁采场岩层控制问题开展了研究，出版专著 2 部，发表论文 90 余篇，其中代表性论文 18 篇，授权发明专利 10 余项，实用新型专利 20 余项。依托的项目信息如表 1 所示。

表 1 案例依托科研项目背景信息一览

序号	项目来源	项目名称	项目编号
1	国家自然科学基金面上项目	基于倾角效应的支架（群）与围岩多维载荷传递及耦合控制机理	52174126
2	国家自然科学基金面上项目	大倾角伪俯斜采场支架与围岩四维作用机理及稳定性研究	51774230
3	国家自然科学基金重点项目	大倾角煤层长壁工作面安全高效开采基础研究	51634007
4	国家自然科学基金面上项目	大倾角煤层长壁开采“关键层”转换与岩体结构变异致灾理论研究	51074120
5	国家自然科学基金面上项目	大倾角煤层长壁大采高采场顶板稳定性及其与支架相互作用特征研究	51204132
6	山东省重大科技创新工程项目	急倾斜薄及中厚煤层智能化开采关键技术与装备	2019JZZY020326
7	陕西省自然科学基础研究计划-陕煤联合基金项目	深埋富水基岩厚煤层复合动力灾害形成机理与控制	2021JLM-10
8	陕西省自然科学基础研究计划项目	不规则载荷历程作用下大倾角煤层开采层状底板破坏滑移机制	2017JQ5091
9	陕西省自然科学基础研究计划项目	大倾角煤层局部充填开采充填体与关键域岩体结构协同作用机制	2016JQ5019
10	陕西高校青年创新团队项目	稀缺难采煤炭资源智能开采创新团队	

成果名称：大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用

获奖情况：陕西省科学技术一等奖

主 持 人：伍永平　解盘石

二、科研促进教学案例

我国复杂难采煤层广泛赋存于西部矿区和东部矿区深部，约占全国探明储量的20%和全国产量的8%，其中60%以上为优质或稀缺资源，复杂难采煤层安全高效开采是我国西部矿区生存和东部矿区持续发展亟待解决的重大工程问题，对促进我国区域经济社会发展具有重要意义。2010年以前，我国复杂难采煤层在开采理论、技术方法与装备研制方面取得了长足进步，但基础理论，特别是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。以下系列案例，通过数值模拟系统研究了复杂难采煤层长壁采场围岩空间结构运动规律、围岩宏观应力演化规律，总结了采场宏观上与力学上的规律，得出了复杂煤层开采装备与围岩系统动力学响应特征，对煤层群协同开采进行了工艺上的优化以及开采后采场顶板的导水特征分析，研究了急倾斜煤层强扰动时巷道围岩的破坏机理与“支架-围岩”系统动态稳定机制，对复杂难采煤层采场围岩控制具有重要的指导意义。

本案例既是西安科技大学多年来聚焦西部大倾角煤层开采岩层控制问题的系统总结，又是对既有矿山压力与岩层控制课程内容的继承与丰富。

（一）案例1：复杂煤层开采围岩空间结构运动规律

1. 案例介绍

大倾角煤层是众所周知的复杂难采煤层，王家山煤矿位于甘肃省白银市平川区与靖远县境内，隶属甘肃靖远煤电股份有限公司，井田位于靖远煤田西北部的王家山煤矿区中西部，核定生产能力为240万吨/年。煤层倾角为40°-50°，为大倾角煤层。在矿井多煤层或多区段持续开采中所致的大尺度采空区围岩破坏与采场围岩裂隙的大量发育，导致采空区容易与周边小窑采空区形成裂隙漏风，为工作面采空区防治带来极大困难，严重影响矿井的安全生产。系统研究了大倾角、急倾斜综放工作面开采中顶煤、顶板及底板裂隙扩展和破断规律，确定采空区留煤位置与留煤量、围岩裂隙扩展-贯通位置，摸清裂隙贯通区域;研究多煤层开采中煤层间、分(区) 段间相互开采扰动特征，确定多分(区)段采空区留煤的运动轨迹、堆积位置。为大倾角煤层综放工作面安全防火工作有一定的参考与指导意义。

（1）大倾角煤层采场数值模拟参数的确定

根据甘肃靖远煤电有限公司王家山煤矿地质资料和实验室岩石力学实验结果，同时考虑到岩层节理裂隙的影响，岩石力学参数根据试验所得结果进行有限元强度折减，得出煤层及主要岩层物理力学参数，见表1-1。

表1-1 煤岩力学参数

序号	岩石名称	容 重 (kg/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (°)
1	4#煤层 基本顶	2675	0.12×10^4	0.31	0.9	1.0	25
2	4#煤层 直接顶	2710	1.4×10^4	0.24	2.0	1.8	31
3	4#煤层	1350	0.3×10^4	0.30	1.0	1.6	28
4	4#煤层 直接底	2492	2.0×10^4	0.21	1.8	3.1	35
5	4#煤层 基本底	2695	2.0×10^4	0.24	1.6	2.9	30

（2）数值模拟模型建立

中二 401 工作面采用大倾角走向长壁综采放顶煤采煤方法，工作面长度为 112 m，采高 2.6m，放煤高度 5.8m，放顶煤回收率 90%，采放比 1：2.3，两采一放，每刀 0.6m。模拟实验中，工作面长度 112m，推进长度 100 m，采高 2.6m，放煤 5.8 m。

根据甘肃靖远煤电股份有限公司王家山煤矿中二 401 工作面实际情况，确定最终模型如下：模型大小为 215 m×200 m×180 m，块体数 15617，节理面数 163669，为了降低边界效应对模拟实验的影响，在模型走向方向上留有 50 m 的边界煤柱在模型的 x，y 方向两侧以及 z 方向底部施加位移约束（施加边界条件），煤层实际平均埋深 680 m，由于数值模拟模型尺寸限制，未模拟的 580 m 上覆岩层通过施加等效载荷（14.5MPa）来模拟，建立数值模型如图 1-1。

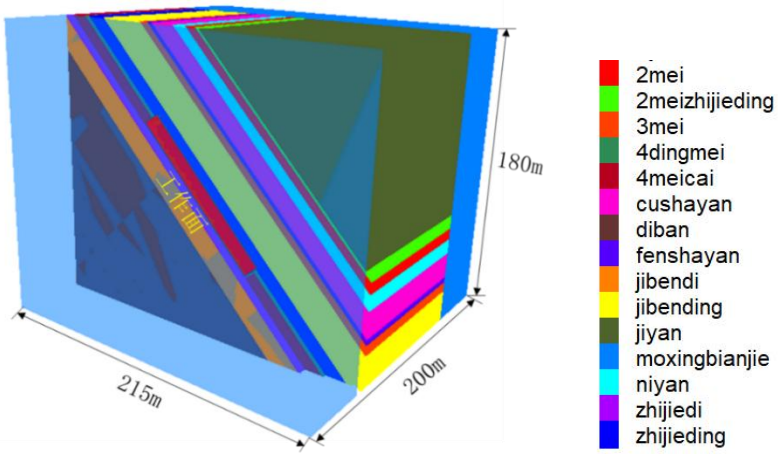


图 1-1 数值模型建立

（3）大倾角煤层采场围岩空间运动规律

通过调用模型位移量与设置模型透明度得出随着工作面的推进（图 1-2 至图 1-5）采场遗煤与直接顶的时序性垮落与堆积形态，还有采场覆岩出现垮落后在大倾角煤层采空区不同区域的充填程度，不同区域充填度呈现出下部区域＞中部区域＞上部区域；在工作面推进时整体的运移规律、裂隙发育规律以及采场围岩影响区域，还得出了中二 401 工作面初次来压步距与周期来压布局，以及围岩出现位移的范围。

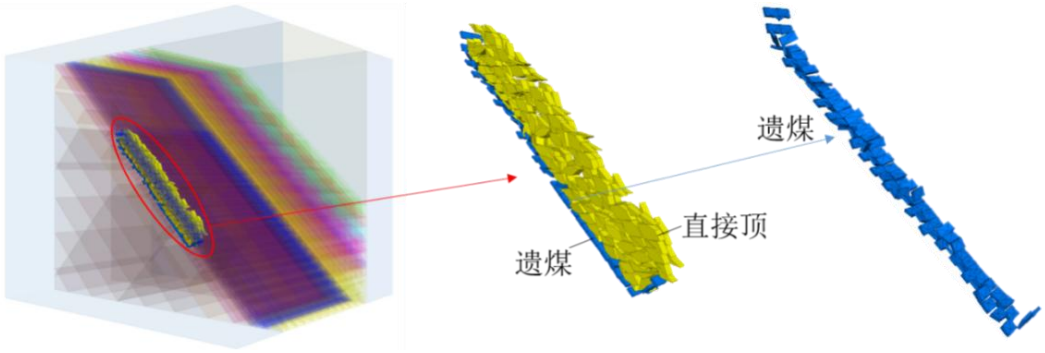


图 1-2 10m 推进度采场围岩运移情况

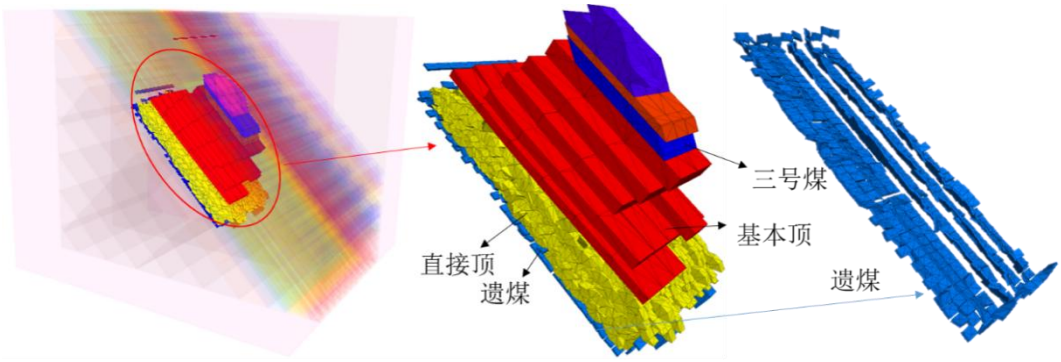


图 1-3 50m 推进度采场围岩运移情况

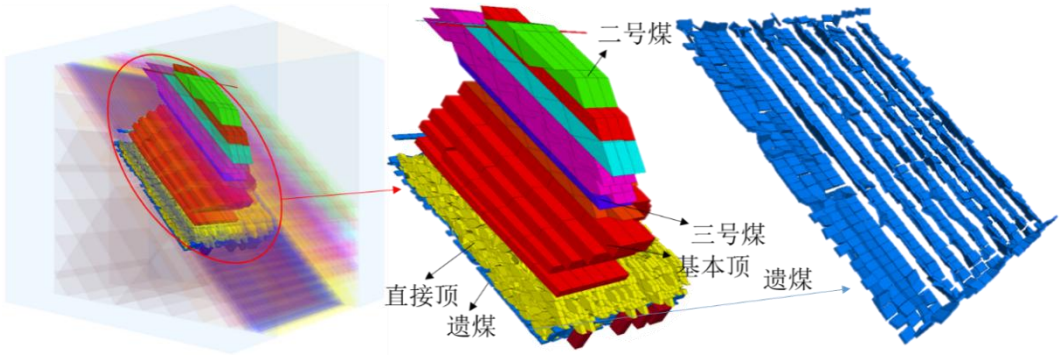


图 1-4 100m 推进度采场围岩运移情况

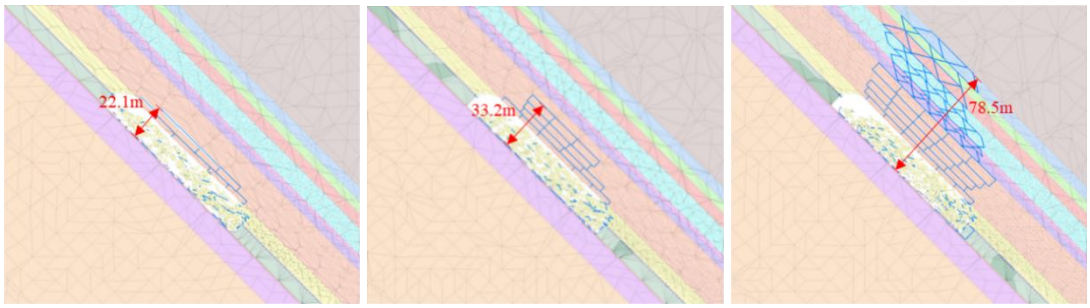


图 1-5 不同推进度采场围岩裂隙发育情况

2.案例实际应用效果

本案例通过研究大倾角、急倾斜综放工作面开采中顶煤、顶板及底板裂隙扩展和破断规律，确定采空区留煤位置与留煤量、围岩裂隙扩展-贯通位置，摸清裂隙贯通区域，研究煤层开采中采空区留煤的运动轨迹、堆积位置。定位矿井间裂隙贯通位置，明确导致矿井间漏风区域。再结合大倾角、急倾斜煤层工作面开采后采场煤岩运移与围岩裂隙扩展规律和现场通风条件，对通风系统进行优化，能大大提高开采环境的安全性，确保现场安全高效绿色开采。

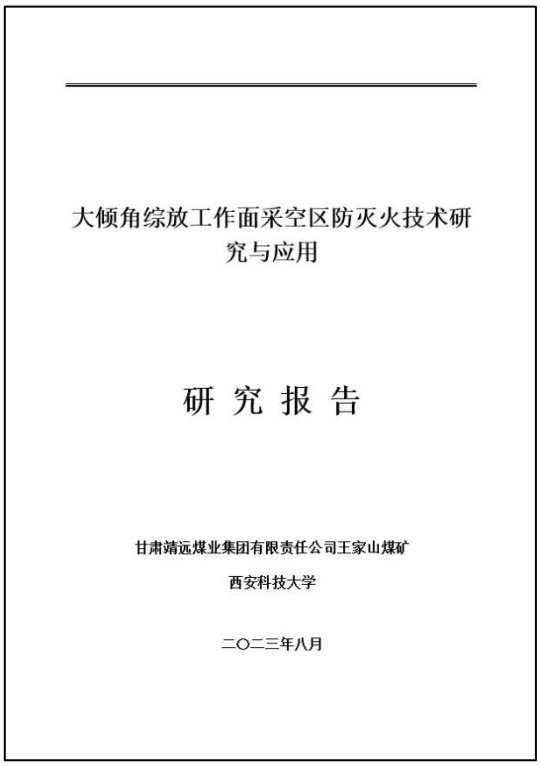
从教学科研互补的角度来看，本案例通过以复杂难采煤层中大倾角煤层开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了复杂难采煤层中大倾角煤层开采过程中围岩的空间结构运动规律，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 1-2 所示。

表 1-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图
2	数值模拟模型建立	对模型施加边界条件和重力， 并通过现场作业规程确定实验方案
3	复杂难采煤层围岩 空间结构运动规律	通过调用模型位移量来显示出现位移的模型， 对位移量为 0 的模型设置透明度

3.支撑材料



大倾角综放工作面采空区防灭火技术研究与应用

研 究 报 告

甘肃靖远煤业集团有限责任公司王家山煤矿

西安科技大学

二〇二三年八月

王家山煤矿项目报告

（二）案例 2：复杂煤层长壁围岩宏观应力演化规律

1.案例介绍

研究表明：大倾角煤层走向长壁工作面围岩和煤层的力学运移规律复杂多变，无论是对围岩控制方法还是开采设备的选择都受到很大的制约，导致开采大倾角煤层的矿井都存在由于开采方法与围岩控制问题引发的安全隐患。特别是在大倾角煤层群走向长壁工作面中，由于多煤层的连续开采，岩移规律更为复杂，对顶、底板控制难度加大，安全隐患增加，因此，研究大倾角煤层群走向长壁开采工作面围岩变形、破坏和运移规律对工作面安全开采具有十分重要的理论意义及实践价值。

甘肃华亭矿业集团有限责任公司东峡煤矿地质构造简单，煤层赋存稳定。主要煤层共有煤 6 层（图 2-1），倾角为 27°~37°，一般为 35°~36°，煤层坚固性系数 f＝2~3。煤层在井田范围内分岔，分出煤 6-1、煤 6-2 上、煤 6-2 中和煤 6-2 下，其中主采煤层煤 6-1 下平均厚度为 5.71m，煤 6-2 上 3.4m，煤 6-2 中 9.98m，上中下三层煤的煤层间距分别为 12m 和 4m，煤层自北向南由轴部向两翼逐渐变薄，煤层层数自北向南由少变多，属于大倾角易燃煤层群。采用走向长壁工作面进行开采。长壁工作面倾斜长 92~120m，平均长度为 110m，煤层群采用下行式开采，即先开采上层煤层煤 6-1 下，然后开采中部和下层煤层煤 6-2 上和煤 6-2 中，中层和下层煤层采用综合机械化放顶煤法开采。

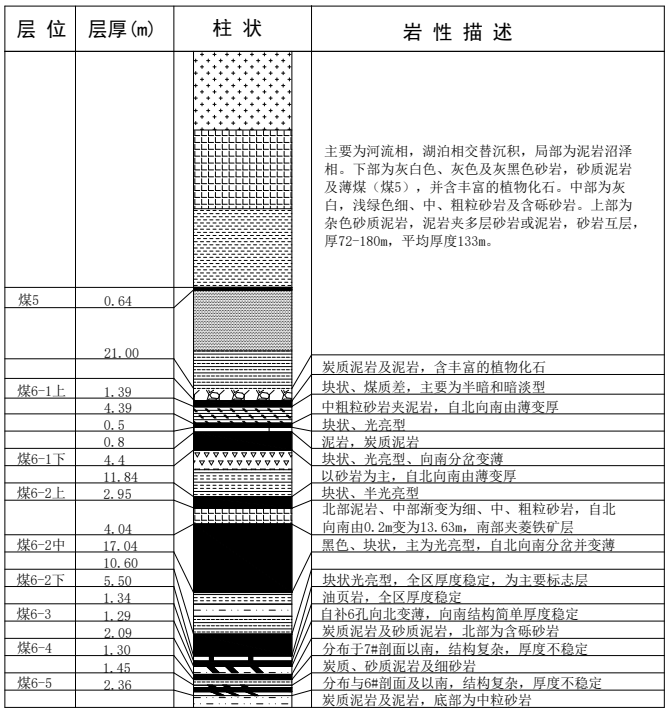


图 2-1 华亭东峡矿煤层综合柱状图

（1）大倾角煤层采场数值模拟参数的确定

根据地质资料（图 2-1）和实验室岩石力学实验结果，得出煤层及主要煤岩层力学参数表 2-1。

表 2-1 煤岩力学参数

名称	密度/(kg/m^3)	弹性模量 E/(MPa)	泊松比	粘聚力 C/(MPa)	内摩擦角 φ/(°)	抗拉强度 σ/(MPa)	剪切模量 G/(MPa)	体积模量 K/(MPa)
粗砂岩	2170	8500	0.3	2	42	3.3	3269	7083
细砂岩	2540	11000	0.3	4	42	3.9	4230	9167
中粒砂岩	2583	12000	0.29	4.5	43	4.6	4651	9523
炭质泥岩、泥岩	2290	7615	0.16	1.3	34	1.2	3282	3732
中粒砂岩	2583	12000	0.29	4.5	43	4.6	4651	9523
煤 6-1 下	1750	3950	0.2	0.89	38	0.73	1646	2194
砂岩	2583	7200	0.32	1.7	38	1.5	2700	6700
煤 6-2 上	1360	1250	0.18	1.87	36	1.03	530	651
泥岩、细砂岩	1750	2500	0.23	6.91	40	3.19	1016	1543
煤 6-2 中	1360	1250	0.18	1.87	36	1.03	530	651
细砂岩	2540	11000	0.3	4	42	3.9	4230	9167

（2）数值模拟模型建立

根据力学模型建立东峡煤矿大倾角煤层群三维数值计算模型，在建立过程中，尽量减小重要区域网格尺寸差异，因为尺寸差异越大编码就越无效，影响计算的准确程度。尽可能保持重要区域网格的统一，避免长细比大于 5：1 的细长单元。

三维计算模型应用 Generate 命令生成，尺寸为宽×厚×高=300m×150m×345m， 工作面推进方向沿 y 轴正方向，采用 Mohr-Coulomb plasticity model 本构模型，应变模式采用大应变变形模式，用 brick 单元模拟煤层及围岩，模型底部限制垂直移动，上部施加上部岩层等效载荷，模型前后和侧面限制水平移动，整个模型由 112500 个单元组成，包括 120528 个节点。应用 FLAC3D 建立三维数值计算模型见图 2-2。

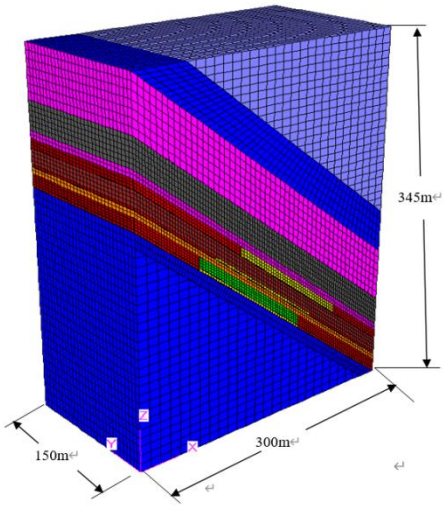


图 2-2 数值模型建立

（3） 煤层群工作面顶板岩移规律分析

从图 2-3 中可看出：开采上层煤 6-1 下时，工作面倾向层位较低的顶板位移最大区域处于工作面中部，但是随着岩层层位增高，位移较大区域向上顺槽顶板处延伸，通过分析

可得，当顶板变形破坏时，工作面将从中上部先破坏且层位较高，下部后破坏层位较低。图 2-4 为采煤 6-1 下时垂直应力特征，可得出应力释放较大区处于工作面中上部，随着顶板层位增高，该区域逐渐减小，呈近似直角三角形轮廓；从图 2-5（a）和（b）顶板位移曲线可得：上层煤（煤 6-1 下）开采时，顶板位移曲线在距上顺槽 30～45m 的上部顶板处发生转折，其中垂直位移急剧降低，而水平位移接近于零，随后两者均有连续增大趋势。图 2-5（c）和（d）为各煤层顶板应力曲线特征，二者对比可得：采煤 6-1 下时曲线变化趋势一致，上顺槽处应力值较大，工作面中部和上部大部分区域应力值较小或为零值，在下部区域应力值逐渐增大，其中垂直应力增加幅度大于水平应力，这是由于未垮落顶板重力沿倾斜向下的分力累积造成的。

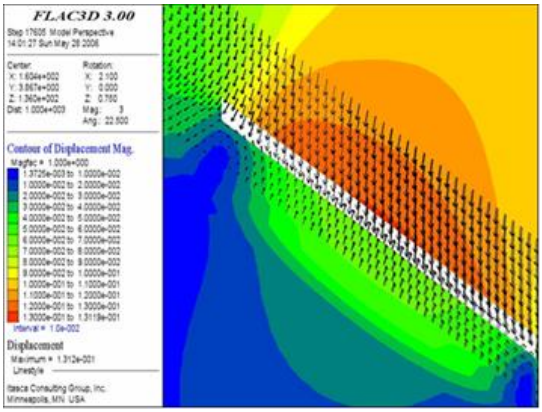


图 2-3 工作面倾向剖面位移特征

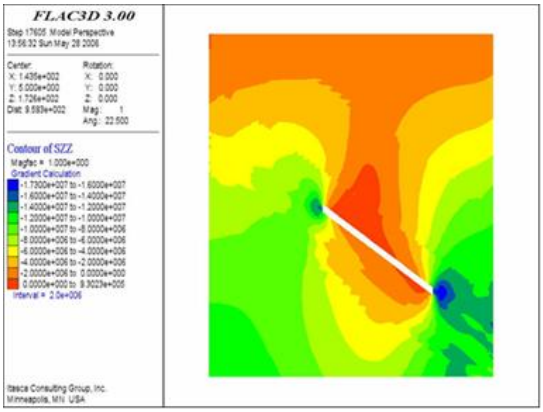
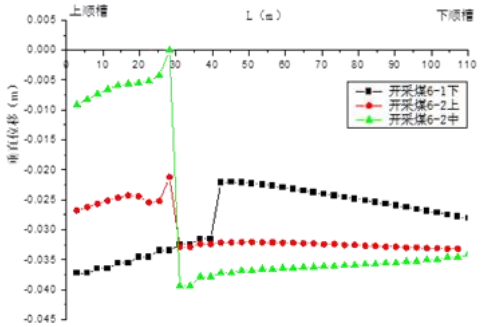
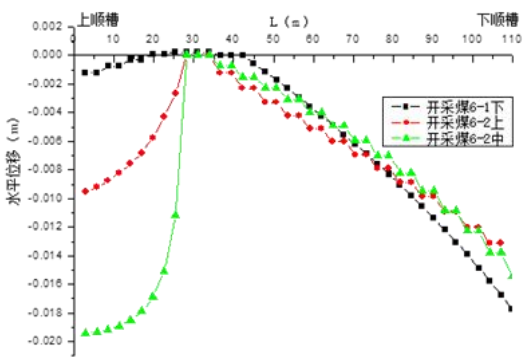


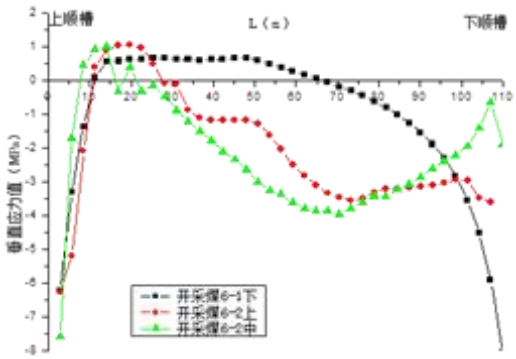
图 2-4 倾向剖面垂直应力特征



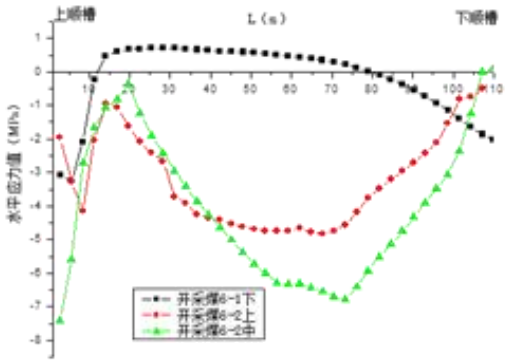
（a）垂直位移



（b）水平位移



（c）垂直应力



（d）水平应力

图 2-5 各煤层工作面倾向剖面顶板位移和应力曲线特征

2.案例实际应用效果

本案例通过研究大倾角煤层顶板岩层沿倾向运移规律，在大倾角煤层群开采中开采下层煤层时，顶板应力和位移的变化特征说明了煤层群开采时顶板岩层沿倾向运移规律的复杂性，所以，在下层煤层综放开采过程中，大放高必然导致更为复杂的岩层运移活动和矿压显现特征，应结合理论在实践中不断总结开采经验，为成功开采创造有利条件。

从教学科研互补的角度来看，该案例通过研究煤层群中顶板岩层沿倾向运移规律，详细介绍了确定模型参数的方法以及构建模型的过程。揭示了在复杂难采煤层中进行煤层群开采时，顶板岩层沿倾向运移的规律。这有助于加深学生对数值模拟的理解，培养学生的创新精神，并提高他们解决实际问题的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 2-2 所示。

表 2-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图
2	数值模拟模型建立	尽量减小重要区域网格尺寸差异，因为尺寸差异越大会影响计算精度
3	煤层群工作面顶板岩移规律分析	通过分析工作面倾向的顶板位移和应力特征曲线总结顶板岩移规律分析

3.支撑材料

[1] 解盘石, 黄宝发, 伍永平等. 大倾角大采高采场覆岩应力路径时空效应[J]. 煤炭学报, 1-14.

