



中国煤炭科工集团
开采研究院有限公司
CCTEG COAL MINING RESEARCH INSTITUTE

煤矿矿井水安全防控与保护技术及应用

张玉军 研究员/博导

中煤科工开采研究院有限公司

2025年5月28日

汇报提纲

一

研究背景

二

顶板含水层控水开采技术及应用

三

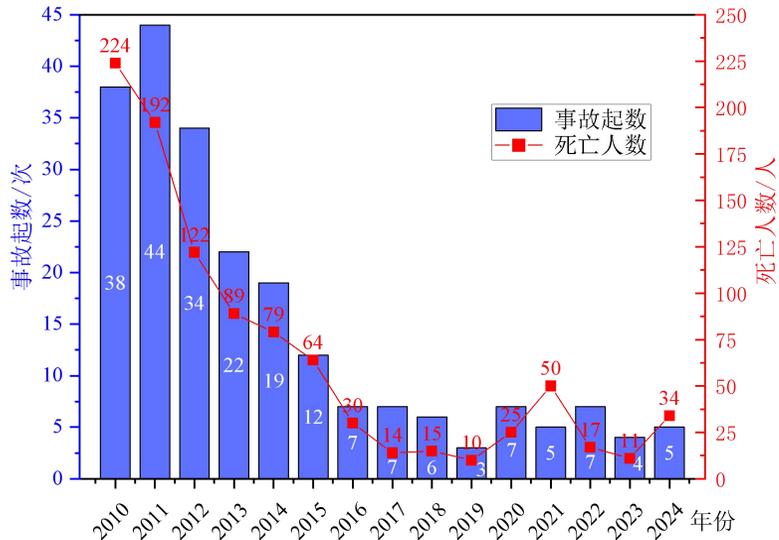
底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



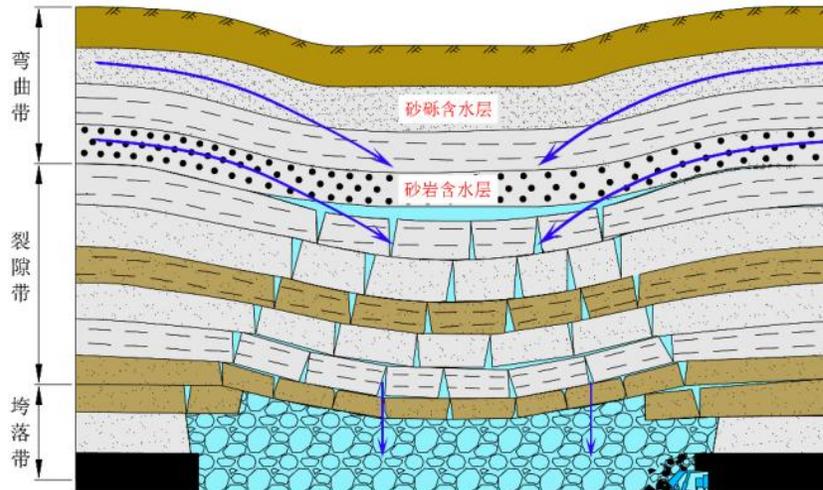
研究背景

一、研究背景

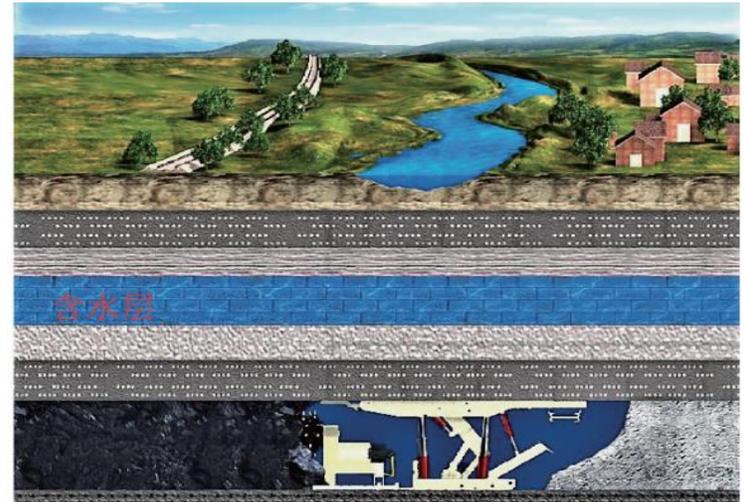
- 我国煤矿区水体类型多，地表水、顶板孔隙裂隙水、底板灰岩水、老空水等**水源复杂多样**，采动裂缝、陷落柱、钻孔等**突水通道变化莫测**。伴随高强度开采耦合特殊、复杂水文地质条件，使得矿井水害仍是主要灾害之一。
- **含水层疏水降压**是水害防控的主要手段，但过量疏放不仅增加矿井涌水量及排水费用，还导致地下水位大幅度下降，**水害精准防控和水资源保护**难度大。



我国煤矿水害现状



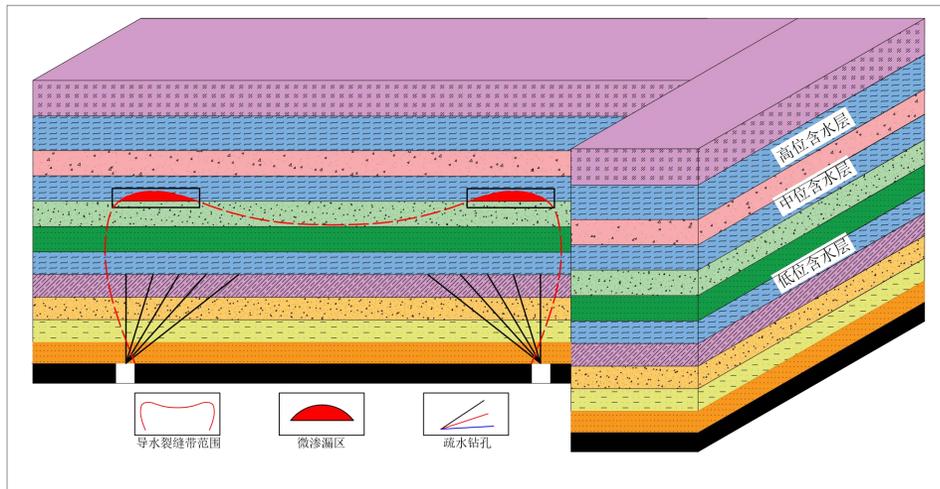
煤矿开采破坏水资源



煤矿充填保水开采示意图

一、研究背景

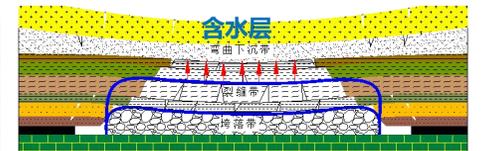
我国已形成一套符合煤矿实际的水体下、承压水上采煤和水害防控安全开采技术。随着煤炭开采深度、厚度和规模的逐渐增大，深部矿井、高强度开采、特殊地质和生态环境条件等使得煤矿水害精准防控和水资源保护难度增大，亟需开展并创新水害防治与水资源协同保护理论与技术，构建不同地质及开采条件下的含水层防控与保护技术体系。



顶板含水层控水开采

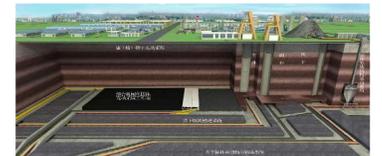
自然保水

对回采工艺与受护水体不采取任何措施，采动破坏未改变隔水岩层原有隔水性能，实现自然保水开采。



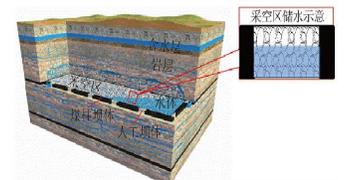
限采保水

限厚开采 条带开采 充填开采
隔水层再造 注浆加固和强化采空区围岩结构



水资源再利用

地下水库
井下采空区处理矿井水的循环系统和水资源利用技术



保水开采技术



顶板含水层控水开采技术及应用

二、顶板含水层控水开采技术



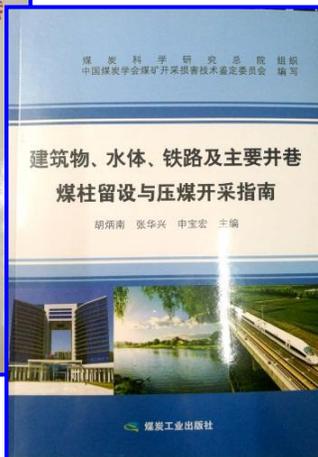
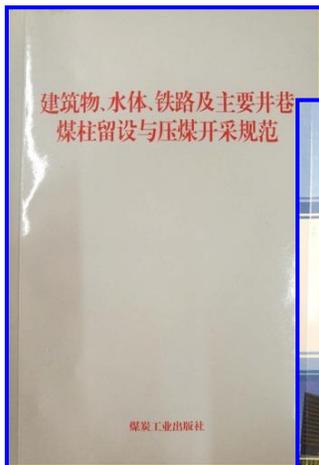
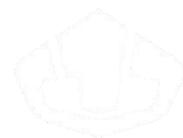
■ 我国顶板水害防控与水资源保护发展现状



- 根据地表水体、松散含水层水体和基岩含水层水体的赋存状态、水力联系以及水体下采煤的经验，可将水体分为**单一水体**和**复合水体**两大类型共 7 种。
- 单一水体即指单纯的**地表水体**、单纯的**松散含水层水体**和单纯的**基岩含水层水体**共 3 种；复合水体则指上述单一水体的不同组合，常见的有 4 种。

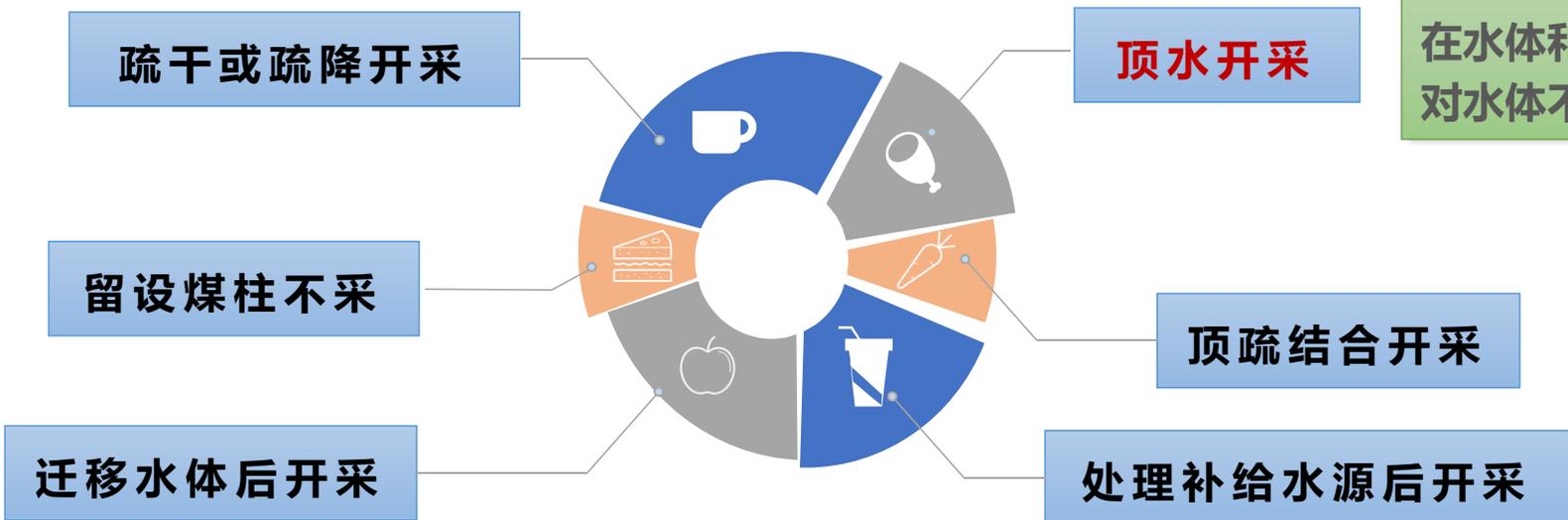
| 水体类型 | 水体与煤层不接触 | 水体与煤层接触 |
|--------------|----------|---------|
| 地表水 | | |
| 松散层水 | | |
| 基岩水 | | |
| 松散层水+地表水 | | |
| 基岩水+地表水 | | |
| 基岩水+松散层水 | | |
| 基岩水+松散层水+地表水 | | |

二、顶板含水层控水开采技术



| 煤层位置 | 水体采动等级 | 水体类型 | 允许采动程度 | 要求留设的安全煤岩柱类型 |
|------|--------|---|----------------------------------|--------------|
| 水体下 | I | <ol style="list-style-type: none"> 1.直接位于基岩上方或底界面下无稳定的粘性土隔水层的各类地表水体; 2.直接位于基岩上方或底界面下无稳定的粘性土隔水层的松散孔隙强、中含水层水体; 3.底界面下无稳定的泥质岩类隔水层的基岩强、中含水层水体; 4.急倾斜煤层上方的各类地表水体和松散含水层水体; 5.要求作为重要水源和旅游地保护的水体 | 不允许导水裂缝带波及到水体 | 顶板防水安全煤岩柱 |
| | II | <ol style="list-style-type: none"> 1.底界面下为具有多层结构、厚度大、弱含水的松散层或松散层中、上部为强含水层，下部为弱含水层的地表中、小型水体; 2.底界面下为稳定的厚粘性土隔水层或松散弱含水层的松散层中、上部孔隙强、中含水层水体; 3.有疏降条件的松散层和基岩弱含水层水体 | 允许导水裂缝带波及松散孔隙弱含水层水体，但不允许垮落带波及该水体 | 顶板防砂安全煤岩柱 |
| | III | <ol style="list-style-type: none"> 1.底界面下为稳定的厚粘性土隔水层的松散层中、上部孔隙弱含水层水体; 2.已或接近疏干的松散层或基岩水体 | 允许导水裂缝带进入松散孔隙弱含水层，同时允许垮落带波及该弱含水层 | 顶板防塌安全煤岩柱 |

顶板含水层的解决途径



在水体和煤层之间保留一定厚度的煤岩柱而对水体不做任何处理的开采

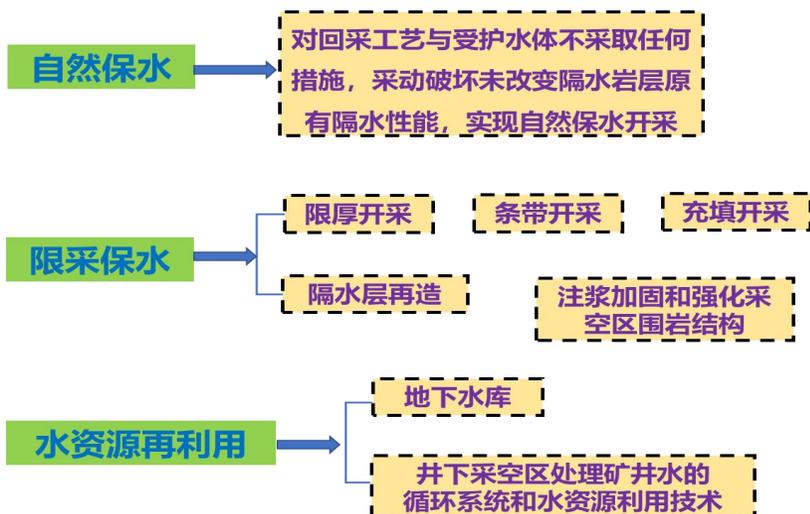
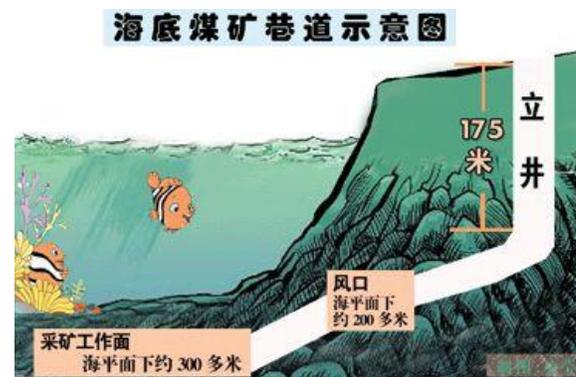
二、顶板含水层控水开采技术



■ 我国顶板水害防控与水资源保护发展现状

□ 我国在五十年代就开始了水体下采煤的系统研究和实践；成功的进行了**海域、河流、湖泊、水库、松散含水层、基岩含水层、岩溶**等各种水体下的采煤，并形成一套符合我国煤矿实际的理论和安全开采技术与措施。

□ 刘天泉院士团队于1981年提出关于**矿区水体保护思想**的论述；
□ 围绕水文地质保障基础、导水裂缝带高度、保水开采工艺等，形成了**自然保水、限采保水和水资源再利用**三大类保水开采技术，近年提出**受扰动含水层修复技术、煤水共采技术**等。

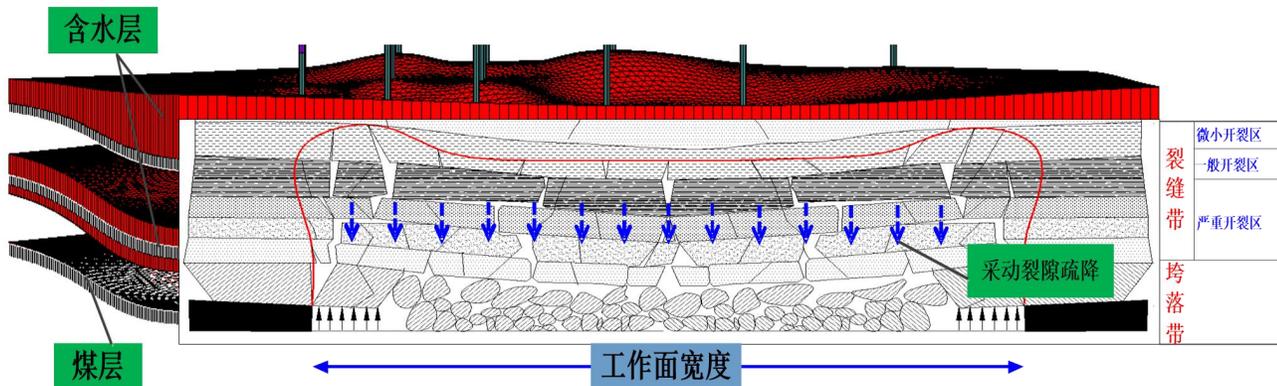


□ 随着煤矿**开采技术水平**的不断提高、**地质采矿条件**的不断变化, 社会对**生态环境保护**的重视, 促使**防治水技术**需与**采煤方法**及其各有关**技术**的变化、**安全生产和生态需求**的结合更加紧密。

