煤矿水灾预防与灾后治理关键技术

报告人：董书宁 研究员

中煤科工西安研究院

2023年5月　安徽·宿州

汇报提纲

1 煤矿水害防治背景

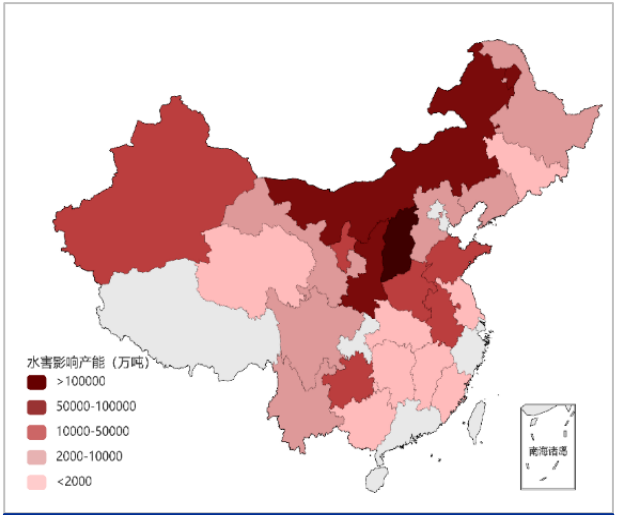
2 煤矿水灾超前预防技术

3 矿井水灾高效治理技术

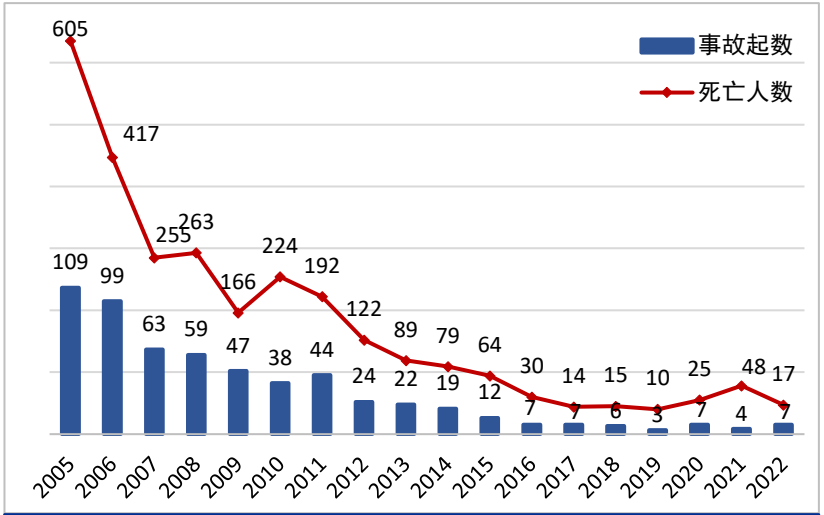
4 煤矿水害防治发展方向

1 煤矿水害防治背景

- 煤矿区地下水是矿区地质环境中**最为活跃、动态变化最为剧烈**的构成要素，具有**威胁矿井安全**和**影响生态环境**的双重属性
- 我国**83%的煤矿**水文地质类型为中等及以上，2000年以来全国煤矿水灾事故造成**5018人死亡**，直接**经济损失达百亿元**，全国煤矿年排水总量高达**70多亿m^3**



全国受水害影响煤炭产能分布

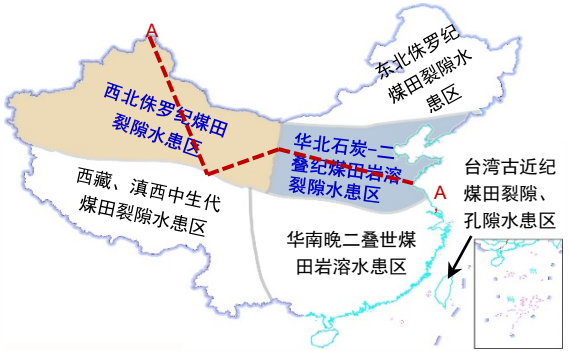


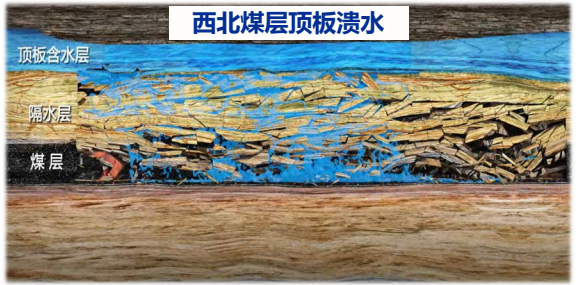
煤矿水灾事故起数及死亡人数变化

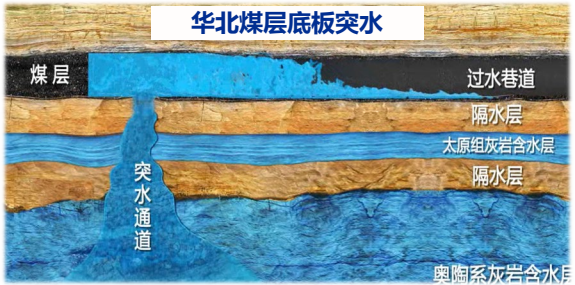
矿区水环境热点新闻

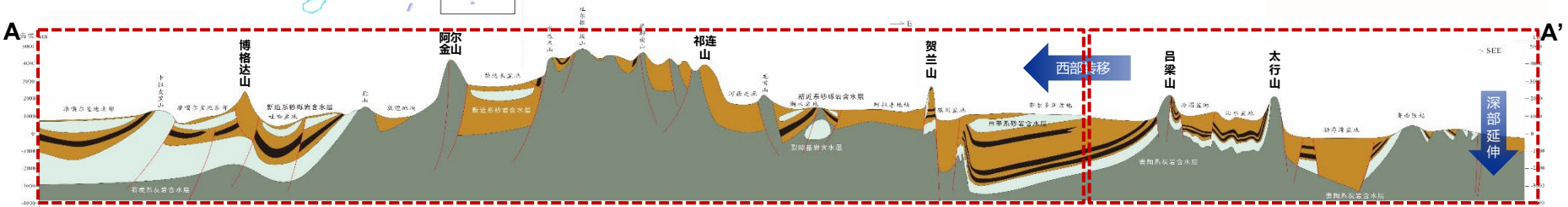
1 煤矿水害防治背景

- 我国煤矿区划分为**6大水灾隐患区**，其中华北、西北地区最为典型：华北石炭-二叠纪煤层开采导通底板奥陶系灰岩岩溶含水层，**易发生底板突水**；西北侏罗纪煤层开采扰动影响顶板砂岩含水层，**威胁矿井安全并造成水资源流失**
- 华北、西北地区煤炭产能占全国90%左右，**水害制约煤炭产能**的问题极为突出









