



# 高寒高海拔地下金属矿床开采关键技术及应用

赵 兴 东  
单位：东北大学

四川 成都  
2025-12



- 研究现状与意义
- 高寒高海拔地下开采技术
- 高寒高海拔环境采掘工程稳定性控制技术
- 工程实例
- 结论

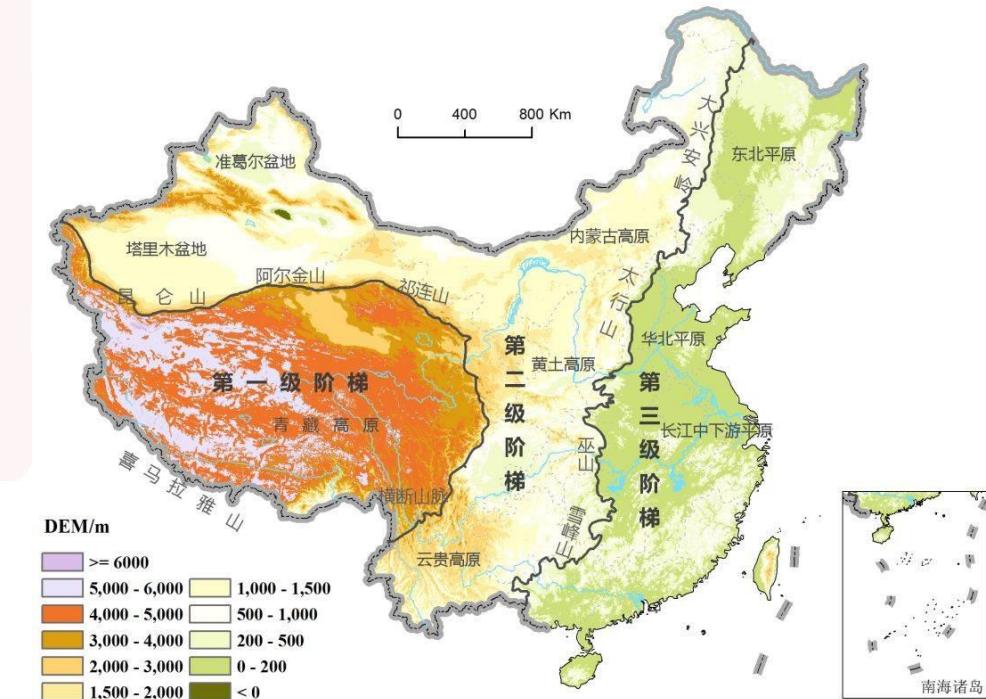


- **研究现状与意义**
- **高寒高海拔地下开采技术**
- **高寒高海拔环境采掘工程稳定性控制技术**
- **工程实例**
- **结论**

## 1.1 研究背景与意义

随着我国经济社会发展对矿产资源需求的持续增长和中东部易采矿产资源的日益枯竭，矿产资源开发逐步向高寒高海拔、空气稀薄、生态脆弱区挺进，这些区域蕴藏着丰富的铜、铅、锌、锂等关键金属矿产资源，占全国总数的78%，高寒高海拔地区是我国重要的战略性矿产资源接续基地，对于保障国家经济安全、国防安全和实施西部大开发、东北全面振兴战略具有至关重要的意义。

由于高寒高海拔地区“高寒、高海拔、低氧、低气压”特殊自然环境与复杂的地质条件，在此种条件下作业人员和采掘装备工效急剧下降，冻融循环严重影响围岩稳定，地压防控困难，矿井通风与保暖能耗巨大，生态环境极为脆弱且修复困难，对传统采矿技术构成了严峻挑战。



## 1.1 研究背景与意义

### 高寒高海拔大型斑岩型矿床分布

西部：

甲玛

驱龙

玉龙

火烧云

大柴旦

普朗

阿舍勒

苏云河

东戈壁

.....

东北部：

多宝山

鹿鸣

岔路口

乌山

兴阿

迪彦钦阿木

.....



全球大型斑岩型矿床分布位置 (据Sillitoe, 2010; 王瑞等, 2020修改)

## 1.1 研究背景与意义

### 高寒高海拔矿区资源丰富 (部分)

矿床名称	主要资源		伴生资源及金属量	海拔/m	年平均气温/°C
	铜矿石量/t	平均品位/%			
驱龙铜矿	$2.596 \times 10^9$	0.38%	钼499 kt, 金453 t, 银274 kt	4600 ~ 5438	0
铁格隆南铜矿	$1.098 \times 10^7$	0.53%	金120 t, 银2.61 kt	4500 ~ 4854	-0.5
甲玛铜矿	$4.546 \times 10^7$	0.94%	钼614.3 kt、铅231.3 kt、锌483 kt金140.2 t、银7578 t	4350 ~ 5407	5.7
尼木厅宫铜矿	$6.15 \times 10^7$	0.46%	钼7.066 t、金4.35 t、银0.235 t	4000 ~ 5000	-1
玉龙铜矿	$6.5 \times 10^6$	0.94%	铁 $1.267 \times 10^7$ t, 钼 $4 \times 10^5$ t	4560 ~ 5124	-1
多不杂铜矿	$2.95 \times 10^6$	0.51%	金93t	4750 ~ 5000	-1
波龙铜矿	$2.72 \times 10^6$	0.56%	金177 t	4750 ~ 4900	-1
拿若铜矿	$2.51 \times 10^6$	0.31%	金82 t, 银873 t	4750 ~ 4900	-1
雄村铜矿	$2.37 \times 10^6$	0.54%	金213 t、银1093 t	3725 ~ 5050	5
朱诺铜矿	$2.3 \times 10^6$	0.57%	钼 $4 \times 10^4$ t、金33.8 t、银999 t	4600 ~ 5100	5
岗讲铜矿	$1.86 \times 10^6$	0.3%	钼 $1.7 \times 10^5$ t	4000 ~ 5200	6

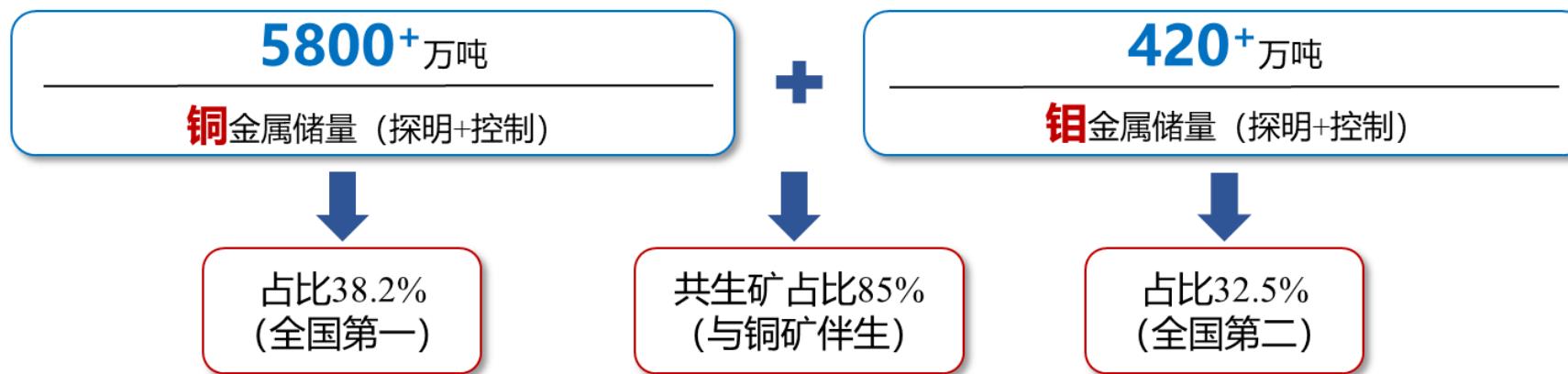
## 1.1 研究背景与意义

### 服务的高寒高海拔矿山



## 1.1 研究背景与意义

### 铜钼战略性矿产绿色高效开发利用迫在眉睫



#### ■ 资源替代潜力:

西藏铜矿完全开发可降低对外依存度 **15个**百分点 (按2030年需求测算) ;

#### ■ 国防安全价值:

矿区分布邻近新藏公路 (G219) , 形成 “资源-运输-国防” 三位一体保障链;

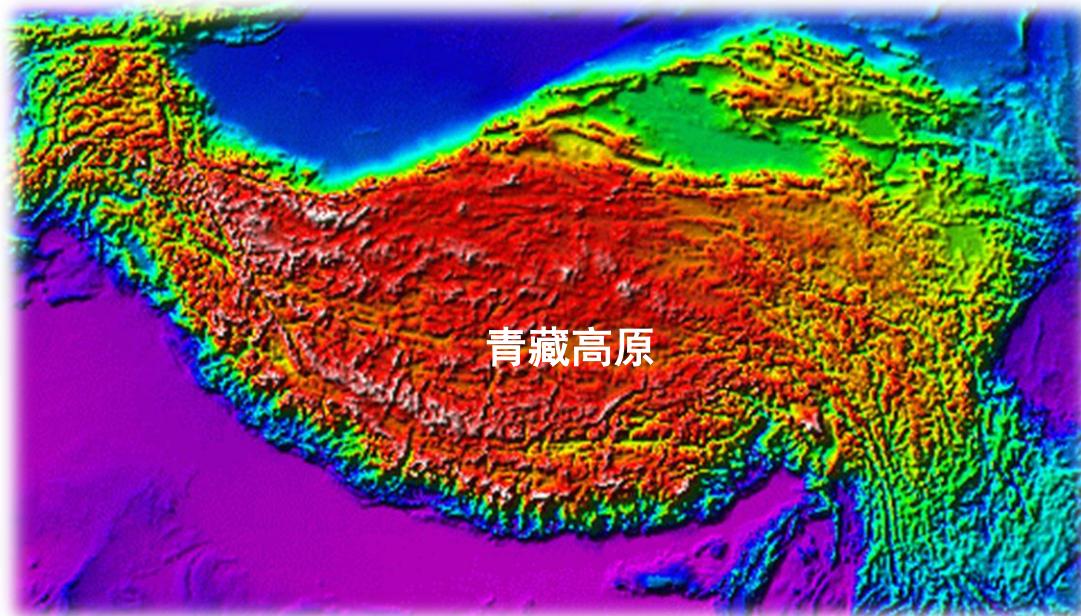
#### ■ 双碳绿色优先:

西藏铜钼资源是国家战略安全的关键支撑, 但开发必须遵循 “生态优先、技术驱动、渐进开发” 原则。

## 1.2 高寒高海拔矿区环境特征与开采技术挑战

### 青藏高原特点

- 经历了大洋俯冲、陆-陆碰撞全过程
- 发育多类型斑岩成矿系统和岩浆矿床
- 是全球最为复杂的造山带



### 资源开发难点

生态环境脆弱，生态文明建设高地

海拔高，低温、低压、低氧（三低）

高原隆升剥蚀，切割强烈，冰川地貌发育

→ 环保要求高，绿色开发

→ 自动化条件复杂苛刻

→ 开发难度大，灾害频发



## 1.2 高寒高海拔矿区环境特征与开采技术挑战

### 1. 高寒高海拔矿山面对的气候特征

#### (1) 低压缺氧

海拔高度 m	0	1000	2000	3000	4000	5000
年平均气压 kPa	101.5	90.0	79.5	70.0	61.5	54.0
含氧量 g/m <sup>3</sup> (20℃)	323.0	280.5	253.4	223.4	196.4	172.1

在5000m处的空气含氧量仅为海平面空气含氧量的53%。

#### (2) 寒冷干燥

气温随着海拔高度的升高而逐渐下降，一般每升高1000米，气温下降约6℃，有的地区甚至每升高150米可下降1℃。由于高原大气压低，水蒸气压亦低，空气中水分随着海拔高度的增加而递减，海拔愈高气候愈干燥。

### 2. 高寒高海拔对矿山设备影响

- (1) 内燃机的燃烧恶化、功率显著下降，油耗增加，冷却系统恶化
- (2) 随海拔高度升高，低气压造成压缩机的排气温度增高
- (3) 低温影响电机的起动性能：采矿机械大多为柴油机，而大气压力低，进气不足，空气经压缩后达不到柴油的燃点(196℃)。

气温每降低1℃，蓄电池容量下降1%~1.5%，启动放电快，温度越低，充电力越差。

- (4) 低温影响橡胶制品的绝缘性能：硬度、扯断强度及伸长率等机械性能均表现出下降趋势。

高度 (m)	功率		油耗占海拔0点 (%)
	Kw	占海拔0点(%)	
0	68.68	100	100
2000	54.21	79	107
3000	45.49	66.7	109.5
4000	36.31	53.3	114.3
5000	32.96	48	116

## 1.2 高寒高海拔矿区环境特征与开采技术挑战

在人员效能方面，低氧环境导致人体血氧饱和度降低，引发一系列生理应激反应。

当海拔超过3000m时，动脉血氧饱和度降至90%以下，大脑认知功能开始下降，反应时间延长，注意力分散，决策能力减弱。

在海拔4000m以上地区，人员短期记忆能力下降约20%，复杂任务执行错误率增加35%-50%。

低温环境则导致人体代谢率增加，肢体灵活性下降，手工操作精度降低，在零下20℃环境下，手工作业效率下降30%以上，操作错误率增加2-3倍。



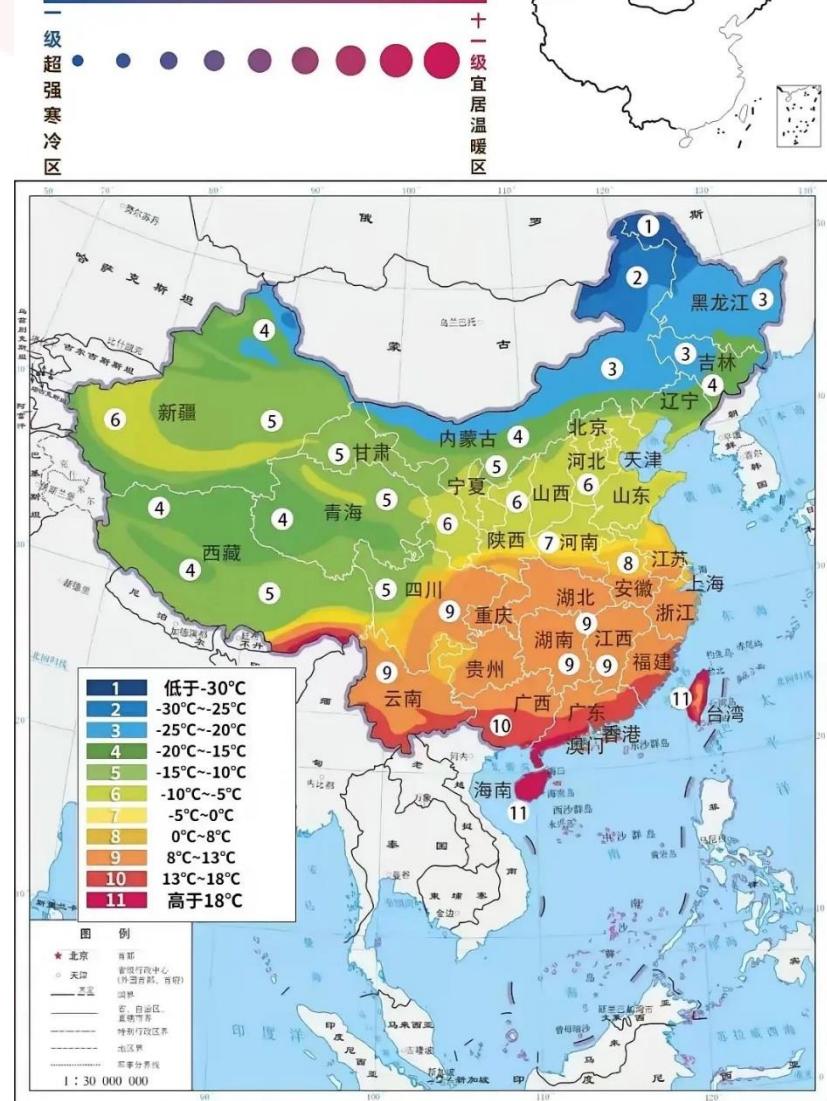
## 1.2 高寒高海拔矿区环境特征与开采技术挑战

高寒矿区位于大兴安岭西麓，得耳布尔河北西岸，属高原区、浅切割的低中山区，海拔标高750~780m，相对高差30m，矿区属亚寒带大陆性气候；年最高气温38°C，最低气温-54°C；年平均降水量479.42mm，多集中在6、7月份，年平均蒸发量749mm；主导风向为西北风，最大风速24m/s；每年9月中旬至翌年5月上旬为冰冻期，夏秋两季多雾，无霜期70~100天；地表为季节性冻土层，0.5~2.95m以下有厚度2~40m的永冻层。