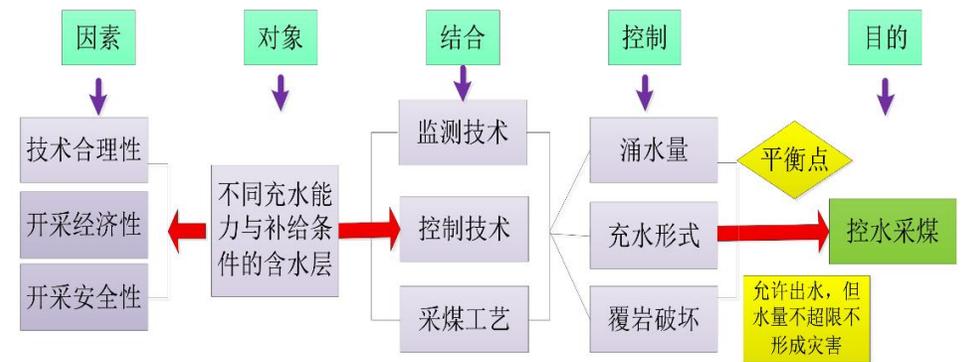
二、顶板含水层控水开采技术

控水开采技术原理及体系构建

- 综合考虑煤矿**安全**、**经济**和**水资源保护**合理因素，针对**不同充水能力与补给条件**的含水层，结合具体的地质采矿条件、相应的**采煤工艺**和**覆岩控制技术**，基于覆岩**采动裂隙垂向导水性**差异分区特征和采动覆岩隔水特性，通过**控制导水裂缝带**垂向不同分带进入含水层的扰动范围，**控制工作面充水量和充水形式**，实现“**控水保安全，保水促生态**”的双重目标。



覆岩采动裂隙垂向分区图



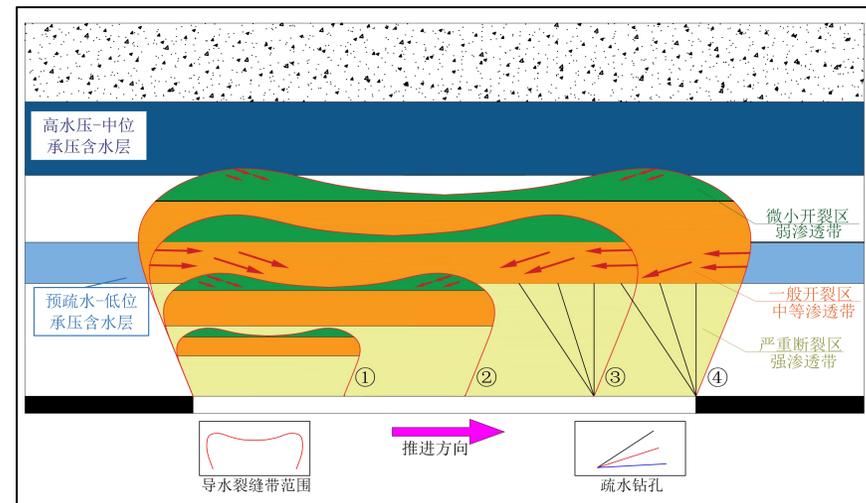
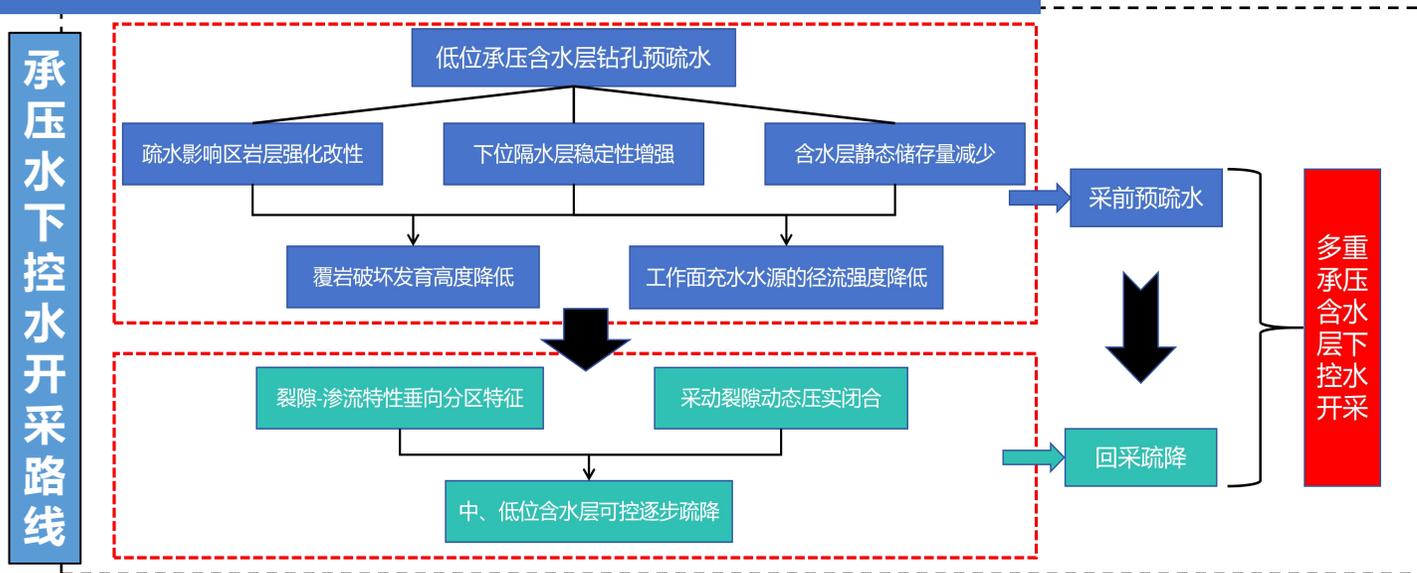
控水开采技术路线图

解决了水体下留设不同类型防水煤岩柱技术而造成煤炭资源的大量损失，或者过量的对含水层的疏放导致地下水位大幅度下降，导致矿区生态环境遭到严重破坏等问题。

二、顶板含水层控水开采技术



控水开采技术原理及体系构建



回采疏降控水效果示意图

采前预疏水

- 采前疏水降压对“疏降漏斗”影响范围内的岩层强度和载荷空间传递有明显控制作用：①疏水影响区岩层发生**强化改性**；②隔水层所承受的**最大拉应力水平下降**；③抑制采动覆岩破坏高度

回采疏降

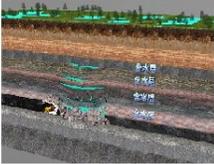
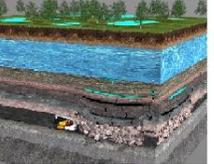
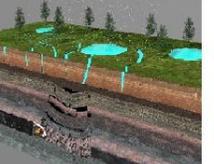
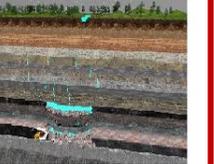
- 弱渗透带与压实裂隙构成**阻水结构**，限制工作面**涌水量超限**。

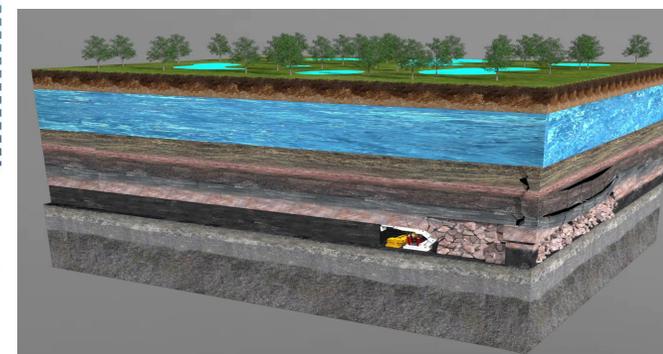
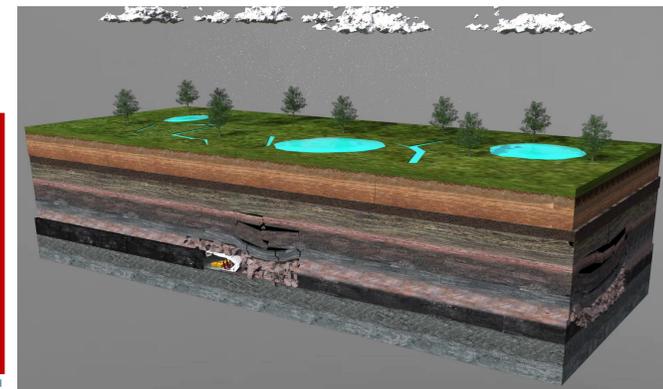
二、顶板含水层控水开采技术



提出了顶板含水层多种典型控水开采模式

基于顶板含水层与主采煤层的空间关系以及充水特征，提出了7类典型的控水开采模式。

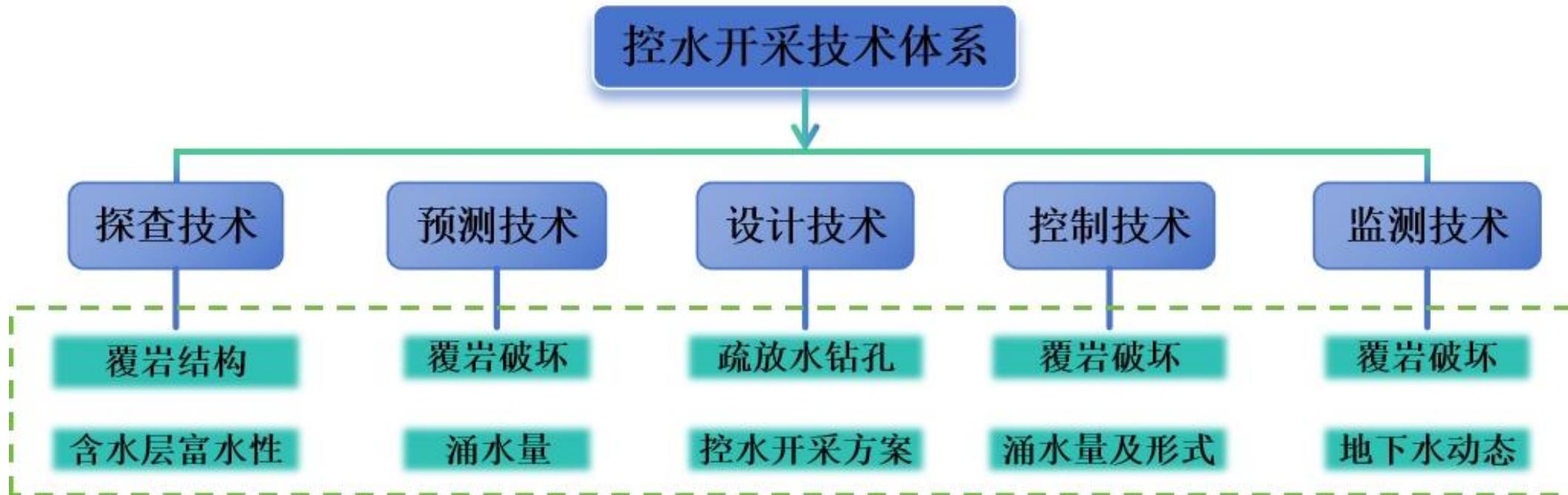
| 区域 | 蒙东矿区 | 蒙陕西部矿区 | 彬长、陇东矿区 | 榆神矿区 | 黄淮地区 | 榆神、新疆矿区 | 榆神矿区 |
|------|--|--|--|--|---|---|--|
| 充水模式 | 弱固结水砂溃涌  | 高承压渐进充水  | 高位巨厚含水层渗透充水  | 上下行裂缝渐进导通式充水  | 高水压砂砾含水层充水  | 侧向大通道强补给充水  | 高静储垂向瞬态充水  |
| 水源 | 顶板弱固结含水层 | 直罗组底部含水层 | 洛河组含水层 | 萨拉乌苏组含水层 | 第四系底部砂砾含水层 | 烧变岩含水层 | 上覆采空区积水 |
| 赋存特征 | 多层、具有流动性 | 初始水压高、富水强，静储量 | 厚度大、水压高，垂向富水性不均一 | 红土层相隔，局部缺失 | 高水压、中等富水、透镜体 | 补给强，通道畅通 | 补给丰富、间距小 |
| 通道 | 垮落带、裂缝带 | 裂缝带上部 | 导水裂缝带 | 地表裂缝与裂缝带沟通 | 风化带煤柱失稳 | 裂缝带、侧向烧变通道 | 导水裂缝带 |
| 充水形式 | 水砂溃涌 | 采动裂缝渐进补给下部含水层 | 采动裂缝渗透 | 地表裂缝与裂缝带沟通 | 泥水溃入 | 侧向涌入或补给 | 垂向瞬态 |



二、顶板含水层控水开采技术



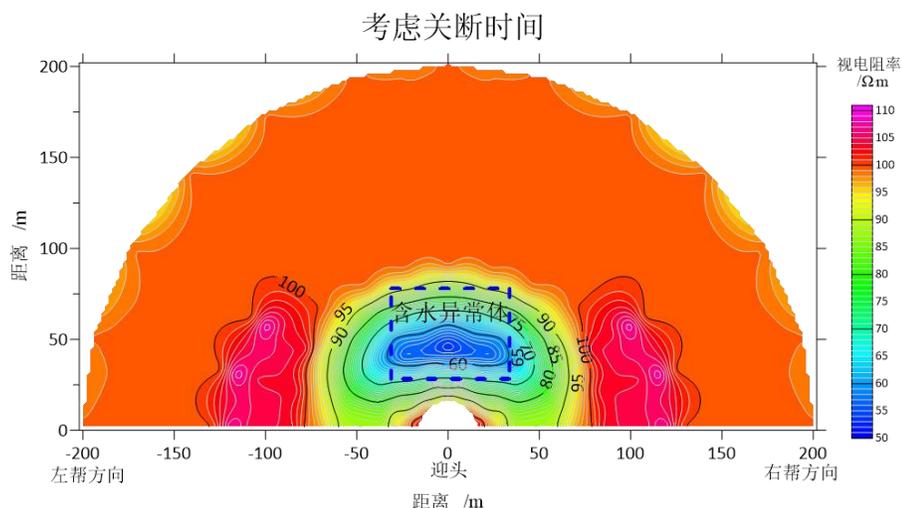
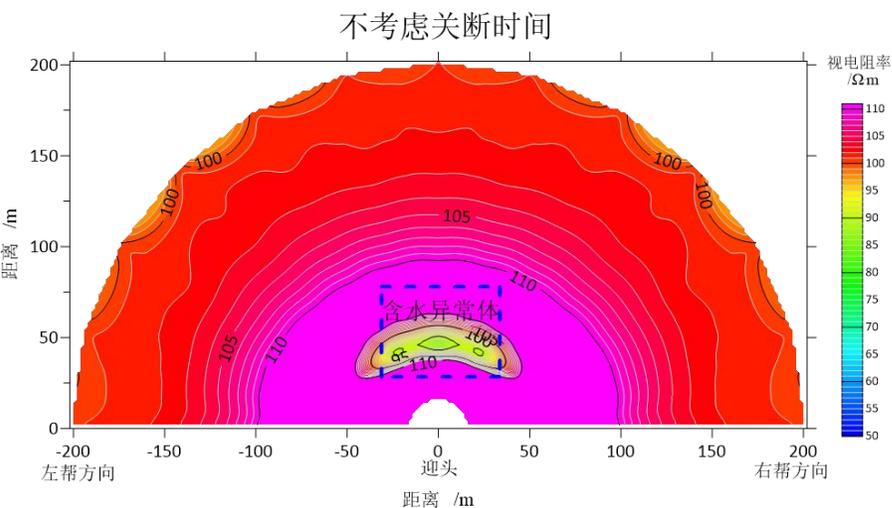
将近水体采煤技术与防治水技术相结合，以**采动覆岩破坏控制**为核心，构建“**含水层精细探测、覆岩破坏精准控制、充水量可控疏降、水情协同监测预警**”为一体的煤矿顶板含水层控（保）水开采理论及技术体系。



二、顶板含水层控水开采技术

关键技术1：提出了基于瞬变电磁的顶板含水层富水性精细探测技术

- 开发了**考虑关断时间的全空间全程视电阻率**计算方法
- 解决了探测过程中**虚假高阻异常**，导致探查结果存在较大盲区，难以满足对近距离煤层顶板含水层富水性探测精度的要求。



不考虑和考虑关断时间效应时的数据（关断时间约100us）结果对比



二、顶板含水层控水开采技术



- ◆ 覆岩破坏高度（垮落带和导水裂缝带）是顶板含水层下安全开采的核心参数，是水害防控与含水层保护技术的关键。
- ◆ 从不同的分类角度，系统的研究了覆岩破坏的分类特征。

| 条件 | 类别及内容 | | | |
|------------|------------------------------------|--|------------------------|--------------|
| 按覆岩移动与破坏形式 | “三带”型破坏 | 垮落带 | 不规则垮落 | 岩层完全失去原有的层次 |
| | | | 规则垮落 | 岩层基本上保持原有的层次 |
| | 裂缝带 | 严重开裂 | 岩层大都断开，裂缝连通性强，漏水严重 | |
| | | 一般开裂 | 岩层不断开或很少断开，连通性较强，漏水一般 | |
| | | 微小开裂 | 岩层有裂缝，但不断开，连通性不太好，漏水微弱 | |
| 弯曲带 | 整体弯曲变形 | 岩层在移动过程中大多表现为由下而上逐层发展的弹性塑性弯曲，形成覆岩的弯曲变形 | | |
| 抽冒型破坏 | 煤层或覆岩仅在局部地方沿竖向一直向上垮落，也称为宝塔形冒落 | | | |
| 切冒型破坏 | 覆岩发生一次性突然垮落，在地表产生突然塌陷，出现非连续变形 | | | |
| 拱冒型破坏 | 采空区周围垮落高度小，中央垮落高度大，垮落的范围呈拱形分布 | | | |
| 弯曲型破坏 | 在局部或大面积采空暴露情况下，整个覆岩不发生垮落而只发生整体弯曲下沉 | | | |