中国煤田水文地质剖面图

1 煤矿水害防治背景

主要难题

如何消除华北石炭二叠纪煤田煤层底板水灾隐患，**避免突水事故**发生？

如何消除西北侏罗纪煤田煤层**顶板水影响**，并**减少水资源流失**？

解决思路与技术方案

水灾超前预防

- 矿井水害危险 **预测评价**
- 矿井水灾风险 **监测预警**
- 矿井水灾隐患 **超前治理**

3

灾后快速治理

- 矿井水灾 **高效（封堵）治理**

1

汇报提纲

1 煤矿水害防治背景

2 煤矿水灾超前预防技术

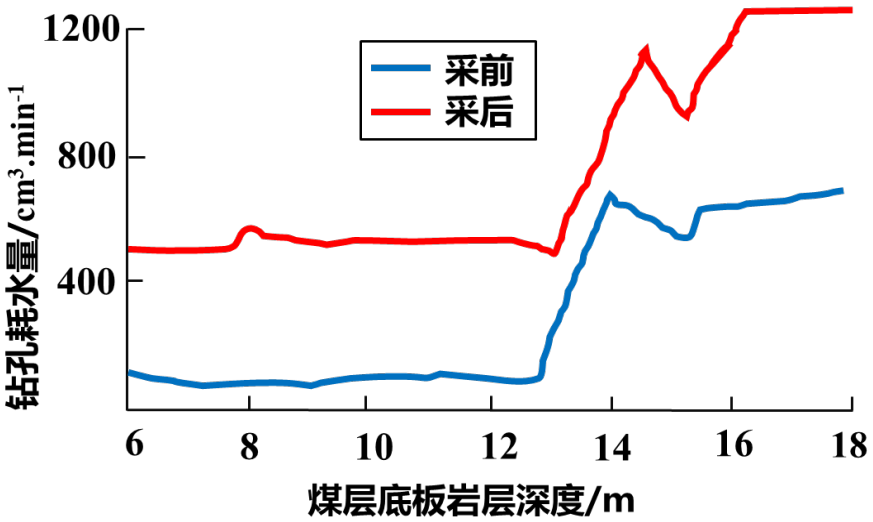
3 矿井水灾高效治理技术

4 煤矿水害防治发展方向

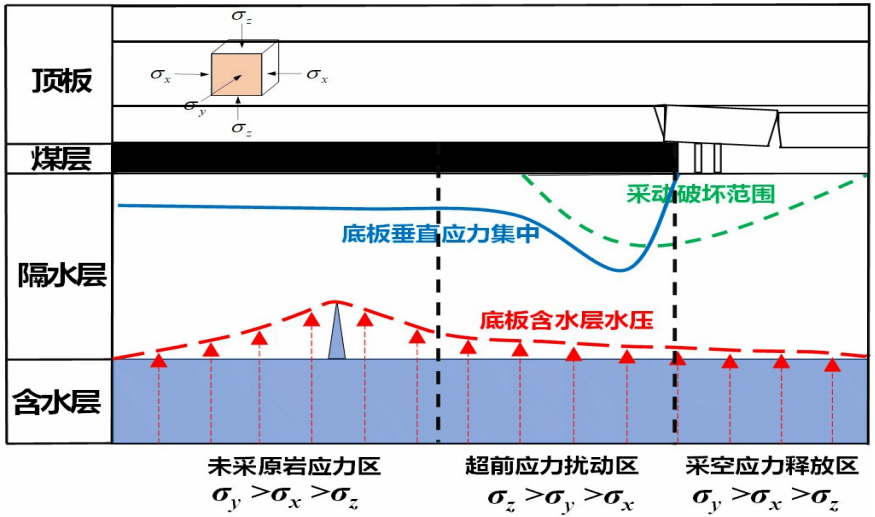
2.1 煤矿水害危险预测评价

煤层底板应力转换-水压导升致灾机理

- 隔水层底部存在**原始导升现象**，并受水压及最小主应力共同控制
- 开采扰动促使最小主应力大小和方向改变，隔水层破裂阈值降低，诱发水压垂向**递进导升劈裂隔水层造成突水**



开采前后不同深度岩层渗透性变化

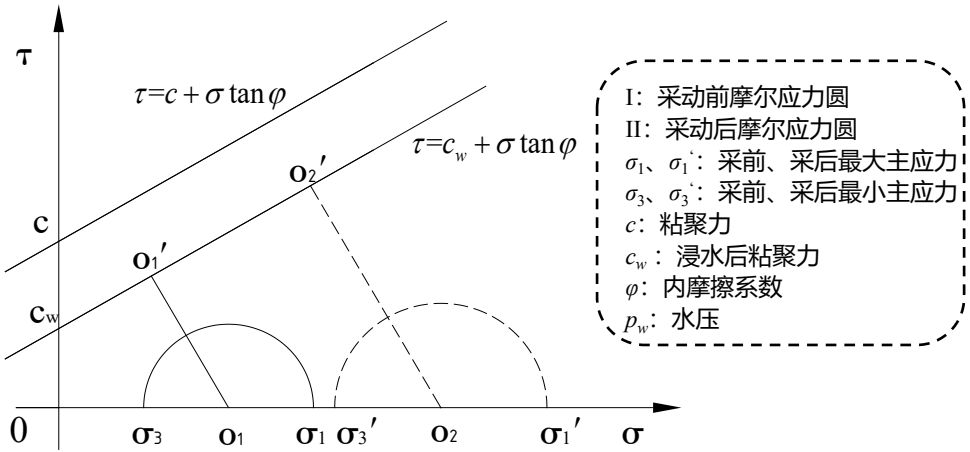


应力扰动-水压导升耦合致灾机制

2.1 煤矿水害危险预测评价

煤层底板应力转换-水压导升致灾机理

- 基于采动应力扰动系数（k_{3d}）、采动水压致裂系数（k_w）、采动岩体失稳系数（k_i），建立**采动底板突水判据（k）**
- 煤层采动底板加载-卸荷应力路径下的**突水判据**： $k > 1$



I：采动前摩尔应力圆
II：采动后摩尔应力圆
σ_1、σ_1'：采前、采后最大主应力
σ_3、σ_3'：采前、采后最小主应力
c：粘聚力
c_w：浸水后粘聚力
φ：内摩擦系数
p_w：水压

基于莫尔应力圆的底板采动应力状态变换示意

采动应力扰动系数

$$k_{3d}=\left|\frac{\sigma_1'-\sigma_3'}{\sigma_1-\sigma_3}\right|\frac{2c\cot\varphi-2p_w+\sigma_1+\sigma_3}{2c\cot\varphi-2p_w+\sigma_1'+\sigma_3'}$$

采动水压致裂系数

$$k_w=\frac{p_w}{3\sigma_3'-\sigma_1'-p_p+R_m}$$

采动岩体失稳系数

$$k_i=\frac{\left|\sigma_1'-\sigma_3'\right|}{2c\cos\varphi+\sin\varphi\left(\sigma_1'+\sigma_3'-2p_w\right)}$$

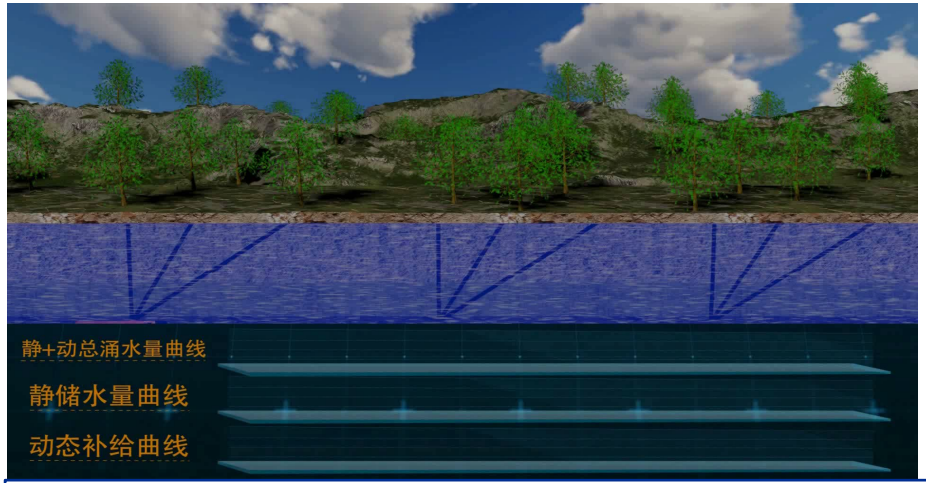
采动底板突水判据

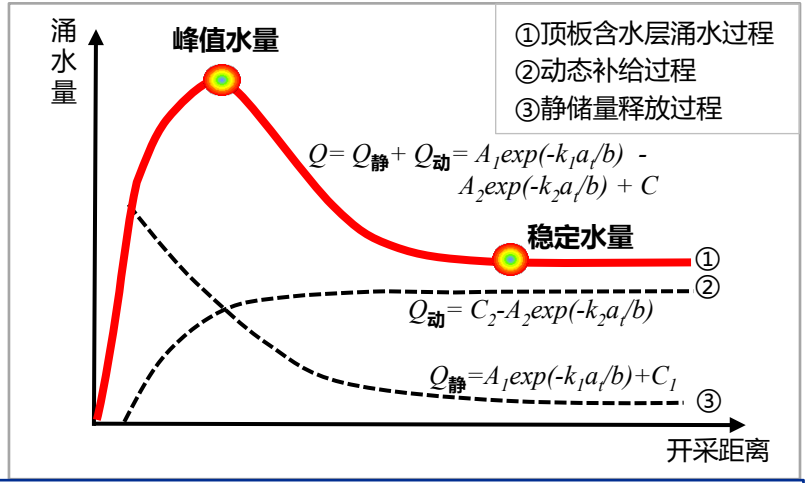
$$k=k_{3d}k_wk_i>1$$

2.1 煤矿水害危险预测评价

煤层顶板含水层卸压涌水系统动力学机制

- 顶板涌水是由含水层周期性断裂造成**静储量释放逐渐衰减**，以及开采范围扩大造成**动态补给量逐渐增加**2部分组成
- 建立的顶板含水层涌水二阶动力学模型，揭示了工作面涌水形态主要受**峰值水量**和**稳定水量**综合控制这一现象