极端恶劣天气，暴风雪等极端天气来临后要停止作业。

合理安排采矿生产，储备足量生产、生活物资，有效减少高寒风险对采矿工程施工安全造成的影响。

中国冬季寒冷区域等级



## 1.2 高寒高海拔矿区环境特征与开采技术挑战

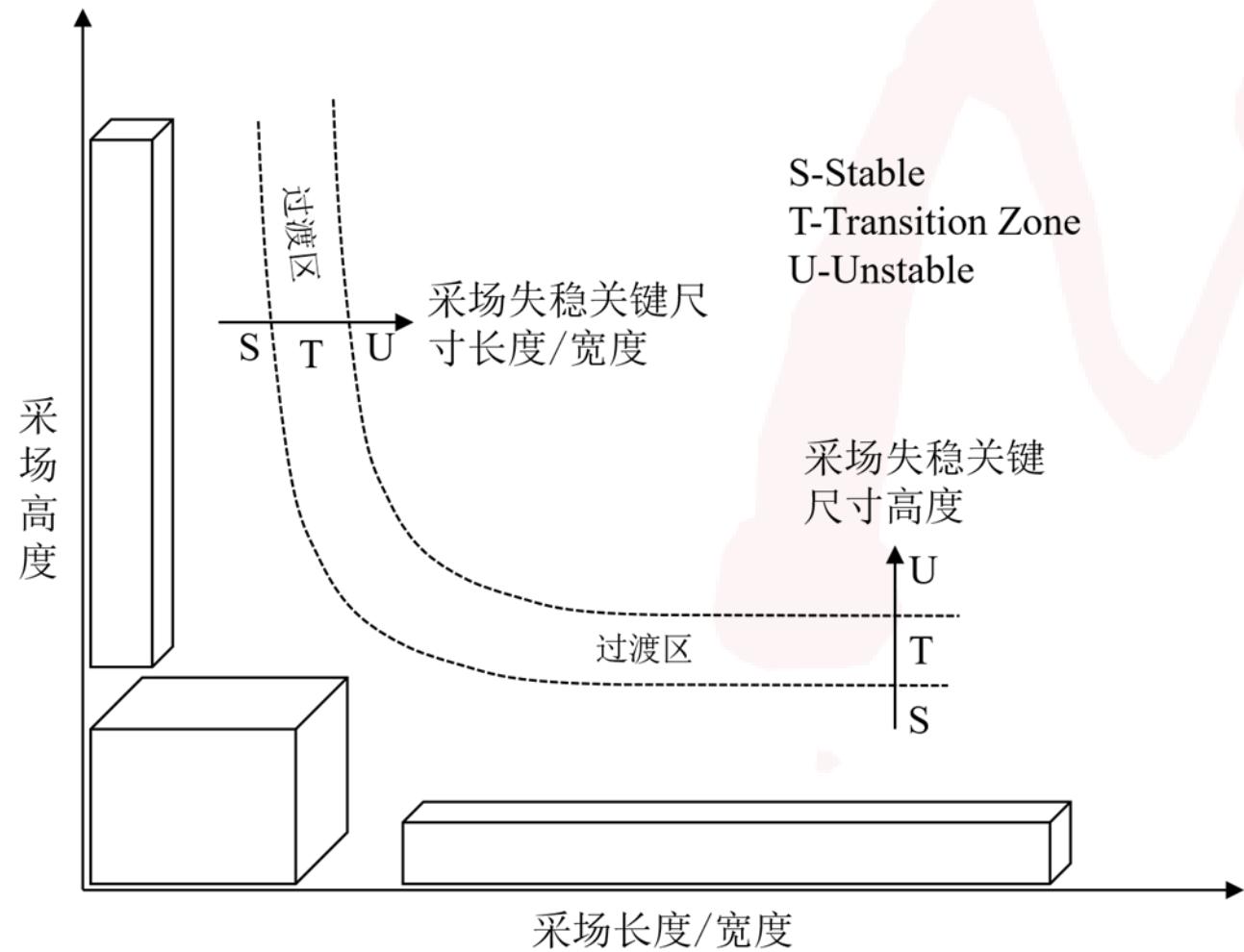
挑战类型	影响机制	后果表现	解决难度
人员健康挑战	低氧导致血氧饱和度下降	劳动效率下降、事故率增加	高
设备性能挑战	低氧、高寒、低气压综合作用	功率下降、故障率增高	中高
围岩稳定性挑战	冻融循环引起冻胀力变化	岩体强度降低、地压灾害风险激增	极高
矿井环境控制挑战	风流-围岩热交换加剧	能耗增加、井巷结冰	中
生态环境挑战	生态环境脆弱、恢复力差	开采扰动后恢复困难、成本高	极高

- 研究现状与意义
- 高寒高海拔地下开采技术
- 高寒高海拔环境采掘工程稳定性控制技术
- 工程实例
- 结论

## 高寒高海拔环境地下采矿方法优选与工艺优化

对于新的采矿计划其整体战略是选择较高水平的机械化；引进无轨采矿设备是各类矿床开采的共识；随着劳动力成本的提高，采用机械代替人的体力劳动将逐渐得到普及。其主要优点为：

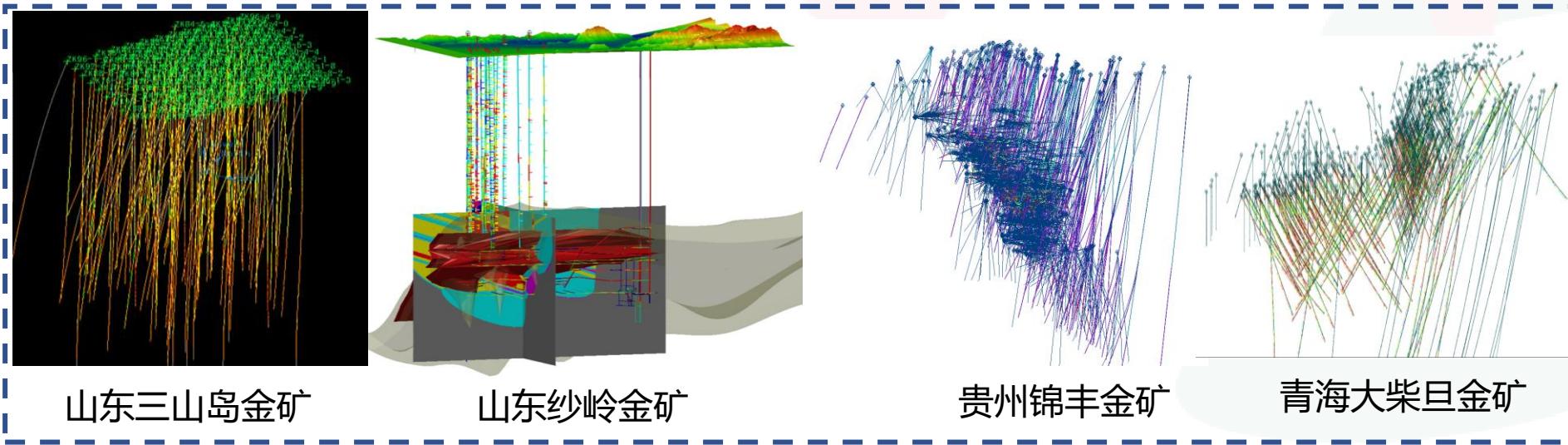
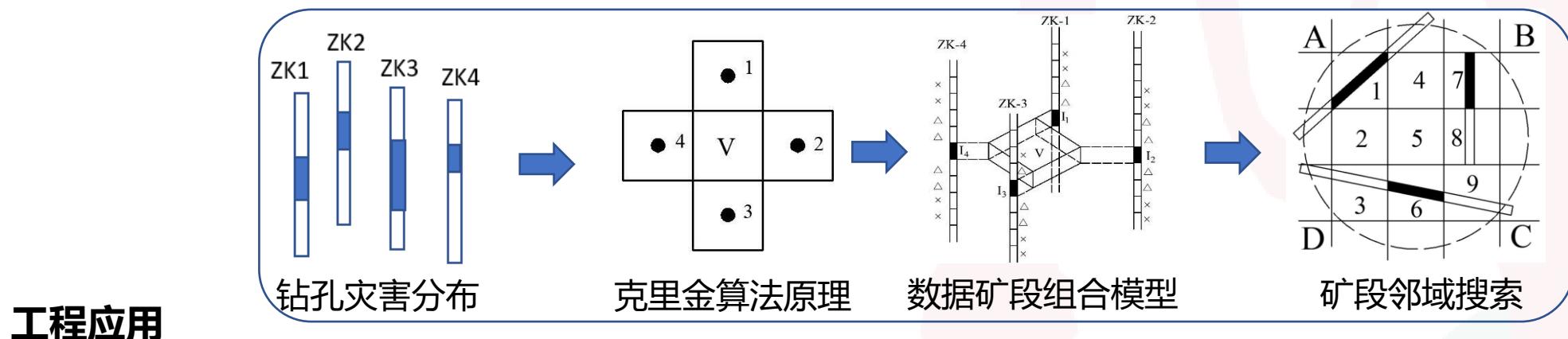
- 构建精准的透视化的矿山三维模型
- 采场设计简化，减少工程时间；
- 减少开拓工程量；
- 提高标准钻、爆、运的速度和效率，加快采矿循环；
- 减少诸如二次破碎、测量、设备安装和支护等辅助工序时间；
- 改善爆破效果，提高出矿效率；
- 在矿柱回采期间，应用充填减少贫化；
- 工作环境改善，更安全。