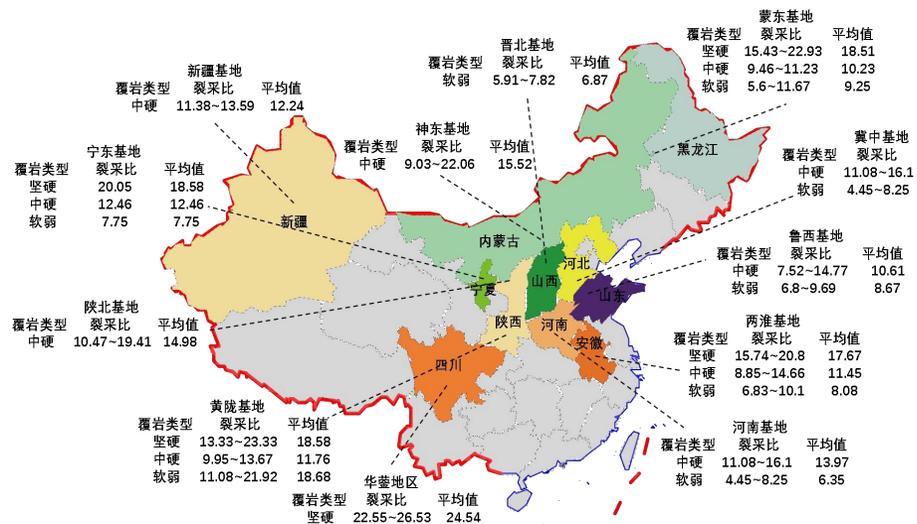
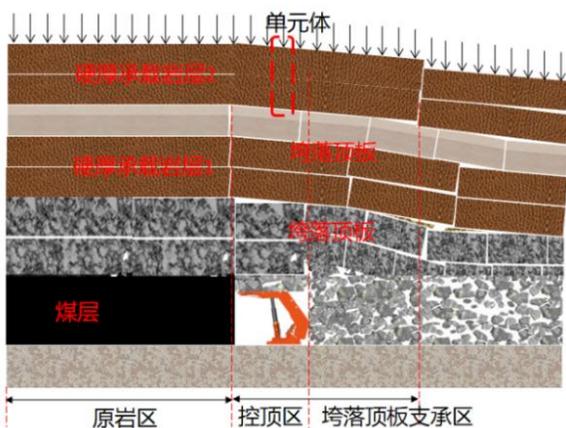
| 条件 | 类别及内容 | | | |
|-----------------|------------|--|--------------------|--------------------|
| 按覆岩破坏范围最终分布形态 | 马鞍形 | 采空区边界上方破坏范围略高，采空区中间部分破坏范围较低而平坦 | | |
| | 抛物线拱形 | 采用走向长壁全部垮落采煤方法开采中倾斜煤层、开采倾角为55~70°的急倾斜煤层时 | | |
| | 椭圆拱形 | 不完全椭圆形 | 开采倾角为71~80°的急倾斜煤层时 | |
| | | 完全椭圆形 | 开采倾角为81~90°的急倾斜煤层时 | |
| | 拱形 | 覆岩破坏的范围是两边低中间略高 | | |
| 均布形 | | | | |
| 按覆岩性与破坏性影响高度的关系 | 坚硬—坚硬型 | | | |
| | 软弱—软弱型 | | | |
| | 软弱—坚硬型 | | | |
| | 坚硬—软弱型 | | | |
| 按裂隙对水体下采煤的影响 | 原生裂隙发育的覆岩 | 隔水性降低，含水性、透水性增加，覆岩破坏高度增大，破坏程度加剧 | 以横向裂隙为主 | 岩石为泥、钙质胶结时隔水性能往往较好 |
| | 原生裂隙不发育的覆岩 | 该类岩体条件隔水性能往往较好 | | |
| 按水体下采煤时水的渗透 | 非破坏性影响 | 所产生的移动和变形不引起连通性的、导水的裂缝，呈整体移动 | | |
| | | 破坏性影响 | 垮落性破坏 | 碎块小面积垮落 |
| | 开裂性破坏 | | 巨块大面积垮落 | 破坏过程无明显的规律性 |
| | 导水的连通性裂缝 | | 发生离层、断裂，但不脱离原生岩体 | |
| | 不导水的非连通性裂缝 | | | |
| 按覆岩破坏发展的充分程度 | 非充分采动 | 覆岩破坏高度随着采空区尺寸的增大而增大 | | |
| | 充分采动 | 覆岩破坏范围的最大高度达到极限值时的开采规模 | | |
| | 超充分采动 | 覆岩破坏高度出现降低时的开采规模 | | |
| | 极不充分采动 | 开采空间某一方向的尺寸极小时的采掘规模 | | |
| 按水体下采煤需要 | 均衡破坏 | 均衡—等量破坏 | | |
| | | 均衡—不等量破坏 | | |
| 非均衡破坏 | 非均衡—等量破坏 | | | |
| | 非均衡—不等量破坏 | | | |

二、顶板含水层控水开采技术

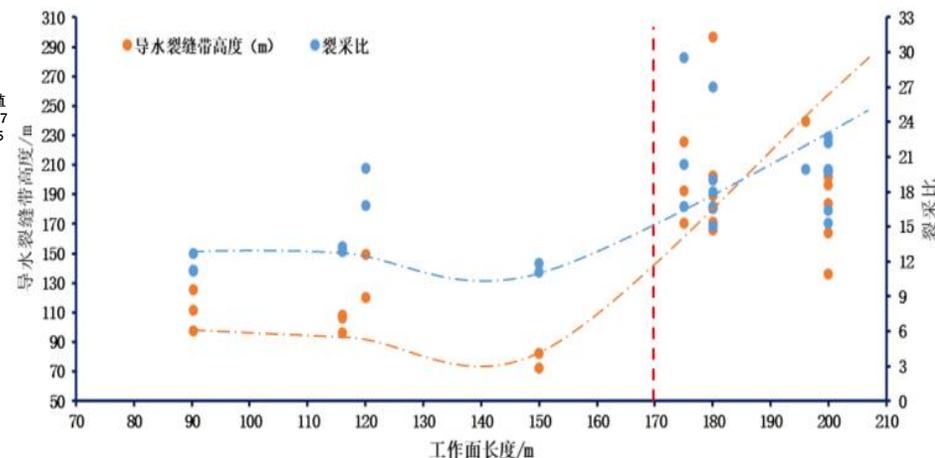


关键技术2：开发了**基于主控岩层**的导水裂缝带发育高度预计方法，揭示典型矿区厚及特厚煤层高强度开采覆岩破坏**区域分布规律**

- 以我国14大煤炭基地为区域绘制了国内厚及特厚煤层综放和大采高综采条件下导水裂缝带高度分布；
- 解决了高强度开采导水裂缝带高度准确预计的问题。



裂采比区域分布



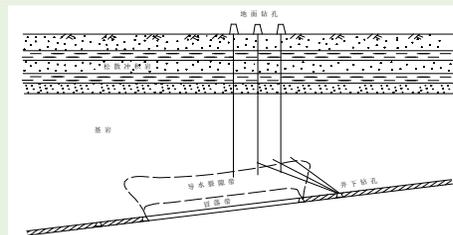
彬长矿区导水裂缝带高度与工作面长度关系

二、顶板含水层控水开采技术

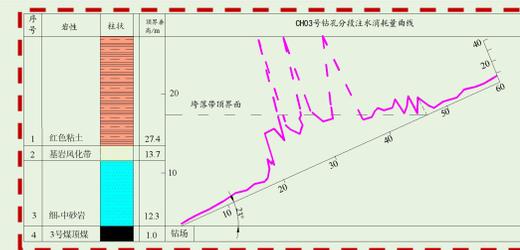


关键技术3：提出了采动覆岩破坏全周期多参量协同动态监测方法

□ **静态观测**：通过地面或井下钻孔冲洗液漏失量观测，配合钻孔窥视，分析覆岩破坏高度；

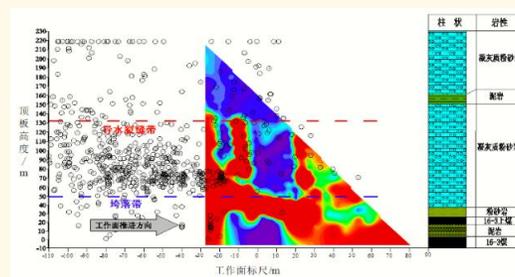


地面钻孔探测

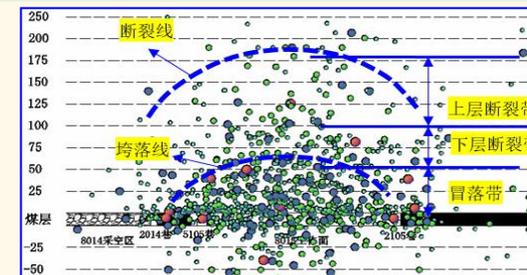


井下钻孔探测

□ **动态观测**：通过电法、微震、光纤等方法动态获取不同采动程度（非充分采动、充分采动和超充分采动）下的覆岩破坏情况。

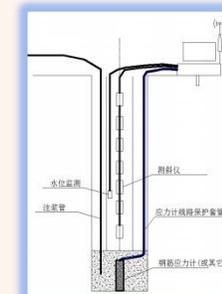
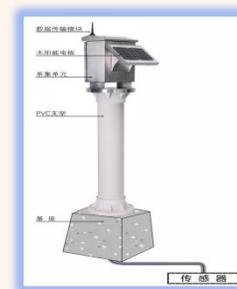


电法监测



微震监测

□ **多参量协同监测**：采动岩层的导水性、物性、能量释放、以及覆岩应力、变形、水位等多参量动态监测。



覆岩钻孔内“应力+下沉+水平移动+水位”多参量监测

二、顶板含水层控水开采技术

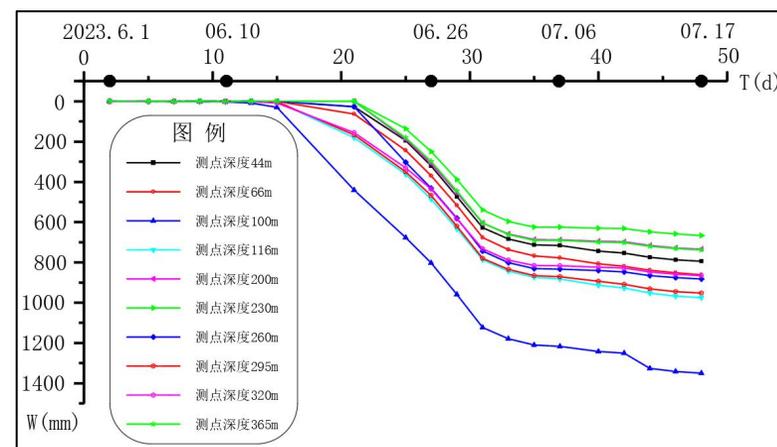
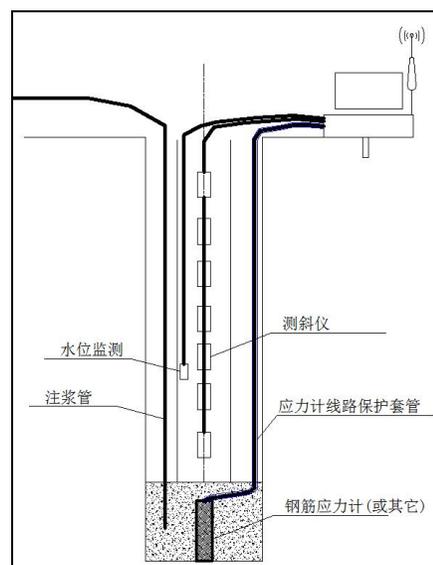
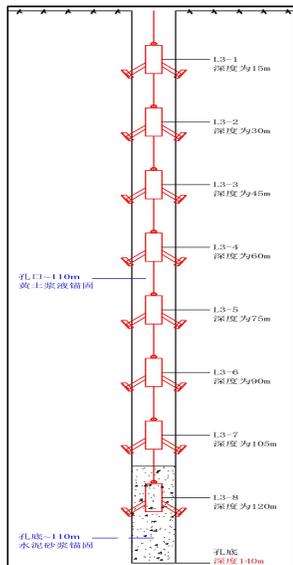


关键技术3：提出了采动覆岩破坏全周期多参量协同动态监测方法

发明了覆岩深部**位移多点位**
大量程连续监测系统，监测
深部首次突破**400m**，监测
精度**1cm**。

开发了覆岩钻孔**“一孔多用”**技术，
实现覆岩单孔内**水位、应力及位移**
的实时连续监测。

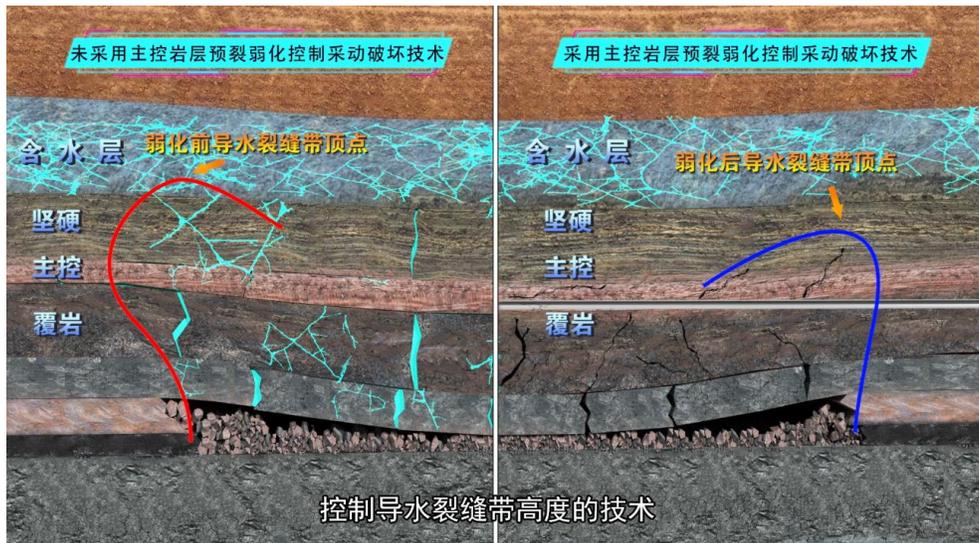
实现工作面**采前采后**全过程、**覆岩与地表**全方位的移动变形监测；
在榆林地区、内蒙古、陕西实现
对覆岩及地表移动变形监测。



二、顶板含水层控水开采技术

关键技术4：研发了顶板坚硬主控岩层预裂弱化控制导水裂缝带技术

- 基于顶板破坏高度具有随着岩层**完整性和强度**的降低而显著降低的特性，采用**预裂技术**将原连续性好的**坚硬岩层**压裂成为非连续性的**软弱岩层**，以此**抑制采动裂隙向上发展**，减少采动对顶板含水层的扰动范围和影响程度。
- 解决了传统以**牺牲资源回收率和采煤工艺改变**为主的导水裂缝带控制问题。



覆岩预裂弱化止裂效果预想图

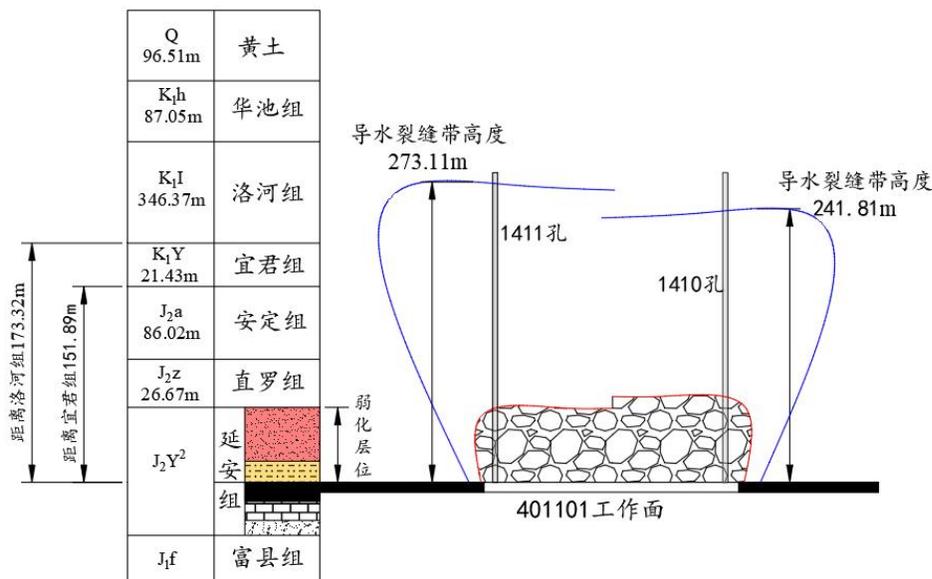
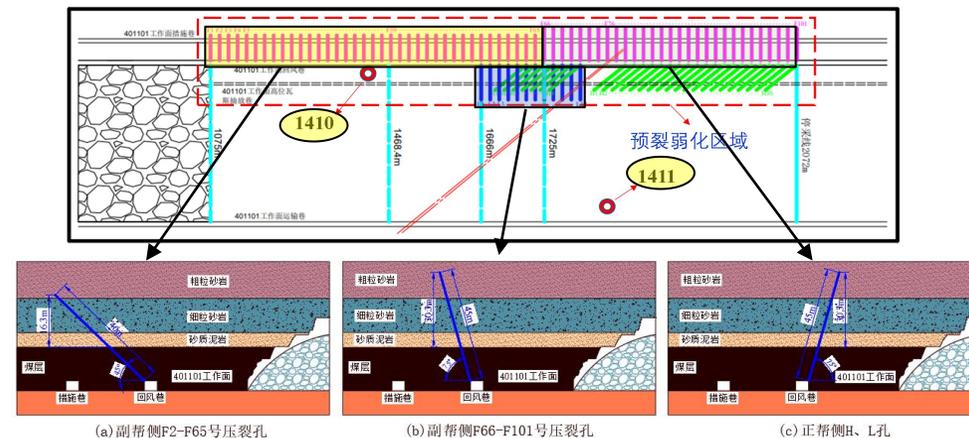


二、顶板含水层控水开采技术



关键技术4：覆岩主控岩层预裂控制导水裂缝带技术

以孟村煤矿为例，低位预裂后覆岩裂采比降低**12%**；
与同类矿井对比，孟村矿预裂后裂采比普遍小于**20**，
周边矿井普遍大于**23**。



预裂与未预裂条件下不同矿井裂采比

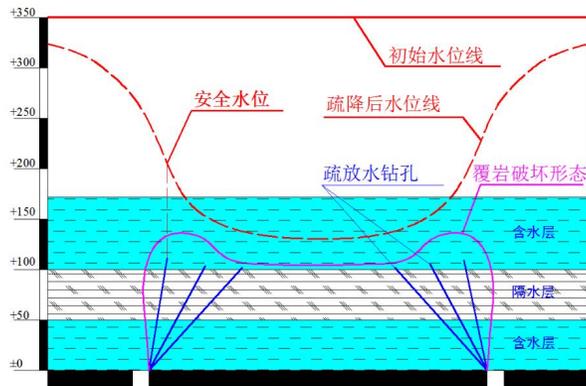
| 矿井 | 预裂后 | | 未预裂 | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 孟村 | 孟村 | 胡家河 | 亭南 | 高家堡 | 大佛寺 | 下沟 |
| 覆岩类型 | 坚硬 |
| 采厚 | 14.7 | 14.5 | 10.00 | 9.10 | 4.89 | 11.00 | 11.00 |
| 裂采比 | 18.58 | 19.24 | 23.32 | 27.90 | 23.07 | 26.98 | 27.00 |