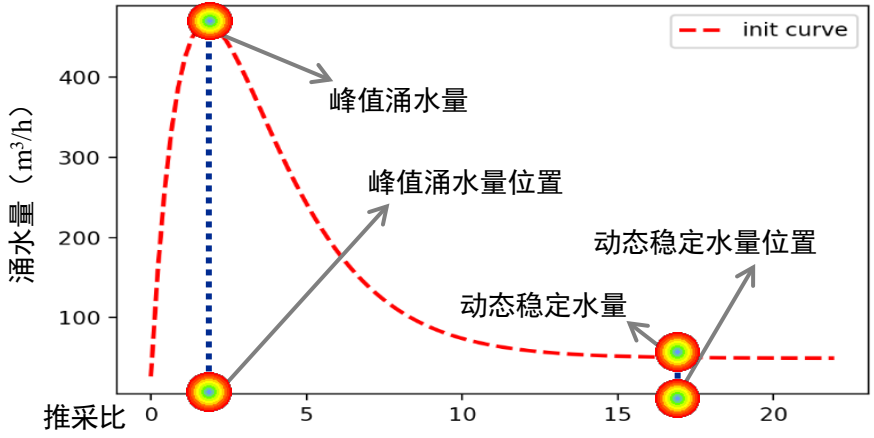


含水层开采扰动涌水量变化动力学模型

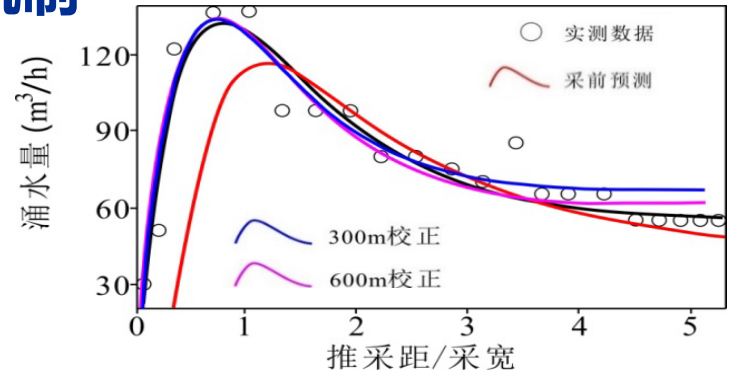
2.1 煤矿水害危险预测评价

煤层顶板含水层卸压涌水系统动力学机制

- 工作面涌水量**采前全过程预测**
- 工作面涌水量预测**采中动态校正**
- 工作面涌水量动态**预测软件**



采前全过程预测



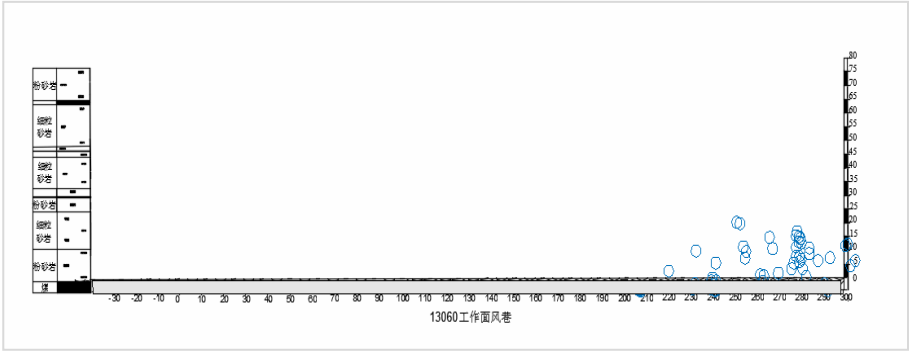
涌水量采中动态校正

工作面涌水量动态预测软件

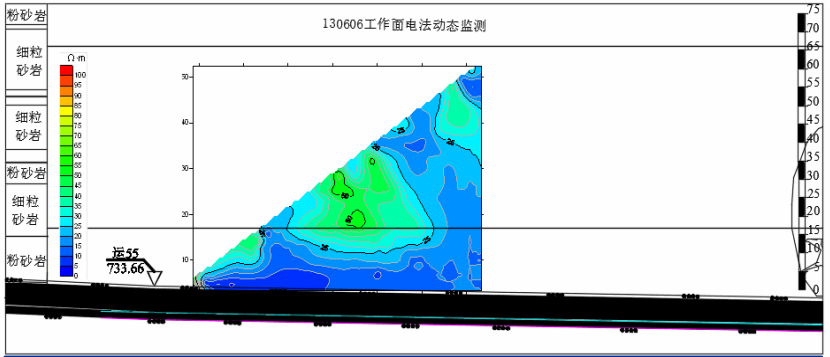
2.1 煤矿水害危险预测评价

矿井突水危险源动态辨识与危险性评价

- **煤层顶（底）板涌（突）水受采矿应力场、渗流场动态耦合影响，突水危险源动态演化，突水危险性受采动影响处于变化状态**
- **危险源动态辨识：孔-巷微震导水通道辨识、孔中电阻率充水水源辨识**
  - 孔-巷微震监测系统监测采动过程中围岩破坏信息，辨识导水裂隙带时空演化
  - 孔中连续电法动态监测，辨识围岩体富水异常时空演化



孔-巷微震采动裂隙动态辨识



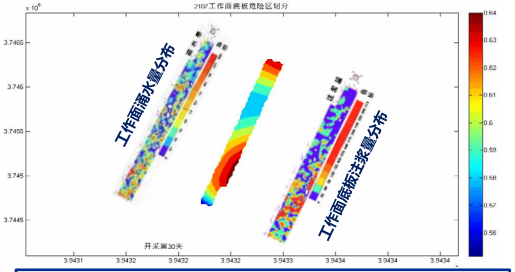
孔中电法充水水源动态辨识

2.1 煤矿水害危险预测评价

矿井突水危险源动态辨识与危险性评价

- **危险性动态评价：多准则决策模型、多元评价准则**
  - 时空域水害辨识信息集成、管理、推理，建立**融合GIS和空间多准则的决策模型**，一体化危险性动态评价模型
  - 基于信息熵、层次分析等权重确定方法，集成**采动突水危险性多元评价准则**，对突水危险性进行量化分析与动态评价

顶板水害危险性动态评价

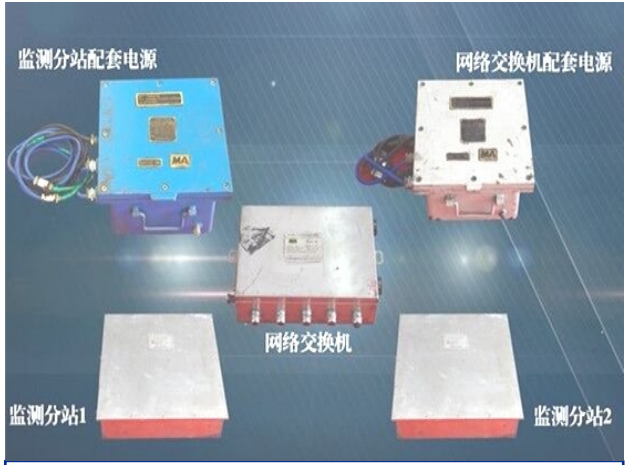


底板水害危险性动态评价

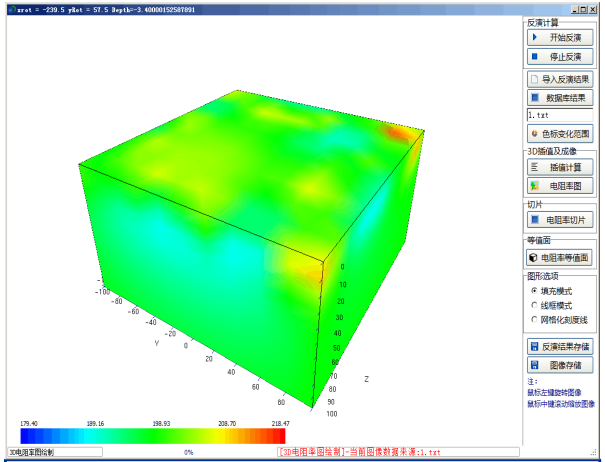
2.2 煤矿水灾风险监测预警

煤矿水灾全空间监测与智能预警技术及装备

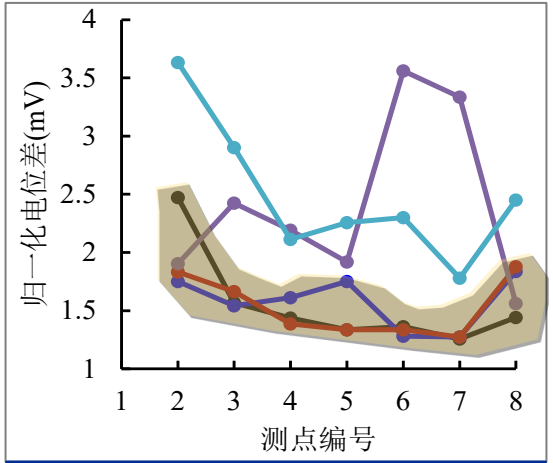
- **ZDJ11多频连续电法充水水源监测装备：采用伪随机多频序列人工场源检测技术，电信号分辨能力达5μV；开发的智能控制软件，可自动切换发射、接收电极，实现数据连续采集与远程控制；利用拟高斯-牛顿法进行电阻率三维反演，突出弱电阻率变化并进行3D动态成像**



矿用ZDJ11多频连续电法仪设备



多频电法监测系统电阻率三维实时成像



信号分辨能力标定试验

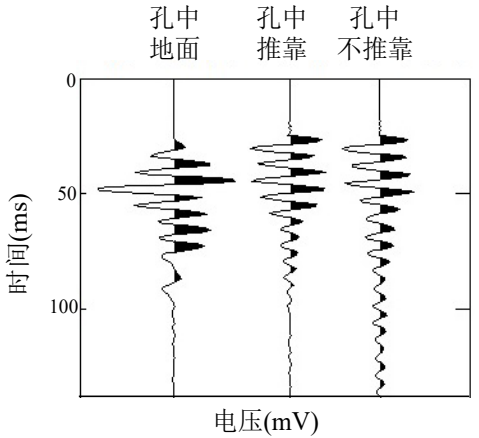
2.2 煤矿水灾风险监测预警

煤矿水灾全空间监测与智能预警技术及装备

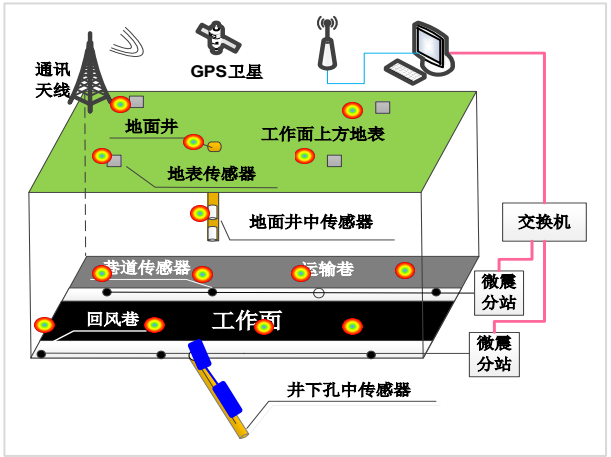
- **井-地-孔一体化导水通道微震监测系统：**研制的带推靠装置的高灵敏度**孔中拾震传感器**，可井下-地面-孔中立体布设；搭建光纤（井下）、无线网桥（地面）**数据传输网络**；建立了微震信号快速、高精度定位的**三分量偏振分析算法**