## 高寒高海拔环境下地压灾害控制技术

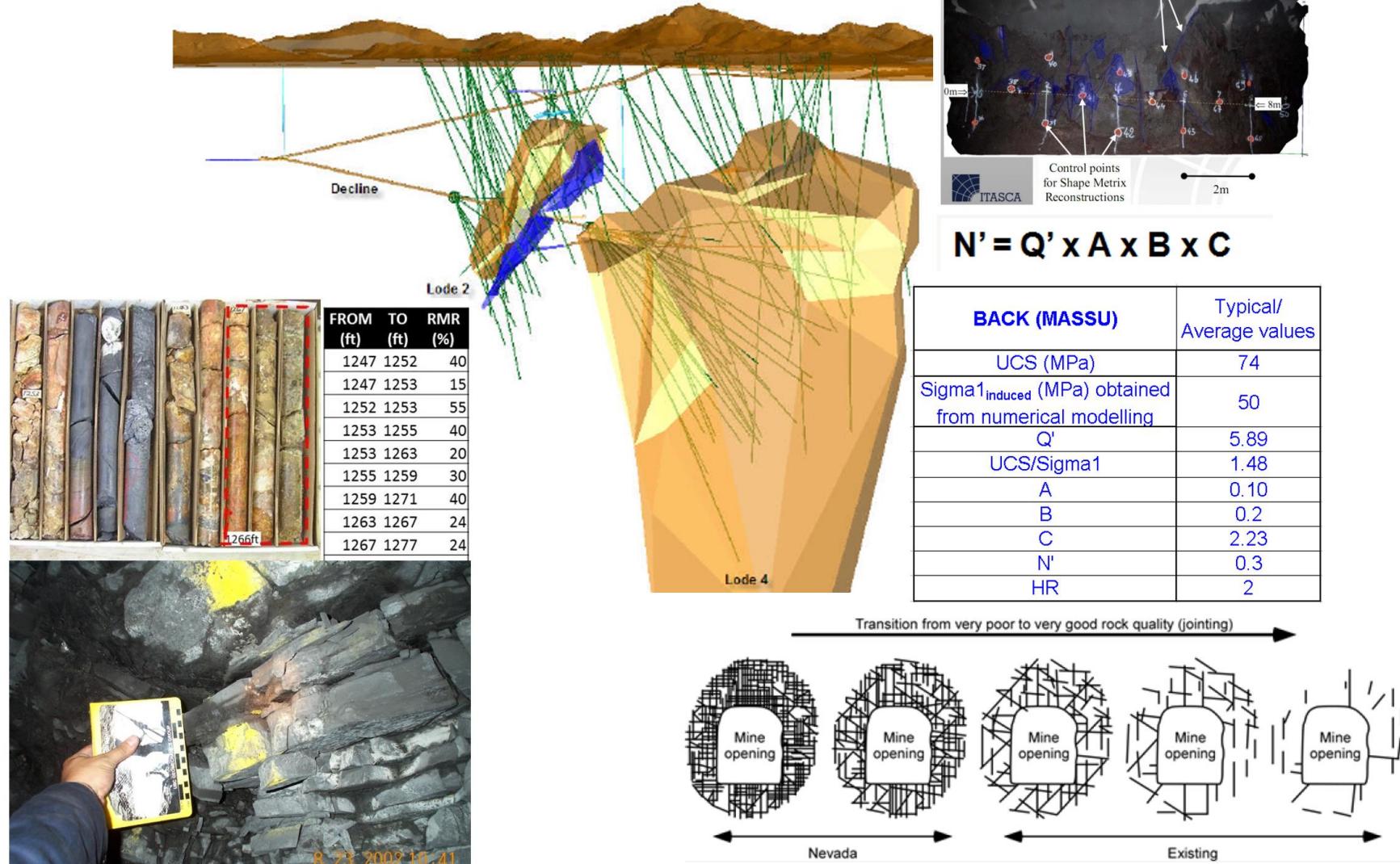
### 矿山工程灾害建模方法

建立依据岩芯的工程灾害风险分析数学模型，改进克里金插值算法，构建矿山三维工程灾害模型



# 高寒高海拔环境下地压灾害控制技术

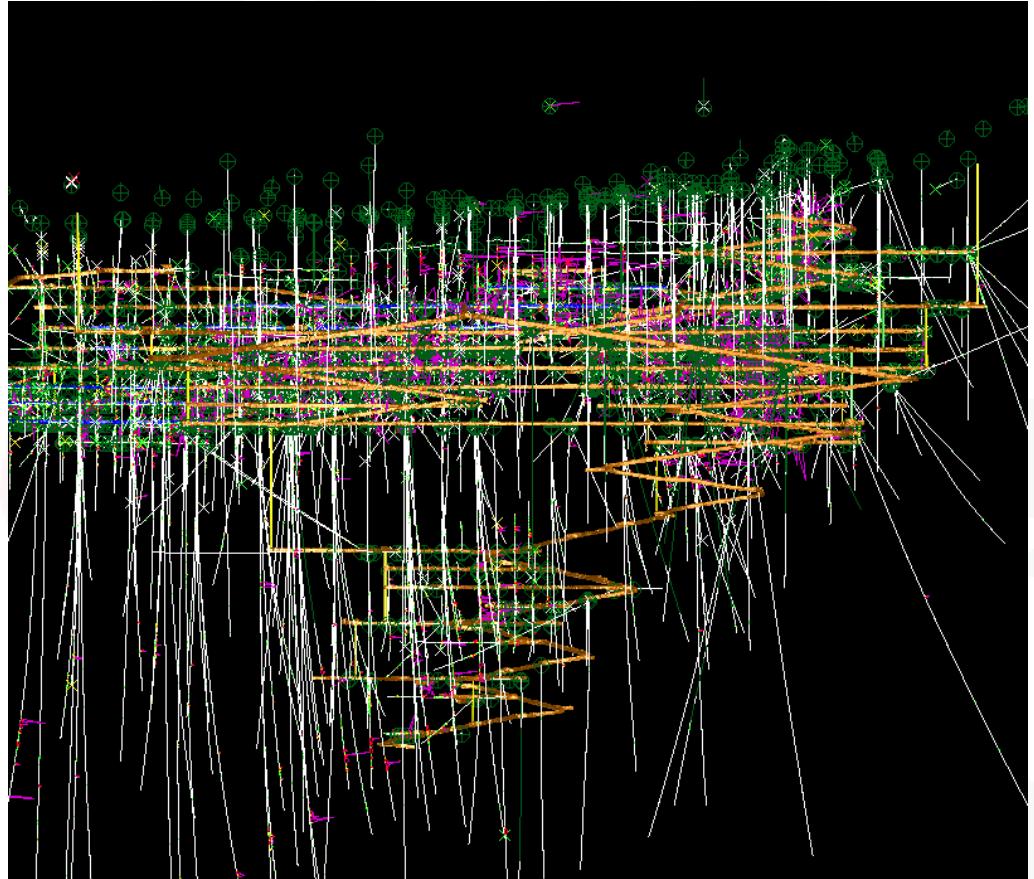
## 工程地质调查



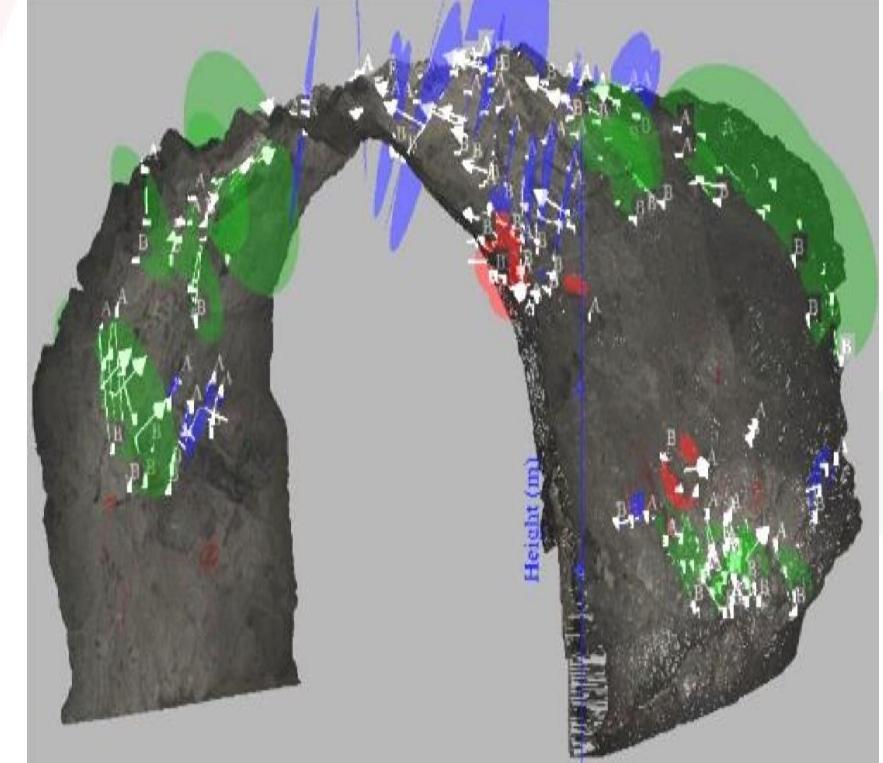
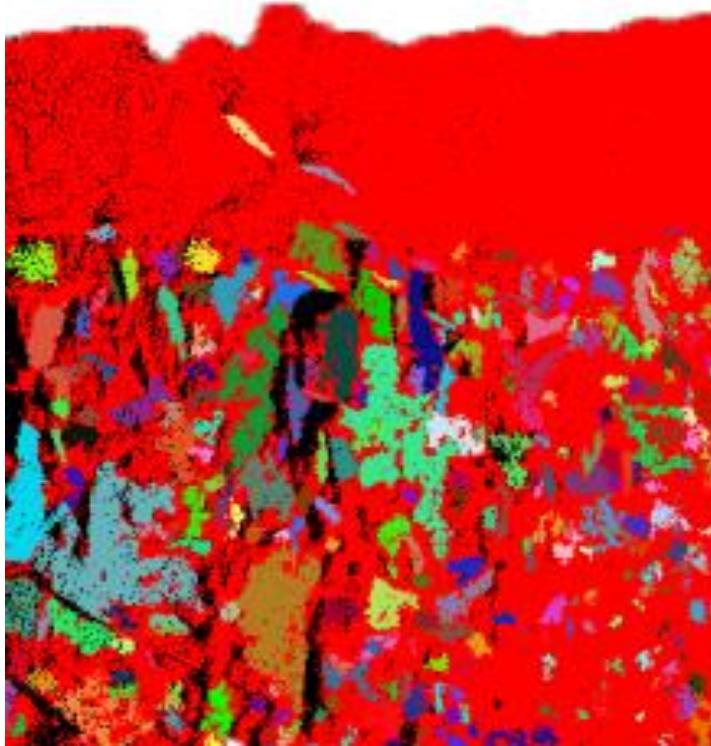
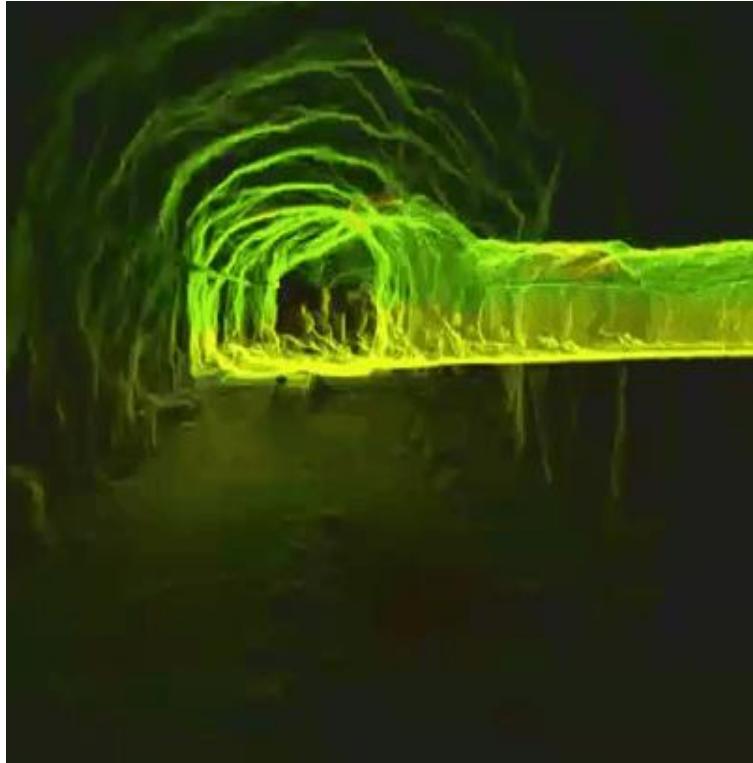
## 青海大柴旦地质钻孔