预裂前后覆岩导水裂缝发育示意图

二、顶板含水层控水开采技术

关键技术5：研发了含水层弱扰动精准消峰可控疏放技术

- 提出了**基于排水能力约束**的顶板含水层采前精准预疏降方法，重点依据采动裂缝导水能力确定**采前疏放水目标层位**和**采前预疏降安全水位高度**，在工作面涌水不超限前提下科学合理设计疏放钻孔和疏降层位，**具体内容包含疏放目标层位合理确定、疏水钻孔深度精准控制、疏放孔位的优化布置、疏放顺序的因地制宜、安全水位计算**；
- 解决了对含水层的不必要的**过度疏降**的问题，**减少人为钻孔涌水通道**，为顶板含水层采前疏降解危工作提供了量化依据。



高效疏水安全水位示意图

$$H_a = \frac{Q \cdot \lg \frac{R_0}{r_0}}{2.73K \cdot M} + \frac{M}{2} = \frac{Q \cdot \lg 2(H_0 - H_a) \sqrt{\frac{K\pi}{F}}}{2.73K \cdot M} + \frac{M}{2}$$

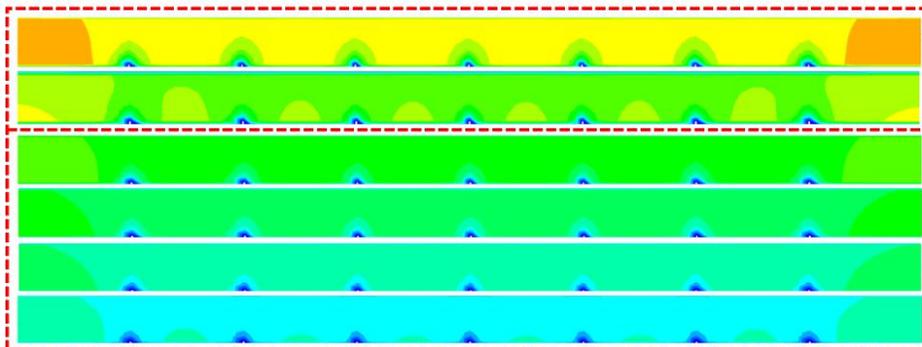
$$H_k = H_{li} - H_c = 0.75M \cdot q_{li}$$



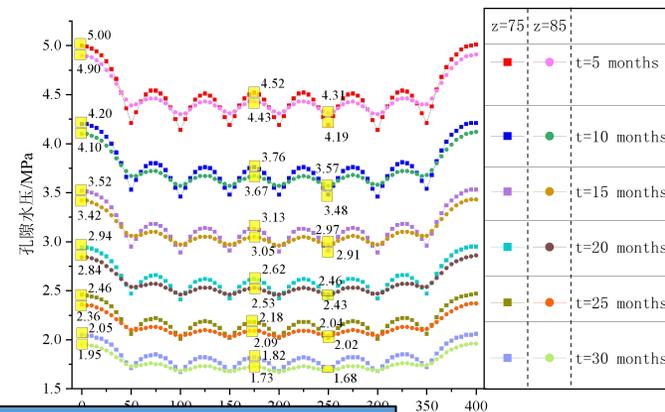
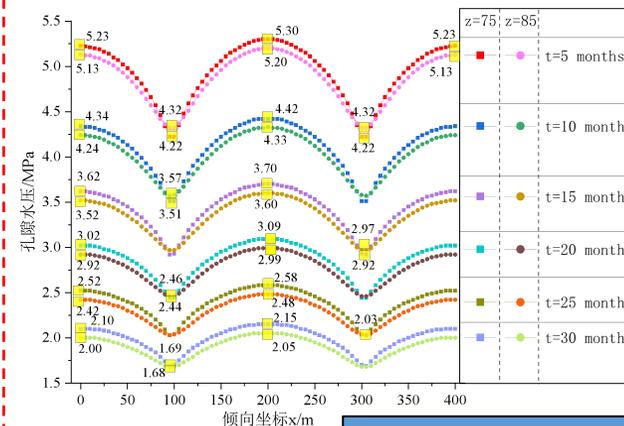
二、顶板含水层控水开采技术

关键技术5：研发了含水层弱扰动精准消峰可控疏放技术

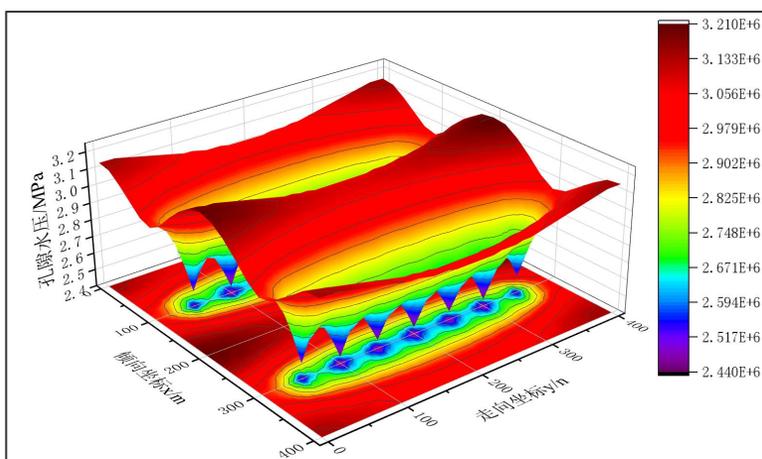
疏水阶段



疏水含水层走向垂直剖面水压分布云图



孔隙水压力随疏水周期演化关系

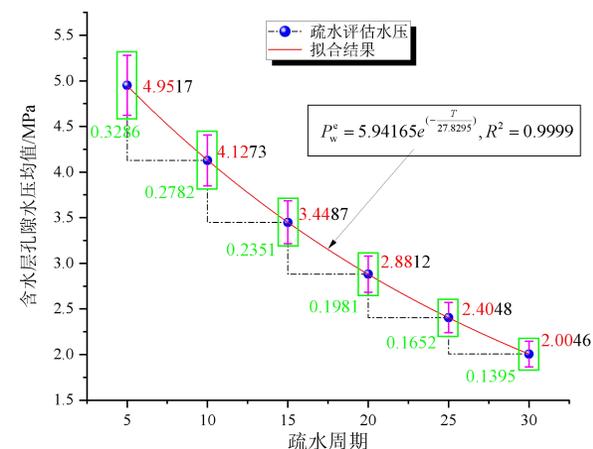


孔隙水压力3D映射曲面

- 疏水含水层评估水压随疏水周期变化关系符合**一阶单指数衰减规律**：

$$P_w^e = 5.94165 \times e^{\left(\frac{-T}{27.8295}\right)}$$

- 整体水压逐渐趋向**均衡稳定状态**。



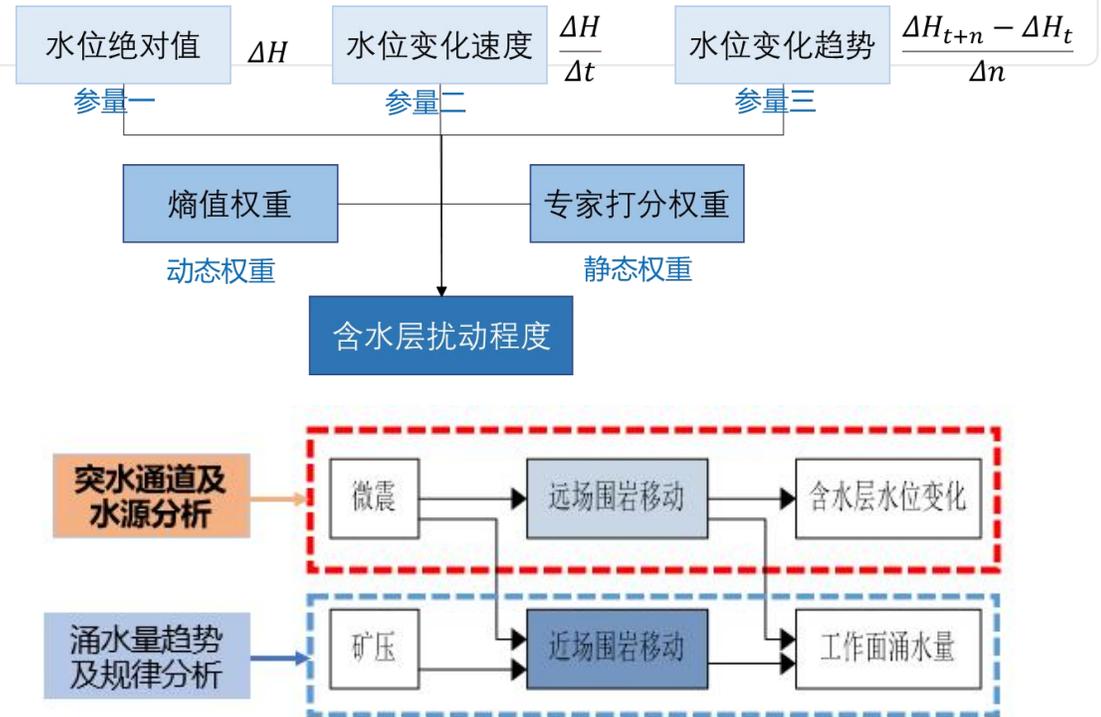
钻孔疏水降压历时曲线

二、顶板含水层控水开采技术



关键技术6：建立了“微震-矿压-水文”一体化监测预警平台

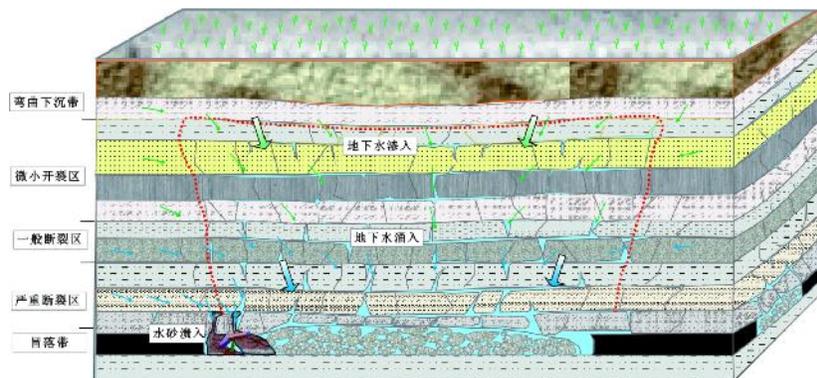
开发了包括“含水层水位绝对值、变化速度以及变化趋势”三参量的采动含水层扰动程度动静权重综合预测模型，基于微震事件追踪的导水裂缝带发育高度预测方法，建立了水文监测预警平台。



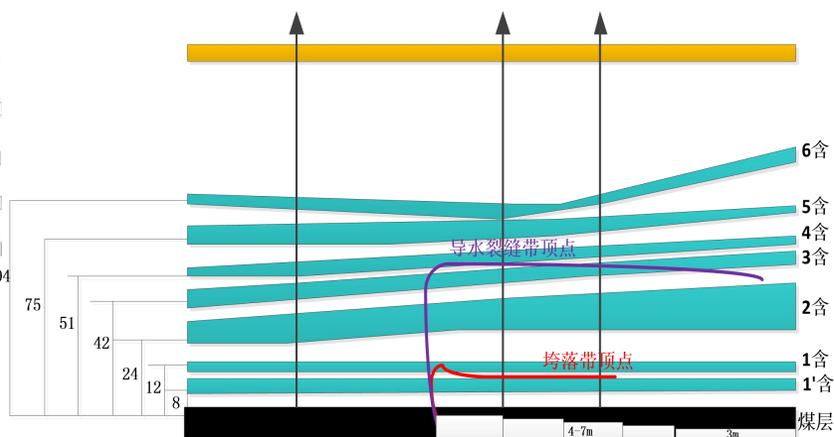
二、顶板含水层控水开采技术

案例1：蒙东弱固结松软含水层综放控水开采应用

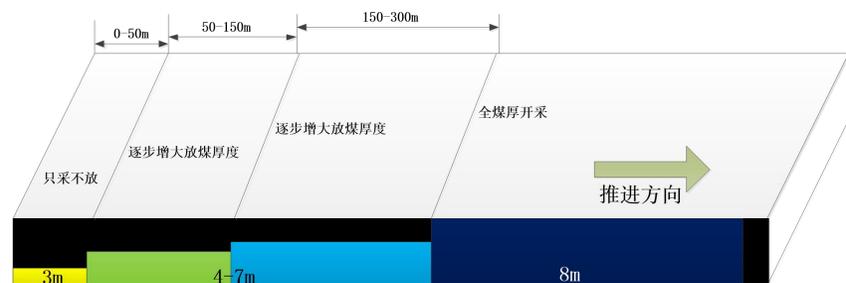
- 针对蒙东扎赉诺尔矿区顶板赋存多层弱固结砂岩含水层，存在突水及溃砂灾害的问题，综合采用**可控疏水**与**分段阶梯控制放煤**相结合，实现依次逐步波及不同含水层；采用**先疏后采**与**边疏边采**相结合，**边疏边采**与**部分顶水开采**相结合，实现对不同含水层的科学疏降；
- 应用该技术10余年来未出现工作面突水及溃砂灾害，实现了特厚煤层综放控水安全回采。



顶板含水层分布及突水溃砂模式



逐步阶梯放煤采动裂缝

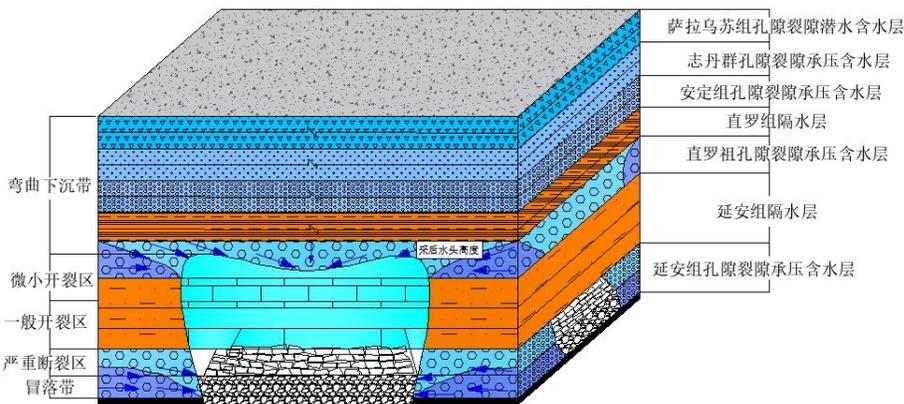


分段控制放顶煤开采厚度

二、顶板含水层控水开采技术

案例2：蒙陕深部多重高承压顶板含水层控保开采技术实践

针对蒙陕深部纳林河二号煤矿顶板赋存**多重高承压含水层**（水压5.2MPa）威胁，避免含水层过量疏放的问题，综合考虑含水层**富水性不均一、衰减速度快、可疏降性较好的特点**，利用延安组和直罗组采动裂缝发育的垂向分带性，采用**“先疏后采与边采边疏相结合”**的控水方案，实现顶板含水层控、保开采。



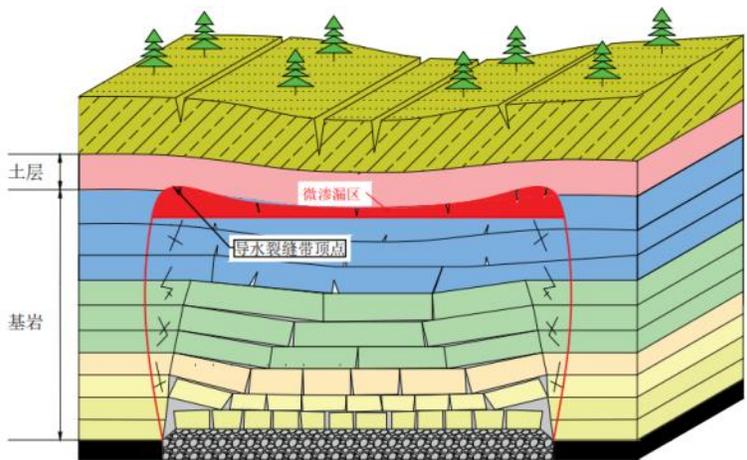
顶板含水层高承压渐进充水模式

| 工作面名称 | 31101工作面 | 31102工作面 | 对比效果 |
|-----------------------------|-----------------------------|---|----------------------|
| 防治水方案 | 疏干放净方案 | 控水开采方案 | “先疏后采、边疏边采”思路控水效果明显。 |
| | 采前以“疏干、放净”思路疏降延安组和直罗组底部含水层。 | 延安组含水层：先疏后采。 直罗组底部砂岩含水层：边采边疏，即采前疏放水钻孔不波及该含水层，利用采动裂缝对其自然疏降。 | |
| 钻孔垂直高度(m) | 120 | 80 | 减少33% |
| 放水钻孔总长度(m) | 32956 | 1764 | 减少95% |
| 单孔最大水量(m ³ /h) | 136.5 | 65 | 降低52% |
| 钻孔总放水量(m ³) | 296万 | 6.4万 | 减少98% |
| 含水层水位降(m) | 289.6(距工作面1100m) | 204.9(距工作面731m) | 减少30% |
| 工作面总放水量(m ³) | 829.6万 | 345.9万(含31101采空区密闭墙出水) | 减少58% |
| 采空区最大涌水量(m ³ /h) | 440.5 | 325 | 减少26% |