地面孔中拾震传感器

下孔中拾震传感器



传感器微震信号接收能力测试

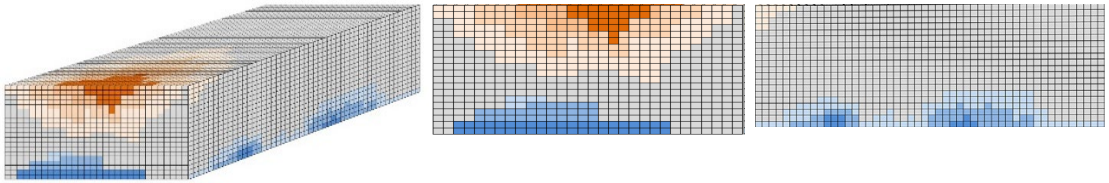


“井-地-孔”一体化微震监测系统部署

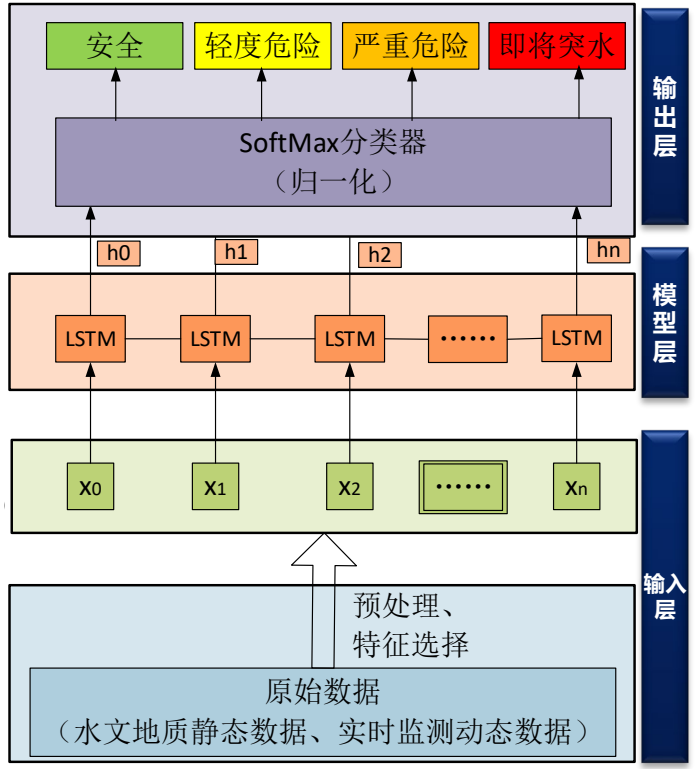
2.2 煤矿水灾风险监测预警

煤矿水灾全空间监测与智能预警技术及装备

- **多元时序监测大数据矿井水害智能预警系统：**采用云计算平台与分布式文件系统，构建了TB级**多元时序大数据存储与数据迁移架构**；基于深度学习模型和自适应参数优化训练算法，实现了**水害危险性智能预警**，并通过**三视热力图形式**实时显示监测区各剖分网格的预警等级



Web端基于三视热力图预警可视化效果

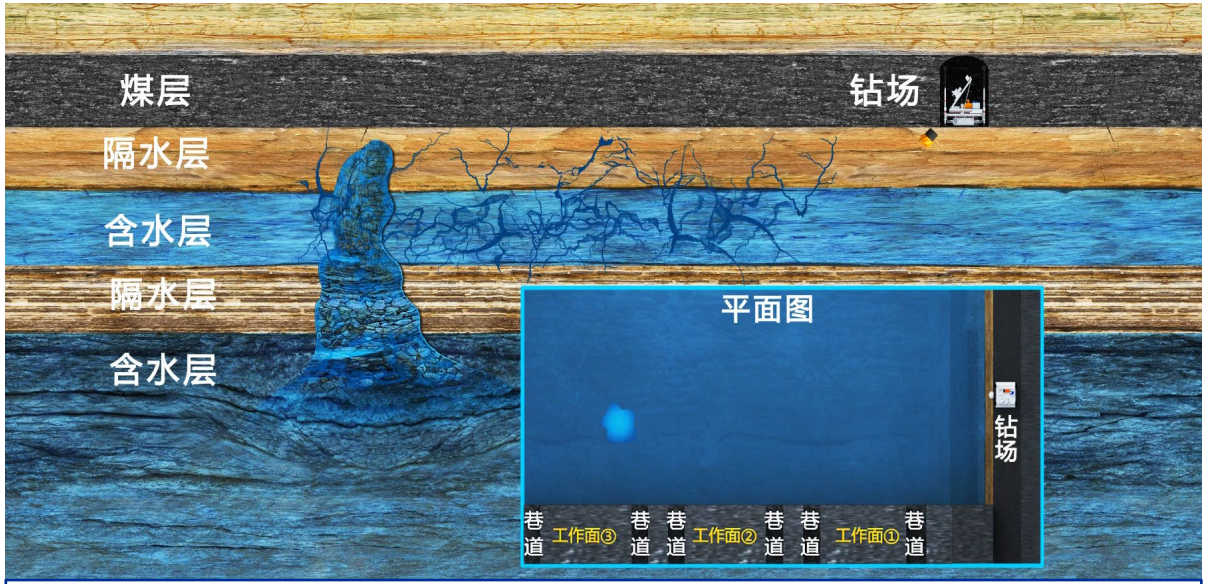


LSTM智能模型框架结构

2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层底板水灾隐患超前区域治理技术

- 采用**顺层定向钻孔面状布设全面注浆**，加固隔水层或改造含水层，消除导升异常带（构造等发育区）并降低原始导高，避免采掘扰动造成突水



超前区域治理技术原理

覆盖全	地面、井下灵活布孔，**消除布孔盲区**
探查全	定向钻孔面状铺设，**充分揭露导水通道**
效果好	钻孔群高效控制注浆，**全面加固/改造**

技术优势

2.3 煤矿水灾隐患超前治理

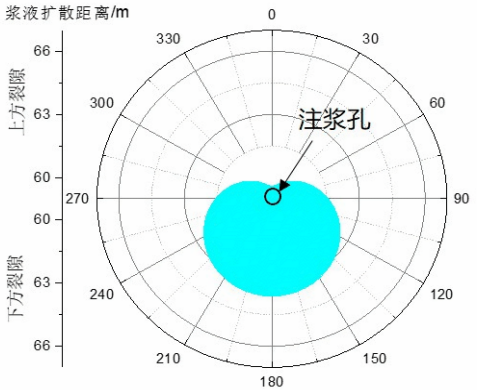
煤层底板水灾隐患超前区域治理技术

■ **水平钻孔群注浆浆液扩散控制理论：**理论模型揭示了重力影响下浆液**非对称扩散**规律；提出**注浆功率因子**指标，建立了不同序次钻孔群**注浆强度控制**耦合模型，为区域注浆工程实施奠定了理论基础

