



# 深部复杂困难巷道围岩控制关键技术及应用

吴拥政

中煤科工开采研究院有限公司

矿山顶板灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室

2025年5月21日



# 目 录

## CONTENTS

### 一、前言

### 二、深部复杂条件巷道特征

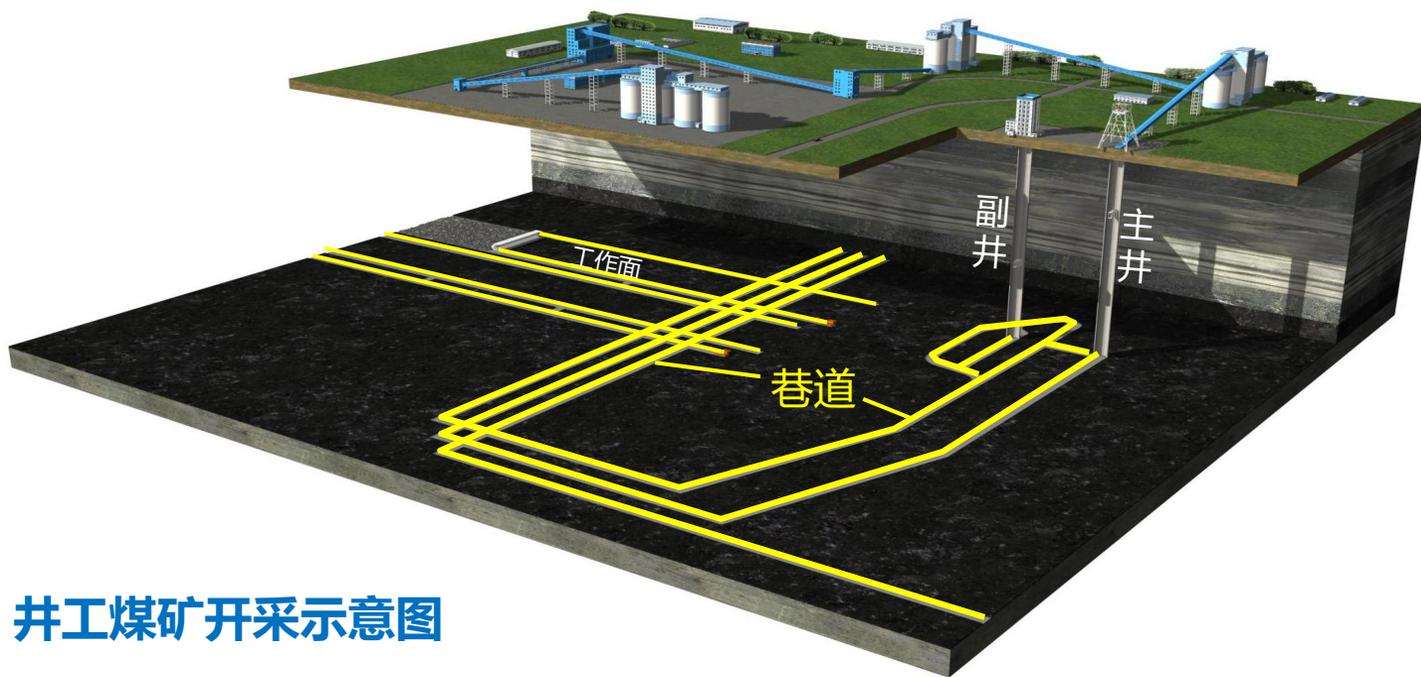
### 三、深部复杂困难巷道控制技术

### 四、应用案例

# 一、前言

## 巷道支护是保障井工煤矿安全、高效生产的关键技术

- 巷道是井工煤矿开采的必要通道。煤矿安全、高效生产取决于巷道畅通与稳定；
- 煤矿新掘巷道长度**13000公里/年**，规模巨大，世界第一。

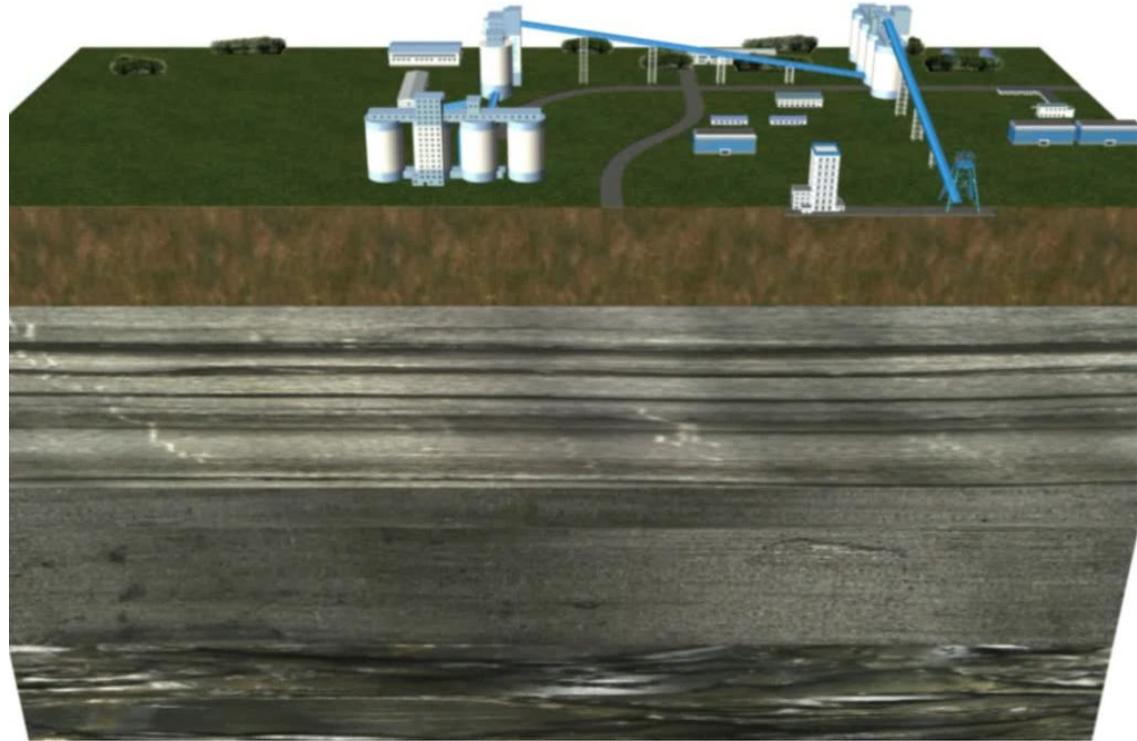


井工煤矿开采示意图

# 一、前言

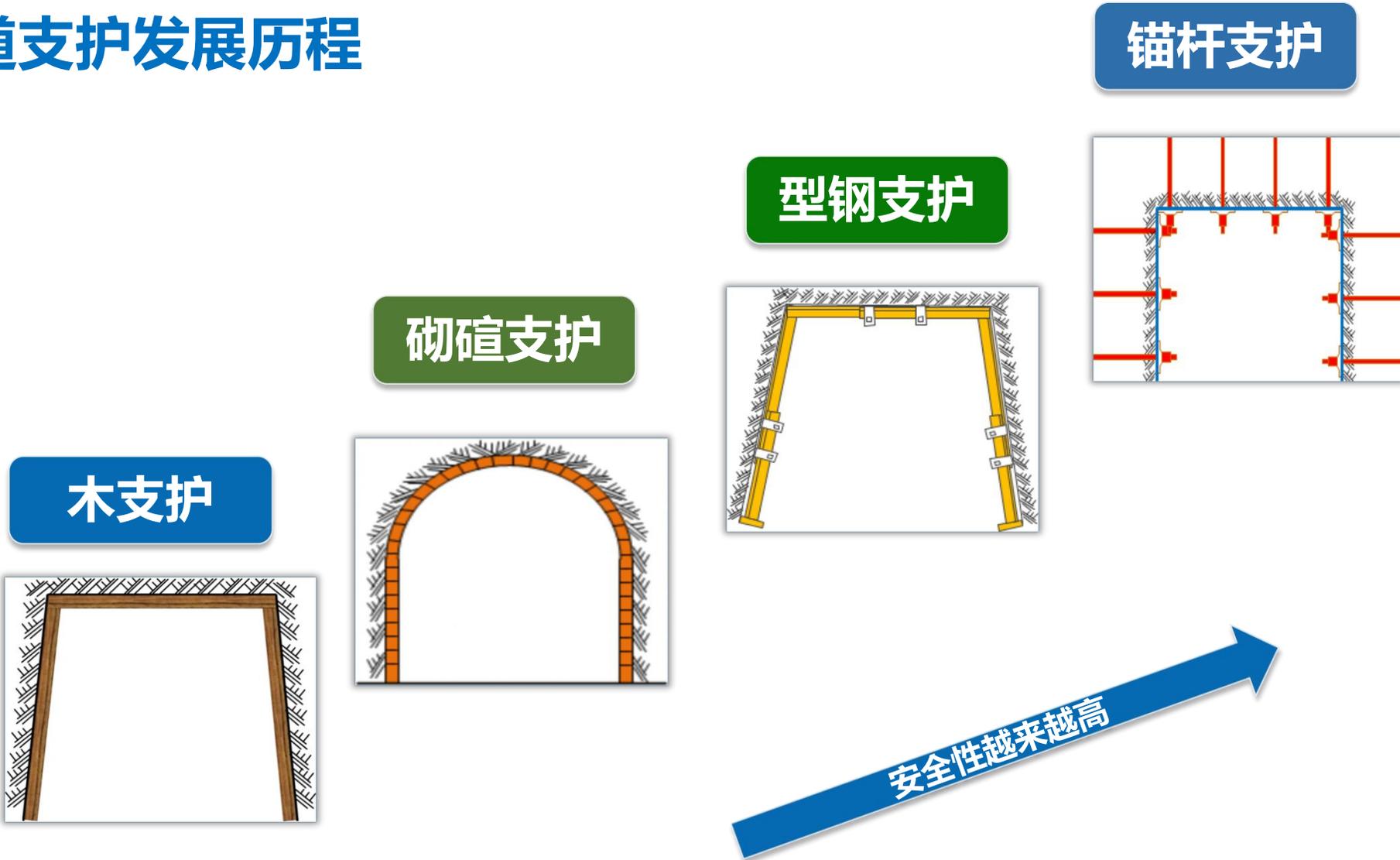
地质条件复杂、煤层松软、埋深大、采动影响强烈

- 最大埋深：  
**1501m;**
- 煤层强度：  
岩石的**1/5;**
- **80%**受采动应力影响, **2-5倍**原岩应力;
- 巷道变形**1-2m**



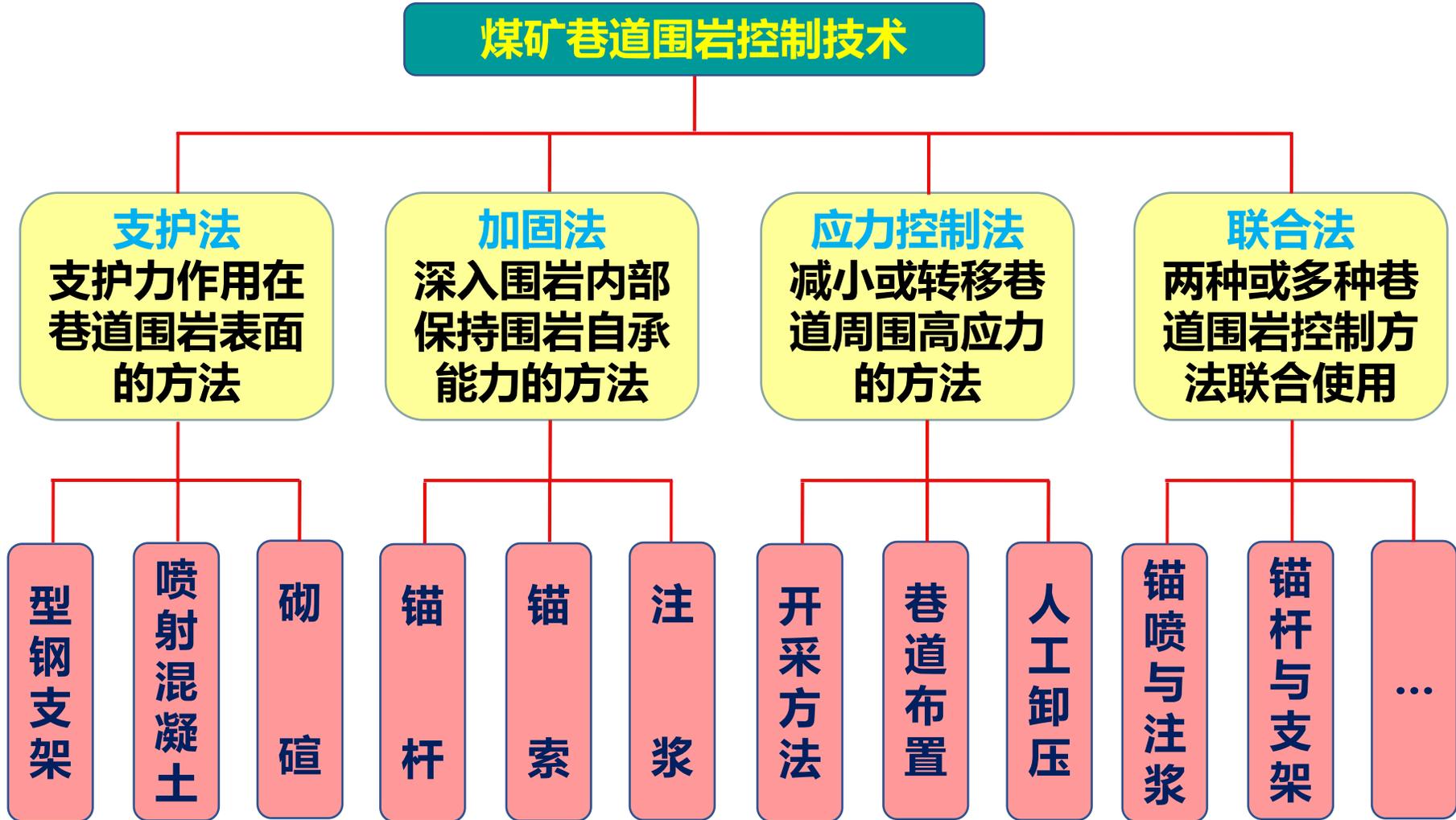
# 一、前言

## 煤矿巷道支护发展历程



# 一、前言

## 提出多种巷道围岩控制技术



# 一、前言

## 目前煤矿巷道围岩控制主要形式

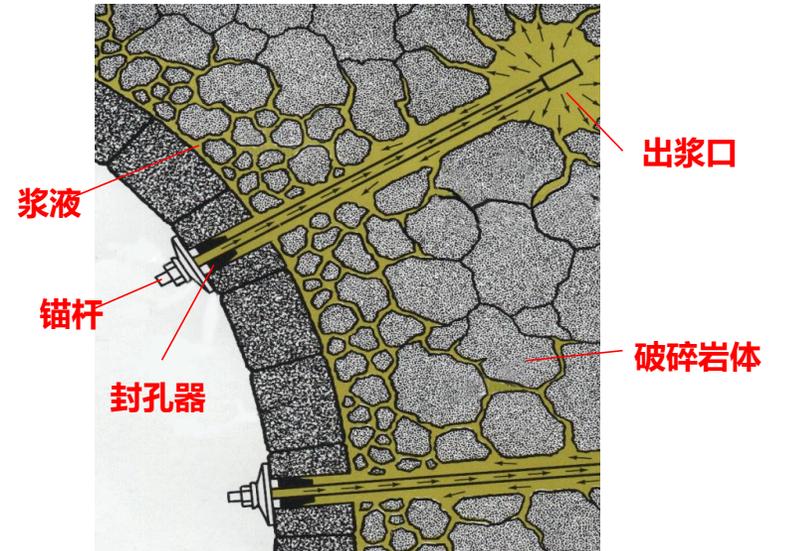
- 锚杆、锚索、锚喷支护。大面积推广应用，总体**80%**，有些矿区**90-100%**；
- 金属支架：工字钢、U型钢支架，钢管混凝土支架等；
- 注浆加固：水泥-水玻璃；高分子材料，复合注浆材料。



