西安科技大学本科生教学案例库建设项目

例库名称：	“西部煤炭绿色智能开采”科研成果转化
	《智慧矿山技术》教学典型案例
适用课程：	智慧矿山技术
专业名称：	采矿工程
学院名称：	能源学院
项目负责人：	王红伟
主要完成人：	张云、姬松涛、杨涛、唐仁龙

西安科技大学教务处 制

2023 年 12 月 15 日

前言

一、案例库建设的意义

案例教学（Case-based Teaching，CBT）是一种运用案例进行教学的教学方法，通过具体现实问题的处理，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。该教学方法由哈佛大学于 1870 年首次提出，是一种基于实践经验的探索性教学方法。我国于 20 世纪 80 年代将案例教学引入国内，最初的案例教学应用于管理科学，1999 年大连理工大学建立了国内的第一个案例库网站。目前，全国各高校都在大力发展新工科建设，对现有工科专业课程进行教学改革，将传统的基础知识与前沿的技术案例或者典型科研整合成建成案例库资源，既实现了教学资源共享,发挥教学团队科研优势,又便于教师根据教学特点选择案例，发挥个人优势和教学特色，有利于提高教学质量。

采矿工程专业作为传统工科专业，面向新经济背景下煤炭转型升级，必须进行专业改造，旨在培养能够在采矿及其相关领域从事工程设计、研究、管理等方面的技术工作，具有一定应用创新能力的高素质专业技术人才。其专业核心课程包括：采矿学、矿山压力与岩层控制、地下工程施工、矿山机械等，涉及煤矿生产全过程，具有工程逻辑和系统特性，实现课程教学目标，必须进行理论与实践深度融合。

西安科技大学采矿工程专业是我国西部煤炭开采人才培养和科技创新基地，经过 85 年传承与发展，形成了大倾角/急倾斜煤层开采、浅埋煤层开采与岩层控制、生态脆弱区充填减损开采、矿山智能开采与灾害精准调控等西部煤炭绿色智能开采特色方向，取得了丰富的科研成果。依托我校采矿工程研究特色，聚焦我国西部煤炭绿色智能开采难题，依据煤炭开采工程逻辑，梳理科研成果与专业核心课程知识内容的对应衔接关系，建立“产教融合、科教融汇”的模块化科研成果转化案例库，对强化提升课堂教学效果，达成应用创新型人才培养目标，为西部煤炭行业培养合格人才具有重要意义。

二、国内外相关案例库建设情况与发展趋势

近年来案例教学方法越来越多的被引入采矿工程专业课程的教学改革中。理论和实践表明，在采矿工程专业教学中采用案例教学法，可以显著提高课堂教学质量，提升学生的素质，容易实现课程教学目标和教学达成度。赵耀龙等借鉴 MBA 的教学经验，对案例教学在采矿工程专业课程中的实践进行了探讨，取得了良好的教学效果。戴小军等在采矿工程专业变形监测与数据处理课程中，尝试采用案例教学法，提升了学生平均成绩和考试成绩，增强了学生对复杂工程问题的分析和创新能力。赵健赟等在采矿工程课程教学改革的研究中指出，通过案例教学可以提高学生的学习积极性、创造力和自信心。刘国栋等尝试通过引入案例教学法，培养采矿工程专业学生独立观察、分析和解决实际问题的综合能力，促进课程教学质量的提高，并通过实践发现基于案例的逆向教学有利于改变采矿工程专业的教学现状，提升教学效果，实现课程教学目标达成度。

当前主要针对采矿工程专业《采矿学》《矿山压力与岩层控制》《开采损害及防治》等某门具体课程进行案例教学与案例库资源建，取得了很好的教学效果。但采矿工程作为一门工

科专业，专业课程之间存在矿山开采活动的工程逻辑过程，专业课程目标与毕业要求之间存在支撑关系，必须梳理科研成果与课程内容、毕业要求的对应关系。同时，面临煤炭行业转型升级，双碳背景下智能开采技术发展迅速，立足西部煤炭开采主战场，建立服务于专业核心课程群的西部煤炭绿色开采综合案例库资源，探索科研与思政相融合教育模式，实现对应用创新型采矿工程人才的系统性培养，是发展的必然趋势。

三、本案例库的应用前景与实用价值

基于“新工科”建设的采矿工程专业改造升级是一项从观念到课程、从制度到个人、从宏观到微观的系统立体工程。专业课程教学案例库建设是课程建设主要内容之一，采矿工程专业课程教学案例来源于矿山开发、科研实践，因此，要结合“产教融合、科教融汇”的校、企、地之间的基地建设、科研项目、生产调研和交流服务等实际情况，进一步深化、融合、拓展至专业课程建设。

西安科技大学地矿特色鲜明，地处西部煤炭资源开发主阵地。近五年来，聚焦西部煤炭绿色智能开采难题，承担国家级项目近 60 项，企业委托横向 700 余项，发表学术论文 400 余篇，出版学术专著 20 余部，获国家发明专利授权 40 余项，获国家科技进步二等奖 3 项，省部级特等奖 4 项、一等奖 40 项。为课程教学案例库的构建提供了丰富详实的系统案例，可以贯穿课程知识内容体系。因此，依托西部煤炭绿色开采全国黄大年式教师团队，融合“采矿精神、特色科研成果”，建设适用于采矿工程专业核心课程群的案例库，为全面打造具有“两性一度”的“金课”奠定基础，对丰富一流课程和一流专业建设内涵，探索新工科专业“教-学-研-用”实践创新育人模式提供支撑，可为全国 54 所矿业类高等院校教学资源案例库建设提供示范和借鉴，具有广阔应用前景。

四、案例建设方案

（一）拟建设的相关案例内容

依托西部煤炭绿色开采全国黄大年式教师团队，结合西安科技大学采矿工程特色科研方向，聚焦西部煤炭资源安全绿色智能开采难题，结合（智能）采矿学、岩石力学、矿山压力与岩层控制、地下工程施工、矿井开采设计等采矿工程专业核心课程教学中的关键知识内容，建设大倾角/急倾斜煤层开采、浅埋煤层开采与岩层控制、生态脆弱区充填减损开采、矿山智能开采与灾害精准调控等四个模块的科研转化教学资源案例库。具体如下：

表 1　科研案例与教学内容的对应关系

模块	案例名称	适用课程	教学环节及内容
大倾角、急倾斜煤层开采	1.大倾角煤层变角度综放工作面安全高效开采集成技术研究	采矿学、矿井开采设计	采煤方法、采煤系统
	2.大倾角煤层局部充填无煤柱开采理论与技术	采矿学、地下工程施工	岩层控制、沿空留巷
	3.急倾斜近距离煤层群联合开采方法及技术	采矿学、矿山压力与岩层控制	采煤方法、冲击矿压

模块	案例名称	适用课程	教学环节及内容
浅埋煤层开采与岩层控制	4.黄土沟壑区浅埋煤层开采裂隙演化致灾机理	矿山压力与岩层控制 开采损害及防治	保水开采、岩层控制
	5.浅埋煤层高强度开采下黏土-基岩协同破坏突水机理	矿山压力与岩层控制、开采损害及防治	保水开采、岩层控制
	6.浅埋近距离房柱式采空区上下残采围岩结构及失稳机理	矿山压力与岩层控制	采煤方法、冲击地压
生态脆弱区充填减损开采	7.西部浅埋煤层风积沙似膏体窄条带充填开采关键技术	采矿学、矿山压力与岩层控制	充填开采、环境保护
	8.生态脆弱矿区短壁块段式充填采煤覆岩表水运移控制技术	采矿学、矿山压力与岩层控制	保水开采、采煤工艺
智能开采与灾害精准调控	9.急倾斜薄及中厚煤层智能开采关键技术及装备	智能采矿学、矿山机械	采煤方法、三机配套
	10.复合坚硬顶板矿压灾害分段压裂区域卸压防治	矿山压力与岩层控制	灾害防治、顶板预裂

（二）建设的进度安排

1.2024.01-2024.03　现场调研、资料收集与梳理、建设方案制定；

2.2024.04-2024.06　分模块建设科研成果转化教学资源案例库；

3.2024.07-2024.09　结合专业教学内容优化案例库、专家论证；

4.2024.10-2024.12　教学应用与持续改进，结题验收。

（三）创新点

1.基于产教融合、科教融汇理念，围绕采矿工程逻辑过程，建立适用于专业核心课程群的模块化西部煤炭绿色开采科研成果转化教学资源案例库，促进案例教学对学生应用创新能力培养。

2.提出“思政+科研”案例教学模式，实现培养链、创新链、产业链贯通，培养具有创新思维、创新能力、家国情怀和使命担当的采矿工程时代新人。

3.借助课程案例建设，探索“教促研—研促教—教促学—学促用”教学研用人才培养途径，促进学生解决复杂采矿工程问题能力的培养。

（四）预期成果与形式

1.建设“模块化”西部煤炭绿色智能开采科研转化教学资源案例库，科研案例 10 个，形成成果报告 1 份。

2.指导学生参加第二课堂和学科竞赛 5 项以上，并获奖励 3 项以上。

3.依托课程案例库建设，发表教改论文 1 篇，申报教学成果 1 项。

“西部煤炭绿色智能开采”科研成果转化《智慧矿山技术》教学典型案例

第一部分：大倾角、急倾斜煤层开采

一、科研项目基本信息

科研项目背景：本案例库在 3 项国家自然科学基金项目、1 项省（部）项目和 3 项企业委托项目资助下，针对大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用开展了研究，出版专著 2 部，发表学术论文 80 余篇，其中 SCI/EI 检索 30 篇，授权国家专利 20 项、软件著作权 1 项，获陕西省科技进步一等奖 1 项、中国煤炭工业科技一等奖、二等奖各 1 项、西安市科学技术进步二等奖 1 项、陕西省高等学校科技进步一等奖、二等奖各 1 项、陕西省博士后科研成果奖励等。依托的科研项目信息如表 2-1 所示。

表 2-1　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
2	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
3	国家自然科学基金面上项目	急倾斜走向长壁采场“顶板-煤柱-底板”链式结构稳定性理论研究	51974230
4	陕西省教育厅科学研究计划项目	大倾角采场充填体与“关键域”岩体结构协同控制作用机制	16JK1491
5	新疆焦煤集团有限责任公司项目	坚硬顶板松软底板大倾角松散煤层大采高综合机械化开采技术研究	/
6	神华宁夏煤业集团有限责任公司项目	枣泉煤矿大倾角综采（放）工作面安全高效开采集成技术研究	/
7	四川煤炭产业集团有限责任公司项目	大倾角煤层长壁工作面综合机械化开采集成技术研究与推广	/

成果名称：大倾角煤层长壁采场岩层控制研究与应用

主持人：伍永平、王红伟

获奖情况：陕西省科技进步奖一等奖，中国煤炭工业科技奖一等奖、二等奖各 1 项，西安市科学技术进步奖二等奖，陕西省高等学校科技进步一等奖、二等奖各 1 项。

二、科研促进教学案例

（一）案例 1：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

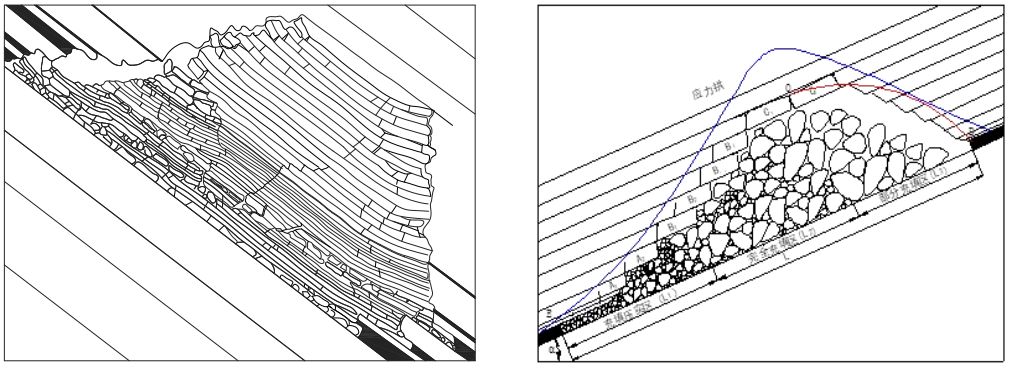
1.案例介绍

大倾角煤层是国际采矿界公认的难采煤层，采场围岩中“关键层”的非确定性和“岩体结构”的变异是形成这类煤层开采岩层运动异常复杂且难以控制的关键所在。利用理论分析、实验研究和现场观测等综合研究手段，研究揭示了大倾角煤层长壁开采工作面覆岩变形、破坏、运移、充填规律；围岩应力场形成与演化机制；“关键层”区域迁移转化特征；“关键层”岩体结构形成与变异机制以及致灾机理。