[2] 罗生虎,王同,伍永平等.大倾角煤层群长壁开采承载拱与间隔岩层采动应力演化特征[J].煤炭学报,2023,48(02):551-562.

[3] 王德发,张颖异,解盘石等.急倾斜中厚煤层伪俯斜采场覆岩运移规律研究[J].煤炭工程,2023,55(01):76-80.

（三）案例 3：复杂煤层开采装备与围岩系统动力学响应特征

1.案例介绍

四川省华蓥山煤业股份有限公司绿水洞煤矿，工作面的煤层厚度 2.5 m，煤层倾角 38-46°，平均倾角为 43°，每层容重为 1.44 t/m^3。随着开采水平的延伸，煤层赋存条件较差，开采难度异常严峻，必须进行综采工艺在采煤方法上的技术创新，从根本上解决大倾角、急倾斜综采存在的问题，如煤壁容易片帮、飞矸严重、下出口易积矸堵塞等，采用综合机械化开采工艺，优化回采过程工序，实现工作面安全高效生产，以利于大倾角、急倾斜煤层综采技术发展，但支架沿伪俯斜推进时出现摆尾、推底现象，急倾斜伪俯斜工作面支架尾部整体呈阶梯状布置，理论上每一架支架尾部的上角容易受到采空区落矸的冲击，其次由于为俯伪斜工作面存在伪斜角，支架受力与真斜工作面开采支架受力不同，支架受到自身重力沿工作面倾向位置不同，容易发生摆尾、滑倒或倾倒等支架失稳现象。因此，研究大倾角煤层长壁伪俯斜采场“支架—围岩”系统稳定性机制与控制，对绿水洞煤矿的安全、高效开采，具有重要的工程实践意义。

（1）大倾角煤层采场数值模拟参数的确定

工作面液压支架沿走向推进，支架的伸缩梁前端依据伪俯斜设计要求，把液压支架伸缩梁设计为非矩形，在采煤过程中能有效支承伪斜工作面三角空顶岩石的载荷，为工作面提供足够的安全空间。工作面支架参数见表 3-1。

表 3-1　ZZ3600/15/36 JD 型液压支架主要技术特征

名称	参数	单位	附 注
型 式	支撑掩护式液压支架		
高度	1500～3600	mm	
宽 度	1590～1770	mm	
中心距	1680	mm	
初撑力	3092	kN	P=31.5MPa
工作阻力	3600	kN	P=35.4MPa
名 称	参 数	单位	附 注
对底板比压	0.6291～0.9122	MPa	H=1.4～2.2m
（前端 f=0.2）			
适应煤层倾角	≯60°		
操纵方式	电液控制，先移架后推溜		
重 量	15355	kg	
运输外形尺寸	5952×1590×1150	mm	（长×宽×高）
型 式	支撑掩护式液压支架		
高 度	1500～3600	mm	

根据现场地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果，支架选用各向同性弹性模型

mechanical elastic，其力学参数为 bulk 2.2e13 、she 0.7e13 、dens 7900 模拟计算采用的煤和岩体的力学参数由表 3-2 给出。

表 3-2 煤和岩体的力学参数

序号	岩石名称	容重 (kg/m3)	体积模量 (MPa)	剪切模量 (MPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (deg)
1	泥岩和灰岩	2420	4167	2869	0.22	1.8	3.5	37
2	钙质泥岩	2550	3435	3876	0.09	1.9	1.8	37.5
3	粘土泥岩	2420	2381	1163	0.29	1.9	2.6	32.9
4	煤	136.	1667	537	0.29	0.6	1.3	32.9
5	泥岩和页岩	2520	2650	1802	0.30	1.6	2.4	32
6	砂岩和页岩	2530	3372	3816	0.14	1.7	4.5	20.4

（2）数值模拟模型建立

首先采用犀牛软件 Rhino 建立液压支架的三维模型，建模时，顶梁、掩护梁、前连杆、后连杆按照弹性体处理，底座视为刚性体。其中 Rhino 进行网格划分，再通过 Kbrix 导入 FLAC3D 中实现。建立液压支架的三维数值计算模型见图 3-1。

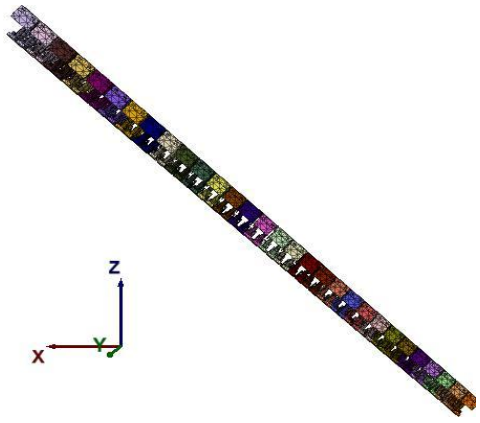


图 3-1 三维支架数值计算模型

根据计算模型建立大倾角煤层三维数值计算模型，FLAC3D 三维模型应用 rhinoceros 外置建模生成，尺寸为宽 X×厚 Y×高 Z=100m×200m×134m，工作面放置等比例支架 30 个，沿工作面倾向，从下到上依次编号为 1#-30#支架，工作面推进方向沿 Y 轴正方向，开挖 80m，前后各留 40m 边界煤柱，采用 Mohr-Coulomb 本构模型，应变模式采用大应变变形模式，模型底部限制垂直移动，上部施加覆岩等效载荷 5.0MPa，模型前后和侧面限制水平移动，整个模型由 3941511 个单元组成，包括 648205 个节点。应用 FLAC3D 建立的三维数值计算模型见图 3-2，在进行开挖计算前，需对模型进行初始平衡计算，通过计算，使

得岩层处于原岩应力状态。

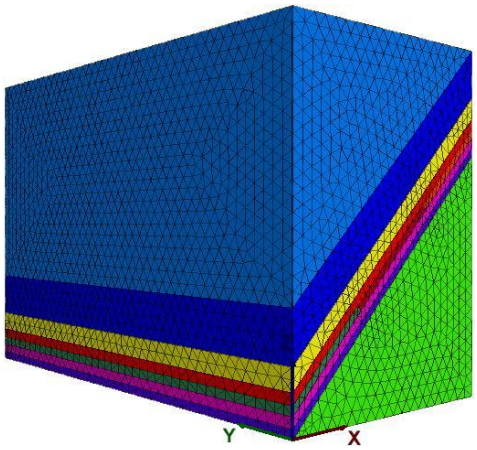
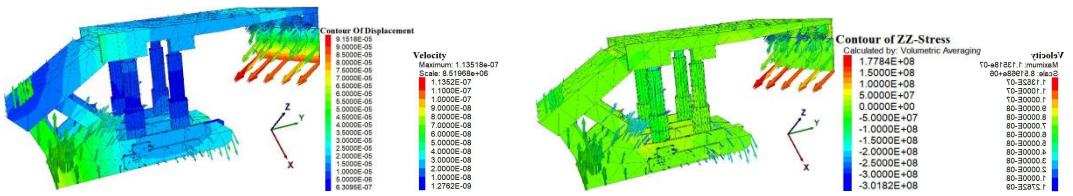


图 3-2 数值计算模型图

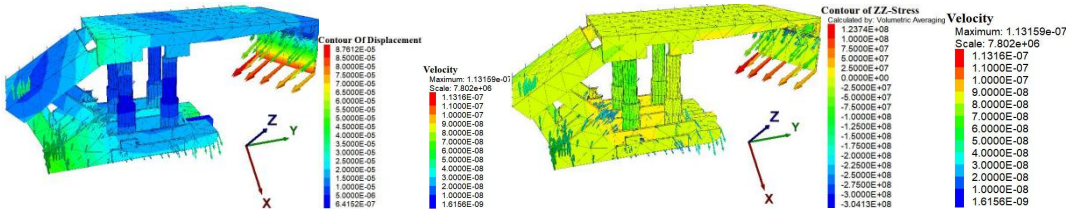
(3)大倾角煤层开采装备与围岩系统动力学响应特征

随着开采空间增大（如图 3-3-图 3-5），支架立柱中部区域应力最大、底座下部区域应力最大，支架其他部位工作面上部区域应力增加明显，且呈现出上部区域＞中部区域＞下部区域应力；工作面立柱与支架其他部分分区域特征存在差别，立柱位移量呈现中部区域＞上部区域＞下部区域位移量，支架其他部分呈现支架上部区域＞中部区域＞下部区域位移量，工作面中上部区域围岩相对活跃，支架易发生失稳破坏。



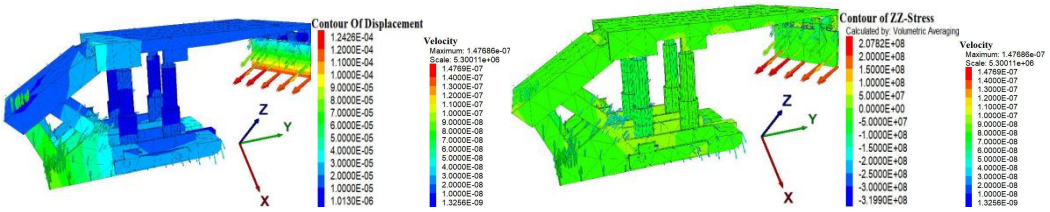
（a）上部区域支架位移与速度特征　　（b）上部区域支架垂直应力与速度特征

图 3-3 上部区域支架受载特征



（a）中部区域支架位移与速度特征　　（b）中部区域支架应力与速度特征

图 3-4 中部区域支架受载特征



（a）下部区域支架位移与速度特征　　（b）下部区域支架垂直应力与速度特征

图 3-5 下部区域支架受载特征

2.案例实际应用效果

本案例通过研究大倾角厚煤层伪俯斜工作面支架稳定性的研究。通过数值模拟技术对大倾角煤层大采高开采进行仿真模拟，研究空间围岩变形破坏运移规律对该类煤层大采高开采工程实践具有一定的指导意义。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以复杂难采煤层中大倾角大采高煤层开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了复杂难采煤层中大倾角大采高煤层开采过程中支架与围岩相互作用机理，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

表 3-3 教学内容与关键内容

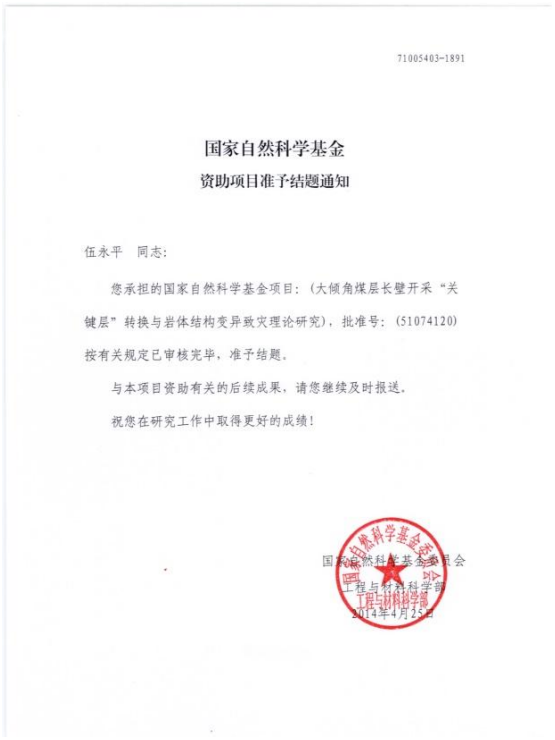
序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	支架参数选用刚形体的强度，各向同性弹性模型 mechanical elastic
2	数值模拟模型建立	顶梁、掩护梁、前连杆、后连杆按照弹性体处理，底座视为刚性体。通过外置建模软件（rhino）建立液压支架的三维数值计算模型
3	大倾角大采高煤层开采过程中支架与围岩相互作用机理	通过相似模拟比较开采空间的增大对支架稳定性的影响。

3.支撑材料

[1] 伍永平，刘孔智，贠东风. 大倾角煤层安全高效开采技术研究进展[J]. 煤炭学报，2014(8):1611-1618.

[2] 伍永平，解盘石，任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报，2010(2):182-184.

[3] 罗生虎，伍永平，解盘石等. 大倾角大采高综采工作面支架受载与失稳特征分析[J].煤炭学报，2018，43(12).



71005403-1891

国家自然科学基金

资助项目准予结题通知

伍永平　同志：

您承担的国家自然科学基金项目：（大倾角煤层长壁开采“关键层”转换与岩体结构变异致灾理论研究），批准号：（51074120）按有关规定已审核完毕，准予结题。

与本项目资助有关的后续成果，请您继续及时报送。

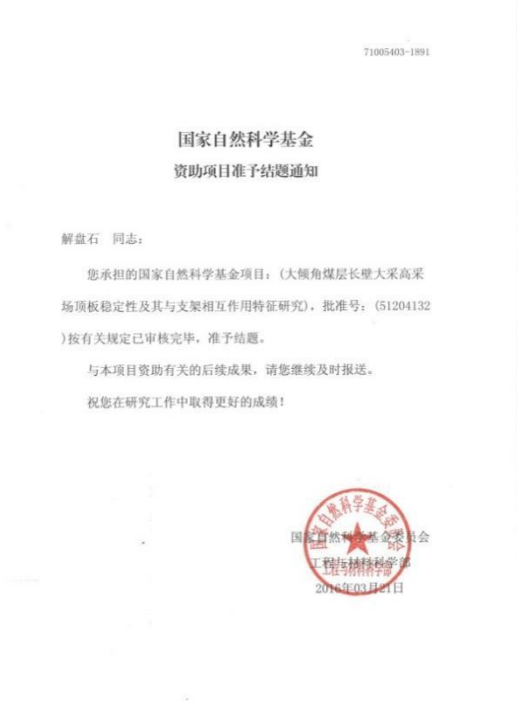
祝您在研究工作中取得更好的成绩！

国家自然科学基金委员会

工程与材料科学部

2014年4月25日

国家自然科学基金面上项目结题证明



71005403-1891

国家自然科学基金

资助项目准予结题通知

解盘石　同志：

您承担的国家自然科学基金项目：（大倾角煤层长壁大采高采场顶板稳定性及其与支架相互作用特征研究），批准号：（51204132）按有关规定已审核完毕，准予结题。

与本项目资助有关的后续成果，请您继续及时报送。

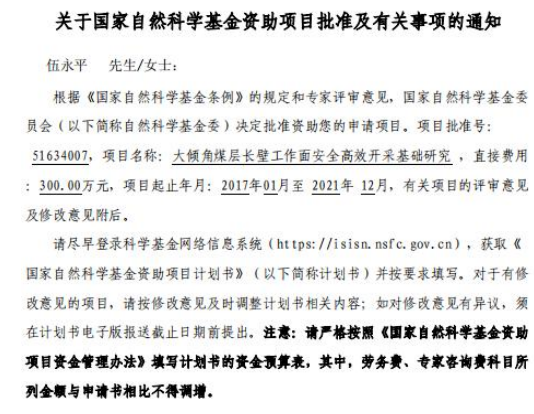
祝您在研究工作中取得更好的成绩！

国家自然科学基金委员会

工程与材料科学部

2016年03月21日

国家自然科学基金面上项目结题证明



关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知

伍永平　先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》的规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定批准资助您的申请项目。项目批准号：51634007，项目名称：大倾角煤层长壁工作面安全高效开采基础研究，直接费用：300.00万元，项目起止年月：2017年01月至2021年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（https://isisn.nsfc.gov.cn），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在计划书电子版报送截止日期前提出。**注意：请严格按照《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》填写计划书的资金预算表，其中，劳务费、专家咨询费科目所列金额与申请书相比不得调增。**

国家自然科学基金重点项目立项通知



山东省重大科技创新工程项目

任 务 书

项目编号：2019JZZY020326

项目名称：急倾斜薄及中厚煤层智能化开采关键技术与装备

承担单位（盖章）：山东矿机华能装备制造有限公司

合作单位（盖章）：西安科技大学，山东科技大学，北京启创卓越科技有限公司

主管部门（盖章）：潍坊市科技局

起止年限：2019至2021

山东省科学技术厅

2019年制

创新工程项目

（四）案例 4：煤层群协同开采工艺优化及顶板导水特征分析

1.案例介绍

大倾角煤层是众所周知的复杂难采煤层，以韩家湾煤矿 2405 工作面为例，该工作面开采 2-2 煤，煤厚 2.5~5.0 m，平均 4.3 m，煤层倾角 1°~3°，该面走向长度 2 700 m，倾向长度 220 m。 2-2 煤上覆基岩厚度为 62~102 m，隔水土层为 30 m 左右，含水层位于隔水土层上部，为富水区。

（1）大倾角煤层采场数值模拟参数的确定

为了更加直观地观测隔水土层孔隙水压随煤层开采的时空响应规律，依托 FLAC3D 渗流模块构建固液耦合模型，并做出以下假设：岩体及隔水土层为多孔连续介质；自重应力场为原始应力场；对开采后的煤体进行无水无压处理；流体本构模型采用饱和稳定流的各向同性流动准则。岩体的孔隙率、渗透系数等参数参考陕北矿业韩家湾煤矿实测资料。

（2）数值模拟模型建立

以韩家湾煤矿 2405 工作面为地质原型，建立三维模型尺寸为 300 m×300 m×150 m，该工作面开采 2-2 煤，煤厚 2.5~5.0 m，平均 4.3 m，煤层倾角 1°~3°，该面走向长度 2700 m，倾向长度 220 m。 2-2 煤上覆基岩厚度为 62~102 m，隔水土层为 30 m 左右，含水层位于隔水土层上部，为富水区。为了减少边界效应，工作面 X，Y 方向各留 50 m 边界煤柱，沿 X 正方向推进，沿 Y 方向为工作面倾向方向。为了研究隔水土层孔隙水压在覆岩周期性沉陷及突水演化过程中所扮演的角色，分别采用一次采全厚 4 m、一次采高 2 m 的 2 种不同开采强度方案进 行对比分析，模型如图 4-1 所示。应力边界条件和位移边界条件相对应，Z 正方向为自由端，其余方向 为固定端。基于 Fish 语言控制两相模拟场，水头设置为含水层为 1 MPa 水压，作为初始孔隙水压力，自含水层之下为递增水头压力，渗透系数及孔隙率参照地质资料进行对应的赋参，在模拟过程使用 set mech，set fluid 关键命令控制应力场及渗流场的计算。按照实际条件整个模型垂向施加自重应力并施加初始孔隙水压力。模型两侧面为达到水平应力大小，除施加自重产生的侧压以外，还施加了具有一定梯度的水平应力。为了模拟实际开采工况，计算从形成原岩应力场与渗流场开始，沿煤层 X 走向分步开挖。

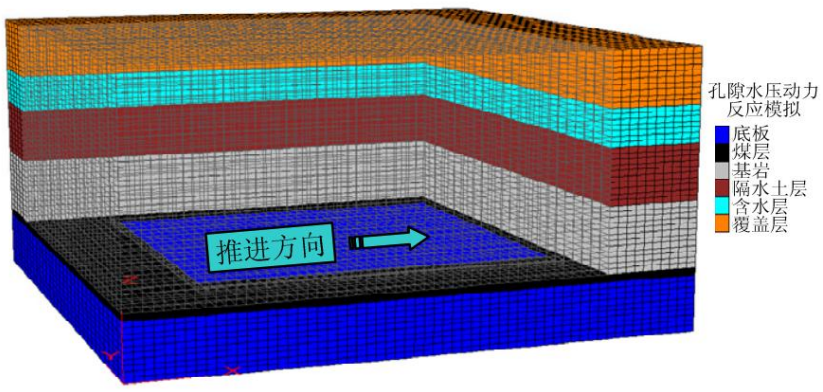


图 4-1 数值模型建立

（3）一次采全厚的孔隙水压响应特征

数值模拟结果表明不同的开采强度对隔水 土层的扰动作用不同。当开采强度较大时，采空区上覆隔水土层孔隙水压出现畸变漏斗；当开采强度较小时，采空区上覆隔水土层孔隙水压会发生周期性小幅波动，不会发生急剧积聚及消散现象。

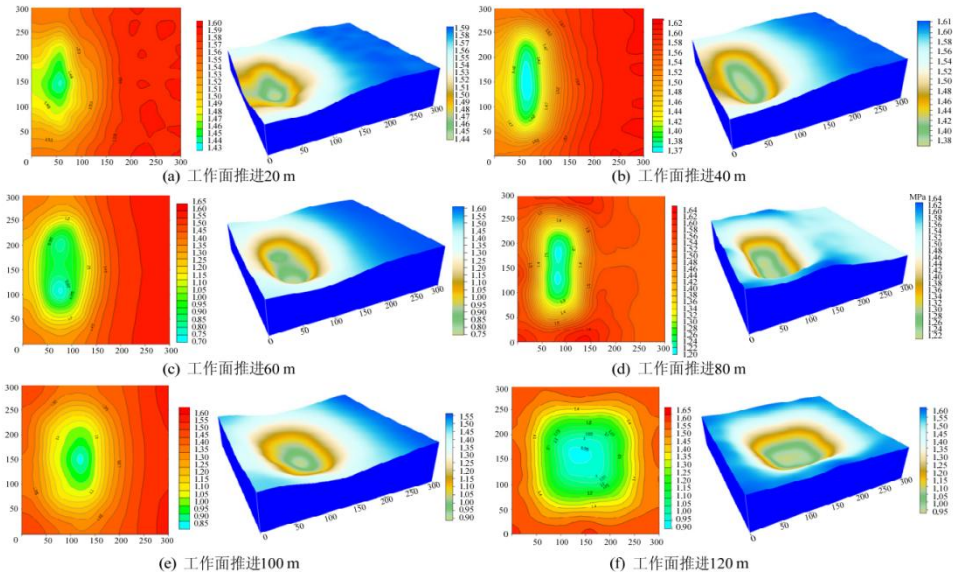


图 4-2 孔隙水压随开采距离的响应特征 (MPa)