新汶协庄矿顺槽锚杆支护



新汶华丰矿大巷金属支架支护



锚杆与注浆加固示意图

# 一、前言

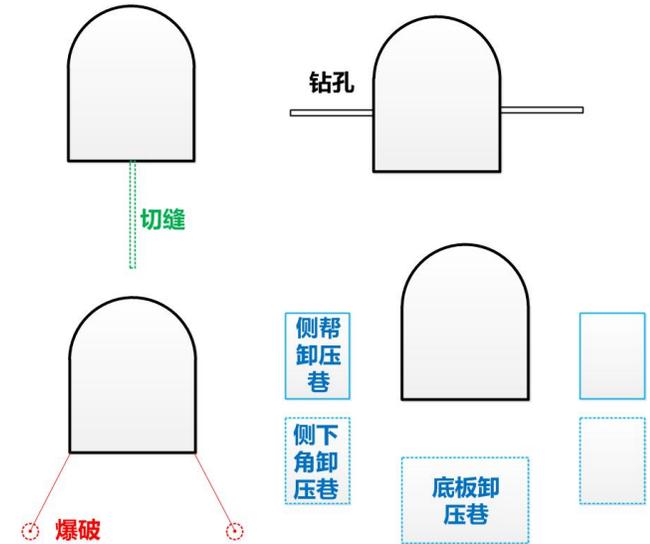
- **复合支护：锚喷+注浆，锚喷+型钢支架，锚喷+混凝土砌碇，锚杆+注浆+型钢支架，锚杆+型钢支架+壁后充填。**
- **卸压技术：高应力、冲击地压巷道，钻孔、切缝、爆破、水力压裂等。**



耿村矿金属支架与锚杆联合支护



口孜东矿金属支架、壁后充填与锚杆联合支护



巷道人工卸压法类型



# 目 录

## CONTENTS

一、前言

**二、深部复杂条件巷道特征**

三、深部复杂困难巷道控制技术

四、应用案例

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 深部复杂条件巷道类型

- 我国煤矿开采深度正以每年10-25米的速度增加，目前**深部**开采的临界深度为600米。
- 深部复杂巷道类型：深部高应力巷道、沿空巷道、留巷巷道、超大断面巷道、强采动巷道、破碎围岩巷道、冲击地压巷道、软岩巷道等。
- GB/T 35056-2018《煤矿巷道锚杆支护技术规范》中对**复杂地段**定义：断层及围岩破碎带、应力集中区、顶板淋水区、裂隙发育区、巷道穿层地段、瓦斯异常区、大断面、大跨度巷道等地段。

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 深部复杂条件巷道特点及对策

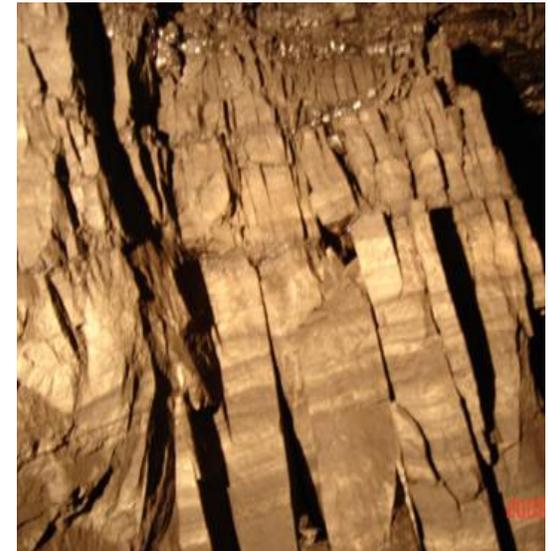
巷道类型	围岩特点	支护形式	典型矿区
软岩巷道	围岩松软，强度低，遇水软化、膨胀	全长锚固锚杆与锚索，喷射混凝土，必要时增设金属支架	平庄、龙口、铁法、淮南、淮北等矿区
破碎围岩巷道	围岩结构面发育，煤岩体破碎、稳定性差	全长锚固锚杆锚索，注浆加固，注浆锚杆锚索，钻锚注锚杆	各矿区断层、褶曲、陷落柱等地质构造破碎带
煤顶或全煤巷道	放顶煤巷道，或四周全部为煤层	高强度预应力锚杆与锚索，全断面锚索	大同、兖州、潞安、晋城、阳泉、华亭等矿区
深部高应力巷道	埋深大，围岩应力高，并伴有冲击地压	高强度、高韧性预应力锚杆锚索，全锚索，金属支架，应力控制	新汶、淄博、徐州、淮南、开滦、义马等矿区
强烈采动影响巷道	受二次多次采动影响，沿空留巷，复用巷道	高强度、高韧性预应力锚杆锚索，全锚索，加强支护，应力控制	工作面多巷布置方式，采用沿空留巷的矿区

## 二、深部复杂条件巷道特征

- 软岩是软、弱、松散、破碎、膨胀、流变、强风化和高应力的岩体统称。
- 软岩大体可分为3种类型
- 第一类：软弱岩体。岩石在自然状态下的强度很低（单轴抗压强度一般**小于30MPa**），遇水软化、膨胀，见风风化，强度进一步降低（黏土岩、泥质岩等）。
- 第二类：破碎岩体，岩块强度并不低，但结构面发育，岩体整体强度低。
- 第三类：高应力岩体。岩块强度并不低，结构面也不发育，只是受到高应力作用，呈现软岩特点。



顶板破碎



巷帮破碎

## 二、深部复杂条件巷道特征

- **软岩巷道围岩变形特征**
- 软岩巷道围岩变形大（米级），时效显著；
- 围岩变形对应力与环境的变化敏感；
- 围岩强度劣化、膨胀、扩容、流变是其变形的典型特征；
- **软弱围岩、高应力、强采动**是大变形的三大主因。



软岩巷道大变形

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 围岩遇水软化、膨胀是黏土岩、泥质岩变形破坏的重要原因

- 含较多黏土矿物的岩石遇水强度大幅降低，甚至泥化失去强度，即使在低应力条件下也会出现大变形。
- 含较多蒙脱石矿物的岩石遇水膨胀、体积显著增加，膨胀后的岩体极易引起强烈底鼓。



巷道剧烈底臃—龙口

## 二、深部复杂条件巷道特征

- 我国埋深1000m以下的煤炭资源非常丰富，主要分布在中东部地区。
- 深部巷道地应力高、采动影响强烈。最大主应力超过40MPa，高于煤层和一些岩石抗压强度。
- 围岩变形与破坏表现为流变性、扩容性和冲击性。
- 巷道开挖后即变形大、持续时间长、稳定性差。
- 受工作面采动影响后，围岩变形破坏加剧。
- 出现冒顶、冲击地压等灾害。

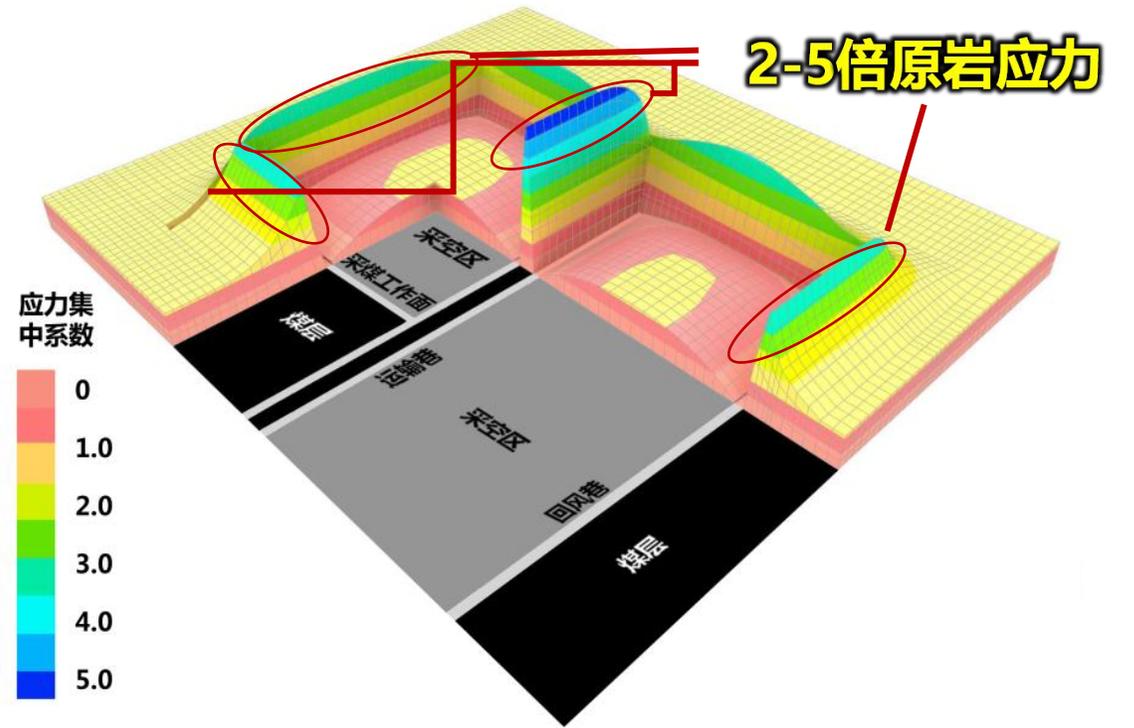


新汶超千米深井巷道变形破坏状况

## 二、深部复杂条件巷道特征

### ● 采动应力

- ✓ 空间上：采动影响范围广，巷道四周变形，顶板下沉、两帮挤出，底鼓强烈。
- ✓ 量值上：围岩大变形，2-3m，甚至更大。
- ✓ 工作面前方、两侧及后方出现高支承压力，两工作面间煤柱支承压力最大，2-5倍原岩应力。

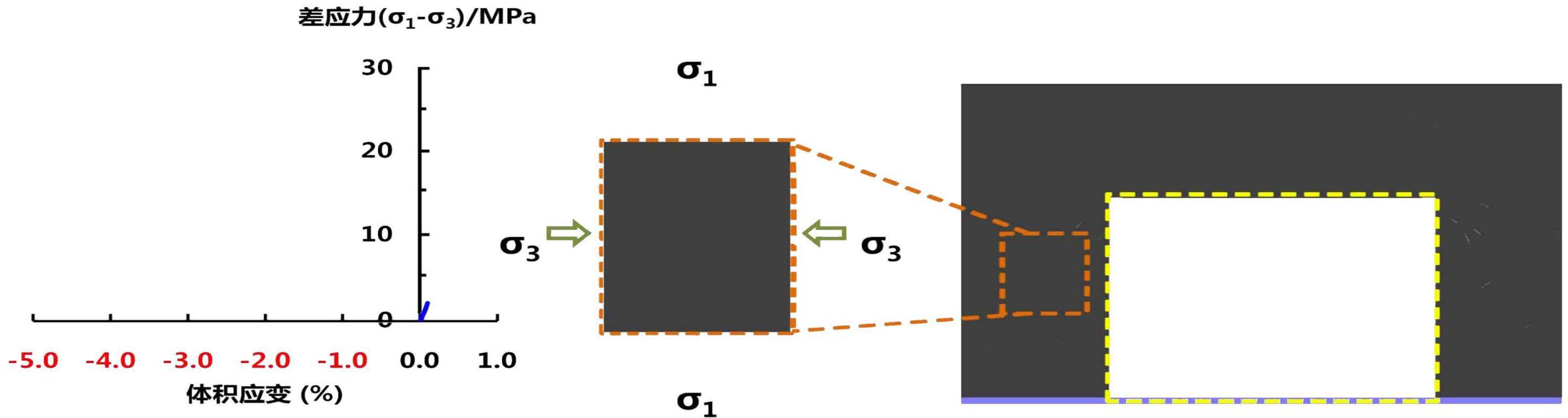


采煤工作面与巷道周围采动应力场分布

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 围岩扩容是巷道大变形的主要原因

- 高应力、强采动诱发高偏应力，高偏应力下岩石发生剪切或拉伸破坏，出现破裂导致岩石体积增加。围岩强度随偏应力增大、时间加长而减小，更容易扩容。



## 二、深部复杂条件巷道特征

- **87%**以上的冲击地压发生在回采巷道中，巷道支护成为防治冲击地压的最后一道防线。
- 深部冲击地压巷道围岩失稳破坏的主要影响因素为**高静载**、冲击应力波产生的**动载荷**及**劣化后的破碎围岩**。

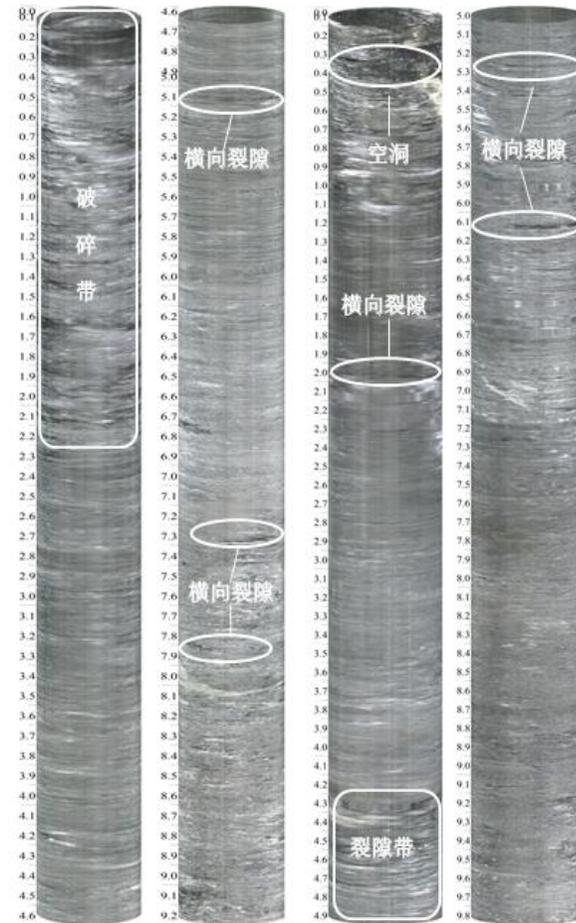


冲击地压巷道变形破坏

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 强冲击载荷下围岩变形破坏特征

- 在发生冲击地压后的巷道中，对冲击破坏后的围岩结构、强度及锚固性能进行了测试。
- 围岩结构：在窥视10m范围内，节理、裂隙、空洞等较为发育，浅部围岩破碎严重，接近碎渣状。节理和裂隙等不连续面的极大发育，弱化了岩层整体强度。