大倾角煤层长壁开采工作面垮落矸石沿倾斜滑移充填呈现下部充填压实、中部完全充填、上部部分充填的分区特征，形成对覆岩变形、破坏和运移的非对称约束效应，导致围岩破断运移具有明显的时序性和不均衡性，覆岩应力分布呈三维非对称拱壳形态。覆岩“关键层”形成区域（层位）沿工作面倾斜方向发生迁移转化，不同区域内“关键层”形成层位不同；覆岩“关键层”沿工作面倾斜方向形成“梯阶”结构，“关键层”岩体结构失稳模式主要有工作面下部区域的压剪、拉伸共同作用的壳基复合失稳，中部区域的壳肩剪切失稳和下部区域的壳顶拉伸失稳，“关键层”拱壳关键部位的失稳是导致岩体结构失稳致灾的核心；“关键层”岩体结构变异致灾导致工作面上部区域出现的高位失稳产生冲击性来压，工作面中下部区域低位失稳则出现推垮型事故。基于以上研究成果，提出了工作面大范围岩层控制和非线性布置方法、支护系统工作阻力分区域控制技术、“支架-围岩”完整性保障技术，指导研制了工作面成套装备，奠定了大倾角煤层的无灾化开采基础。

（1）揭示了大倾角煤层覆岩变形、破坏、运移、充填规律

利用物理相似模拟实验和数值实验对典型条件下大倾角煤层开采岩层变形、破坏和移动特征进行实验研究，结果表明：大倾角煤层长壁开采工作面垮落矸石沿倾斜滑移充填呈现下部充填压实、中部完全充填、上部部分充填的分区特征，形成对覆岩变形、破坏和运移的非对称约束效应，导致工作面推进的多循环“卸-加载”过程中，围岩破断运移具有明显的时序性和不均衡性。



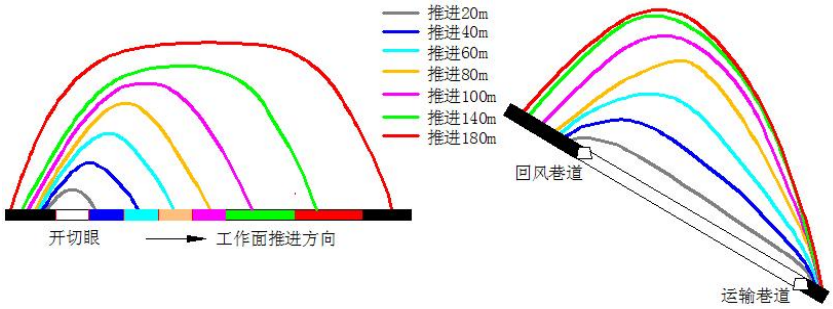
（a）覆岩垮落破碎特征　　（b）大倾角煤层开采采场充填特征

图 2-1　大倾角煤层覆岩垮落及充填特征

（2）揭示了大倾角煤层长壁开采围岩应力场形成与演化机制

研究发现，在多因素交互影响下，大倾角煤层长壁开采覆岩应力呈三维非对称拱壳形态，该应力拱壳是开采扰动破坏原岩应力平衡后，围岩在自组织作用下形成的起主要承载作用的

高应力形成，是在某一强度准则下强度包络线的空间展布形态，具有几何形态和应力形态双非对称性，可以用应力拱壳形态方程表征和进行主要参数预测。

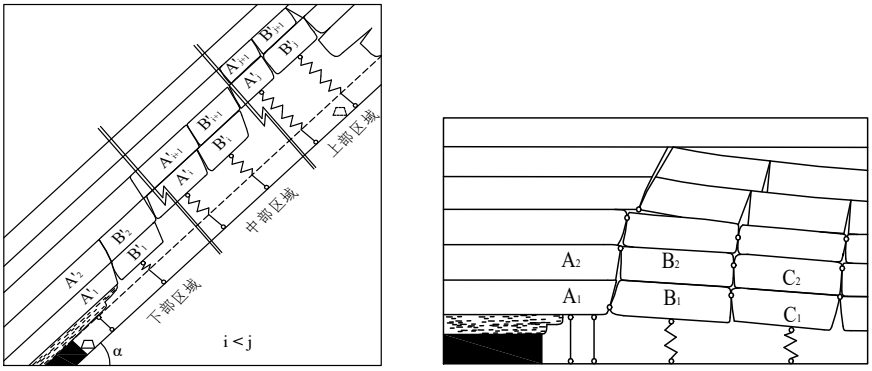


（a）沿煤层走向　　（b）沿煤层倾向

图 2-2　应力拱壳演化形态

（3）大倾角煤层长壁开采围岩应力拱壳范围内覆岩“关键层”区域迁移转化特征

基于物理相似模拟实验和现场观测，在沿工作面倾向充填矸石对覆岩的非对称约束下，大倾角煤层长壁开采工作面覆岩“关键层”形成区域（层位）沿工作面倾斜方向发生迁移转化，不同区域内“关键层”形成层位不同，典型意义上的直接顶、基本顶及其上位岩层力学形态及其在岩体结构形成中的作用可能发生变异，覆岩“关键层”沿工作面倾斜方向形成“梯阶”结构，该结构岩体破断后形成倾斜砌体结构，并以倾向堆砌和反倾向堆砌两种形式运移和平衡。



（a）倾向模型　　（b）走向模型

图 2-3　大倾角煤层倾斜长壁开采“关键层”岩体结构模型

2.案例实际应用效果

本案例研究成果已经被应用于四川、甘肃、新疆、贵州以及黑龙江等省、自治区的多个大倾角煤矿综合机械化开采、综合机械化大采高或综合机械化放顶煤开采实践，解决了制约这些矿井技术经济效益提高的关键技术难题，经济与社会效益显著。

本案例可充分发挥教学和科研一体化，研究内容在多个生产矿井已成功应用，更加注重理论研究的实用性和可靠性。以物理相似模拟实验和现场观测为主要研究手段，在拓宽学生眼界的同时极大地满足了学生的参与感，激发学生的积极性，提升了学生的主观能动性和专业自信，使学生能够切身实地的将所学知识转变为过硬的技术手段。本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 2-2 所示。

表 2-2　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	煤层覆岩变形规律	工作面的非对称约束效应	围岩破断运移性质
2	应力拱壳形态及作用	覆岩应力形态的形成机理	应力拱壳形态方程应用
3	关键层理论	关键层“梯阶”结构	覆岩变化及岩体结构形成

3.支撑材料

[1]. 伍永平,王红伟,解盘石.大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳分析[J].煤炭学报,2012,37(04):559-564.

[2]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.大倾角煤层开采“关键域”岩体结构稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(02):287-294.

[3]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.大倾角煤层开采“关键域”转换与岩体结构平衡特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(10):1009-1014.

[4]. 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.

[5]. 王红伟,焦建强. 一种适用于急倾斜煤层伪俯斜弧形工作面的异形液压支架[P]. 陕西省：CN209369851U,2019-09-10.

[6]. 王红伟. 一种急倾斜厚煤层俯伪斜弧形斜切分层综放开采方法[P]. 陕西省：CN109026000B,2019-12-03.

（二）案例 2：大倾角煤层变角度综放工作面安全高效开采集成技术研究

1.案例介绍

大倾角煤层是指埋藏倾角为 35°~55°的煤层，是国际采矿界公认的难采煤层，广泛分布于我国各大矿区。近年来，我国大倾角厚煤层综放开采工艺逐渐趋于成熟，但对于变角度条件下大倾角煤层综放开采研究较少，存在岩层控制系列难题亟需解决。针对枣泉煤矿 120210 工作面变角度大倾角煤层综放开采条件，采用理论分析、室内实验、科学计算、现场测试和工业试验等多种科学方法与手段，系统研究了大倾角煤层变角度工作面综放开采岩层控制理论和开采方法，揭示了大倾角变角度工作面综放开采围岩应力分布、变形破坏、运移充填的分区域特征和支架稳定性特征及工作面不同区域“关键层”区域迁移转化机制，提出了“工作面产量-质量与支架-围岩系统稳定性”分区域控制原则，发明了大倾角变角度工作面仰伪斜变角度布置方式、顶煤放出量和支架工作阻力分区域控制技术，研制了以“可调宽、大阻力”液压支架为核心的大倾角煤层变角度综放工作面的“三机”特种成套装备，填补了我国该领域空白，达到国际先进水平。

（1）揭示了大倾角煤层变角度综放工作面开采过程中顶板垮落充填规律、关键层区域形成特征及迁移转化机制

大倾角煤层变角度综放工作面顶板垮落充填具有分区性，自下而上依次为充填压实区、完全充填区、部分充填区，导致不同区域“关键层”发生迁移转化，下部区域“关键层”向直接顶和伪顶岩层转移，中部区域“关键层”处于基本顶中下位岩层中，上部区域“关键层”向基本顶上位岩层中转移。不同区域“关键层”关键岩块相互作用，形成倾向“梯阶”结构，自上而下破断方式分别为二次回转垮落、一次回转垮落、直接垮落，导致工作面来压时序性和非均衡性。

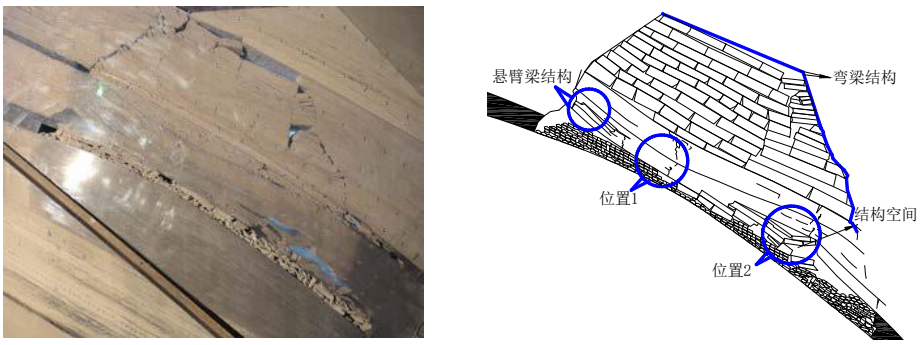


图 2-4　覆岩倾向垮落充填分区特征

（2）揭示了大倾角煤层变角度综放工作面开采过程中围岩应力、位移分布非对称分区特征和支架稳定性非均匀分区特征

充分采动前，围岩位移分布呈对称特征，上部区域顶板垂直应力最小、中部区域较大、下部区域最大；充分采动后，中下部区域处于压应力状态、上部区域处于拉应力状态，位移分布沿倾向表现出明显的非对称特征，上部区域最小、中部区域较大、下部区域最大。上部区域支架受力均匀，稳定性高，下部区域支架受力不均、稳定性差。上部区域是放煤容易区域、下部区域支架稳定性控制重点区域，中部区域是安全防护调整区域，为“工作面产量-质量与支架-围岩系统稳定性”分区域控制原则的提出奠定基础。

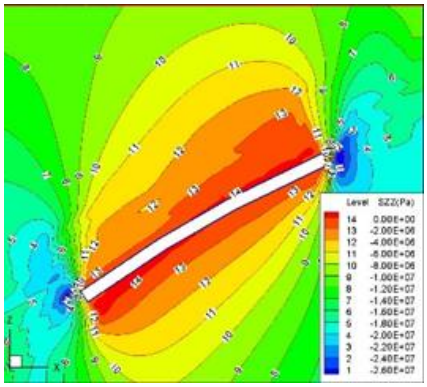


图 2-5　变角度工作面应力分布

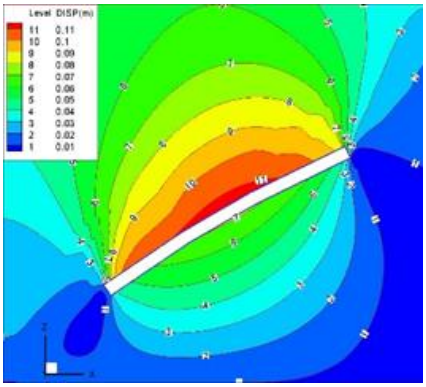


图 2-6　变角度工作面位移分布

120210 综放工作面沿倾斜方向支架受载具有分区特征，下部区域支架载荷平均 29.5MPa，且支架受力不均、变化范围大；中部区域支架载荷平均 27.15MPa，支架受力较均匀；上部区域支架载荷平均 23.7MPa，支架受力均匀，变化幅度较小（图 7）。工作面推进过程中液压支架立柱伸缩量不同，支架前立柱伸缩量大于后立柱伸缩量，沿倾斜方向下侧立柱伸缩量大于上侧立柱伸缩量，且主要发生在中上部区域，导致该区域液压支架向上倾斜的现象。工作面下部区域部分支架上侧立柱伸缩量大于下侧立柱伸缩量，导致该区域液压支架向下倾倒显现（图 8）。