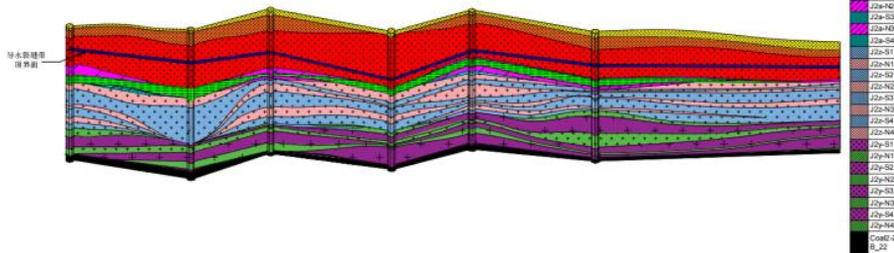
二、顶板含水层控水开采技术

案例3：10m超大采高顶板复合水体下控水开采应用

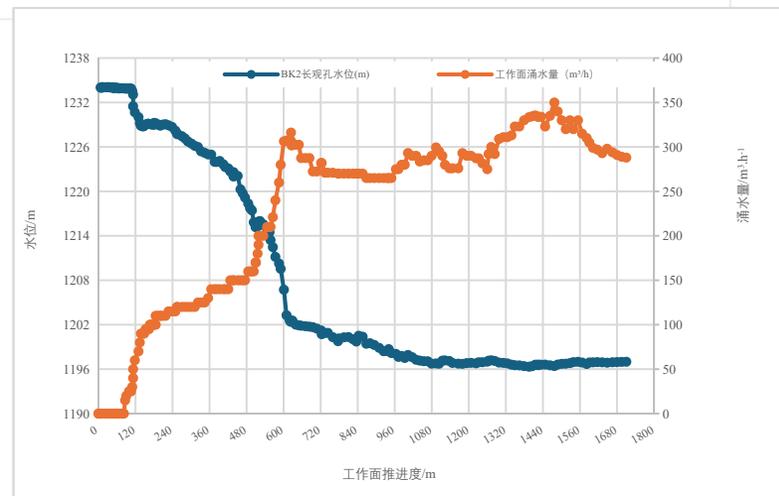
- 基于红土层具有遇裂缝可弥合再生隔水的特性以及对采动裂缝有抑制作用，采用“静储量精准疏放+动补给增排分流+全空间流场监测+局部防切顶漏顶”的复合顶板水防控方案；
- 综合开采过程中长观孔水位、工作面涌水量及水化学多因素监测，采动裂缝仅导通基岩裂隙及风化带含水层，第四系含水层未受采动影响，实现了超大采高控水安全高效开采和生态潜水地下水的有效保护。



土-基覆岩导水裂缝带发育高度与形态



导水裂缝带与含水层空间关系



工作面涌水量与基岩风化带水位变化关系曲线

二、顶板含水层控水开采技术



不同顶板含水体的控水安全采煤实践

- ✓ 蒙东地区灵东矿、铁南矿、敏东等矿井，实现**松软弱固结顶板**含水层下控水安全开采；
- ✓ 蒙西顶板高承压复合含水层下**高效疏控**安全开采；
- ✓ 10m超大采高顶板复合含水层**控（保）水**安全开采；
- ✓ 山东兖州矿区兴隆庄煤矿实现了综放工作面**采空区滞后出水形式**下的控水安全采煤；
- ✓ 安徽宿南矿区祁东煤矿实现了综采工作面**有限涌水形式**下的控水安全采煤；
- ✓ 鹤岗矿区乌山矿砾岩含水层下实现**首采面综放控水**安全开采；
- ✓ 龙口矿区实现了**海下采煤**，大屯矿区实现了**微山湖下采煤**，下沟矿实现了**泾河下采煤**，亭南煤矿实现了**亭口水库下采煤**、鹤岗振新矿实现了**石头河下安全回采**；

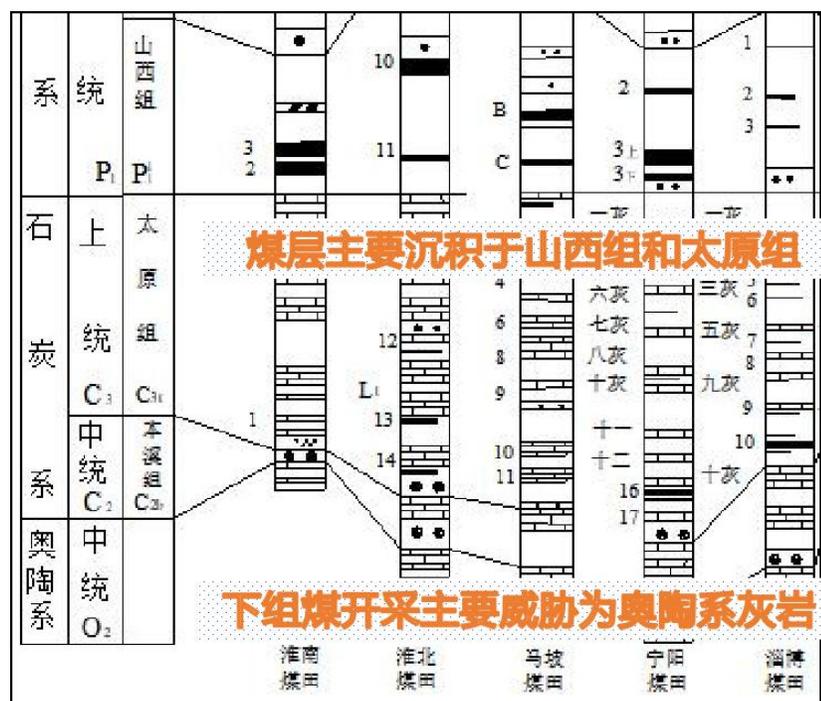




底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

- ❑ 底板奥陶系灰岩水是华北型石炭二叠纪煤田开采主要威胁。含水层具有较高的含水能力，且岩溶裂隙发育，一旦突水将造成大量人员伤亡及财产损失。
- ❑ 安徽“两淮”矿区、山东肥城-淄博-新汶等矿区、河南焦作-郑州-永城等矿区、陕西澄合-韩城-铜川等、河北邯邢-井陘-开滦-蔚县、内蒙古准旗-乌海以及山西各大矿区。



煤矿采深逐年增加

上组煤→下组煤

浅部→深部 (新村、孔庄等1400~1500m)



煤层底板水压逐渐增大

深部下组煤带压已达7MPa以上;

有些矿井已达10MPa以上



超薄隔水层底板逐渐增多

煤层底板与灰岩含水层间距10~20m

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

- 隔水层能够承受的水头压力大于实际水压：**带压开采**
- 隔水层能够承受的水头压力小于实际水压：
 - ✓ **疏水降压、帷幕注浆+疏水降压**
 - ✓ **地面区域治理和底板局部注浆加固**

根据《煤矿防治水细则》，
推进防治水“五个转变”。

底板突水特征

- 1 突发性强，无明显前兆
- 2 水量增速快，灾害控制难度大
- 3 突水往往具有时滞性，容易造成误解
- 4 突水量与过水通道有相互促进现象
- 5 经济、人员损失大，复矿难度大

政府

要求

承压水上开采

水文地质补勘

危险性评价

开采方案设计

工程治理

过程治理

源头预防

局部治理

区域治理

井下治理

井上下治理

措施防范

工程治理

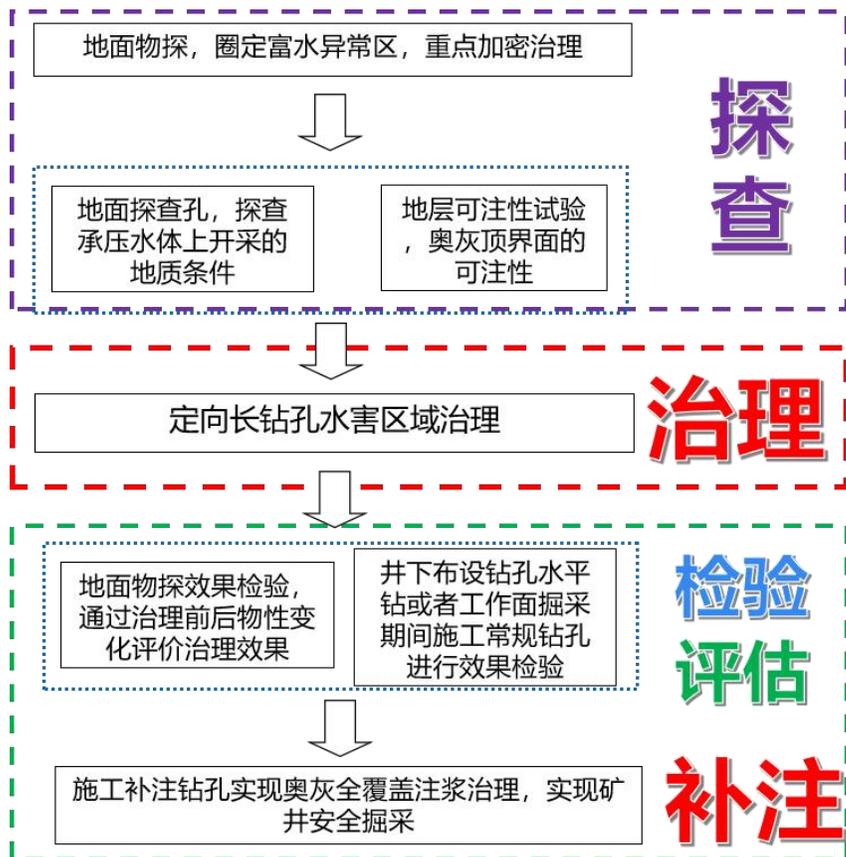
治水为主

治保结合

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



地面区域治理技术：将煤炭行业地面**预注浆**技术与石油行业的**定向井**技术相结合，在巷道掘进或工作面回采之前，对其**底板含水层**进行超前区域定向注浆改造，形成了“**探查、治理、检验、评估、补注**”为一体的区域治理技术，实现**底板水害安全防控与水资源保护开采**。



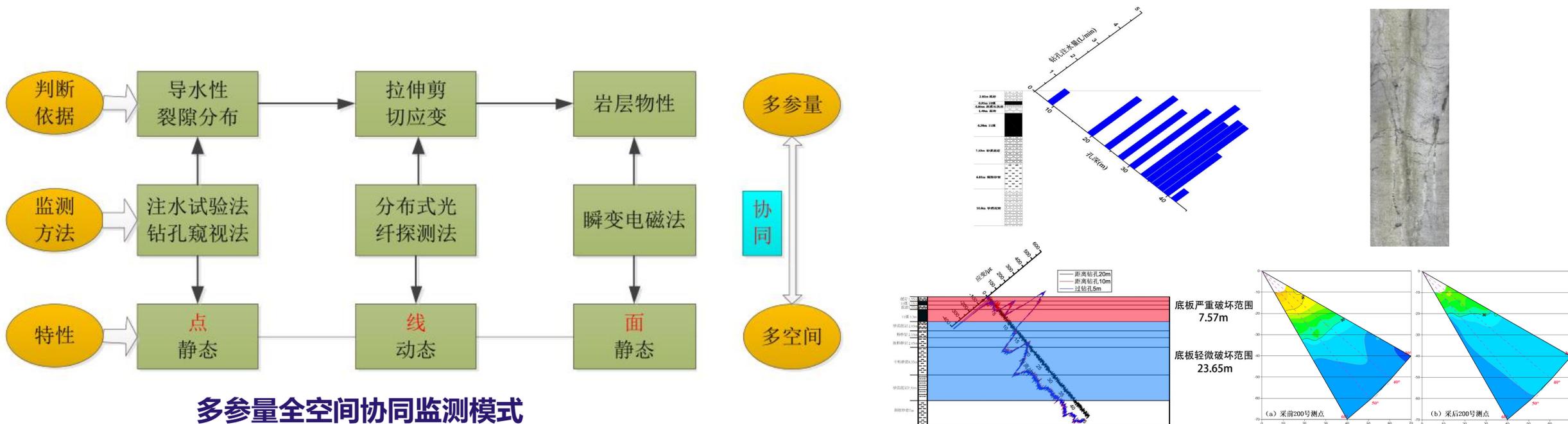
该技术在地面施工定向水平多分支钻孔

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果1：构建了煤层底板破坏深度多参量全空间协同监测方法

✓ 采用钻孔注水试验法（点）、钻孔窥视法（点）、钻孔分布式光纤监测法（线）、瞬变电磁法（面）四种方法，构建了煤层底板全空间点-线-面协同监测模式；从**裂隙导水性、拉伸剪切应变、采动岩层物性**多参量角度以“点—线—面”不同监测方法综合获取煤层底板破坏程度。

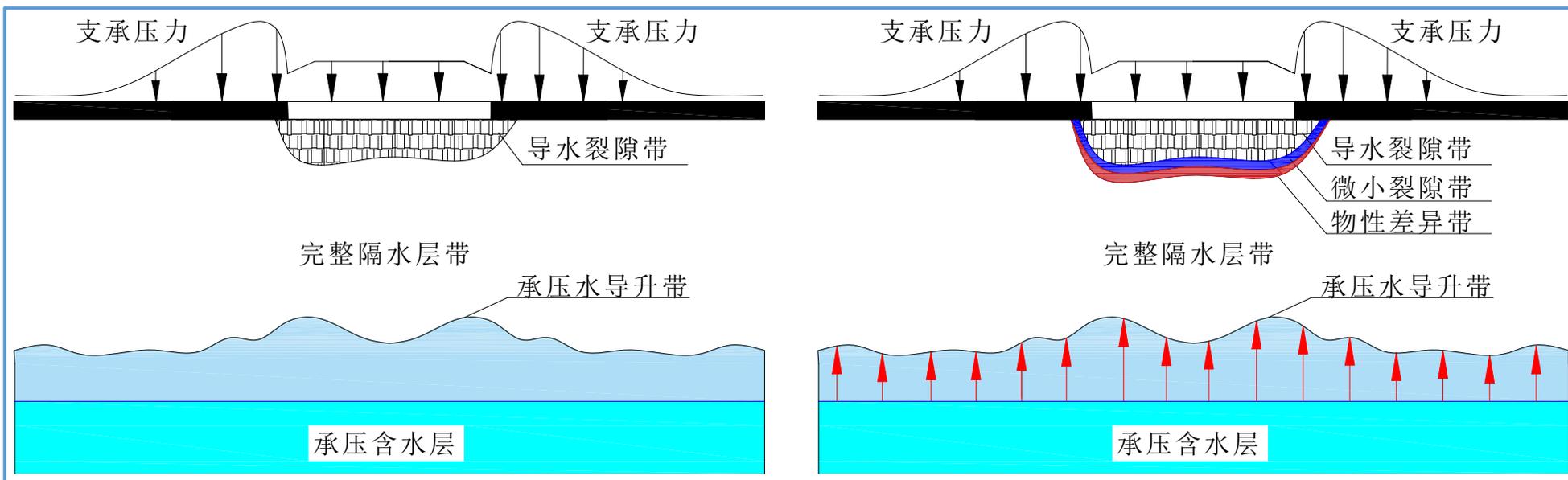


三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果1：构建了煤层底板破坏深度多参量全空间协同监测方法

- ✓ 煤层底板采动破坏程度存在明显的层次性分带特征，提出将煤层底板采动影响区从纵向上划分为**导水裂隙带**、**微小裂隙带**、**物性差异带**。更精确的指导和评价了突水危险性评价及治理层位的确定。



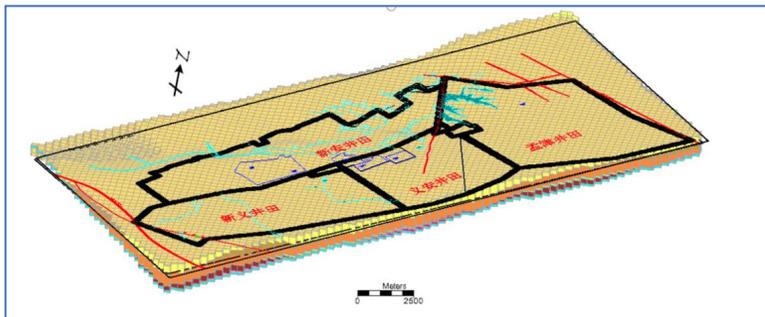
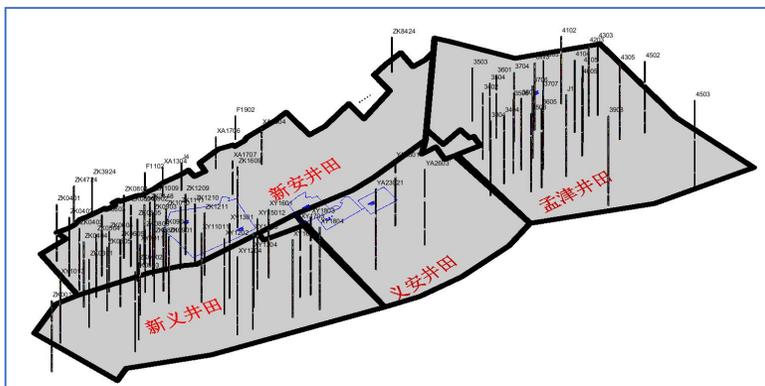
传统“下三带”划分示意图