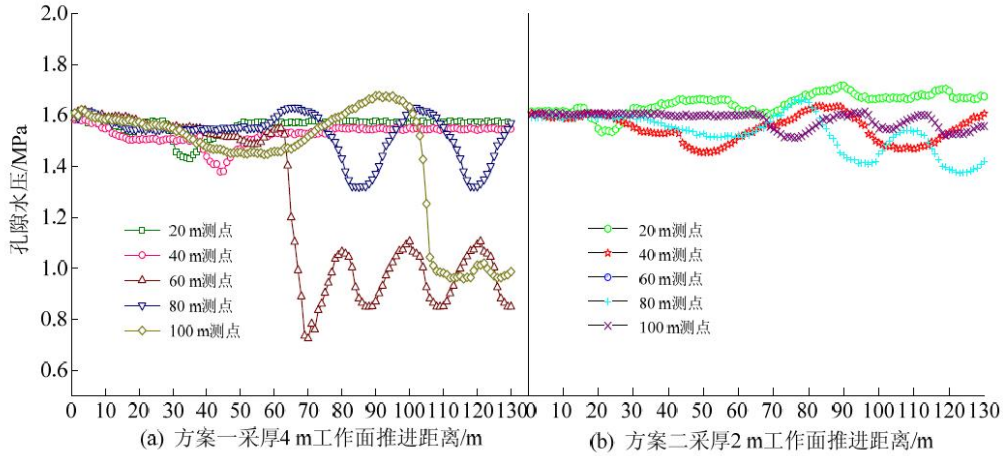


图 4-3 两方案测点孔隙水压变化曲线图

2.案例实际应用效果

本案例通过研究应用模拟软件构建了相应的流固耦合模型， 分析了在不同开采强度条件下隔水土层孔隙水压变化与覆岩破坏演变规律；基于固液耦合试验平 台，进行孔隙水压监测试验，进一步揭示并验证了开采扰动及渗流作用下隔水土层孔隙水压与突 水灾变之间的对应关系。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过研究流固耦合模型，介绍了确定模型参数的方法以及建立模型的过程，揭示了在不同开采强度条件下隔水土层孔隙水压变化与覆岩破坏演变规律。这有助于加深学生对数值模拟的理解，培养学生的创新精神和解决实践问题

的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 4-1 所示。

表 4-1 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图和 FLAC3D 渗流模块构建固液耦合模型
2	数值模拟模型建立	对模型施加边界条件和重力，按照实际条件整个模型垂向施加自重应力并施加初始孔隙水压力
3	一次采全厚的孔隙水压响应特征	通过监测隔水土层在工作面推进过程中的孔隙水压随着推进距离的积聚及消散规律，进行对应响应特征分析

3.支撑材料

[1] 张东升，李文平，来兴平等．我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]．煤炭学报，2017， 42(1)：36-43．

[2] 张杰，杨涛，田云鹏等．采动及渗流作用下隔水土层破坏规律研究 [J]．岩土力学，2015，36(1)：219-224

[3] 张杰，侯忠杰．固-液耦合试验材料研究 [J]．岩石力学与工程学报，2010，27(1)：106-110．

（五）案例 5：急倾斜煤群重复采动巷道变形破坏及支护

1.案例介绍

四川广旺能源发展（集团）有限责任公司所属赵家坝煤矿，始建于 1969 年底，平硐开拓，水平标高+555m。设计生产能力 21 万吨/年，一九八二年达产，一九八四年超过设计生产能力达到 25 万吨/年。上世纪八十年代中期，+555m 水平进入开采末期，于一九八六年进行第一次水平延深，延深水平标高为+340m，为一对明斜井开拓。一九九一年十月竣工投产，投产后经十五年开采，产量逐年增加，特别是最近三年，年产量均突破 30 万吨。

矿井地质条件复杂，不但开采的煤层倾角大（平均倾角在 55º以上），而且煤层距离近。目前有 8#、9#、10#、11#、12#五层煤可采，其中 9#煤层与 10#煤层的层间距约为 2.01m；10#与 11#煤层的层间距约为 4.96m，11#与 12#煤层的层间距约为 6.17m。煤层及绝大部分岩层的层理和节理高度发育，呈现出松软破碎的特性

根据煤层赋存情况及开采技术条件，结合该矿多年来的开采经验，采煤方法选用俯伪斜走向长壁采煤法进行开采。采用采区前进，区内后退式回采。先采上层煤 8#煤层，后采下一层煤 9#煤层。上、下层保持一定的超前距离。回采巷道主要采用沿空留巷的方式，即上一区段工作面的运输平巷留作下一区段工作面的回风平巷。

（1）急倾斜煤层采场数值模拟参数的确定

根据四川广旺能源发展（集团）有限责任公司所属赵家坝煤矿地质资料和实验室岩石力学实验结果，同时考虑到岩层节理裂隙的影响，岩石力学参数根据试验所得结果进行有限元强度折减，得出煤层及主要岩层物理力学参数，见表 5-1。

表 5-1 煤岩力学参数

序号	岩石名称	容 重（kg/m^3）	弹性模量（MPa）	泊松比	抗拉强度（MPa）	粘结力（MPa）	内摩擦角（°）
0	老顶细砂岩	2550	8210	0.15	3.51	5.21	35.25
1	直接顶泥质粉砂岩	2640	6310	0.31	2.27	2.79	37.82
2	伪顶炭质泥岩	3180	2810	0.35	0.60	1.10	15.12
3	9 煤	1450	3520	0.32	0.89	1.25	25.12
4	直接底炭质粉砂岩	2610	3601	0.30	1.15	1.20	26.20
5	老底泥质粉砂岩	2640	6310	0.31	2.27	2.79	37.82
6	10 煤	1450	3520	0.32	0.89	1.25	25.12
7	泥质粉砂岩	2640	6310	0.31	2.27	2.79	37.82
8	11 煤	1450	3520	0.32	0.89	1.25	25.12
9	泥质粉砂岩	2640	6310	0.31	2.27	2.79	37.82

（2）数值模拟模型建立

根据赵家坝矿井地质资料，并考虑计算需要，确定数值计算力学模型（图 5-1），在建立力学模型过程中，考虑到模型计算时边界效应的影响，使主要研究区域处于边界效应

影响的范围外，以达到更接近实际的计算效果。

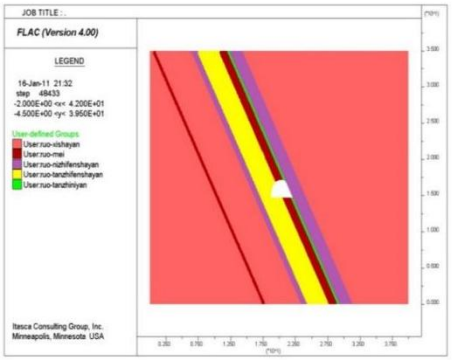
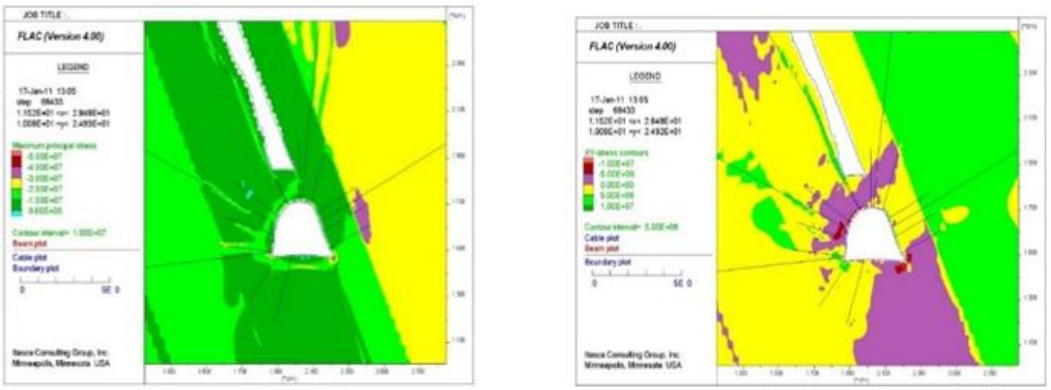


图 5-1 数值计算模型

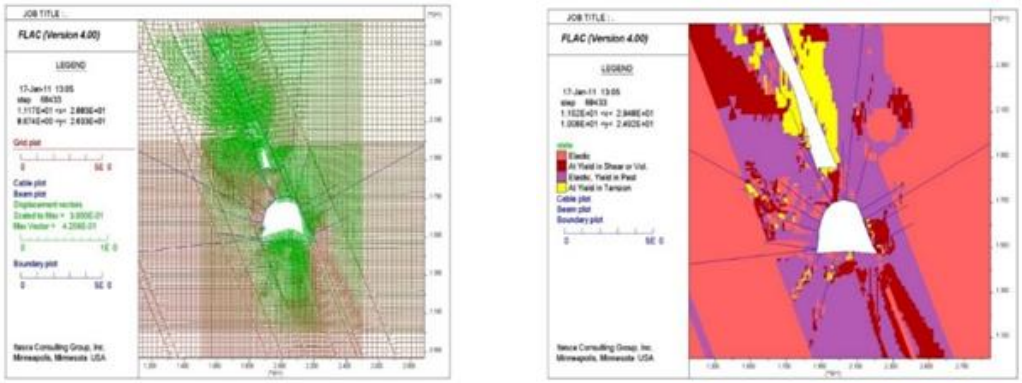
（3）急倾斜煤群重复采动巷道变形破坏特征

通过分析支护条件下的巷道围岩变形破坏情况（图 5-2-图 5-4）可以得出：采高强度锚杆、托盘+锚索+W 钢带+钢筋网+注浆锚杆+喷砼支护方式支护后，巷道围岩强度提高，应力集中有所减小，围岩应力场趋于均匀化，围岩最大主应力分布由集中应力区向低应力区转换。上区段煤层开采后，巷道围岩应力得到了释放，巷道浅部应力值有所减少，应力集中主要出现在巷道拐角处。下区段煤层开采后，上下区段工作面顶底板出现了较大范围的零应力分布区域，应力向巷道周围岩体转移，使的巷道围岩最大主应力和剪应力值增加，主要增加区域位于巷道底板和左帮。



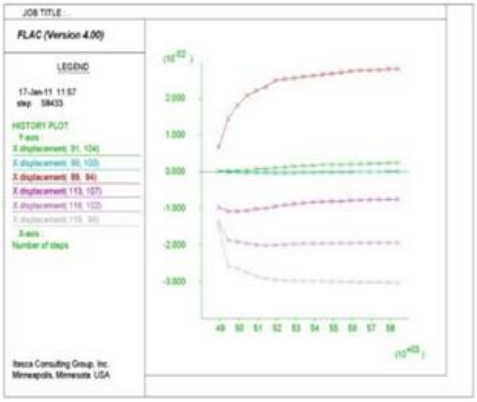
（a）最大主应力云图　　（b）剪应力云图

图 5-2 围岩应力分布图

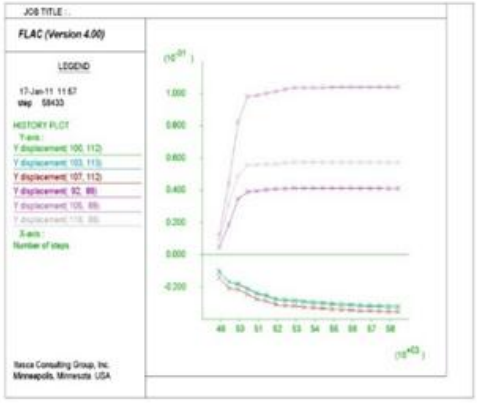


（a）位移矢量特征图　　（b）破坏图

图 5-3 巷道围岩破坏场图



（a）水平位移



（b）垂直位移

图 5-4 支护条件下巷道表面位移图

2.案例实际应用效果

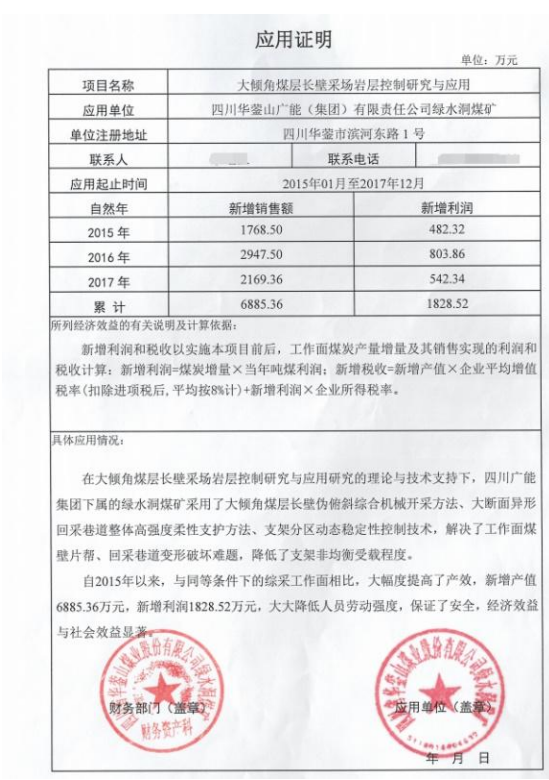
本项目利用现场实践（松动圈测试、围岩力学特性测试、初步方案实施、矿压观测等）、室内平立交互可加载相似材料模拟实验、数值模拟手段，对广旺矿区赵家坝煤矿急倾斜回采巷道变形失稳机理进行了深入研究，分析总结了急倾斜煤层巷道非对称变形失稳机理，提出了非对称载荷下多介质耦合支护的围岩控制策略，并提出了赵矿急倾斜回采巷道支护优化方案，实践表明：采用高强度锚杆、托盘+锚索+W 钢带+钢筋网+注浆锚杆+喷砼支护方式能有效控制巷道稳定性。为今后类似工程设计、施工和管理积累经验和提供科学依据，通过该项目研究进一步完善和发展软岩巷道支护理论与实践。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以复杂难采煤层中急倾斜煤层开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了复杂难采煤层中急倾斜煤层群重复采动巷道变形破坏特征，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

表 5-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果
2	数值模拟模型建立	对模型施加边界条件和重力， 并通过现场作业规程确定实验方案
3	急倾斜煤群重复采动 巷道变形破坏特征	分析支护条件下的巷道围岩变形破坏情况

3.支撑材料



应用证明

单位：万元

项目名称	大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用		
应用单位	四川华蓥山广能（集团）有限责任公司绿水洞煤矿		
单位注册地址	四川华蓥市滨河东路 1 号		
联系人		联系电话	
应用起止时间	2015年01月至2017年12月		
自然年	新增销售额	新增利润	
2015 年	1768.50	482.32	
2016 年	2947.50	803.86	
2017 年	2169.36	542.34	
累 计	6885.36	1828.52	

所列经济效益的有关说明及计算依据：

新增利润和税收以实施本项目前后，工作面煤炭产量增量及其销售实现的利润和税收计算：新增利润=煤炭增量×当年吨煤利润；新增税收=新增产值×企业平均增值税率（扣除进项税后，平均按8%计）+新增利润×企业所得税率。

具体应用情况：

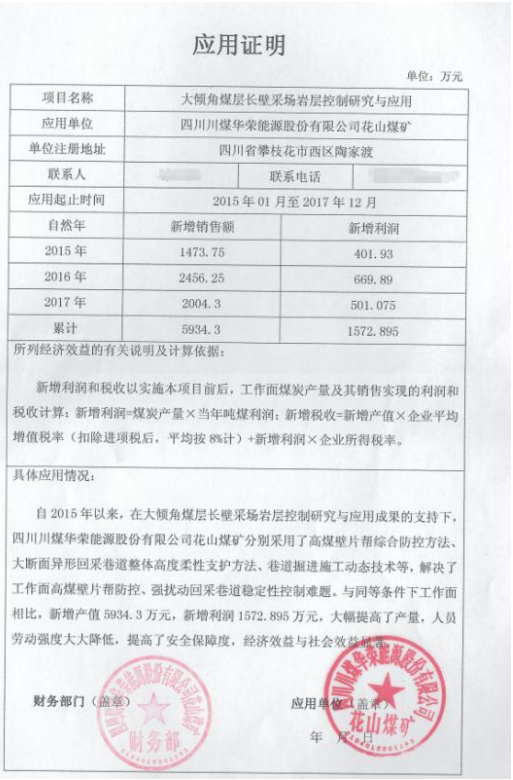
在大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用研究的理论与技术支持下，四川广能集团下属的绿水洞煤矿采用了大倾角煤层长壁伪俯斜综合机械开采方法、大断面异形回采巷道整体高强度柔性支护方法、支架分区动态稳定性控制技术，解决了工作面煤壁片帮、回采巷道变形破坏难题，降低了支架非均衡受载程度。

自2015年以来，与同等条件下的综采工作面相比，大幅度提高了产效，新增产值6885.36万元，新增利润1828.52万元，大大降低人员劳动强度，保证了安全，经济效益与社会效益显著。

财务部门（盖章）　　应用单位（盖章）

年　月　日

绿水洞矿成果应用证明



应用证明

单位：万元

项目名称	大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用		
应用单位	四川川煤华荣能源股份有限公司花山煤矿		
单位注册地址	四川省攀枝花市西区陶家渡		
联系人		联系电话	
应用起止时间	2015 年 01 月至 2017 年 12 月		
自然年	新增销售额	新增利润	
2015 年	1473.75	401.93	
2016 年	2456.25	669.89	
2017 年	2004.3	501.075	
累计	5934.3	1572.895	

所列经济效益的有关说明及计算依据：

新增利润和税收以实施本项目前后，工作面煤炭产量及其销售实现的利润和税收计算：新增利润=煤炭产量×当年吨煤利润；新增税收=新增产值×企业平均增值税率（扣除进项税后，平均按 8%计）+新增利润×企业所得税率。

具体应用情况：

自 2015 年以来，在大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用成果的支持下，四川川煤华荣能源股份有限公司花山煤矿分别采用了高煤壁片帮综合防控方法、大断面异形回采巷道整体高度柔性支护方法、巷道掘进施工动态技术等，解决了工作面高煤壁片帮防控、强扰动回采巷道稳定性控制难题。与同等条件下工作面相比，新增产值 5934.3 万元，新增利润 1572.895 万元，大幅提高了产量，人员劳动强度大大降低，提高了安全保障度，经济效益与社会效益显著。

财务部门（盖章）　　应用单位（盖章）

年　月　日

花山煤矿成果应用证明

第二部分：浅埋煤层开采

一、科研项目基本信息

背景信息：本案例库在 4 项国家自然科学基金项目、2 项省部级基金项目和 4 项企业合作项目资助下，针对浅埋煤层长壁采场岩层控制问题开展了研究，出版专著 2 部，发表论文 60 余篇，其中代表性论文 18 篇，授权发明专利 10 余项，实用新型专利 10 余项。依托的项目信息如表 1 所示。

表 1 案例依托科研项目背景信息一览

序号	项目来源	项目名称	项目编号
1	国家自然科学基金面上项目	浅埋近距离煤层群采场覆岩结构动载效应研究	52074211
2	国家自然科学基金面上项目	浅埋煤层群开采煤柱群结构及应力场与裂缝场耦合控制	51674190
3	国家自然科学基金面上项目	浅埋煤层大采高顶板结构及其稳定性研究	51174278
4	国家自然科学基金青年项目	浅埋煤层顶板沙土层载荷传递与关键层动态结构理论	50104009
5	陕西省教委专项科学研究基金项目	浅埋煤层顶板采动结构理论研究	00JK219
6	陕西省自然科学基金项目	浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究	98D02
7	神华集团神府精煤公司项目	神府矿区浅埋煤层顶板活动规律与支护对策研究	
8	神木大砭窑气化煤有限责任公司项目	大砭窑合理液压支架选型及巷道支护方案论证	
9	神府经济开发区海湾煤矿项目	海湾三号井合理采煤方法及支架选型论证	
10	陕西煤业化工集团有限责任公司科学技术研究计划项目	2-2煤层首采工作面矿压规律及支架适应性研究	2018SMHKJ-C-30

二、科研促进教学案例

我国西部毛乌素大沙漠边缘的神府东胜煤田探明储量 2236 亿 t，是我国目前探明储量最大的煤田，与美国阿巴拉契亚煤田、德国鲁尔煤田等并称为世界七大煤田，煤炭产量约占全国的 30%。煤层赋存埋藏浅，基岩薄，煤层多，开采厚度大，地表生态脆弱，类似条件国际罕见，缺乏理论和经验。通过自 1993 年以来近 30 年的研究与实践，创立了浅埋煤层岩层控制的基本理论，填补了知识空白，得到了广泛传播和应用。

本系列案例，系统揭示了浅埋煤层开采时的矿山压力显现规律，以及从岩层垮落的动态模拟来对浅埋煤层采场基本顶结构演化特征展开分析，基于浅埋煤层的数值模拟对长壁开采的支架支护阻力进行确定，建立了浅埋煤层的边坡模型，对煤层开采时其边坡稳定性进行分析，采用大尺寸的模型建模方法对浅埋煤层超长大采高工作面覆岩运动规律进行理论分析，为浅埋煤层采场顶板支护和控制提供了理论依据，支撑西部浅埋大煤田安全绿色

开采。

本案例是对西安科技大学多年来西部浅埋煤层开采岩层控制的系统说明，又是对岩土工程数值分析课程内容的继承与丰富。

（一）案例 1：浅埋煤层开采矿山压力显现规律

1.案例介绍

能东煤矿位于陕西省府谷县西北部，方位角 300°，距离府谷县约 85km，行政区划隶属陕西省府谷县老高川乡管辖。矿区位于陕北侏罗纪煤田神府新民矿区的西北部，构造单元处于鄂尔多斯台向斜宽缓的东翼---陕北斜坡上。根据地质填图、勘探揭露及井巷回采工程、煤层底板等高线图的情况，地层总体为走向东西、倾向南西，倾角小于 1°的单斜构造，属简单构造。31205 工作面位于矿井的南翼，为 3-1 煤层的第四个综采工作面，工作面设计倾向长 180m（实体煤壁长度），走向长度 1890m；煤层倾角 1～3°，平均厚度 1.28m。系统研究了能东煤矿 31205 工作面采巷道顶底板岩层分层厚度、节理裂隙发育程度，测定煤层、顶底板岩石物理力学参数，揭示了 31205 工作面开采影响下对 32206 主、辅顺槽变形时空演化规律；验证近距离煤层群开采影响下 32206 主、辅顺槽稳定性。

（1）浅埋煤层采场数值模拟参数的确定

根据地质资料和实验室岩石力学实验结果，得出煤层及主要岩层物理力学参数（表 1-1）。计算采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则判断岩体的破坏：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} - 2c\sqrt{\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \qquad (1)$$

式中，σ1、σ3 分别是最大和最小主应力，c，φ分别是粘结力和摩擦角。当 fs>0 时，材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下，岩体的抗拉强度很低，因此，可根据抗拉强度准则（σ3≥σT）判断岩体是否产生拉破坏。