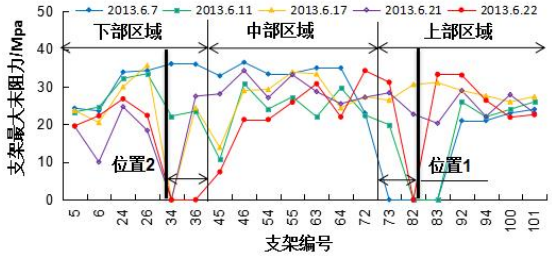


图 2-7　工作面倾向支架受力状态变化

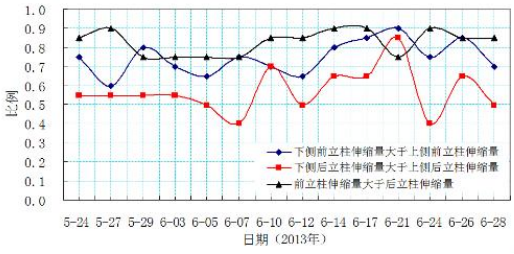
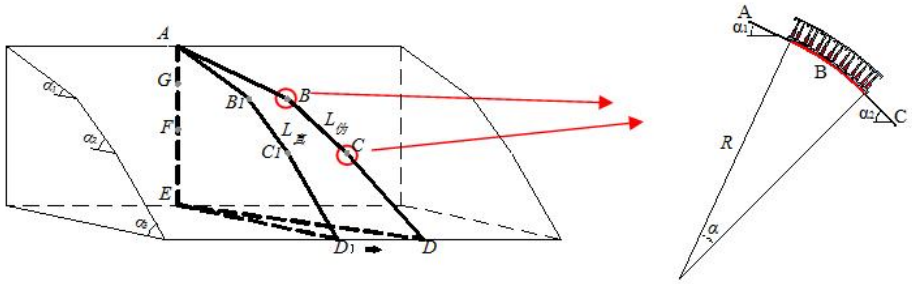


图 2-8　工作面支架立柱伸缩状态

（3）研发了大倾角工作面伪仰斜变角度布置方式

提出了“重点控制下部区域支护系统稳定性、全面促进上部区域高效生产、调整中部区域安全防护体系”的“工作面产量-质量与支架-围岩系统稳定性”分区域控制原则，研发了工作面伪仰斜变角度布置方式、基于“上足、中少、下尽（3:2:1）”的顶煤放出量控制技术和基于支护阻力分区域控制的“支架-围岩”系统稳定性控制技术、区段巷道整体高强度柔性支护和煤壁片帮及冒顶控制技术，解决了支架动态稳定和工作面安全高效生产的矛盾难题。



（图中，α_1、α_2、α_3-上部、中部、下部区域倾角，$ABCD$-仰伪斜工作面，$AB_1C_1D_1$-真倾斜工作面）

图 2-9　工作面仰伪斜变角度布置示意图

2.案例实际应用效果

本案例所依托的项目系列研究成果已经被用于指导枣泉煤矿后续 16 采区大倾角煤层开采，取得了良好的技术经济与社会效益，并获神华宁夏煤业集团 2016 年度科技进步奖，在集团得到大力推广。本案例中涉及的研究内容是由理论研究与实践相结合，采用了多种科学方法与手段进行了系统研究。在研究过程中，揭示了大倾角变角度工作面综放开采围岩应力分布、变形破坏、运移充填的分区域特征以及支架稳定性特征，同时也揭示了工作面不同区域“关键层”区域迁移转化机制。此外，还提出了“工作面产量-质量与支架-围岩系统稳定性”分区域控制原则，并发明了大倾角变角度工作面仰伪斜变角度布置方式、顶煤放出量和支架工作阻力分区域控制技术。在装备方面，研制了以“可调宽、大阻力”液压支架为核心的大倾角煤层综放工作面“三机”特种成套装备。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过对工作面变角度大倾角煤层综放开采难点的发现和求证过程，拓宽了学生知识面范围，培养了学生自主创新意识和动手能力以及解决现场实际问题的能力。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 2-3 所示。

表 2-3　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	顶板垮落充填的分区特征	顶板垮落充填机理	顶板垮落充填对关键层迁移转化的影响
2	充分采动前后围岩位移分布特征	分区域控制原则	支架受载的分区特征
3	工作面稳定性控制原则	支架动态稳定和工作面安全高效生产问题的技术方法	工作面稳定性和安全高效生产理论支持

3.支撑材料

[1]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.大倾角变角度综放工作面顶板运移与支架稳定性分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(03):507-513.

[2]. 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.

[3]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.大倾角特厚煤层综放液压支架工作阻力确定[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(08):1020-1024.

[4]. 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.

[5]. Wang H W, Wu Y P, Jiao J Q, et al. Stability Mechanism and Control Technology for Fully Mechanized Caving Mining of Steeply Inclined Extra-Thick Seams with Variable Angles[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2021, 38(2): 1047-1057.

[6]. 王红伟,伍永平,曹沛沛，等. 大倾角煤层变角度综采/放工作面伪仰斜变倾角布置方法[P]. 陕西省：CN105649628B,2018-07-10.

（三）案例 3：大倾角局部充填开采充填体与关键域岩体结构协同作用机制

1.案例介绍

针对大倾角煤层走向长壁综采过程中岩层控制难题，提出大倾角煤层局部充填开采创新方法，并采用实验研究、数值计算、理论分析等综合研究方法，确定大倾角煤层局部充填工艺与尺度参数，系统研究大倾角煤层局部充填开采充填区域尺度效应、多因素交互作用下采场围岩非对称破坏及应力场形成与演化的改善机制、充填体与垮落矸石的非均衡约束作用下“关键域”形成与平衡机制、“关键域”岩体结构稳定性控制等科学问题，揭示局部充填作用下围岩空间应力场形成及演化特征，建立“关键域”岩体结构模型及其基本表征模式，确定岩体结构稳定性判别准则及失稳模式。对丰富难采煤层开采理论、拓展岩层控制研究领域均具有重要意义。

（1）大倾角煤层局部充填开采方法及参数确定

局部充填工作面布置方式及参数确定。选择一个伪仰斜走向长壁工作面作为所述的大倾角煤层实际开采工作面，伪仰斜工作面与真倾斜工作面面的夹角约为 0°~7°，对工作面上部区域进行局部充填，工作面倾斜长度 L 和充填区域长度 L_1 由以下公式确定：

$$L_{充}=\left(L-L_{充}\right)k \tag{2-1}$$

$$L_1=\frac{k}{k+1}L \tag{2-2}$$

$$L'=\left(L-L_{充}\right) \tag{2-3}$$

$$L=(k+1)L' \tag{2-4}$$

式中，k 为大倾角工作面矸石完全充填区和充填压实区占工作面长度的比例系数，取 2/3；L' 为大倾角综采工作面长度，m，取 120m。计算得出工作面倾斜长度 200m、充填区域长度 80m。

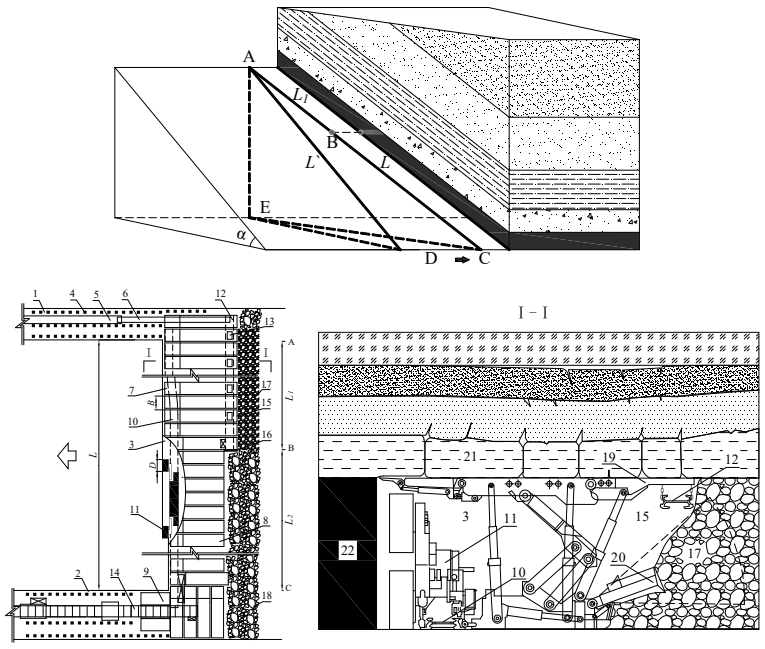
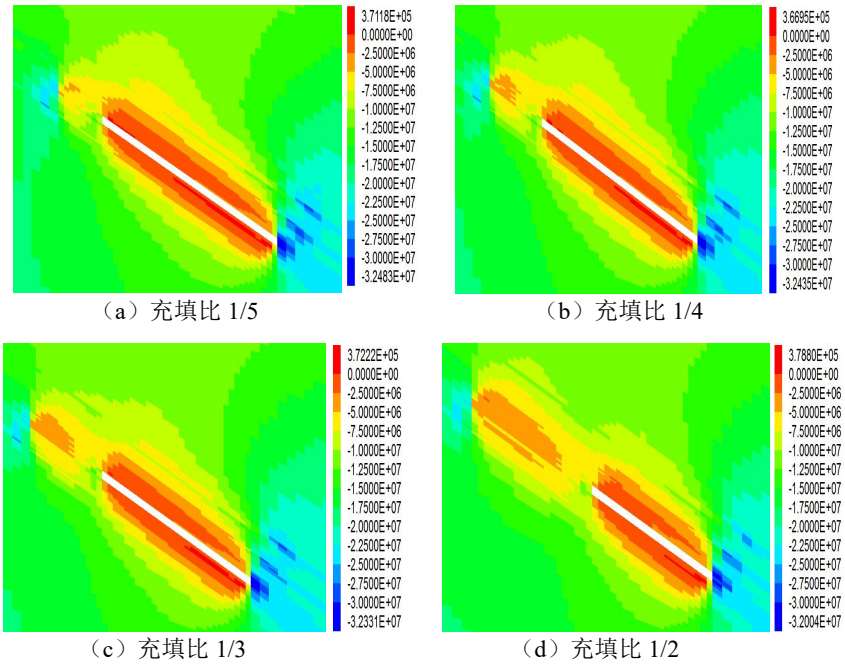


图 2-10　大倾角煤层伪斜工作面局部充填开采方法

（2）不同充填比条件下覆岩应力分布特征

由图 31 可知，大倾角煤层长壁局部充填开采过程中（从工作面上部区域进行人工充填），受充填体的作用，围岩应力重新分布，重新分布的应力在工作面充填区域顶底板中应力值为 5MPa，未充填区域顶板中上部区域和底板下部区域应力值为零，该区域内岩层完全破坏，在上下端口煤岩层处形成应力集中，最大集中应力 22～32MPa。当充填比 1/5 时，围岩最大应力为 32.48MPa，最小应力为 0.37MPa；充填比 1/4 时，围岩最大应力为 32.43MPa，最小应力为 0.36MPa；充填比 1/3 时，围岩最大应力为 32.33MPa，最小应力为 0.37MPa；充填比 1/2 时，围岩最大应力为 32.00MPa，最小应力为 0.38MPa，覆岩应力形态发生变化。随着充填比的增大，最大应力在减小，减小幅度较小，这是由于充填体和上端口煤体共同作用，承压区域面积变大，抑制了顶板的下沉变形。其次，随着充填比的增大，覆岩的非对称应力拱在逐渐变缓，这是由于人工充填工作面上部区域后，充填抑制充填区域处顶板的变形，降低了上部区域应力释放程度、范围，从而有效的改变了应力状态。



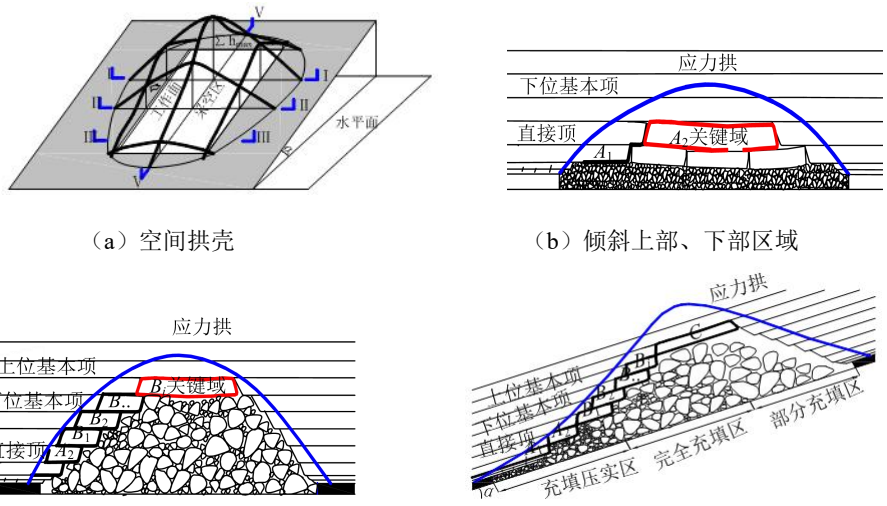
（a）充填比 1/5　　（b）充填比 1/4

（c）充填比 1/3　　（d）充填比 1/2

图 2-11　不同充填比下倾向覆岩应力分布特性（单位：Pa）

（3）局部充填采场“关键域”形成及岩体结构稳定性机制

大倾角煤层开采采空区充填矸石在工作面倾斜方向上的破碎程度不同，表现出的力学特征（强度、完整性、约束作用）不同，导致工作面覆岩变形、破坏和垮落形态沿工作面倾向发生变化。在工作面倾向下部区域，采空区垮落矸石排列整齐、充填密实，对上覆岩层的支撑与约束作用强，在工作面推进过程，破碎、垮落的岩层高度处于工作面直接顶；在工作面倾向中部区域，采空区垮落矸石排列杂乱、充填较密实，对上覆岩层的支撑与约束作用较强，在工作面推进过程中，破碎、垮落的岩层高度处于工作面基本顶下位岩层；在工作面倾向上部区域，受人工充填体支撑作用，在工作面推进过程，破碎、垮落的岩层高度处于工作面直接顶；工作面顶板岩层的破碎、垮落方式导致沿工作面倾斜方向上岩层垮落形态特征和应力分布形态不同。沿工作面走向，大倾角煤层开采上覆岩层的垮落形态与一般倾角煤层类似，存在一般形式的“增压区、减压区和重新压实区，顶板岩层垮落形态为对称拱形。



（a）空间拱壳　　（b）倾斜上部、下部区域

（c）倾斜中部结构　　（d）倾向剖面

图 2-12　大倾角煤层局部充填开采“关键域”形成层位

2.案例实际应用效果

科教融合，以研促教，本案例是对大倾角煤层走向长壁综采过程中岩层控制难题提出的一种创新解决方法，基于实验研究、数值计算和理论分析，具有科学性，实用性，能够有效提升学生在理论知识方面的推演和应用能力，锻炼学生运用理论知识解决实践问题的能力。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 2-4 所示。

表 2-4　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	大倾角煤层局部充填开采方法	局部充填工作面布置方式及参数	局部充填开采充填区域的尺度效应
2	局部充填开采过程中围岩应力重新分布及充填比对围岩应力状态的影响	围岩及充填体的力学特性、应力分布规律	充填比对围岩应力状态的影响规律
3	充填矸石在工作面倾斜方向上的力学特征	充填矸石对覆岩的影响规律及岩层垮落形态特征和应力分布形态	充填矸石的破碎情况与其力学特征

3.支撑材料

[1]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.大倾角采场矸石充填量化特征及覆岩运动机制[J].中国矿业大学学报,2016,45(05):886-892+922.

