

西安科技大学本科生教学案例库建设项目

案例库名称：“西部矿井开采岩层控制理论与实践”
科研成果转化教学案例

适用课程：矿山压力与岩层控制

专业名称：采矿工程

学院名称：能源学院

项目负责人：黄庆享

主要完成人：郎丁、崔峰、杜君武、贺雁鹏、解盘石、
伍永平、来兴平

西安科技大学教务处 制

2022年8月30日

目 录

前言	- 1 -
1. 案例库建设的意义	- 1 -
2. 国内外相关案例库建设情况与发展趋势	- 1 -
3. 本案例库的应用前景与实用价值	- 2 -
4. 案例建设方案	- 3 -
第一部分：浅埋煤层开采岩层控制理论与技术	- 4 -
一、科研项目基本信息	- 4 -
二、科研促进教学案例	- 5 -
（一）案例 1：浅埋煤层矿压特征与浅埋煤层定义	- 5 -
（二）案例 2：浅埋煤层开采老顶周期来压的结构分析	- 8 -
第二部分：大倾角煤层开采岩层控制理论与技术	- 11 -
一、科研项目基本信息	- 11 -
二、科研促进教学案例	- 11 -
（一）案例 1：大倾角煤层长壁采场顶板破断与岩体结构变异	- 12 -
（二）案例 2：大倾角长壁采场“支架-围岩”系统稳定性控制	- 15 -
（三）案例 3：大倾角煤层开采方法创新与成套技术装备研制	- 18 -
（三）案例 4：急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道失稳机制及控制	- 20 -
第三部分：西部生态脆弱矿区保水减损开采岩层控制研究	- 22 -
一、科研项目基本信息	- 22 -
二、科研促进教学案例	- 24 -
（一）案例 1：浅埋煤层保水开采岩层控制（隔水层稳定性）研究	- 24 -

(二) 案例 2: 榆神府矿区浅埋煤层柔性条带充填理论与技术	- 28 -
第四部分: 西部矿区动力灾害预报与科学采矿	- 32 -
一、科研项目基本信息	- 32 -
二、科研促进教学案例	- 32 -
(一) 案例 1 : 急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术	- 33 -
(二) 案例 2 : 急倾斜特厚煤层群采动应力畸变致诱动力灾害控制	- 36 -
(三) 案例 3 : 不同孔径冲击倾向性煤样破坏特征能量演化规律	- 39 -
(四) 案例 4 : 急倾斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定	- 43 -
(五) 案例 5 : 不同卸压措施下“双能量”指标协同预警及调控	- 47 -

前言

1. 案例库建设的意义

《矿山压力与岩层控制》课程是采矿工程专业的主干课程，是研究煤层采掘后岩层运动规律及其控制方法的科学，是力学在采矿工程实践密切结合的创新产物，是创新采矿方法、维护采掘空间安全、保障安全高效绿色开采重要课程，被誉为采矿工程的灵魂。课程的主讲的理论技术来自于采矿岩层控制工程实践，课程内容随矿山压力与岩层控制科学研究的发展而更新。科研案例库的建设，对学生深刻理解矿山压力原理，正确应用岩层控制技术，提高教学质量，具有重要作用和意义。

案例教学是在学生掌握了有关基本知识和分析技术的基础上，在教师的精心策划和指导下，根据教学目的和教学内容的要求，运用典型案例，将学生带入特定事件的现场进行案例分析，通过学生的独立思考或集体协作，进一步提高其识别、分析和解决某一具体问题的能力，同时培养正确的管理理念、工作作风、沟通能力和协作精神的教学方式。著名教育家杜威曾说过：最好的一种教学，就是牢牢记住学校教材和实际经验二者相互联系的必要性，使学生习惯于寻找这两方面的相互的联系。案例教学法是一种寻找理论与实践恰当结合点的十分有效的教学方式。

案例教学是根据教学目的，通过教师组织学生通过实际案例的学习与、讨论和交流，加深对基本原理和概念理解，提高应用知识解决问题能力的一种教学方法，其本质是理论与实践相结合的互动教学。建立案例库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的提高，也有利于教师个人和团队的发展。案例的数量和质量决定了案例教学法的效果，课程案例库的建设对不断提高案例的数量和质量具有重要作用。

2. 国内外相关案例库建设情况与发展趋势

案例教学法最早可以追溯到古希腊、罗马时代，但它真正作为一种教学方法的形成和运用，却发生在 1910 年美国哈佛大学的法学院和医学院。20 世纪初，案例教学开始被运用于商业和企业管理学，其内容、方法和经验日趋丰富和完善，并在世界范围内产生了巨大的影响。现代社会发展加速，市场竞争日趋白热化，对知识的实际应用能力提出了更高要求。案例教学作为一种行之有效的、务实且有明确目的的、以行动为导向的训练越发受到人们的广泛青睐。全世界范围内享有盛名的就是哈佛商学院案例，这种方法为社会培养的大量杰出的工商界骄子，使得案例教学法成为一种风靡全球的、被认为是代表未来教育方向的成功教育模式。

哈佛学者斯腾恩伯格认为，优秀教师与普通教师存在三大差别特征，即知识的差别、效率的差别和洞察力的差别。就知识而言，包括三个层面，即原理性知识、特殊

案例的知识、把原理和规则运用到特殊案例中的知识。一个优秀的教师应该具备三个层次的完备的知识体系。

人的智力是由内智力和外智力两部分共同构成的，内智力指大脑的思维能力，外智力指人所拥有的知识、经验和技能。内智力是智力的核心，外智力是智力的外壳。智力竞争更多体现为内智力的较量，教育的中心必须由知识的系统积累转变为开发学生的智力潜能，尤其是开发其智力的核心-大脑思维能力，案例教学法是一种致力于提高学生综合素质的面向未来的教学模式。

哈佛案例教学一般分为三类：一是问题评审型，就是给出问题和解决问题的方案，让学生去评价；二是分析决策型，就是没有给出方案，需要学生讨论分析以提出决策方案；三是发展理论型，就是通过案例，发现新的理论生长点，发展并不断完善理论体系。案例教学法对调动学生成为积极参与者，而不是消极被动的听众。案例教学使得学生成为了教学活动的主体，形成了学生自主学习、合作学习、研究性学习和探索性学习的开放型的学习氛围。

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。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。

近年来，本科课堂教学质量不断得到重视，教学案例库的建设也取得长足发展。主要体现在案例库建设资金得到落实，根据学科专业特点设计了案例评估指标体系，促进了案例教学发展。对于采矿工程《矿山压力与岩层控制》课程而言，各高校课程案例多以任课教师个人的科研素材为主，不利于案例资源共享，也容易成案例信息“孤岛”，缺乏系统性，辐射带动作用有限。我校目前尚未系统建设《矿山压力与岩层控制》课程案例库，亟待围绕最新科研实践成果，建设“聚焦前沿、取材典型、系统集成”的教学案例库，加强省级一流课程建设，提高课程目标达成与人才培养质量。

3. 本案例库的应用前景与实用价值

《矿山压力与岩层控制》课程由我国学者根据中国煤炭开采实践需求而自主创立，前身可追溯至1961年由原西安矿业学院（现西安科技大学）刘听成教授为采矿1957级开设的《矿山压力》选修课。六十余年来，课程紧密结合煤炭工业实践，不断赓续发展，为行业人才培养与科技进步奠定了坚实基础。理论与实践的紧密结合是课程的属性特色，课程理论内容体系的不断完善丰富也支撑着采矿技术创新发展。可以说，实践是矿山压力与岩层控制的“灵魂”。案例教学方法与课程强烈的实践属性适配性强，是实现知识内容由“实践-理论-实践”迁移应用的有效路径。因此，建立系统的教学案例库十必要，对提升采矿学生创新素质和实践能力具有重要作用。

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。长期以来聚焦西部

复杂埋藏条件及生态脆弱矿区的煤层开采与岩层控制问题，积累孕育了大倾角煤层长壁开采岩层控制理论与技术、浅埋煤层开采岩层控制理论与技术、西部矿区动力灾害预报与科学采矿、生态脆弱矿区减损保水开采等特色学科研究方向，为课程教学案例库的构建提供了丰富详实的案例，可以贯穿课程知识内容体系。西部是我国煤炭资源富集区和煤炭开发的主战场，依托我校矿压研究特色，聚焦我国西部煤炭资源开发中的岩层控制问题，梳理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，为西部煤炭行业培养合格人才具有重要意义。

采矿工程是一个复杂的系统工程，核心在于保障回采空间安全的前提下进行高效开采。这一活动中，矿山压力的演化带来的一系列岩体力学响应是一切矿山安全问题的根源之一，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、矿井防灭火等问题。若案例库建设能结合以上突出问题，并突出西部安全绿色开采岩层控制特色，提升创新能力和就业竞争力，应用前景广阔。

4. 案例建设方案

根据西安科技大学矿业工程学科的特色科研方向，聚焦西部煤炭资源开发中的岩层控制问题，结合课程教学中的关键知识内容，建设科研教学转化案例库。

“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
浅埋煤层开采岩层控制理论与技术	1 浅埋煤层矿压特征与浅埋煤层的定义	关键层理论
	2 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析	短砌体梁、台阶岩梁
	3 浅埋煤层长壁开采顶板结构理论与支护阻力确定	顶板结构、顶板压力估算
	4 浅埋近距离煤层群分类及其采场支护阻力确定	底板支承压力传播、顶板压力估算
	5 浅埋煤层大采高工作面顶板破断角实测研究	顶板“o-x”破断
大倾角煤层长壁开采岩层控制理论与技术	1 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征	顶板结构、关键层理论
	2 大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳分析	支承压力非对称分布
	3 大倾角煤层开采“R-S-F”系统稳定性及控制模式	支架围岩关系、顶板结构
	4 绿水洞煤矿大倾角煤层综采技术研究与应用	支架围岩关系、顶板结构
	5 急倾斜煤层巷道围岩变形破坏特征及支护技术	巷道矿压显现与支护技术
西部生态脆弱矿区保水减损开采岩层控制研究	1 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究	岩层移动引起的采动损害
	2 浅埋煤层保水开采岩层控制研究	岩层移动引起的采动损害
	3 浅埋煤层群开采区段煤柱应力与地表裂缝耦合控制	巷道矿压显现与维护原理
	4 陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用	条带/充填开采岩层移动
西部矿区动力灾害预报与科学采矿	1 急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术	煤矿动压显现及控制
	2 急斜特厚煤层群采动应力畸变致诱动力灾害控制	冲击矿压发生机理
	3 不同孔径冲击倾向性煤样破坏特征能量演化规律	冲击矿压危险性评定
	4 急斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定	冲击矿压防治
	5 不同卸压措施下“双能量”指标协同预警及调控	冲击矿压预测预报

矿山压力与岩层控制科研转化本科教学案例

第一部分：浅埋煤层开采岩层控制理论与技术

一、科研项目基本信息

科研项目背景：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 1-1 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荷载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

成果名称：浅埋煤层岩层控制理论及其应用

获奖情况：陕西省科学技术一等奖、河南省科学技术一等奖

主持人：黄庆享

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，研究成果被编入《矿山压力与岩层控制》教科书和《煤矿总工程师技术手册》，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顶板台阶下沉机理，基于单一关键层和双关键层结构，提出了浅埋煤层定义；建立了采场初次来压的“非对称三铰拱”结构模型和周期来压的“台阶岩梁”结构模型，阐明了浅埋煤层工作面“埋藏浅，压力大”的来压机理；提出了地表厚沙土层载荷传递因子，测定了顶板结构端角挤压和端角摩擦系数，基于支架“给定失稳载荷”工作状态，提出了合理支护阻力定量计算方法；揭示了浅埋煤层群开采的覆岩垮落规律和结构特征，提出了以间隔层关键层和间采比为指标的浅埋近距离煤层群的分类，建立了“浅埋极近距离煤层”、“浅埋单关键层近距离煤层”和“浅埋双关键层近距离煤层”顶板结构模型，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。

本案例既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总结，又是对矿山压力与岩层控制课程内容的继承与丰富。

（一）案例 1：浅埋煤层矿压特征与浅埋煤层定义

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。浅埋煤层开采，工作面动载明显，顶板呈现台阶下沉，造成顶板压力灾害，高强度开采对地表环境破坏严重，亟待研究。系统研究了浅埋煤层开采的矿压特征，首次提出了浅埋煤层定义，为浅埋煤层岩层控制实践提供了科学依据和理论基础。

（1）浅埋煤层矿压特征

浅埋煤层工作面的主要矿压特征是老顶破断运动直接波及地表，顶板不易形成稳定的结构，来压存在明显动载现象，支架处于给定失稳载荷状态，揭示了浅埋煤层顶板垮落明显的“台阶下沉”现象。老顶初次破断形成“非对称三铰拱”结构，周期性破断形成“台阶岩梁”结构；老顶初次破断形成主动板块和从动弧形过渡区，主动板块滑落失稳导致来压，弧形过度区易溃沙；岩板周期性破断形成微弧岩条结构，岩条超前破断是工作面中部压力大的原因，如图 1-1 所示。

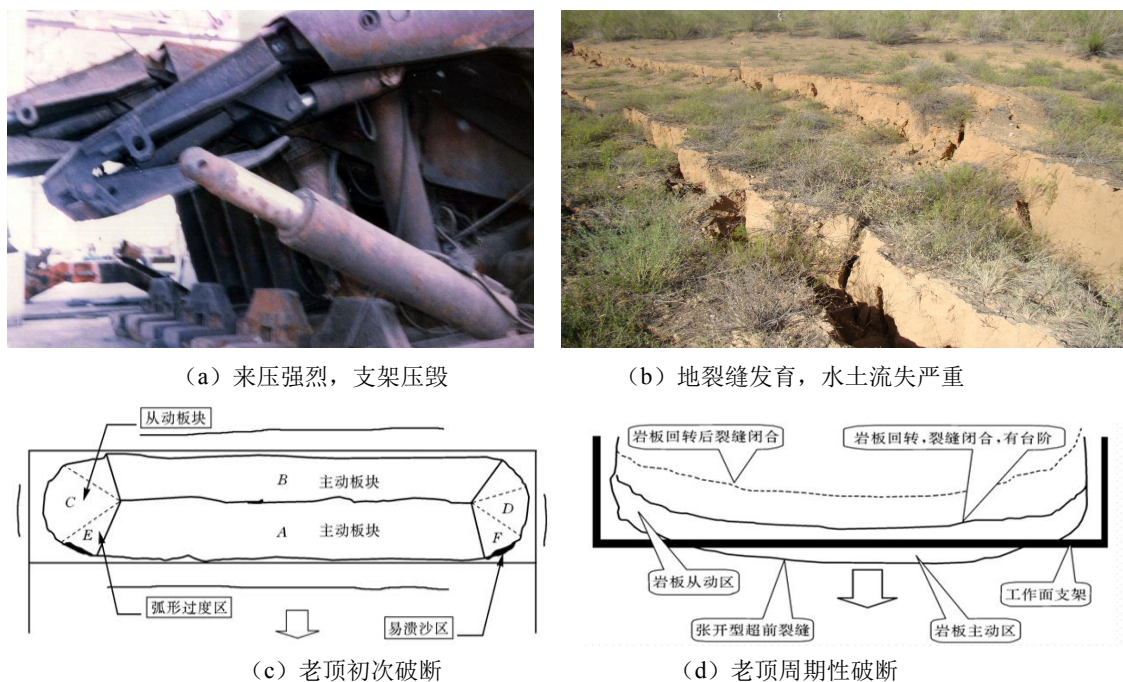


图 1-1 浅埋煤层开采灾害及顶板破断特征

(2) 浅埋煤层的定义

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。以基载比和单双关键层为指标，浅埋煤层可分为：典型浅埋煤层和近浅埋煤层。