冲击后窥视照片

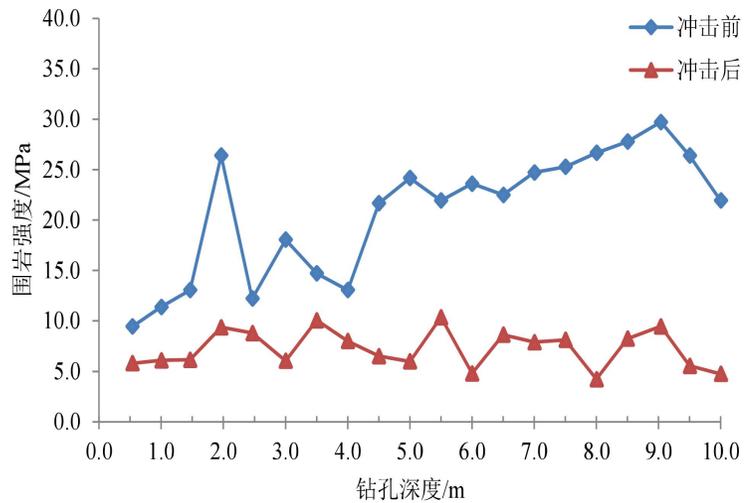


冲击后煤岩体情况

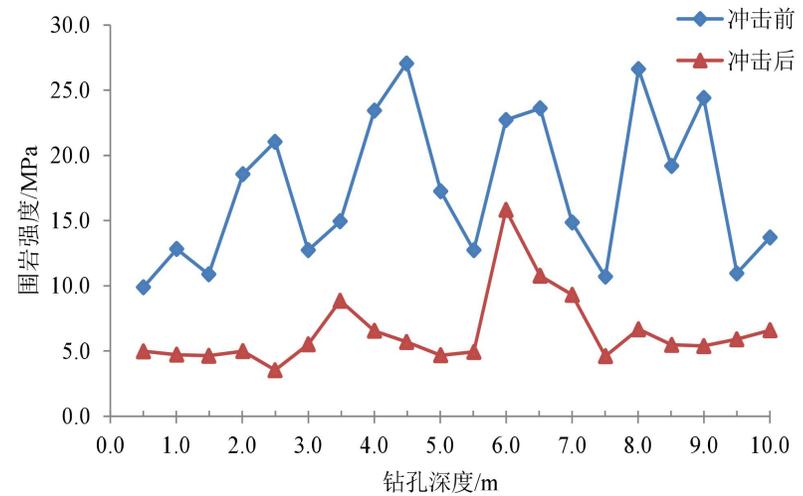
## 二、深部复杂条件巷道特征

### 强冲击载荷下围岩变形破坏特征

- 冲击后顶板泥岩强度平均在7MPa，巷帮煤体强度平均在6MPa；冲击后顶板强度下降**72.9%**，两帮煤体强度下降**59.6%**。



顶板

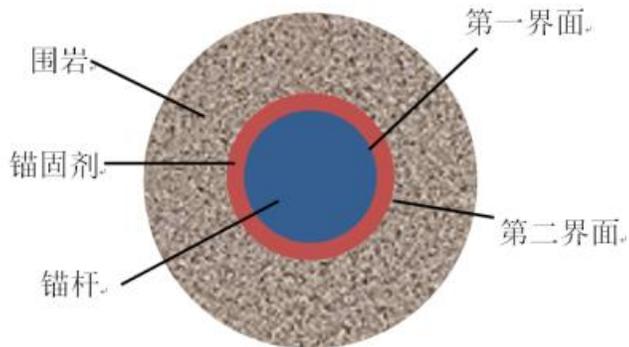


巷帮

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 强冲击载荷下锚固系统劣化

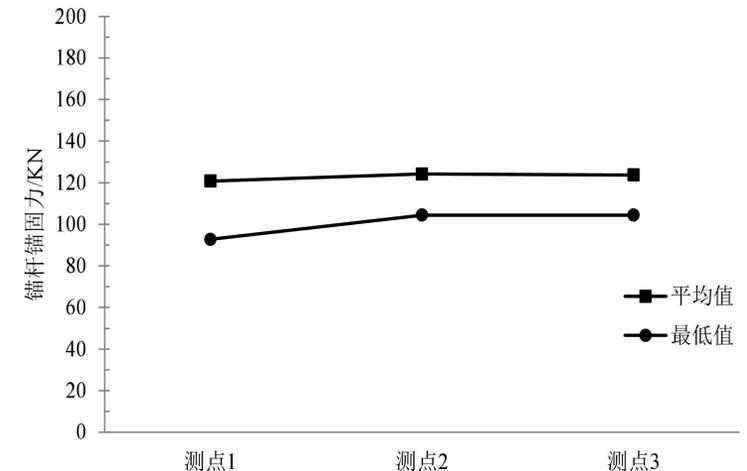
- 冲击地压锚杆支护巷道中，当冲击应力波产生的拉应力超过锚固剂的抗拉强度，则锚固剂会产生裂纹；当拉应力或切应力超过锚固界面的粘结强度，则锚固界面产生**脱黏失稳**。
- 强冲击载荷下锚杆锚固力平均120kN左右，最低值为92.8kN，远低于设计值190kN。



锚固界面示意图



锚固界面损伤失效形式

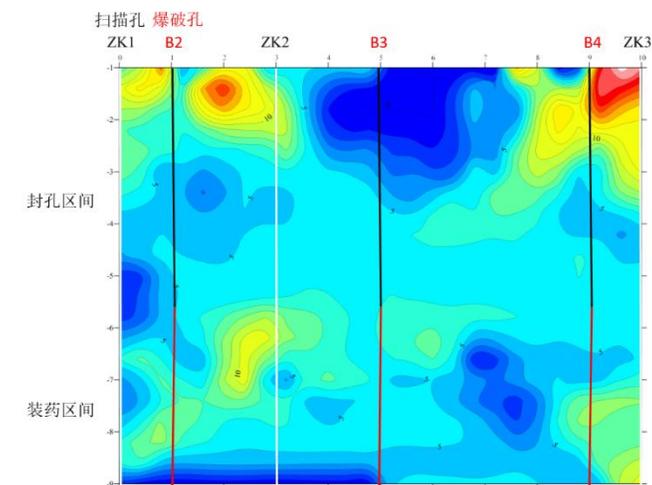
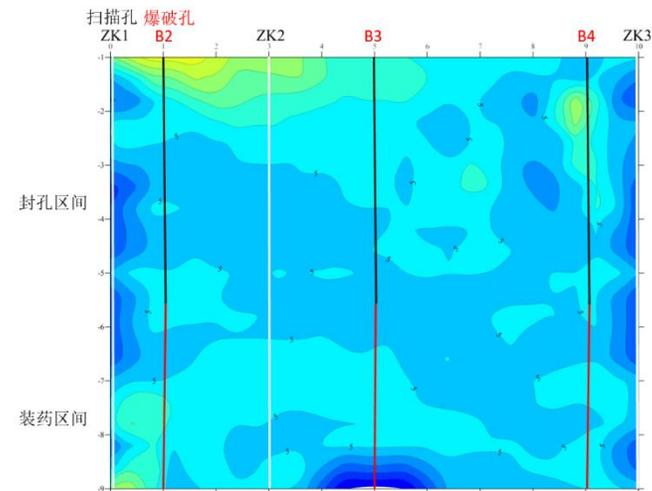


冲击后锚杆锚固力

## 二、深部复杂条件巷道特征

### 强冲击载荷下锚固系统劣化

- 采用CT扫描仪、锚杆拉拔计等设备测试了巷道煤层爆破卸压前后**围岩完整性和锚固性能**。爆破孔直径42mm，距底板2m，垂直巷帮打设，孔深10m，装药量4kg，装药长度4.4m，封孔长度5.6m。锚杆长度2.4m，锚索长度3.5m。
- 卸压后测试区域煤体视吸收系数总体增大，煤体结构较差。
- 爆破前和爆破后锚杆锚固力均达到了190kN，爆破卸压对**锚杆锚固力影响不大**。爆破前锚索平均锚固力为232kN，爆破后平均锚固力为170kN，锚固力降低26.7%。说明爆破卸压**对巷帮锚索锚固力影响明显**。



爆破卸压前后围岩损伤CT扫描结果



# 目 录

## CONTENTS

一、前言

二、深部复杂条件巷道特征

**三、深部复杂困难巷道控制技术**

四、应用案例

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## 深部复杂困难巷道大变形机理

### ■ 巷道特点

- ✓ 围岩强度低、完整性差；
- ✓ 高应力；
- ✓ 强采动。

### ■ 巷道围岩变形形式

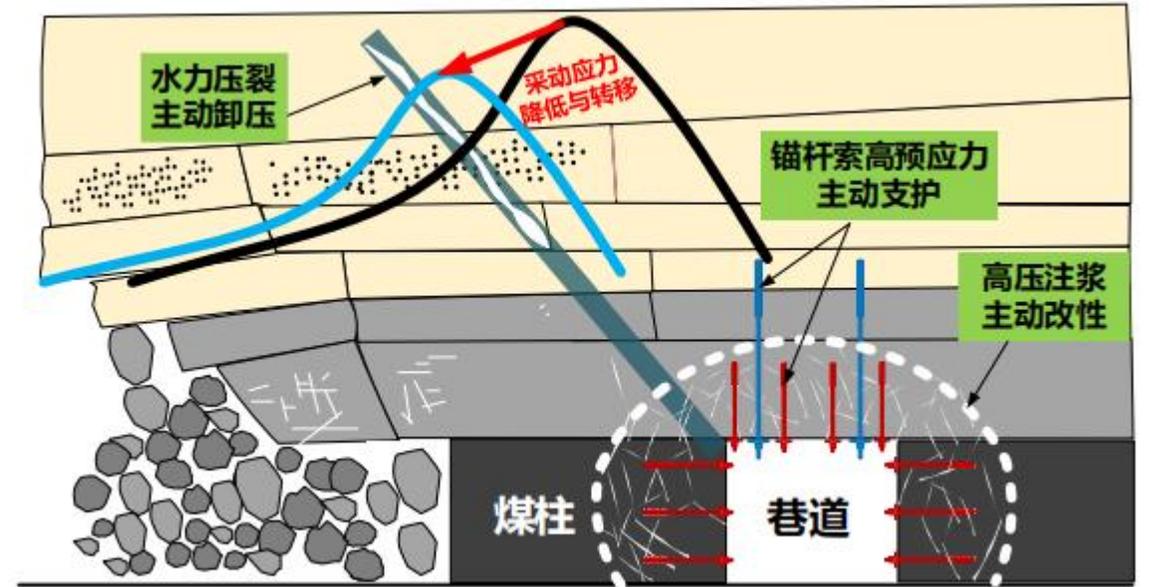
- ✓ 遇水软化与膨胀
- ✓ 偏应力作用下的扩容变形；
- ✓ 强流变；
- ✓ 结构大变形；
- ✓ 冲击变形。

**如何控制？**

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## 巷道支护-改性-卸压时空协同控制原理

- 传统单一支护很难控制软岩巷道大变形
- 支护-改性-卸压协同控制
  - ✓ 首先进行锚杆锚索高预应力主动支护；
  - ✓ 围岩裂隙发育，高压力劈裂注浆主动改性，提高巷道强度、锚固力和完整性；
  - ✓ 完成支护-改性后，选择合理层位，在工作面采动应力升高前卸压，减小侧方悬顶和采空区后方悬顶，降低应力集中程度；
  - ✓ 对于软岩，及时喷浆封闭，防止围岩遇水软化、膨胀及风化极为重要。



巷道支护-改性-卸压协同控制原理

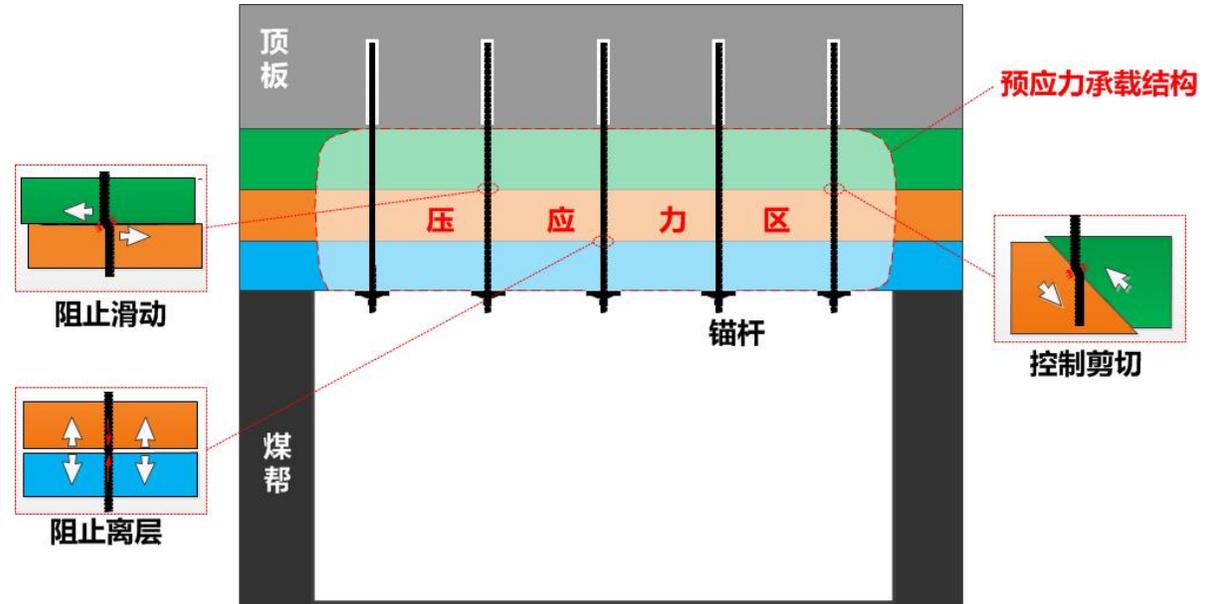
时间协同 } 应力、强度控制 → 变形控制  
空间协同 }

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## 主动支护—高预应力锚杆与锚索支护

### ■ 预应力支护原理

- ✓ 主要作用：减小偏应力，控制围岩不连续、不协调的扩容变形，保持围岩完整性，减小围岩强度降低。在锚固区形成预应力承载结构。
- ✓ 锚杆预应力及其有效扩散起决定性作用；
- ✓ 锚杆支护具有足够延伸率和冲击韧性，使围岩连续变形释放，避免局部破坏。
- ✓ 高预应力高强度锚杆，实现一次支护。