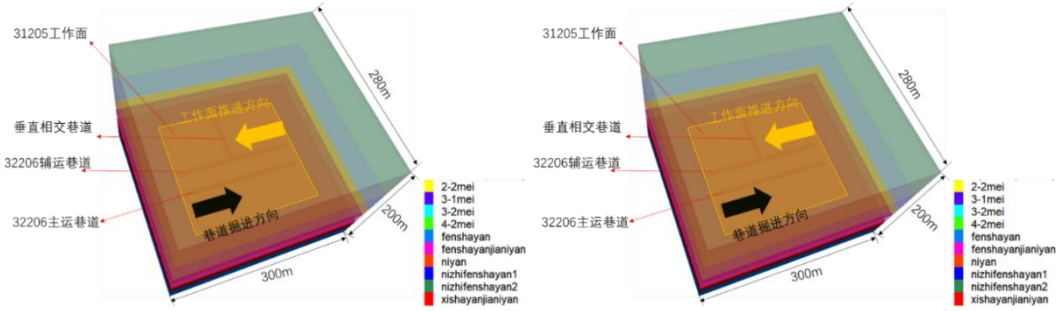
表 1-1 煤岩力学参数

序号	岩石名称	容 重 (kg/m^3)	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (°)
1	粉砂岩	2420	3.5	2.1	0.21	2.69	6.48	28.4
2	4^{-2}煤	1250	1.6	1.0	0.28	0.7	5.99	24.4
3	细砂岩夹泥岩	2350	2.8	1.8	0.22	1.59	5.96	27.9
4	3^{-2}煤	1280	1.3	0.84	0.28	0.73	6.63	20.8
5	粉砂岩夹泥岩	2240	2.8	1.8	0.21	1.65	4.06	35.4
6	3^{-1}煤	1220	1.6	1.0	0.29	0.7	5.34	27.9
7	泥岩	2370	2.8	1.8	0.23	2.69	6.48	28.4
8	2^{-2}煤	1250	1.6	1.0	0.28	0.7	5.99	24.4

9	泥质粉砂岩	2420	3.5	2.1	0.21	2.69	6.48	28.4

（2）数值模拟模型建立

根据工作面地质资料，并考虑计算需要，确定 32206 主、辅顺槽垂直投影与 31205 工作面不同叠合程度（中部、偏向一侧）数值计算模型（图 1-1），模型 31205 工作面长度为 180m，3-1 煤层平均埋深 150m，3-2 煤层平均埋深 174m，32206 顺槽宽为 5m，四周边界煤柱各留 50m。根据计算模型建立 FLAC3D 三维数值计算模型，模型尺寸为：长×宽=880m×565m，可以模拟至地表，采用 Mohr-Coulomb plasticity model 本构模型，用 brick 单元模拟煤层及围岩，模型底部限制垂直移动，模型前后和侧面采用位移约束限制水平移动，整个模型由 1574000 个单元组成，包括 1659632 个节点，三维数值模型如图 1-1 所示。

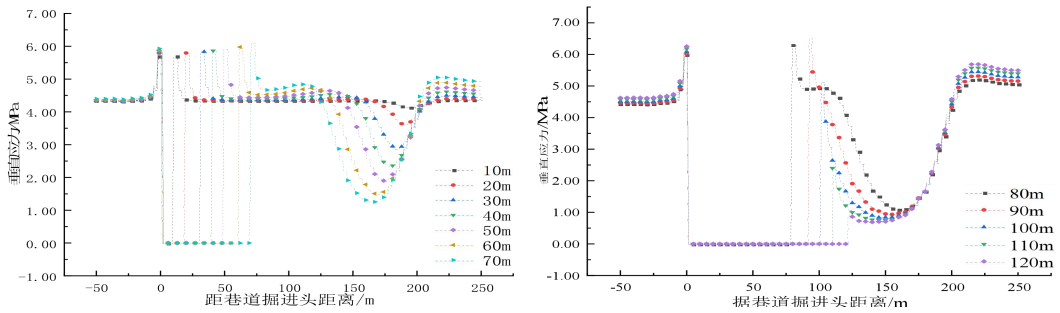


（a）下位巷道位于上工作面垂直投影中部　(b) 下位巷道位于上工作面垂直投影一侧

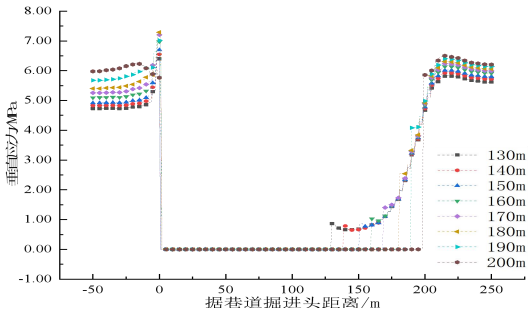
图 1-1 数值模型

（3）工作面开采影响下对 32206 主、辅顺槽变形时空演化规律

图 1-2 为 31205 工作面不同空间位置时下位 3-2 煤层的支承压力分布规律， 在 31205 工作面推进度为 0 m-70 m 时，工作面未对巷道造成影响，且 32206 主运及辅运顺槽之间也无影响；在 31205 工作面的推进度为 80 m-120 m 时，当工作面位于 32206 主、辅顺槽正上方时，31205 工作面回采对 32206 主、辅顺槽围岩应力环境有改善作用，使 32206 顺槽煤壁支承压力降低；在 31205 工作面推进度为 130 m-200 m 时，32206 顺槽围岩压力在 31205 工作面推进度达到 150 m 时最小，随着推进度增大，巷道围岩变形量增大，但整体仍然较为稳定。

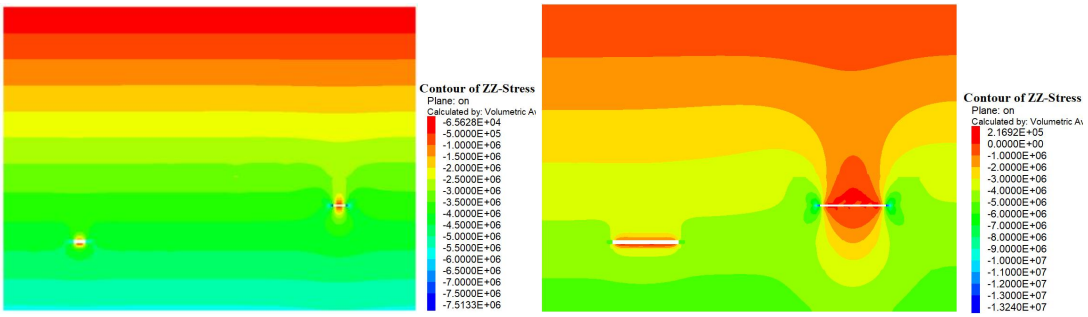


（a）巷道掘进 0-70m　　（b）巷道掘进 80-120m

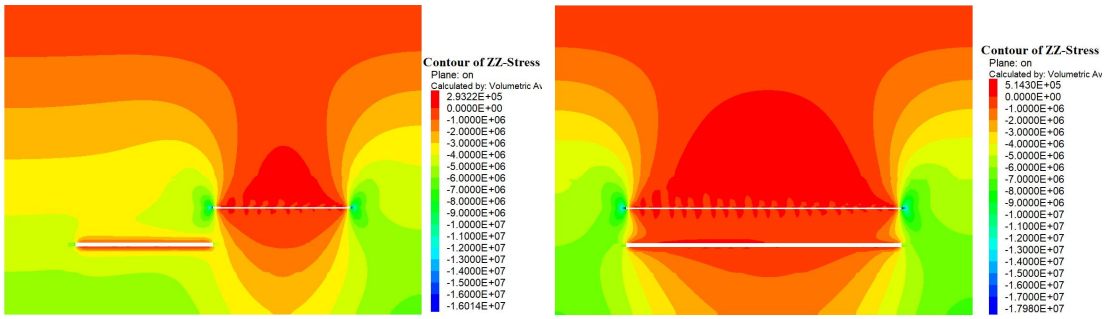


（c）巷道掘进 130-200m

图 1-2 巷道不同掘进度时煤层支承压力分布规律



（a）工作面推进 10m　　（b）工作面推进 50m



（c）工作面推进 100m　　（d）工作面推进 200m

图 1-3 工作面不同推进度时采场应力演化规律

2.案例实际应用效果

本案例通过研究近距离煤层群开采影响下对下位工作面主、辅顺槽稳定性的影响。提出了在下位工作面主、辅顺槽在支护设计时，应充分考虑围岩结构和各类支护材料特性的关系；在巷道掘进过程中，应及时支护；支护断面形成后加强巷道深部顶板离层及表面位移监测。在遇到软弱围岩或断层时，应适当强化支护参数，必要时进行补强支护。建议能东煤矿开展切实可靠的巷道矿压监测，基于矿压监测数据进行支护工艺参数调整，并进行工业性试验验证巷道支护参数的合理性和有效性，为能东煤矿安全、高效生产创造有利条件。因此，开展近距离煤层开采矿压显现特征及其对下位掘进巷道稳定性影响研究，项目对提升巷道掘进速度、保障能东煤矿安全生产具有一定的科学和现实意义。

从教学与科研相互促进的角度审视，本案例中的研究主题是基于教材基础知识内容的拓展和延伸，体现了岩层控制理论在实际中的应用。这一研究对矿山压力与岩层控制理论

进行了有益的补充与丰富。案例内容在教学与科研之间形成了良好的互动，紧密地将理论与实际相结合，有助于学生对基础理论问题的应用性理解和对实际场景的感知。

表 1-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	通过岩石力学试验结果与摩尔库伦屈服准则
2	数值模拟模型建立	对模型施加边界条件和重力，并在建模时对煤层布置测线
3	简单模型条件下力与位移综合分析	通过保存不同开采状态下的模型，对其不同状态下的矿压与位移进行监测，分析其分布规律

3.支撑材料



合同编号：6000237197

技术开发(委托)合同

项目名称：近距离煤层群开采矿压显现特征及其对下位掘进巷道稳定性影响研究

受让方(甲方)：陕西省煤炭科学研究所有限责任公司

受与方(乙方)：西安科技大学

签订时间：2023 年 08 月

签订地点：陕西省西安市

中华人民共和国科学技术部印制

第十一条 本合同经双方法定代表人或委托代理人签字盖章后生效。

甲方：陕西省煤炭科学研究所有限责任公司(盖章)

法定代表人/委托代理人：(签字)

2023 年 8 月 16 日

乙方：西安科技大学(盖章)

法定代表人/委托代理人：(签字)

2023 年 8 月 16 日

图 1-4 技术开发合同

（二）案例 2：浅埋煤层采场基本顶结构演化特征分析

1.案例介绍

神府东胜煤田储量巨大，是我国目前重要的煤产地之一。神东矿区大部分区域集中在埋深 100~150 mm 范围内，埋深相对较浅，基岩相对较薄，部分覆岩以单关键层控制整个覆岩为主要特点。已有的实践表明，浅埋煤层覆岩来压较为剧烈，根据已有浅埋煤层工作面矿压观测结果，其主要特点如下：1) 顶板基岩沿全厚切落，基岩破断角较大，破断直接波及地表。来压期间有明显的台阶下沉和动载现象。工作面覆岩不存在“三带”，基本上为冒落带和裂隙带“两带”。2) 浅埋煤层工作面顶板一般为单一主关键层类型，老顶岩块不易形成稳定的砌体梁结构。3) 基岩与载荷厚度之比(简称基载比)对来压显现有重要影响。基载比越小，采场来压越剧烈，关键层及覆岩产生的动载现象越明显。由于浅埋煤层的以上特点，给该区域煤炭回采过程中的设备和人员带来巨大的潜在威胁，分析和预防顶板大面积垮落产生的动力灾害成为研究热点。大量的实践表明，覆岩中的关键层对整个覆岩的变形起到决定性的作用，特别是埋深较浅且基载比较小的煤层，关键层的作用尤为明显。哈拉沟 22407 工作面位于 22 煤四盘区，走向长度 3 224 m，工作面倾向长度 284.3 m，面积 91.66 万 m2，地面标高 1191~1 286.8 m，煤层底板标高 1 127.8~1 147.9 m。煤层平均厚度 5.39 m，设计采高 5.2 m。切眼附近松散层厚 30~40 m，上覆基岩厚 89~98 m。大部分直接顶为粉砂岩，厚 18.47~44.1 m，基本顶为中细粒砂岩，厚 0.9~17.3 m。工作面上覆岩层为典型的浅埋薄基岩单关键层结构。

（1）浅埋煤层采场数值模拟参数的确定

为了重点分析关键层对整个上覆岩层稳定的影响机理，特别是初次来压期间关键层的失稳过程及机理，因此，关键层的层位、分层厚度和力学模型及参数的选取非常重要。通过建立系列数值模型，使得模型的运行结果反演获得上覆岩层的演化特征。相关参数如下：1) 关键层的分层厚度为 8 m；2) 覆岩分层厚度均为 2 m；3) 分层之间用“interface”隔离，起到各个岩层之间的分层作用；4) 底板、关键层和覆岩的力学参数如表 2-1 所列。

表 2-1 岩体强度参数

岩层	弹性模量/GPa	泊松比	密度/（g·cm^{-3}）	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/Mpa
覆岩	2.5	0.25	2.5	0.6	30	0.4
关键层	10	0.25	2.5	2.4	30	0.8
煤层	5	0.25	2.5	2.0	30	0.6
底板	10	0.25	2.5	3.0	30	2.0

（2）数值模拟模型建立

为了分析 22407 工作面开采期间关键层破断运动规律，特别是其三维空间的开裂机理，本文用 FLAC3D 建立如图 2-1 所示的数值模型。模型总长度 240 m，宽 160 m，模拟煤层埋深 100 m，上覆岩层总厚度为 50 m，其中包括 8 m 厚关键层和 42 m 厚覆岩，松散荷载层厚 50 m，基载比为 1∶1，满足浅埋煤层定义。

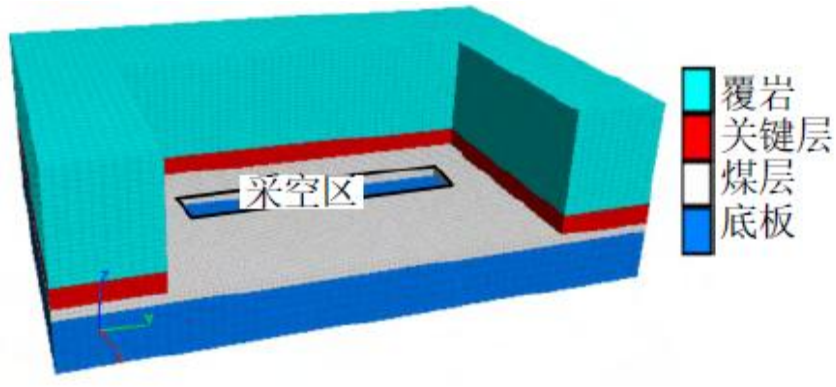


图2-1 数值模拟模型

（3）顶板断裂数值模拟结果及分析

如图 2 所示，随着开挖跨度的不断增加，关键层跨中挠度不断增加，在开挖跨度达到 52 m 之前，开挖跨度与挠度几乎成正比，当开挖跨度由 52 m 增加到 56 m 时，跨中挠度由 94.8 mm 突然增加到 273 mm，增加幅度较大。当开挖跨度增加到 60 m 时，关键层失稳，整个覆岩随之全部垮落。说明数值模型中的关键层符合浅埋煤层初次来压的基本特征。

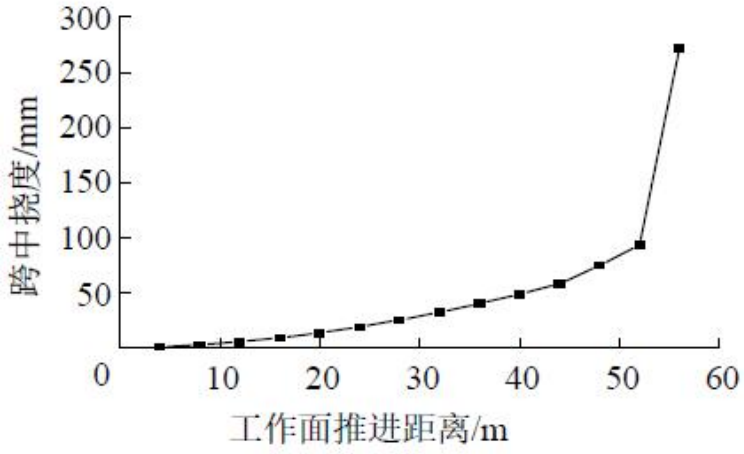


图 2-2 工作面推进距离与关键层跨中挠度关系

通过下述破坏过程可以发现(图 2-3 至图 2-6)，关键层在浅埋煤层中起到关键支承作用，关键层的初次来压步距决定了整个覆岩的极限跨距，极限跨距越大，工作面的来压现象越明显，关键层垮落时产生的动载荷越大。关键层和覆岩的局部受拉或者受剪屈服不代表整个覆岩的垮落，而是随着采空区跨度的不断增加，屈服区不断扩展和延伸，直到关键层形成了完整的“O-X”破裂带时，关键层上的覆岩也由于关键层的跨度和挠度不断增加而发生大范围的屈服，给关键层带来了较大的竖向压力促使关键层无法维持自身稳定而最终垮落。

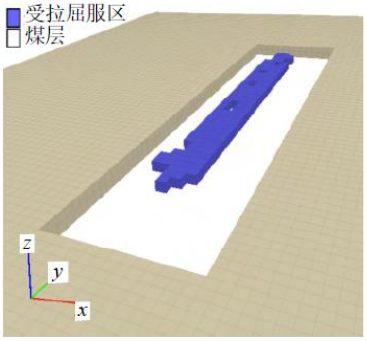
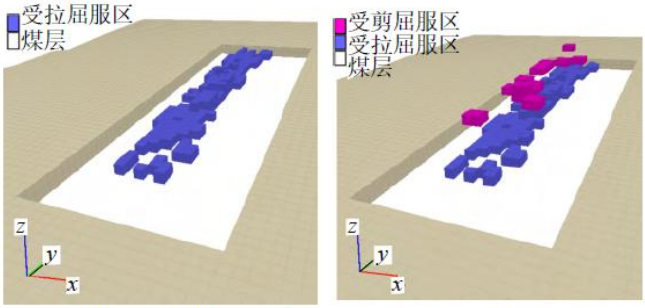
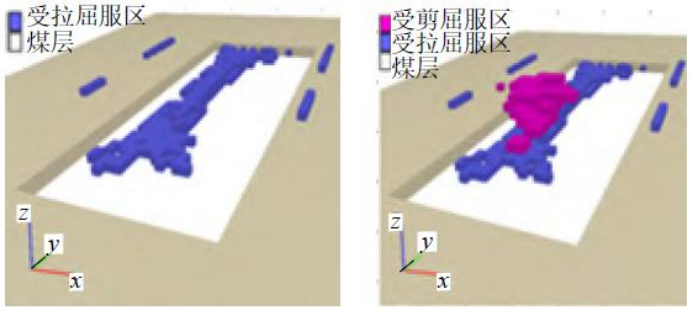


图 2-3 工作面推进 28 m 时关键层屈服区分布图



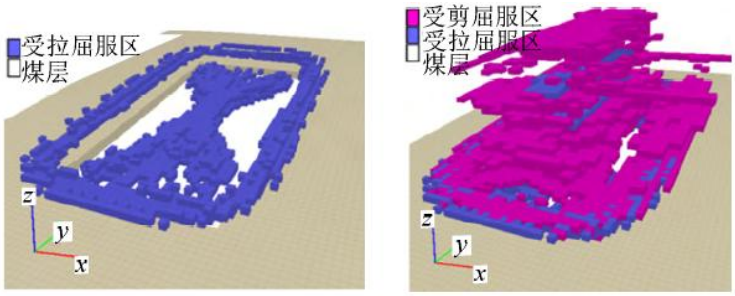
(a) 关键层内的屈服区分布图　(b) 整个覆岩的屈服区分布图

图 2-4 工作面推进 36 m 时覆岩屈服区分布图



(a) 关键层内的屈服区分布图　(b) 整个覆岩的屈服区分布图

图 2-5 工作面推进 44 m 时覆岩屈服区分布图



(a) 关键层内的屈服区分布图　(b) 整个覆岩的屈服区分布图

图 2-6 工作面推进 56 m 时覆岩屈服区分布图

2.案例实际应用效果

研究关键层在浅埋煤层开采过程中的破坏特征对掌握覆岩变形及垮落过程和预防顶板大面积来压产生的动力灾害有着重要的理论与现实意义。此次研究对浅埋煤层覆岩关键层

的开裂过程和垮落机理进行数值模拟研究，结合神东浅埋煤层的特点、来压步距和垮落特征建立含单一关键层的数值模型。重点分析工作面在推进过程中，关键层和覆岩开裂位置和破坏区的发展全过程，分析浅埋薄基岩覆岩垮落机理。这对掌握和控制浅埋煤层覆岩大面积来压产生的动力灾害有着重要的意义。

站在教学与科研相辅相成的立场，我们发现本案例的研究主题源自于教材中的基础知识，并将其拓展至实际应用领域，展示了岩层控制理论的具体运用。此研究为矿山压力与岩层控制理论提供了有价值的补充和发展。案例内容在教学与科研之间建立了积极的互动关系，强调理论与实践的紧密结合，旨在促进学生对基础理论的掌握和实际场景相结合。

表 2-2 教学内容与关键内容

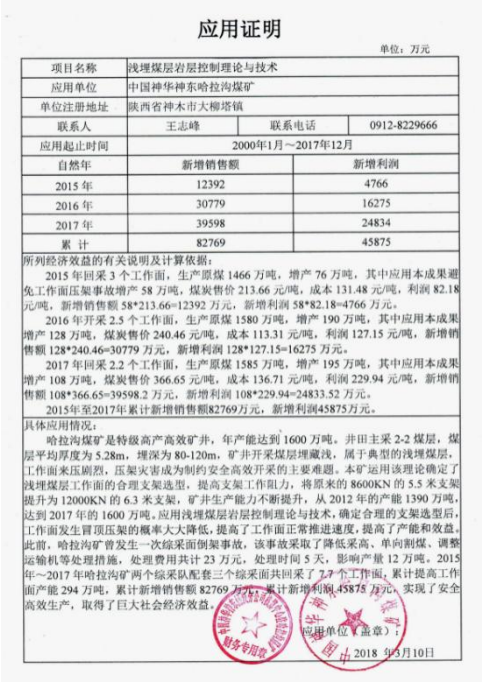
序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图
2	数值模拟模型建立	对模型施加边界条件和重力，并对关键层与普通岩层加以区分
3	岩层垮落动态模拟	对不同推进度下的覆岩破坏区域进行调用，分析其覆岩的动态破坏垮落特征

3.支撑材料

[1] 黄庆享．浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]．岩石力学与工程学报，2002，21(8)：1174-1177.

[2] 黄庆享，钱鸣高，石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J]. 煤炭学报，1999(6): 581-585.

[3] 黄庆享.采场老顶初次来压的结构分析[J]. 岩石力学与工程学报，1998(5):521-526.