底板层次性分带示意图

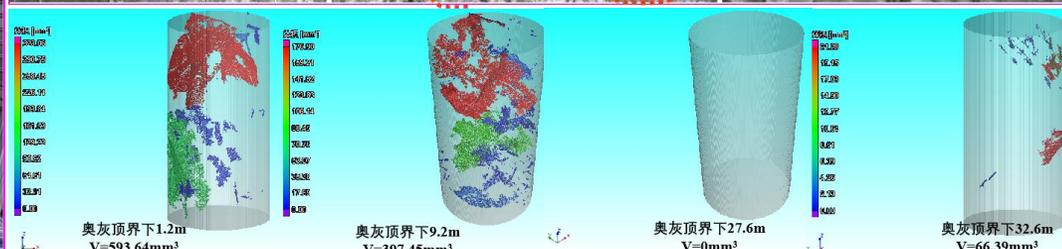
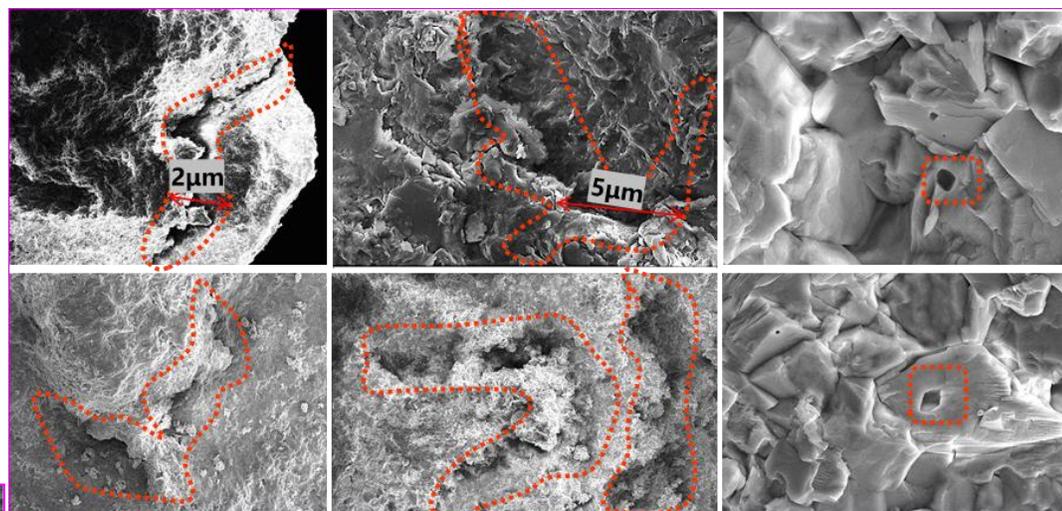
三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果2：针对**区域注浆治理受注体裂隙网络特征不明**问题，融合多源地质数据挖掘、原位渗透性测试和数字岩心技术，揭示了豫西矿区奥灰地层具有“**整体低渗~裂隙闭合~构造隐伏**”的区域性特征，提出了奥灰地层可注性评估和治理靶区确定方法



| 分支孔 | 井段 m | 涌失量 m ³ /h | 注浆量 t | 单米注浆 t/m | 透水率 Lu | 渗透性等 级 |
|------|---------------|--------------------------|----------|-------------|-----------|-----------|
| Z1-2 | 1160-960=200 | < 5 | 2326.491 | 11.63 | 0.73 | 微透水 |
| Z1-2 | 1888-1757=131 | 16 | 194.142 | 1.48 | 1.28 | 弱透水 |
| Z1-2 | 2118-1984=134 | 10 | 356.55 | 2.66 | 1.27 | 弱透水 |
| Z1-2 | 2202-2118=84 | < 5 | 921.983 | 10.98 | 2.37 | 弱透水 |
| Z1-1 | 1667-1343=324 | > 60 | 326.308 | 1.01 | 1.73 | 弱透水 |
| Z1-1 | 1720-1667=53 | > 60 | 327.614 | 6.18 | 2.02 | 弱透水 |
| Z1-1 | 2226-2003=223 | < 5 | 4006.14 | 17.9 | 0.17 | 微透水 |
| Z2-1 | 1147-955=192 | < 5 | 38.156 | 0.20 | 0.28 | 微透水 |
| Z2-1 | 1436-1233=203 | > 60 | 3335.162 | 16.43 | 4.35 | 弱透水 |
| Z2-1 | 1679-1436=243 | > 60 | 1366.79 | 5.62 | 2.77 | 弱透水 |
| Z2-1 | 1919-1679=240 | < 5 | 311.548 | 1.30 | 0.49 | 微透水 |
| Z2-2 | 1118-905=213 | < 5 | 25.084 | 0.12 | 0.22 | 微透水 |
| Z2-2 | 2111-2005=106 | > 60 | 548.248 | 5.17 | 5.01 | 弱透水 |
| Z2-2 | 2221-2111=110 | 6 | 549.513 | 5.00 | 1.71 | 弱透水 |
| Z2-7 | 1105-905=200 | < 5 | 438.637 | 2.2 | 0.29 | 微透水 |
| Z2-7 | 1305-1105=200 | < 5 | 48.9 | 0.2 | 0.22 | 微透水 |
| Z2-7 | 1505-1305=200 | < 5 | 723.081 | 3.6 | 0.22 | 微透水 |
| Z1-4 | 22162084=132 | < 5 | 712.6 | 5.40 | 0.40 | 微透水 |



三维数值建模与流场刻画

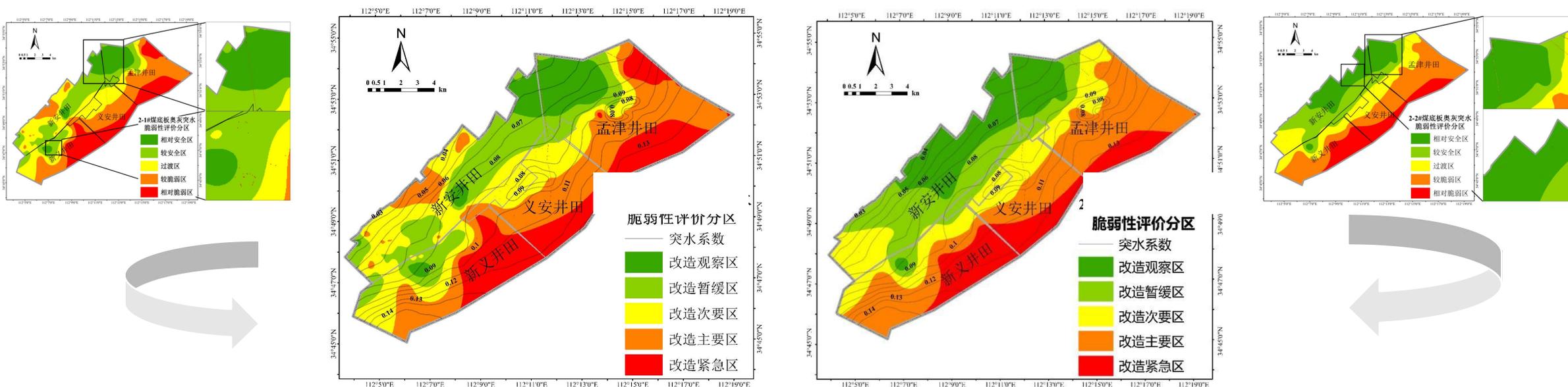
原位压水与渗透性实验

奥灰岩溶裂隙高分辨率电子显微镜和CT扫描分析

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

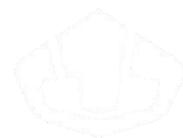


成果2：针对**区域注浆治理受注体裂隙网络特征不明**问题，融合多源地质数据挖掘、原位渗透性测试和数字岩心技术，揭示了豫西矿区奥灰地层具有“**整体低渗~裂隙闭合~构造隐伏**”的区域性特征，提出了奥灰地层可注性评估和**治理靶区确定方法**

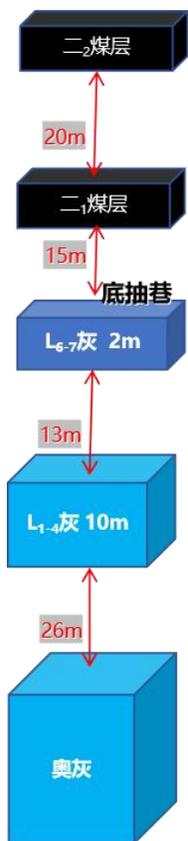


对应突水危险程度将区域治理改造分为5个等级：**紧急区、主要区、次要区、暂缓区和观察区**，根据开采接续进而确定地面区域治理工作的优先级。

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果3：基于豫西矿区典型承压水上开采地质条件，结合典型突水案例分析，提出了三类带压开采概化地质模型，揭示了深部超高水压条件下**薄隔水层**、**中（厚）隔水层**含**隐伏断层**、**重复采动下厚隔水层**煤层底板突水机理。



➤ 薄隔水层

- ✓ 强矿压采动加剧煤层底板破坏深度；
- ✓ 高承压水突破底板有效隔水层。

➤ 中厚隔水层

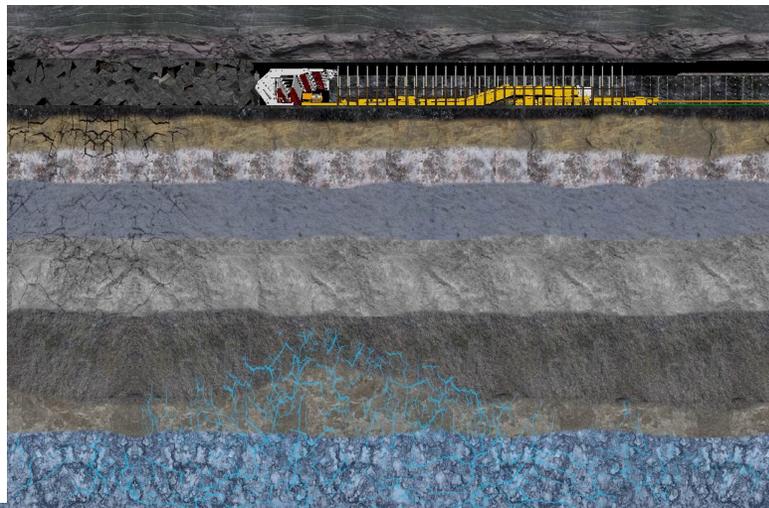
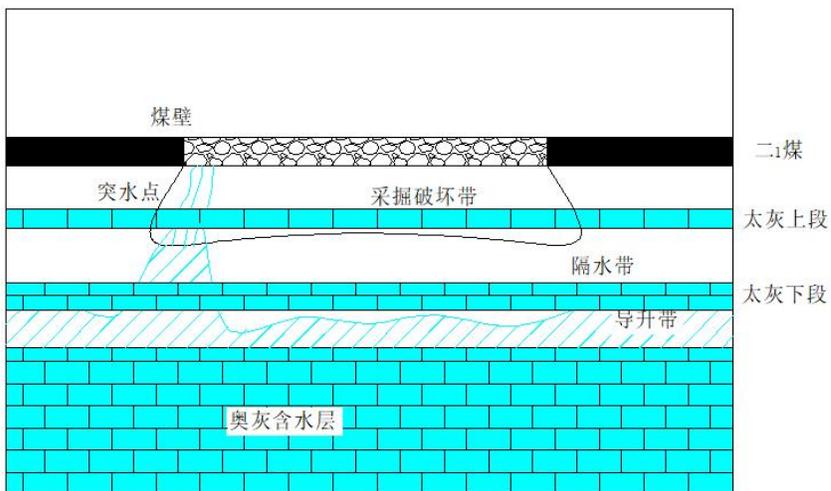
- ✓ **构造导升突水：**
 - 强矿压采动扰动底板破坏范围；
 - 构造承压水导升。
- ✓ **重复采动突水：**
 - 重复采动加剧了煤层底板采动破坏范围；
 - 原始承压水导升高度进一步增加。



三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

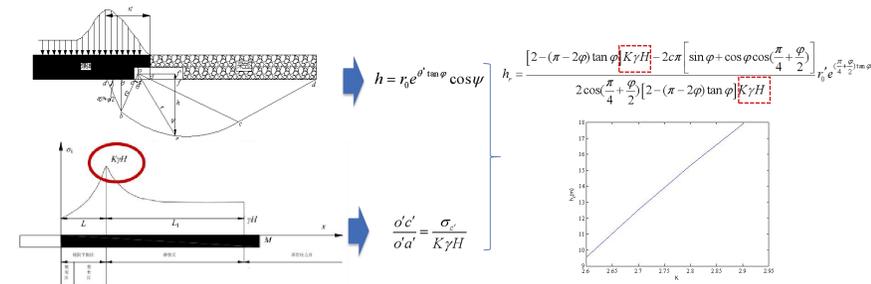


成果3：基于豫西矿区典型承压水上开采地质条件，提出了三类带压开采概化地质模型，揭示了深部超高水压条件下**薄隔水层**、中（厚）隔水层含隐伏断层、重复采动下厚隔水层煤层底板突水机理。



深部强采动**薄隔水层**底板突水

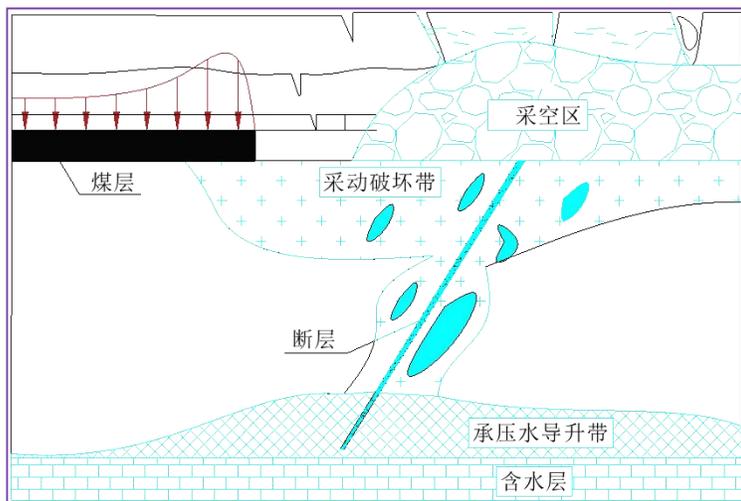
- ✓ **深部强采动扰动**影响加剧了煤层底板变形破坏深度；
- ✓ **承压水递进导升**弱化了煤层底板有效隔水层厚度。



三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



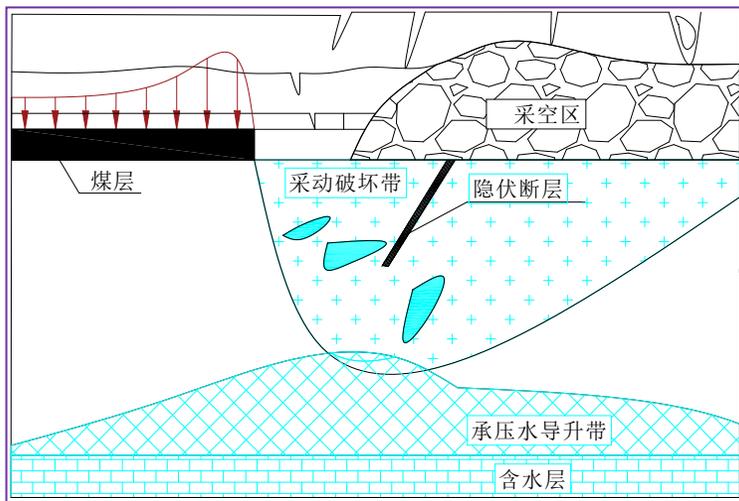
成果3：基于豫西矿区典型承压水上开采地质条件，提出了三类带压开采概化地质模型，揭示了深部超高水压条件下薄隔水层、**中（厚）隔水层含隐伏断层**、重复采动下厚隔水层煤层底板突水机理。



沟通隐伏断层突水

连通底板矿压破坏带和
底板高承压含水层

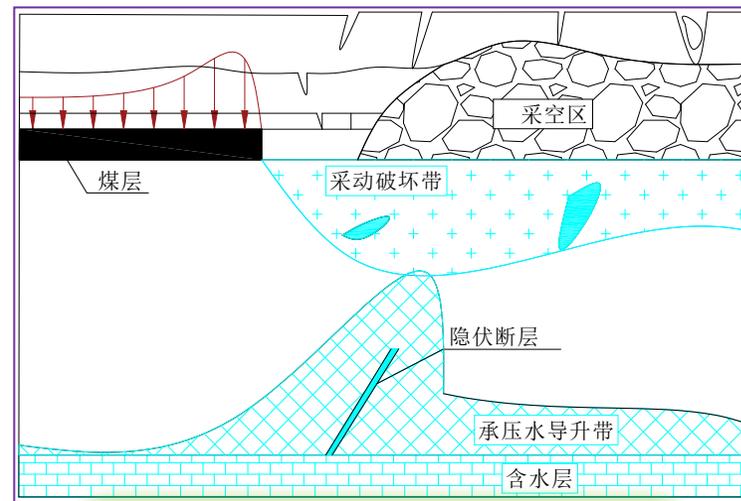
易测易防



上位隐伏断层突水

显著影响采动破坏带采
掘过程揭露数量多

难测易防



下位隐伏断层突水

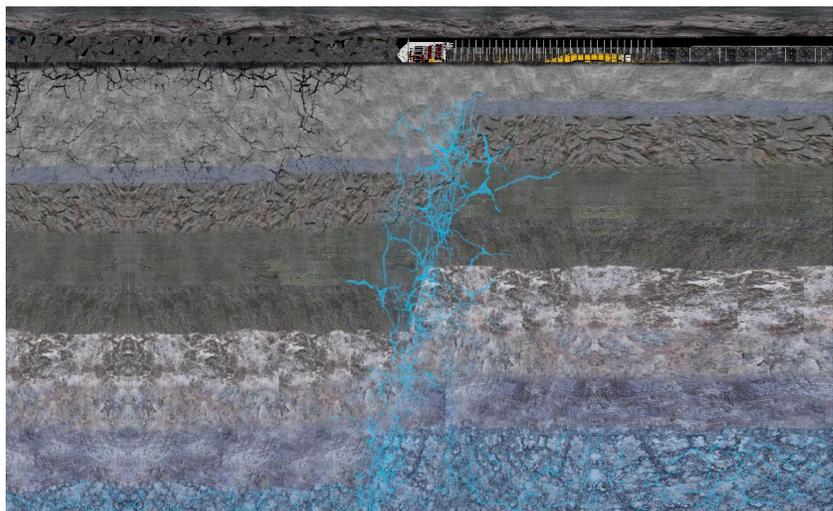
增加原始导升高度现有
技术手段难以查明

难测难防

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



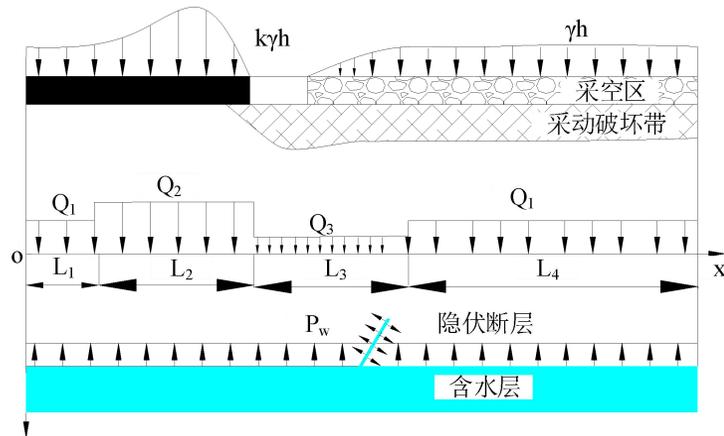
成果3：基于豫西矿区典型承压水上开采地质条件，提出了三类带压开采概化地质模型，揭示了深部超高水压条件下薄隔水层、**中（厚）隔水层含隐伏断层**、重复采动下厚隔水层煤层底板突水机理。