使用多种勘查手段相集合，充分利用化探（RC）、钻探、物探等勘查手段提高探矿效率。过去几年以RC寻找矿化、地层线索+金刚石验证找矿的探矿方式获得了良好成效，成功探获了深覆盖层区Ⅱ、Ⅲ矿带矿体。获青海省科学技术三等奖。

采用全数据化管理，具有全面的地质信息数据库，通过SURPAC、LEAPFROG等国际领先三维软件构建矿区三维地质模型及大数据模型，为矿体的分布规律、赋存特征、变化趋势等分析研究提供直观便捷的基础条件，是靶区预测的得力工具。



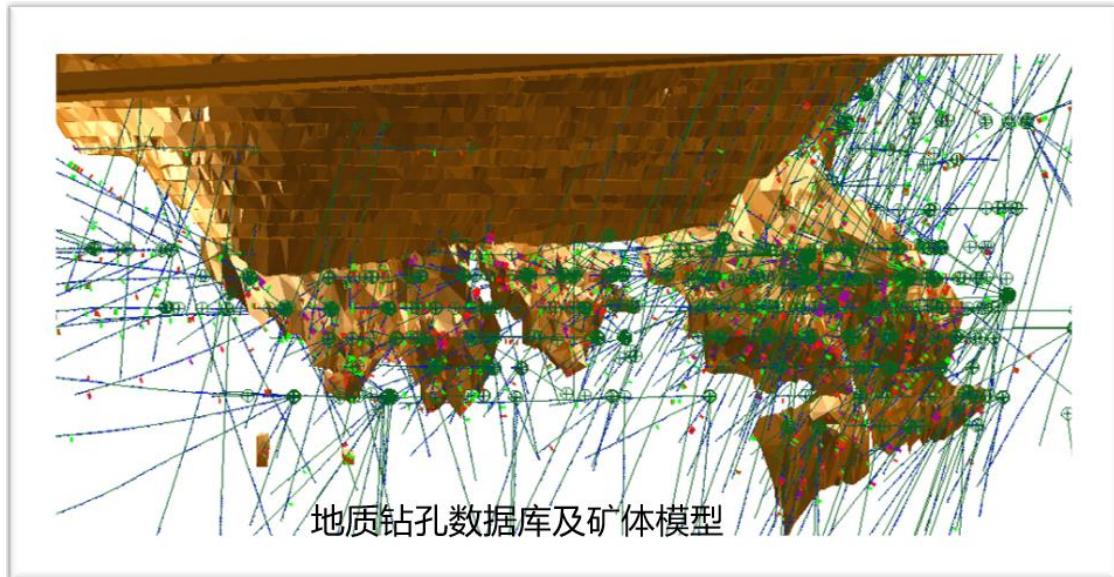
## 采用三维激光扫描建模及工程地质调查



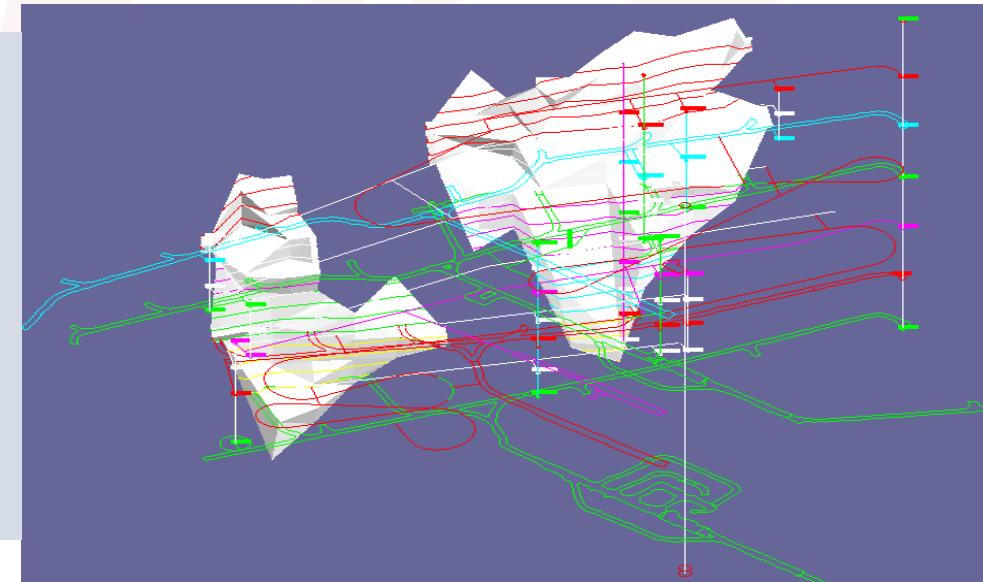
岩体结构智能识别及表征技术，效率提升200%

## 青海大柴旦矿业三维地质建模与岩石力学数据

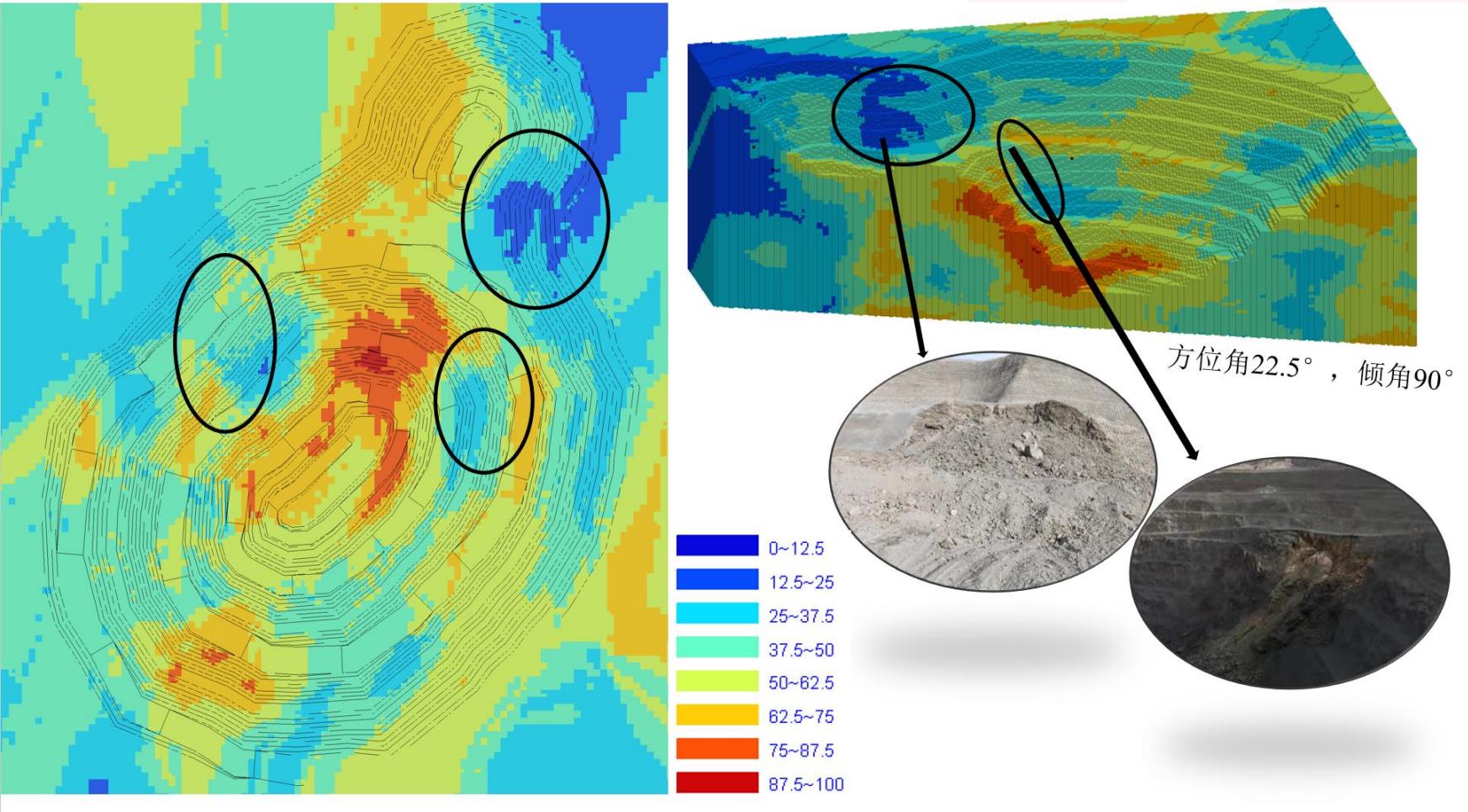
在三维可视化平台下，建成集地质资源管理、测量管理、采矿三维可视化设计功能于一体的矿山资源数字化系统。使地质资源信息在矿山地质、测量、采矿之间数字化流转，支撑矿山规划设计，为矿山智能生产打下了基础。