(1) 典型浅埋煤层：对于基岩比较薄、松散载荷层厚度比较大的浅埋煤层，其顶板破断运动表现为整体切落形式，易于出现顶板台阶下沉。此类厚松散层、薄基岩浅埋煤层称为典型的浅埋煤层，可以概括为埋藏浅、老顶为单一关键层结构的煤层。

(2) 近浅埋煤层：对于基岩厚度比较大、松散载荷层厚度比较小的浅埋煤层，其矿压显现规律介于普通工作面与浅埋煤层工作面之间，顶板结构呈现两组关键层，存在轻微的台阶下沉现象，可称为近浅埋煤层。覆岩垮落主要形成冒落带和裂隙带“两带”；基岩厚度较大时，形成双关键层，具有大小周期来压。

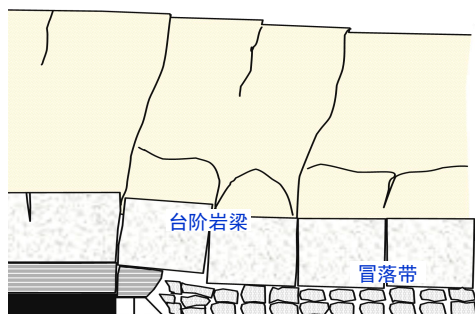


图 1-2 典型浅埋煤层台阶岩梁与两带

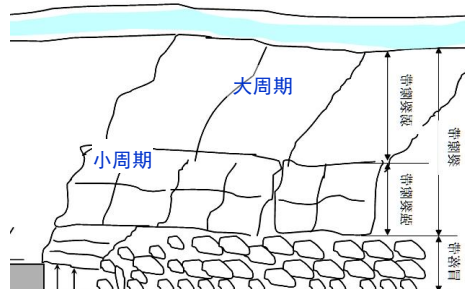


图 1-3 近浅埋煤层双关键层三带特征

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，科学解释了浅埋煤层长壁开采过程中采场矿压显现的规律，给出了浅埋煤层的科学定义，对指导现场岩层控制实践具有重要的指导作用。研究成果先后在陕煤、神东等矿区得到了应用，以此为基础发展形成了系列岩层控制技术，极大的促进了西部浅埋煤层长壁采场工作面的安全高效绿色开采。

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 1-1 所示。

表 1-1 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	基本顶初次破断	非对称三铰拱结构	基本顶初次破断特征及来压
2	基本顶周期性破断	台阶式下沉、动载明显	顶板结构运动对矿压的影响
3	关键层理论	台阶岩梁结构	关键岩层对覆岩结构的作用

3. 支撑材料

[1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究, 中国矿业大学出版社, 2000.

钱鸣高院士评价: 填补空白; 李洪昌教授在《煤炭学报》发表评介: 开拓了岩层控制新领域

[2] 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(8):1174-1177.

获奖: 《岩石力学与工程学报》创刊 30 周年优秀论文作者, 中国岩石力学与工程学会, 2012.6.6

[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.

[4] 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.

[5] 黄庆享, 张沛. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009 (9):2722-2726.

[6] 黄庆享, 胡火明, 刘玉卫, 蔚保宁. 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.

[7] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构理论与支护阻力确定[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002(1):70-72.

[8] 黄庆享, 田小明, 杨俊哲等. 浅埋煤层高产工作面矿压分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(Z1): 53-56.

[9] 黄庆享. 采场老顶初次破断机理与破断形态[J]. 西安矿业学院学报, 1999(3):193-197.

[10] 黄庆享. Roof structure theory and support resistance determination of longwall face in shallow seam[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2003(2):21-24.

(二) 案例 2：浅埋煤层开采老顶周期来压的结构分析

1. 案例介绍

浅埋煤层顶板结构理论是揭示来压机理、确定支护参数的岩层控制核心理论，关于顶板结构理论有大结构、小结构假说、组合关键层理论、“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构理论，其中最具代表性的是“台阶岩梁”结构，揭示了顶板来压的机理是台阶岩梁结构滑落失稳，阐明了浅埋煤层工作面“埋藏浅，压力大”的机理；提出了地表厚沙土层载荷传递因子，测定了顶板结构端角挤压和端角摩擦系数，基于支架“给定失稳载荷”工作状态。

(1) 浅埋煤层采场“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构理论

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，演化为“台阶岩梁”结构(图 2-1)。“台阶岩梁”结构是浅埋煤层周期来压的常见状态，比“短砌体梁”结构更不稳定，浅埋煤层采场支护计算应以“台阶岩梁”结构为准。该结构水平力 T 随回转角 θ_1 和块度 i 的增大而减小，滑落失稳是浅埋煤层顶板来压强烈的根本原因。

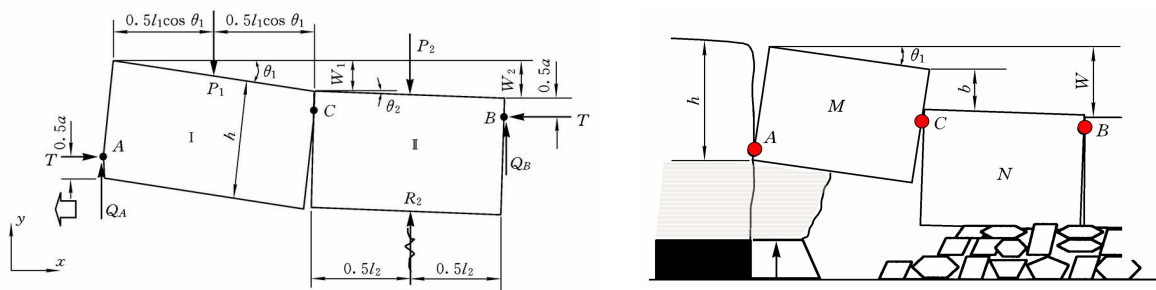


图 2-1 浅埋煤层顶板“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构模型

(2) 浅埋煤层顶板结构的量化参数的确定

①岩块摩擦系数 $\tan\varphi$: 老顶岩块间的摩擦处于限制法向位移极限应力状态，为残余摩擦角。实验测定为 $22^\circ\sim 32^\circ$ ，平均 27° ，摩擦系数为 $0.4\sim 0.6$ ，平均为 0.5 。

②端角挤压系数 $\eta = \sigma_{nj} / \sigma_c$: 揭示了老顶岩块端角应力和岩体弱面是端角挤压强度小于单向抗压强度的主要原因(图 2-2)。实验测定出老顶岩块端角挤压系数为 $0.36\sim 0.45$ ，平均 0.4 。这两项重要参数以往按经验均取 0.3 ，本研究避免了超过 25% 的结构误差，如图 2-3 所示。

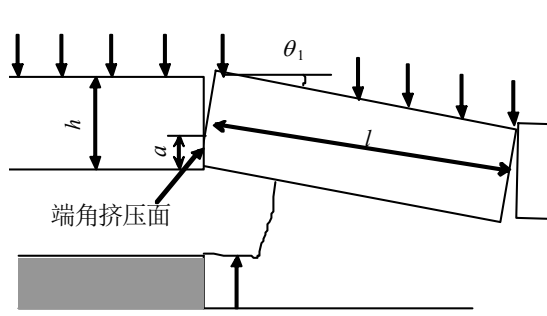


图 2-2 模拟岩块端角挤压实验加载方式

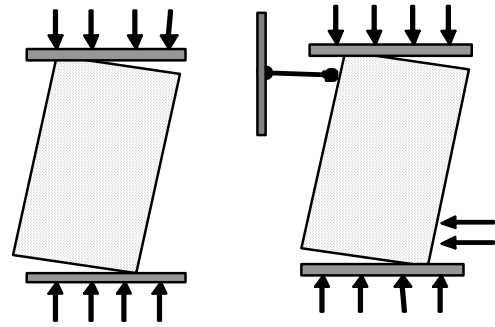


图 2-3 老顶岩块的端角抗压和挤压

(3) 浅埋煤层采场网格状钻场实测技术

在工作面超前辅运顺槽和回风顺槽共计施工立孔和斜孔 31 个，钻孔在空间交叉成网状，钻场覆盖工作面初次来压和 4 次周期来压，钻孔垂高覆盖薄基岩全厚(图 2-4)。首次实测了薄基岩大采高顶板破断运动规律和顶板结构形成与演化全过程，实证了大采高初次来压“非对称三铰拱结构”和周期来压“台阶岩梁”结构形态。

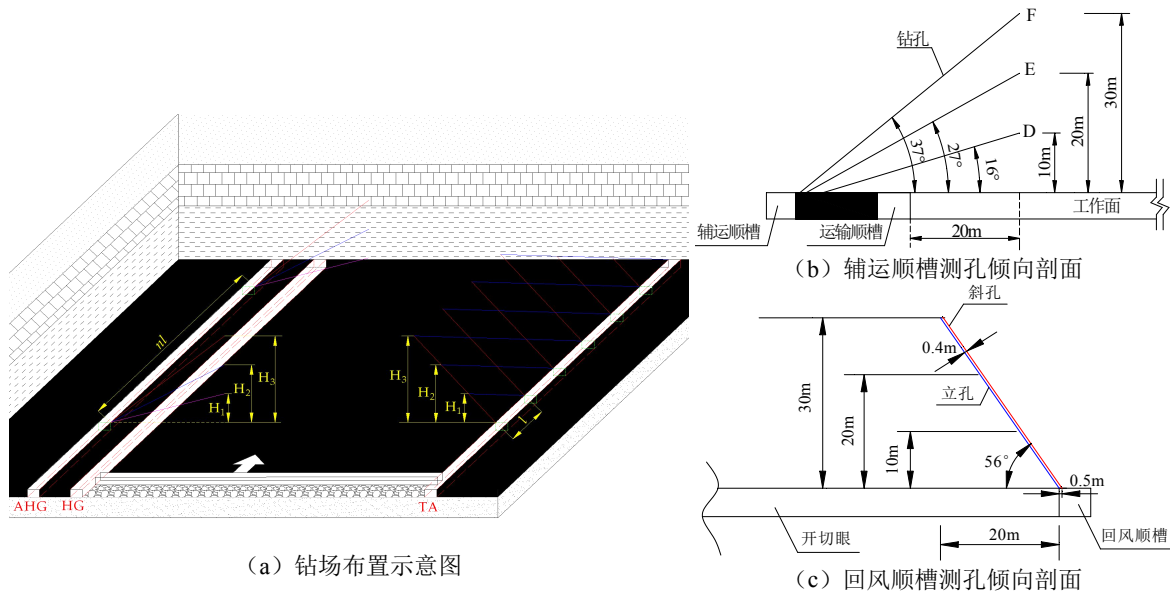


图 2-4 顶板破断运动网格状钻场

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是由理论与实践相结合，揭示了浅埋煤层采场顶板动压强烈的机理是台阶岩梁结构滑落失稳。实验测定了顶板结构端角挤压和摩擦系数，实现了顶板结构计算的量化，提出了采场支架的“给定失稳载荷”状态，建立了工作面支架工作阻力确定方法，奠定了浅埋煤层采场顶板控制的理论基础。先后在神东集团、陕煤集团、恒源集团等生产矿井取得了规模应用，经济和社会效益显著。

从教学科研互补的角度来看，本案例通过浅埋煤层周期来压顶板结构理论理论的发现和验证过程，增强学生感性认识，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科研发现之间对应的关联关系如表 2-1 所示。

表 2-1 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	短砌体梁结构	非稳态结构的形式	顶板破断与回转运动是动态变化的
2	台阶岩梁结构	不同顶板结构作用下的“支架-围岩”系统失稳模式	支架与围岩的接触关系改变造成的支架工况变化
3	钻探工程在顶板结构的应用	实证了台阶岩梁结构	顶板在不同阶段的形成的顶板结构不同，导致不同的矿压显现

3. 支撑材料

[1] 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.

获奖: 《煤炭学报》创刊 50 周年百篇最具影响力学术论文, 中国煤炭学会, 2014.10

[2] 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.

[3] 黄庆享, 石平五, 钱鸣高. 老顶岩块端角摩擦系数和挤压系数实验研究[J]. 岩土力学, 2000(1): 60-63.

[4] 黄庆享, 张沛. 厚砂土层下顶板关键块上的动态载荷传递规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004 (24)

[5] 黄庆享. 厚沙土层在顶板关键层上的载荷传递因子研究[J]. 岩土工程学报, 2005(6):672-676.

[6] 黄庆享. 厚沙土层下采场顶板关键层上的载荷分布[J]. 中国矿业大学学报, 2005(3):289-293.

[7] 黄庆享, 张沛. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009 (9): 2722-2726.

[8] 黄庆享. 采场老顶初次破断机理与破断形态[J]. 安矿业学院学报, 1999(3):193-197.

第二部分：大倾角煤层开采岩层控制理论与技术

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和 3 项企业合作项目资助下，针对大倾角煤层长壁采场岩层控制问题开展了研究，发表论文 80 余篇，其中代表性论文 18 篇，出版专著 2 部，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 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	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
4	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	
5	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	
6	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

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

我国大倾角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，大倾角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，我国大倾角煤层在开采理论、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，系统研究了大倾角煤层长壁采场“关键层”转化与岩体结构变异机理、“支架-围岩”系统动态稳定机制等科学问题，为大倾角煤层长壁采场围岩灾变防控和新型开采方法研究奠定了理论基础，对非对称采场“支架-围岩”系统稳定性控制、高煤壁片帮防控、强扰动巷道稳定性控制等具有重要指导作用。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：大倾角煤层长壁采场顶板破断与岩体结构变异

1. 案例介绍

发现了采空区非均匀充填作用下大倾角煤层长壁顶板破断的时序性与非对称性，采场“关键层”区域沿倾向迁移-转化现象，构建了采场非对称壳体结构力学模型，揭示了“关键层”空间形态与力学性状跃层转换和壳体结构“梯阶变异”机制；建立了采场倾斜砌体结构动力学方程，确定了壳体作用下倾斜砌体结构稳定性判定准则，为该类采场岩层控制实践提供了科学依据。

(1) 大倾角煤层长壁采场顶板破断时序性与非对称性

顶板断裂和垮落在走向方向的“时序”不同，呈先中部，次上部，后下部的顺序。同时，受冒落矸石在自重作用下沿采空区的非均匀充填影响，工作面倾斜下部顶板活动空间减小，上部顶板活动空间增大，引发了倾斜方向不同区域顶板垮落范围和程度的非对称性，进而造成矿压显现的非对称性。如图 1.1 所示。

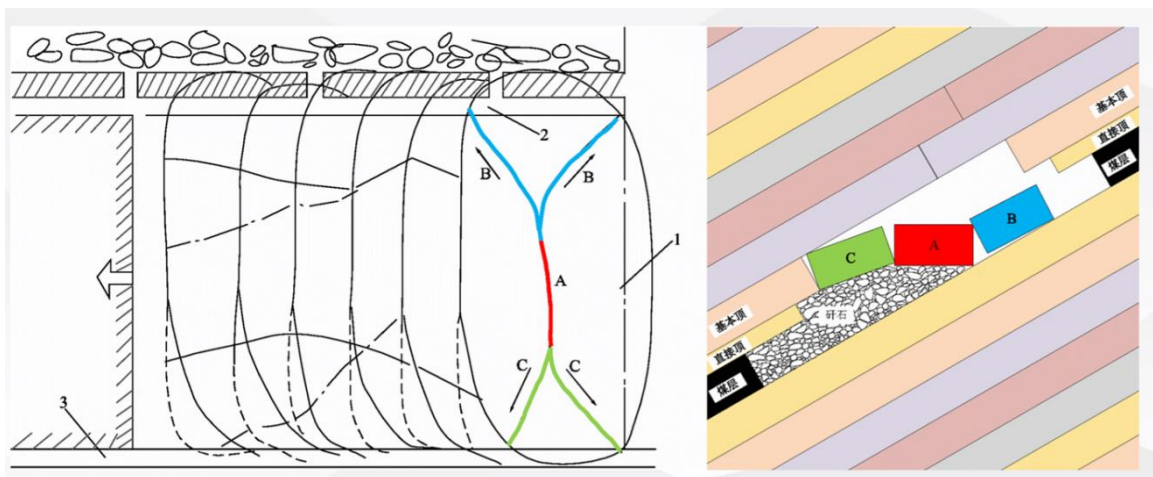


图 1.1 大倾角采场顶板破断的时序性与非对称性

(2) 大倾角煤层长壁采场“关键层”区域迁移转化机制

大倾角煤层“关键层”区域沿工作面倾斜方向发生迁移转化，在工作面倾斜下部区域，“关键层”区域由一般倾角条件下的基本顶岩层向下部的直接顶和伪顶岩层转移；工作面倾斜中部区域，“关键层”区域处于基本顶中下位岩层中；工作面倾斜上部区域，“关键层”区域向基本顶上位岩层中转移。由于顶板岩层的沉积层理作用，“关键层”沿工作面倾斜方向形成“梯阶”结构，如图 1.2 所示。进而控制着采动应力供壳的三维非对称分布，如图 1.3 所示。