控制方程

$$6\mu L^2 \pm \rho g \sin\alpha b^2 tL - (p - p_0) b^2 t - 6\mu r_0^2 = 0$$

μ-浆液粘度；
L-扩散距离；
ρ-浆液密度；
α-裂隙倾角；
b-裂隙宽度；
t-注浆时间；
p_1-注浆压力；
p_0-静水压力；
r_0-注浆孔径



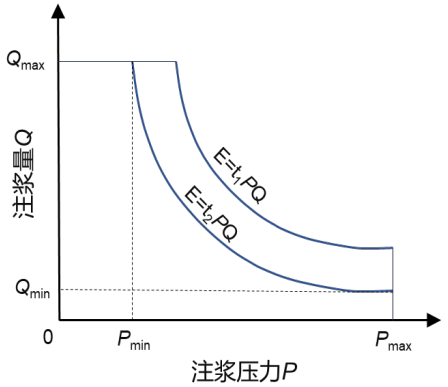
单孔注浆裂隙介质浆液扩散规律

注浆功率因子

$$E = p^*Q = 2\pi\left(L^3\tau_0 / L_t^3\tau_{0t}\right)/E_t$$

$$\Rightarrow \beta_t L^3 = \frac{p_t \cdot Q_t}{\tau_{0t}}$$

E-注浆功率因子；
Q-单位时间注浆量；
τ_0-浆液初始剪应力；
t-注浆钻孔序次



不同序次水平分支孔注浆参数优化控制

2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层底板水灾隐患超前区域治理技术

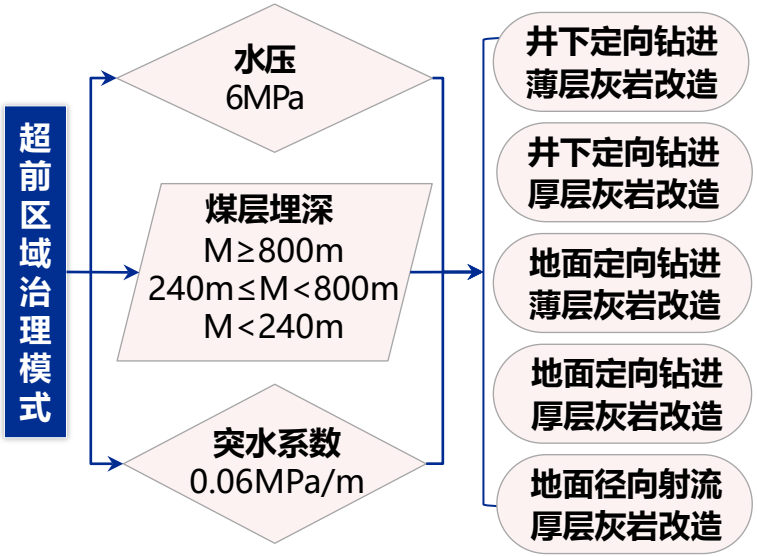
■ **超前区域治理综合技术体系：模式选择、钻进探查、高效注浆、效果检验**

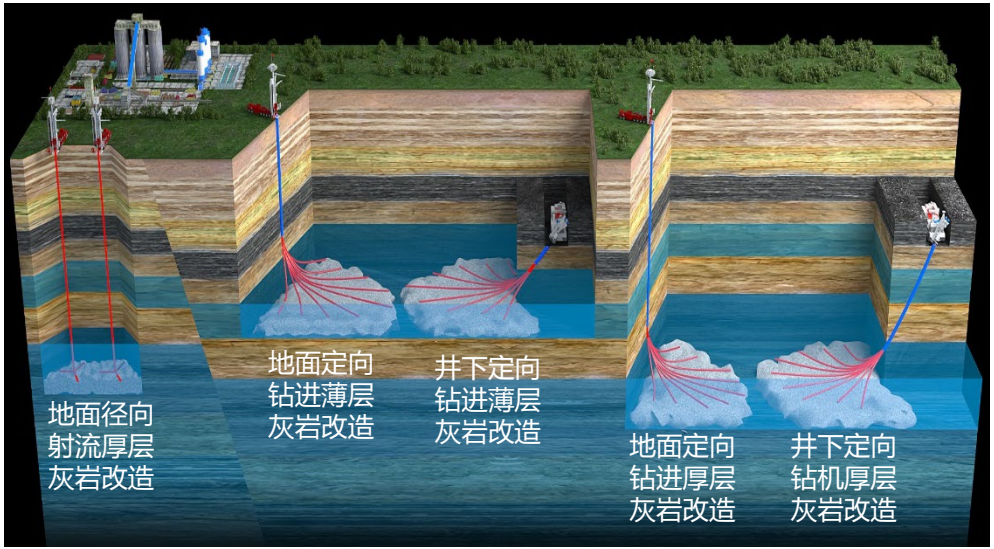
- **模式选择：**确定工程方案（施工位置、治理层位、钻孔布设）
- **钻进探查：**注浆方案制定（含水层及通道特征、注浆参数、注浆量预算）
- **高效注浆：**注浆工程实施（单孔注浆参数、钻孔群注浆工艺）
- **效果检验：**确保实施效果（治理过程中检验、治理结束后检验）

2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层底板水灾隐患超前区域治理技术

■ **模式选择：**根据地形地貌、煤层赋存、水文地质条件及装备性能，确定出适用于我国不同煤矿区的超前区域治理模式及选择准则，为工程方案选取奠定基础



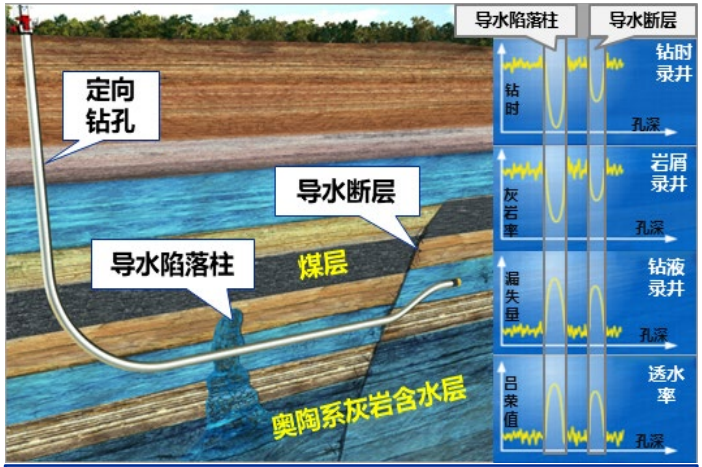


煤层底板水患超前区域治理模式

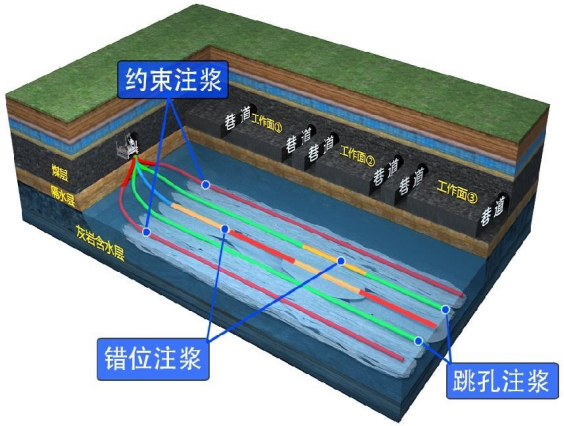
2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层底板水灾隐患超前区域治理技术

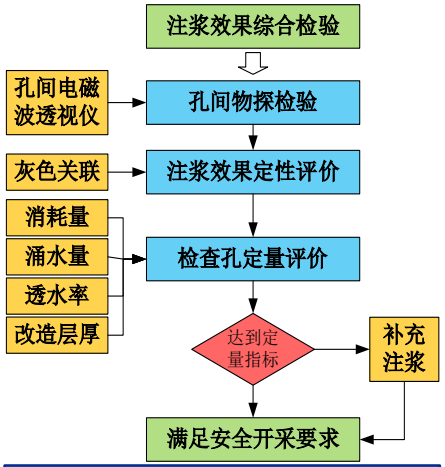
- **钻进探查：** 融合钻孔施工过程中多源信息，综合判识隐蔽导水通道
- **高效注浆：** 定向钻孔群分序高效控制注浆、单孔分段保压梯度注浆新工艺
- **效果检验：** “孔间物探、定性分析、定量评价”注浆效果综合检验技术



隐蔽导水通道水平孔超前精准探查



定向钻孔群高效注浆工艺

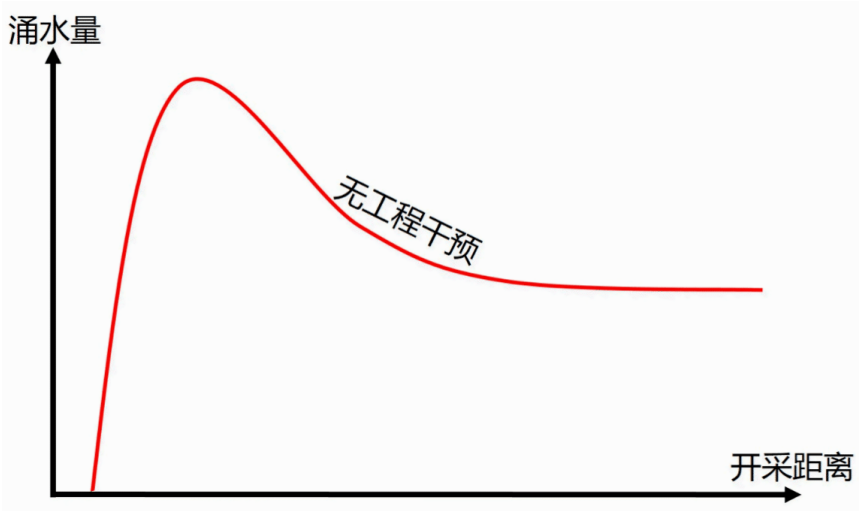


注浆效果综合检验

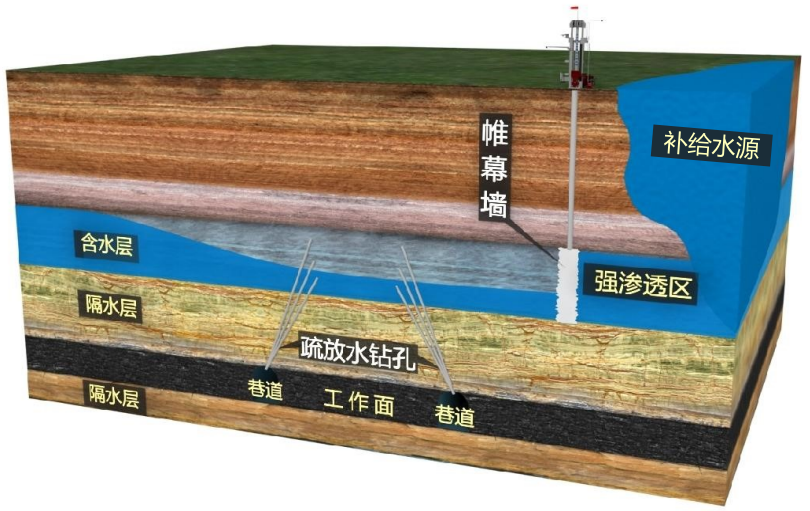
2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层顶板水治保结合协同防控技术