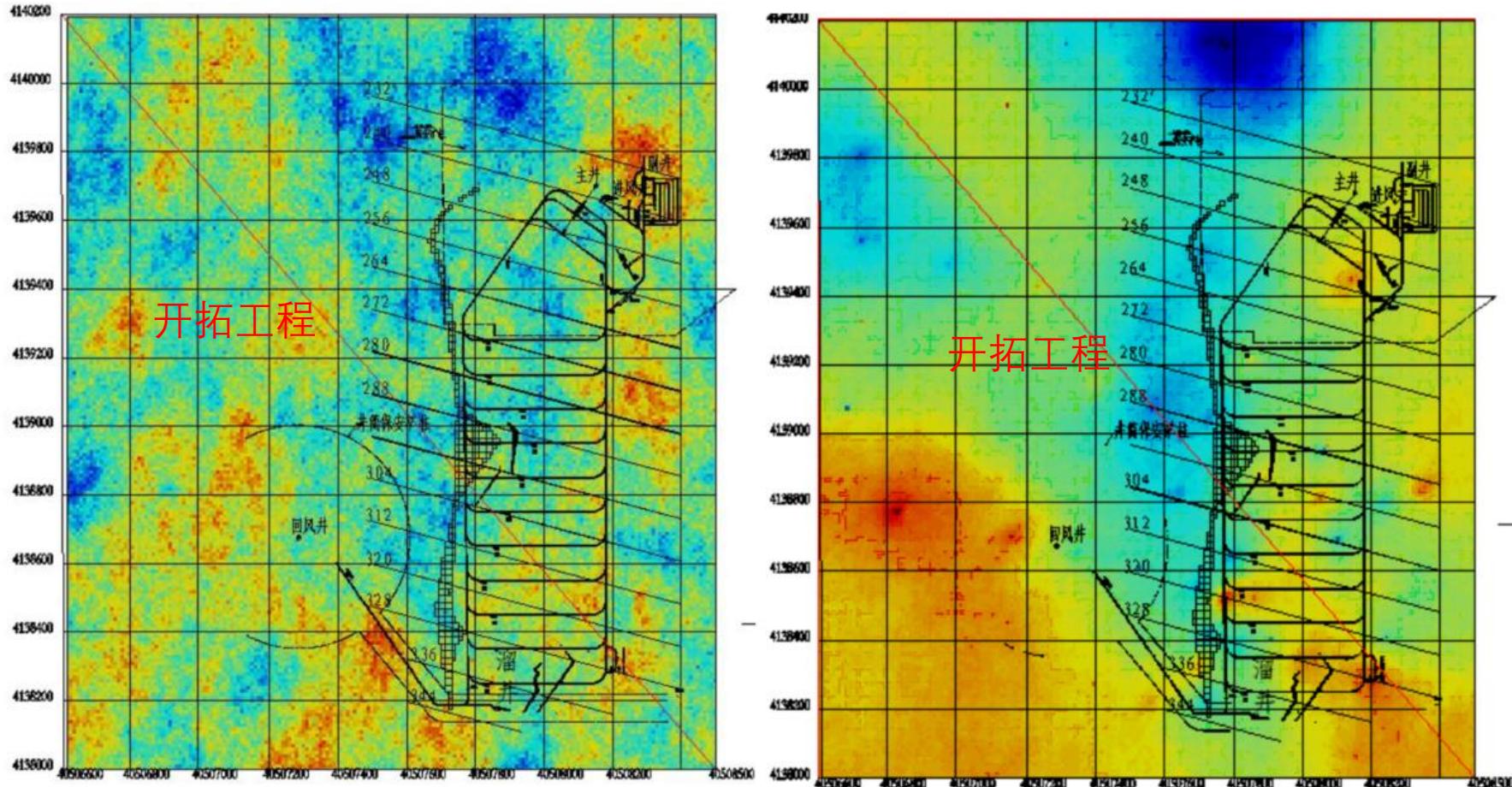
三维采矿系统设计



## 矿山三维可视化工程灾害模型-青海大柴旦矿业

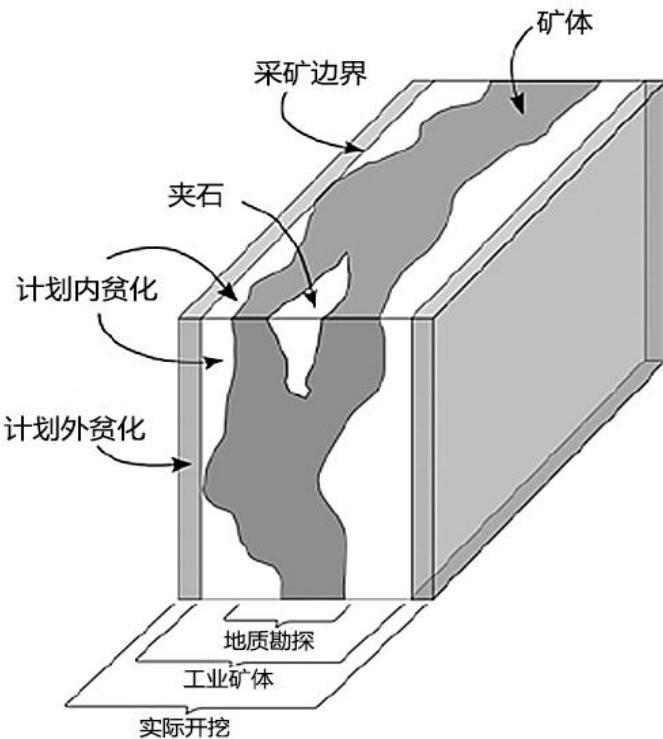


## 矿山三维可视化工程灾害模型



指导采矿设计与地压防控

## 采矿方法设计基础



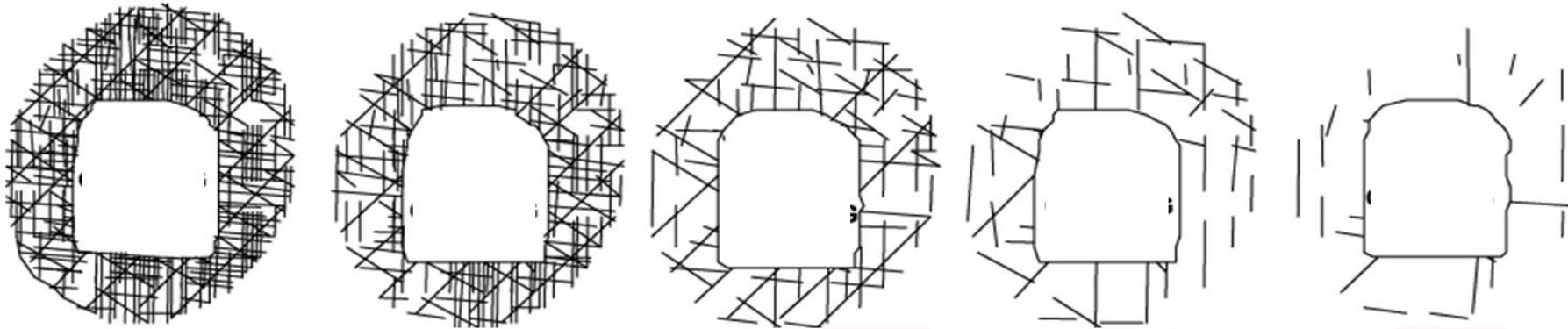
- 矿石品位的分布情况 (掌握比较清晰) ;
- 地质结构 (部分知道, 从技术角度考虑掌握需要的信息) ;
- **围岩应力条件** (很少测量) ;
- **岩体工程属性** (很少掌握-平均值和推测值) 。

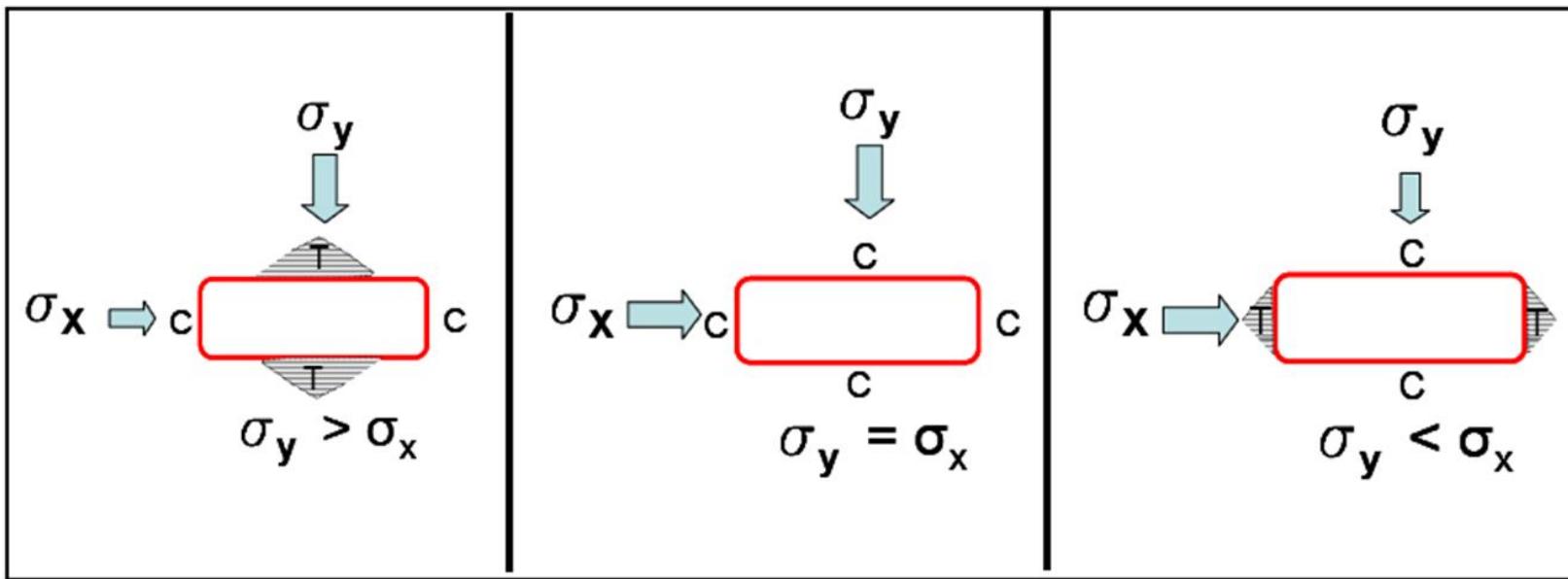
- 修正回采顺序, 降低能量释放率和应力集中;
- 回采区域应力评估, 应用矿柱或充填体, 降低应力集中和地压灾害;
- 降低开采工作面应力集中;
- 采用释能支护技术解决高应力岩体稳定性控制。