深部强采动中（厚）隔水层底板隐伏导升突水

强采动扰动加剧了煤层底板采动破坏深度;**隐伏构造**为承压水突水致灾提供弱面通道。

薄层灰岩受奥灰补给且**补给路径复杂且隐蔽**，原岩本身**存在孔隙裂隙缺陷**且分布复杂多变。



隐伏断层采动活化扩展的临界水压力

$$P_c = \frac{[\sin 2\alpha - (1 - \cos 2\alpha)(\tan \phi' + \lambda_2)] \sigma_z - [\sin 2\alpha + (1 + \cos 2\alpha)(\tan \phi' + \lambda_2)] \sigma_x - 2c'}{2(\tan \phi' + \lambda_2)}$$

$$= \frac{K_{nc}}{\sqrt{\pi a}(\tan \phi' + \lambda_2)}$$

隐伏断层采动承压水导升高度

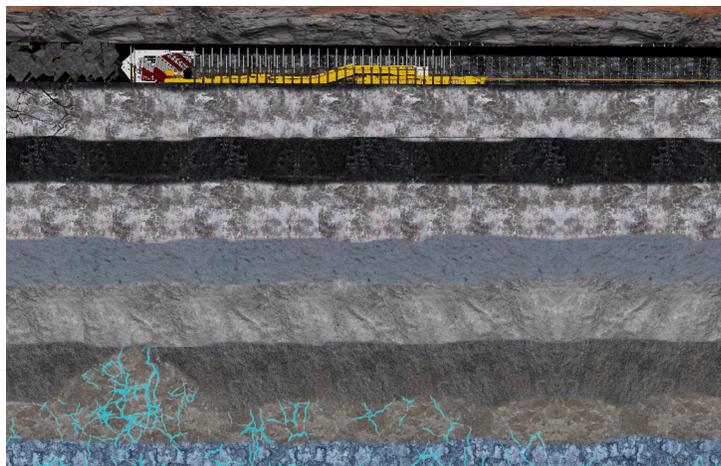
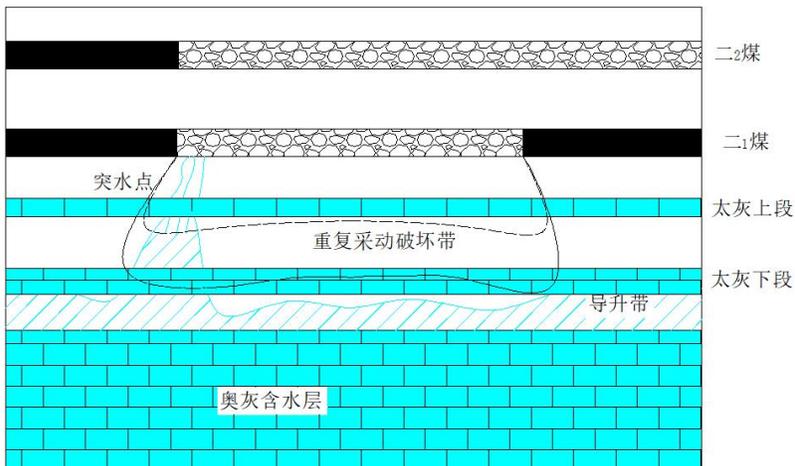
$$h = \Delta H + 2a \sin \alpha$$

$$= \frac{8R_z \sin(\theta + \alpha)}{\xi_1 \rho_w v^2 + \gamma_w \sin(\theta + \alpha)} \cdot \left(P_0 - P_c - \xi_2 \frac{\rho_w v^2}{2} \right) + 2a \sin \alpha$$

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果3：基于豫西矿区典型承压水上开采地质条件，提出了三类带压开采概化地质模型，揭示了深部超高水压条件下薄隔水层、中（厚）隔水层含隐伏断层、**重复采动下厚隔水层**煤层底板突水机理。



- ✓ 重复采动扰动采场强矿压现象被削弱，但采空区**四周煤岩体内仍存在应力集中现象**，底板导水破坏带深度变大，影响弱化了隔水层完整性；
- ✓ 重复采动增大了**岩体内裂隙发育程度**，劣化隔水层段阻隔水性能。

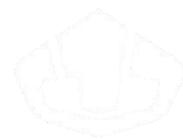
重复采动的有效隔水层厚度

重复采动扰动下厚隔水层底板承压水导升突水

$$h'' = h' + h$$

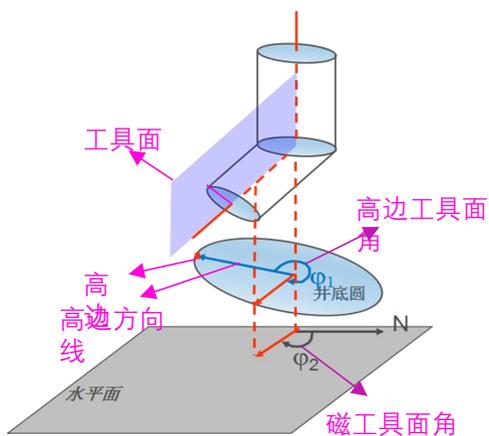
$$- \sqrt{3(h-h')^2 + \frac{3\gamma H h^2}{\sigma_b} \sin 2\alpha - \frac{6\gamma H \cos^2 \alpha h^2}{\sigma_b \tan 2\alpha}}$$

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

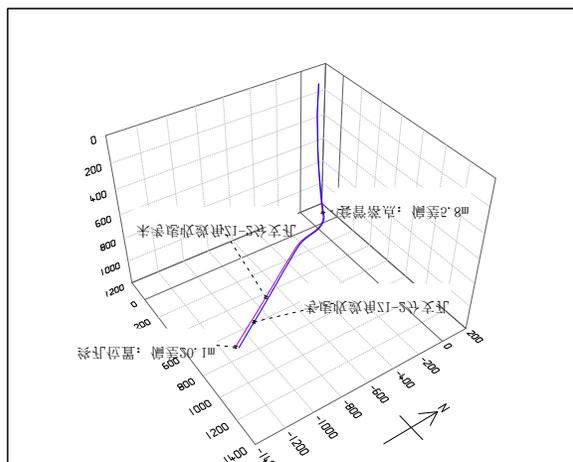


成果4：研发考虑**子午角**和**磁偏角**的精准定向导向技术，结合岩屑-伽马多因素融合**隐伏通道识别模型**，实现泥质灰岩层位轨迹**精准控制**与**隐伏导水通道靶向识别封堵**。

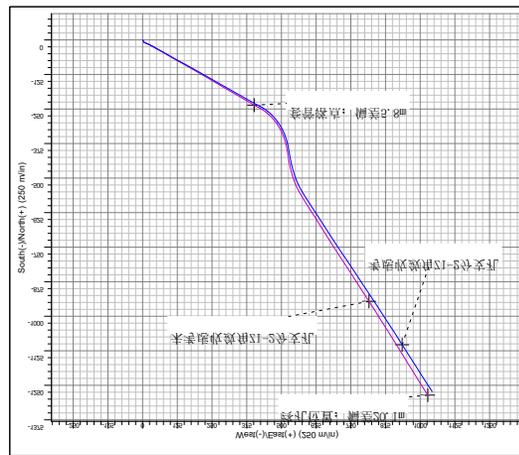
- ✓ 根据区域治理层位“**打得准**”的总体要求，通过研究“真北、磁北、北标北”三北关系及子午线收敛角计算方法，揭示了子午线收敛角对定向轨迹设计的影响机制，开发了**定向轨迹精准设计方法**
- ✓ 以孟津矿区域治理项目为例，磁偏角 5.25° ，子午线收敛角 0.71° ，与不考虑子午线收敛角时，当水平段长度为1200m左右时，终点平距相差20m（**每1km提高精度20m**）。解决了治理范围与设计不符的问题。



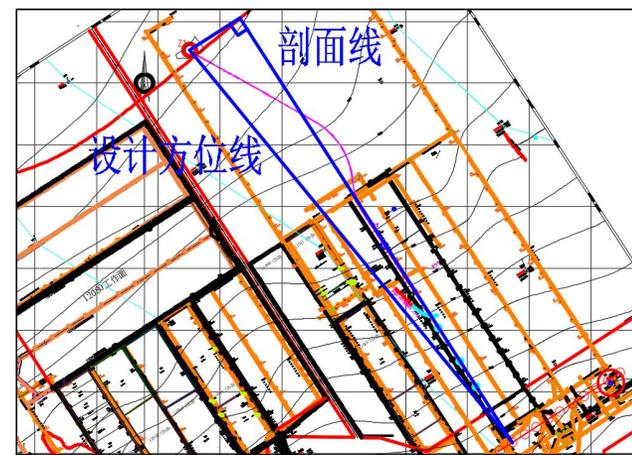
高边工具面角与磁工具面角



设计轨迹3D投影图



定向钻轨迹平面图投影图



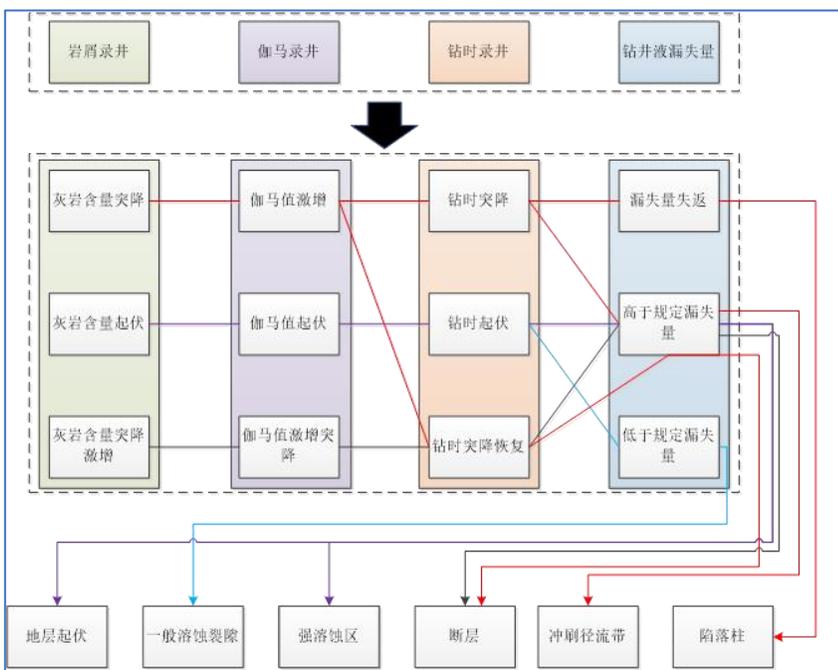
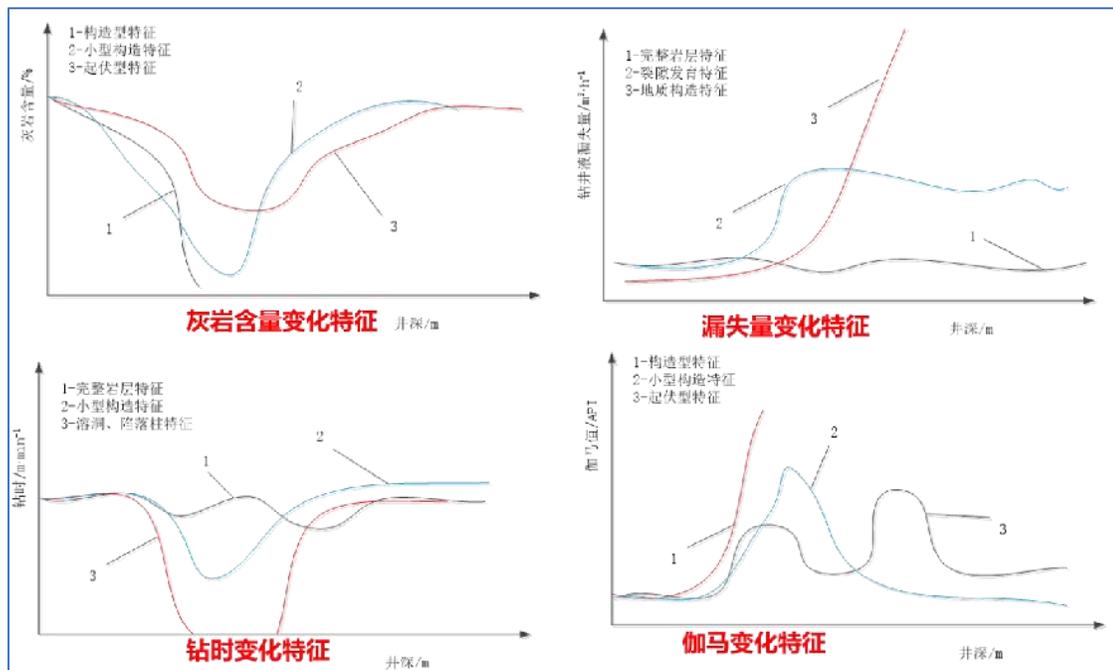
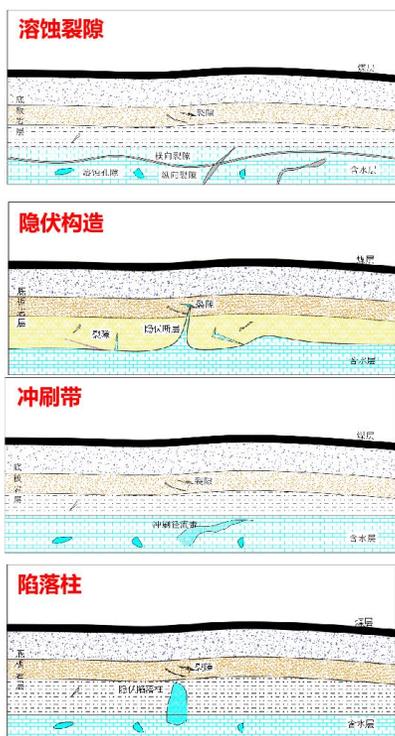
定向钻轨迹剖面图及平面图误差分析

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果4: 研发考虑**子午角**和**磁偏角**的精准定向导向技术, 结合岩屑-伽马多因素融合**隐伏通道识别模型**, 实现泥质灰岩层位轨迹**精准控制**与**隐伏导水通道**靶向识别封堵。

- ✓ 隐伏构造识别指标: 主要有岩屑录井、水文录井、钻时录井、伽马录井。
- ✓ 隐伏构造分类: 主要有溶蚀裂隙、冲刷径流带、导水断层、充水褶皱、陷落柱。



多元信息联合的隐伏通道识别模型构建

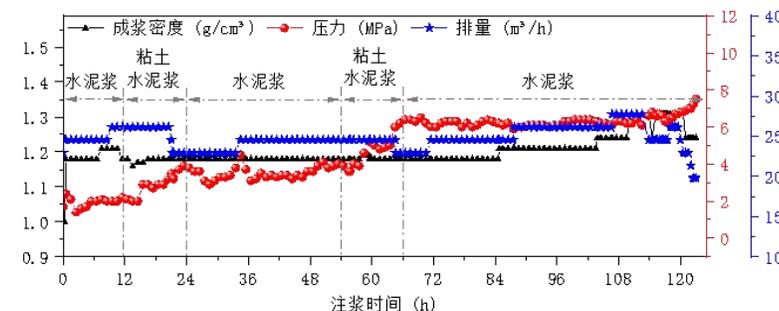
三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



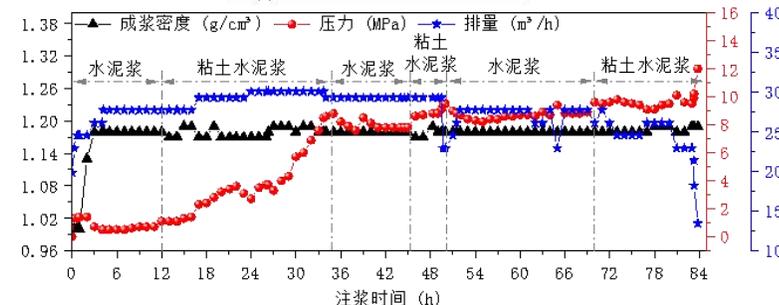
- ✓ 依据地面区域治理长水平孔注浆过程中，在确定注浆终压前提下出现的**低压充填**、**中压扩散**和**高压裂隙延展加固**三个阶段，划分注浆压力阶段；
- ✓ 基于阶梯式缓慢起压原则，提出了“**适压（稀浆控压）-交替（浆液类型，经济性）-调整**”三阶段控制型**交替注浆**模式。针对低渗泥灰岩微裂隙注浆量少的难题，经过工程实践检验，该模式使得**注浆时间延长至2~10倍**，**延米平均注浆量由1.2t提升至4.7t**，有效提升了区域治理工程质量。

三阶段“控压增量”注浆工艺调控参数示例

| 阶段 | 特征 | 原则 | 材料要求 |
|--------|------------------|--|---|
| 低压充填阶段 | 低渗、微张裂隙发育 | 满足“ 稀浆漫注 ”和“ 疏通裂隙 ”要求 | 水泥浆1.18 g/cm ³ 疏通裂隙、替换钻井液，注浆量>钻孔体积5倍； |
| 中压扩散阶段 | 钻孔周边原岩裂隙疏通距离接近极限 | 水泥浆与粘土水泥浆的交替切换 控制注浆压力阶梯上升是关键 | 粘土水泥浆，密度在1.22g/cm ³ ，黏度控制在16.5~18.5s；水泥浆，浆液密度在1.18g/cm ³ ，注浆量>钻孔体积2倍； |
| 高压加固阶段 | 浆液扩散充填范围趋于饱和 | 保持高密度注浆状态，可适当 调整固相比、增加水泥掺量 ，增强浆液胶结强度，封闭钻孔周边裂隙 | 非终孔，优选粘土水泥浆，水泥与粘土固相比≥10:10，黏度17~18.5s；终孔优选水泥浆，密度1.20~1.30 g/cm ³ |