应用证明

单位：万元

项目名称	浅埋煤层岩层控制理论与技术		
应用单位	中国神华神东哈拉沟煤矿		
单位注册地址	陕西省神木市大柳塔镇		
联系人	王志峰	联系电话	0912-8229666
应用起止时间	2000年1月～2017年12月		
自然年	新增销售额	新增利润	
2015 年	12392	4766	
2016 年	30779	16275	
2017 年	39598	24834	
累 计	82769	45875	

所列经济效益的有关说明及计算依据：

2015 年回采 3 个工作面，生产原煤 1466 万吨，增产 76 万吨，其中应用本成果避免工作面压架事故增产 58 万吨，煤炭售价 213.66 元/吨，成本 131.48 元/吨，利润 82.18 元/吨，新增销售额 58*213.66=12392 万元，新增利润 58*82.18=4766 万元。

2016 年开采 2.5 个工作面，生产原煤 1580 万吨，增产 190 万吨，其中应用本成果增产 128 万吨，煤炭售价 240.46 元/吨，成本 113.31 元/吨，利润 127.15 元/吨，新增销售额 128*240.46=30779 万元，新增利润 128*127.15=16275 万元。

2017 年回采 2.2 个工作面，生产原煤 1585 万吨，增产 195 万吨，其中应用本成果增产 108 万吨，煤炭售价 366.65 元/吨，成本 136.71 元/吨，利润 229.94 元/吨，新增销售额 108*366.65=39598.2 万元，新增利润 108*229.94=24833.52 万元。

2015年至2017年累计新增销售额82769万元，新增利润45875万元。

具体应用情况：

哈拉沟煤矿是特级高产高效矿井，年产能达到 1600 万吨。井田主采 2-2 煤层，煤层平均厚度为 5.28m，埋深为 80-120m，矿井开采煤层埋藏浅，属于典型的浅埋煤层，工作面来压剧烈，压架灾害成为制约安全高效开采的主要难题。本矿运用该理论确定了浅埋煤层工作面的合理支架选型，提高支架工作阻力，将原来的 8600KN 的 5.5 米支架提升为 12000KN 的 6.3 米支架，矿井生产能力不断提升，从 2012 年的产能 1390 万吨，达到 2017 年的 1600 万吨。应用浅埋煤层岩层控制理论与技术，确定合理的支架选型后，工作面发生冒顶压架的概率大大降低，提高了工作面正常推进速度，提高了产能和效益。此前，哈拉沟矿曾发生一次综采面倒架事故，该事故采取了降低采高、单向割煤、调整运输机等处理措施，处理费用共计 23 万元，处理时间 5 天，影响产量 12 万吨。2015年～2017 年哈拉沟矿两个综采队配套三个综采面共回采了 7.7 个工作面，累计提高工作面产能 294 万吨，累计新增销售额 82769 万元，累计新增利润 45875 万元，实现了安全高效生产，取得了巨大社会经济效益。

应用单位（盖章）：

2018 年 3 月 10 日

图 2-7 应用效益证明

（三）案例 3：浅埋煤层密集孔切顶成巷优化方案效果验证

1.案例介绍

陕西瑞能煤业有限责任公司矿井位于黄陵县店头镇西北方向约 2 km 的鲁寺西沟内，行政区划隶属黄陵县店头镇管辖。本案例针对全采动周期下相邻工作面开采对沿空留巷效果的影响进行研究，以瑞能煤矿 203 运输巷道以及 203 工作面、205 工作面为研究背景，采用计算机数值模拟系统分析密集钻孔切顶卸压沿空留巷技术中巷道受开采扰动下的矿压显现及围岩变形规律，包括应力、位移等变化规律及其相互影响机制，研究留巷段巷道矿压显现特征并分析巷道围岩变形破坏机制，结合确定的密集钻孔切顶工艺，嵌入不同的永久/临时支护方案，分析不同支护方案在各个采动阶段的支护效果，确定能够满足巷道全采动周期稳定需求且经济上可行的支护参数。

（1）浅埋煤层采场数值模拟参数的确定

以往数值模拟经验表明，数值模拟结果是否更为接近实际，取决于参数选取的准确性，本次模拟为了更为接近工程实际，主要选取块体和结构面两类组成，其中本模拟中块体采用 Mohr-Coulomb 本构模型，结构面采用库伦滑动本构模型，Mohr- Coulomb 屈服准则如下：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} - 2c\sqrt{\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \tag{1}$$

式中，σ_1、σ_3 分别是最大和最小主应力，c，φ分别是粘结力和摩擦角。当 fs>0 时，材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下，岩体的抗拉强度很低，因此，可根据抗拉强度准则（$\sigma_3 \geq \sigma_T$）判断岩体是否产生拉破坏。根据瑞能煤矿地质资料和室内实验室岩石力学测试结果对模型材料参数进行赋值，考虑到岩石节理的影响，对结构面参数进行了适当的折减。

（2）数值模拟模型建立

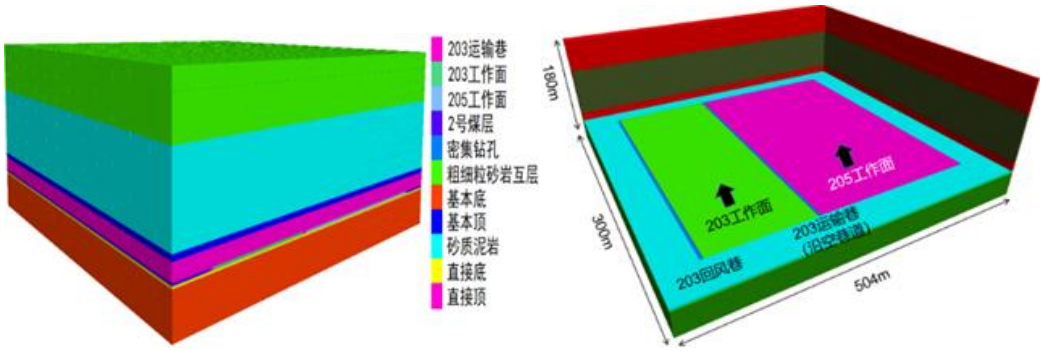
①巷道直接顶厚度 14 m，基本顶厚度 5 m

模型尺寸（长×宽×高）为 504 m×300 m×180 m，考虑到计算机算力有限，同时为了减少模型的运行时间，按照三种支护形式建立三个模型（原有支护、优化支护方案一、优化支护方案二）上覆地层载荷通过在模型上表面施加等效载荷的方式实现。其中 203 工作面长度 150 m，205 工作面长度 245 m。为了减少边界效应对模型计算结果的影响，在模型四周各留设 50 m 边界煤柱，按照瑞能煤矿 203 运输顺槽作业规程建立工作面两巷。直接顶厚度为 14 m，基本顶厚度为 5 m，在 203 巷道顶板左侧布置密集钻孔，模型建立如图 3-1 所示：

②巷道直接顶厚度 6 m，基本顶厚度 5 m

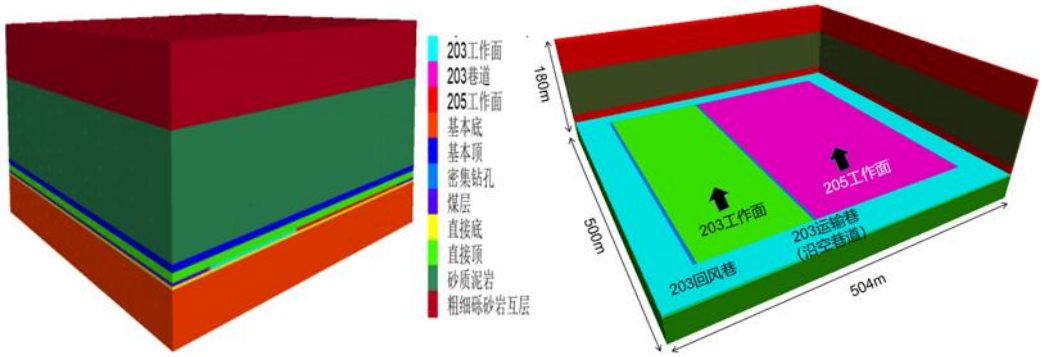
模型尺寸（长×宽×高）为 504 m×500 m×180 m，为提高数值模型计算效率，数值模型并未建立全部地层，上覆地层载荷通过在模型上表面施加等效载荷的方式实现。其中 203 工作面长度 150 m，205 工作面长度 245 m。在模型四周各留设 50 m 边界煤柱以减少边界效应对模型计算结果的影响，按照瑞能煤矿 203 运输顺槽作业规程建立工作面两巷。直接顶厚度为 6 m，基本顶厚度为 5 m，在 203 巷道顶板左侧布置密集钻孔，模型建立如图 3-2

所示：



（a）模型整体图　　（b）模型空间位置透视图

图 3-1 直接顶 14m、基本顶 6m 数值模型

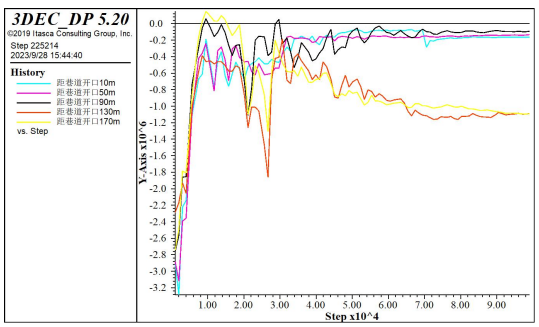


（a）模型整体图　　（b）模型空间位置透视图

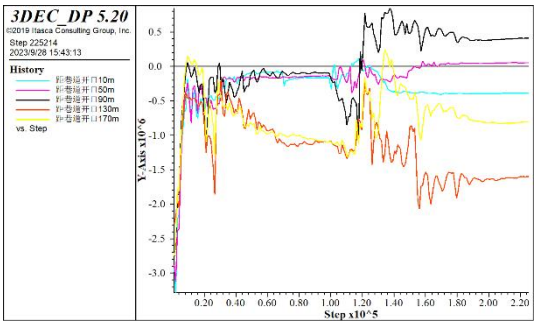
图 3-2 直接顶 5m、基本顶 6m 数值模型

（3）密集孔切顶成巷全采动周期沿空巷道支护效果数值计算结果分析

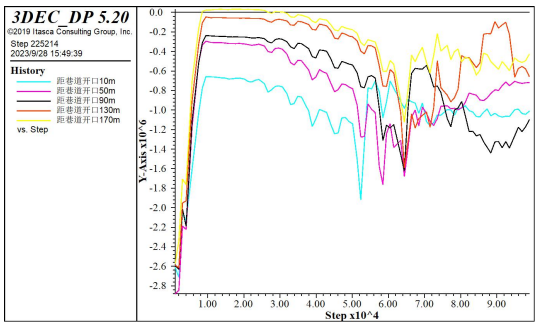
如图 3-3 所示，通过观察采动影响区巷道围岩应力演化特征，比较不同永久支护方案全采动周期沿空巷道的支护效果可知：巷道开采后，顶板应力产生释放，由压应力转变为拉应力，随工作面的推进又转变为压应力。开采 203 工作面时，采用原支护方案，顶板受开采扰动影响较大，最大应力达到 1.88 MPa，补强支护方案一条件下，顶板最大应力达到 1.82 MPa，采用补强支护方案二时，顶板受开采扰动较小，顶板应力最大值为 1.44 MPa。开采 205 工作面时，采用原支护方案，顶板不同位置受扰动大小不同，应力极值为 2.22 MPa，采用补强支护方案一时，顶板应力极值为 2.44 MPa，采用补强支护方案二后，应力极值减小至 1.62 MPa，可见，采用补强支护方案二后，可以一定程度上改善巷道围岩的受力情况，提高巷道的整体稳定性。



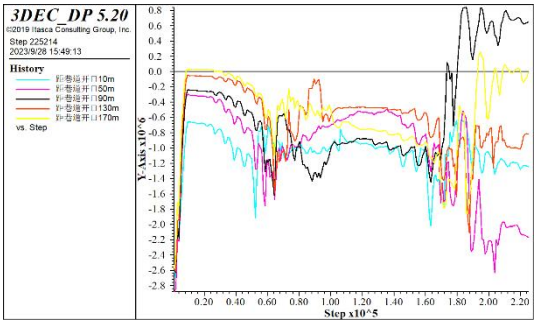
(a)开采 203 工作面原支护方案



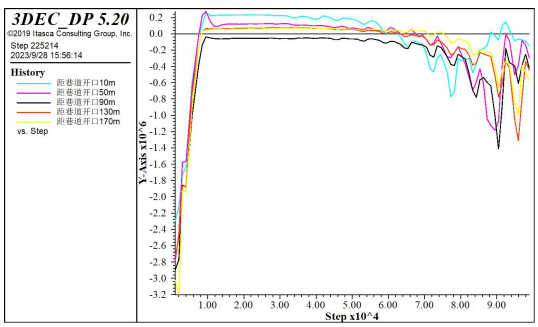
(b)开采 205 工作面原支护方案



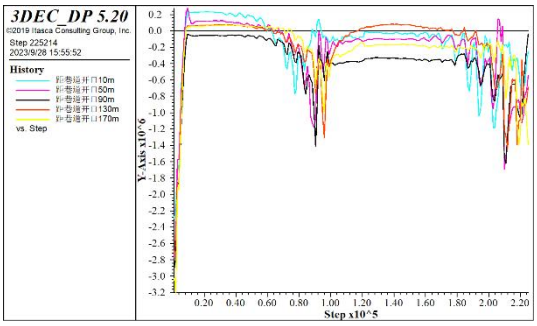
(c)开采 203 工作面补强支护方案一



(d) 开采 205 工作面补强支护方案一



(e)开采 203 工作面补强支护方案二



(f) 开采 205 工作面补强支护方案二

图 3-3 全采动周期不同支护方案巷道围岩应力演化特征

2.案例实际应用效果

本案例报告运用数值计算软件 3DEC 对全采动周期下相邻工作面开采对沿空留巷效果的影响进行研究，以瑞能煤业有限公司 203 运输巷道以及 203 工作面、205 工作面为研究背景，系统分析密集钻孔切顶卸压沿空留巷技术中巷道受开采扰动下的矿压显现及围岩变形规律，包括应力、位移等变化规律及其相互影响机制，研究留巷段巷道矿压显现特征并分析巷道围岩变形破坏机制，结合确定的密集钻孔切顶工艺，嵌入不同的永久/临时支护方案，分析不同支护方案在各个采动阶段的支护效果，确定能够满足巷道全采动周期稳定需求且经济上可行的支护参数。本案例结合科研应用到教学中，能够把教材中的知识实际应用。案例内容在教学与科研之间建立了积极的互动关系，强调理论与实践的紧密结合，旨在促进学生对基础理论的掌握和实际场景相结合。

表 3-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图
2	数值模拟模型建立	块体采用 Mohr-Coulomb 本构模型， 结构面采用库伦滑动本构模型
3	巷道全采动周期受载特征	对不同支护方案的巷道围岩均布置侧线，分析采动过程中其位移、应力分布变化规律

3.支撑材料

[1] 黄庆享,赵萌烨,黄克军.浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(01):71-77+86.

[2] 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(02):282-286.
[3] 黄庆享,胡火明,刘玉卫等. 浅埋煤层工作面液压支架工作阻力的确定[J]. 采矿与安全工程学报，2009(3):304-307.
[4] 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.

（四）案例 4：浅埋近距离煤层群开采边坡稳定性分析

1.案例介绍

露天边坡坡体高度和坡角随着开采的进行而逐步增加，加之破碎带、岩脉以及爆破振动的影响，使得滑坡成为露天矿坑中最常见的地质灾害之一。滑坡产生的堆积体具有宽级配和高松散度等特性，使得滑坡堆积体的稳定性较差。所以需要对这些滑坡堆积体稳定性进行分析，并提出合理的治理措施，以减轻其对矿区安全生产的影响。本案例所研究矿坑呈近东西向展布，长 3.3 km，宽 2.1 km，面积 4.8 km^2。该矿目前开采至 1556 m 标高处，与开采最终标高 1230 m 相差甚远。从已揭露采场边坡状况来看，主矿采场南帮的岩性和构造较复杂，断层破碎带和岩脉较多且出露宽度大，与边坡走向相近，倾向直立或反倾，对边坡的稳定性不利，已靠帮到界的台阶滑塌及倾倒破坏明显。本案例所研究的滑体便位于南帮，该滑体所处区域形成了高度近 100 m，分为+1650、+1626、+1598、+1570、+1565 的 5 个工作平台，总体边坡坡角为 41°~44°，而滑坡发生于+1570～+1650 m 工作平台之间，根据矿区最终境界设计图可知，在该滑体下部 1480～1514 m 标高范围内将建设矿石二期破碎站，所以对该滑体稳定性分析及治理措施的研究是非常必要的。

（1）浅埋煤层采场数值模拟参数的确定

该矿区边坡节理裂隙较发育。岩体为残坡积层及全风化岩层，散体及碎裂结构。考虑到矿山在开挖过程中产生的卸荷回弹及爆破震动等因素，稳定性分析时将边坡表层约 30m 左右的覆盖层定为白云岩破碎带（即风化带）。风化带的力学参数较白云岩基岩有所降低。岩石物理指标标准值可视为岩体物理指标标准值；体内摩擦角标准值可由岩石内摩擦角标准值根据岩体完整性乘以 0.80~0.95 的折减系数确定；岩体粘聚力标准值由岩石粘聚力标准值乘以 0.20~0.30 的折减系数确定，结合该矿区勘察报告，选取物理力学参数如表 4-1。

表 4-1 物理学参数表

材料	容重γ（KN/m^3）粘聚力 C(MPa)		内摩擦角φ(°)
风化白云岩	28.0	0.07	29.0
完整白云岩	29.0	0.44	38.0
滑体堆积体	26.0	0.01	15.0

（2）数值模拟模型建立

随着 FLAC3D 在岩土工程中应用的不断拓展， 人们认识到模型的准确度会对数值模拟的结果产生 影响。而造成 FLAC3D 建模不精确的原因主要包括:(1) FLAC3D 前处理存在工作量大、过程繁琐而且可视化程度低等问题，故不得不对模型进行简化来减小建模的工作量；(2)岩土体地质调查信息是建立模型的原始资料，其准确度直接影响着模型的精确程度。目前针对 FLAC3D 前其处理存在的不足，国内外专家已经做不少的探索，常见有利用编程语句开发 FLAC3D 前处理程序、利用三维建模软件和通过有限元软件（如迈达斯、ANASY）的前处理功能等用于复杂地形建模的方法；而对如何提高用于建立数值模型的地质调查资料准确度的研究还不是很多。采用三维激光扫描技术使该问题得到了解决，该技

术可以从实物中进行快速的逆向三维数据采集，其激光点云中的每个三维数据都是直接采集目标的真实数据，使得后期处理的数据完全真实可靠。利用三维激光扫描仪采集得到的三维逆向数据并结合迈达斯软件重构堆积体模型，见图 4-1。

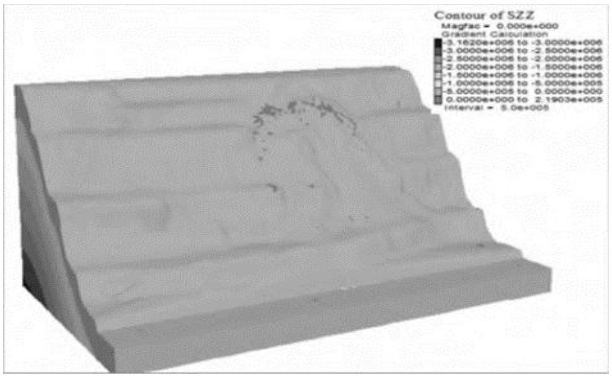


图 4-1 堆积体三维模型

（3）数值模拟结果及稳定性分析

①堆积体稳定性分析

通过堆积体稳定性分析可以判断该滑体继续滑动的可能性。计算模型尺寸为 188m×300m×118m。岩土体采用实体单元混合网格（包括 4 节点四面体、5 节点金字塔、6 节点三棱柱和 8 节点六面体）模拟。计算模型共划分了 91448 个单元，47852 个节点，计算精度为：1×10-5，图 4-2 为滑移后的应力分布云图。

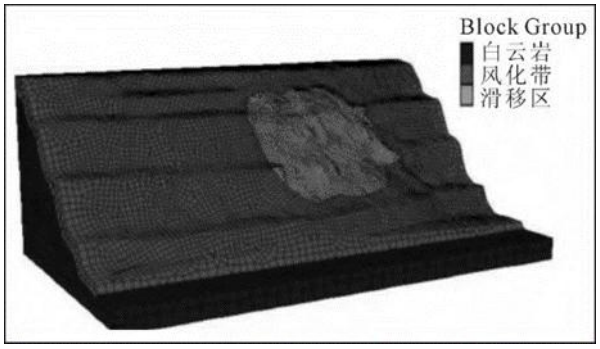


图 4-2 滑移后边坡应力分布云图

由图 4-3 所示的剪切应变增量可以看出，在滑移区周围出现贯通的剪切带，滑移区有继续发生滑移的危险。由图 4-4 可以看出滑移区出现完全塑性分布，大部分属于剪切破坏，少部分属于拉伸破坏。综合剪切带和塑性区分析，滑移区发生继续滑移的可能性很大。此外，在滑移区右侧（西侧）台阶处也出 现了贯通的塑性区，在滑移区继续发生滑移后带动周围风化带滑动的可能性也很大，所以必须对该堆积体进行治理。

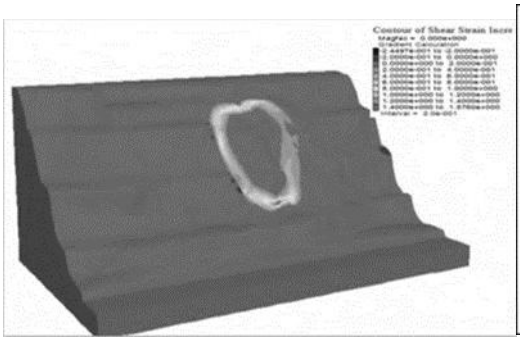


图 4-3 滑移后边坡剪切应变增量云图

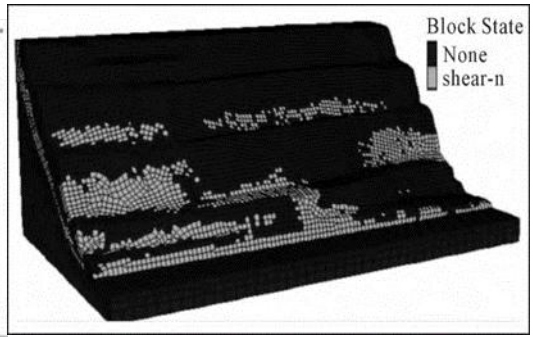


图 4-4 滑移后边坡塑性区分布图

②削坡后边坡稳定性分析

综上可知，目前堆积体处于不稳定状态，随时都有下滑可能。滑坡不仅对矿场的继续开采以及矿区工作人员的生命安全造成威胁，还影响到滑坡下方矿石二期破碎站的建设，所以对边坡采取有效的防治措施是有必要的。本文提出削坡的防治方案，并通过数值模拟的方法计算削坡后边坡的稳定性。图 4-5 给出了滑体治理前后的典型剖面图。从剖面图可以看出，边坡总体角度由削坡前约为 47°减小到约 41°。对削坡处理后边坡进行建模如 4-6 所示，尺寸为 188m×300m×118m。计算模型共划分了 154681 个单元，98940 个节点。计算精度为：1×10^{-5}。

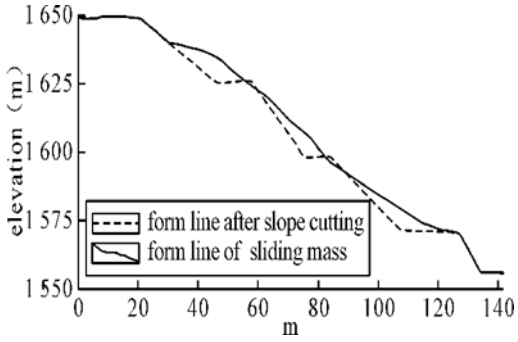


图 4-5 滑体治理前后典型剖面图

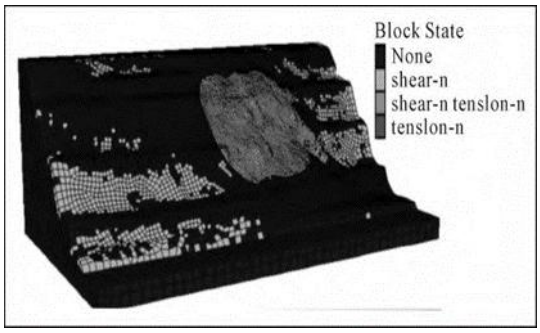


图 4-6 削坡后边坡地形三维模型

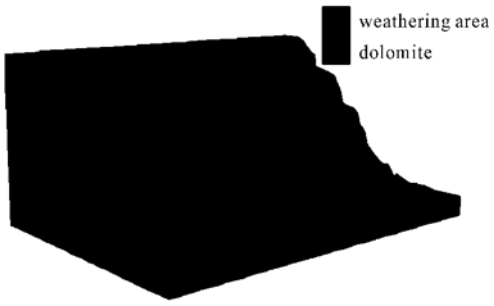


图4-7削坡后剪切应变增量云图

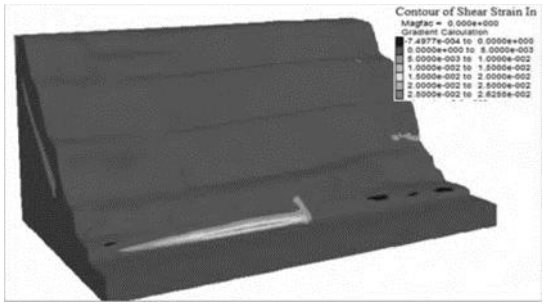


图4-8 削坡后边坡塑性区分布图

由图 4-7 所示的剪切应变增量云图可以看出，在边坡坡面未出现贯通的剪切带，边坡底部虽然出现一定范围的剪切带，但是未出现贯通现象。从图 4-8 所示的坡面塑性区分布云图可以看出塑性区主要分布在边坡底部，均属于剪切破坏，削坡区域未出现大面积塑性区范围。综合剪切带和塑性区分析，削坡后边坡自稳能力较强。

2.案例实际应用效果

该矿区滑坡发生后，形成了极为复杂的地质表征结构，利用传统的建模方法已难以满足精确建模的要求。本案例提出的采用三维激光扫描技术获取地质表征结构三维数据，并利用该数据对复杂地形建立 FLAC3D 计算模型的方法，具有建模速度快和准确反映三维地质形态的优点；并且精确的计算模型使得数值模拟的结算结果更为可靠。

利用 FLAC3D 结合三维激光扫描技术对矿区滑体建立计算模型并进行模拟计算，计算结果表明该滑体现处于不稳定状态，需采取治理措施。本文提出削坡减载的治理方法，通过 FLAC3D 数值计算得到采用该方法对滑体进行治理后，边坡自稳能力较强。

站在教学与科研相辅相成的立场，我们发现本案例的研究主题源自于教材中的基础知识，并将其拓展至实际应用领域，展示了理论的具体运用。案例内容在教学与科研之间建立了积极的互动关系，强调理论与实践的紧密结合，旨在促进学生对基础理论的掌握和实际场景相结合。

表 4-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果、现场地层综合柱状图及地表等高线
2	数值模拟模型建立	采用三维激光扫描仪记录信息生成网格再导入 FLAC3D 中对其进行分组赋参
3	边坡稳定性模拟方法	通过对坡体进行截面分析其坡体角度的变化以及受力矢量的变化

3.支撑材料

[1] 余学义,毛旭魏.近距离煤层重复采动对坡体稳定性的影响[J].西安科技大学学报,2019,39(01):34-42.