- **控制疏放：**保持一定安全水头，最优化设计消减峰值水量，**确保矿井安全**
- **帷幕截流：**强渗透补给区建造地下帷幕墙，拦截动态补给量以**减少地下水流失**
- **技术目标：**确保矿井安全开采的前提下尽可能**减少水资源损失**



治保结合防控理论原理



治保结合防控技术原理

2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层顶板水治保结合防控技术——顶板水多目标控制疏放技术

- 各向异性含水层**倾斜钻孔井流计算**方法，结合涌水动力学模型**确定顶板安全水头**，科学确定疏放水量、疏放时间等关键参数
- 束状倾斜直孔和枝状水平定向孔布设**疏水模式**，优化设计孔组间距及钻孔形态，**消除顶板水害隐患并避免无效疏放**

倾斜钻孔井流模型

$$s(r,z,t)=\frac{V_p}{8\mu_s(\pi^3 a_r^2 a_z t^3)^{\frac{1}{2}}}\exp[-\frac{\overline{r}^2+(z-z')^2}{4a_z t}]$$

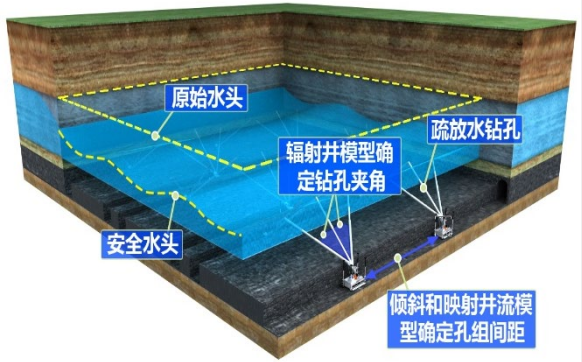
最优疏放水量模型

$$\min W_{疏}=\sum_1^m\left(\int_0^t\frac{4\pi T\left(H_0-\eta H_w\left(Q_{排}\right)\right)}{\ln\frac{2.25Tt}{r^2\mu^*}}dt\right)$$

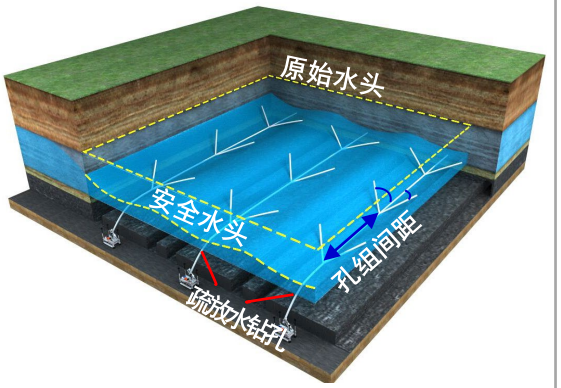
最优疏放水时间

$$\min t^*=\min W_{疏}/\sum_0^{n^*}\left(Q_{1Hw(Q_{排})}+Q_{2Hw(Q_{排})}+Q_{3Hw(Q_{排})}\right)$$

控制疏放优化设计模型



束状倾斜直孔疏放水钻孔布置

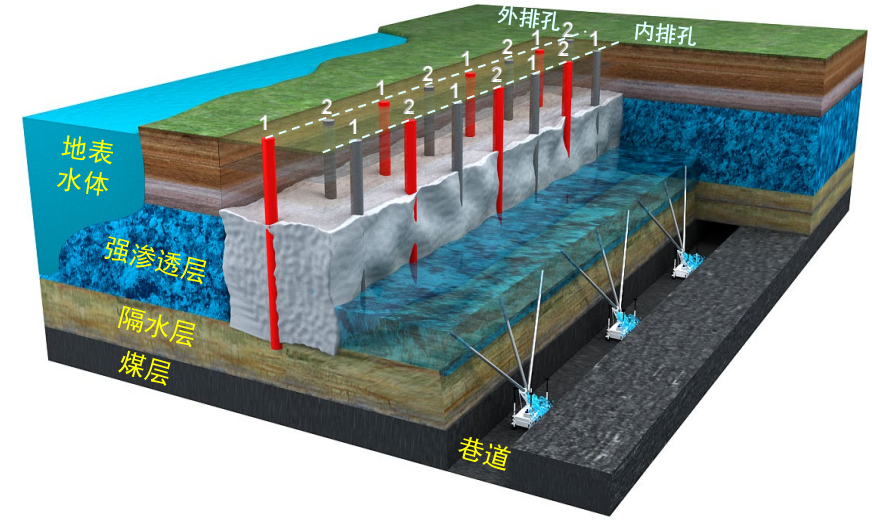


枝状近水平定向孔疏放水钻孔布置

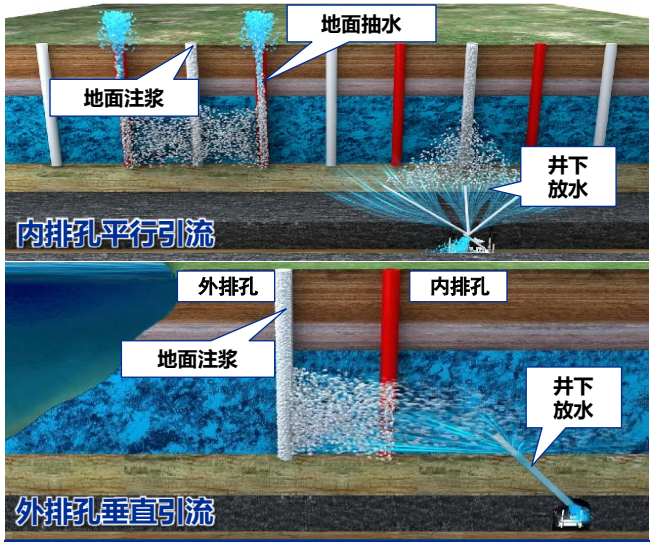
2.3 煤矿水灾隐患超前治理

煤层顶板水治保结合防控技术——含水层地下帷幕截流技术

- 针对有侧向强渗透补给的含水层，创建“**排孔段三维孔序优选、双位双向引流注浆、一带两区综合检验**”的帷幕截流技术；利用内排孔平行引流、外排孔垂直引流注浆，构建截水帷幕，可消减90%以上动态补给水量



帷幕截流减排技术示意图



引流注浆技术示意图

汇报提纲

1 煤矿水害防治背景

2 煤矿水灾超前预防技术

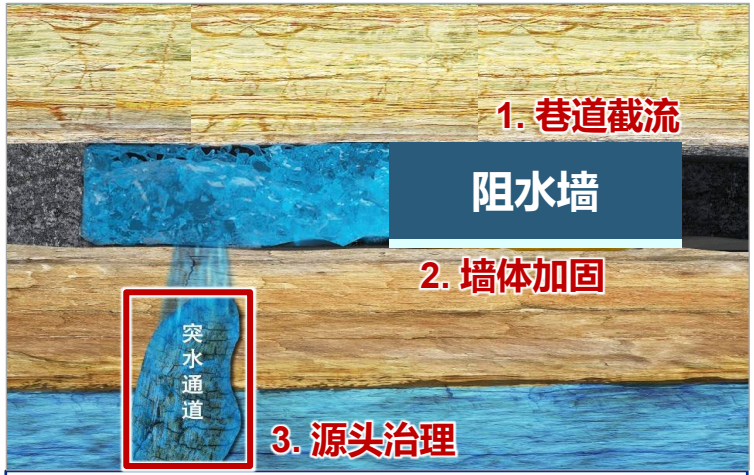
3 矿井水灾高效治理技术

4 煤矿水害防治发展方向

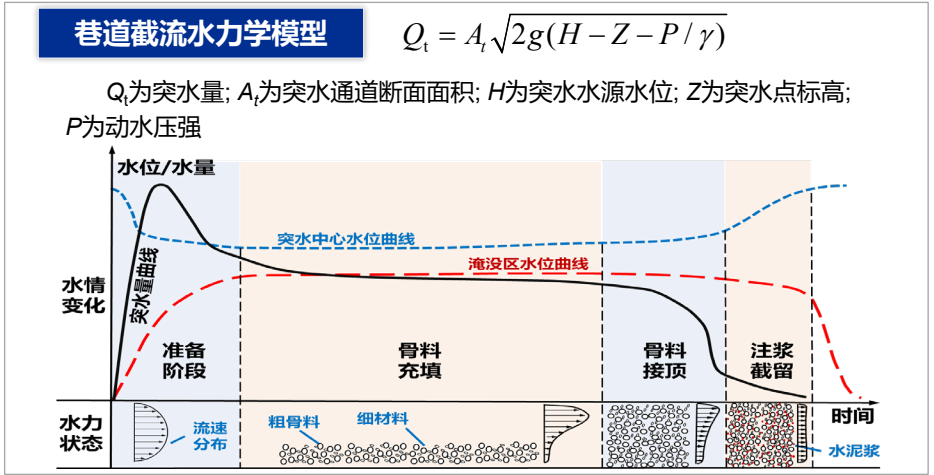
3 矿井水灾高效治理技术

过水巷道阻水墙建造流态演化水力学模型

- 矿井突水灾害治理一般都必须**先封堵**距突水点最近的**过水巷道**，变动水为静水后，**再全面根治突水通道**
- 巷道截流阻水墙建造过程**“四阶段”水力学模型**，揭示出不同截流封堵阶段流态时空演化及阻水墙受力机制