## 高寒高海拔环境下地压灾害控制技术

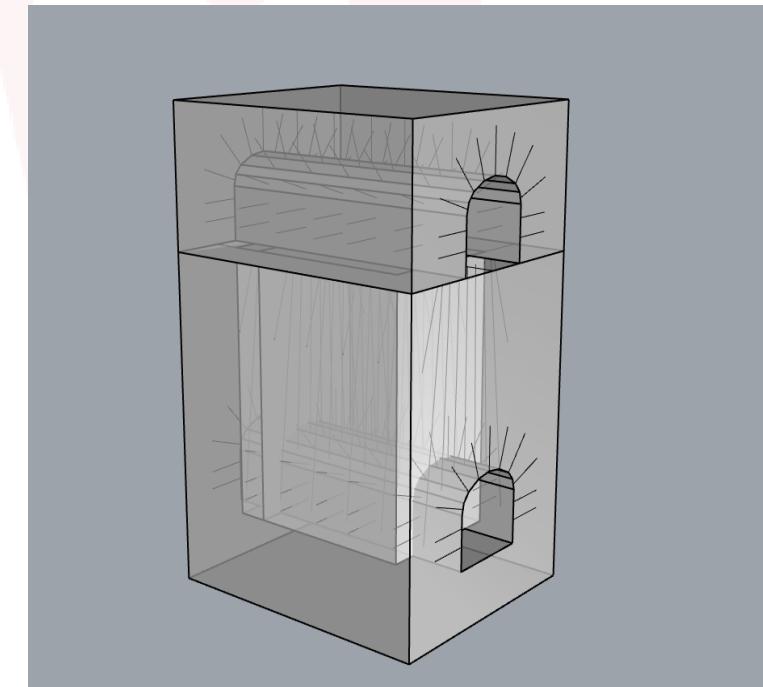
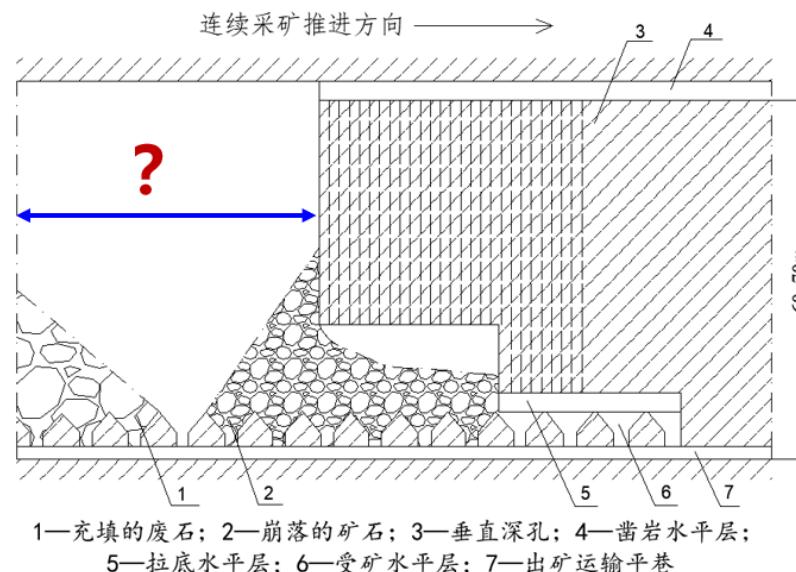
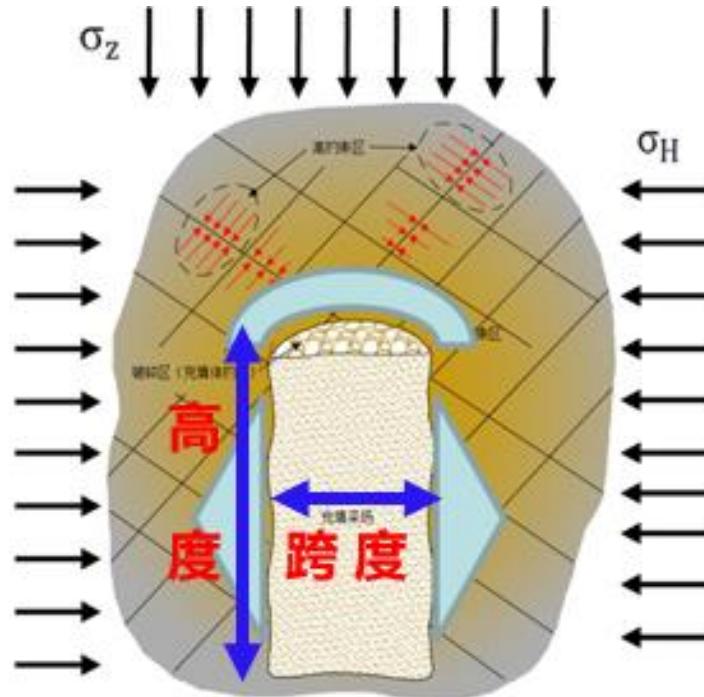
岩体条件



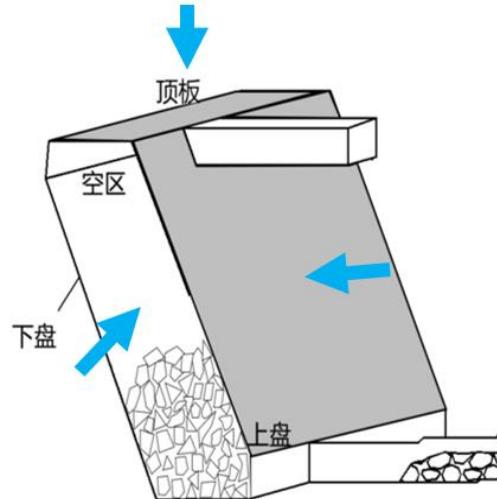
地应力



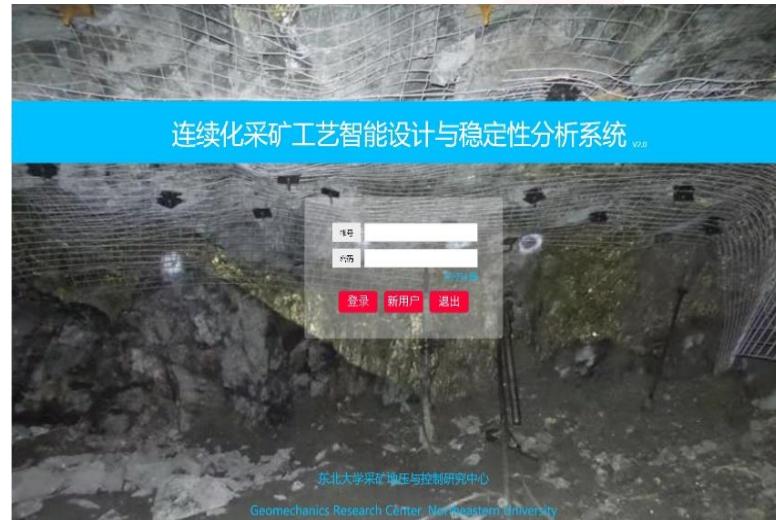
## 采场结构参数设计



## 采场结构参数设计



采场结构

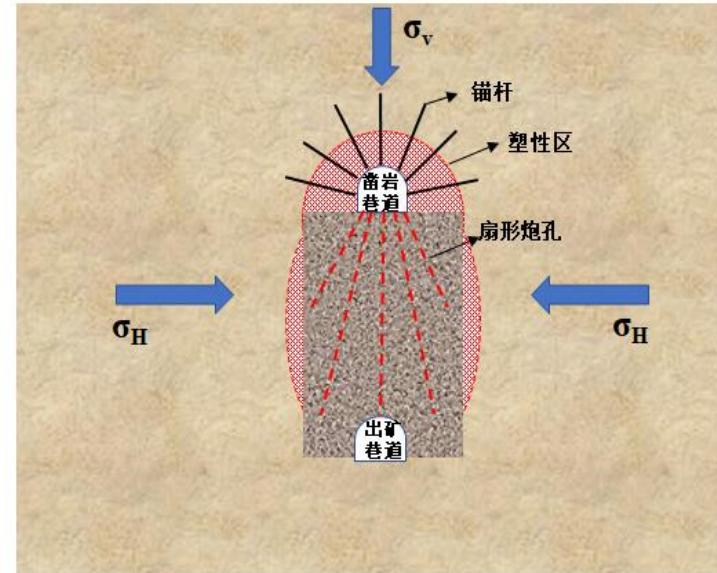
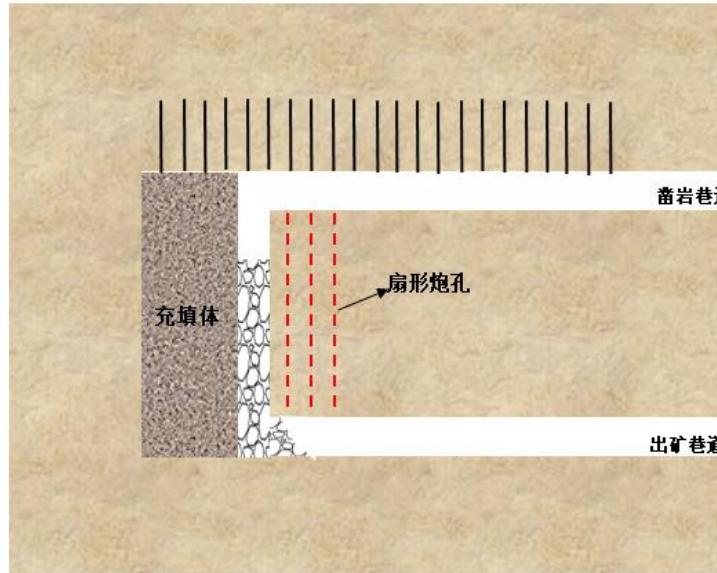