[2] 吕兆海,赵长红,曹建涛等.高温火区赋存下露天开采爆破及边坡稳定性研究[J].煤矿安全,2017,48(07):162-165.

（五）案例 5：浅埋煤层超长大采高工作面覆岩运动规律

1.案例介绍

神华公司宽沟煤矿位于新疆呼图壁县的天山北麓，井田东西长 9.7 km，南北宽 3.15 km，井田面积约 20.132 5 km^2，西翼采区现主采具有强冲击倾向性的 B4–1 煤层和具有弱冲击倾向性的 B2 煤层，两煤层为相距 43.8 m 的近距离煤层，且 B4–1 煤层顶板具有弱冲击倾向性、B2 煤层顶板具有强冲击倾向性。B4–1 煤层平均厚度 3.0 m，平均倾角为 14°，可采走向约 746 m 的 W1145 工作面位于 B4–1 煤层，采用综合一次性采全高的开采方法；B2 煤层平均厚度 9.5 m，平均倾角为 14°，可采走向长约 1468 m、倾向约 192 m 的 W1123 工作面位于 B2 煤层，采用综放开采，采高 3.2 m，放煤高度 6.3 m。宽沟煤矿目前回采 W1123 工作面，开采顺序依次为 B4–1 煤层 W1145 工作面、B2 煤层 W1123 工作面。宽沟煤矿 B4–1 与 B2 煤层群示意图如图 5-1 所示。为满足多煤层矿井进行上行开采时的安全与高效，上行开采的覆岩结构演化特征及其稳定性研究显得尤为重要，特别是对具有强冲击倾向性的近距离煤层，需做好冲击灾害的防治措施，并确定合理的停采位置，避免因覆岩大范围失稳而造成重大冲击灾害事故有重要意义。

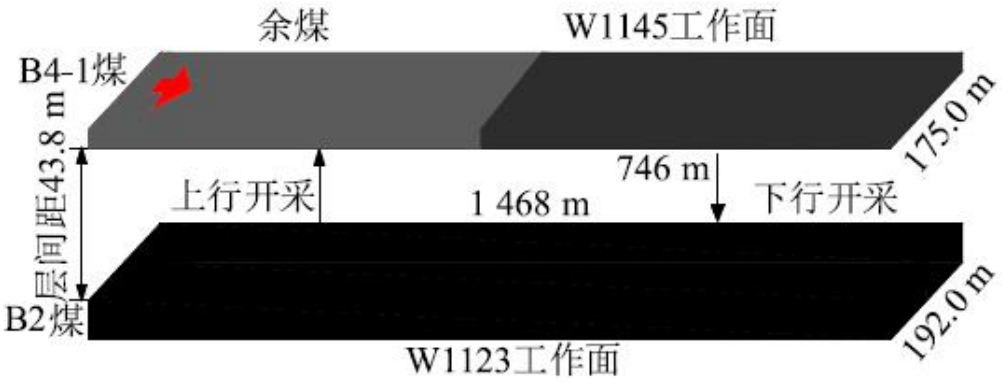


图5-1 煤层群示意图

（1）浅埋煤层采场数值模拟参数的确定

现场取样和岩石力学实验结果表明，当载荷达到屈服极限后，岩体在塑性流动过程中随变形保持一定残余强度。本次采用理想弹塑性本构模型莫尔–库仑屈服准则来判断岩体的破坏，通过现场地质调查和岩石力学实验结果确定了煤岩力学参数，并在模拟计算采用时根据开采实践结果进行了适当折减。本次数值分析的煤岩力学参数如表 5-1 所示。

表 5-1 主要煤岩力学参数

岩层类别	密度 ρ/(kg·m^{-3})	剪切模量 G/GPa	体积模量 K/GPa	黏聚力 C/MPa	抗拉强度 Rm/MPa
砂砾岩	2532	8.50	14.17	16.22	2.33
泥岩	2533	3.83	7.42	4.39	2.28

细砂岩	2531	14.07	19.57	21.38	3.17
粗砂岩	2543	10.94	13.45	21.63	4.48
B4-1煤	1303	2.88	6.25	3.81	1.97

（2）数值模拟模型建立

通过 3DEC 数值模拟实验对 B4–1 （模型如图 5-2 所示，长 1 000 m，宽 1 m，高 378 m。）剩余煤层工作面回采过程中不断前移的超前支承压力及 W1145 工作面切眼位置处的滞后支承压力进行监测分析，结合底板应力演化规律，验证理论分析，并为确定合理的停采线位置提供依据。

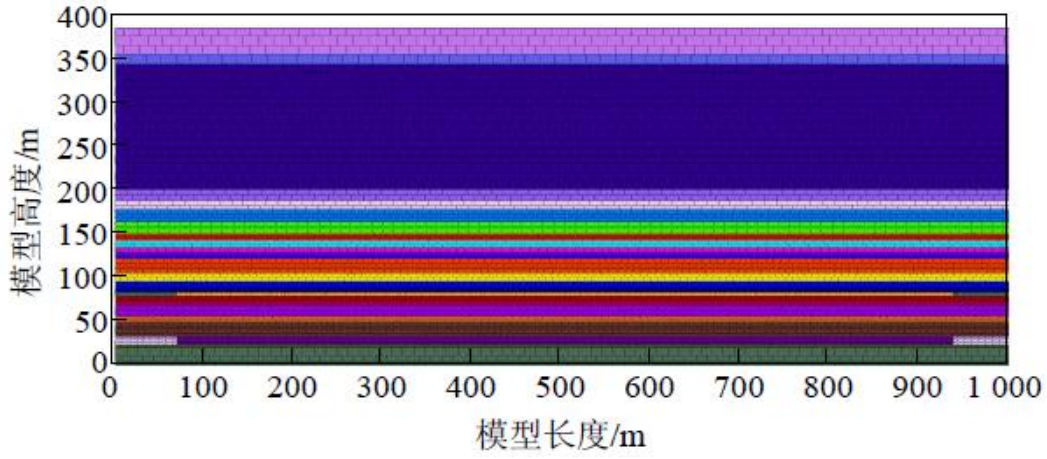


图 5-2 3DEC 数值计算模型

(3)工作面覆岩运动规律

根据底板应力数据以及 5.6 m 的底板单元间隔，作出区域 1～5 回采结束后的煤层底板双峰值应力演化趋势，如图 5-3 所示，在复采面推进过程中，各区域采后的双峰值效应随开采愈加明显。其中位于 W1145 工作面开切眼处的滞后支承应力明显高于因复采逐步前移的超前支承应力。随复采进行右侧滞后峰值应力基本呈现出单调递增的变化趋势，至区域 5 回采后的初采面滞后峰值应力达 18.1MPa；随工作面推进位置不断前移的左侧峰值应力呈现出动态波动式的递增趋势，至区域 5 回采后的复采面超前峰值应力达到 12.0 MPa。覆岩应力分布在区域 5 回采始末(见图 4(a)，(b))，中部煤层底板应力逐渐增加，但应力增加幅度较小，中部底板应力略小于 W1145 面切眼处的滞后应力。区域 6 回采过程中的中部煤柱应力明显上升，在煤柱剩余 33.6 m(见图 4(c))首次出现明显的煤柱底板中部应力集中效应，在煤柱剩余 28.0m(见图 5-4(d))时的该应力集中效应更为明显。

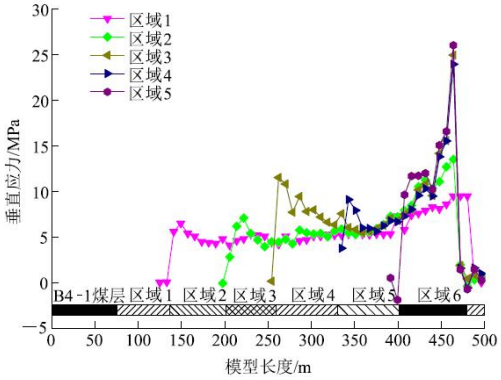
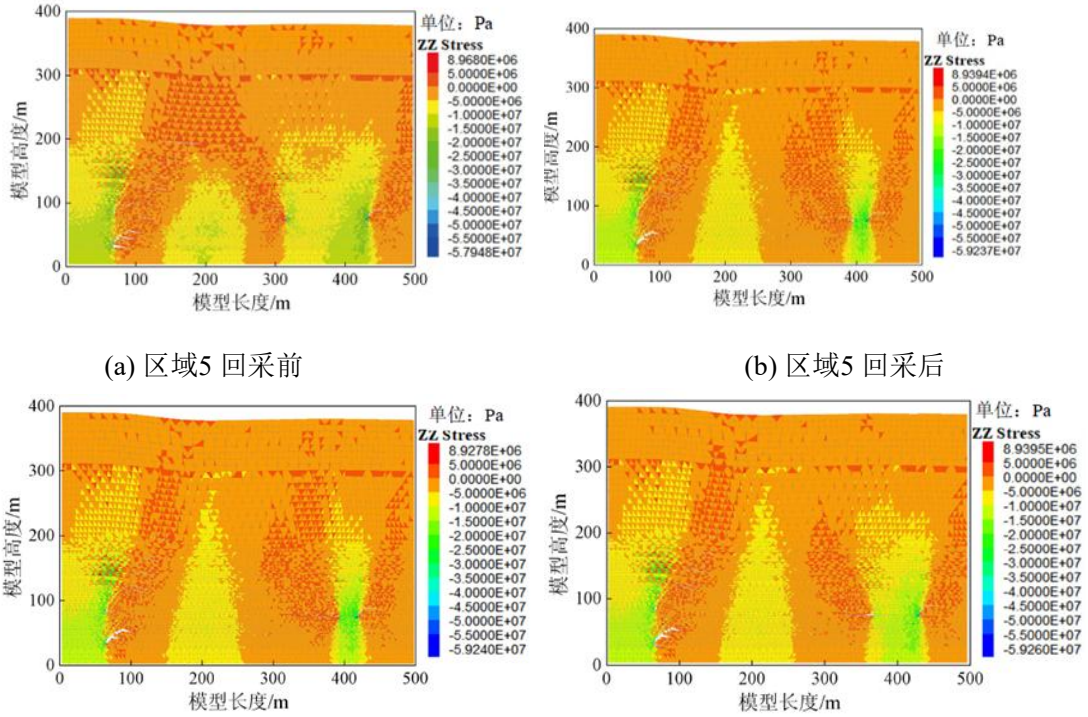


图 5-3 煤层底板双峰值应力演化趋势



(a) 区域5 回采前　　(b) 区域5 回采后

(c) 煤柱剩余33.6 m　　(d) 煤柱剩余28.0 m

图 5-4 覆岩应力分布特征

2.案例实际应用效果

采用 3DEC 数值模拟方法，在 B4–1 强冲击倾向性余煤复采过程中，分析底板双峰值应力确定煤柱最小安全距离 L。数值模拟分析底板应力验证了双峰值应力叠加效应的准确性。对双峰值应力区的煤柱最小安全距离 L、周期来压确定煤柱合理范围 L、冲击危险性指数确定煤柱合理范围 L 的综合分析得出：为确保近距离强冲击倾向性 B4–1 煤上行开采覆岩结构稳定的煤柱剩余尺寸为 39.2 m。研究结果为近距离强冲击倾向性煤层上行开采覆岩结构稳定性研究提供了科学指导。

基于教学与科研相互促进的视角，我们发现本案例的研究主题是基于教材基础知识的拓展和延伸，将其应用于实际场景，充分展示了岩层控制理论的具体实践。这一研究为矿

山压力与岩层控制理论的发展提供了宝贵的补充。案例内容在教学与科研之间形成了积极的互动，强调理论与实践的紧密结合，旨在帮助学生更好地理解和应用基础理论知识，并提高他们对实际场景的感知能力。

表 5-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定与建立	采用岩石力学试验结果及现场地层综合柱状图并且结合摩尔库伦准则对其进行一定程度的消减
2	大尺寸模型建模方法及边界条件设置	大尺寸模型需要对煤层以及顶底板网格进行进一步划分，且需要注意不同层位的节理划分

3.支撑材料

[1] 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(2): 282-286.

[2] 黄庆享,马龙涛,董博等. 大采高工作面等效直接顶与顶板结构研究[J]. 西安科技大学学报，2015(5):541-546+610.

[3] 黄庆享,刘文岗,田银素. 近浅埋煤层大采高矿压显现规律实测研究[J]. 矿山压力与顶板管理，2003(03):58-59+118.

应用证明

单位：万元

项目名称	浅埋煤层岩层控制理论与技术		
应用单位	陕煤集团神木张家峁矿业有限公司		
单位注册地址	陕西省神木县店塔镇张家峁矿业公司		
联系人	刘建浩	联系电话	0912-8028197
应用起止时间	2015年1月至2017年12月		

自然年	新增销售额	新增利润
2015 年	16957	5712
2016 年	19392	8845
2017 年	52564	33369
累 计	88913	47926

所列经济效益的有关说明及计算依据：

2015年总产量1116.0万吨，新增产量112.0万吨，吨煤平均价格151.4元，吨煤成本100.4元，吨煤利润51元，新增销售额16957万元，新增利润5712万元；

2016年总产量1071.8万吨，新增产量93.5万吨，吨煤平均价格207.4元，吨煤成本112.8元，吨煤利润94.6元，新增销售额19392万元，新增利润8845万元；

2017年总产量1185.2万吨，新增产量158.9万吨，吨煤平均价格330.8元，吨煤成本120.8元，吨煤利润210元，新增销售额52564万元，新增利润33369万元；

2015年~2017年累计新增销售额88913万元，累计新增利润47926万元。

具体应用情况：

张家峁井田位于神府矿区南区，地质储量 8.65 亿吨，生产能力 1000 万吨/年，可采煤层 7 层，其中厚煤层及中厚煤层 4 层，煤厚 2.8~6.5m，埋深 70~160 m，属于典型浅埋煤层。我公司应用"浅埋煤层开采岩层控制理论及其应用"成果，开展了大采高工作面支架选型与顶板控制技术、常家沟水库周边安全开采、区段煤柱合理留设等难题攻关，保障了矿井安全高产，取得了显著的经济效益。

2015 年~2017 年，应用浅埋煤层开采岩层控制理论确定了大采高工作面合理的支架选型与顶板控制技术，保障了大采高工作面安全高产，避免了压架停产事故，三年累计多回收煤炭 186.9 万吨。根据浅埋煤层隔水层稳定性判据优化了常家沟水库保护煤柱尺寸，减少了煤炭损失，2015 年~2017 年多采回收煤炭 149.6 万吨（若成果用于整个常家沟水库周边后可增加产量 457 万吨）。根据浅埋煤层顶板结构和压力规律，将大采高工作面区段煤柱宽度由 19.2m 优化为 17.45m 和 15.7m，每年平均增加产量 9.3 万吨，三年累计增加产量 27.9 万吨。2015 年~2017 年采煤科技进步累计多开采煤炭 364.4 万吨，累计新增利润 [illegible] 万元，实现了浅埋煤层的安全、高效、保水开采。

应用单位（盖章）：

财务专用章

[illegible]月13日

图 5-5 应用效益证明

第三部分：矿区动力灾害预防

一、科研项目基本信息

背景信息：本案例库在 2 项国家自然科学基金项目和 2 项企业合作项目资助下，针对西部矿区动力灾害预报与科学采矿问题开展了研究，出版专著 2 部，发表论文 40 余篇，其中代表性论文 10 篇，授权发明专利 8 项，实用新型专利 10 余项。依托的项目信息如表 1-1 所示。

表 1-1 案例依托科研项目背景信息一览

序号	项目来源	项目名称	项目编号
1	国家重点基础研究计划(973计划)前期专项	西部矿山多源动力学灾害发生演化机制与防控基础研究	2014CB260404
2	国家自然科学基金面上项目	深部煤岩采掘扰动诱发能量场展布异化致灾基础研究	51874231
3	国家能源集团新疆能源有限责任公司	急倾斜特厚煤层巷道防冲优化布置及煤岩体能量传导调控减灾预警技术研究	
4	神华新疆能源公司	神新能源公司急倾斜煤层动力学控制关键技术研究与示范	

成果名称：急倾斜煤层动力学灾害控制关键技术研究与示范

获奖情况：新疆维吾尔自治区科技进步一等奖

主 持 人：来兴平　崔峰

二、科研促进教学案例

新疆是国家规划建设的第 14 个高起点、高标准、高效益的亿吨级大型煤炭基地。随着东部煤炭资源的逐步枯竭，新疆正逐渐从战略资源储备区向生产区转变。新疆的煤炭资源预测储量占我国的 40%左右，我国西北赋煤区的倾斜和急倾斜煤层占到 60%左右，其中又以新疆为主(占比 61%)，近年来，随着开采深度的增加，急倾斜煤层表现出独特的动力学灾害。研究揭示煤岩灾害动力学机制，创建了急倾斜煤岩深部动力灾害时空多元预测体系，研发了以耦合致裂弱化为导向的急倾斜煤层动力灾害动态调控技术，形成了急倾斜煤层动力灾害防治与动态调控体系，建成急倾斜煤层动力学灾害防治示范矿井，对保障矿山深部安全开采与经济社会发展和整体稳定起到了重要的推动作用。。

本案例既是西安科技大学多年来聚焦西部大倾角煤层开采岩层控制问题的系统总结，又是对既有矿山压力与岩层控制课程内容的继承与丰富。

（一）案例 1：急倾斜采动煤岩损伤及运移规律

1.案例介绍

顶煤是综放采场支架与顶板间的唯一介质，其采动力学行为是“支架－围岩”系统稳定性的关键影响因素。在大倾角煤层长壁采场，这种影响作用尤为凸显。顶煤由初始状态至放出状态，实质上是内部裂隙发育扩展和强度劣化的渐进过程。早期的研究沿走向对这一

过程进行了区划，按照顶煤力学行为的演变划分为:“弹性区—极限平衡区—散体区”，这种划分方式反映了煤体在不同采动阶段的力学行为响应，但这 3 个阶段难以利用某种统一的“本构关系”进行表达，各区域的范围界限无法定量表征。随着连续介质损伤力学的发展，学者们对顶煤的破坏过程有了新的认识，即顶煤的渐进劣化是损伤不断累积的过程。同时，这种损伤累积的过程与顶煤经历的采动应力演化路径密切相关，不宜抛开采动应力的演化而单纯从材料的本征力学行为讨论。

基于连续介质损伤力学的基本观点，阐释采动过程中顶煤的损伤劣化过程，实现了对极限平衡状态界面处顶煤宏观损伤的表征。以长山子 1125 大倾角综放工作面为研究背景，系统研究不同“关键域”层位高度影响下大倾角综放采场顶煤的宏观等效损伤演化过程。结合理论分析与数值计算结果，界定顶煤极限平衡状态界面位置，可为大倾角综放采场顶煤支架关系评价提供参考依据。

（1）数值模拟参数的确定

由于倾斜方向“关键域”岩体结构形成层位受岩层性质和采空区非均匀充填所共同影响，现行的三维数值模拟软件难以在建模过程中还原这一“被动”过程。因此，考虑在三维的采动空间内截取倾斜方向不同位置“关键域”层位高度的走向截面逐一进行分析。UDEC 是一款基于离散元的数值分析软件，在分析煤层这类内部裂隙和弱面较发育的岩体移动变形问题具 有独特优势。以长山子煤矿 1125 大倾角综放工作面为研究背景建立数值模型，模型采用 Mohr-Coulomb 破坏准则，各岩层参数见表 1-1。

表 1-1 煤岩力学参数

序号	岩石名称	容重 /(kg*m^{-3})	体积模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	粘结力/MPa	内摩擦角 /(°)
1	粉砂岩	2520	4083	2.2	2.1	36
2	煤	1350	3250	2.2	2.2	28
3	炭质泥岩	2650	3642	1.8	5.6	37
4	泥岩	2500	4524	1.6	4	23
5	细砂岩	2710	6667	1.6	2.9	30
6	粗砂岩	2470	2103	1.2	1.9	25
7	砂岩	2600	4083	1.7	5	32
8	细砂岩	2710	4358	1.6	2.9	35
9	砾岩	2570	3650	1.8	3.1	33
10	粉砂岩	2350	2405	1.6	2.9	28

（2）数值模拟模型建立

在大倾角采场中“关键域”各层位岩层所起到的作用与近水平煤层中“关键层”的作用是一致的。由于要能够形成铰接结构以承担上覆岩层载荷，“关键域”各岩层应具有断裂步距大、厚度大、强度高的特征。“关键域”a 块位于细砂岩泥岩互层中，“关键域”b、c 块位于细砂岩的下分层，“关键域”d 块位于细砂岩的上分层，结合相似材料实验中“关键域”所在岩层的层理分布和工作面实测周期来压步距，设定“关键域”所在岩层的单元尺寸为：长为 16m、宽为 4m。为了更清晰的观察上覆岩层的垮落特征和运移规律，根据埋深深度由深到浅依次将其他岩层的单元尺寸划分为：长 2m、宽 1m；长 3m、宽 1m；长 4m、宽 1m。

模型 1-5，几何尺寸均为：长 200m,宽 100m，埋深分别为 236、246、260、268 和 274，考虑到模型 1 与模型 5“关键域”层位高度一致，且埋深的差距引起的上覆岩层载荷差异较小，可忽略不计。因此，5 个模型可简化为 4 个模型进行分析。各模型上边界设置为自由边界,底边界和两侧边界设置为固定边界，模型块体材料采用 Mohr-Coulomb 本构模型。数值模型建立如图 1-1 所示。

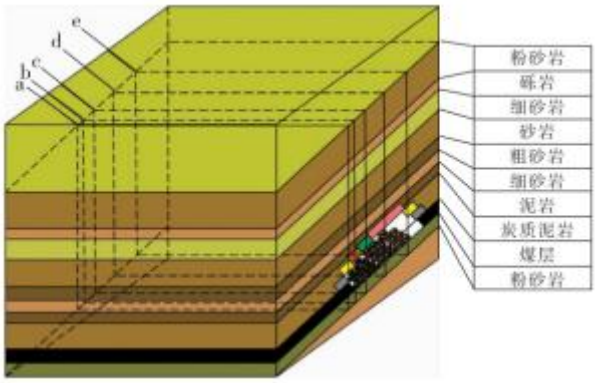


图1-1 数值模型建立

（3）不同“关键域”高度下顶煤的宏观等效损伤

在距煤壁前方 50m 处布置测点，测点距离底板高度为 4m，监测采动过程中顶煤的水平与垂直位移，并计算合位移，得到不同“关键域”层位高度下，顶煤位移随其距工作面煤壁距离的演化，如图 1-2 所示。

对顶煤宏观等效损伤变量的表述，要确定任意位置处顶煤的宏观等效损伤变量，须先确定顶煤放出时刻的位移。顶煤放出前后，其垂直方向的位移势必存在一个突然增大的过程，位移突增则代表着顶煤自由坠落的过程，因此顶煤垂直位移发生突增的起点位置即可认为是顶煤放出瞬时的位置。在 4 组相似模型中，“关键域”层位为 8，12，14，16 m 时，顶煤垂直位移发生突变的节点分别为:SVL=0.792，1.042，1.041 和 0.866 m;对应的水平位移分别为:ShL=0.771，0.737，0.865 和 0.846m，各“关键域”层位高度下的顶煤放出前最终位移平均值 SF 约 1.13m。将各时刻顶煤的位移瞬时位移与顶煤放出前的最终位移 SF 进行计算，可得不同“关键域”层位高度条件宏观等效损伤变量的演化特征，如图 1-3 所示。

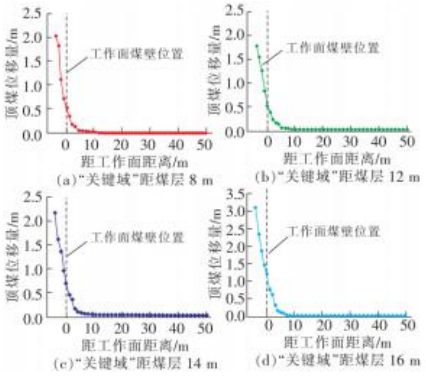


图1-2 不同“关键域”层位下顶煤位移演化

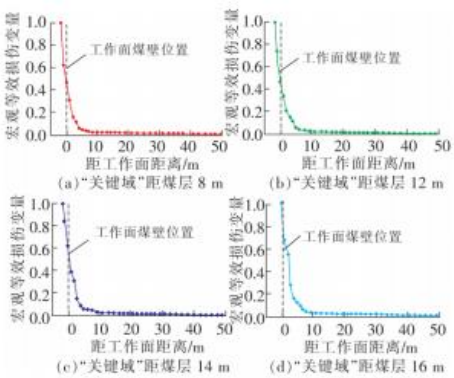


图1-3 不同“关键域”层位下宏观等效损伤变量

2.案例实际应用效果

基于连续介质损伤力学观点，对采动过程顶煤的应力边界条件演化和裂隙发育过程进行了合理的简化与假设，采用考虑到损伤的广义虎克定理和 Hoek-Brown 岩体经验强度准则，给定了顶煤极限平衡状态界面位置处顶煤损伤的表征方法。考虑到煤体本身损伤过程是一个难于监测统计的“黑箱”问题，提出了用顶煤瞬时位移与最终位移之比描述宏观等效损伤的方法，实现了对采动作用下煤体损伤过程的量化描述。以长山子煤矿 1125 大倾角综放工作面为背景，通过物理相似材料模拟实验确定了工作面倾斜方向覆岩内“关键域”层位的分布情况，并通过 UDEC 数值分析揭示了不同“关键域”层位高度控制作用下顶煤宏观等效损伤演化过程。

从教学科研互补的角度来看，以长山子 1125 大倾角综放工作面为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了不同“关键域”高度下顶煤的宏观等效损伤及运移规律。增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 1-2 所示。

表 1-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果
2	数值模拟模型建立	各模型上边界设置为自由边界,底边界和两侧边界设置为固定边界
3	不同“关键域”高度下顶煤的宏观等效损伤	合理布置测点，监测采动过程并计算位移

3.支撑材料

[1] 伍永平,解盘石,任世广.大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析［J］.煤炭学报,2010,35(2):182－184.