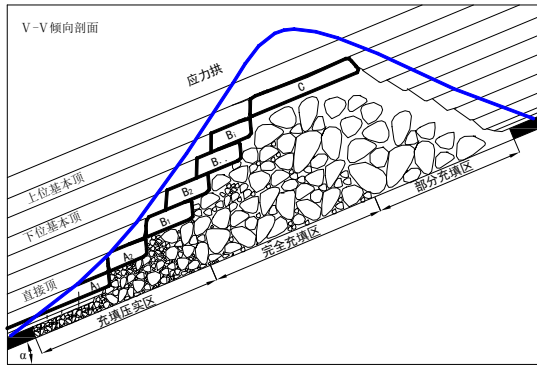


图 1.2 “关键层”区域迁移转化示意

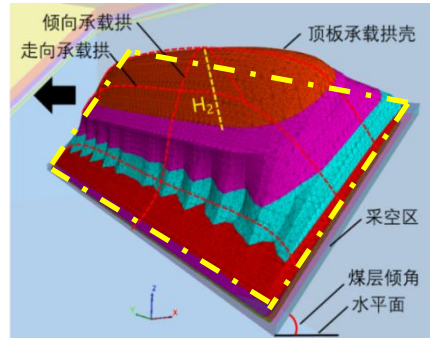


图 1.3 采动应力供壳三维非对称分布

(3) 大倾角采场岩体梯阶结构变异机制

工作面倾斜方向上，“关键层”区域处于不同岩体层位，不同层位岩体断裂后和相邻岩块发生挤压和铰接作用，形成砌体结构，不同区域砌体结构的约束条件不同，其形成与平衡机制也不同。发现了破断顶板的砌体与反砌体堆砌形式，揭示了砌体结构的失稳机制与活跃程度区化特征，阐明了覆岩承载壳体失稳致诱倾斜砌体结构灾变机理。如图 1.4 所示。

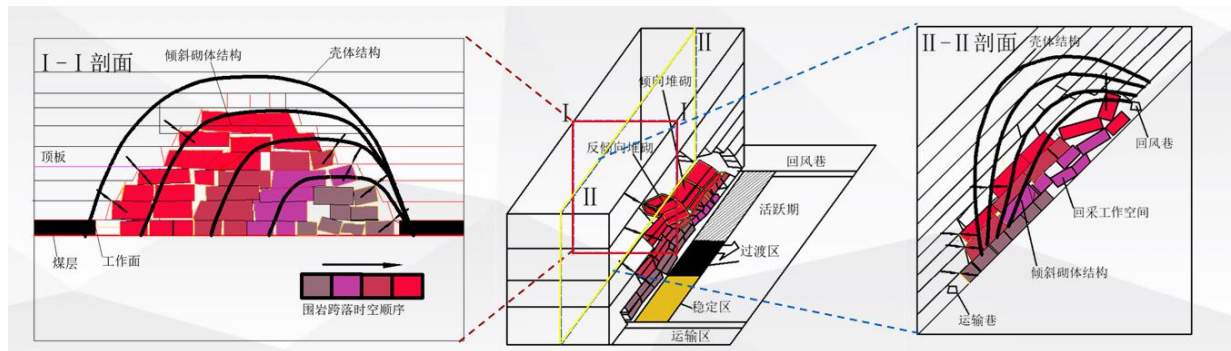


图 1.4 采场倾斜砌体承载结构示意

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，科学解释了大倾角煤层长壁开采过程中采场矿压显现的特殊规律，对指导现场岩层控制实践具有重要的指导作用。研究成果先后在四川、新疆、甘肃、宁夏等矿区得到了应用，以此为基础发展形成了系列岩层控制技术，指导了大倾角长壁采场成套专用设备研发试制，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 1-1 所示。

表 1-1 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	直接顶的垮落	采空区垮落矸石非均匀充填	直接顶的性质与作用
2	基本顶“o-x”破断	基本顶倾斜砌体结构承载	基本顶断裂与运动对矿压的影响
3	关键层理论	倾斜方向关键层区域迁移转化	关键层对岩层运动的控制机制

(二) 案例 2：大倾角长壁采场“支架-围岩”系统稳定性控制

1. 案例内容

首次提出了大倾角煤层“R-S-F”系统稳定性控制理论，阐明了不同顶板结构作用下的“支架-围岩”系统失稳模式，研发了工作面非线性限位布置方式，最大限度保证了支护系统下端的基础稳固；在此基础上提出了大倾角大采高工作面煤壁偏帮综合防控技术、大倾角煤层综放开采工作面分区控制技术，提升了大倾角煤层长壁开采“支架-围岩”控制技术水平。

(1) 大倾角采场“R-S-F”系统稳定性控制

建立了基于围岩灾变经典模式的“R-S-F”（顶板-支架-底板）系统动力学分析模型。通过数学方法建立并解算了“R-S-F”系统的动力学一般方程，运用动态稳定性理论对不同灾变状态下支架的动态稳定性进行了分析，计算确定了回采过程中保持“R-S-F”系统动态稳定所需的支架工作阻力，判明了引发“R-S-F”系统失稳的主要影响因素及参数指标，提出了“R-S-F”系统动态稳定性控制模式，如图 2.1 所示。

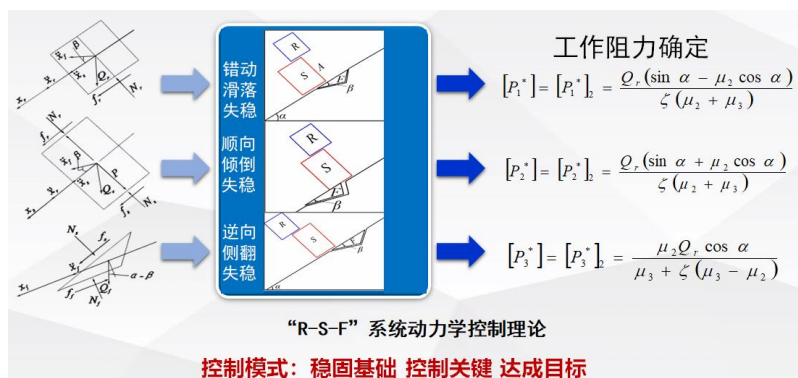


图 2.1 “R-S-F”系统动态稳定性控制模式

(2) 不同顶板结构作用下的“支架-围岩”系统失稳模式

通过工作面观测、三维数值模拟分析和物理相似模拟，发现了顶板结构破断后形成倾向堆砌与反倾向堆砌结构，同时，倾斜砌体结构与支架作用在倾斜剖面 and 走向剖面上可分为六种接触作用类型，建立了倾斜砌体结构与支架三维作用模型，揭示了不同作用方式下“支架-围岩”系统失稳致灾机理，给出了失稳判定依据，如图 2.2 所示。

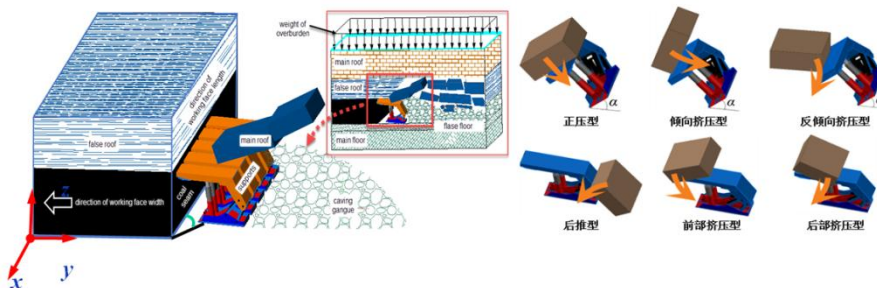


图 2.2 不同顶板结构作用下的“支架-围岩”系统失稳模式

(3) 工作面非线性空间限位布置

为了增大矸石充填长度，降低顶板压力非均衡性，提高倾斜下部巷道与支架稳定性，发明了工作面“圆弧段”及“楔形”布置方式，降低了工作面下部采场高度，增加了倾斜下部的充填长度，保证了工作面支护系统及工作阻力的均衡性，为大倾角煤层工作面增产提效创造了有利条件。如图 2.3 所示。

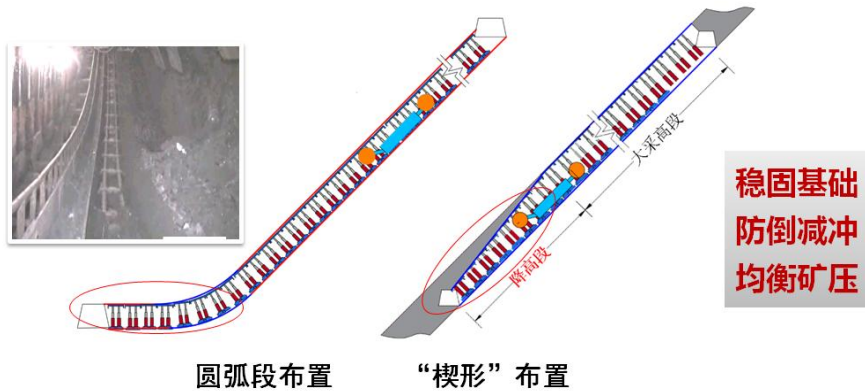


图 2.3 工作面非线性空间限位布置示意

(4) 大倾角大采高煤壁偏帮综合防控技术

针对大倾角大采高工作面煤壁片帮的蔓延与滑冒特征，研究了煤层倾角、开采高度、支架阻力等多因素对片帮的叠加作用机理，提出了“保证支架初撑、耦合弱化顶板、超前加固煤壁”的片帮及冒顶综合防控技术，如图 2.3 和图 2.4 所示。

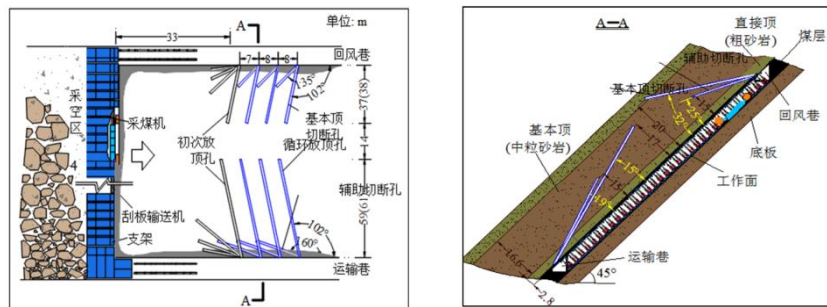


图 2.3 工作面超前断顶

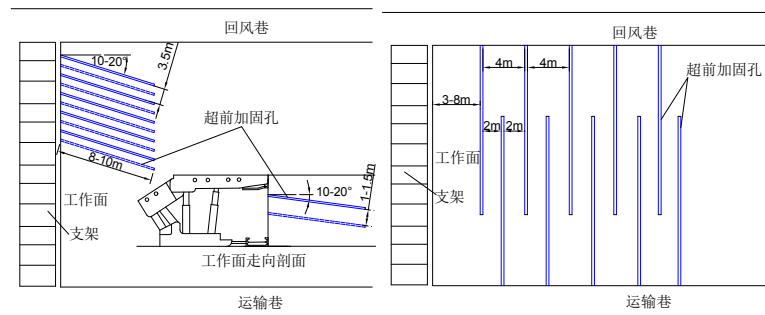


图 2.4 工作面煤壁超前加固

(5) 大倾角综放采场“支架-围岩”稳定性综合控制技术

大倾角软煤综放采场支架稳定性控制的关键在于通过人工手段干预促使顶煤介态转化界面向工作面采空区一侧后移，避免端面顶煤漏冒，同时采取措施提高支架的自稳性能及抗倒、抗滑能力。提出了着眼于“防”的以“增加顶煤厚度、分区控制放煤量”为关键的顶煤主动控制技术，和着眼于“治”的以“工作面伪斜布置、支架结构优化、规范移架工序”为关键的支架被动调控技术。如图 2.5 所示。

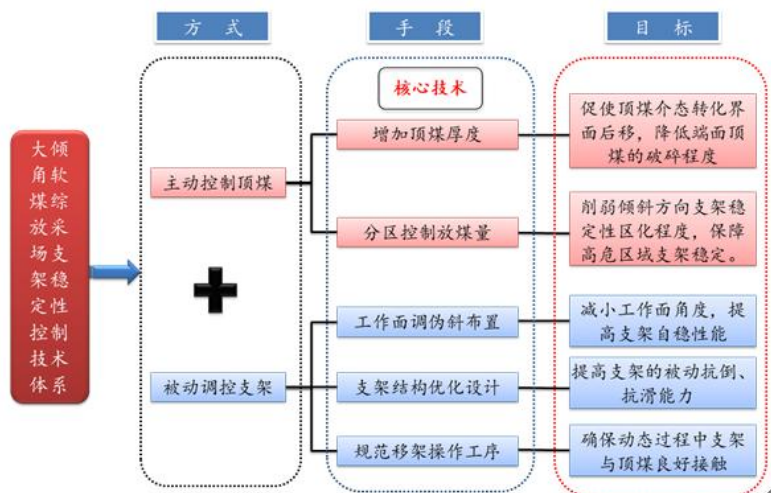


图 2.5 大倾角长壁综放开采“支架-围岩”稳定性控制技术体系

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是由理论研究向实践应用的过渡，通过揭示支架-围岩”系统失稳机制，提出了共作面的非线性布置限位，大采高煤壁偏帮防控，综放开采“R-S-F”伪系统失稳治理等一系列工程难题解决方案，是理论知识的创新与系统应用。先后在川煤集团、新疆焦煤集团、宁煤集团所属生产矿井取得了规模应用。

从教学科研互补的角度来看，本案例是对岩层控制问题的具体画像，具有清晰的实践背景，便于在课堂上帮助学生将抽象化的理论进行具象化的感知与认识，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 2-1 所示。

表 2-1 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	基本顶的初次来压与周期来压	基本顶破断的时序性与非对称性	倾角影响下顶板的破断步距与回转运动形式
2	采场支架与围岩的相互作用机理	不同顶板结构作用下的“支架-围岩”系统失稳模式	支架与围岩的接触关系改变造成的支架工况变化
3	岩体变形破坏形式 支承压力分布	大倾角大采高条件下的煤壁片帮机制	煤壁片帮的应力驱动作用 倾角影响下采动应力的区化分布
4	放顶煤开采矿压显现的基本规律	大倾角综放开采顶煤区化破坏与矿压非对称显现	采动应力路径区化影响下顶煤的渐进破碎机理及其与支架的作用关系