[2]. 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.

[3]. Wang H W, Wu Y P, Liu M F, et al. Roof-breaking mechanism and stress-evolution characteristics in partial backfill mining of steeply inclined seams[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2020, 11(1): 2006-2035.

[4]. 王红伟,伍永平,曹沛沛. 大倾角煤层走向长壁工作面局部充填开采方法[P]. 陕西：CN105134215A,2015-12-09.

（四）案例 4：急倾斜走向长壁采场“顶板-煤柱-底板”链式结构稳定性理论

1.案例介绍

急倾斜煤层走向长壁开采是典型的倾斜层状岩体开采卸荷工程问题，受倾斜层面效应和开挖卸荷效应影响，采场围岩“岩体结构”构成单元的多样性和关联性是形成该类煤层开采岩层运动异常复杂且难以控制的关键所在。针对急倾斜走向长壁采场围岩应力传递方式及路径、“R-P-F”链式结构形成、灾变及断链减灾机理等科学问题，采用卸荷岩体力学实验、多维物理相似模拟、多元数值计算、理论分析和现场监测相结合的综合研究方法，分析倾斜层状岩体卸荷力学特征，建立倾斜层状岩体卸荷等效力学模型和卸荷屈服准则，揭示急倾斜煤层开采“煤柱-岩层”应力传播衰减机理及空间形态特征；分析开采卸荷层状岩体应力-应变与载荷-位移间等效转换关系，建立急倾斜走向长壁采场“R-P-F”链式结构关系模型和物理力学模型，揭示链式结构形成机理；定量表征链式结构灾变形态阶段，揭示“R-P-F”链式结构灾变及断链减灾机理，为急倾斜煤层走向长壁安全高效开采奠定理论基础。

（1）急倾斜煤层走向长壁开采“R-P-F”链式结构关系模型和物理力学模型构建

采用急倾斜煤层走向长壁开采卸荷相似模拟和数值计算，研究煤柱稳定性、顶板结构区域转换及平衡、底板变形破坏失稳特征，分析采场卸荷区“煤柱-岩层”应力应变场，通过应力-应变与载荷-位移的等效转换，建立基于卸荷岩体载荷-位移准则的“R-P-F”链式结构关系模型和物理力学模型，为揭示“R-P”结构链、“F-P”结构链、“R_1-P_1-F_1”结构链、多区段联动“$R_{1...n}$-$P_{1...n}$-$F_{1...n}$”结构链等不同类型链式结构形成机理奠定基础。

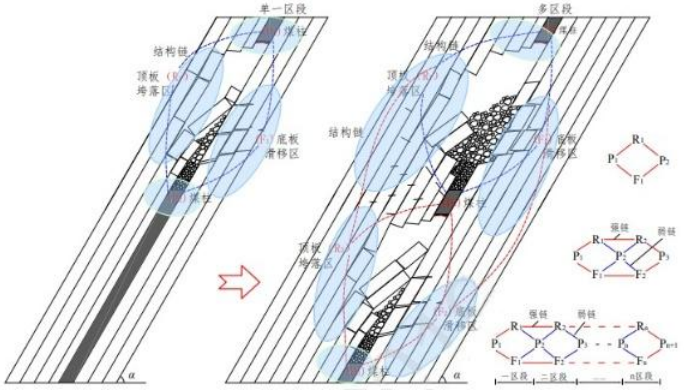


图 2-13　急倾斜煤层开采“R-P-F”链式作用关系

（2）急倾斜煤层走向长壁开采卸荷相似模拟实验

采用急倾斜煤层开采三维加卸荷相似模拟实验平台（图 6）、平立交互加卸荷相似模拟实验平台，按照岩体卸荷力学参数和相似理论，分别制作 1.5m×1.5m×1.0m 三维模型 1 架次、1.5m×1.5m×0.2m 二维模型 2 架次，借助基于声波、光学测量系统（分布式光纤传感技术、钻孔窥视、三维激光扫描、近景摄影技术）、高精度应力-应变监测系统、智能动态载荷采集系统等多元测试手段，分析急倾斜煤层走向长壁开采卸荷作用下顶板倾向结构区域转换与平衡特征、底板潜在滑移面变形破坏失稳特征、区段煤柱变形破坏特征及“R-P-F”链式结构形成及演化特征，通过在采场不同位置施加多频率载荷激励，采用应力频响函数法识别施加的激励载荷沿工作面倾向、走向、垂向的分布及传递，确定卸荷采场围岩应力传递方式及路径，构建采场围岩应力传递三维形态模型，揭示急倾斜煤层走向长壁开采采场空间围岩应力动态传递规律。

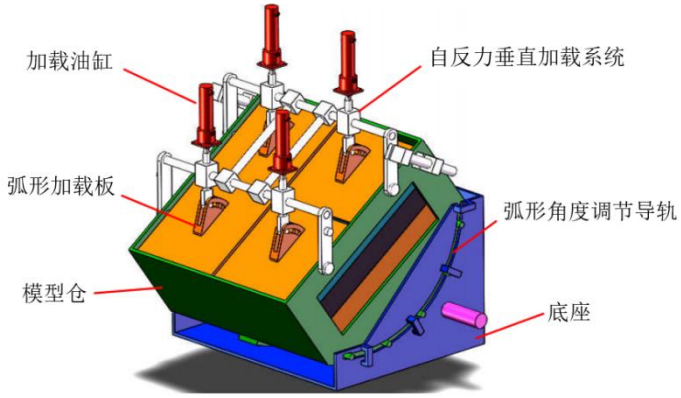


图 2-14　三维加卸荷物理相似模拟实验平台

2.案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是通过卸荷岩体力学实验、多维物理相似模拟、多元数值计算、理论分析和现场监测相结合的综合研究方法，解决倾斜层状岩体开采卸荷工程问题。通过建立倾斜层状岩体卸荷等效力学模型和卸荷屈服准则，以及急倾斜走向长壁采场“R-P-F”链式结构关系模型和物理力学模型，揭示了急倾斜煤层开采中“煤柱-岩层”应力传播衰减机理及空间形态特征和链式结构形成机理，以及“R-P-F”链式结构灾变及断链减灾机理。在理论层面结合系统应用进行了创新。从教学科研互补的角度来看，本案例是对急倾斜走向长壁采场“顶板-煤柱-底板”链式结构稳定性的理论探究，具有严谨的科学性质，使学生更加深刻的对理论知识有生动的理解，锻炼学生运用理论知识解决实践问题的能力。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 2-5 所示。

表 2-5 教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	急倾斜煤层走向长壁开采卸荷相似模拟和数值计算	应力-应变与载荷-位移的等效转换	“R-P-F”链式结构关系模型和物理力学模型对链式结构形成机理的意义
2	三维加卸荷相似模拟实验平台	急倾斜煤层开采采场空间围岩应力动态传递规律	围岩应力传递的三维形态模型揭示岩层开采中应力传递的规律
3	急倾斜煤层动力灾害及开采防治	“R-P-F”链式结构灾变及断链减灾机理	多源动力耦合致灾机理

3.支撑材料

[1]. 王红伟,伍永平,解盘石.大倾角煤层开采覆岩应力场形成及演化特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(08):1022-1026.

[2]. 王红伟,伍永平,曹沛沛，等.大倾角煤层开采大型三维可加载相似模拟试验[J].煤炭学报,2015,40(07):1505-1511.

[3]. 王红伟,宋远洋,焦建强，等.大倾角煤层断层带回采巷道动载失稳机理[J].采矿与安全工程学报,2022,39(05):971-980+991.

[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.

第二部分：浅埋煤层开采与岩层控制

一、科研项目基本信息

科研项目背景：本案例库在 2 项国家自然科学基金面上项目、1 项国家自然科学基金青年基金项目和 10 余项省部级课题资助下，针对榆神府矿区浅埋煤层开采研究展开了研究。主持完成企业委托创新项目 40 余项，发表学术论文 50 余篇，其中 SCI、EI 等检索 20 余篇，获国家专利 4 项。获省部级科学技术二等奖、三等奖共 6 项。依托的科研项目信息如表 3-1 所示。

表 3-1　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	国家自然科学青年基金项目	浅埋煤层粘土层隔水性采动破坏及控制机理研究	51204133
2	国家自然科学基金项目	浅埋近距房柱式采空区上下残采围岩结构及失稳机理研究	51774229
3	国家自然科学基金项目	区域隔水关键层采动破坏的突水致灾机理与防治研究	51474173

成果名称：近距浅埋煤层柱式采空区下重复采动覆岩结构破坏及控制

主持人：张杰

获奖情况：省部级科学技术二等奖、三等奖共 7 项

二、科研促进教学案例

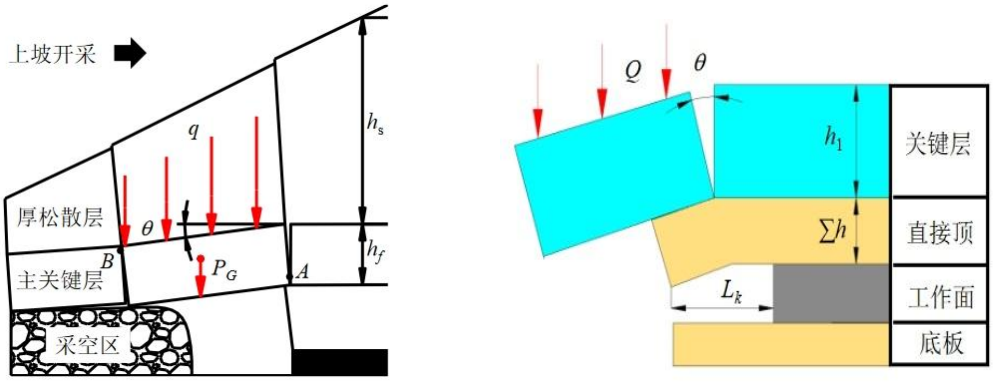
（一）案例 1：极近距离沟谷地形下工作面矿压规律

1.案例介绍

我国西部神府东胜煤田是世界最大的浅埋煤田，20 世纪 90 年代初国家开始开发神东煤田，已经建成 2 个亿吨级现代化特大型矿区，是国家的重要能源基地。神东煤田的典型特点是储量大，煤层多，煤质好；埋藏浅，基岩薄，松散层厚，地表生态环境脆弱，尤其是过沟谷开采时，产生的采动裂缝将会引起漏风、漏水等一系列影响矿井安全生产的问题。因此，针对陕北地区薄基岩厚松散层采动裂缝发育问题，研究其在沟谷地形下采动裂缝的发育规律，将有助于特殊地形下浅埋煤层的安全高效开采。

（1）沟谷地形矿压特征

浅埋近距离煤层开采时，随着开采煤层综合采厚逐渐增大，在地表沟谷地形的影响下，造成工作面采场矿压显现剧烈，尤其是在沟谷地貌上坡阶段。浅埋煤层采场关键块块度比较大（1.0~1.4），顶板结构将形成“短砌体梁”结构，该结构难以保持稳定，将出现滑落失稳导致架后切落；上覆松散层厚度随着上坡而逐渐增大，而以“剪切-回转”的形式作用在顶板之上。随着上覆松散层的增大覆岩承载载荷增大，而导致沟谷地貌下上坡阶段的矿压增大。