[2] 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(1):24-34.

[3] 解盘石,伍永平,罗生虎等．大倾角大采高采场倾向梯阶结构演化及稳定性分析［J］．采矿与安全工程学报，2018，35(5):953－959.


973 计划前期研究专项
课题任务书
项目名称 能源开发利用及工业过程节能中的科学问题研究
课题编号 2014CB360404
课题名称 西部矿山多震动力灾害发生演化机制与防控基础研究
中华人民共和国科学技术部制
2014 年 09 月 27 日
现场应用证明

“973”前期研究专项任务书



科研成果应用证明

（二）案例 2：急斜特厚煤层群开采动力灾害发生机理

1.案例介绍

乌鲁木齐矿区急斜特厚煤层占世界急倾斜煤层储量的 30%，煤层倾角 45°～87°，煤层赋存环境复杂多变，其开采工艺与近水平煤层相差甚大，动力灾害频发。随采深的增加，历史残留煤柱顶底板区域应力集中明显，严重影响邻近煤层和残留煤柱下分段煤层的安全高效开采。以乌鲁木齐矿区南采区 87°特厚煤层为工程背景，通过理论分析、数值模拟对残留煤柱的滑移失稳以及应力演化特征进行研究，提出了分段深孔爆破的卸压措施，有效降低了动力灾害的发生频率。

（1）数值模拟参数的确定

为了获得随+495 水平 B3+6 煤层回采穿过残留煤柱时，残留煤柱的应力演化特征，采用 FLAC3D 数值模拟软件进行模拟计算与分析，通过 室内岩石力学实验获得煤岩体力学参数见表 2-1。

表 2-1 煤岩体力学参数

名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	容重/(kg*m^{-3})
煤层	2.70	1.79	0.63	0.72	30.00	12.60
直接底	7.96	3.83	1.41	3.33	26.70	20.08
老底	8.30	4.10	2.31	3.50	36.33	24.83
直接顶	7.96	3.83	1.41	3.33	26.70	20.08
老顶	8.30	4.10	2.31	3.50	36.33	24.83
采空区充填体	0.80	0.27	0.21	0.50	38.00	17.00
岩柱	8.30	4.10	2.31	3.50	36.33	24.83

（2）数值模拟模型建立

+495 水平 B3+6 煤层倾角为 87°，B3+6 煤层厚度为 40m，B1+2 煤层厚度为 30m，直接顶、直接底厚度为 8m，残留煤柱高为 86m，层间岩柱厚度为 50m，模型尺寸为 246m×50m×250m(X×Y×Z)，根据现场取样及岩体力学特性，选用摩尔－库伦本构模型，沿 Y 方向推进。在 X 方向施加梯度水平应力模拟构造应力对顶底板及煤层的压力析，模型如图 2-1 所示。

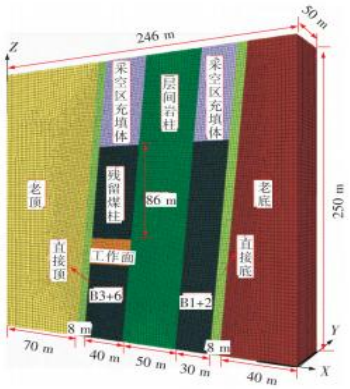
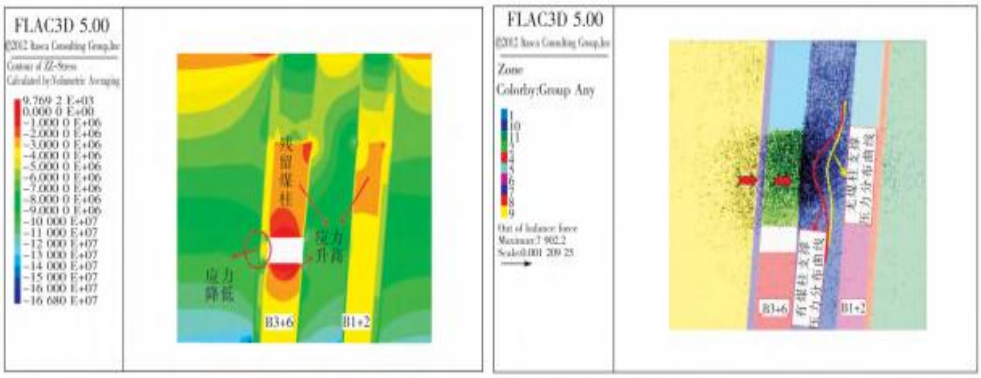


图2-1 数值计算模型

（3）残留煤柱应力场分布特征

图 2-2 为+495 水平 B3+6 煤层回采穿过残留煤柱时，残留煤柱垂直应力与应力分布矢量特征。从图 2-2(a)可以看出，随+495 水平 B3+6 煤层工作面的推进，残留煤柱、B1+2 煤层局部区域在垂直方向上都出现了明显的应力升高特征;随工作面的走向推进，残留煤柱悬空面积会随之增大，将会促使残留煤柱下方未采煤体应力集中程度进一步增大;当残留煤柱在垂直方向上的应力超过其承载能力时，将会发生剪切滑移破坏，从而诱发动力灾害;残留煤柱的存在致使+495 水平 B3+6 煤层工作面顶板相对于残留煤柱呈现出应力降低特征，顶板不易发生变形，易形成悬空顶板，当悬空顶板突然垮落时，将诱发动力灾害。从图 2-2(b)可以看出，残留煤柱将 B3+6 煤层上覆岩层的作用力传递到了层间岩柱上，即 B1+2 煤层的顶板上，使得 B1+2 煤层顶板处局部范围内出现应力集中现象，应力强度显著增大。残留煤柱不仅对+495 水平以及+495 水平以下 B3+6 煤层的安全开采有重要影响，还对邻近 B1+2 煤层的安全高效开采产生重要影响。因此，必须有效削减残留煤柱储存的应力强度，进而实现安全高效生产。



（a）垂直应力分布特征　　（b）应力分布矢量特征

图 2-2 覆岩结构特征

2.案例实际应用效果

本案例分析了急斜特厚煤层残留煤柱稳定性及其动力灾害防治。以乌鲁木齐矿区南采区 87°特厚煤层为工程背景，通过理论分析、数值模拟对残留煤柱的滑移失稳以及应力演化特征进行研究，提出分段深孔爆破的卸压措施，有效降低动力灾害的发生频率。运用块体理论构建了残留煤柱滑移失稳力学模型，得出当作用在残留煤柱沿倾向向下的合力大于顶底板对其摩擦力的合力时，残留煤柱将发生滑移失稳，从而诱发动力灾害，并获得了残留煤柱滑移失稳的必要条件。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以急斜特厚煤层群开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了急斜特厚煤层群开采动力灾害发生机理，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 2-2 所示。

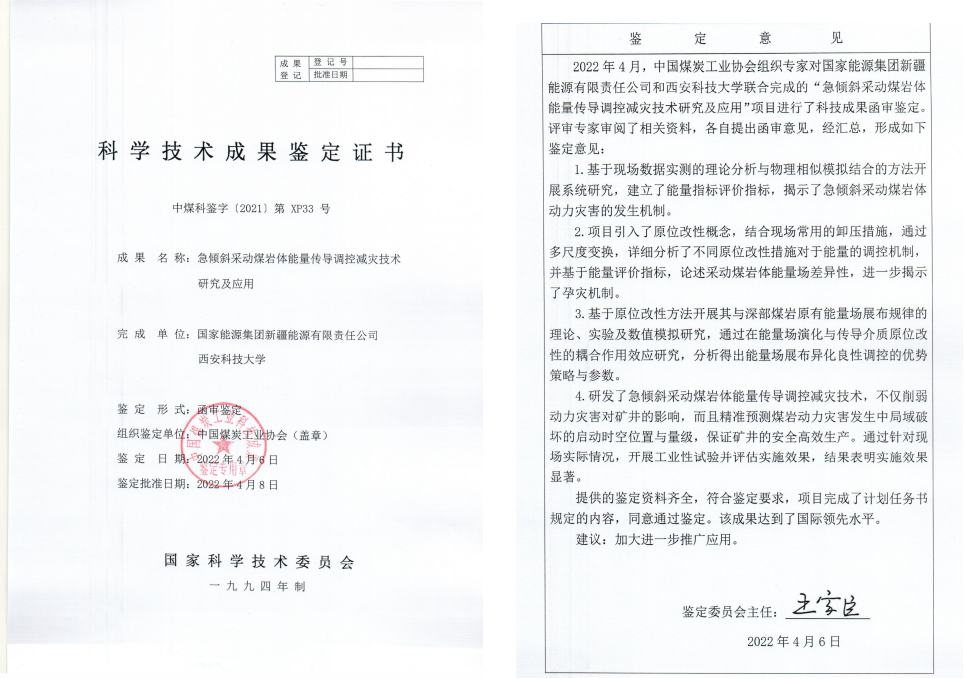
表 2-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果
2	数值模拟模型建立	在 X 方向施加梯度水平应力模拟构造应力对顶底板及煤层的压力
3	残留煤柱应力场分布特征	通过调用模型应力分布云图，分析总结应力场分布特征

3.支撑材料

［1］来兴平,李云鹏,王宁波等．基于梁结构的急斜煤层 综放工作面顶板变形特征［J］．采矿与安全工程学报，2015，32(6):871－876.

［2］曹建涛,来兴平,崔峰等．急斜特厚煤层开采扰动区(MDZ)煤岩体动力学变形失稳过程分析［J］．西安科技大学学报，2015，35(4):397－402.



成果登记 登记号 / 批准日期

科学技术成果鉴定证书

中煤科鉴字〔2021〕第 XP33 号

成果名称：急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术研究及应用

完成单位：国家能源集团新疆能源有限责任公司
西安科技大学

鉴定形式：函审鉴定

组织鉴定单位：中国煤炭工业协会（盖章）

鉴定日期：2022 年 4 月 6 日

鉴定批准日期：2022 年 4 月 8 日

国家科学技术委员会

一九九四年制

鉴　定　意　见

2022 年 4 月，中国煤炭工业协会组织专家对国家能源集团新疆能源有限责任公司和西安科技大学联合完成的“急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术研究及应用”项目进行了科技成果函审鉴定。评审专家审阅了相关资料，各自提出函审意见，经汇总，形成如下鉴定意见：

1.基于现场数据实测的理论分析与物理相似模拟结合的方法开展系统研究，建立了能量指标评价指标，揭示了急倾斜采动煤岩体动力灾害的发生机制。

2.项目引入了原位改性概念，结合现场常用的卸压措施，通过多尺度变换，详细分析了不同原位改性措施对于能量的调控机制，并基于能量评价指标，论述采动煤岩体能量场差异性，进一步揭示了孕灾机制。

3.基于原位改性方法开展其与深部煤岩原有能量场展布规律的理论、实验及数值模拟研究，通过在能量场演化与传导介质原位改性的耦合作用效应研究，分析得出能量场展布异化良性调控的优势策略与参数。

4.研发了急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术，不仅削弱动力灾害对矿井的影响，而且精准预测煤岩动力灾害发生中局域破坏的启动时空位置与量级，保证矿井的安全高效生产。通过针对现场实际情况，开展工业性试验并评估实施效果，结果表明实施效果显著。

提供的鉴定资料齐全，符合鉴定要求，项目完成了计划任务书规定的内容，同意通过鉴定。该成果达到了国际领先水平。

建议：加大进一步推广应用。

鉴定委员会主任：王家臣

2022 年 4 月 6 日

图 2-3 科技成果鉴定

（三）案例 3：冲击倾向性煤样破坏特征分析

1.案例介绍

岩体强度是岩体力学中的重要内容之一，该问题与地下工程中的生产实际有着十分密切的联系，其中岩体稳定性和动力现象问题都直接或间接的与岩体强度有关。在采矿工程中，大倾角煤层因埋藏条件特殊而开采难度高于近水平煤层，受煤层倾角影响，其矿压显现规律和围岩应力展布形态具有典型的非对称特征。随着工作面推进，该类倾斜煤层工作面前方煤岩组合体在不同的应力状态会引发煤岩组合体不同的失稳破坏形式。

（1）煤岩组合体模拟参数的确定

先采用石英砂为骨料，以水泥和石膏为胶结材料开展混凝土试样的配比试验研究，在结果中选取与煤、岩性质相似的混凝土配比。通过试验研究，选用 C325 水泥、70~140 目石英砂、石膏和水为原材料，最终确定煤的质量配比为水泥、石膏、河沙、水配比为 1∶0.45∶0.8∶0.45，岩的质量配比为水泥、石膏、河沙、水配比为 1∶0∶1.2∶0.35。将两者分层浇筑至模具中，经 28d 的养护后两者自然粘合，使用取心机取心后在岩石切割机上以不同倾角进行切割、打磨最终为 5cm×10cm(ø×h)的标准试件。单一煤、岩试件物理力学参数如表 3-1 所示。

表 3-1 单一煤、岩试件物理力学参数

材料属性	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	材料密度/(kg/m³)	材料属性
煤	1.47	0.28	13.37	3.93	31.85	1350	煤
岩	4.90	0.22	54.62	5.79	46.03	2530	岩

（2）数值模拟模型建立

煤岩组合体交界面在不同倾角时具有不同的破坏特征，而相同条件下不同倾角时煤岩组合体交界面应力状态的改变是导致其强度不同的主要原因 。鉴于数值模拟具有可重复性，应进一步模拟煤岩组合体在单轴加载条件下处于初始破坏前弹性阶段的平衡状态下分析内部主应力状态的演变特征对其强度的影响。根据实际情况，确定最终模型如下：采用岩和煤 2 种岩石组成的圆柱体模型为本次数值模拟的试件形状，模型尺寸为 5 cm×10 cm(ø×h)。模型坐标原点位于试件几何中心，亦是煤岩交界面中心，以原点为基准点，交界面绕 x 轴转过的倾角为 α 。不同倾角下节点数与单元数模型信息见表 3-2。数值模型建立如图 3-1 所示。

界面倾角/(°)	o×h/(cm×cm)	节点数	单元数
0	5×10	37262	36000
15	5×10	39658	36476
30	5×10	42018	36492
45	5×10	44770	36492
60	5×10	48038	36452

表 3-2 模型信息

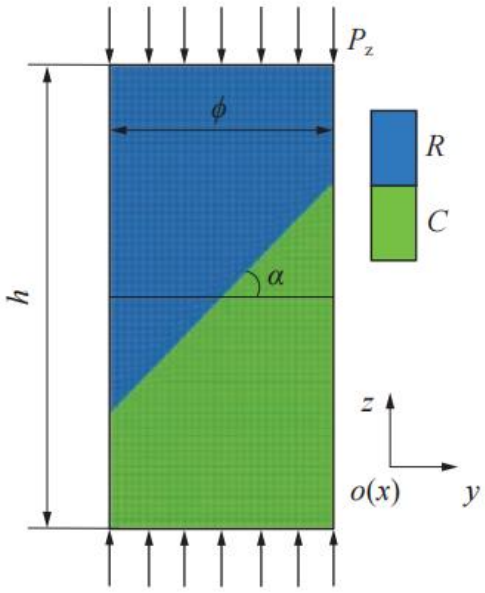


图 3-1 数值模型建立

（3）主应力展布形态与演化规律

图 3-2 为交界面在不同倾角下煤岩组合体受载变形后第 1 主应力大小演化分布云图，分析可知，当倾角为 0°时，由于煤岩物理力学性质差异，导致岩体受岩体的拉约束作用，其交界面部分的第 1 主应力为拉应力；而在煤体受到岩体的压约束作用，导致其交界面部分的第 1 主应力为压应力。随着倾角从 0°增加至 30°过程中，煤岩组合体交界面处的约束形式不变但约束程度开始降低。当层面倾角从 30°增大至 45°时，交界面处岩体由受拉状态转为受压状态，煤体反而由受压状态转为受拉状态。随着层面倾角由 45°继续增大，煤岩组合体交界面处的约束作用经历转变后开始增大，交界面处岩体第 1 主应力为压应力，煤体第 1 主应力为拉应力，影响范围由交界面中部向两端转移。

可以看出，在倾角为 0°时，界面约束影响范围呈拱形分布，岩体交界面处第 1 主应力极值为 0.25 MPa,处于拉应力状态；煤体交界面处第 1 主应力极值为 0.19 MPa,处于压应力状态。当层面倾角开始增大时，交界面两侧第 1 主应力极值开始降低，倾角增大至 30°时，岩体交界面处第 1 主应力极值降低了 0.21 MPa,煤体交界面处第 1 主应力极值降低了 0.17 MPa。在层面倾角从 30°增大至 45°过程中，煤岩组合体交界面处的约束形式发生转变，岩体的第 1 主应力极值由 0.04 MPa 的拉应力转变为 0.1 MPa 的压应力，煤体的第 1 主应力极值由 0.03MPa 的压应力转变为 0.1 MPa 的拉应力。随着层面倾角继续增大，交界面两侧的第 1 主应力极值呈增大趋势，在倾角为 60°时的岩体第 1 主应力极值为 0.12 MPa,极值位置处于界面中上部，煤体第 1 主应力极值为 0.15 MPa,极值位置处于界面中下部。

由上述结果分析可知，煤岩组合体交界面第 1 主应力分布存在 2 种状态，由岩体的拉应力和煤体的压应力状态转变为岩体的压应力和煤体的拉应力状态。当层面倾角小于主应力转变的临界倾角时，界面法向压力产生的界面约束作用较大，在交界面处煤体对岩体产生拉约束作用，岩体对煤体存在压约束作用。当层面倾角大于转变的临界倾角时，界面切向应力产生的界面约束作用较大，在交界面处煤体对岩体产生压约束作用，岩体对煤体存在拉约束作用。

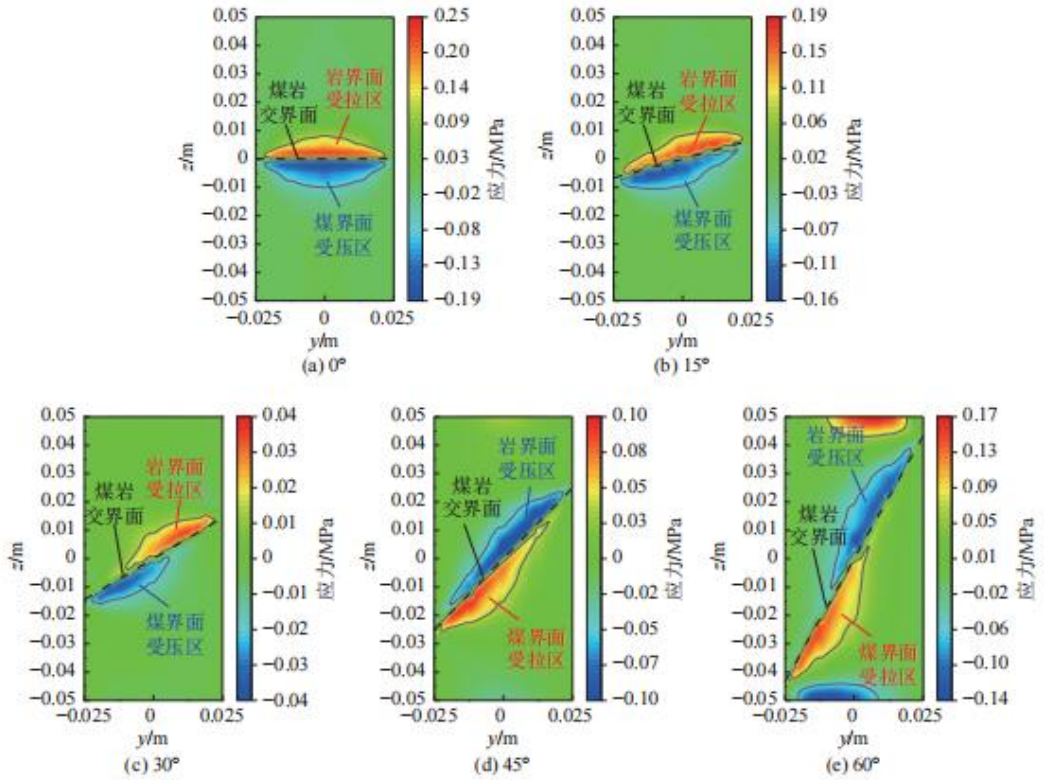


图 3-2 10m 不同倾角下第 1 主应力展布形态与演化特征

2.案例实际应用效果

倾角从 0°至 60°的增大过程中，煤岩组合体的第 1 主应力由“煤体受压+岩体受拉”状态转变为“煤体受拉+岩体受压”状态，第 1 主应力大小呈现先减小后增大的趋势。为研究不同倾角煤岩组合体应力传递与受载破坏特征，利用岩石力学试验与数值模拟分析了不同倾角条件下煤岩组合体变形破坏规律以及交界面处主应力大小渐变方向偏转演变规律，基于层状岩体破坏理论建立了单轴压缩条件下倾斜煤岩组合体力学模型，探究了不同倾角煤岩组合体界面应力非均衡传递规律及其强度特征，研究结果对于大倾角煤层安全高效开采具有一定的理论参考意义。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以煤岩组合体破坏为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了不同倾角煤岩组合体界面应力非均衡传递规律及其强度特征规律，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 3-3 所示。

表 3-3 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	数值模拟参数选定	采用岩石力学试验结果
2	数值模拟模型建立	采用岩和煤 2 种岩石组成的圆柱体模型为数值模拟的试件形状
3	主应力展布形态与演化规律	通过调用模型位移云图，分析总结应力演化规律

3.支撑材料

［1］伍永平,负东风,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（1）：24−34.

［2］罗生虎,田程阳,伍永平等.大倾角煤层长壁开采顶板受载与变形破 坏倾角效应[J].中国矿业大学学报，2021，50（6）：1041−1050.