(三) 案例 3：大倾角煤层开采方法创新与成套技术装备研制

1. 案例介绍

发明了大倾角煤层走向长壁工作面异形液压支架俯斜开采方法、特厚煤层长-短壁融合开采方法，研制了适用于开采方法的平行四边形液压支架，有效控制了倾角 $>45^\circ$ 的大倾角煤层长壁开采矸石非均衡充填及底板破坏滑移，创新了大倾角煤层长壁综采技术与装备，拓展了该类煤层安全高效开采技术的应用范围。

(1) 大倾角煤层走向长壁工作面异形液压支架俯斜开采方法

设计了一种大倾角煤层走向长壁工作面异形液压支架俯斜开采方法，研制了适用于该开采方法的平行四边形液压支架，有效降低煤层倾角的同时提高了端面稳定性与支架抗扭摆能力。如图 3.2 所示。

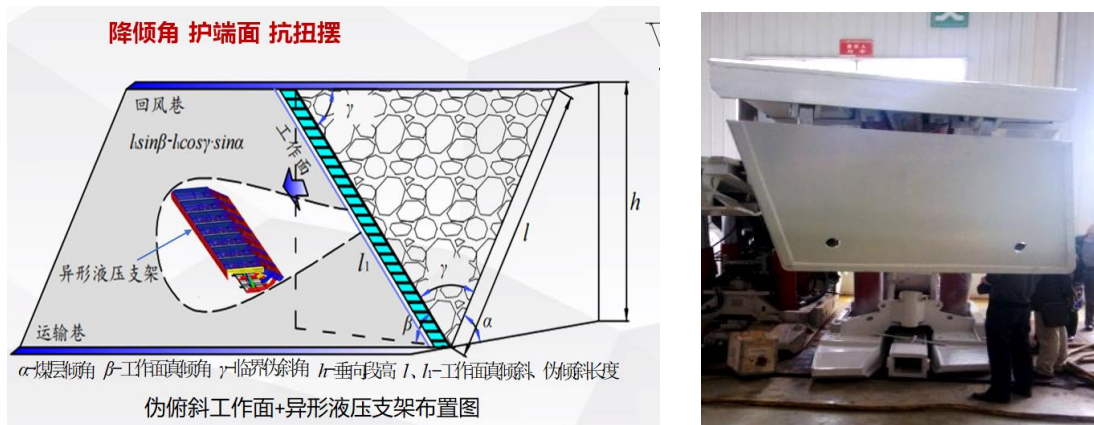


图 3.1 大倾角煤层走向长壁工作面异形液压支架俯斜开采方法示意

(2) 大倾角特厚煤层长-短壁融合开采方法

基于大倾角特厚煤层长壁综放和水平分段放顶煤的技术优势，将沿倾斜方向的长壁工作面与水平分段的短壁工作面有机的集成、合而为一，构成大倾斜特厚煤层高段走向壁式综放采煤法，为大倾角特厚煤层开采难题提供了有效途径，如图 3.2 所示。

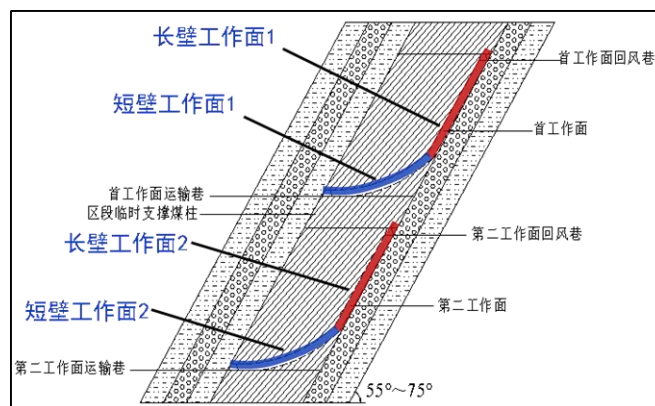


图 3.2 大倾角特厚煤层长-短壁融合开采方法示意

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是基于煤层赋存条件而进行的采煤方法创新，针对特殊的煤层赋存条件，在原有的壁式采煤方法基础上，创新了俯伪斜异形液压支架采煤法，特厚煤层长短壁融合采煤法，针对性的解决了大倾角长壁开采支架稳定性控制难度大、厚煤层顶煤漏冒控制难度大的问题，在重庆能投集团，甘肃华亭煤业，甘肃靖远煤业等公司得到了成功应用。

从教学科研互补的角度来看，本案例是对岩层运动控制问题的灵活运用，属于课程内容的延伸与拓展，通过案例讲解可以激发学生的创新思维，锻炼分析问题的能力。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 3-1 所示。

表 3-1 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	采场支架类型与支架力学特性	俯伪斜采场与异型液压支架的协同机制	液压支架的结构力学特性与适用条件
2	水平分段综放开采矿压显现 长壁综放开采矿压显现	大倾角厚煤层长短壁融合开采工艺条件下的支护系统稳定性控制效能	厚煤层水平分段综放开采岩层运动特点与长壁综放开采岩层运动特点的综合分析与整合利用

(三) 案例 4：急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道失稳机制及控制

1. 案例介绍

急倾斜煤层赋存角度为 45° 以上，是国际公认的难采煤层。我国大倾角和急倾斜煤层占 15%~20% 的储量，其年产量占全国煤炭总产量的 10% 左右。急倾斜煤层巷道的矿压显现较剧烈，支架的受载状况具有非对称性，大量的巷道因维护不当而报废。文献检索查新表明，该“急倾斜煤层软岩重复采动回采巷道”类型为国内外首例，此前无成功实践先例。该项目成功攻克了该类型巷道支护难题，具有广阔的应用前景。

(1) 揭示了急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道的变形破坏机制

急倾斜煤层回采巷道变形破坏失稳是一个十分复杂的时间、空间问题，即在不同的阶段影响巷道变形破坏的主导因素不同：

初掘阶段：非对称岩体结构及应力分布导致巷道变形失稳，巷道围岩复杂围岩环境（围岩节理、裂隙发育、风化或遇水易崩解）、大埋深、复杂地质构造（近 600m 埋深，高水平应力，且大于垂直应力）是巷道非对称变形的主要影响因素；

一次采动阶段：非对称原岩应力释放机理导致巷道变形失稳，大埋深、复杂地质构造和采动应力非对称分布是导致巷道变形失稳的主要影响因素；

二次采动阶段：楔形作用、拱脚效应与层间压剪变形失稳机理导致巷道变形失稳，开采扰动形成的拱形岩层结构是此次巷道变形破坏的主要影响因素，为主导作用。

(2) 研发了急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道支护技术

针对赵矿重复采动影响沿空回采巷道，利用高强度锚杆、托盘+锚索、大尺寸十字托盘+W 钢带+钢筋网+注浆锚杆+喷砼非对称多介质耦合支护方式能够有效控制巷道围岩的变形。提出以不同介质组成的支护结构性能耦合作用和高强度柔性支护为目标，以锚杆为核心、锚索与棚架为主体，辅以注浆和表面封闭，能充分利用围岩自承能力的耦合支护技术，解决大倾角煤层长壁工作面异形断面巷道支护难题。

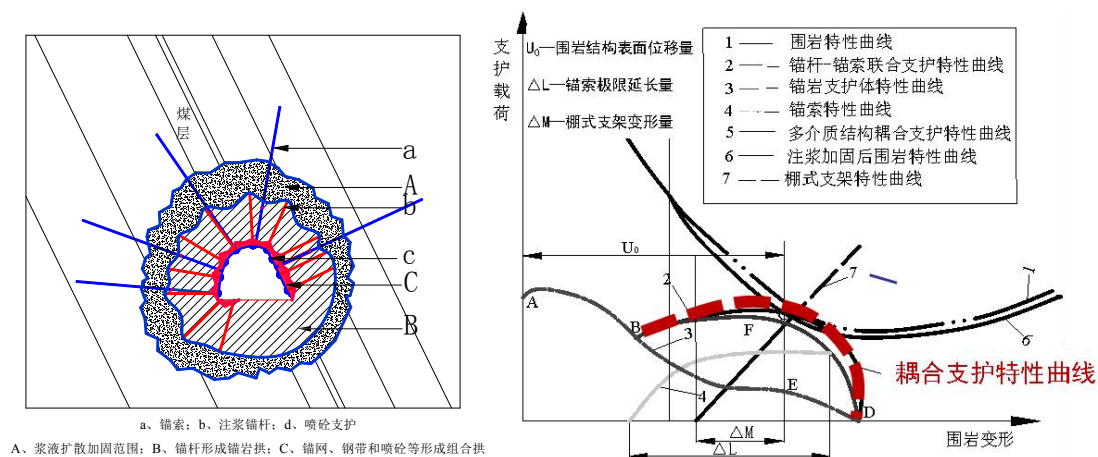


图 4.1 急倾斜软岩沿空巷道非对称多介质耦合支护方式与效能

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道支护技术在绿水洞煤矿开展应用，与原支护方案相比，产生经济效益 500 余万元，减少了回采巷道维修量，大幅度降低了维修成本，减少了人员和维修费用，取得了明显的经济效益。同时，保证了矿井正常生产，极大地降低了工人劳动强度，改善了作业环境，消除了工作面安全隐患。该成果于 2013 年 03 月 17 日由四川省科技厅鉴定，达到国际先进水平。



图 4.2 现场支护效果

从教学科研互补的角度来看，本案例是对巷道岩层控制与采场岩层控制的结合，既有煤矿回采巷道本身变形破坏的影响因素分析，又涉及沿空巷道在工作面重复采动影响下的变形破坏，与采场周围的支承压分布相关，最终提出的巷道围岩控制技术又涉及了各类型巷道柔性支护原理。是对课程知识内容的系统性串联与应用。涵盖知识点多，范围广。

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 4-1 所示。

表 4-1 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	巷道围岩应力及变形规律	巷道复杂围岩条件及应力环境对巷道原岩应力状态的影响	埋深、围岩性质等天然影响因素是如何影响巷道矿压显现的
2	沿空留巷	矿井沿空巷道的具体布置形式	实践应用场景代入
3	受采动影响巷道围岩变形	不同采掘阶段内急倾斜煤层重复采动沿空软岩巷道的变形破坏机制	不同回采阶段沿空巷道受载历程分析
4	软岩巷道变形规律及支护技术	急倾斜非对称多介质耦合支护方式	不同支护方式原理及应用场景，多种支护方式并用的耦合效能

第三部分：西部生态脆弱矿区保水减损开采岩层控制研究

一、科研项目基本信息

科研项目背景：本案例库在 4 项国家自然科学基金项目、4 项省（部）项目和 4 项企业委托项目资助下，针对西部生态脆弱矿区保水减损开采岩层控制开展了研究，发表论文 60 余篇，其中 EI/SCI40 余篇，出版专著 2 部，授权发明专利 10 余项，获国家科学技术进步奖二等奖、中国煤炭工业科学技术奖一等奖、陕西省第十四届自然科学优秀学术论文奖一等奖。依托的科研项目信息如表 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	国家自然科学基金面上项目	浅埋煤层地表隔水层的采动隔水性研究	50574074
2	国家自然科学基金面上项目	浅埋煤层局部柔性充填隔水岩组稳定性研究	51174156
3	国家自然科学基金面上项目	浅埋煤层群开采煤柱群结构效应及其应力场与裂缝场耦合控制	51671190
4	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
5	陕西省科技厅联合基金项目	煤层群开采致灾机理及预警与防治技术研究	2019JLP-08
6	陕西省教育厅重点实验室项目	陕北浅埋煤层特殊保水开采隔水层稳定性研究	2010JS019
7	陕西省科技统筹创新工程计划项目	陕北生态脆弱区浅埋煤层条带充填保水开采技术研究	2011KTCQ01-41
8	榆林市科技计划项目	生态脆弱区浅埋煤层特殊保水采煤方法	[2010]4号-12
9	陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司	柠条塔煤矿北翼多煤层开采覆岩破坏规律研究	NTTHT-咨询-2014-11
10	陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司	柠条塔煤矿北翼多煤层科学开采方法研究	NTTHT-咨询-2014-09
11	榆神煤炭榆树湾煤矿有限公司	榆树湾煤矿首分层大采高矿压与保水开采研究	20080063
12	神东天隆集团有限责任公司霍洛湾煤矿	霍洛湾煤矿采动区下极近距离煤层矿压规律与支护研究	6000150193

成果名称：浅埋煤层岩层控制及减损开采理论与技术

主持人：黄庆享

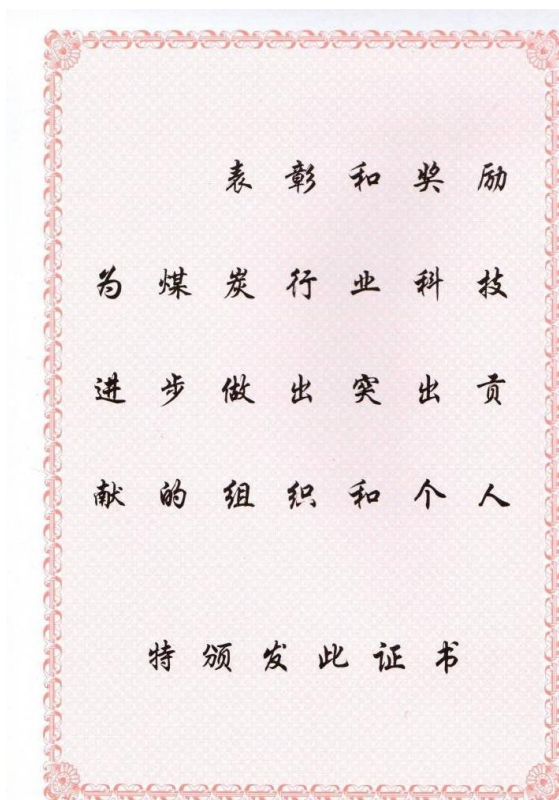
获奖情况：国家科学技术进步奖二等奖，中国煤炭工业科学技术奖一等奖，陕西省第十四届自然科学优秀学术论文奖一等奖。



国家科技进步二等奖



陕西省自然科学优秀论文一等奖



中国煤炭工业科技进步一等奖

二、科研促进教学案例

(一) 案例 1：浅埋煤层保水开采岩层控制（隔水层稳定性）研究

1. 案例介绍

我国西部浅埋煤层保水开采的核心理念是保护生态水位，保水开采岩层控制的理论基础是隔水层的稳定性。基于陕北浅埋煤层煤水赋存条件，发明了固液耦合模拟实验技术，揭示了浅埋煤层隔水岩组的稳定性主要受“上行裂隙”和“下行裂隙”影响，采动裂隙带的导通性决定着隔水岩组的隔水性。给出了“上行裂隙带”发育高度和“下行裂隙带”发育深度的计算公式，建立了以隔水岩组厚度与采高之比（隔采比）为指标的隔水岩组隔水性判据，本案例为西部浅埋煤层保水开采岩层控制提供了理论依据和实践方法。

(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 3.1），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。

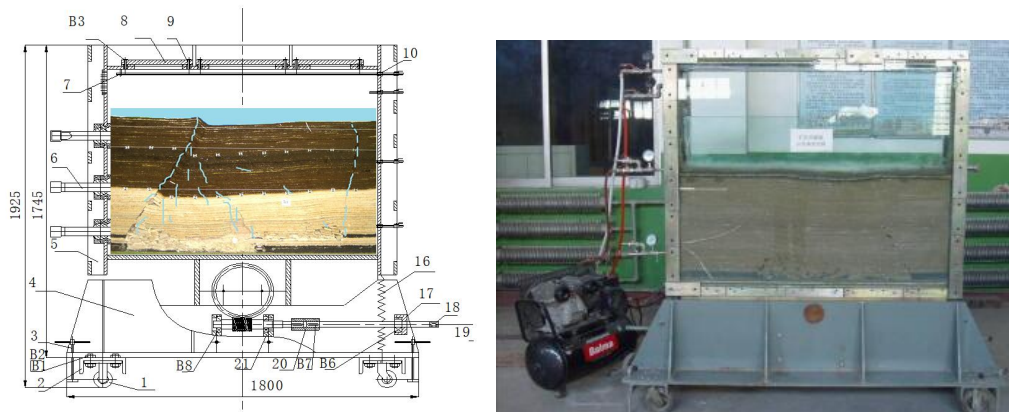


图 3.1 固液耦合模拟实验装置

(2) 采动覆岩上行裂隙和下行裂隙发育规律

① 采动覆岩上行裂隙发育高度

研究发现，单一煤层开采，采动覆岩导水裂隙带高度与采高成正比，与裂隙带顶部隔水岩组的极限曲率成反比。上行裂隙带顶部隔水岩组的极限曲率越大，即隔水岩组的柔性越大，导水裂隙带发育越小，可用下式计算，

$$H_s = 2\sqrt{\frac{M}{K_t}} \quad (1)$$

式中， M 为采高，导水裂隙带顶部岩层极限曲率 K_t 。对于分层重复采动，导水裂隙带高度随采高增加的幅度越来越小。相同厚度的第 2、3 和 4 分层开采的导水裂隙带高