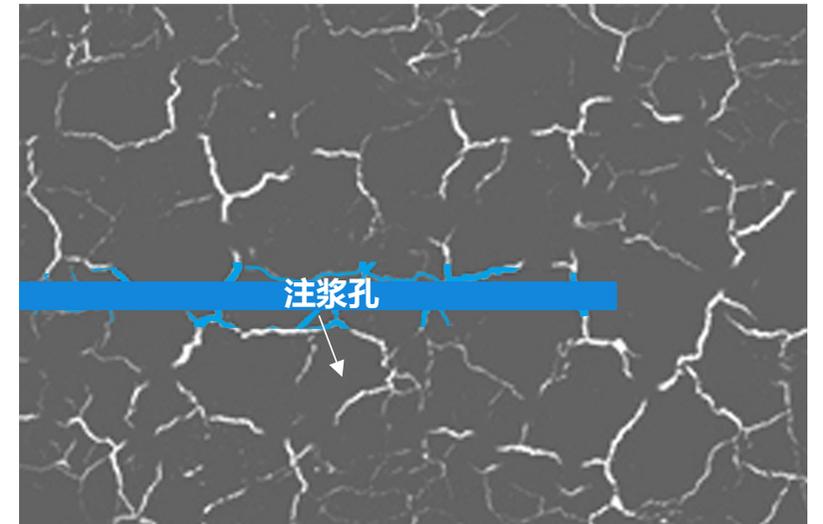


预应力锚杆支护原理图

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## 主动改性-高压劈裂注浆

- 现有无机材料难注入低渗透围岩，有机材料价格高、污染环境。
- 开发高渗透、高强度、高黏结微纳米无机有机复合注浆材料。
- **高渗透**：减小材料粒径；改善浆液对裂隙表面润湿性；劈裂连通孤立裂隙；
- **高强度**：选用快速水化反应矿物材料；掺入促进水化反应的添加剂；减小材料粒径，增加反应面积。
- **高黏结**：改善浆液对裂隙表面润湿性，可进入裂隙表面微观凹凸；浆液与裂隙表面形成化学键作用。

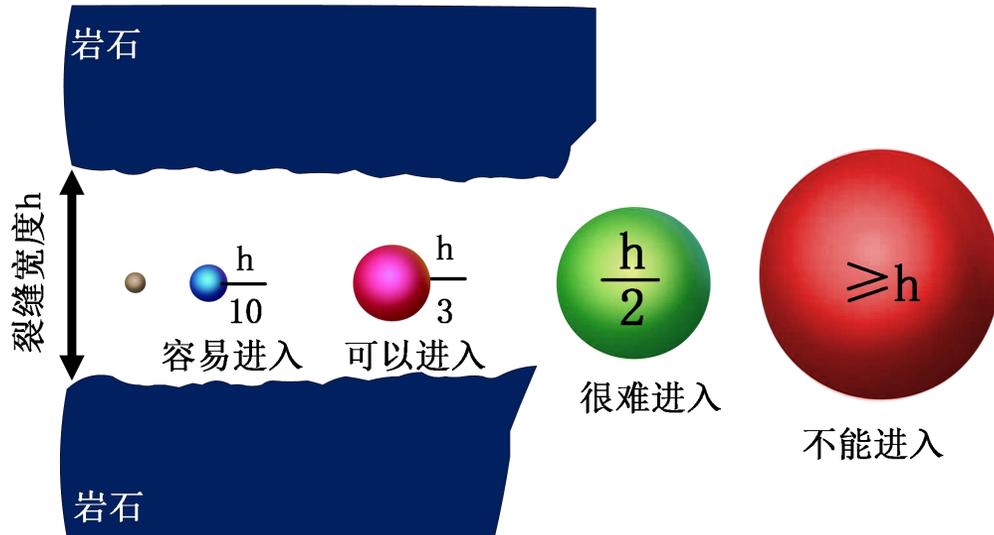


高压劈裂注浆主动改性过程

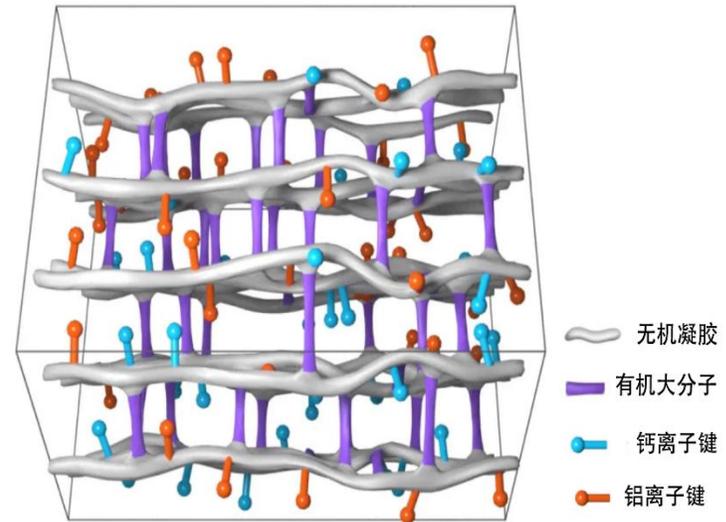
# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 纳米改性复合单液注浆材料（亲岩）

- 无机胶凝材料组分**配比优化**，**超细加工**50 $\mu\text{m}$ 至10 $\mu\text{m}$ 超细颗粒，提高注浆材料**水化程度**、**可注性**；
- 纳米有机粒子增强与原位聚合，形成**有机-无机互穿交织网络结构**，改善物理结构及界面性能，提高抗压、抗折、粘结、抗渗性。
- 与425#普通硅酸盐水泥相比，可注性提高4倍，初凝速度提高6倍，28d抗压强度提高1.7倍，粘结强度提高1倍以上。



注浆颗粒与裂缝大小的关系

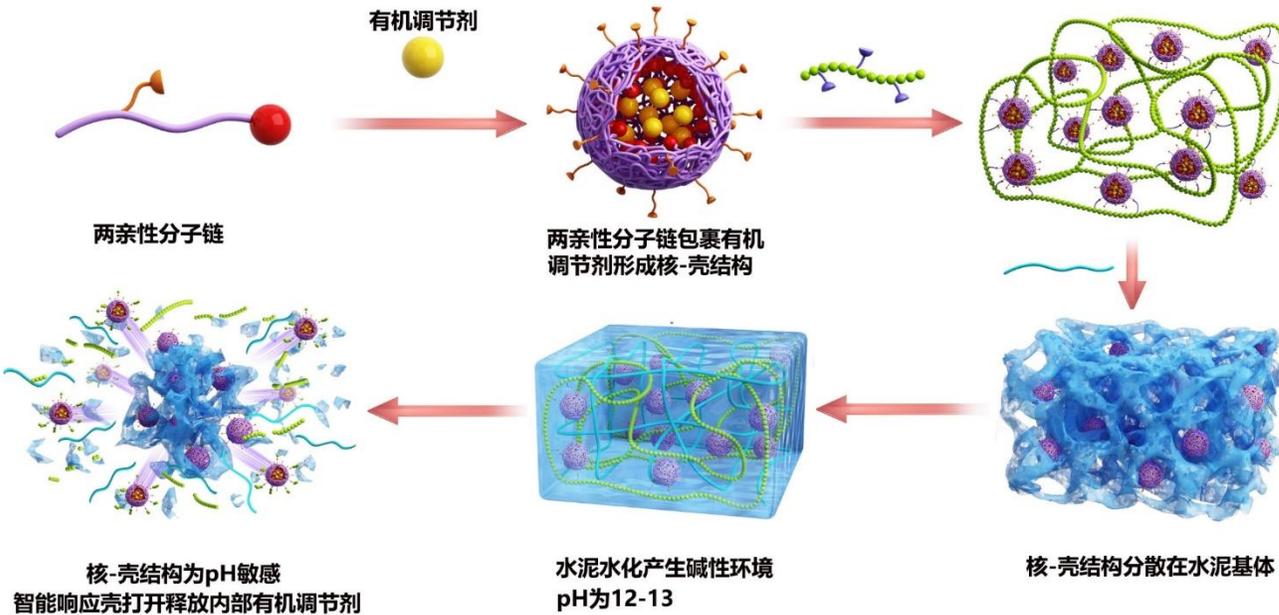


有机-无机互穿交织网络结构

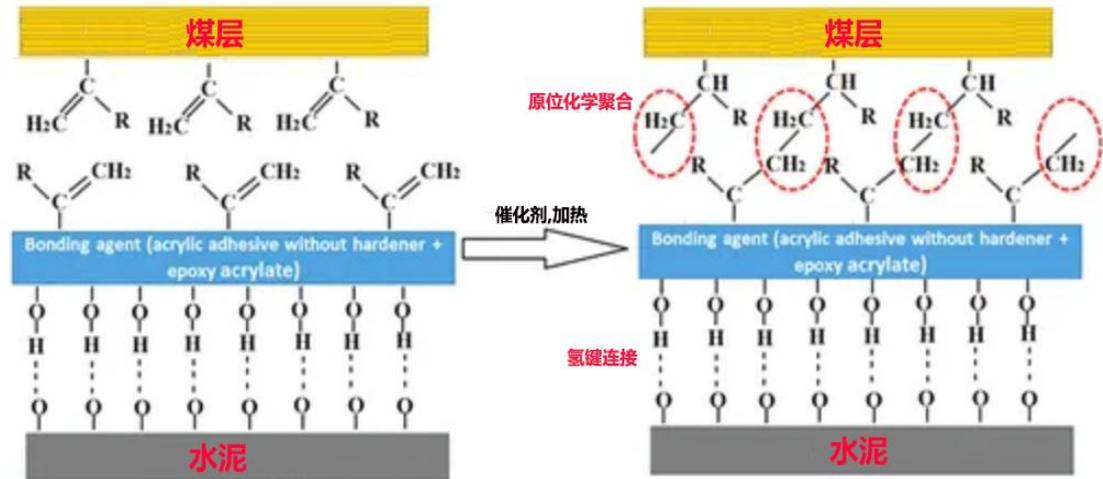
# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 纳米改性复合单液注浆材料（亲煤）

- 与岩体不同，煤体为有机物，传统注浆材料与煤粘不住，有机材料有毒、价格昂贵。
- 通过两亲性分子链的自组装形成壳，包裹调节剂为核，形成pH响应的核壳粒子，当水泥水化产生碱性环境时，智能响应释放有机调节剂；
- 利用无机材料水化过程放热，在煤体界面发生原位聚合形成共价键，提高粘接性。



pH响应的核壳粒子释放过程



原位聚合形成共价键

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 高压劈裂注浆设备与监测

- 研制出高压注浆泵，在气压0.4-0.5MPa，注浆压力**35MPa**，高压液压注浆泵，注浆压力**45MPa**，满足高压劈裂注浆要求；
- 开发了高压多参量（压力、流量、密度）注浆自动监测系统。

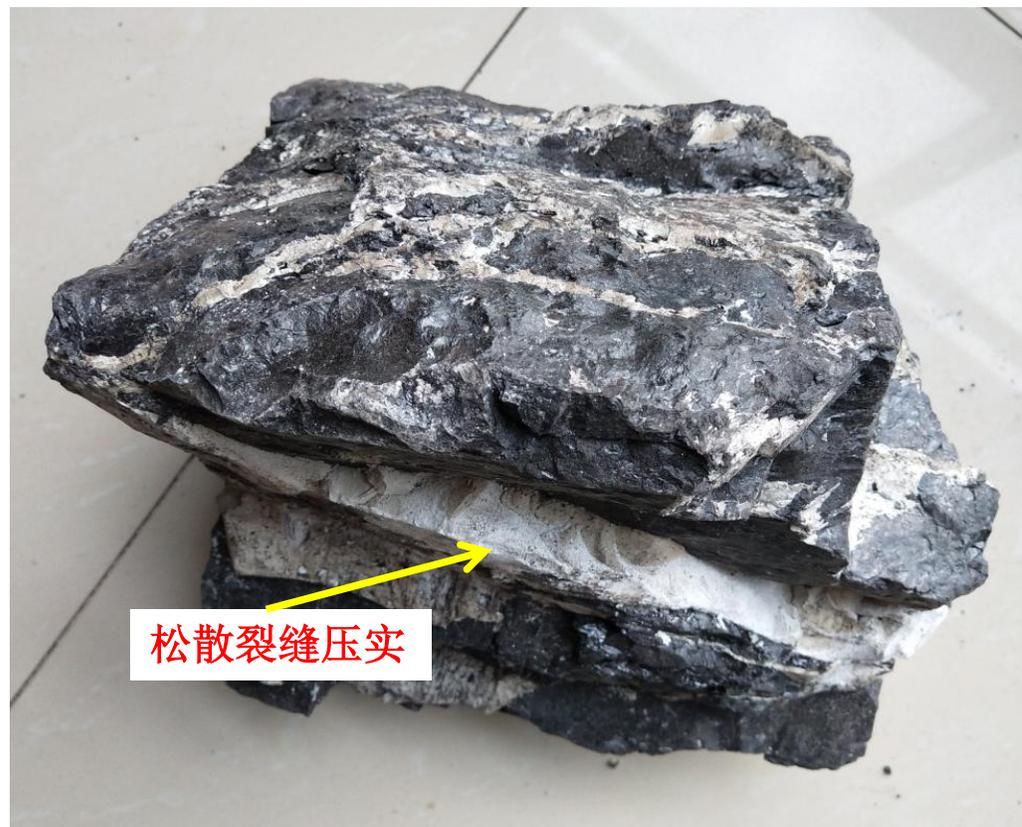
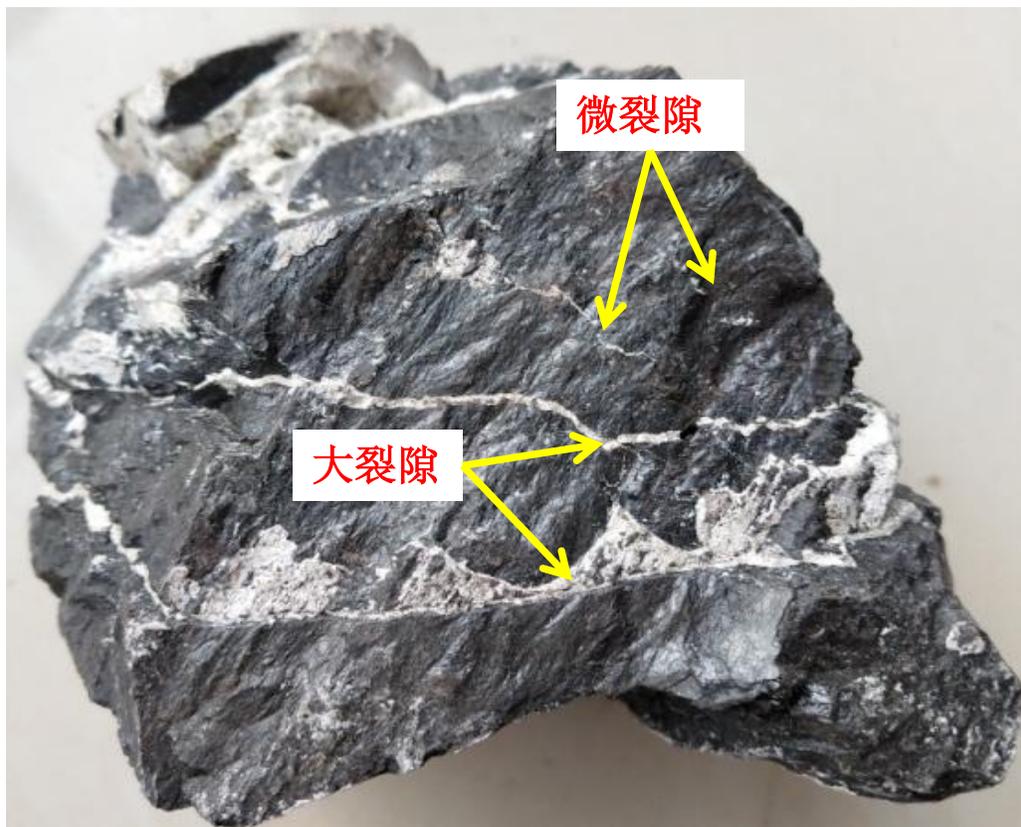