（a）上坡开采阶段周期来压关键层受力　　（b）采场顶板受力

图 3-1　沟谷地貌开采矿压特征

（2）采场矿压显现影响因素

浅埋煤层出现来压强烈的主要原因和其关键层的构成有关，普通采场顶板基岩较厚，存在多组关键层，最接近采场的下组关键层受到其上部多组关键层的保护而处于减压区，因此采场压力并不大。而浅埋煤层仅有 1~2 组关键层，其上部直到地表均为软弱的载荷层，顶板结构不易稳定，导致来压迅速。在沟谷地貌下开采时，覆岩结构及采场矿压显现规律受地表沟谷产状及煤层赋存条件影响，其影响因素可分为：①煤层沟底埋深②沟谷沟深③沟谷坡角④煤层采厚。

①煤层沟底埋深：当煤层沟底埋深较浅时，沟谷坡体位于采场裂隙带，甚至垮落带内，沟谷坡体受采动影响作用在覆岩承载结构岩块上，使覆岩承载结构稳定性变差，有发生滑落失稳的危险，易造成工作面强矿压现象。

②沟谷深度：基岩上覆应力载荷分布不均匀，在煤层工作面推进过程中，采场覆岩应力场的变化更加剧烈，覆岩变形、移动和破坏程度更为剧烈，工作面在通过沟谷地貌上坡段时，采场矿压显现强度更加剧烈。

③沟谷坡角：代表着工作面推进相同距离地表起伏程度越剧烈，受煤层采动影响，沟谷坡体越容易发生滑坡、翻转等危险，当沟谷坡体发生滑移、偏转等异常覆岩活动时，对顶板活动、裂隙发育情况、采场矿压以及应力场分布都会产生明显影响。

④煤层开采厚度：而沟谷地貌下覆岩应力场分布本身就同正常地形下岩层应力场分布有所不同，煤层开采厚度的增加，必然会导致采场覆岩应力场愈发复杂，覆岩变形破坏和采场矿压显现特征更加剧烈。

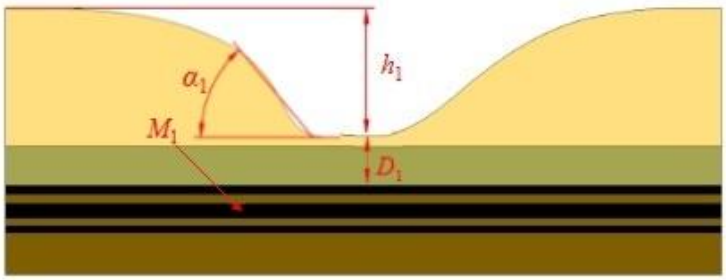


图 3-2　采场矿压显现影响因素

2.案例实际应用效果

从科学属性与实践应用效果上来看，本案例属基础理论研究，科学解释了沟谷地貌煤层

开采过程中采场矿压显现的规律，给出了沟谷地貌的下矿压特征，对指导现场岩层控制实践具有重要的指导作用。研究成果先后在神府等矿区得到了应用，以此为基础发展形成了系列岩层控制技术。

从教学科研互补的角度来看，本案例中的研究内容均由教材中基础的知识内容延伸拓展而来，是岩层控制理论的实际应用，是对矿山压力与岩层控制理论的补充与丰富，案例内容教研互促，理论与实际结合紧密，有助于学生对基础理论问题的应用化理解，场景化感知。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联如表 3-2 所示。

表 3-2　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	顶板破断	短砌体梁	基本顶破断特征及来压
2	顶板周期破断	剪切-回转	顶板结构运动对矿压的影响
3	矿压影响因素	埋深、谷深、坡角、采厚	埋深、谷深、坡角、采厚对覆岩结构的作用

3.支撑材料

[1] 浅埋近距房柱式采空区上下残采围岩结构及失稳机理研究,52004229

[2] 张杰,李宏儒,杨森，等.极近距离沟谷地形下工作面矿压规律及支架适应性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(12):48-51.

[3] 张杰,张建辰,刘清洲，等.浅埋综采工作面覆岩裂隙发育及漏风规律研究[J].煤炭工程,2021,53(03):118-123.

[4] 张杰,龙晶晶,杨涛，等.浅埋煤层沟谷下开采动载机理研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(06):1222-1227.

[5] 张杰,杨涛,王斌，等.浅埋煤层沟谷径流下开采顶板突水预测分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(05):868-875.

（二）案例 2：浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究

1.案例介绍

浅埋煤层顶板突水是由于导水裂隙带贯穿隔水层而引起的，随着煤层群的下行开采，土层与基岩层的协同隔水机理亟待明确。通过建立上层位隔水土层渗透扩展力学模型来描述裂隙发育形态；采用土–岩复合隔水层力学模型，在“给定变形”条件下计算下层位隔水土层处于整体稳定状态时的力学判据。研究表明，隔水土层根据其性质不同可以分为上层位隔水土层和下层位隔水土层；通过比较总载荷与上层位隔水土层抗拉强度的大小，当总载荷小于等于上 层位隔水土层抗拉强度时裂隙不再向下发育从而得出裂隙发育长度；在“给定变形”条件下，当下层位隔水土层长边中部位置处产生的拉应力小于或等于拉伸强度阈值时，下层位隔水土层整体结构处于稳定状态，不会产生拉伸破坏；根据韩家湾煤矿地质情况进行数值模拟，模拟结果与理论分析结果相吻合。研究可为相似地质条件下顶板突水预测提供参考。

（1）发明了固液耦合模拟实验技术

在“固-液”两相介质条件下，是保水开采研究的关键，也是尚待攻克的技术难题。本案例为解决以上问题，发明了固液耦合模拟实验装置（图 3-3），实现了隔水层稳定性“固-液”耦合相似模拟技术，能够准确模拟黏土隔水层的塑性和水理性。

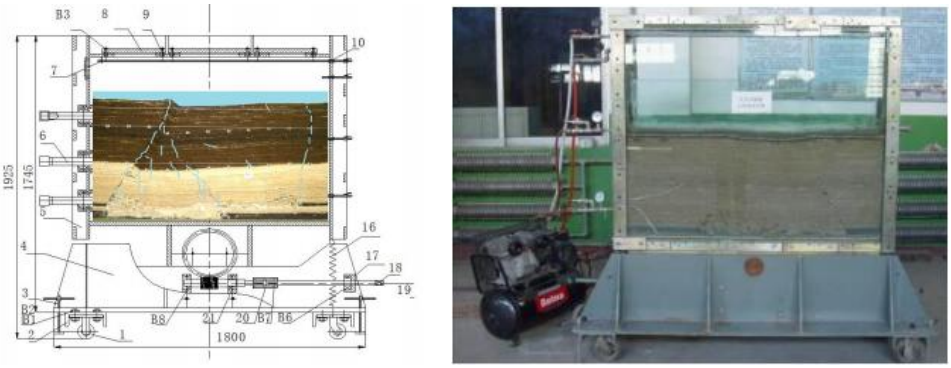


图 3-3　固液耦合模拟实验装置

（2）上层位土裂隙发育机理

裂隙受水压力作用扩展过程中，裂隙应在长宽深三个方向破裂及延伸。相应有三个流动方向，但具体条件下将裂隙受裂隙水压扩展问题简化成在裂隙长、宽的二维破裂。设 L 为裂隙的发展方向，裂隙面上任一点 L 处的压力为 P，由于裂隙表面是粗糙的，则裂隙面上的阻力与该点的压力成正比，其比例系数为裂隙面的粗糙系数 K。裂隙承受的压力包括潜水含水层水压和部分上覆载荷。

如图所示沿裂隙的发展方向取一微元，长度为 dL，宽度为 dB，其承受的水压力为 $P+\dfrac{\partial P}{\partial L}\mathrm{d}L$，裂隙面产生的阻力为 $K\left(P+\dfrac{\partial P}{\partial L}\mathrm{d}L\right)$。根据水流运动定律，$L$ 方向上有：

$$\begin{aligned}&\left(P+\frac{\partial P}{\partial L}\mathrm{d}L\right)(B-\mathrm{d}B)-PB+2\left(P+\frac{\partial P}{\partial L}\mathrm{d}L\right)K\mathrm{d}L\\&=\left[\rho\frac{1}{2}(2B-\mathrm{d}B)\mathrm{d}L\right]\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\end{aligned}\qquad(3\text{-}1)$$

式中：v—流体流速；ρ—水的密度

因为地下水流速度随时间变化很小，所以可以忽略所有二阶微量，得：

$$B\frac{\partial P}{\partial L}+2PK=0 \tag{3-2}$$

解得：

$$P = p_0 e^{\frac{KL}{B}} \tag{3-3}$$

式中：p_0—潜水层含水层水压及部分上覆荷载总压力

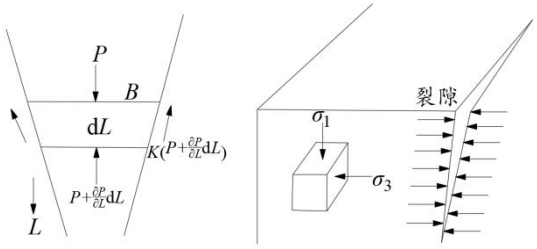


图 3-4　上层位隔水土层裂隙扩展力学模型

（3）下层位土-岩协同承载作用

实际开采中，直接顶和老顶破断垮落后，其上薄基岩一般由破碎岩体支撑着，碎石对上部基岩作用一定的分布反力，若假设薄基岩下的支撑介质具有弹性抗力，即假设符合弹性地基条件，则可将薄基岩简化为下图所示的复合隔水层弹性地基基础板。

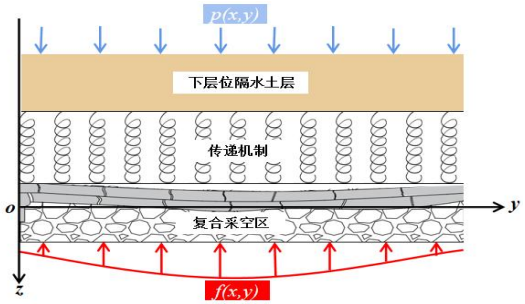


图 3-5　上复合隔水层弹性地基模型

将压实后的破碎岩石视为弹性地基，进而获得支撑载荷 $f(x,y)$的表达式为：

$$f(x,y)=k^i\omega \tag{3-4}$$

式中：k^i 为弹性地基系数。

弹性地基系数与煤岩层厚度之间的关系：

$$\left\{\begin{array}{l} k_m = E_m / h_c \\ k_i = E_i / h_i \end{array}\right\} \tag{3-5}$$

煤层及其上方 i-1 层基岩组成的“组合体”的弹性地基系数 k^i：

$$\frac{1}{k^i}=\frac{1}{k_m}+\frac{1}{k_1}+\cdots+\frac{1}{k_{i-1}} \tag{3-6}$$

式中：k_m—煤体的弹性地基系数；k_1，…，k_{i-1}—各岩层的弹性地基系数；E_m—煤体的弹性模量；E_i—任一岩层的弹性模量；h_i—煤层上方各岩层厚度；h_c—综合采高。

2.案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容源于陕北生态脆弱区开采实际问题，是理论与实践紧密结合的成功应用案例。结合韩家湾现场工程地质条件，通过理论计算得出韩家湾煤矿 214201 工作面推进过程中下层位隔水土层随基岩层的破断而发生拉伸破坏，上层位隔水土层裂隙发育深度为 17.98m，上层位隔水土层仍具备隔水能力。为韩家湾煤矿的并通过 COMSOL 数值模拟软件模拟了上层位隔水土层应力恢复过程，表明了韩家湾煤矿安全、高效、保水开采，取得了显著的社会经济效益

表 3-3　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	绿色开采实验技术	固液耦合物理模拟实验技术	丰富粘土与基岩协同隔水机理
2	上层位土裂隙发育机理	裂隙受水压力发育程度	上层位隔水土层裂隙扩展
3	潜水渗入上层位隔水土层裂隙力学模型	下位隔水土层处于整体稳定状态时的力学判据	复合隔水层弹性地基模型

3.支撑材料

[1]. 浅埋煤层高强度开采下黏土-基岩协同破坏突水机理研究，52004200

[2]. 杨涛,闫医慧,张杰，等.浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究[J].煤炭科学技术, 2023, 51(07):234-242.

[3]. 杨涛,张杰,林海飞，等.隔水土层孔隙水压畸变与顶板突水灾变的时空响应特征模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(02):317-325.

[4]. 张杰,杨涛,索永录，等.基于隔水土层失稳模型的顶板突水致灾预测研究[J].煤炭学报, 2017,42(10): 2718-2724.