度增量分别为 1/6、1/12 和 1/20。第 1 分层的开采导致的导水裂隙带高度最大。因此，对于厚煤层开采，第一分层采高不宜过大。采用分层限高开采，可以降低导水裂隙带高度，提高隔水岩组稳定性和保水开采的可能性。

② 采动覆岩下行裂隙发育深度

采动隔水岩组弯曲下沉将导致地表（或隔水岩组的上表面）出现张拉，产生向下发育的下行裂隙（图 3.2），裂隙的宽度和深度与采深、采高、顶板管理方法、土层性质及其厚度有关。采动地表的下行裂隙一般为楔形，在表土层一定深度处尖灭。将下沉曲线中单位宽度上的下沉量称为下沉梯度 T_s ，其计算公式为，

$$T_s = \frac{w}{r} \quad (2)$$

式中： w 为最大下沉量，m； r 为曲率半径，m。

通过控制顶板运动，增大沉降区宽度，可以降低下沉梯度，减缓导水裂隙的产生。“下行裂隙带”的发育深度与隔水岩组厚度、性质、采高等参数有关，其计算公式为，

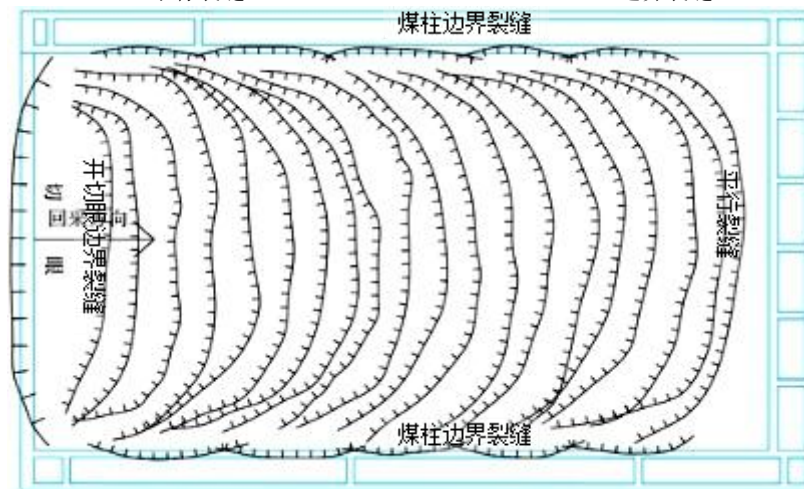
$$H_x = h_g - \varepsilon_t \cdot \frac{E_g h_g^3}{6M_0} \quad (3)$$

实际应用中，下行裂隙计算公式中许多参数难以确定，需要配合模拟实验确定。



(a) 平行裂缝

(b) 边界裂缝



(c) 神南矿区某矿 1²煤层地表下行裂缝素描

图 3.2 采动地表裂缝

(3) 采动隔水岩组的隔水性判据

隔水岩组是保水开采的关键层，其稳定性是保水开采的关键。根据覆岩“上行裂隙”和“下行裂隙”发育规律（图 3.3），建立了隔水岩组稳定性判据，奠定了水体下安全开采和保水开采岩层控制理论基础，隔水岩组隔水性判据为，

$$G_c = \frac{H}{M} \geq (H_s + H_x) / M + 3 \quad (\text{土层}) \quad (4)$$

$$G_c = \frac{H}{M} \geq (H_s + H_x) / M + 5 \quad (\text{基岩}) \quad (5)$$

式中， H 为隔水岩组厚度，m； H_s 为上行裂隙带高度，m； H_x 为下行裂隙带深度，m； M 为采高，m。

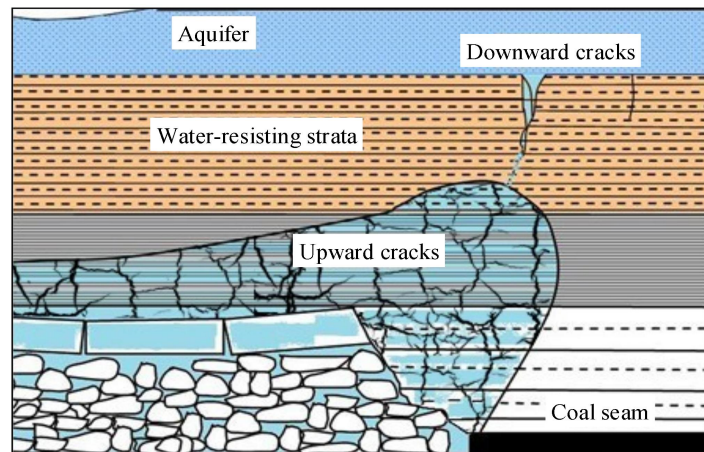


图 3.3 采动覆岩上行裂隙和下行裂隙发育规律

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。榆树湾煤矿位于榆神矿区中南部，主采2⁻²煤层，厚度11.6m，埋深230m。该矿应用浅埋煤层保水开采岩层控制理论，采用5.5m分层大采高开采方法，2015年~2017年共开采了2⁻²煤层首分层20106、20108和20110三个工作面，科技进步新增产量507万吨，新增利润66794万元。实现了安全、高效、保水开采，取得了显著的社会经济效益；张家峁煤矿生产能力1000万吨/年，可采煤层7层，埋深70~160 m，属于浅埋煤层开采，大采高工作面压架事故和常家沟水库周边安全开采是技术难题。2015年~2017年，应用浅埋煤层岩层控制理论和技术，避免了压架停产事故，三年累计多回收煤炭186.9万吨。应用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，累计增产364.4万吨，新增利润47926万元，实现了安全高效保水开采。

本案例可充分发挥教学和科研一体化，研究内容在教材基础理论的基础上延伸而

来，更加注重理论研究的实用性和可靠性，创新发展了浅埋煤层安全高效和绿色开采岩层控制理论和技术。本案例以现场工程应用为主体，以创新思维增进教学活力，将“四个自信”融入教学，有助于激发学生学习热情和专业自信，为培养采矿工程专业德才兼备的复合型人才奠定坚实基础。

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 3-1 所示。

表 3-1 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	丰富矿山压力与岩层控制研究方法
2	采场上覆岩层破坏规律	采动裂隙类型及发育程度	岩层破坏对地表生态环境损伤的影响机制
3	关键层理论	采动隔水岩组隔水性判据	关键层学术思想掌握隔水岩组稳定性的作用
4	岩层及地表沉陷基本规律	近距离煤层开采地层非均匀沉降机理	覆岩结构对地层移动的影响机制

(二) 案例 2：榆神府矿区浅埋煤层柔性条带充填理论与技术

1. 案例介绍

榆神府矿区浅部煤层开采诱发地表生态环境恶化，其根源是开采导致隔水岩组失稳引起地表潜水流失，最严重的是特殊保水开采区。本案例研发了低强度、低成本柔性充填材料，揭示了柔性条带充填开采的覆岩裂隙发育与隔水岩组稳定性规律，建立了局部柔性充填隔水岩组稳定性力学模型，提出了合理的充填间隔宽度和充填宽度计算方法，确定了局部充填保水开采关键参数，为榆神府矿区特殊保水开采区条带充填开采提供了科学依据。

(1) 高沙充填材料研发

① 表面特征：陕北风积沙为天然山砂，具有颗粒相对单一，粘聚力小，保水性差，松散性强等特点，如图 4.1 所示。



图 4.1 陕北榆林风积沙表面特征

② 风积沙粒径与级配分析：榆神府矿区风积沙粒级组成参数如表 4.1 所示，风积沙的加权平均粒径 d_{av} 在 0.1~0.3mm 之间，不均匀系数 $C_u < 5$ ，曲率系数 C_c 在 0.9~1.6 之间。榆神府矿区风积沙颗粒大小均匀，属于典型的级配不良的特细砂。另外，风积沙颗粒表面活性低，粘性小，松散性强，水稳性好。

表 4.1 榆神府矿区风积沙粒级组成参数

参数	取样地点				
	榆林北部 试样 1	榆林北部 试样 2	神朔线 DK230+480	神朔线 DK230+625	榆靖高速
d_{av}/mm	0.213	0.205	0.164	0.118	0.116
d_{10}/mm	0.165	0.145	0.035	0.077	0.075
d_{30}/mm	0.210	0.200	0.069	0.084	0.095
d_{60}/mm	0.275	0.280	0.087	0.095	0.125
C_u	1.667	1.93	2.485	1.234	1.667
C_c	0.972	0.985	1.564	0.965	0.963

③ 充填材料强度：充填的目的不是控制地表的绝对沉降，而是保障隔水层稳定即可。确定合理的充填强度，是降低成本和保障充填效果的关键。实际生产中，一般充填体构筑 8h 后工作面将继续推进，支架前移后直接顶在上覆岩层的作用下将产生一定变形，充填体必须有足够的强度保持自稳，且能防止直接顶和充填体破坏。直接顶的分层厚度一般小于 1.5~2m，8h 龄期强度为充填材料早期强度进行模拟，龄期 8h 的膏体充填材料强度为：

$$\sigma_{c,8h} = B(a\gamma_f h_f + 0.05) \quad (1)$$

式中， a 为实验室试块与现场临界立方体试件单轴抗压强度的比值，一般为 1.1~1.3； B 为安全系数，一般为 1.5~2.0。

④ 柔性充填材料配比确定：经过对陕北榆神府矿区风积沙进行反复试验，配制出了充填材料主要由风积沙、水泥、粉煤灰、添加剂和水组成，灰沙比 1:10~1:14，质量浓度为 83~84%，28d 强度在 2MPa，泌水率小于 5%。

(2) 柔性条带充填开采覆岩裂隙发育与隔水岩组稳定性规律

采用间隔充填的长壁开采方式，整个工作面长度为 250m，等间距充填两个条带，如图 4.2 所示，不同充填间隔宽度与充填宽度对应的隔充比与充填率如表 4.2 所示。

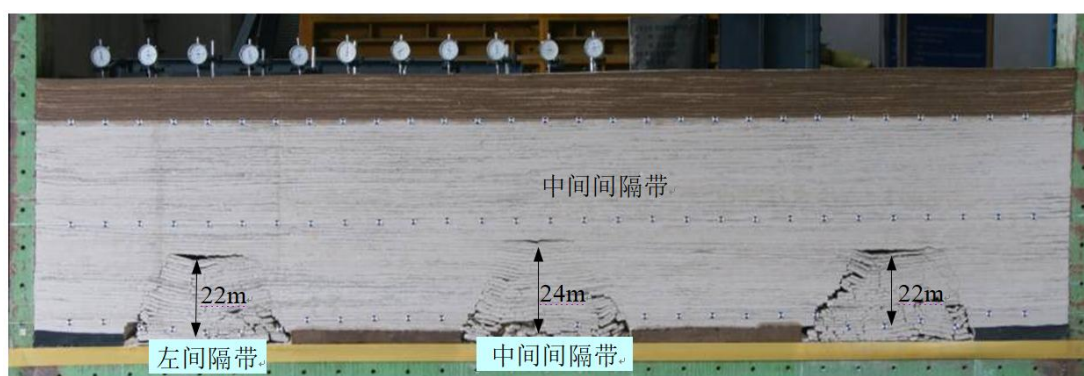


图 4.2 等间距充填两条带，充填间隔宽度 50m，上行裂隙发育高度 22~24m

表 4.2 工作面 250m 等间距充填 2 个条带的裂隙特征

充填间隔宽度 m	充填宽度 m	隔充比 ζ	充填率 %	上行裂隙高度 m	下行裂隙深度 m
50	50	1	40	22-24	0.0
60	35	1.7	28	34.5	0.0
70	20	3.5	16	37.0	0.0
75	13	5.77	10	49.0	5.0
78	8	9.75	6.4	63.5	8.5 贯通

当隔充比为 1，充填间隔宽度 50m，充填宽度 50m 时，上覆岩层上行裂隙高度 22~24m，无下行裂隙。当隔充比为 1.7，充填间隔宽度 60m，充填宽度 35m 时，间隔带上行裂隙发育高度增大为 34.5m。隔充比为 3.5 时，充填间隔宽度和充填体宽分别为

70m 和 20m，充填体受压碎胀，采空区上方顶板的垮落带高度增大。

当隔充比为 5.77，充填间隔宽度为 75m，充填宽度为 13m 时，覆岩垮落升高，在黏土层上界下行裂隙发育深度为 5m，是采高的 1.25 倍。当充填间隔宽度 78m（隔充比 9.75）时，右侧上行裂隙和下行裂隙贯通（图 4.3）。



图 4.3 隔充比 9.75，上行裂隙和下行裂隙穿透隔水层

(3) 条带充填保水开采隔水层稳定性控制理论

建立了条带充填隔水层连续梁力学模型（图 4.4），确定了“上行裂隙”发育高度和“下行裂隙”发育深度，给出了条带充填开采的隔水层稳定性判据，确定了充填条带宽度和间隔宽度计算方法，形成了条带充填保水开采技术。

$$\text{上行裂隙发育高度: } H_s = \frac{1}{2 \times \cot \theta} \cdot [l_2 + \frac{M_f d}{\tan \varphi} \left[\ln \left(\frac{c + \sigma_f \tan \varphi}{c} \right)^\beta + \tan^2 \varphi \right] - L_{2 \max}] \quad (2)$$

$$\text{下行裂隙发育深度: } H_x = H - \frac{R_T}{E \beta_m^2 e^{\beta_m x_c} (b_1 \cos \beta_m x_c - a_1 \sin \beta_m x_c)} - h_u \quad (3)$$

$$\text{条带充填隔水岩组下沉曲线: } \varepsilon(x) = 2B\beta_m^2 e^{\beta_m x} (b_1 \cos \beta_m x - a_1 \sin \beta_m x) \quad (4)$$