多参量注浆监测系统

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 注浆效果

浆液扩散进煤体中大裂隙和微裂隙，松散煤体存在**压实现象**。

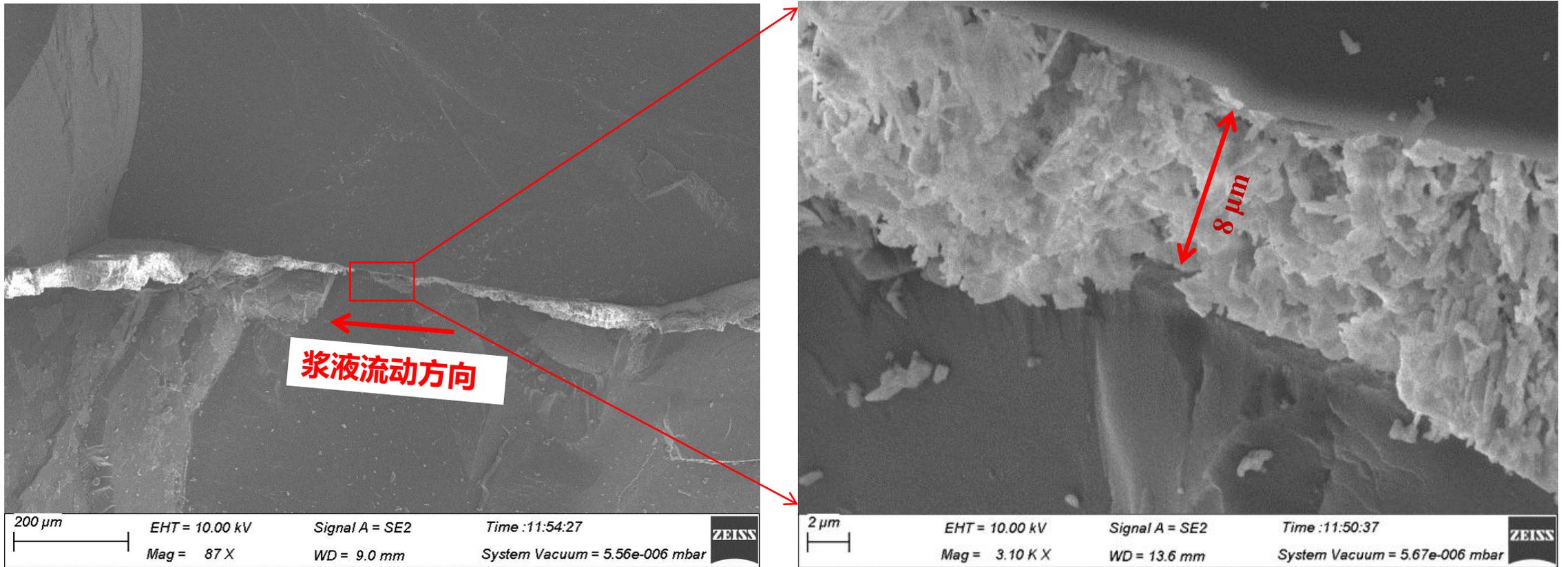


注浆煤样照片

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 注浆效果

扫描电子显微镜观测：浆液可通过并充满小于**10微米**的裂隙。



扫描电子显微镜观测照片

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

## ■ 大吨位高压中空注浆锚索

- ✓ 破断载荷**440-520kN**;
- ✓ 直径**21.8mm**，延伸率**7%**;
- ✓ 一次成孔，封孔位置及长度可调;
- ✓ 封孔压力**25MPa**以上;



## 注浆锚索及其配件

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

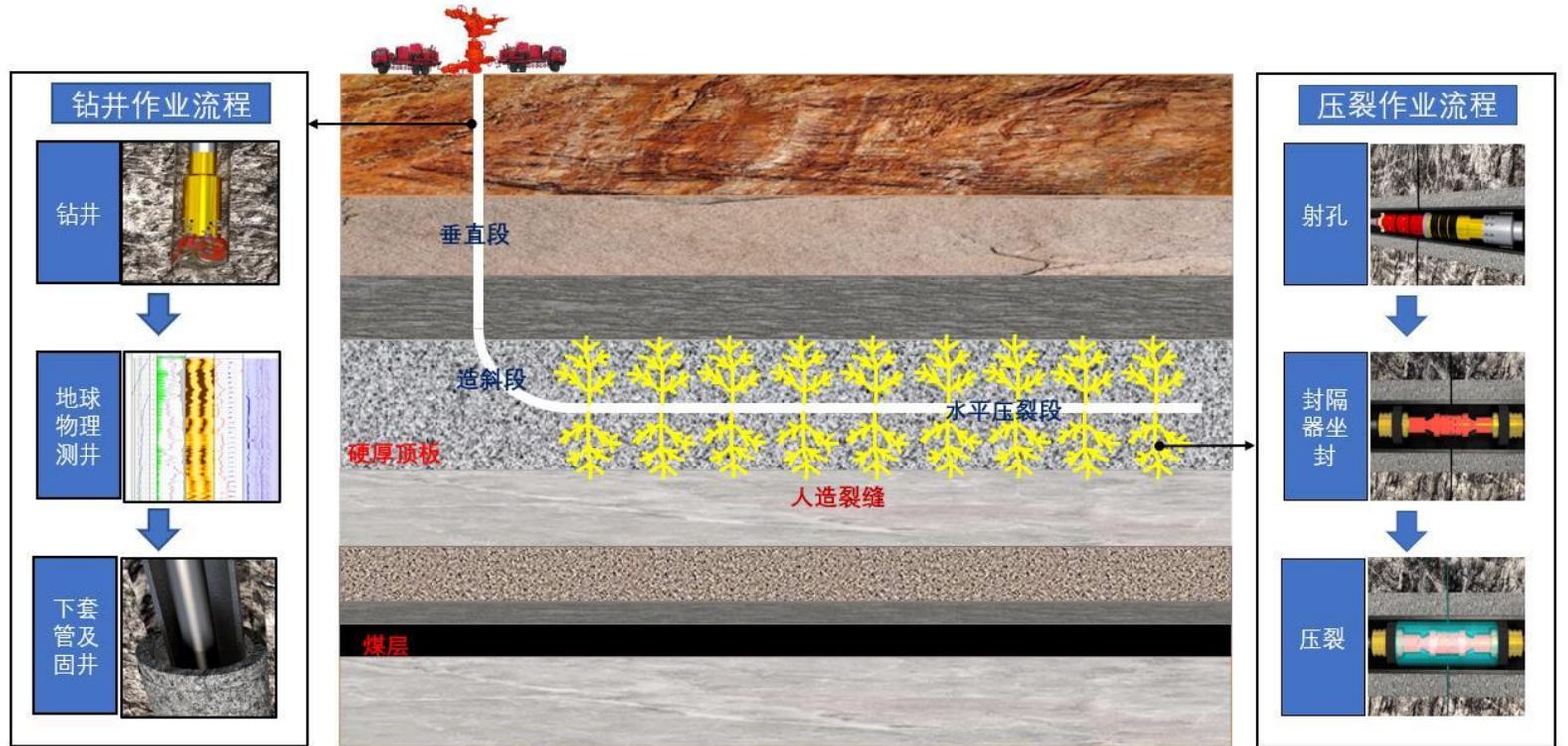
## 主动卸压—高应力、强采动巷道

### ■ 水力压裂卸压

✓ 水力压裂用于采煤工作面坚硬顶板弱化，高应力、强采动巷道围岩控制及冲击地压防治。

### ✓ 水力压裂卸压分类

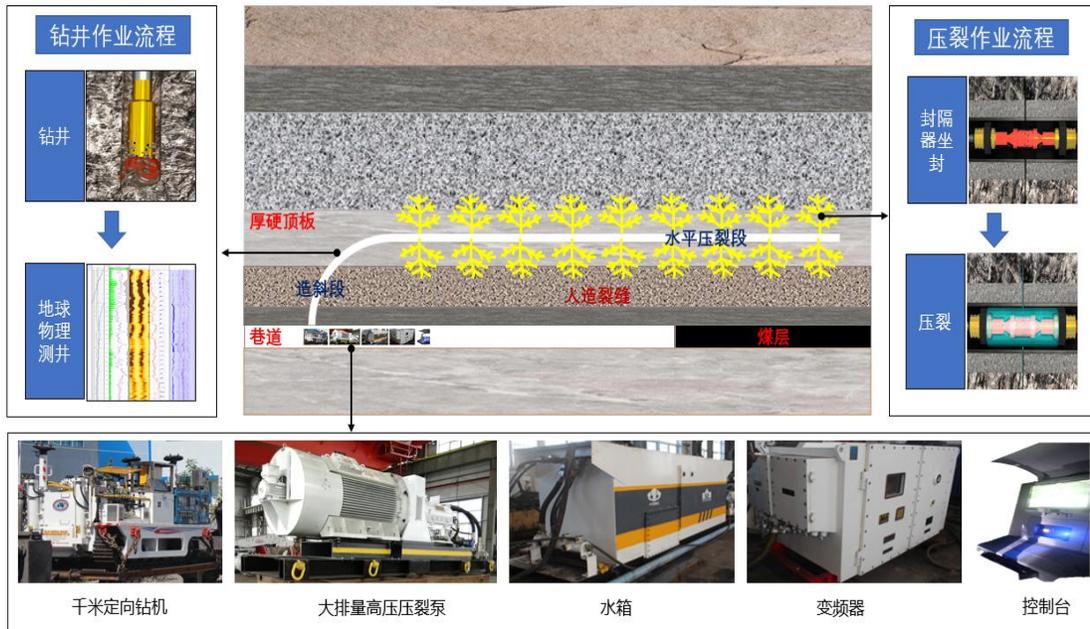
- 实施地点：地面压裂和井下压裂。
- 井下压裂：区域压裂和局部压裂。
- 层位：高位、中位及低位压裂



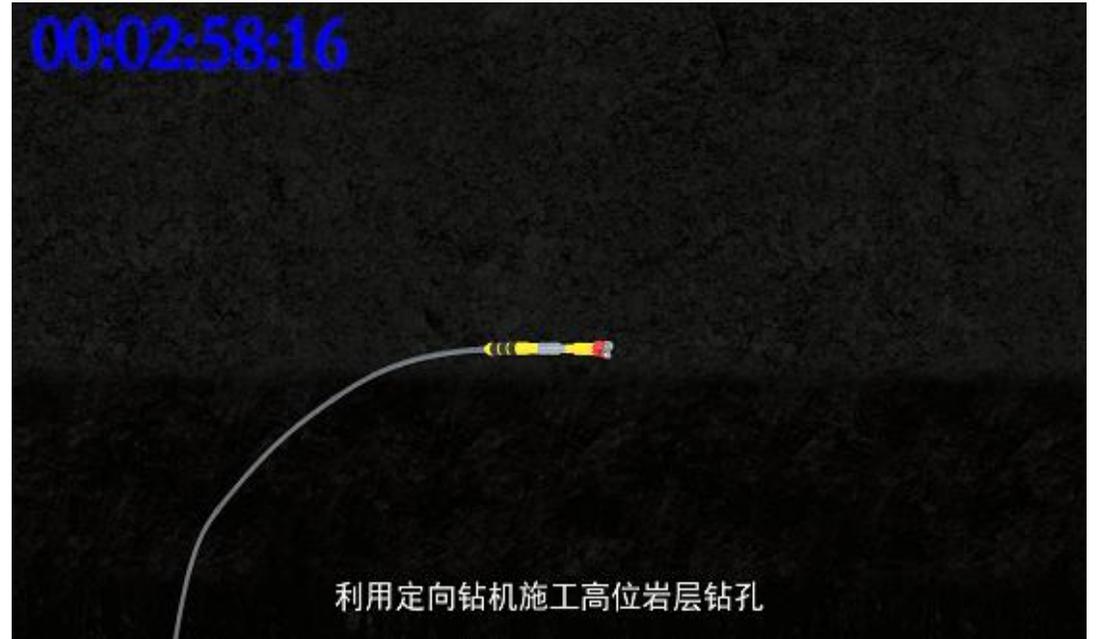
地面大范围体积压裂技术示意图

# 三、深部复杂困难巷道控制技术

- ✓ 井下区域水力压裂技术
- 可实施井下区域压裂，水平段孔长500~800m；
- 处理煤层上方30~80m的上位厚硬顶板；
- 压裂顶板弱化改性，显著降低工作面矿压显现强度。



井下区域压裂技术装备示意图



井下区域压裂卸压施工示意图



# 目 录

## CONTENTS

一、前言

二、深部复杂条件巷道特征

三、深部复杂困难巷道控制技术

**四、应用案例**

## 四、应用案例

---

- **实例1：水致劣化软岩巷道全断面支护-改性-封闭控制技术**  
(宁煤清水营煤矿)
- **实例2：千米深井巷道支护-改性-卸压协同控制技术**  
(中煤新集口孜东煤矿)
- **实例3：强冲矿井临空动压回采巷道控制技术**  
(陕煤彬长胡家河煤矿)

## 四、应用案例-水致劣化软岩巷道



### ■ 弱胶结富水软岩巷道围岩控制技术

- ✓ 清水营煤矿是国家能源集团宁夏煤业公司宁东煤田鸳鸯湖矿区最北部的一个井田，产能500万吨/年。
- ✓ 巷道掘进初期：锚杆拔断、锚索切断、喷层开裂、顶板下沉、帮鼓和底鼓。
- ✓ 由于巷道支护问题解决不了，矿井建井时间长。