第三部分：生态脆弱区充填减损开采

一、科研项目基本信息

科研项目背景：本案例库在 1 项国家级项目和 5 项企业合作项目资助下，针对西部生态脆弱区充填减损开采问题开展了研究，发表论文 30 余篇，其中 EI/SCI 20 余篇，出版专著 1 部，授权发明专利 10 项。依托的科研项目信息如表 4-1 所示：

表 4-1　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	巷柱式采空区“充填体-煤柱-直接顶”承载结构失稳机理研究	52074208
2	榆林市能源局	榆林市榆阳区浅埋煤层风积沙似膏体窄条带充填开采技术研究	/
3	榆林市上河煤矿	榆林市上河煤矿风积沙似膏体充填开采技术研究与方案设计	/
4	榆林市麻黄梁二墩煤矿有限公司	榆林市麻黄梁镇二墩煤矿水体下压覆煤体条带充填开采方案设计	/
5	榆林市常乐堡矿业有限公司	榆林市常乐堡矿业有限公司膏体充填开采方案设计	/
6	陕西涌鑫矿业有限责任公司沙梁煤矿	沙梁煤矿复杂地质条件下条带式充填开采技术研究	/

成果名称：西部浅埋煤层风积沙似膏体窄条带充填开采关键技术研究

主持人：李龙清、邵小平、唐仁龙

获奖情况：陕西省科技进步二等奖

二、科研促进教学案例

（一）案例 1：西部浅埋煤层风积沙似膏体窄条带充填开采关键技术研究

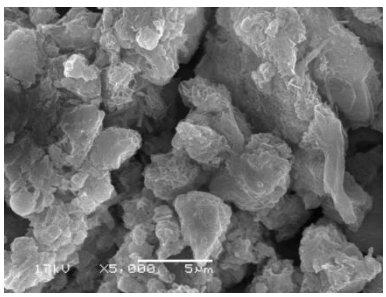
1.案例介绍

地处鄂尔多斯盆地南缘的陕北地区属典型的生态脆弱区，是我国重要能源战略承接地之一，也是我国四大国家级能源化工基地之一，煤炭资源丰富，现代煤化工产业发达。大力解决西部生态脆弱区浅埋煤层保水开采及固废处置难题是实现西部矿山绿色可持续开发，促进生态文明建设、改善人民生活质量的重要举措。窄条带充填开采是实现西部典型生态脆弱区浅埋煤层保水开采有效工艺，本案例研发了风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料，确定了浅埋煤层窄条带充填开采工艺，揭示了浅埋煤层覆岩载荷传递规律与窄条带充填体承压机理，形成了适于西部生态脆弱区浅埋煤层充填保水开采成套技术体系。

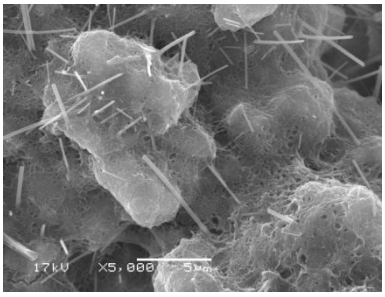
（1）风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料研发

揭示了风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料的水化特性，探究了风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料的水化硬化机理，确定了浅埋煤层窄条带充填开采风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料基准配比，风积沙:粉煤灰:水泥（质量比）=60:24:16，开展了风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料工业试验。

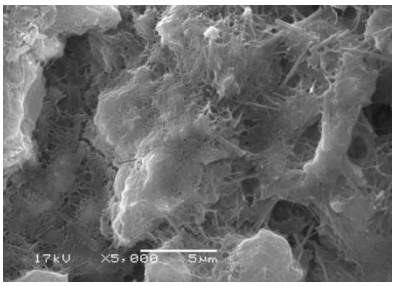
通过对养护 3 天、7 天、14 天的试件分别进行电镜扫描，结果如图 4-1 所示，当试件养护 3 天时，粉煤灰表面已经被水泥水化产生 $Ca(OH)_2$ 所腐蚀；当试件养护 7 天时，粉煤灰开始发生火山灰反应，形成了纤维状粒子的I型 C-S-H；当试件养护 14 天时，形成网络状粒子的II型 C-S-H，此时，试件的强度也随之增强。



（a）养护 3 天试件 SEM 结果



(b) 养护 7 天试件 SEM 结果

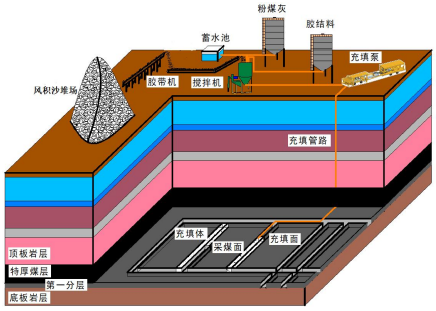


（c）养护 14 天试件 SEM 结果

图 4-1　风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料 SEM 结果

（2）浅埋煤层窄条带充填开采工艺

案例确定了在地面搅拌制备风积沙-粉煤灰似膏体充填材料、采用充填泵加压和管道输送的充填工艺流程，如图 4-2 所示。案例发展了窄条带充填开采方法，确定了基于采高的窄条带充填开采巷道布置方式，为条带充采工艺设计和巷道布置方式提供了指导；如图 4-3 所示，当采高小于 5.5m 时，将工作面顺槽沿煤层底板布置；当采高大于 5.5m 时，将工作面顺槽沿煤层顶板布置，有效提高了充填挡板架设效率及充填效率。同时，案例提出了浅埋煤层窄条带充填开采的三种（单倍、双倍和三倍）基准工艺类型，为实现条带煤柱安全高效置换回采提供了保障，为优化各阶段充填体强度、降低充填成本提供了依据；以双倍基准工艺类型为例，如图 4-4 所示，第一阶段，条带开采与条带采空区前进式充填阶段；第二阶段，条带煤柱 A 煤柱回采与 A 煤柱条带采空区前进式充填阶段；第三阶段，条带煤柱 B 煤柱回采与 B 煤柱条带采空区前进式充填阶段。



(a)工艺流程示意图

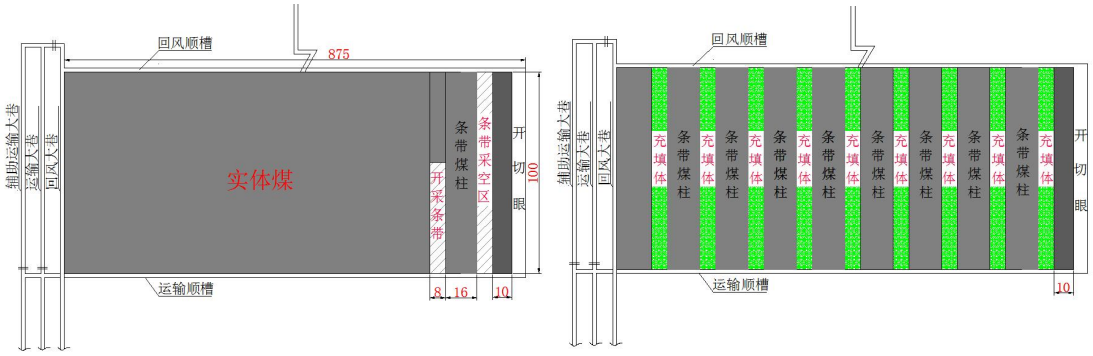


(b)榆阳区常乐堡煤矿充填站远景

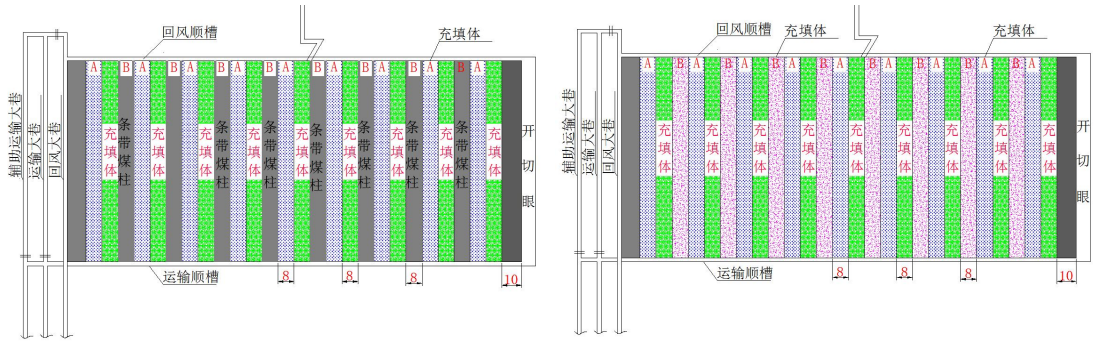
图 4-2　浅埋煤层窄条带充填工艺流程



图 4-3　浅埋煤层窄条带充填开采工作面巷道布置方式



(a1)第一阶段-工作面条带前进式开采阶段　　(a2)第一阶段-条带采空区前进式充填阶段



(b)第二阶段-条带煤柱 A 回采与充填　　(c)第三阶段-条带煤柱 B 回采与充填

图 4-4　浅埋煤层窄条带充填开采双倍基准工艺类型

（3）窄条带充填开采覆岩载荷传递规律及接顶技术

案例阐明了窄条带充填开采覆岩载荷传递规律，为窄条带充填开采参数设计、充填体强度设计提供了理论依据。当基载比 $1.5<J_Z<3.0$ 且基采比 $J_C<15$ 时，由于基岩厚度适中，上覆岩层可能形成一定的结构承载体，上覆岩层载荷将大部份作用于充填体，井下宜开展强弱搭配充填体（最后一次充填可采用弱充填）全充填开采。窄条带充填开采整个过程中煤柱及充填体保持稳定状态，充填体刚充入采空区时未承载，待左右侧煤柱被采出后，逐步参与承载，煤柱被全部置换采出，直接顶被充填体有效支承，直接顶和充填体形成了稳定的承载体系。如图 4-5 所示。

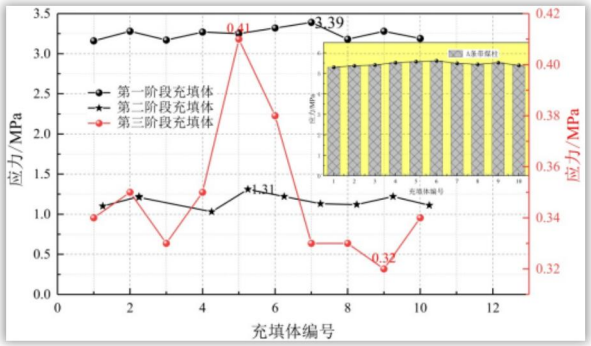


图 4-5　浅埋煤层窄条带充填开采覆岩载荷传递规律

2.案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是理论研究向实践应用的过渡，研发了风积沙-粉煤灰基似膏体充填材料，在教材现有知识体系的基础上发展了窄条带充填开采方法，确定了基于采高的窄条带充填开采巷道布置方式，提出了浅埋煤层窄条带充填开采的三种（单倍、双倍和三倍）基准工艺类型，阐明了窄条带充填开采覆岩载荷传递规律，确定了条带巷道顶部敷设多通道分布式导气管的接顶方法。本案例紧密围绕行业发展绿色环保热点问题，在典型生态脆弱区充填保水开采工程中得到了检验和完善，形成系列化实用理论与技术，成果已在榆林市上河煤矿、榆阳区常兴煤矿、泰普煤业等矿井推广应用，经济社会效益显著。

科教融合，以研促教，本案例是对减损开采岩层控制的具体体现，能够拓宽学生知识面，激发学生学习热情和主动性，增强创新精神和专业自信，不断完善以学生为主体的课程教学。通过该案例研究思路及内容，培养学生将所学的矿业理论活学活用。

本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 4-2 所示。

表 4-2　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	采空区的处理方法	浅埋煤层窄条带充填工艺	对现有教材内容的扩充
2	工作面巷道布置	浅埋煤层窄条带充填开采工作面巷道布置方式	对现有教材内容的扩充
3	煤柱支承压力分布	浅埋煤层窄条带充填开采覆岩载荷传递规律	顶板结构关系改变造成的应力分布变化

3.支撑材料

[1]. 邵小平,陶叶青,刘二帅，等.陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(07):63-70.

[2]. 邵小平,武军涛,张嘉凡，等.上行开采覆岩裂隙演化规律与层间岩层稳定性研究[J].煤炭科学技术,2016,44(09):61-66.

[3]. 唐仁龙,李龙清,邵小平，等.青岗坪煤矿综放面矿压规律及支架适应性研究[J].西安科技大学学报,2016,36(03):336-342.

[4]. 邵小平,丁自伟,尉迟小骞，等.条带开采煤柱长时效应分析及置换开采方式研究[J].煤炭工程,2015,47(08):57-59+63.

[5]. 邵小平,石平五,王怀贤.陕北中小矿井条带保水开采煤柱稳定性研究[J].煤炭技术,2009,28(12):58-61.