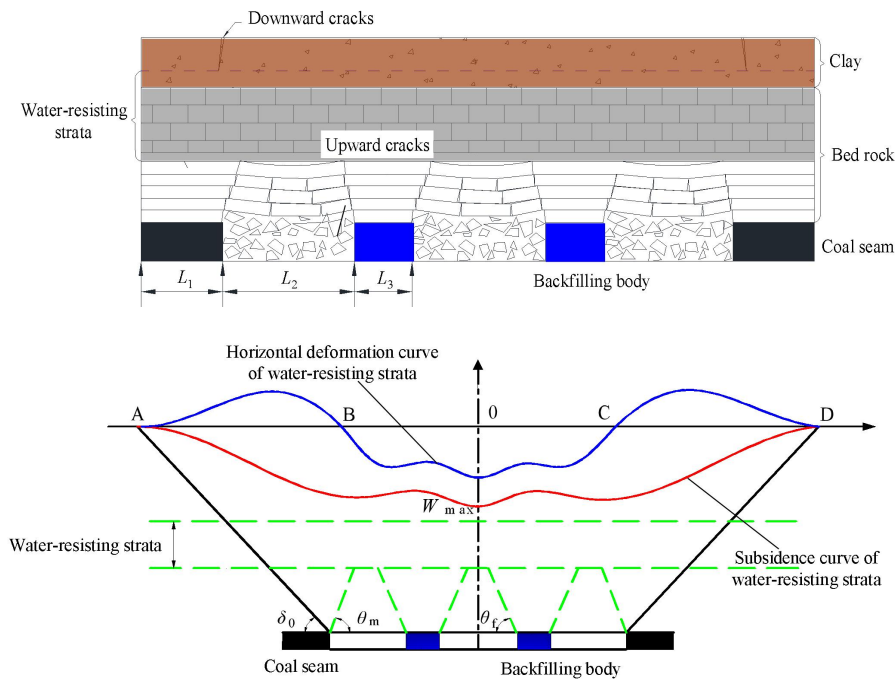


图 4.4 条带充填隔水岩组连续梁力学模型

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，研发了低强度、低成本柔性充填材料，在教材现有知识体系的基础上揭示了柔性条带充填开采的覆岩裂隙发育与隔水岩组稳定性，建立了局部柔性充填隔水岩组稳定性力学模型，确定了充填条带宽度和间隔宽度计算方法。本案例紧密围绕行业发展绿色环保热点问题，为榆神府矿区特殊保水开采区充填开采提供了新方法。

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 4-1 所示。

表 4-1 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	长壁采空区柔性充填开采技术	对现有教材内容的扩充
2	直接顶与基本顶垮落特征	不同隔充比条件下覆岩垮落规律	丰富和发展现有教材采场顶板结构控制理论
3	关键层理论	条带充填保水开采隔水层稳定性控制理论	关键层学术思想对研究条带充填隔水岩组稳定性的作用

第四部分：西部矿区动力灾害预报与科学采矿

一、科研项目基本信息

科研项目背景：本案例库在 2 项国家级项目和 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，发表论文 40 余篇，其中代表性论文 10 篇，出版专著 2 部，授权发明专利 8 项，实用新型专利 10 余项。依托的科研项目信息如表 1-1 所示。

表 1-1 案例依托科研项目背景信息一览

	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示范	

成果名称：急倾斜煤层动力学灾害控制关键技术研究示范

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矿区动力灾害预报与科学采矿问题的系统总结，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：急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾技术

1. 案例介绍

急倾斜煤岩体动力灾害的调控，必须精准掌握综放面动态开采过程中急倾斜煤岩体弯曲加载蓄积能量的源头、能量的优势传导路径与传导效率，才能确定卸压吸能方案的实施位置、实施强度，通过人工诱导煤岩原位改性降低能量的传导效率、提高能量的耗散程度，联合工作面开采速度、开采段高、开采顺序的调整实现能量源头的协同控制；预测动力灾害发生的时间、空间、强度，也必须清楚的掌握能量的源头、能量的传导路径与传导效率，才能精准的预测能量传导释放的终端位置，实现动力灾害的预警。基于以上原因开展急倾斜煤岩体能量传导调控减灾及预警技术研究，有效提高动力灾害的控灾效果与预警精度，保障急倾斜煤层的安全开采。

(1) 急倾斜特厚煤层采动煤岩体的动力灾害发生机制

急倾斜煤层工作面回采使得煤岩体裂隙扩展，至某一临界位置后，煤岩体失稳释放能量诱发了冲击地压。随着综放面的持续向深开采，煤岩体能量传导主要沿中间岩柱的优势路径进行传导。随采深增加高能扩散区逐渐变宽，即随着采深增加岩柱内部中能量密度聚集区域的面积增加。压力源头是动力灾害发生的动力源，为动力灾害的发生提供原动力。动力灾害的发生是压力源和释放终端通过一个传导路径结合起来，将高压力传导至自由面终端释放，造成了终端自由面区域严重的灾害显现。综合分析认为急倾斜特厚煤层动力灾害的发生机理是“源头-传导-释放”。伴随着向深部开采，积蓄能量增加，其急倾斜煤层开采的能量优势传导致灾更为突出。如图 1.1 所示。

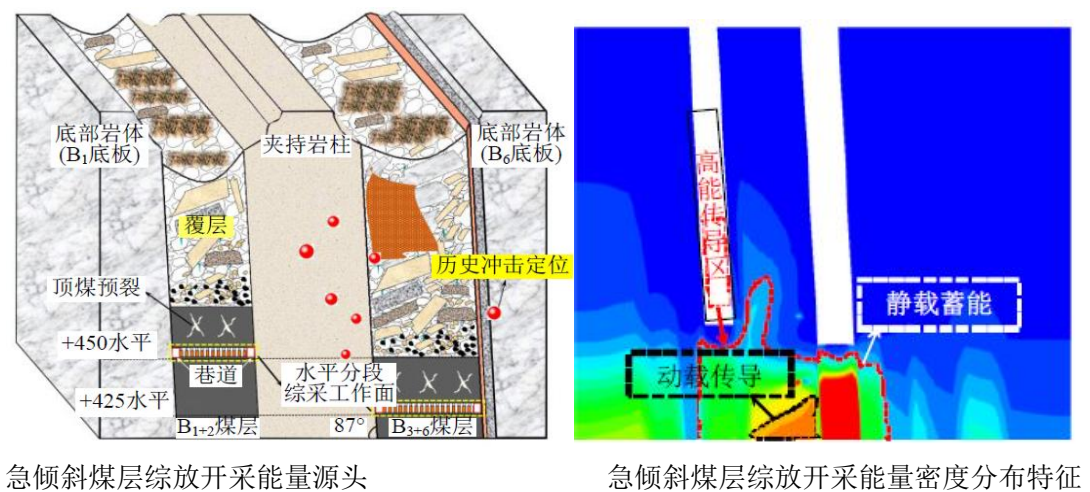


图 1.1 急倾斜煤层开采的能量优势传导致灾机理

(2) 急倾斜特厚煤层开采参数与巷道防冲布置的优化

急倾斜特厚煤层水平分段综放工作面同一水平开采时，先采煤层开采可降低后采煤层工作面下方围岩水平应力；向下分层开采时，先采煤层作为后采煤层的解放层，可降低后采煤层的工作面围岩应力集中程度。改变顺序先采 B1+2 煤使得应力渐进性递增趋势转为“V 型”变动特征，x 方向 B1+2 煤应力降低值大于 B3+6 煤应力增量。对比煤层开采的应力水平和卸压程度，先采 B3+6 煤层优于先采 B1+2 煤。如图 1.2 所示。

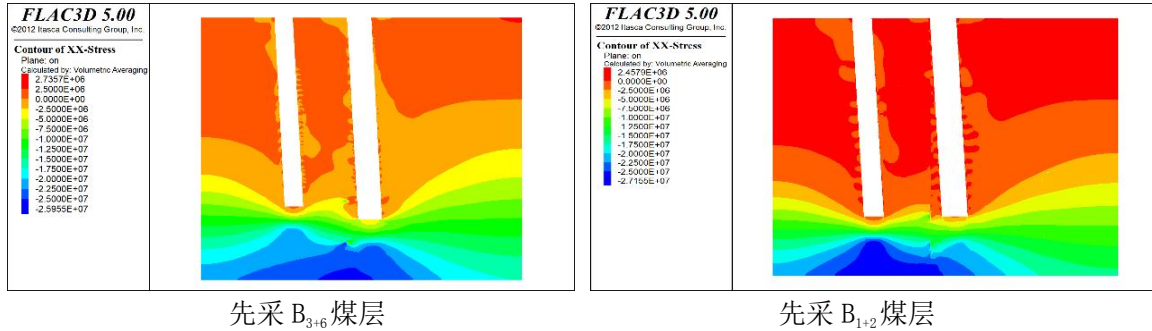
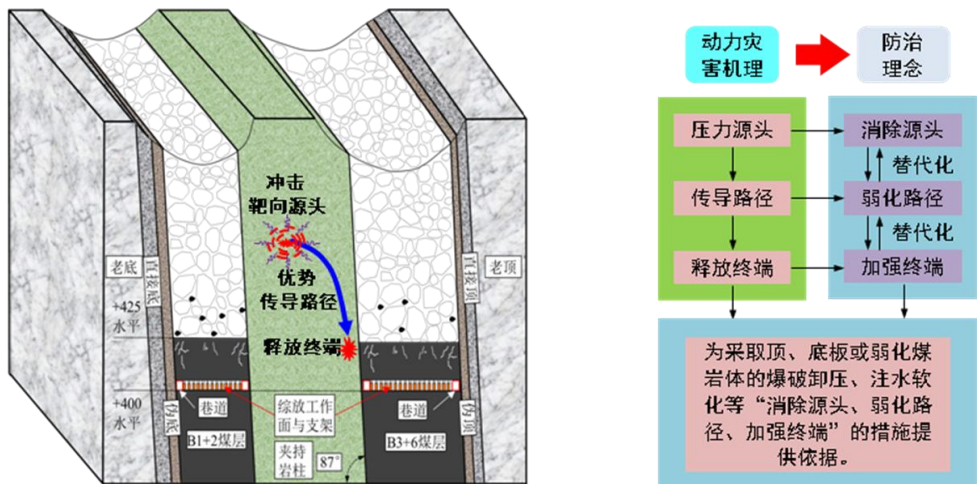


图 1.2 水平应力分布特征

(3) 急倾斜冲击地压煤岩原位改性调控减灾预警体系

动力灾害的发生可从压力源头、传导路径、释放终端 3 个层次来考虑，为此提出“消除源头、弱化传导、加强终端”的防治理念。摸清压力源头是有的放矢的首要条件；合理有效的软化煤岩体可降低或消除动力灾害对释放终端的影响；明确实施“消除源头、弱化传导、加强终端”的时机，及早“加强终端”的支护强度。现场采用顶底板深浅孔爆破，以在煤层顶底板岩石中形成立体缓冲带，阻碍与减弱应力传递。在 B3 巷沿煤体倾向施工注水，现场检测检验了煤岩体原位改性控灾技术应用效果，有效保障了工作面的安全开采。如图 1.3 所示。



动力灾害发生的动态响应示意图

动力灾害防治理念与策略框图

图 1.3 “消除源头、弱化传导、加强终端”的原位改性控灾技术

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，科学解释了急倾斜采动煤岩体能量传导调控减灾，对指导现场岩层控制实践具有重要的指导作用。研究成果在新疆、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，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 1-1 所示。

表 1-1 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	动力灾害发生机制	急倾斜煤层开采的能量优势传导	能量传导与动力灾害关联
2	开采参数与巷道防冲布置的优化	急倾斜特厚煤层开采水平应力分布特征	开采参数优化与应力分布的影响
3	煤岩原位改性调控减灾预警	煤岩体原位改性调控能量传导	煤岩体原位改性对能量传导的控制机制

(二) 案例 2：急倾斜特厚煤层群采动应力畸变致诱动力灾害控制

1 案例介绍

采动应力诱发的动力灾害是制约急斜特厚煤层群安全开采的难题之一。以乌鲁木齐矿区乌东煤矿动力灾害防控为目标，采用开采技术条件调查、理论分析、数值计算和现场监测等方法与手段，揭示采动应力畸变致诱动力灾害机理。研究表明：43 号煤层产生的采动应力经其顶煤传导作用至层间夹持煤岩柱，同时受自重作用夹持煤岩柱发生大变形，造成其倾向上部层位受拉伸应力而倾向下部层位受压缩应力，引发 45 号煤层+575 水平南巷顶板应力高度集中，导致动力灾害频发。针对 43 号煤层工作面高于 45 号煤层工作面的开采布局，制定“先注水后爆破”解危措施。现场监测结果表明微震大事件频率由 4.0 次/min 降至 1.0 次/min，电磁辐射峰值强度降至 42.8 mV，动力灾害得到有效控制。

(1) 急倾斜特厚煤层水平分段综放开采采动应力传导分析

急斜特厚煤层群的特殊地质构造(图 2.1)采用了独具特色的水平分段综放开采方法。43 号煤层工作面回采后，破碎覆层对其顶板的支撑力小，采动应力峰值下移至工作面顶煤，并且经顶煤的传导而作用至煤层底板，即层间夹持煤岩柱(图 2.2)。由于 45 号煤层+575 m 水平以上分段的回采，层间夹持煤岩柱存在较大暴露尺寸，在采动应力的剪切作用和其自重的双重作用下变形量持续增大。若受力环境进一步恶化，必然导致煤岩柱突然断裂，其内部积蓄的大量能量瞬间释放，产生动力灾害。

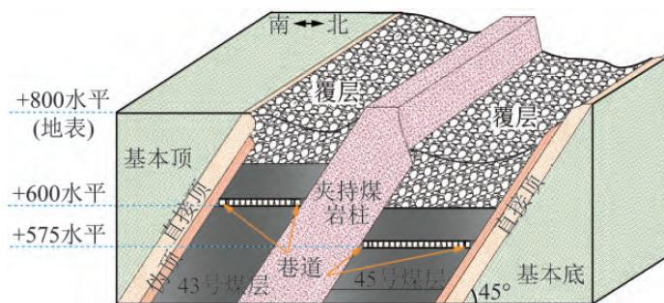


图 2.1 急倾斜煤层赋存与开采布局

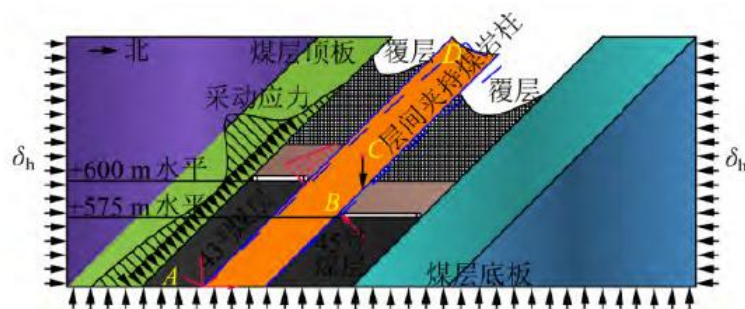


图 2.2 急倾斜特厚煤层水平分段综放开采采动应力传导分析

(2) 急倾斜特厚煤层开采扰动下垂向应力分布与演化规律

急倾斜煤层与地下岩层共同变形、相互影响。43号煤层顶板在采动应力和自重的综合应力作用下向其煤层方向倾斜，对43号煤层顶煤造成应力推挤。采动应力经43号煤层顶煤传导作用于层间夹持煤岩柱而造成巨大的剪切作用，煤岩柱在采动应力和自重的剪切与压迫双重作用下向45号煤层方向产生大变形，造成煤岩柱在靠近43号煤层的倾向上部层位受拉伸应力而在靠近45号煤层的倾向下部层位受压缩应力的受力状态，压迫45号煤层覆层和顶煤，导致煤层工作面北巷发生横向膨胀变形和顶部下沉，同时43号煤层北巷受煤岩柱倾向上部层位拉伸变形影响，导致巷道北帮发生横向变形。因为垂向深部层位的煤岩柱变形量较小，所以43号煤层南巷和45号煤层南巷整体形变量不大。由于煤岩柱岩性致密且厚度较大，并且45号煤层逐渐被挤压密实的顶煤和上覆煤岩层对其产生支撑作用，煤岩柱并没有发生断裂破坏而释放能量，始终处于完整状态。层间夹持煤岩柱内部能量主要包括3种形式：一部分为自身的形变能，一部分用于抵消综合反作用力做功，第3部分存储于煤岩柱深层局部位置，转化为冲击势能。冲击势能储能集中位置为其倾向下部层位以45号煤层+575水平南巷顶板为中心的一定范围，图2.3描述的应力集中区。随煤层开采而带来的频繁扰动，煤岩柱形变量不断增加，冲击势能随应力集中程度的加剧，持续连锁累积，导致45号煤层南巷顶板面临着动力灾害威胁，现场开采过程中需要采取有效的防控措施。如图2.3所示。