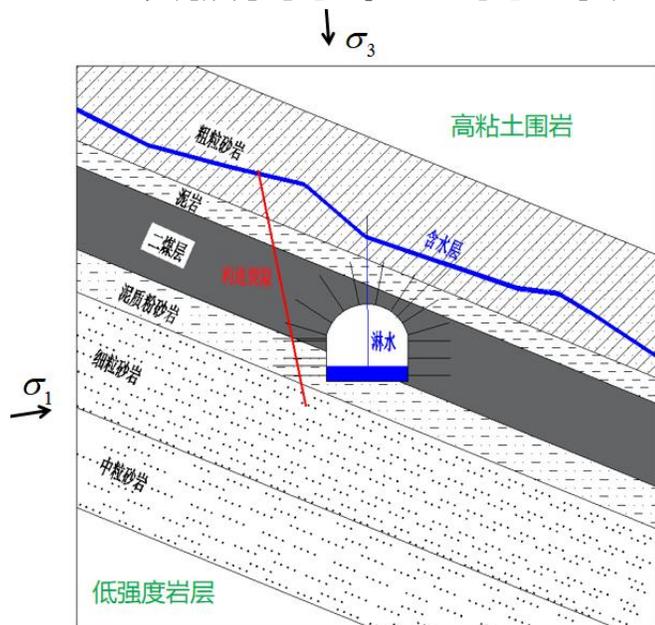


软岩巷道变形破坏状况

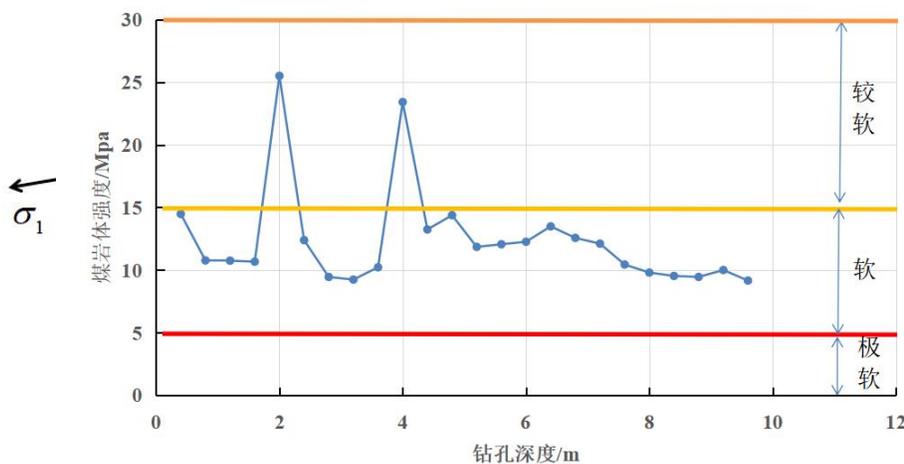
# 四、应用案例-水致劣化软岩巷道

## 实例1：宁煤清水营煤矿110207机巷

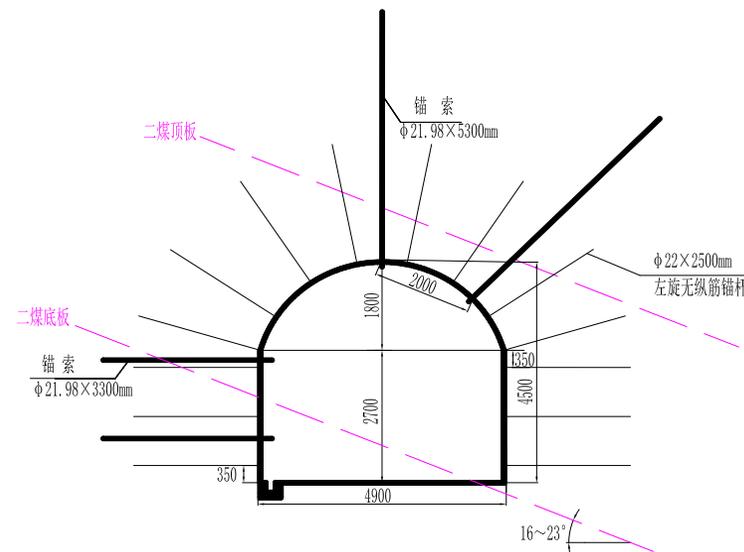
- ✓ 工作面埋深400~500m，一侧与上工作面采空区留设19~25m保护煤柱；
- ✓ 围岩为泥岩、泥质胶结粗粒砂岩，裂隙发育，强度低，抗压强度小于15MPa，且富含高岭石、蒙皂石等粘土矿物，遇水易泥化、膨胀；
- ✓ 顶板含水，巷内出现淋滴水，原支护锚网带索喷支护方式，巷道断面5.5m×3.8m。



巷道掘进层位分布



顶板围岩强度曲线

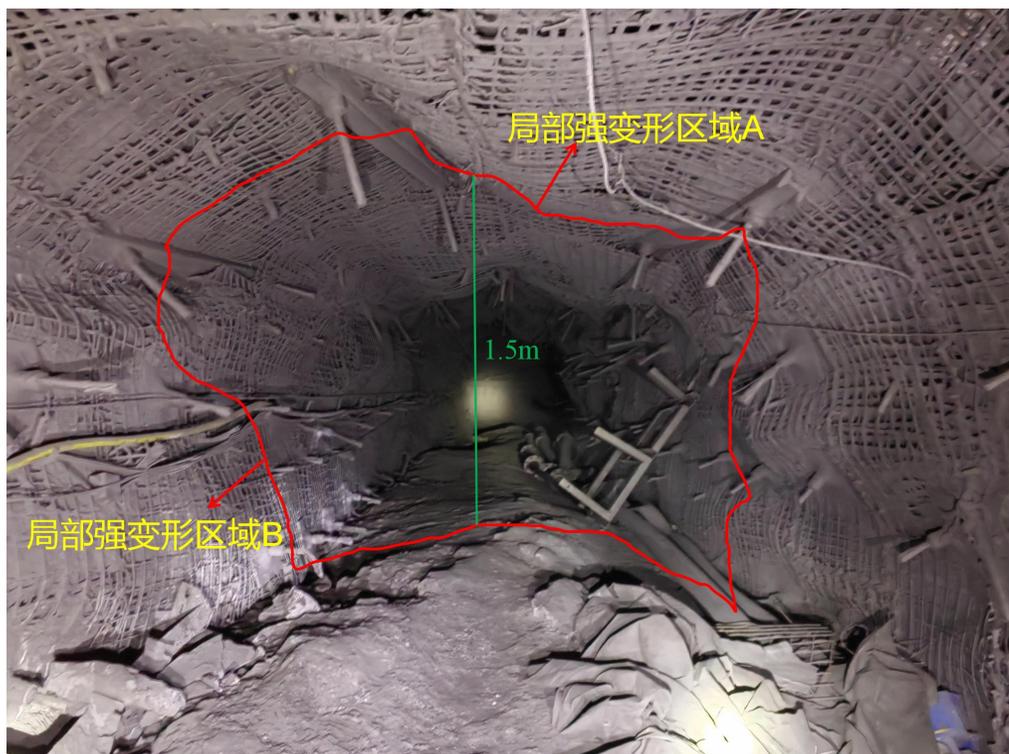


原支护形式及参数

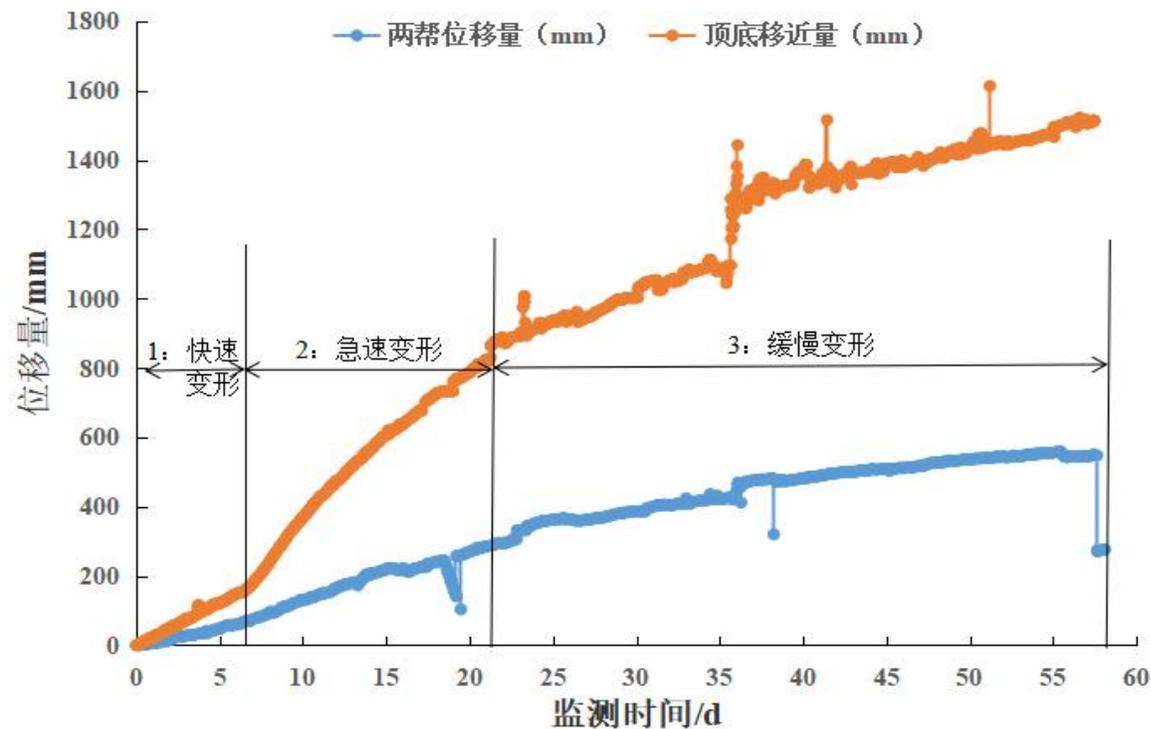
## 四、应用案例-水致劣化软岩巷道

### ■ 巷道变形情况

- ✓ 空间上呈全断面整体大变形，断面收缩率**超过70%**；
- ✓ 时间上呈短期即大变形，且长期不能稳定。



巷道变形实景

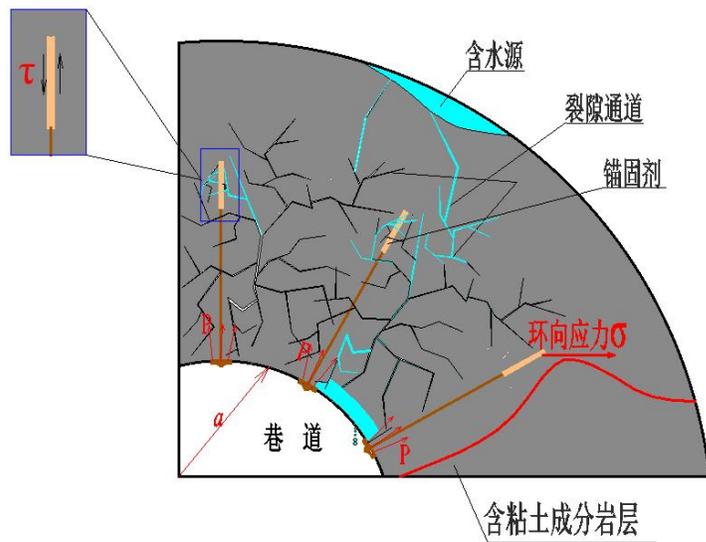


围岩变形监测曲线

## 四、应用案例-水致劣化软岩巷道

### ■ 巷道变形机理分析

- ✓ 围岩强度低，承载力弱：顶底板岩性软弱， $< 15\text{MPa}$ ，强度应力比低；煤体强度 $< 10\text{MPa}$ 。
- ✓ 围岩水致劣化效应明显：顶底板粘土矿物含量高，以高岭石、伊蒙混层为主，极易风化、劣化。
- ✓ 顶板弱含水，巷内淋滴水普遍，加速围岩劣化。
- ✓ 锚固效果差：现场测试锚索锚固不合格率达到20%，与围岩软、三径不匹配有关。
- ✓ 预应力低、扩散效果差：部分锚杆预应力低于 $20\text{kN}$ ，锚索低于 $70\text{kN}$ ，护表构件面积小。



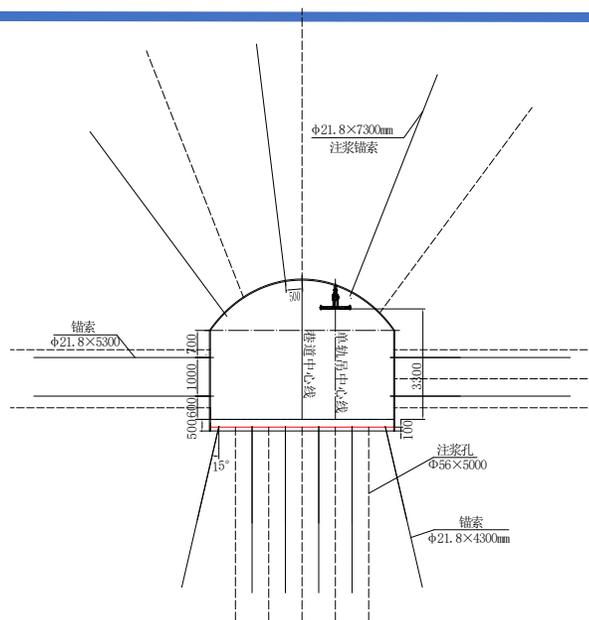
围岩劣化示意图

巷道变形段

## 四、应用案例-水致劣化软岩巷道

### ■ 巷道变形控制方法

- ✓ 控制原则：及时封闭，“控顶、固帮、强底”全断面支护
- ✓ 控制方法：高预应力强力锚索基本支护+喷浆封闭+注浆
- ✓ 控制要点：
  - 预注浆阻隔淋水
  - 高预应力注浆锚索全长锚固
  - 底板注浆及高预应力锚索支护
  - 喷浆封闭



巷道支护设计及参数



开发的注浆锚索锁具



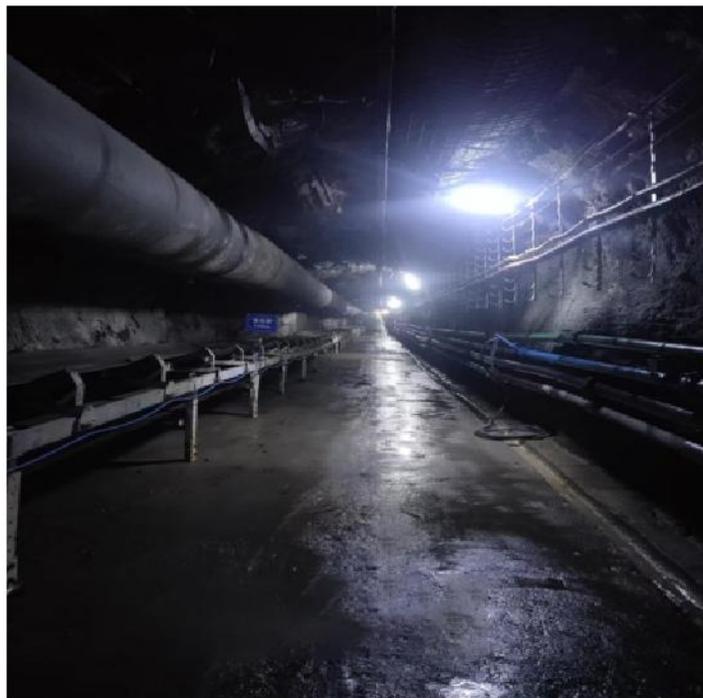
锚索增阻装置



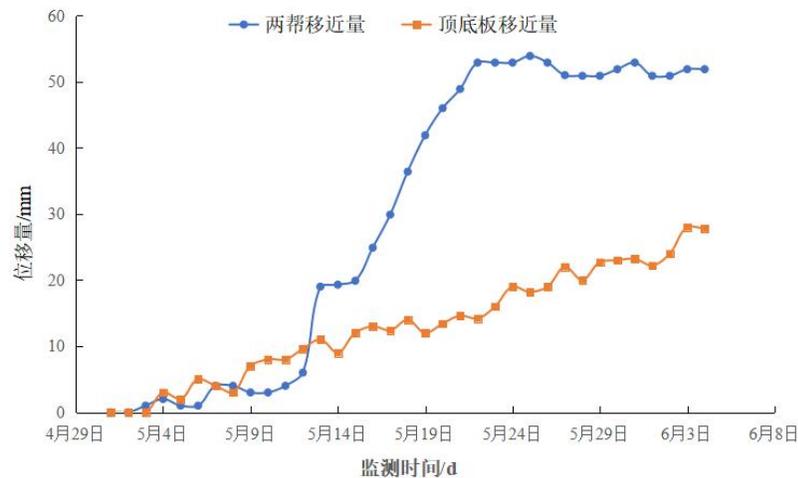
软岩专用防水锚固剂

# 四、应用案例-水致劣化软岩巷道

## ■ 控制效果



锚索受力监测



巷道变形监测

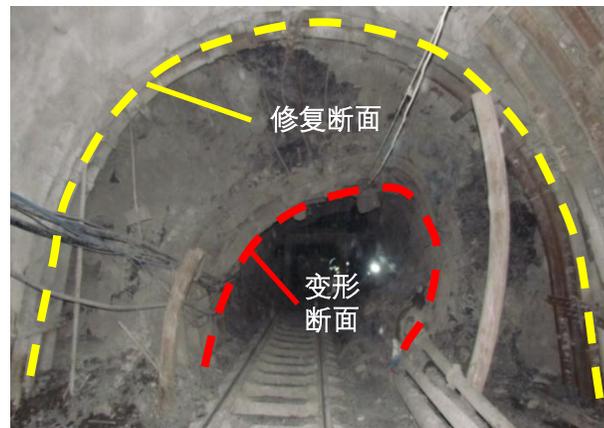
✓ 围岩变形趋于稳定，锚索受力稳定、巷道变形量减少

80%以上。

## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

### ■ 典型煤矿-淮南新集口孜东矿

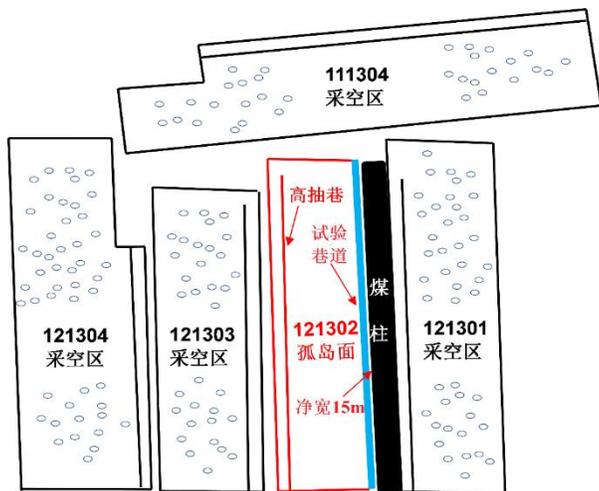
- ✓ **高地应力**，埋深大，开采深度达到1000m，地应力高，最大应力24.94MPa。
- ✓ **强采动**，采高5m，工作面长，采动影响强烈，采动范围150m以上。
- ✓ **大变形**，持续变形，锚固结构整体移近，累计底鼓6m，帮移近4m。
- ✓ 围岩松软，遇风、水强度劣化严重。
- ✓ 前掘后修、边掘边修，巷道失修率达60%。
- ✓ 巨厚松散层591m、软岩，岩层以泥岩为主，煤层松软破碎，强度低。