（二）案例 2：生态脆弱矿区短壁块段式充填采煤覆岩导水裂隙控制技术

1.案例介绍

我国煤炭发展重心已从中东部转移至西部，西部地区煤炭资源储量极大，地表为厚风积沙覆盖层且层下蕴藏着的宝贵的水资源，其地质构造简单，煤质优良。同时我国西部属干旱-半干旱区，水资源贫乏，植被稀疏，生态环境脆弱。针对矿区开采遗留的“三下”压煤，边角煤柱，工广煤柱以及不规则块段等煤炭资源的回收问题，同时为解决矸石堆积危害和煤炭开采造成的水资源流失，本文提出采用短壁块段式充填采煤技术回收该资源。因此，根据块段式充填采煤工艺特征和物理模拟相似准则，建立了块段式垮落法和块段式充填条件下的覆岩导水裂隙控制效果对比的物理相似模型，并对采场覆岩移动和导水裂隙发育特征进行了监测，试验结果表明：当充填体充入采空区后，作为永久承载体与保护煤柱共同承担上覆岩层的载荷，有效降低了上覆岩层的下沉和破坏高度，相较于块段式垮落法，实测得到块段式充填法采场上覆岩层的最大垂直变形、导水裂隙带高度和覆岩活动范围降幅分别高达 91.4%、82.5%、64.9%，可实现矿区水资源保护的目的。

（1）短壁块段式充填采煤上覆岩层移动特征

短壁块段式充填工作面通过布置 4 条支巷构成一个开采块段，相邻块段之间设有块段间隔离保护煤柱，每个块段中的煤柱采用自上而下顺序后退式进行回收，在回收过程中，每个采硐（长度一般小于 11m，宽度约为 3m）之间留有临时煤柱（煤柱宽度一般为 0.5~1.5m）。当一个块段回收完后，将矸石材料自上而下充入采硐、支巷以及联巷内，采硐间煤柱和密闭墙起到挡板作用以保证充实率达到设计要求。块段式充填采煤工艺设计主要包括开采工艺与充填工艺。开采工艺：在煤柱的回收过程中，选用 4 台履带式行走式液压支架配合连续采煤机，来保障工作面割煤和装煤工序的安全进行，行走液压支架分 2 组布置，一组布置在支巷内，另一组布置在相邻两条支巷间的联巷内（支巷和联巷的宽度均为 5m）。充填工艺：在充填过程中，利用 2 台履带式行走液压支架布置在支巷内，配合抛投机和推土机等完成采空区的充填。块段式充填开采工作面布置具体如图 4-6 所示。

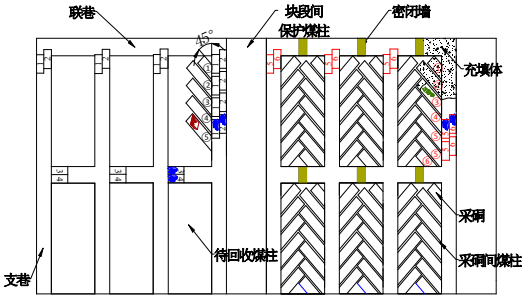


图 4-6　块段式充填工作面布置及主要设备

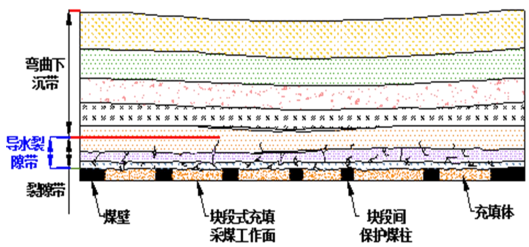
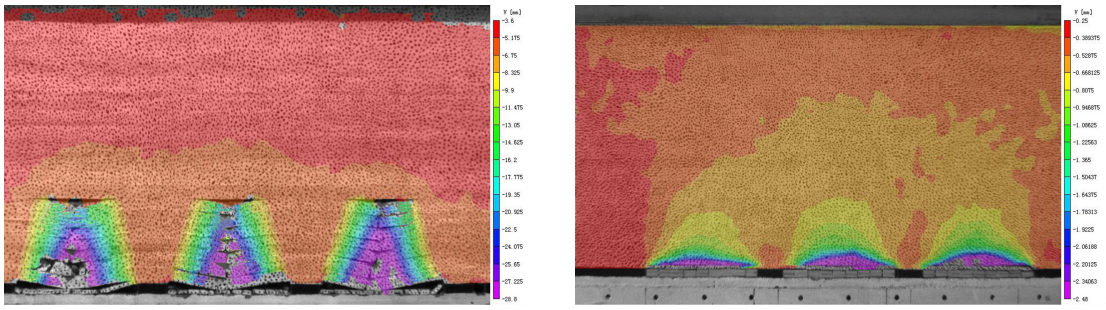


图 4-7　块段式充填采煤覆岩移动特征图

块段式充填采煤技术中，煤炭采出以后，矸石材料被及时充填入采空区，在夯实机构的作用下充分接顶，作为永久承载体与煤柱共同承担了上覆岩层的载荷，使上覆岩层只发生缓慢下沉，进而能够很好的控制岩层的移动和破断，对减少地表沉陷有着实质性的作用，从根本上改变了采场围岩的变形特征。大量实测表明，由于矸石材料充满采空区，相比较垮落开采方法，块段式充填工作面上覆岩层只存在“两带”，即裂隙带和弯曲带。块段式充填采煤覆岩变形特征如图 4-7 所示。

（2）块段式充填采煤覆岩导水裂隙控制效果对比

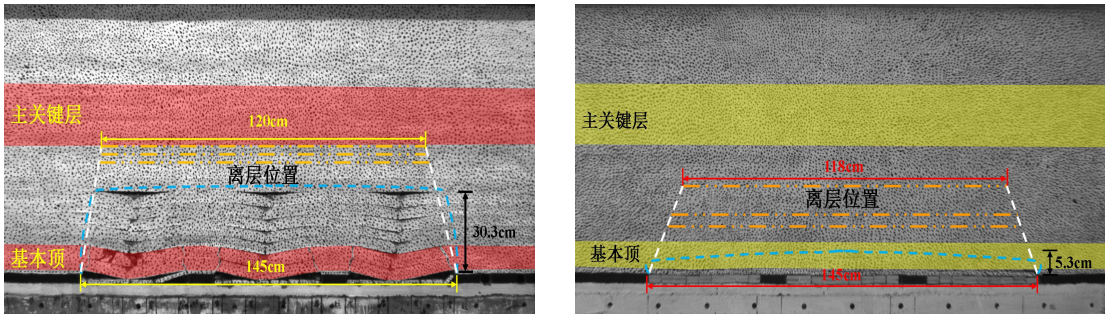
当开采区域的煤层开挖完毕后，从云图颜色变化方面看，相比较块段式垮落法，块段式充填法云图变化的色差梯度小，云图变化缓和，这从一定程度上说明块段式充填法引发的覆岩变形量及范围较小。以基本顶和主关键层为研究对象，块段式垮落法工作面上方基本顶和主关键层均有明显的下沉变形，而采用块段式充填采煤技术将煤层回收完毕后，其工作面上方基本顶的下沉量减少了 86.6%，主关键层下沉量平均降低了 27.8%。可以看出当矸石材料充入采空区后，降低了上覆岩层的下沉空间，有效地控制了开采区域的覆岩变形量。



（a）块段式垮落法覆岩垂直位移云图　　（b）块段式充填法覆岩垂直位移云图

图 4-8　不同采煤方法下覆岩垂直位移云图

当采用块段式垮落法回收煤层时，其采场覆岩导水裂隙带高度约为 30.3cm，基本顶完全发生破断，离层最高位置位约 43.3cm；而采用块段式充填法时，采动引发的覆岩导水裂隙带高度仅为 5.3cm，基本顶仅发生局部破坏，离层最高位置位约 28.3cm，有效的控制了导水裂隙的发育。此外，块段式垮落法造成的覆岩活动范围尺寸分别达到 145×120×43.3cm，而块段式充填法造成的覆岩空间运动的尺寸分别降低至 145×118×28.3cm，极大地控制了采场上覆岩层的活动范围，如图 4-9 所示，从根本上改变了采场整体的围岩应力分布情况。



（a）块段式垮落法覆岩破坏特征　　（b）块段式充填法覆岩破坏特征

图 4-9　不同采煤方法下覆岩破坏特征

2.案例实际应用效果

从科学属性与实践应用效果上来看，本案例属基础理论研究，科学解释了生态脆弱矿区短壁块段式充填采煤覆岩导水裂隙控制，对指导现场岩层移动和裂隙发育控制实践具有重要的指导作用。研究成果在陕北矿区得到了应用，以此为基础发展形成了系覆岩裂隙控制技术，指导了现场工程实践，取得了良好技术经济效益。

从教学科研互补的角度来看，本案例中的研究内容均由教材中基础的知识内容延伸拓展而来，是岩层控制理论的实际应用，也是实践研究过程中对岩层控制理论的补充与丰富，案

例内容教研互促，理论与实际结合紧密，有助于学生对基础理论问题的应用化理解，场景化感知。

在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 4-3 所示。

表 4-3　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	绿色开采技术	短壁块段式充填采煤工艺及关键设备	对现有教材内容进行扩充
2	采动覆岩移动特征	短壁块段式垮落法与短壁块段式充填法覆岩破坏特征对比	丰富和发展现有教材采场覆岩结构控制理论
3	导水裂隙发育机理	块段式充填开采过程中覆岩导水裂隙控制理论	块段式充填开采对地表生态环境损伤的影响机制

3.支撑材料

[1]. 张云,刘永孜,曹胜根，等.短壁块段式充填采煤矸石充填材料重金属离子“下行”迁移规律及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(02):284-294.

[2]. 张云,刘永孜,来兴平，等.基于导水裂隙扩展-重金属离子迁移的短壁块段式充填保水采煤机理研究[J].煤炭科学技术,2023,51(02):155-172.

[3]. 张云,曹胜根,来兴平，等.短壁块段式采煤覆岩导水裂隙发育力学特性分析[J].煤炭学报,2020,45(S2):551-560.

[4]. 张云,曹胜根,郭帅，等.含水层下短壁块段式采煤导水裂隙带高度发育规律研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(01):106-111.

[5]. 张云,曹胜根,来兴平,等.短壁块段式充填采煤覆岩导水裂隙发育机理及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(06):1086-1092.

第四部分：智能开采与灾害精准调控

一、科研项目基本信息

科研项目背景：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，针对大倾角煤层长壁采场岩层控制及智能化开采关键技术问题开展了研究，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。依托的科研项目信息如表 5-1 所示。

表 5-1　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	四川煤炭产业集团有限责任公司项目	急倾斜煤层智能化开采关键技术及装备	
8	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：急倾斜薄及中厚煤层智能化开采关键技术与装备

主持人：解盘石、王红伟

获奖情况：中国煤炭工业科技一等奖

二、科研促进教学案例

（一）案例 1：急倾斜煤层智能化开采关键技术及装备

1.案例介绍

急倾斜煤层是典型的复杂地质条件煤层，广泛赋存于我国各大矿区，是国际公认的难采煤层，其安全高效智能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。采用理论研究、室内实验、数值计算、现场测试和工业试验等多种研究方法与测试手段，系统开展了急倾斜煤层智能化开采关键技术及装备研究与实践，发现了急倾斜采场围岩与装备重力-倾角效应，揭示了急倾斜煤层开采围岩与装备系统多维度稳定性控制机制，发明了俯伪斜与斜向长壁开采系统，形成了急倾斜煤层开采沿空护巷技术体系和多煤层、多区段协同开采方法，研发了基于中心距智能调控的急倾斜支架（群）智能控制系统，研发了自适应控制的急倾斜液压支架及配套装备和智能飞矸防控体系，解决了急倾斜工作面设备自动防倒滑、防飞矸、防片帮的智能化控制难题，形成了较完善的急倾斜煤层智能化开采关键技术及装备体系，达到国际领先水平。在国内外类似条件煤层矿井得到了广泛应用，取得了显著的

经济和社会效益，开辟了复杂条件煤炭资源安全高效开发新路径。

（1）智能化综采控制技术

由工作面顺槽监控中心对综采设备（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、高产高效采煤方式各子系统不受综采自动化系统控制，以保证在检修和综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。

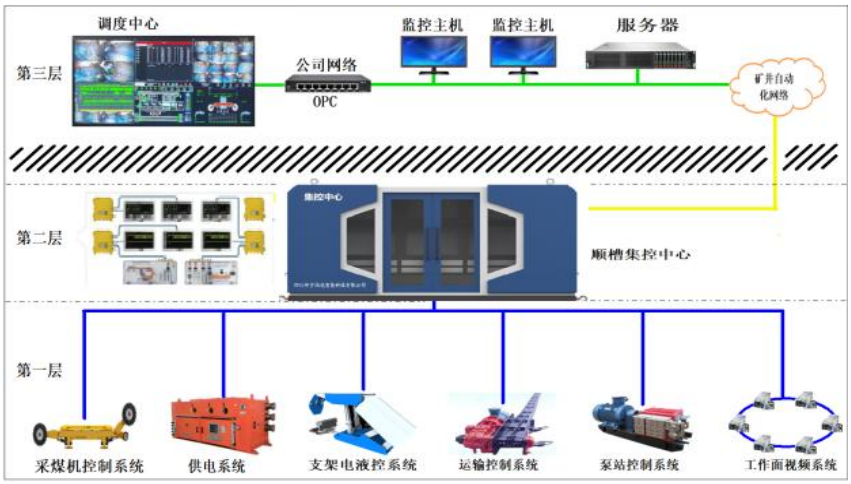


图5-1　综采智能化控制系统结构模式示意图

（2）工作面防飞矸技术研究

①工作面支架架前挡矸装置

在急倾斜工作面支架设置刚性可伸缩架前挡矸装置。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。

该工作面为智能化综采工作面，采煤机的精准定位及工作面设备监控功能对工作面正常推进具有重要作用，为保证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 5-2。