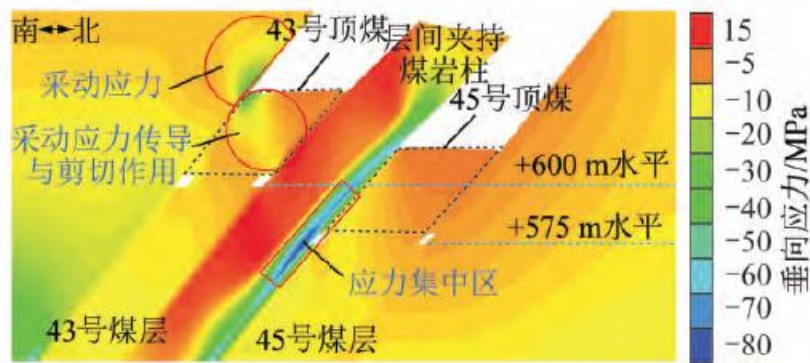


图 2.3 开采扰动下垂向应力分布与演化规律

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是由理论研究向实践应用的过渡，通过采用微震监测系统和电磁辐射监测系统对解危过程进行实时监测与分析，评估解危措施的工程实践效果（见图 2.4 与 2.5）。解危措施实施后期，此阶段层间夹持煤岩柱处于能量基本完全释放状态，弱化后的 43 号顶煤切断了采动应力传导途径，使采动应力峰值下移，减小了对层间夹持煤岩柱的挤压作用。如下图所示，微震大事件频率由 4.0 次/min 降至 1.0 次/min，电磁辐射峰值强度降至 42.8mV，解危效果显著，保障了安全生产。

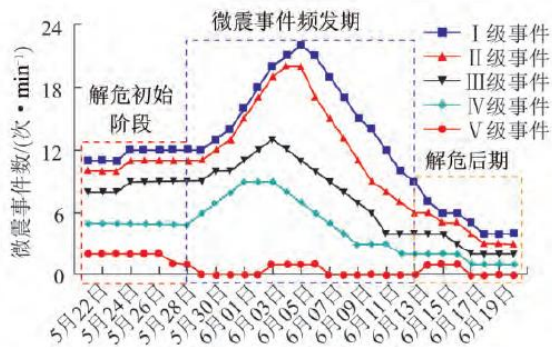


图 2.4 微震事件频率随时间变化趋势

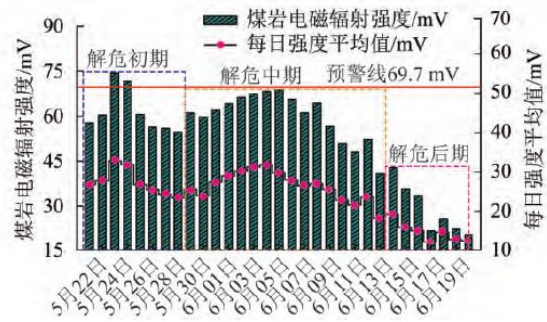


图 2.5 煤岩电磁辐射强度随时间变化趋势

从教学科研互补的角度来看，本案例是对岩层控制问题的具体画像，具有清晰的实践背景，便于在课堂上帮助学生将抽象化的理论进行具象化的感知与认识，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 2-1 所示。

表 2-1 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	基本顶的初次来压与周期来压	水平分段综放开采采动应力传导	倾角影响下顶板应力传导与能量积聚
2	开采扰动下垂向应力分布与演化规律	不同顶板结构作用下的煤岩体变形	顶板结构关系改变造成的应力分布变化
3	岩体变形破坏形式 支撑压力分布	急倾斜下的动力灾害	煤岩柱形驱动作用影响下采动应力分布

(三) 案例 3：不同孔径冲击倾向性煤样破坏特征能量演化规律

随着煤矿开采深度的逐步增加，深部采场所受的地应力也将急剧增大。在深部开采过程中，冲击地压等动力灾害的频发给煤炭资源高效安全开采带来了新的挑战。针对冲击地压防控手段，提出了以原位改性的方式进行注水软化、卸压钻孔和爆破等对围岩弱化，最终达到能量释放的目的，该方式已成为预防和控制冲击地压的主要手段。煤体从应力集中至完全破裂前必然会有破坏预兆出现，可以利用声发射在煤样加载过程中寻找破裂阶段破坏特征信号。针对峰前破裂阶段，使用声发射搜寻关键破坏特征信号，从而锁定特征破坏点并对其能量进行分析，探究不同孔径煤样在加载破坏前能量演化规律，为深部开采过程动力灾害的预警提供科学支撑。

1 案例介绍

提出将耗散能 U_d 与弹性应变能 U_e 之比 K 描述孔洞煤样加载过程中破坏情况，通过声发射监测加载过程中信号携带能量变化搜寻煤样加载过程中关键特征破坏节点，探究不同孔径煤样在加载破坏前能量演化规律，获得了冲击倾向性煤样卸压下的失稳破坏特征，拓展了该类煤层安全高效开采技术的应用范围。孔洞煤样加载过程中破坏特征能量的演化规律可为煤层开采过程中卸压释能提供参考，为控制动力灾害发生的规模与频度提供了理论与实验支撑。

(1) 含孔洞煤样不同加载阶段损伤演化规律

在进行加载破坏过程中需要对岩石进行能量输入，使岩石完成形态转变。假设在加载过程中煤样与外界不存在热交换，煤样为封闭热力学系统。因此，在加载过程中，煤样存在3种能量交换(如图3.1所示)，即总输入能 U 、弹性应变能 U_e 、耗散能 U_d 。

完整煤样在加载破坏过程中曲线应力-应变曲线变化相对平滑，声发射在破裂阶段的累计能量平滑上升，振铃计数峰值处激增。煤样在加载过程中内部单元受力均匀，应力不断积聚，所萌发扩展的裂隙在煤样内均匀分布，达到峰值强度时，岩体强度失效裂纹贯通，岩体破坏表现突发式破坏。

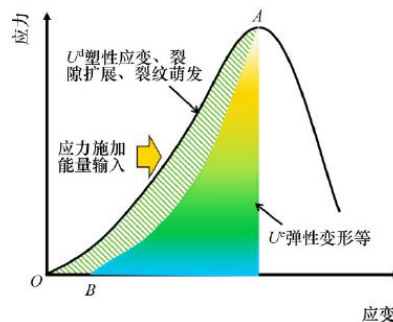


图 3.1 煤样加载过程中能量转换关系

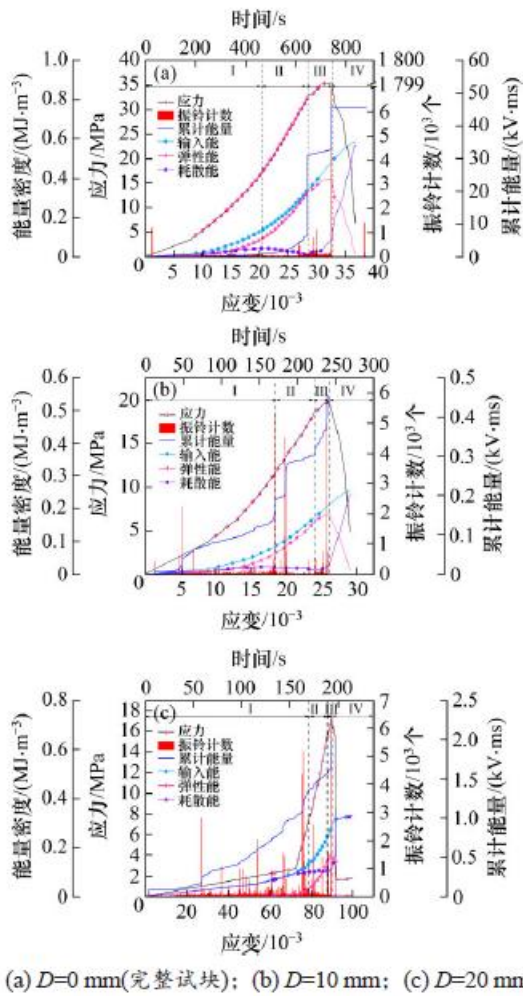


图 3.2 不同孔径煤样应力-能量-声发射演化曲线

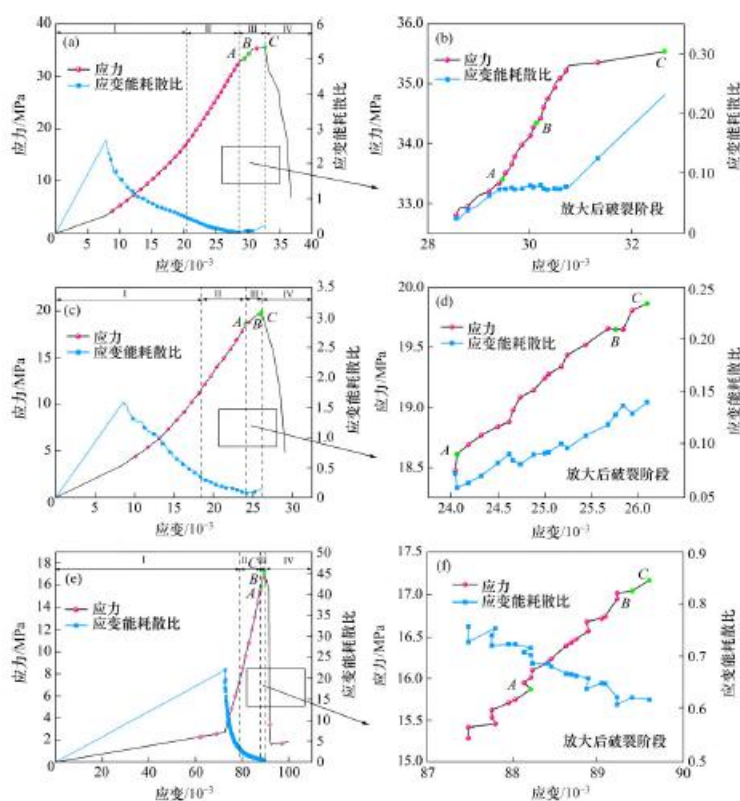
随着孔径的逐步增大，耗散能曲线变化开始逐渐升高，同时，破裂阶段 AE 累计能量表现出直线上升，并在该阶段振铃逐渐频繁触发，反映出孔洞煤样在外部加载破坏过程中岩体内部单元表现受力的不均匀性，在孔洞周边出现应力集中区域，导致岩体内部大范围不均匀出现裂隙的萌发扩展，最终煤样断裂在应力峰值处贯通使强度发生劣化。

不同孔径煤样耗散能曲线弹性阶段在加载过程中衰减，当荷载加载到破裂阶段时耗散能曲线开始逐步上升，说明在岩体在弹性储能阶段将外部输入的能量进行储存，在破裂阶段裂隙之间快速贯通进行能量释放。同时，随着孔径的增大，不同孔径煤样破裂阶段耗散能曲线变化趋于平缓，说明在该阶段煤样内部裂隙的萌发贯通受到孔洞增大的影响，导致岩体破裂减少。如图 3.2 所示。

(2) 孔洞煤样特征破裂特征

基于煤样能量耗散机制，通过耗散能 U_d 与弹性应变能 U_e 之比 K 描述孔洞煤样加载过程中破坏情况。在弹性阶段，不同孔径煤样弹性能耗散比 K 近似表现线性递减趋

势，而且孔径增大使得 K 递减速率变化增大。表明在该阶段煤样内部裂隙的萌发和扩展仍在持续进行，但是弹性应变能的储存占据着主导地位，该过程能量耗散较少。孔径的增大抑制了孔洞周边煤体的损伤破坏，降低了能量的耗散，因此，在弹性阶段，弹性能耗散比 K 快速衰减。在破裂阶段，随着孔径增加，弹性应变能耗散比 K 渐趋趋于平稳。这主要是由于内置结构的形成使得应力在结构周边形成了应力集中区，由关键破裂影响煤样破坏。因此，孔洞的存在在一定程度上减少了破裂阶段裂纹扩展的数量，使得煤样破裂维持在相对稳定的状态。煤样内置孔洞孔径的增大加速了煤样的失稳，导致煤样加载时储存的弹性能在劣化失稳前快速大量释放，因此，造成了大直径孔洞煤样整体 K 在破裂阶段呈现下降趋势。随着卸压孔径增大，煤层中关键特征能量位置也逐渐增多，煤层断裂破坏过程所耗散的能量也逐渐增大。如图 3.3 所示。



(a) $D=0$ mm(完整试块); (b) 图(a)局部放大; (c) $D=10$ mm; (d) 图(c)局部放大; (e) $D=20$ mm; (f) 图(e)局部放大

图 3.3 不同孔径煤样弹性应变能耗散比的变化曲线

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的研究内容是基于煤样单轴加载峰值强度前的破裂阶段破坏特征的能量和破裂关系，使用声发射搜寻关键破坏特征信号，从而锁定特征破坏点并对其能量进行分析，为煤层开采过程中卸压释能提供参考，同时也为深部开采过程动力灾害的预警提供科学支撑。

从教学科研互补的角度来看，本案例是对动力灾害问题研究解决的灵活运用，属

于课程内容的延伸与拓展，通过案例讲解可以激发学生的创新思维，锻炼“举一反三”分析问题的能力。

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 3-1 所示。

表 3-1 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	煤岩承载下的变形破坏特征	不同孔径煤样耗散与动力灾害发生的机制	煤岩结构力学特性与灾害发生适用条件
2	采场矿压动力显现与卸压措施	孔洞煤样特征破裂特征与动力失稳联系	孔洞煤样特征破裂特征与动力灾害发生的影响

(四) 案例 4：急倾斜煤层(群)水平分段顶煤超前预爆范围确定

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 mB3—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) 急倾斜特厚煤层水平分段综放开采扰动区结构特征

开采扰动导致煤体应力重新分布,当煤层裂纹扩展力超过煤体的局部拉伸强度时,煤层裂纹起裂、扩展与失稳,顶煤产生局部冒落。若煤层裂纹(或结构面)发育并相互作用,造成顶煤大尺度垮落诱致动力灾害。煤岩“损伤-断裂-失稳”是多元(时间与空间演化)信息耦合作用的物理-力学过程。急倾斜煤岩体在不同层位区域和不同尺度扰动作用下产生剪切-滑移,增加了支护与开采难度。急斜煤层是复杂构造运动的结果,由于急斜煤层(群)工作面较短,开采扰动区可视为一个采空区尺度的活化断层结构。煤体内部存在许多不连续的微裂隙,在复杂应力作用下,裂纹端部的集中拉应力超过煤体拉抗强度时,裂纹端部产生新裂纹或扩展初始裂纹,导致顶煤断裂。顶煤超前预爆破就是应用煤层深孔聚能爆破致裂方法,利用特殊装药结构积聚爆炸能量,在爆生气体二次驱动下扩大顶煤断裂带范围。如图 4.1 所示。

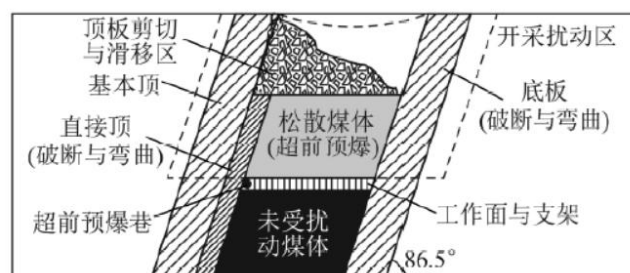


图 4.1 急斜煤层开采扰动区结构特征

(2) 急倾斜特厚煤层顶煤应力与变形规律综合分析

科学先进的顶煤运动规律的监测对安全开采至关重要。为获取采动影响下顶煤应力分布演化规律,采用分区域监测方法(图 4.2)。通过工作面观测、三维数值模拟分析和相似材料模拟实验,发现了急斜煤层埋藏较深(约 246 m),且顶板为较硬粉砂岩,在采动影响下易产生剪切破断与滑移,并与破断顶煤相互作用,工作面应力集中或产