口孜东矿深井软岩巷道变形破坏状况

## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

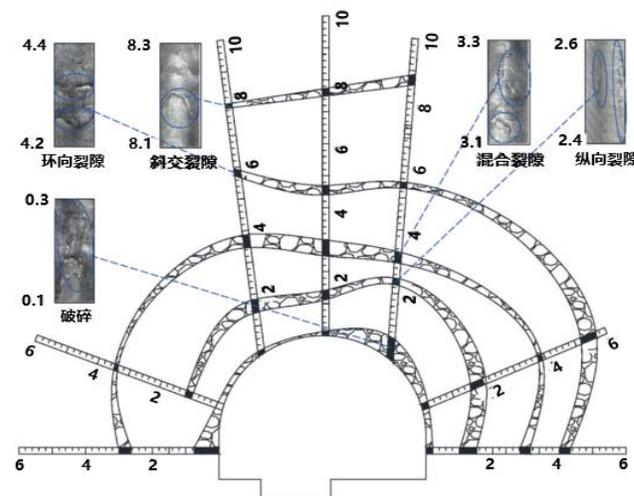
- 121302工作面，开采13-1煤层，平均厚度4.9m，埋深1000m，工作面长350m。试验点为运输巷。运输巷距采空区煤柱宽度15m。原支护采用锚网索支护+喷浆+滞后注浆联合控制方案，巷道变形严重，大量锚杆、锚索破断，钢带撕裂、托板压翻。
- 煤层强度10MPa，顶底板均以泥岩、砂质泥岩等软岩为主，强度37.7MPa，顶板37.1~45.3m存在8.2m坚硬细砂岩，强度91MPa。存在环向、斜交、复合等多种裂隙，粘土矿物占总矿物含量60%左右。煤帮锚固力低，工作面帮锚杆锚固力86kN，煤柱帮仅20kN。



工作面及试验巷道平面图

岩性	厚度/m	顶底板累计厚度/m
细砂岩	8.2	45.3
砂质泥岩与泥岩互层	15	37.1
细砂岩与砂质泥岩互层	11.7	22.1
泥岩与砂质泥岩互层	10.4	10.4
13-1煤层	4.9	4.9
泥岩	5.5	5.5
砂质泥岩与泥岩互层	21.6	27.1
细砂岩	5.1	32.2

顶底板岩层分布

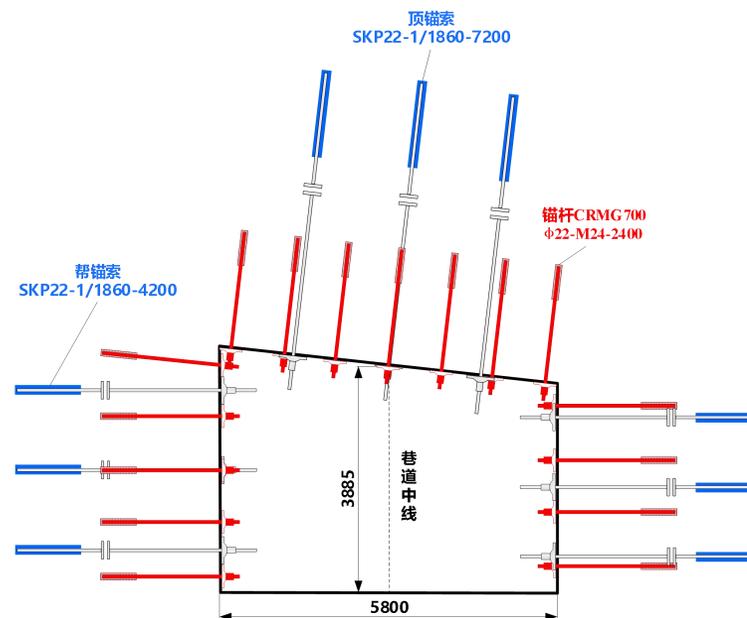


图中数字为钻孔窥视仪测量的深度（或者是钻孔深度），m

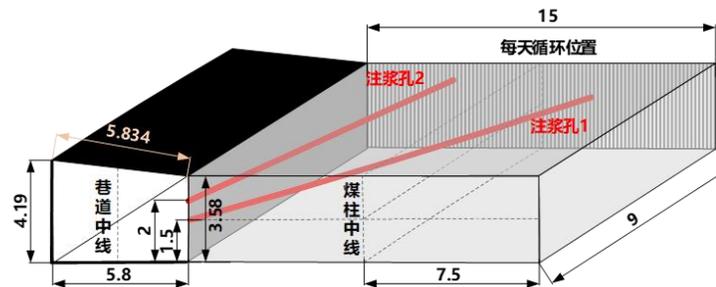
巷道全断面窥视图

## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

- ✓ 高预应力锚杆支护—高压劈裂注浆改性—水力压裂卸压。
- ✓ 700号超高强度锚杆，直径22mm、长2.4m，预紧扭矩500N.m；锚索直径22mm，预应力300kN。
- ✓ 高压劈裂注浆：煤柱侧超前注浆，微纳米无机有机复合材料，高压劈裂注浆。



口孜东矿巷道锚杆锚索支护布置图



口孜东矿巷道超前注浆孔布置图

## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

### ■ 主动改性—注浆

- ✓ 超前、高压劈裂注浆，解决注不进、粘不住问题；
- ✓ 提高煤体强度、完整性及锚杆锚固力；控制巷帮变形，提高巷帮对顶板支撑能力。
- ✓ 煤柱侧帮注浆后，锚杆拉拔力提高2倍左右，大幅提高了破碎煤柱的可锚性。

注浆前后煤柱侧帮锚杆拉拔力测试结果

	拉拔位置	锚固剂用量	拉拔力/kN
注浆加固前	煤柱侧帮，距工作面8m	2支MSK2350	47
注浆加固后	支护-改性-卸压试验段	2支MSK2350	140
	支护-改性-卸压试验段	2支MSK2350	150
	支护-改性-卸压试验段	2支MSK2350	140

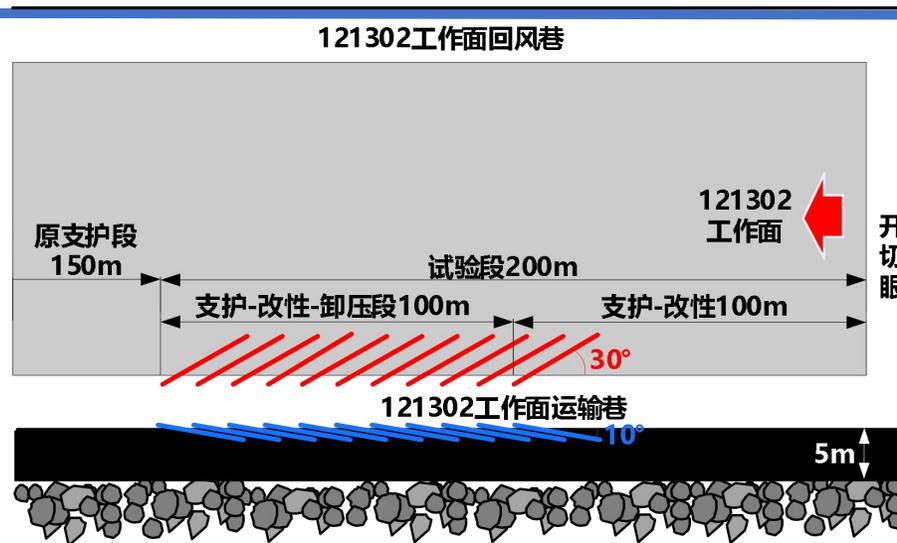
## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