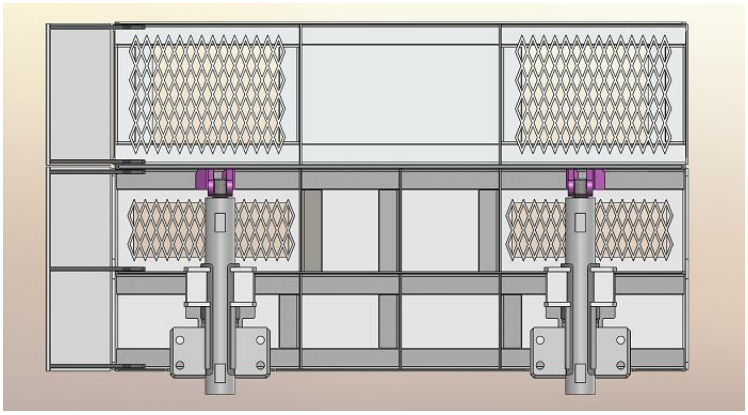


图5-2　架前挡矸装置示意图

②工作面支架架间挡矸装置

在急倾斜工作面支架间每隔 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 5-3。

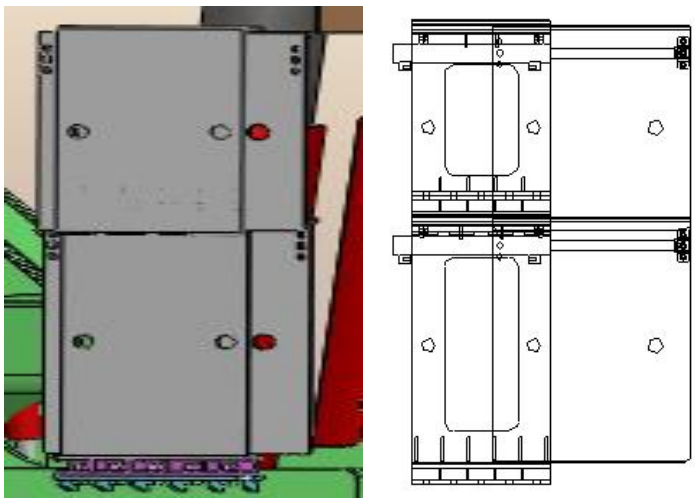


图5-3　架间挡矸装置示意图

2.案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是理论研究向实践应用的过渡。本案例基于急倾斜采场围岩与装备重力-倾角效应和急倾斜煤层开采围岩与装备系统多维度稳定性控制机制，发明了俯伪斜与斜向长壁开采系统，形成了急倾斜煤层开采沿空护巷技术体系和多煤层、多区段协同开采方法，研发了基于中心距智能调控的急倾斜支架（群）智能控制系统和自适应控制的急倾斜液压支架及配套装备和智能飞矸防控体系。

从教学科研互补的角度来看，本案例中的研究内容均由急倾斜煤层开采和智能化开采相关知识融合延伸拓展而来，是急倾斜煤层岩层控制理论的实际应用，也是实践研究过程中对岩层控制理论的补充与丰富。案例内容教研互促，理论与实际结合紧密，有助于学生对基础理论问题的应用化理解，场景化感知。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 5-2 所示。

表 5-2　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	智能化综采控制技术	基于重力-倾角效应的采场围岩与装备系统多维稳定性控制理论	急倾斜煤层开采岩层控制
2	工作面防飞矸技术	急倾斜液压支架及配套装备和智能飞矸防控体系	自适应智能化控制系统
3	复杂煤层急倾斜智能化综采巷道布置及回采工艺	急倾斜煤层开采围岩与装备系统多维度稳定性控制机制	回采工艺与“三机”配套

3.支撑材料

[1]. 伍永平,胡博胜,王红伟，等.大倾角煤层长壁开采工作面飞矸致灾机理研究[J].煤炭学报,2017,42(09):2226-2234.

[2]. 王红伟,伍永平,解盘石，等.新工科背景下煤矿智能开采“金课”设计与实践探索[J].高教学刊,2020(17):115-118.

[3]. 王红伟,伍永平,解盘石,等.大倾角煤层长壁大采高工作面煤壁稳定性的采厚效应[J].采矿与安全工程学报,2018,35(01):64-70.

[4]. 伍永平,胡博胜,王红伟，等.大倾角煤层飞矸运移能量演化特征仿真与实验研究[J].西安科技大学学报,2018,38(01):37-42.

[5]. 解盘石,王红伟,孙轩，等. 一款智能无人化采掘一体机[P]. 陕西省：CN217872795U,2022-11-22.

（二）案例 2：工作面超前支承压力解析表达及其调控机制

1.案例介绍：

在基本顶初次破断前，采空区上部岩层的重量不断地向开采空间四周转移，从而在采场四周形成支承压力带，工作面前方形成超前支承压力，在关键层初次破断前，随着采出宽度增大，采场四周的支承压力峰值逐渐增大，当关键层初次破断时，支承压力峰值达最大值。工作面超前支承压力分布范围与峰值大小是最基础也是最关键的矿压数据，对采场矿压管理与顶板控制至关重要。

“工作面超前支承压力解析表达”融合《材料力学》、《结构力学》、《矿山压力与岩层控制》、《地下建筑结构》等学科知识，构建坚硬顶板-煤体精细化力学模型，实现对超前支承压力的解析表达。利用该模型可进一步分析埋深、关键层力学性质、煤体力学性质、工作面支护强度等因素对支承压力的调控机制。

（1）坚硬顶板-工作面精细化力学模型

将来压前的顶板按照荷载与地基条件不同划分为四区段，如图 5-4 所示。其中第一区段位于采空区上部，无地基支撑受均布荷载；第二区段位于工作面上方，受到增压荷载作用与工作面支架支承；第三区段，受到增压荷载作用与塑性煤体支承；第四区段，受到降压荷载作用与弹性煤体支承。

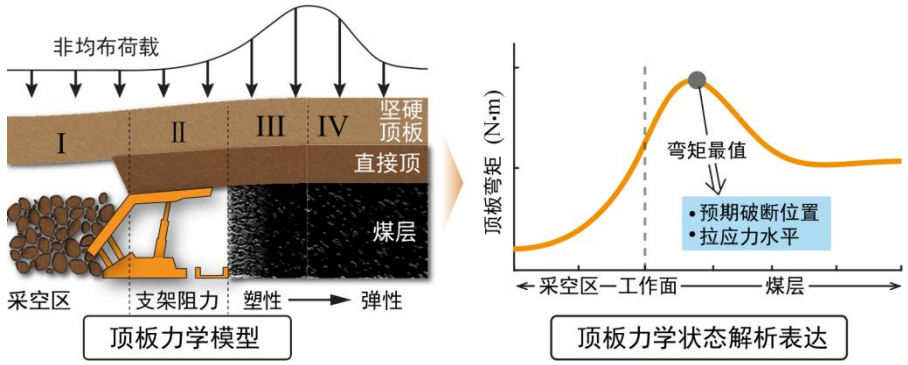


图 5-4　坚硬顶板-工作面精细化力学模型

（2）坚硬顶板–煤体力学模型叠加法简化求解

将所构建坚硬顶板-煤体力学模型利用叠加法进行简化求解，如图 5-5 所示。其中第一区段顶板左端在初次来压为导向边界，在周期来压前为自由边界，右侧为区段一与区段二顶板界面处的弯矩与剪力条件，利用材料力学梁模型进行求解；第二区段顶板左端为区段一与区段二顶板界面处的弯矩与剪力条件，右端为区段二与区段三顶板界面处的弯矩与剪力条件，利用材料力学梁模型进行求解；第三区段顶板左端为区段二与区段三顶板界面处的弯矩与剪力条件，右端为区段三与区段四顶板界面处的弯矩与剪力条件，利用弹塑性地基有限长梁进行求解；第四区段顶板左端为区段三与区段四顶板界面处的弯矩与剪力条件，右端为半无限长条件，利用弹塑性地基半无限长梁进行求解。

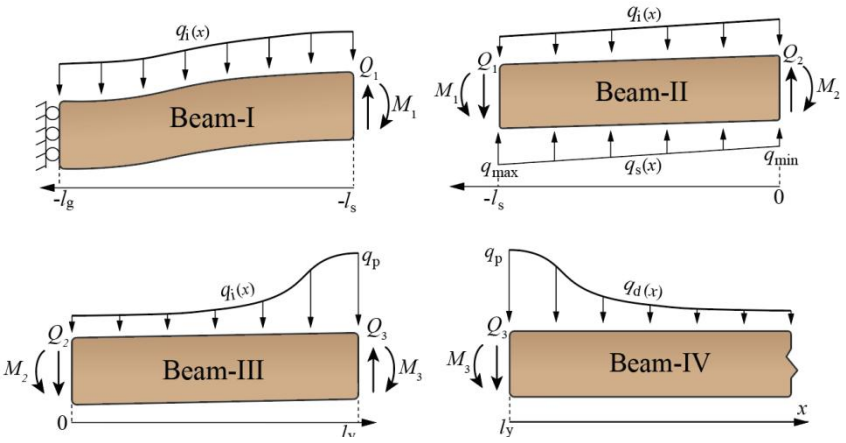


图 5-5　坚硬顶板-煤体力学模型叠加法简化求解

（3）超前支承压力的调控机制

利用所构建坚硬顶板-煤体力学模型可计算出顶板的挠度、角度、弯矩、剪力、拉力、应变能密度以及煤体上方的支承反力即支承压力。通过控制模型相应参数的取值范围可以量化该参数对支承压力的控制规律，例如埋深可以调节荷载大小实现，岩层力学性质可以调节顶板弹性模量，工作面支架工作阻力可以调节区段三顶板的支承力。图 5-6 为塑性区煤体不同刚度条件下的顶板力学状态与支承压力分布规律。

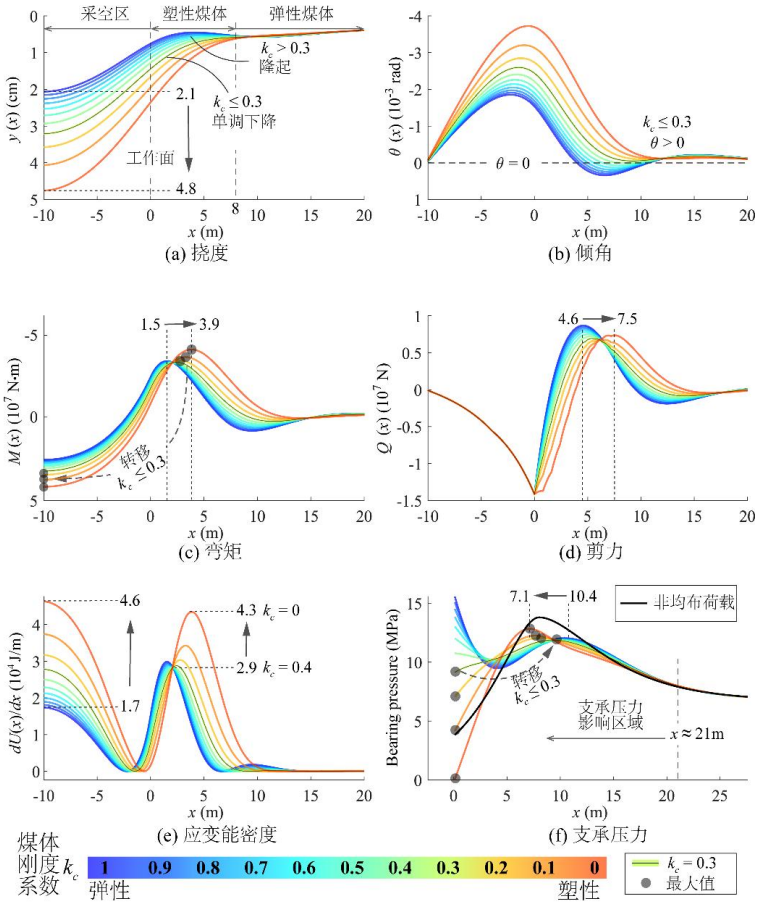


图 5-6　超前支承压力的调控机制

2.案例实际应用效果

本案例的研究内容是基于《矿山压力与岩层控制》、《材料力学》、《地下建筑结构》等课

程内容的延深与创新，针对超前支承压力量化求解问题，在原有较为简化的力学模型上，创新将顶板按照力学边界条件不同划分若干区段。融合专业课程与基础课程的课程基础知识，实现了科研-教学的融会贯通。在本案例中蕴含的教学内容与科研发现之间对应的关联关系如表 5-3 所示。

表 5-3　教学内容与科研发现的对应关系

序号	教学内容	科研发现	内在联系
1	《矿山压力与岩层控制》基本顶的初次来压与周期来压，顶板压力的估算，回采工作面支承压力的分布。	发现了工作面支护强度与煤体塑性区对顶板力学状态的影响规律。	采场支承压力的分布规律及其控制机制。
2	《材料力学》弯曲变形分析，工程中的弯曲变形问题，挠曲线的微分方程，用叠加法求弯曲变形。 《地下建筑结构》弹性地基梁理论。	构建了精细化坚硬顶板-工作面精细化力学模型。	不同边界、荷载、地基条件下的梁模型求解。

3.支撑材料

[1]. 姬松涛,张开智,张兆一，等.基于岩梁倾角监测的顶板初次来压试验研究[J].矿业研究与开发,2016,36(01):53-57.

[2]. 张开智,姬松涛,张兆一，等.基于倾角的顶板初次断裂前岩梁跨度反演分析[J].矿业研究与开发,2016,36(04):94-98.

[3]. 王树立,张开智,蒋金泉，等.超厚高位红层砂岩破断运动与矿震活动规律[J].采矿与安全工程学报,2016,33(06):1116-1122.