控制注浆固结体建造封堵技术原理

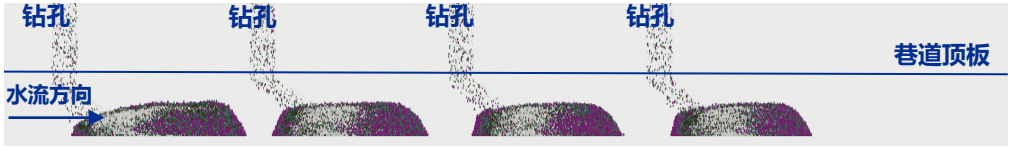


巷道截流水力学模型

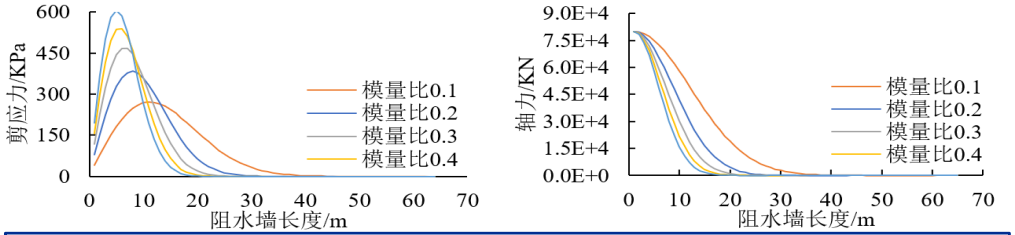
3 矿井水灾高效治理技术

过水巷道骨料灌注阻水墙建造截流技术

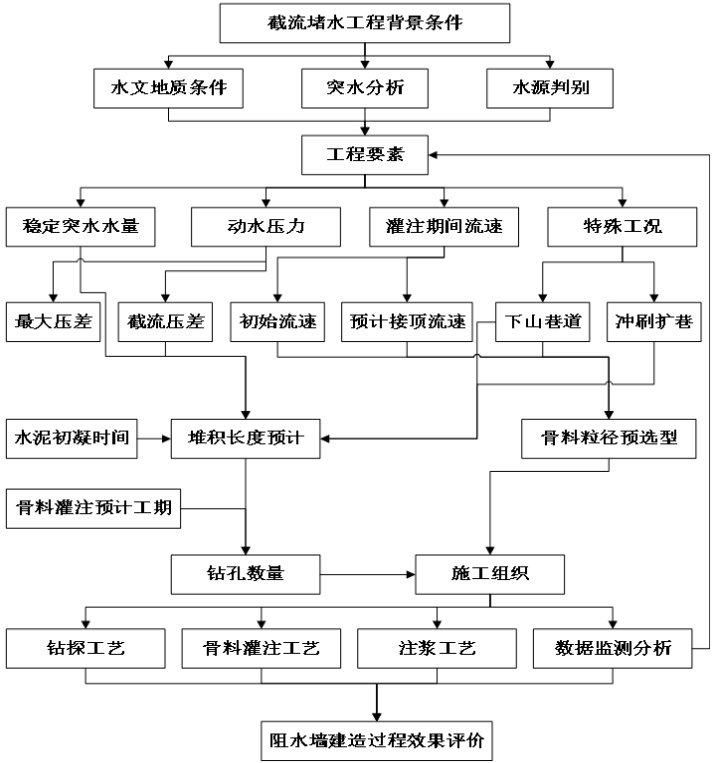
- 阻水墙-围岩相互作用解析模型，得出水压、突水量与**阻水墙体长度**的相互关系
- **钻孔数量**估算，**骨料粒径**选择与动态调整，构建出**截流技术体系**



骨料灌注阻水墙截流技术原理示意



阻水墙长度与受力分析

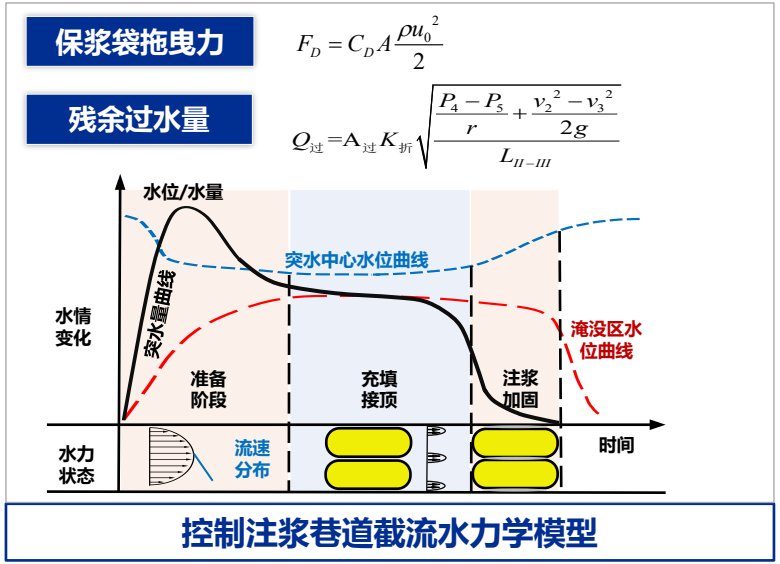


骨料灌注阻水墙截流技术体系

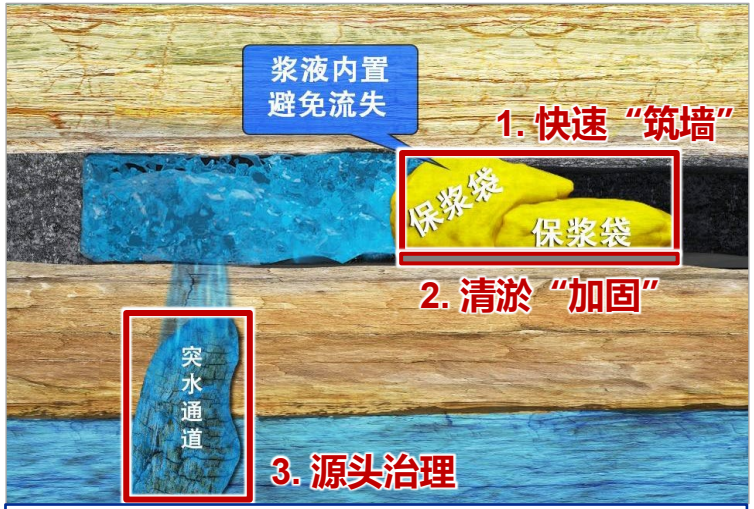
3 矿井水灾高效治理技术

过水巷道控制注浆固结体建造封堵技术

- 原理：增大骨料体积和质量，可**显著缩短充填接顶阶段**，实现快速截流
- 方案：保浆袋控制浆液形成结石体**快速“筑墙”截流**并清淤加固，封堵过水巷道控制水情，然后再**全面根治突水通道**



控制注浆巷道截流水力学模型

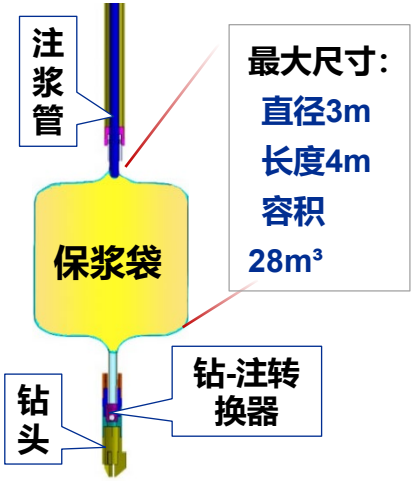


控制注浆固结体建造封堵技术原理

3 矿井水灾高效治理技术

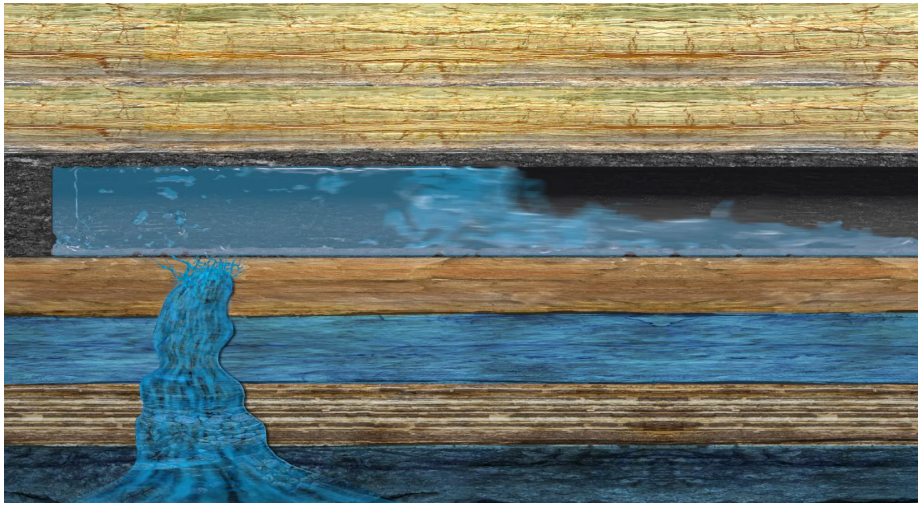
过水巷道控制注浆固结体建造封堵技术

- 研发出可内置保浆袋的**钻注一体化控制注浆钻具**，通过**携袋钻进，注浆入袋，袋内固结，抛袋建墙**工艺，可形成28m³的结石体快速构建阻水墙；开发了**“一步法”置换技术**，采用高压射流清淤劈裂注浆**加固**，实现了过水巷道的快速可靠封堵