生冲击载荷，诱发大面积顶煤整体性冒落。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(见图 4.3)。

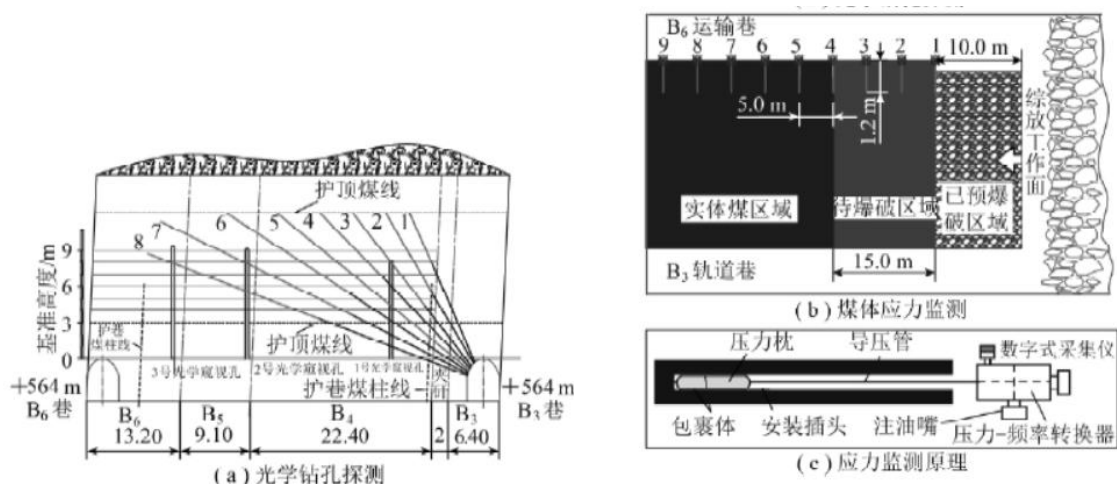


图 4.2 现场综合监测点布局

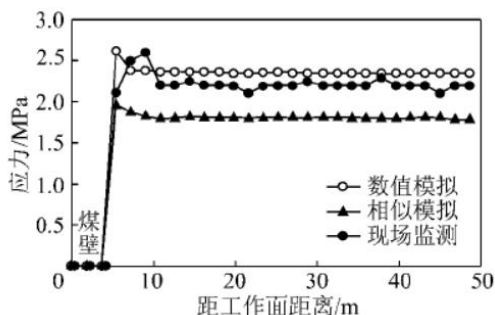


图 4.3 急倾斜特厚煤水平分段综放工作面超前支承压力分布综合比较

利用光学窥视方法，获得了顶煤变形特征。对比分析表明，0~1.0m 裂隙发育，1.0~2.5m 纵向裂隙丛生，一条裂隙继续延伸到 4.5m 处；5.0~6.0m 煤体破碎，主要是超前预爆破后此处煤体变为松散煤块向钻孔内自由面挤压所致，5.0~6.0m 下方顶煤下端受挤压，此处护顶煤柱为 3.0 m，裂隙在 2.5 m 发育，冒顶几率增大。

(3) 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，+564B₃₋₆工作面超前预爆破实施方案见图 4.4 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。

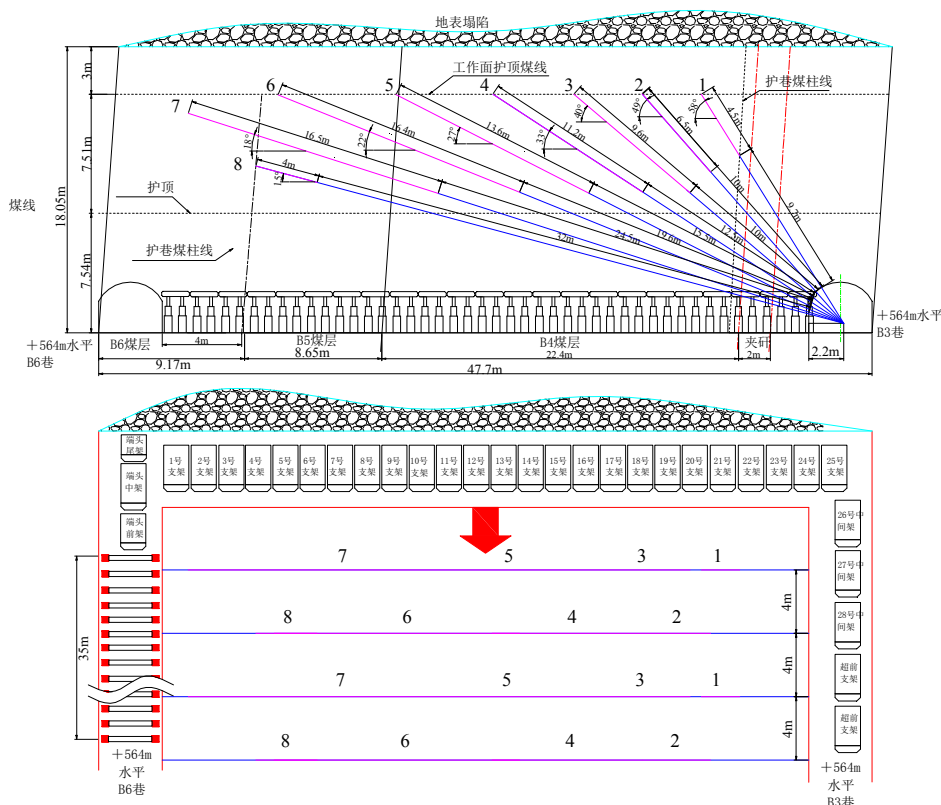


图 4.4 超前预爆布置相关参数

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(图 3-2)，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(图 3-4)，BQF-100 封孔器封孔(图 3-5)，封孔材料选用黄泥，封孔长度不少于 8m。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 8m，间距为 4m，工作面护顶煤厚 4.3m。北巷护巷煤柱定为 4m，南巷定为 5m。

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 10.0~35.0m，支护距离在 0~45.0m，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

本案例中涉及的急倾斜煤层超前预爆破技术，针对急倾斜特厚煤层复杂地质与开采技术条件，创造性地应用了急倾斜特厚煤层综放开采综合控顶方法，变革了采煤工艺，杜绝了工作面架间爆破落煤，实现了安全开采，提高了作业效率和安全性，降低了成本。采用多种先进的现场监测与探测方法及手段，为超前预爆破设计与优化提供了依据，提高了急倾斜特厚顶煤弱化效果。超前预爆破范围控制在 10.0~35.0 米。解决了影响安全回采的突出矛盾，全面提高了综放回采综合效率，创造了明显的经济效益和社会效益。2010 年 12 月由新疆维吾尔自治区科技厅鉴定，达到国内领先水平。

从教学科研互补的角度来看，本案例是对巷道岩层控制与采场岩层控制的结合，既有煤矿回采巷道本身变形破坏的影响因素分析，又涉及沿空巷道在工作面重复采动影响下的变形破坏，与采场周围的支承压力分布相关，最终提出的巷道围岩控制技术又涉及了各类型巷道柔性支护原理，是对课程知识内容的系统性串联与应用。涵盖知识点多，范围广。本案例蕴含的教学内容与科研发现之间对应关系如表 4-1 所示。

表 4-1 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	采场围岩应力及变形规律	水平分段综放开采对扰动区结构特征的影响	埋深、围岩性质等天然影响因素是如何影响顶煤应力与变形规律的
2	顶煤冒放性改善	超前预裂爆破效的具体布置形式	实践应用场景代入

(五) 案例 5：不同卸压措施下“双能量”指标协同预警及调控

1. 案例介绍

煤矿冲击地压防治措施实施均与卸压工程息息相关，为进一步细化卸压措施的合理性，从工程尺度将卸压措施转化为实验室尺度的卸压手段。通过单轴压缩方式施加静载，在室内尺度下分别得出 2 种常用卸压手段承载煤样的损伤演化规律，分析“双能量”指标一致性，并构建协同预警机制。将承载煤样破坏过程“双能量”指标尝试引入到承载煤样破坏前兆判别思路，最终形成协同预警机制，具有广阔的应用前景。

(1) 揭示了不同卸压措施承载煤样力学特性

注水软化调控措施未能显著改变破坏特征曲线（图 5.1），而曲线部分特征参数发生明显改变，体现在峰前线性段斜率降低，且峰后应力-应变曲线亦有所差别，峰后应变区间范围与含水率呈现正相关性。就注水卸压状态煤样而言，煤样平均含水率分别为 0%，3.28%和 5.51%时，相较于完全干燥状态煤样，平均峰值强度分别降低了 28.7%和 34.4%；平均峰值应变分别降低了 21.5%和 19.0%；平均弹性模量整体出现降低趋势。随着含水率的增大，煤样的峰值强度、峰值应变和弹性模量均出现不同程度降低，但降低幅度均随含水率增加而显著减小，间接说明注水卸压措施能对煤样的力学参数进行宏观调控，存在显著率响应效应。

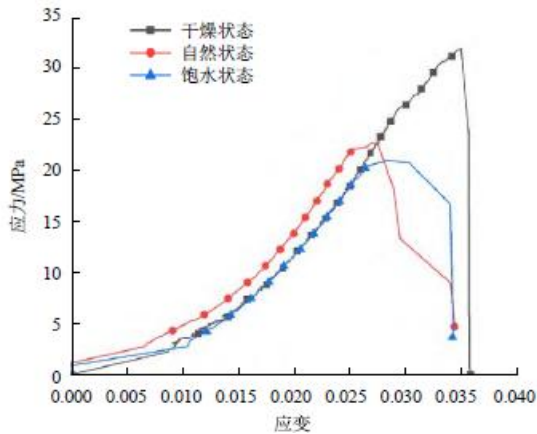


图 5.1 注水卸压状态典型煤样变形破坏特征

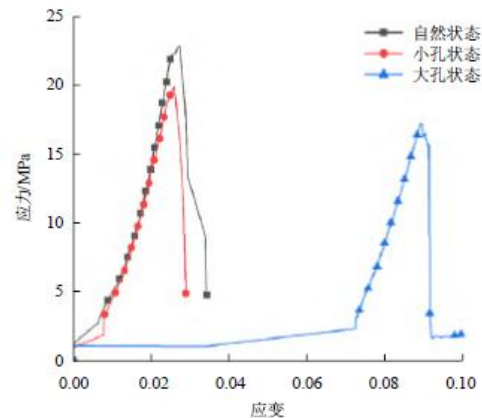


图 5.2 钻孔卸压状态典型煤样变形破坏特征

不同钻孔卸压措施显著改变改变了破坏特征曲线（图 5.2），出现明显的应力转移和应力平衡阶段，随着孔径的改变，特征点力学参数均显现出差异性。就钻孔卸压煤样而言(其中注水卸压中自然状态下煤样作为该措施下完整状态煤样进行空白对比分析)，煤样孔洞直径分别为 0，10 和 16 mm 时，相较于自然完整状态煤样，平均峰值强度分别降低了 13.1%和 24.8%；平均峰值应变分别减小了 5.0%和增大了 226.1%；平均弹性模量随孔径增大出现降低趋势，其中自然状态和小孔状态下弹性模量数值近乎

一致，而大孔状态下弹性模量数值降低。随着卸压孔洞尺寸的增大，煤样的峰值强度显著降低，且降低幅度与孔洞尺寸呈现明显正相关性，此外峰值应变和弹性模量出现两者差异显著类型，即存在应力转移和应力平衡状态，间接说明钻孔卸压措施能对煤样的力学参数进行宏观调控，同样存在显著率响应效应。

(2) “双能量”指标的跨尺度协同预警技术

二维状态下，声发射“监测能量”为细观层面损伤演化，而理论“计算能量”为宏观层面损伤演化，利用二维状态下理论“计算能量”和声发射“监测能量”，验证了“双能量”指标之间的一致性。分别统计累积声发射“监测能量”和累积“计算能量”归一化演化趋势，发现其两者之间的线性关系，可表明不同卸压措施承载煤样损伤演化全程主要由于能量贯穿，同时亦可表明两者之间的跨尺度协调性。基于此，在三维状态下，分析现场大型工程尺度深部煤岩体冲击地压预测预报问题时，往往利用以微震“监测能量”为主体的多源时空数据之间的协同变异系数，采用精细化数值模拟配合理论计算，有效获取“计算能量”，进一步可以在三维状态下刻画累积“计算能量”，结合现场大尺度累积“监测能量”，利用协同-并行计算，形成跨尺度“双能量”指标冲击地压协同预警机技术，对现有的冲击地压防治工作提供可靠依据，如图 5.3 所示。

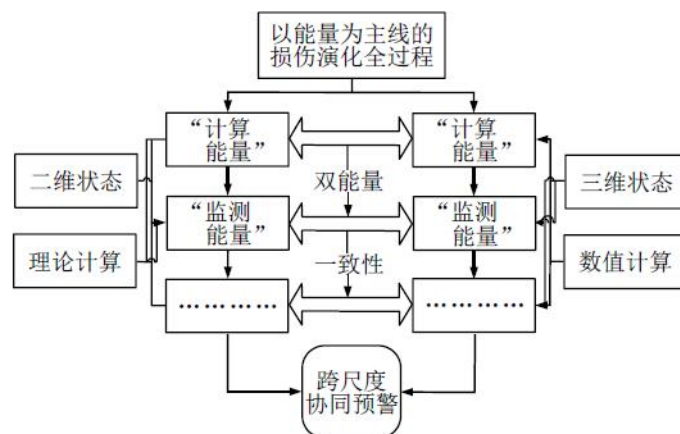


图 5.3 跨尺度协同预警技术

2. 案例实际应用效果

本案例中涉及的不同卸压措施下“双能量”指标协同预警及调控技术在宽沟煤矿开展应用，初始预报时间比冲击地压发生时间提前 2-7 日，预警方法准确预警率为 83.3%。根据关键层层位与煤层的间距，确定了超前深孔爆破高度为 44.3m，同时由覆岩破断角确定了炮孔角度为 73~79°。顶板超前爆破降低了微震事件聚集区的大能量事件，平均来压强度由 37.0MPa 降低至 31.5MPa，来压步距由 31.5m 降低至 28.4m，爆破效果较好。采用一种等效面积下钻孔卸压方法，运用于 W1123 回采巷道进行卸压。卸压钻孔直径 150mm、孔深 12m、间距 1m，沿巷道煤柱侧距底板 1.5m 单排布置。通过微震监测得到现场卸压后的高能量事件明显减少，日均震动频次由 73 次降低至 52

次，降幅达 28.7%，煤柱内部能量释放明显降低，卸压效果明显，保障了安全生产。

从教学科研互补的角度来看，本案例是对缓倾斜特厚煤层覆岩结构类型划分及关键层层位计算确定，准确识别覆岩整体特征的主要加载层、松散层、关键层揭示缓倾斜特厚煤层综放面走向方向、倾向覆岩采动破断及垮落规律，分析得出考虑上层采空区压力传导作用下的覆岩结构演化趋势，揭示覆岩垮落后的结构及层位关系，指导工作面回采及支护的相关参数优化，为实现矿井冲击地压的有效防控提供科学支撑和设计依据，实现矿井冲击地压有效防控的目的。与采场矿压调控预警密切相关，最终提出的预警及调控技术是对课程知识内容的系统性串联与应用。涵盖知识点多，范围广。

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 4-1 所示。

表 5-1 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	围岩应力及变形规律	不同卸压措施对承载煤样力学特性的影响	卸压措施因素是如何影响煤样力学特性的
2	动力灾害预警	深部煤岩体冲击地压预测预报手段	实践应用场景代入