(a)Z1-3分支：1629~1831m段



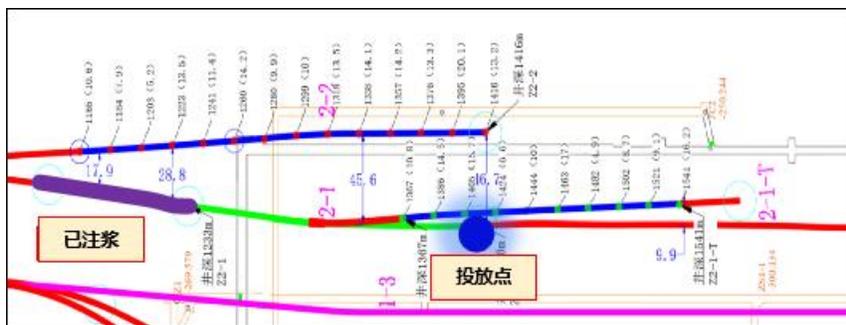
(c)Z2-2分支：1522~1776m段

基于“控压增量”注浆工艺的现场注浆压力变化过程

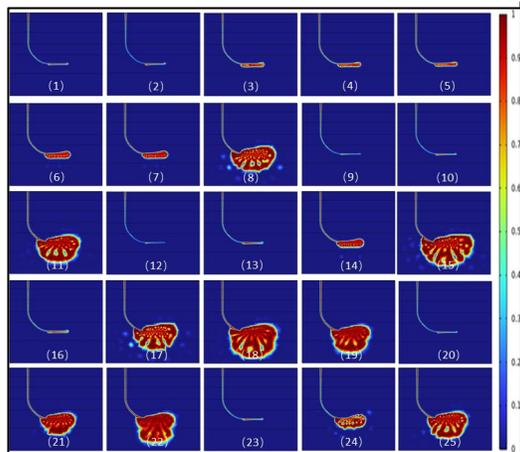
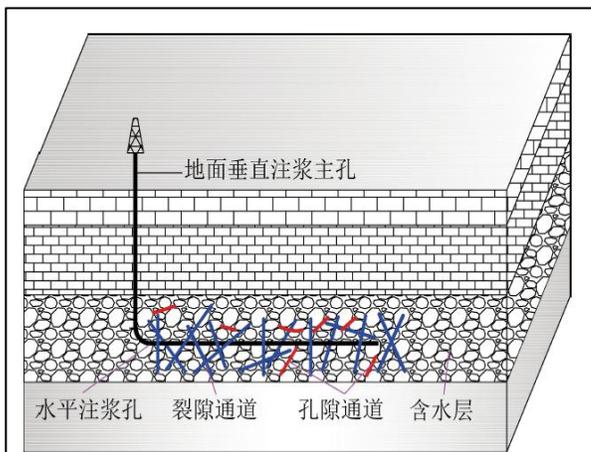
三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



成果6：基于注浆过程中示踪试验、井下串浆、井下钻孔揭露注浆浆液、裂隙精细定量数值模拟等手段，获得**构造主控通道**和**原生低渗通道**异化浆液扩散特征。

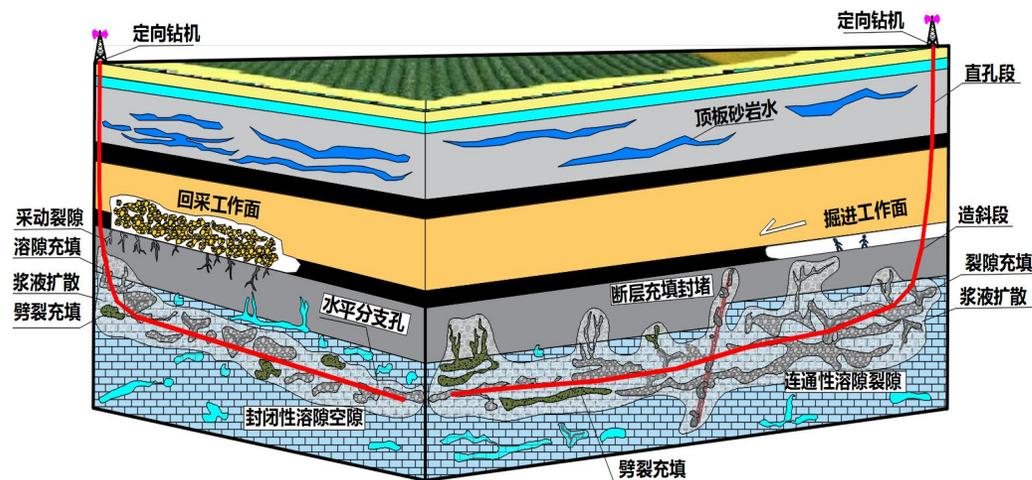


分支孔井段示踪剂检测结果



裂隙精细定量因素条件下数值模拟

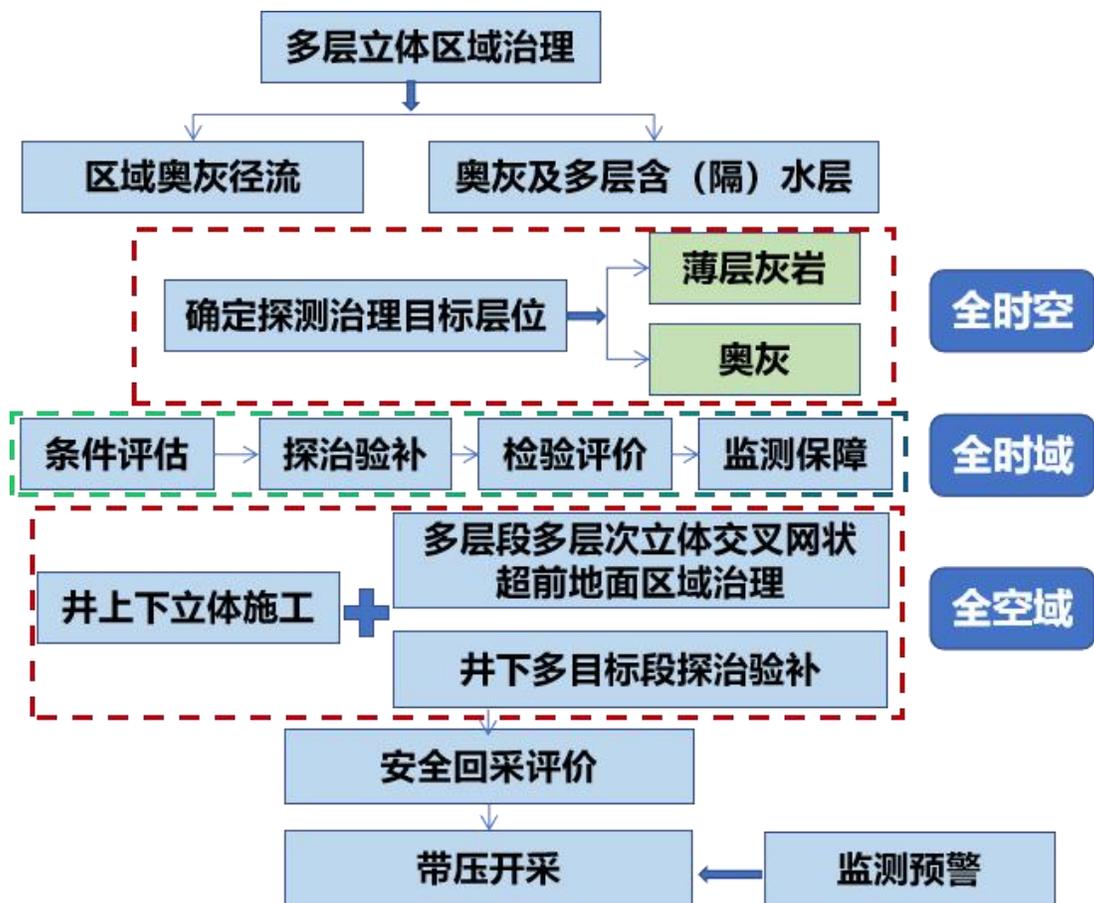
- **原生封闭性溶隙空间**，以渐进式注浆封堵为主，浆液扩散有限；
- **连通性溶隙空间**，以构造联通性为主，浆液扩散范围较大；
- 浆液扩散**压力驱动**为原则，岩-水-浆相互作用时，遇弱则强、见缝就走。



三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

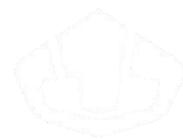


成果7：针对深部高水压突水特点，形成底板复合承压含水层多层立体区域治理模式，实现了深部高承压水上**减水开采**和**无害化开采**。

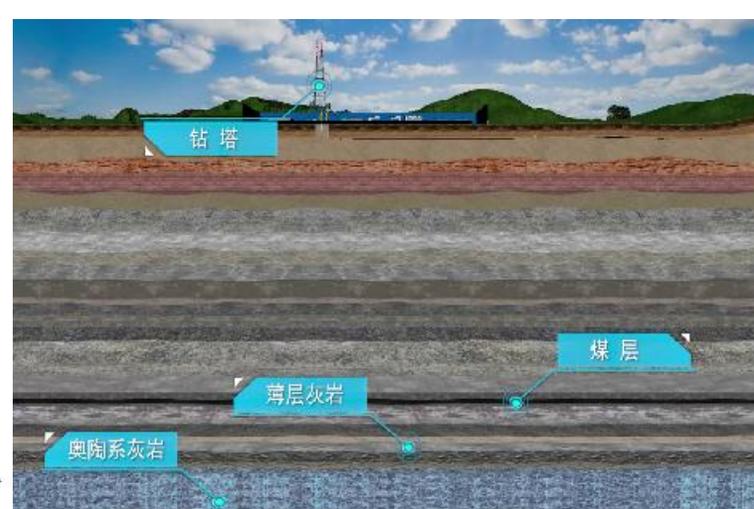
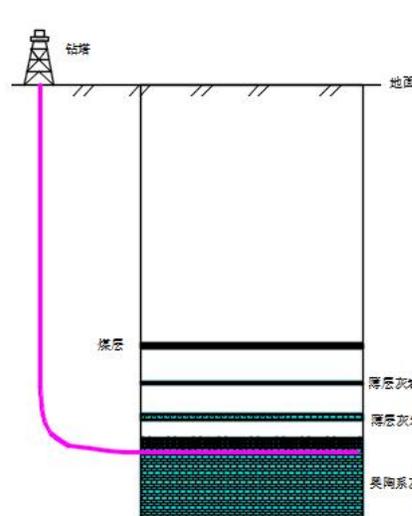
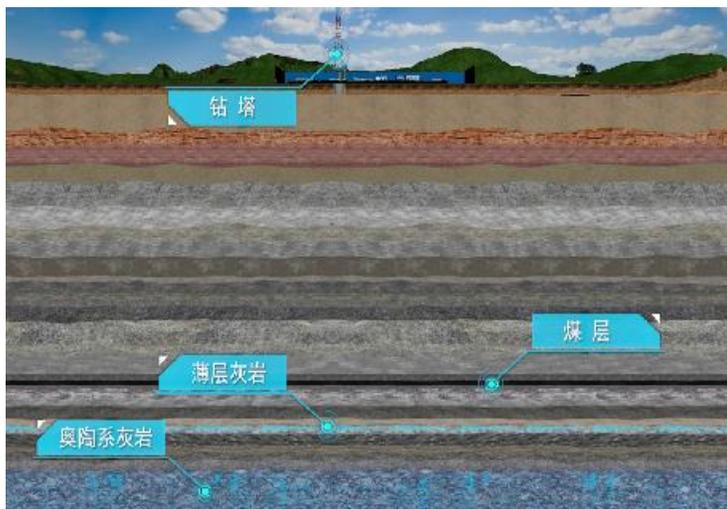
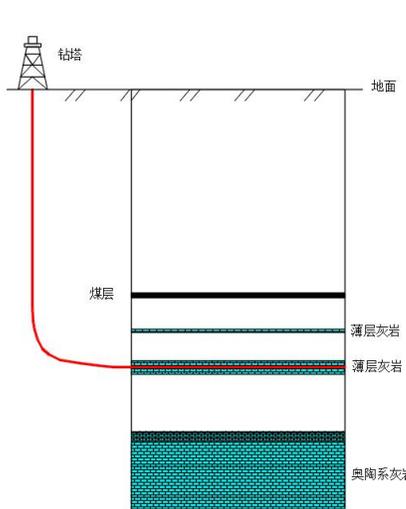


- ✓ “全时空”：奥灰及多层薄灰岩水害综合防治。
- ✓ “全时域”：从条件预测评估开始，到全方位立体网状探治，再到效果检验评价，直至回采监测保障，形成“条件评估、探治理补、检验评价、监测保障”治理质量流程。
- ✓ “全空域”：形成井上和井下立体施工、多层段多层次立体交叉网状地面超前区域治理、井下双目标层段探、治、验、补防治模式。

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术

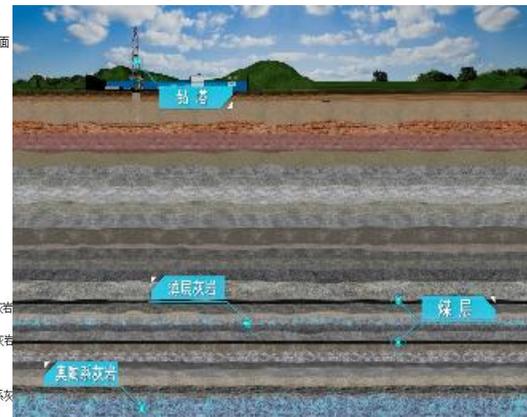
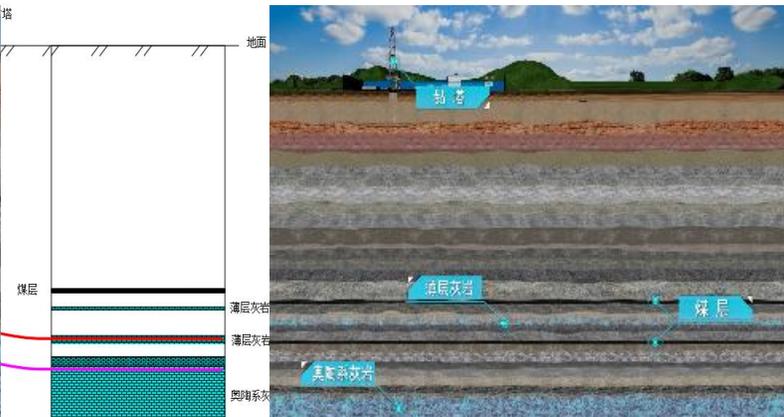
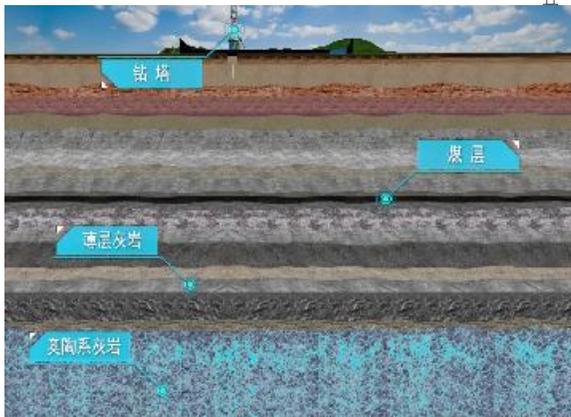
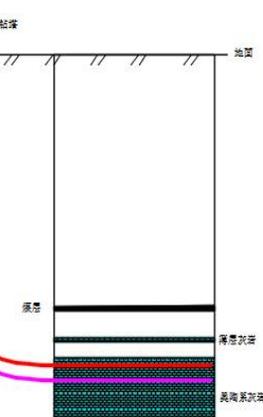
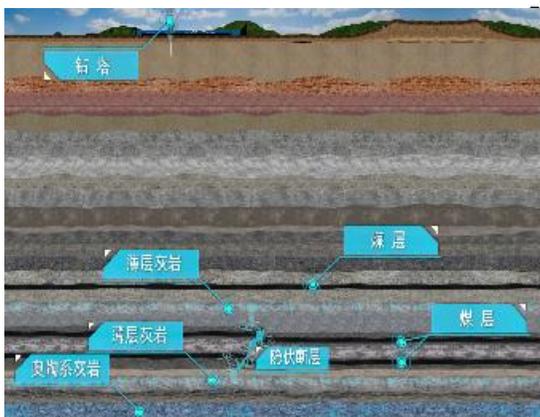
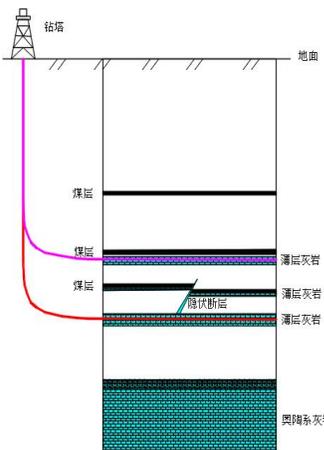


成果7：形成底板复合承压含水层多层立体区域治理模式



薄层灰岩单层治理

奥灰顶部单层治理



薄层灰岩多层治理

奥灰顶部多层治理

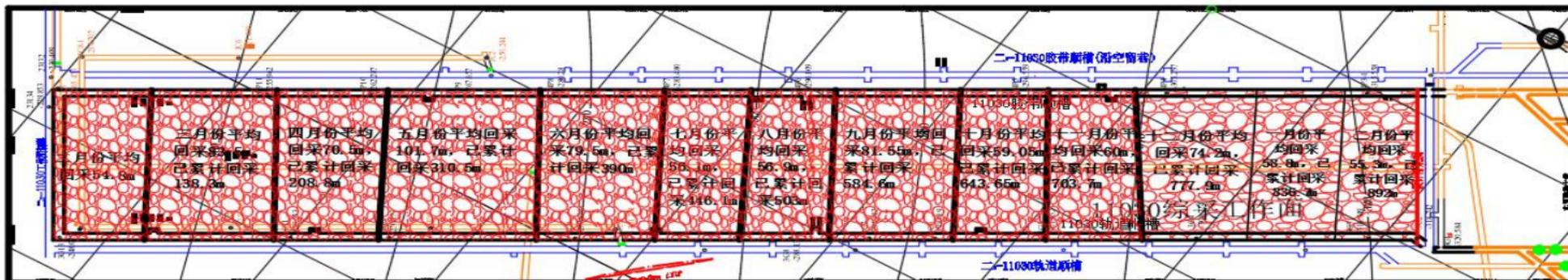
薄灰奥灰多层治理

三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



工程实践：孟津煤矿11030工作面区域治理累计钻探量14136.04m、注浆量44344t、平均注浆量3.84t/m。首治工作面已正常推采结束，底板未出水。

- ✓认识一：工作面区域治理完成时间要提前于采掘0.5~1年，①完善异常区检验、补强工作，②消除注浆对受注层渗流场的扰动，③浆液凝固、胶结强度可靠。
- ✓认识二：重视井下治理、检验工作，加强井下钻探、注浆、物探等异常区块检验、补强，加强井下钻孔水文参数、轨迹参数搜集和检验层位控制。
- ✓认识三：井下检验孔设置注浆标准，如涌水量指标、层位指标，止水套管多级下放，固管质量，封孔质量。
- ✓认识四：水压大、治理层位深、局部要加密治理和双层补强治理。



三、底板灰岩含水层超前区域治理与保护技术



乌海华资煤矿地面区域治理项目部



孟津煤矿地面区域治理项目部



中国煤炭科工集团

开采研究院有限公司

CCTEG COAL MINING RESEARCH INSTITUTE

源于专业

品质源于专业，专业创造价值，开采即品质。60多年来，开采始终引领煤炭科技进步，支撑行业发展，用专业的技术，为客户提供优质服务，创造非凡价值。

止于至善

弘扬工匠精神，以至善至美为终极目标，把技术、产品与服务做到极致，勇于挑战，不断超越，在传承中改进，在改进中提高，持续为客户创造、奉献精致产品。

报告完毕、谢谢大家