控制注浆固结体建造装备

保浆袋实物及缝制工艺

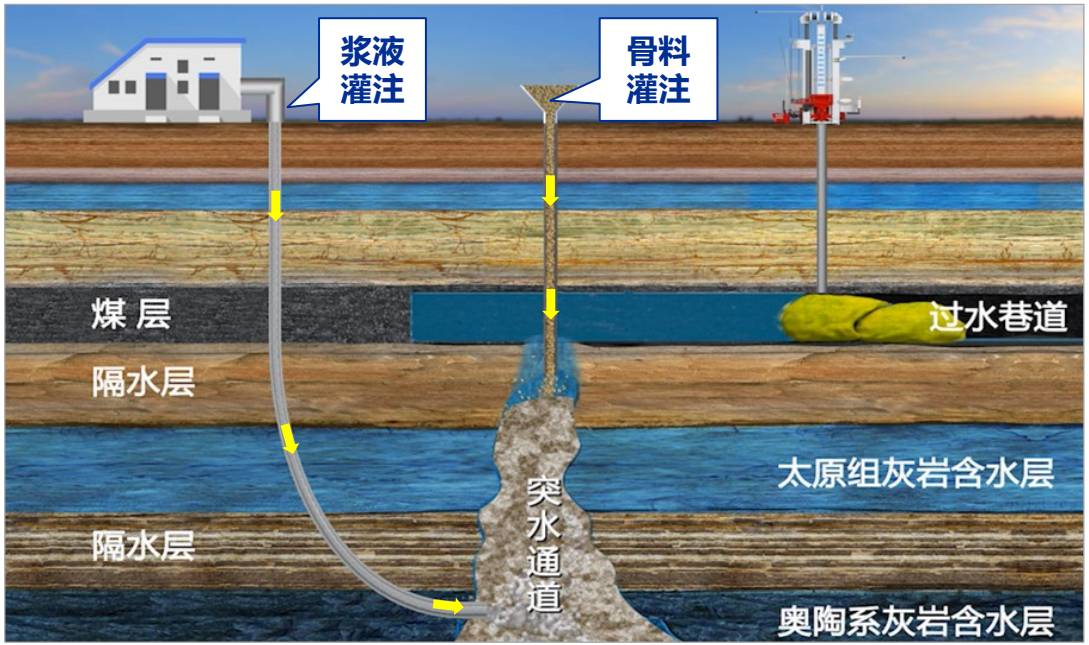


控制注浆固结体建造工艺

3 矿井水灾高效治理技术

突水通道反过滤注浆治理技术

- 过水巷道截流完成后，利用水位恢复过程中突水通道内水压差异特征，开发**浆液-骨料反过滤注浆技术**，彻底根治突水通道



汇报提纲

1 煤矿水害防治背景

2 煤矿水灾超前预防技术

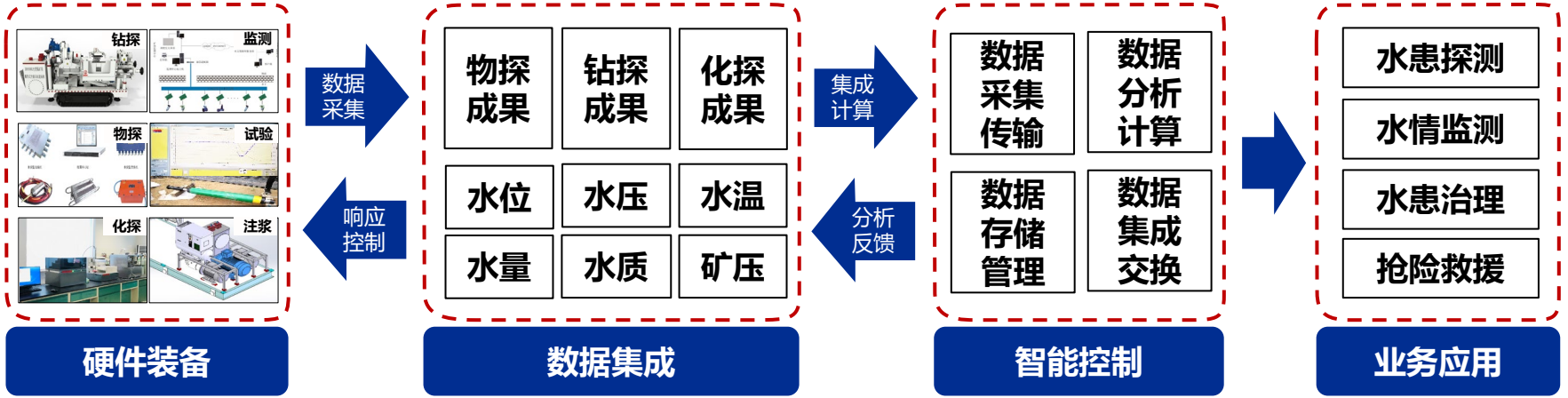
3 矿井水灾高效治理技术

4 煤矿水害防治发展方向

四、水害防治技术发展方向

面向煤矿智能开采的全过程水害智能防控技术

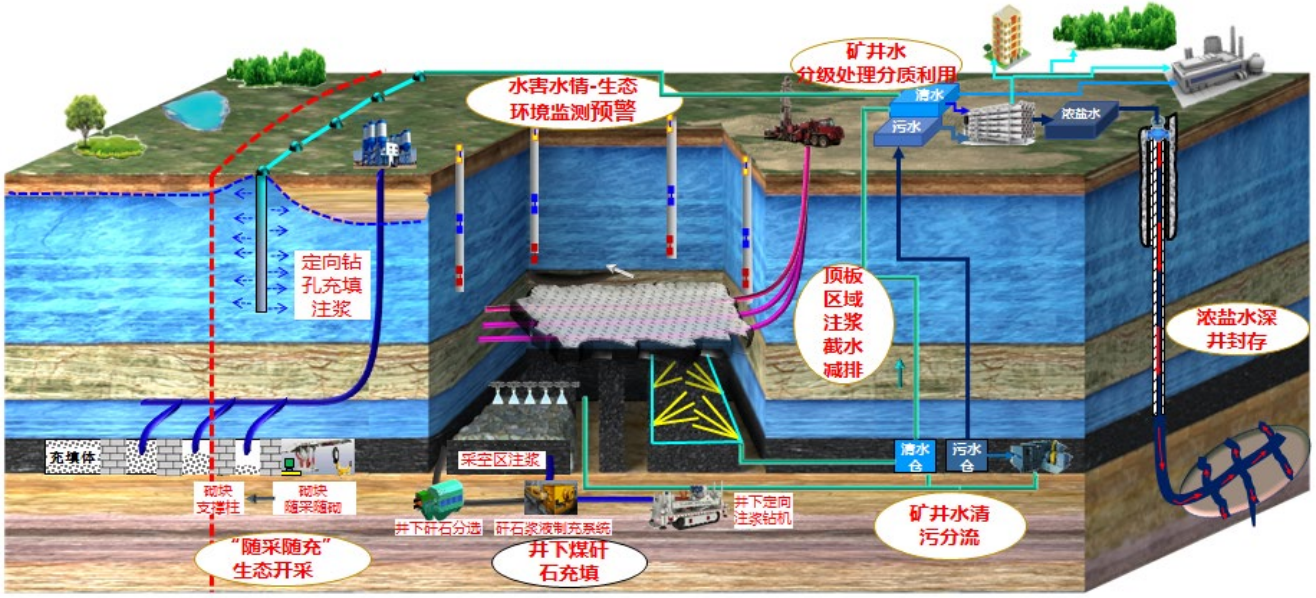
- 水患探测（物探、钻探、化探）**数据实时互联**，自主分析判识致灾因素
- 水情监测（水位、水温、水量）**实时全面感知**，综合评价预测水害危险性
- 水患治理自主学习，**智能分析构建防治方案**，协同控制并动态调整治理方案
- 水灾应急快速响应，**智能处置控制灾害蔓延**，自主制定应急与抢险方案



四、水害防治技术发展方向

面向生态的矿区水保-治-用结合协同技术

- 煤层顶底板含水层侧向帷幕截流减排**保水开采**
- 煤矿采动裂隙控制与修复隔水层再造**减水开采**
- 矿井水资源化井上下综合**分级处置**与**分质利用**



中国煤炭科工集团

感谢各位专家

敬请批评指正！