（四）案例 4：急斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定

1.案例介绍

超前预爆破是急斜煤层(群) 水平分段综放开采顶煤有效破碎与高效开采技术之一。乌鲁木齐矿区急斜煤层赋存丰富，煤层倾角大(平均 86. 5°) ，工作面较短，顶煤损伤、变形和破坏规律复杂，具有明显的非对称和局部化特征。已有学者对综放工作面的应力、变形和破坏特征进行了深入研究。与长壁开采相比，急斜煤层工作面较短，水平分段综放开采顶煤应力分布与变形区域划定是实施超前预爆的关键指标。以乌鲁木齐矿区碱沟煤矿急倾斜煤层+ 564 mB_{3_6}综放工作面开采为背景，基于开采条件分析，现场监测，分析了不同推进度与采动影响下煤体应力分布规律，为现场危险源辨识与安全生产提供了依据。

（1）大倾角煤层采场数值模拟参数的确定

根据乌鲁木齐矿区碱沟煤矿地质资料和实验室岩石力学实验结果，同时考虑到岩层节理裂隙的影响，岩石力学参数根据试验所得结果进行有限元强度折减，得出煤层及主要岩层物理力学参数，见表 4-1。与长壁开采相比，急斜煤层工作面较短，水平分段综放开采顶煤应力分布与变形区域划定是实施超前预爆的关键指标。以乌鲁木齐矿区碱沟煤矿+564mB3－6 综放工作面开采为背景，基于开采条件分析，现场监测，分析了不同推进度与采动影响下煤体应力分布规律，为现场危险源辨识与安全生产提供了依据。

表 4-1 煤岩力学参数

序号	岩石名称	容重 (kg/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (°)
1	4#煤层基本顶	2675	0.12×10^4	0.31	0.9	1.0	25
2	4#煤层直接顶	2710	1.4×10^4	0.24	2.0	1.8	31
3	4#煤层	1350	0.3×10^4	0.30	1.0	1.6	28
4	4#煤层直接底	2492	2.0×10^4	0.21	1.8	3.1	35
5	4#煤层基本底	2695	2.0×10^4	0.24	1.6	2.9	30

（2）数值模拟模型建立

以乌鲁木齐矿区碱沟煤矿+564mB3－6 综放工作面开采为背景，基于开采条件分析，现场监测，建立数值模型。

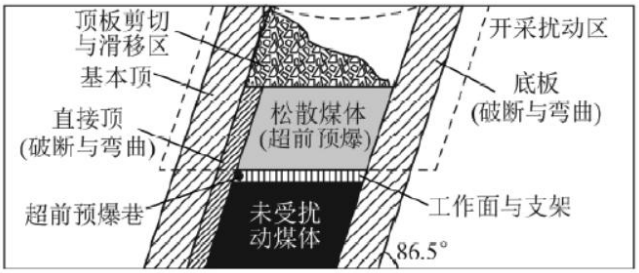


图 4-1 急斜煤层开采扰动区结构特征

（3）急斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定

数值计算表明:急斜特厚煤层工作面较短，水平分段综放工作面应力集中更接近煤壁。由于基本顶破断后大范围下沉，应力分布范围变窄，压力峰值向工作面内移，在煤壁前方5.4 m达到最大。进风巷和回风巷自底板起1.6 m处应力较3.2 m处大，进风巷应力较回风巷大0.5 MPa。在推进初期，进风巷与回风巷应力分别在超前3.2 m与1.8 m处趋于平衡，最终在工作面前方5.4 m处达到稳态。综合比较表明，现场实测应力动态变化规律与数值计算和物理相似模拟结果基本吻合(图4-2)。

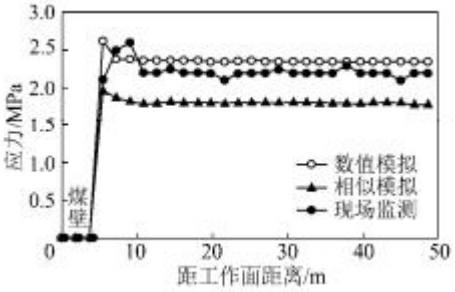


图4-2 应力分布综合比较

（4）急倾斜特厚煤层水平分段综放顶煤超前预裂爆破工程实践

急倾斜特厚煤层水平分段综放顶煤超前预裂爆破顶煤工艺工业性试验确定了超前预爆炸药、钻机及封孔设备，+564$B_{3\text{-}6}$工作面超前预爆破实施方案见图4-3所示。由B3轨道巷向B6胶带运输机巷垂直于煤层走向布置ϕ110mm单向扇形顶煤松动爆破孔，每组钻孔为8个，分两排施工每排4个炮孔，组内每排炮眼排距4米，每组间距8米，贯穿整个煤层，贯穿整个煤层，实施单组孔超前预爆破。

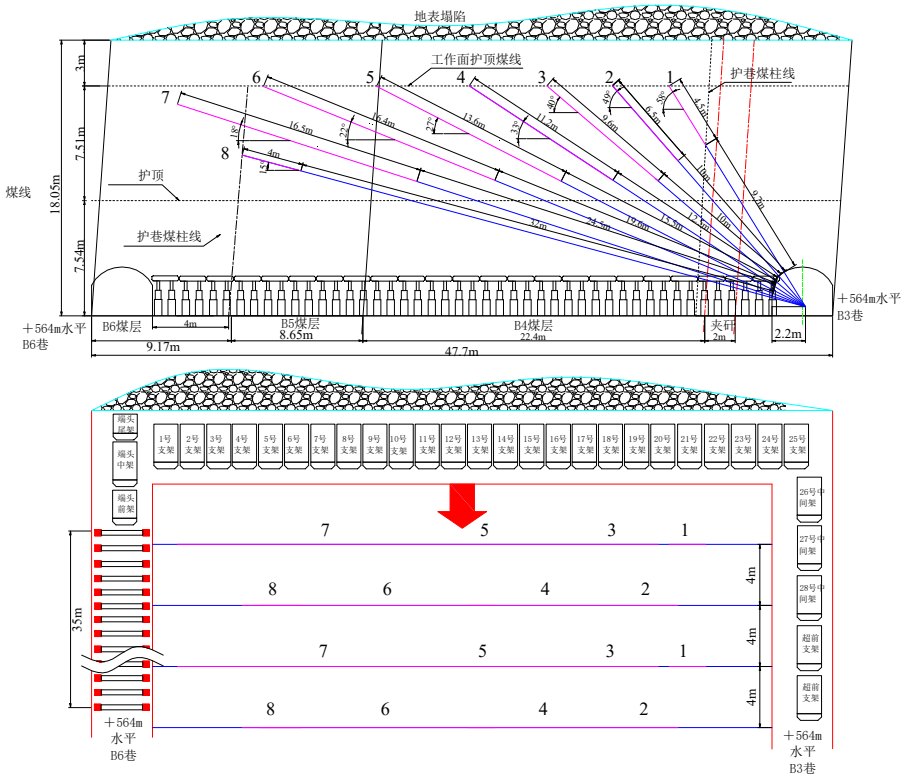


图4-3　超前预爆布置相关参数

炸药选用：乳胶基质与敏化剂两种化工材料配合制成的混合炸药。在两种材料混合之前，为化工材料，均不属于火工品，解决了运输、使用的安全管理问题。

设备选用：打眼采用 ZDY-800 型钻机，该钻机扭矩大，钻孔钻进、退钻速度快，大大提高了钻孔效率；装药采用 BCJ－5 型装药机正向装药，BQF-100 封孔器封孔，封孔材料选用黄泥，封孔长度不少于 8 m。大大提高了装药、封孔质量以及速度。

爆破孔间距：根据 B3~B4 煤体单组炮眼爆破工艺总结确定炮眼的排距为 8 m，间距为 4 m，工作面护顶煤厚 4.3 m。北巷护巷煤柱定为 4 m，南巷定为 5 m。

装药结构：采用 BCJ-5 型装药机正向装药，每个炮孔装 4 发雷管，引药雷管线采用并联方式连接。封孔材料选用黄泥。

爆破后的顶煤松动实测表明，顶煤松动圈范围为 3.9 m。顶板与底板位移变化梯度较小，锚杆与锚索支护区域内位移不显著。爆破弱化后，煤体位移中央大，两侧小。在工作面超前预爆范围内采用端头支架等措施，超前预爆破控制范围为 10.0~35.0 m，支护距离在 0~45.0 m，实现了安全开采，最高日产达 6 000 t，经济与安全效益显著。

2.案例实际应用效果

本案例通过研究急斜特厚煤层(群)短壁工作面水平分段综放开采过程中，顶煤损伤、变形和破坏规律，分析易诱发动力失稳与灾害的原因。为现场超前支护距离定量确定提供了依据，实现安全开采。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以急斜煤层(群)水平分段开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了急斜煤层(群)水平分段开采过程中顶煤损伤、变形和破坏规律，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。

在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 4-2 所示。

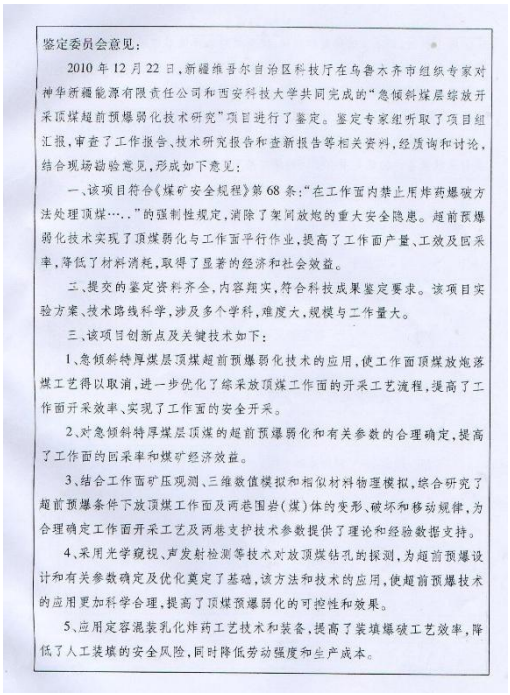
表 4-2 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	爆破参数选定	实践应用场景代入
2	采动模型动力分析	现场实测应力动态变化规律与数值计算和物理相似模拟结果对比

3.支撑材料

［1］来兴平,胡开江,郭秉超等．碱沟煤矿急倾斜煤层(群)综放开采顶煤超前预爆弱化技术［R］．西安科技大学，神华新疆能源有限责任公司，2010.

［2］来兴平,伍永平,张坤等．多场耦合下急斜煤层开采三维物理模拟［J］．西安科技大学学报，2009，29(6):654－660.



鉴定委员会意见：

2010年12月22日，新疆维吾尔自治区科技厅在乌鲁木齐市组织专家对神华新疆能源有限责任公司和西安科技大学共同完成的“急倾斜煤层综放开采顶煤超前预爆弱化技术研究”项目进行了鉴定。鉴定专家组听取了项目组汇报，审查了工作报告、技术研究报告和查新报告等相关资料，经质询和讨论，结合现场勘验意见，形成如下意见：

一、该项目符合《煤矿安全规程》第68条：“在工作面内禁止用炸药爆破方法处理顶煤……”的强制性规定，消除了架间放炮的重大安全隐患。超前预爆弱化技术实现了顶煤弱化与工作面平行作业，提高了工作面产量、工效及回采率，降低了材料消耗，取得了显著的经济和社会效益。

二、提交的鉴定资料齐全，内容翔实，符合科技成果鉴定要求。该项目实验方案、技术路线科学，涉及多个学科，难度大，规模与工作量大。

三、该项目创新点及关键技术如下：

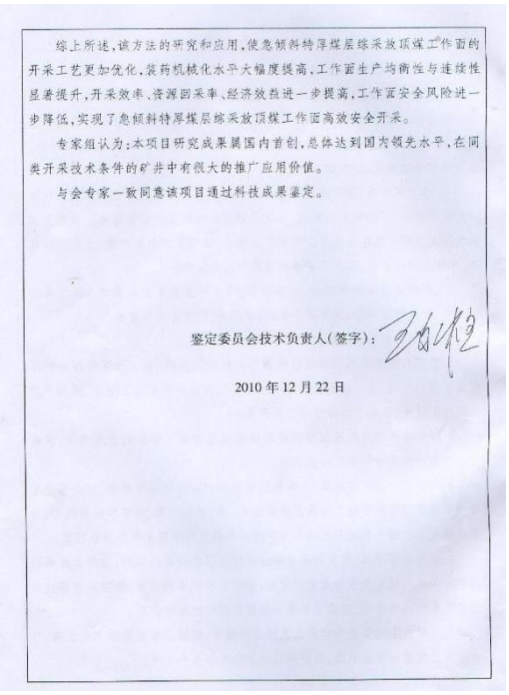
1、急倾斜特厚煤层顶煤超前预爆弱化技术的应用，使工作面顶煤放炮落煤工艺得以取消，进一步优化了综采放顶煤工作面的开采工艺流程，提高了工作面开采效率、实现了工作面的安全开采。

2、对急倾斜特厚煤层顶煤的超前预爆弱化和有关参数的合理确定，提高了工作面的回采率和煤矿经济效益。

3、结合工作面矿压观测、三维数值模拟和相似材料物理模拟，综合研究了超前预爆条件下放顶煤工作面及两巷围岩（煤）体的变形、破坏和移动规律，为合理确定工作面开采工艺及两巷支护技术参数提供了理论和经验数据支持。

4、采用光学窥视、声发射检测等技术对放顶煤钻孔的探测，为超前预爆设计和有关参数确定及优化奠定了基础，该方法和技术的应用，使超前预爆技术的应用更加科学合理，提高了顶煤预爆弱化的可控性和效果。

5、应用定容混装乳化炸药工艺技术和装备，提高了装填爆破工艺效率，降低了人工装填的安全风险，同时降低劳动强度和生产成本。



综上所述，该方法的研究和应用，使急倾斜特厚煤层综采放顶煤工作面的开采工艺更加优化、装药机械化水平大幅度提高，工作面生产均衡性与连续性显著提升，开采效率、资源回采率、经济效益进一步提高，工作面安全风险进一步降低，实现了急倾斜特厚煤层综采放顶煤工作面高效安全开采。

专家组认为：本项目研究成果属国内首创，总体达到国内领先水平，在同类开采技术条件的矿井中有很大的推广应用价值。

与会专家一致同意该项目通过科技成果鉴定。

鉴定委员会技术负责人（签字）：

2010年12月22日

图 4-4　成果鉴定

（五）案例 5：急倾斜煤层顶煤冒放性及瓦斯运移分析

1.案例介绍

苇湖梁煤矿属于低瓦斯矿井，+579E2EB1+2 急倾斜煤层(64～69°)高阶段综放面沿 B1+2 煤层不同的走向长度范围赋存有阶段高度分别为 52 m,102 m,18 m 的煤体，在 52 m 高阶段开采过程中，采空区多次出现大范围动力坍塌，并将空区内有害气体挤入工作面造成伤人现象。煤层注水是特厚煤层放顶煤开采中提高煤体可放性和防治顶板或顶煤产生动力学失稳首选措施。在教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室（依托单位为西安科技大学），研究急倾斜特厚煤层大段高综放工作面的顶煤在采动过程中“顶煤层-水-瓦斯”(固-液-气体)三相介质运动演化、耦合作用及迁移规律，重点分析工作面以及采空区瓦斯分布变化规律，为现场进行瓦斯灾害的防治提供技术参数依据，本质上遏制并有效解决了提高水平分段高度后是否可能导致瓦斯积聚而形成新的“爆炸源”的问题。

（1）工作面初采阶段气体浓度分布

工作面初采期间，在上覆煤层跨落后，根据纯 N_2 作为指标性气体的性质，从表 5-1 可以看出，在靠近工作面回风侧的采空区内，指标性气体浓度含量高，反映了工作面在初采阶段的瓦斯浓度分布特征。测定的气体浓度分布情况见表 5-1 所示。

表 5-1 工作面初采(首次跨落)阶段的气体浓度

测点编号	距离地板高度(cm)	O_2浓度(%)	纯 N_2浓度(%)
3#测孔	3	19.4	7.2
2#测孔	3	20.3	2.9
4#测孔	13	18.5	11.5
5#测孔	13	20.4	2.4

（2）工作面放顶煤阶段气体浓度分布

在工作面开采放顶煤期间，上部煤层垮落后的采空区域增加，根据纯 N_2 作为指标性气体的性质，从表 5-2 可以看出，在工作面支架上部放顶煤之后，靠近工作面部位的指标气体(纯 N_2)浓度比远离工作部位的指标气体浓度低。测定的气体浓度分布情况见表 5-2 所示。

表 5-2 工作面放顶煤阶段的气体浓度

测点编号	距离地板高度(cm)	O_2浓度(%)	纯 N_2浓度(%)
3#测孔	3	19.6	6.2
2#测孔	3	19.7	5.7
4#测孔	13	17.4	16.7
5#测孔	13	18.9	9.6
9#测孔	23	16.5	21.1
8#测孔	23	17.2	17.7

（3）工作面顶板冒落阶段气体浓度分布

在工作面开采到上覆岩层顶板跨落期间，除了上部煤层跨落后的采空区域增加之外，煤层顶板围岩受到破坏，由表 5-3 给出的实验数据统计对比可见，指标气体浓度分布情况是，在工作面（3#和 2#测孔）和上覆岩层附近（9#和 8#测孔）的区域，纯 N_2 浓度要比中间区域（5#和 4#测孔）的浓度低，反映了涌出气体仍然聚集在遗煤多的地方。由于上覆岩层跨落，出现了漏风通道，所以导致实验中所测定的指标气体浓度比上述两种情况下的浓度数值偏低。测定的气体浓度分布情况见表 5-3 所示。

表 5-3 工作面放顶煤阶段的气体浓度

测点编号	距离地板高度(cm)	O_2 浓度(%)	纯 N_2 浓度(%)
3#测孔	3	19.9	4.8
2#测孔	3	20.6	1.4
4#测孔	13	19.5	6.7
5#测孔	13	19.8	5.3
9#测孔	23	20.2	3.4
8#测孔	23	20.5	1.9

①数值模拟参数的确定

根据前面实验基本参数以及实验得出的气体浓度分布与采空区垂直距离的关系，采用数值计算软件(Flunt)，来对苇湖梁煤矿采空区瓦斯气体的实际情况进行模拟研究。

②数值模拟模型建立

基本开采条件，模型采用现场煤层赋存的实际数据，即在+750 m 水平所开采的 B1+2 煤，每层厚 33 m，煤层平均倾角 65°；煤层开采方法为综采放顶煤，其中，采高 2.5 m，放顶 17.5 m。模拟计算采用二维模式，如图 5-1 所示。通风边界条件，工作面风量为 402 m^3/min，端面积：7.88 m^2，风速 0.82 m/s；按此计算，工作面两端头通风阻力 1.16 Pa。采空区瓦斯初始状态下浓度为 100%，不考虑煤层自燃所引起的煤体内能变化，同时，按照现场瓦斯管理的要求，在工作面回风侧（工作面上隅角）瓦斯浓度为 0.8%，以此作为工作面边界基本条件。其他边界条件，在煤层顶、底板不考虑传质传热要素，工作面风流的空气组分：O_2 为 20.9%，N_2 为 79.1%。对于煤层顶端（露头端），不考虑有淋水以及漏风要素。

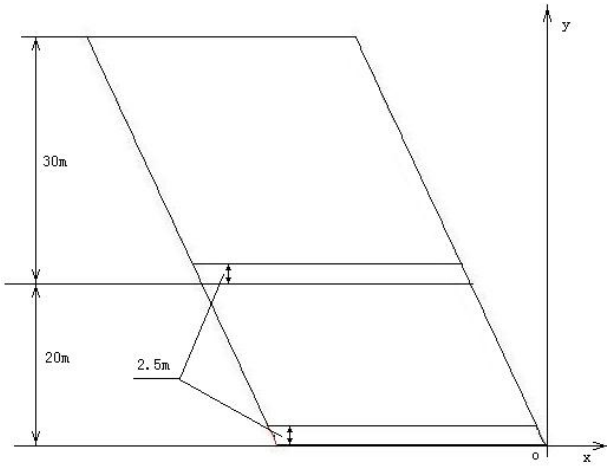


图 5-1 模拟计算煤层几何边界条件

③采空区瓦斯分布规律

1）工作面初采阶段采空区气体浓度分布

通过模拟计算，得出采空区瓦斯分布（如图 5-2 所示）。从中可以看出，初采阶段，除了直接顶或煤层有部分或局部冒落，工作面上部煤层没有进行大面积垮落，产生一定量裂隙，工作面空气以渗流扩散方式，将松动煤体内的瓦斯进行稀释，主要集中在工作面中部。

根据所得到的瓦斯沿工作面垂直方向梯度变化规律，在模拟计算中得到，空气能深入煤层深度为 10 m 左右，煤层孔隙内瓦斯浓度在 50%以上。

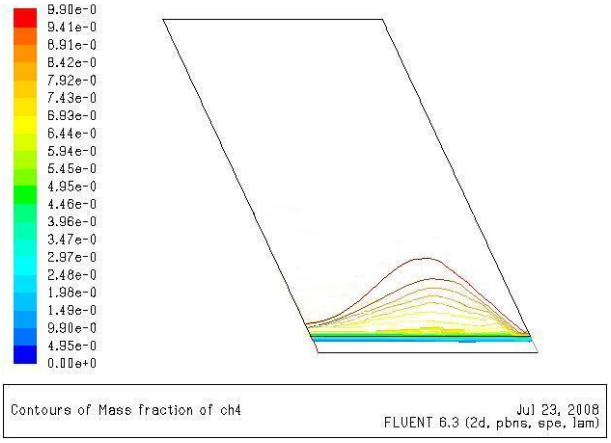


图 5-2 综放工作面初采时期采空区瓦斯分布

2）工作面放顶煤阶段采空区气体浓度分布

结合现场采煤的实际情况，现场采放比为 1：7。通过模拟计算，得出采空区瓦斯分布（如图 5-3 所示）。从中可以看出，在放顶煤过程中，工作面顶部冒落范围大，特别是在垂直方向，几乎达到上水平工作面巷道位置，瓦斯释放后，弥漫了所有空间，根据工作面风流流向，在工作面的进风侧，由于煤层冒落不充分，所以瓦斯集聚范围小，但是气体浓度高。而在工作面的回风侧，上覆煤层冒落充分，瓦斯集聚范围大，同时空气渗入的量也多。

按照所得到的瓦斯沿工作面垂直方向梯度变化规律，在模拟计算中，在工作面的回风侧，空气能深入煤层深度为 20 m 左右，煤层冒落区域内瓦斯浓度在 50%以上。

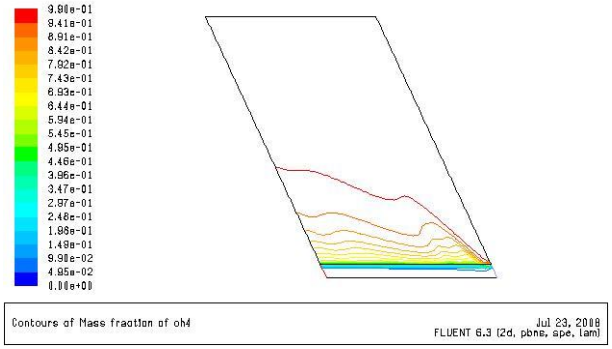


图 5-3 综放工作面放顶煤阶段采空区瓦斯分布

2.案例实际应用效果

本案例通过数值模拟实验，得到了采空区瓦斯分布在不同开采阶段、不同外界条件下

的分布规律。根据实验得到的瓦斯在采空区分布规律，通过数值模拟实验手段，对于现场一个开采阶段内瓦斯分布情况进行了分析研究。所研究结果，对于现场进行瓦斯防治，特别是进行瓦斯抽采提供了重要的技术参数。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过以急倾斜煤层开采为例，介绍了模型参数的确定方法以及模型建立过程，揭示了急倾斜煤层顶煤冒放性及瓦斯运移规律，增强学生对数值模拟的理解，锻炼学生创新精神和解决实践问题的能力。在本案例中蕴含的教学内容与关键内容如表 5-4 所示。

表 5-4 教学内容与关键内容

序号	教学内容	关键内容
1	散体流建模参数选定	采用现场实测得瓦斯浓度数据以及现场地质赋存情况
2	气固耦合模拟	通过确定工作面瓦斯浓度、端面积及风速来得出通风阻力

3.支撑材料

[1]崔峰,来兴平,曹建涛等.急倾斜综放破碎顶煤流动规律数值模拟[J].西安科技大学学报,2010,30(03):255-259+270.

[2]伍永平,来兴平,曹建涛等.多场耦合下急斜煤层开采三维物理模拟(1)[J].西安科技大学学报,2009,29(06):647-653+676.

[3]来兴平,伍永平,张坤等.多场耦合下急斜煤层开采三维物理模拟(2)[J].西安科技大学学报,2009,29(06):654-660.