✓ 水力压裂

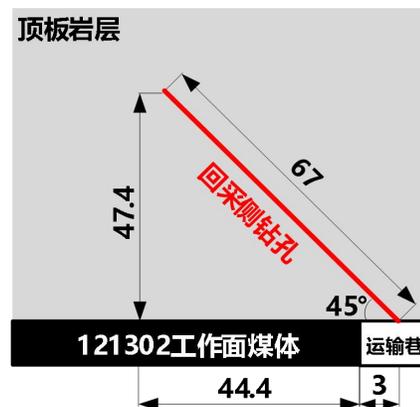
□ 目标层为顶板上部37-45m坚硬细砂岩。

□ 巷道两侧布置2组钻孔，间距10m，孔深67m。

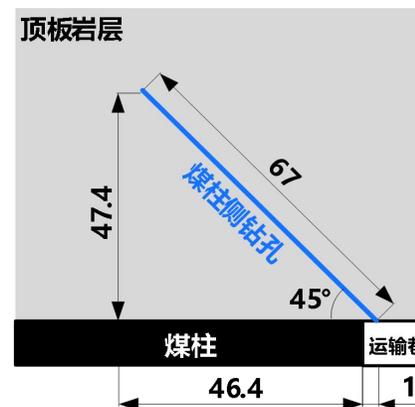
□ 与运输巷轴向夹角 $30^\circ$ 、 $10^\circ$ 。



(a) 钻孔布置平面图



(b) A-A剖面



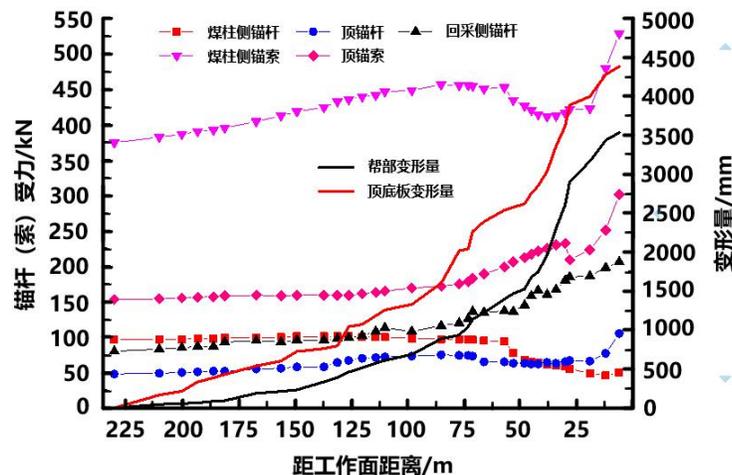
(c) B-B剖面

口孜东矿巷道水力压裂钻孔布置图

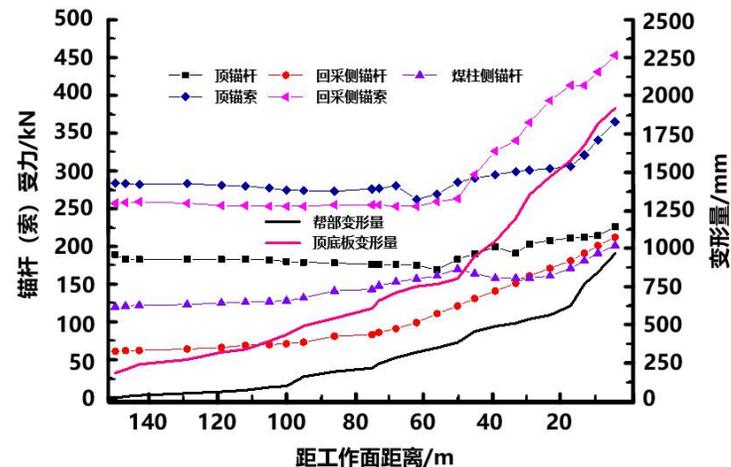
# 四、应用案例-千米深井软岩巷道

## ■ 围岩控制效果

## ✓ 围岩变形与支护体受力

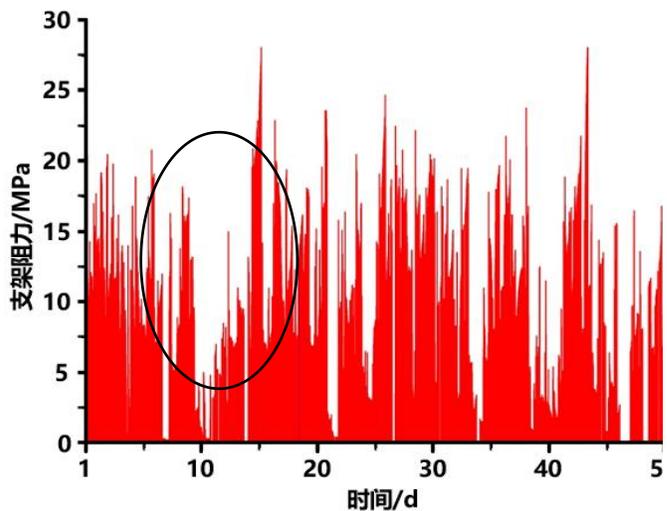


原支护

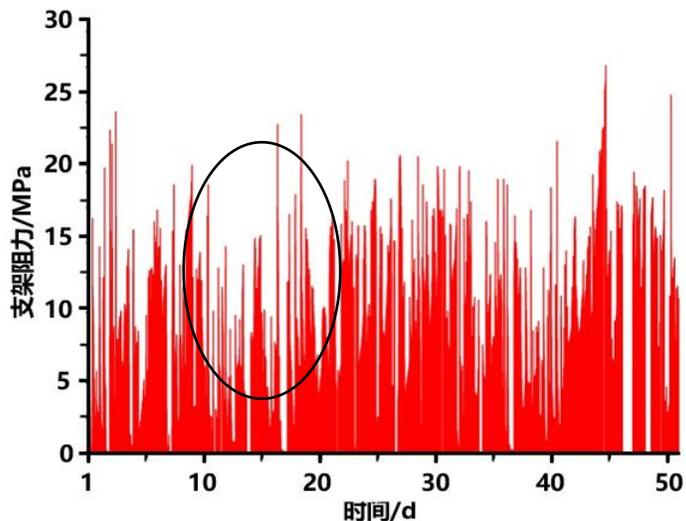


支护-改性-卸压

## 回采阶段巷道变形及锚杆锚索受力变化曲线



4#液压支架立柱阻力



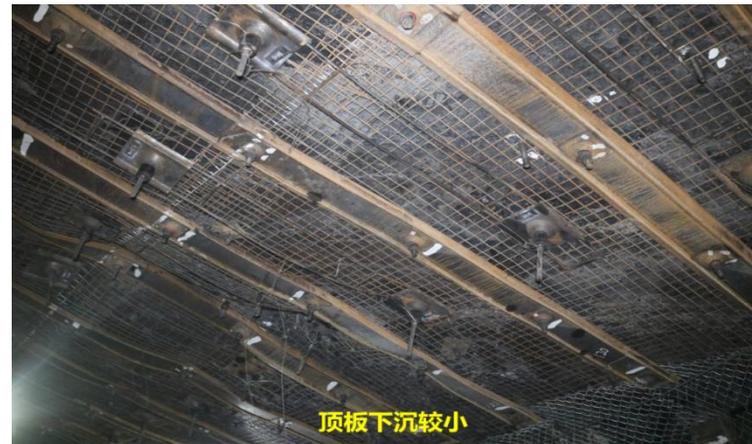
6#液压支架立柱阻力

✓ 压裂段液压支架平均阻力5-7MPa，  
非压裂段支架平均阻力为12.5MPa，  
降低56%-60%。

## 四、应用案例-千米深井软岩巷道

### ✓ 围岩控制效果

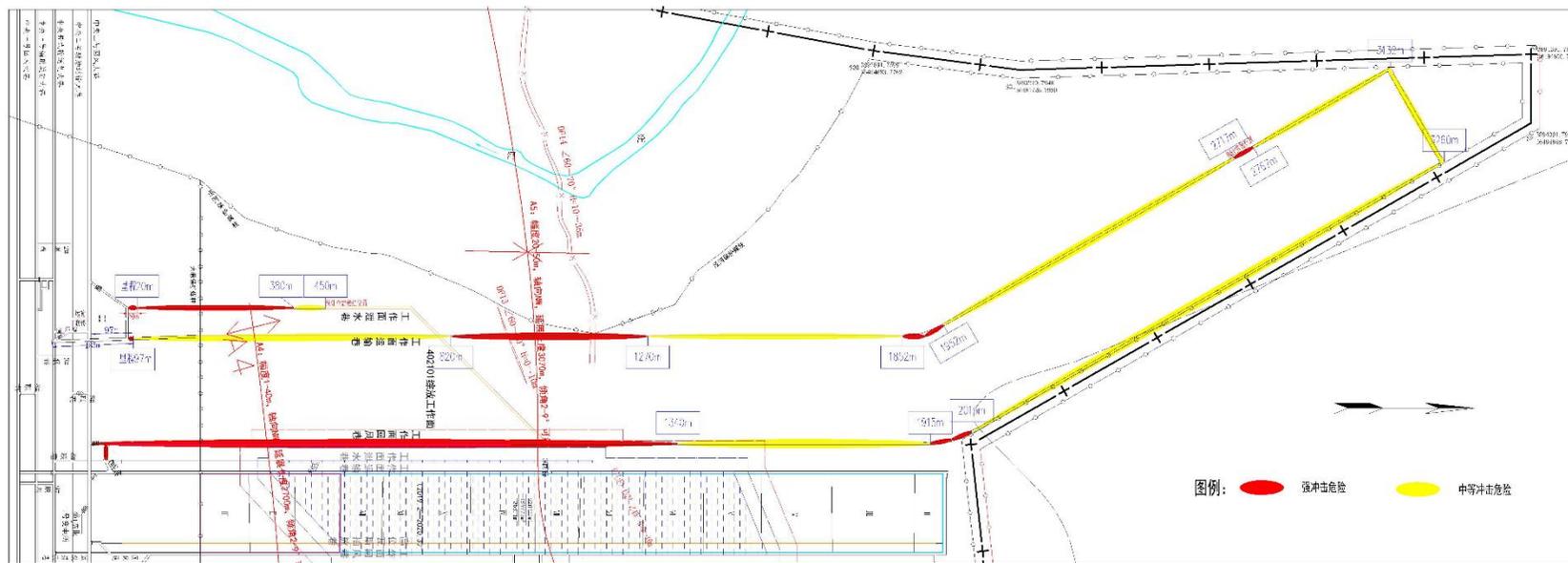
- 掘进回采全过程，新支护顶板下沉减小**74.9%**，底鼓减小**54.2%**，两帮移近减小**69.2%**。
- 围岩位移大幅降低，稳定性显著提高。



口孜东矿巷道围岩控制效果

## 四、应用案例-强冲击临空巷道

- 胡家河煤矿402101回风巷断面**22.62m<sup>2</sup>**；距离402102采空区60m，距离402102泄水巷35m；煤层平均单轴抗压强度**17.85MPa**，平均厚度**20m**，埋深**578~790m**，具有**强冲击危险性**；受**A4背斜轴部**影响；最大水平主应力**33.87MPa**与巷道夹角**68°**。



平面布置图

岩性	柱状	厚度/m 最小-最大	岩性描述
中砂岩		53-77	厚度变化范围为53.35-77.09m，岩性主要由一套灰-深灰色的泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩与浅灰色-灰白色细粒砂岩以及煤层组成
砂质泥岩		1.7-8.5	较易冒落的粉砂岩、砂质泥岩，厚度1.7-8.5m，易风化
4号煤层		6-28	赋存稳定，厚度6-28m，平均厚度20m。煤层结构简单一般含两层夹矸，且位于煤层的中上部，夹厚度一般小于0.3m
砂质泥岩		3-5	灰褐色，团块状，质密坚硬，易碎易风化
泥岩		0-44	平均厚度33m，部分地段缺失

4号煤层顶底板柱状图

## 四、应用案例-强冲击临空巷道

- 埋深大、构造、煤体节理裂隙发育、软弱泥岩底板；
- 煤柱不合理，强采动、冲击载荷、大直径钻孔和爆破卸压措施影响、矿井水腐蚀与劣化；
- 巷道大量锚杆、锚索破断，钢带撕裂，支护体系失效，顶板下沉明显，巷帮凹凸不平，成型差，底板鼓起明显。



掘进巷道帮部成型差



顶帮下沉、钢带撕裂



锚索破断

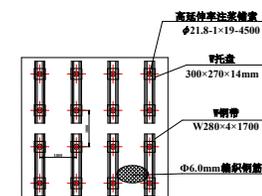
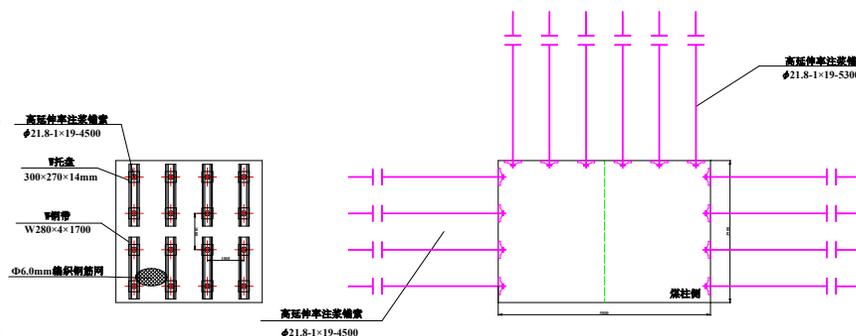
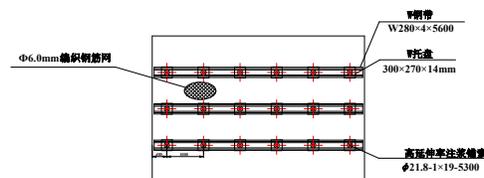


底鼓

## 四、应用案例-强冲击临空巷道

- **喷涂护表**：巷道帮部随掘随喷，提高巷帮浅部破碎煤体的完整性，避免冲击载荷下巷帮片帮。同时，有利于降低预应力损失，提高预应力的传递效果。

- **锚注**：掘进时，采用高延伸率**注浆锚索**替换原有普通锚索，提高锚索抗冲击性能，通过注浆提高锚索锚固力及抗剪切性能；回采时，补打高延伸率注浆锚索，通过高压劈裂注浆，恢复巷道顶板完整性，提高锚索锚固力，控制巷道在冲击和采动应力下出现持续蠕变。



正常区域锚注支护方案

## 四、应用案例-强冲击临空巷道

- W型锚索托盘：托盘尺寸300×270×14mm，与W钢带配合使用，提高锚索预紧力传递面积。
- 抗冲击锁具：增加了防松盖，减少锚具因冲击出现的失锚现象。
- 高延伸率高压注浆锚索：直径22.4mm，封孔压力25MPa以上，延伸率9%以上。
- A4背斜影响区域增加帮锚索长度，顶板直径28.6mm锚索补强支护，底板注浆锚索支护；回采期间顶板长注浆锚索补强支护。



W型锚索托盘



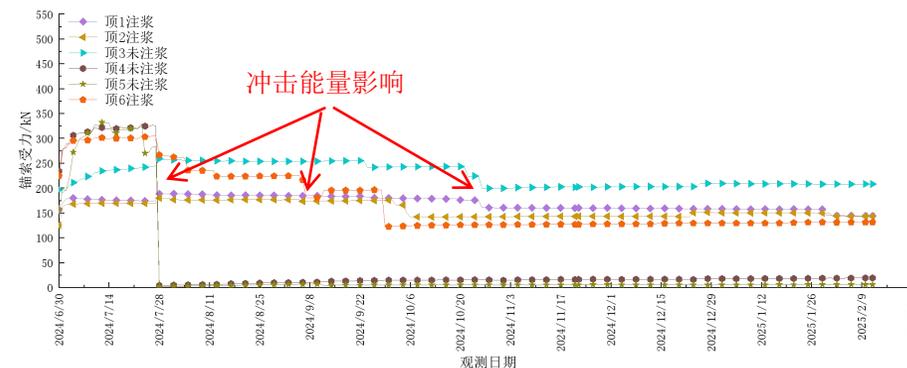
高延伸率注浆锚索



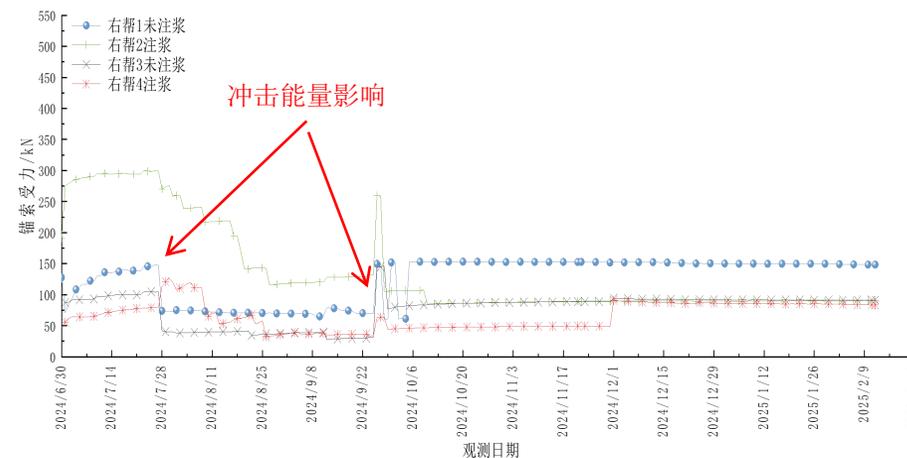
抗冲击锁具

## 四、应用案例-强冲击临空巷道

- 锚索安装后未受冲击能量影响前受力呈现先增阻，随后保持稳定的趋势；
- 受冲击能量影响后，锚索工作阻力会立刻出现一定幅度的降低或增加，一般**未注浆锚索受冲击后工作阻力下降明显，注浆锚索受冲击后工作阻力有一定增幅**；
- **冲击能量会造成未注浆锚索锚固性能失效，使其工作阻力基本降为0**，而注浆锚索受冲击后依然具有较高工作阻力；
- 采用注浆锚索实现预应力全长锚固，能够实现**锚得住、高预应力与工作阻力、冲不散**的目标。



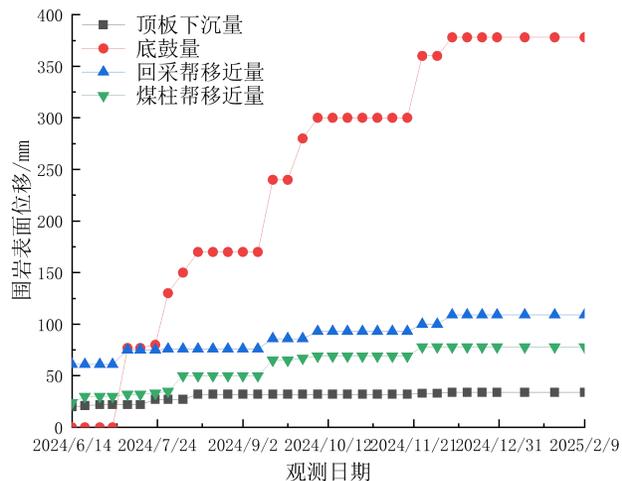
顶板锚索受力



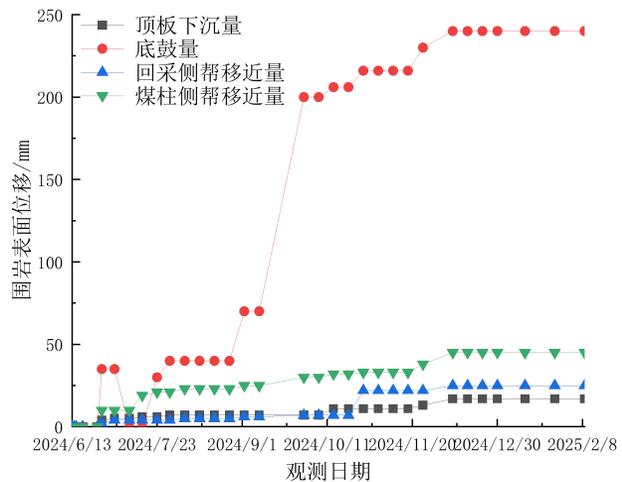
帮部锚索受力

# 四、应用案例-强冲击临空巷道

■ 围岩变形均以底鼓为主，其次为两帮移近，顶板下沉相对较小；试验段较非试验段平均顶板下沉、底鼓、回采侧帮移近降幅分别达到**29%**、**25%**、**61%**。



非试验段围岩变形



试验段围岩变形



控制效果

# 展望



进一步加强深部巷道地质力学环境测试与分析



进一步研究深部复杂困难巷道应力场分布规律



深入研究深部巷道变形、破坏机理及支护理论



研究典型巷道**深、软、冲**巷道围岩控制理论与技术



..., 需继续不断的研究与试验



**谢 谢!**  
**敬请批评指正**