连续化采矿工艺设计与稳定性分析系统



采动地压响应理论 → 深部采场结构设计

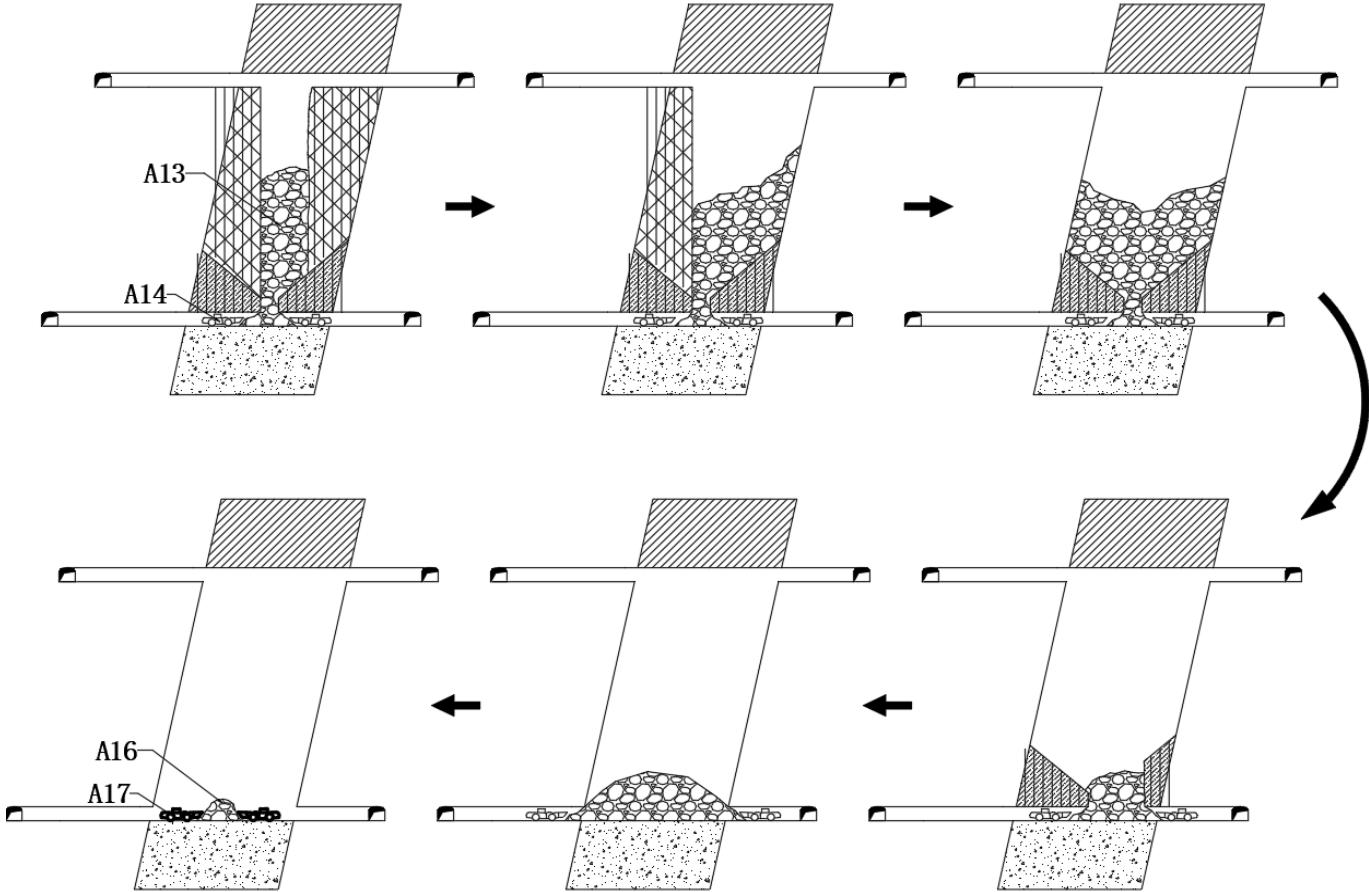
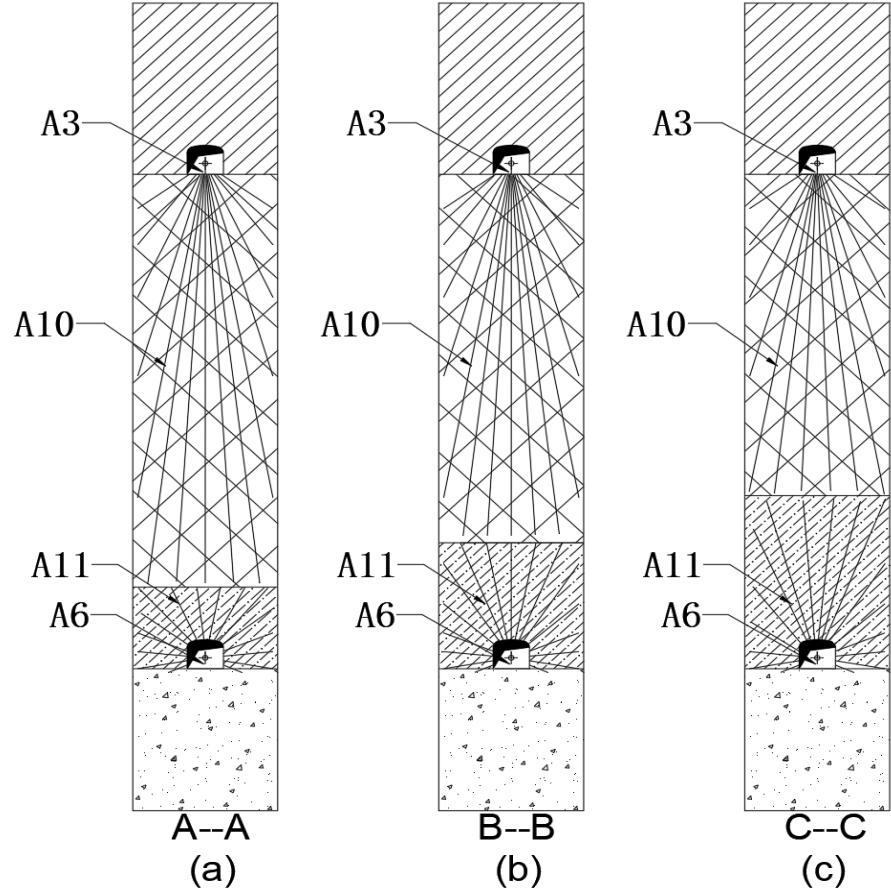
## 开发了采场预控顶+下向扇形孔+平底结构采场结构——“门拱式采场结构”空场嗣后充填采矿法



中国专利：ZL201510158269.7

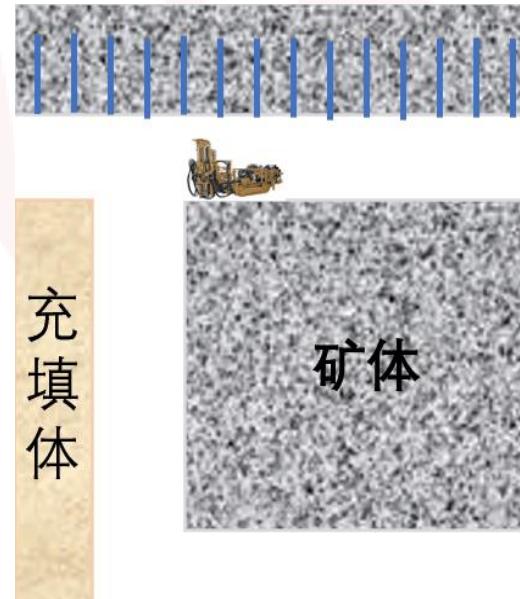
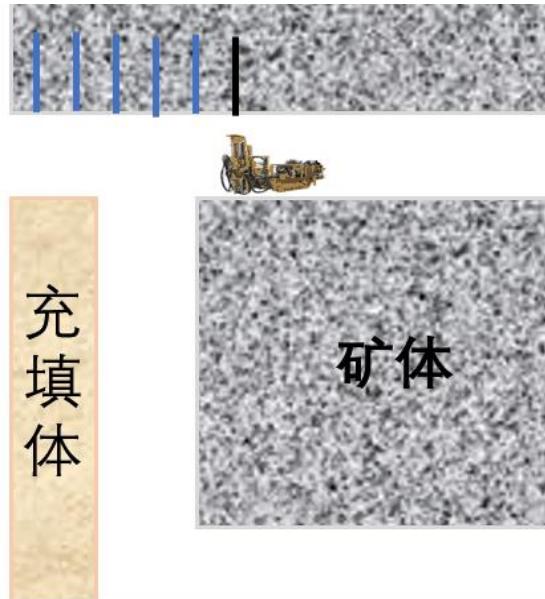
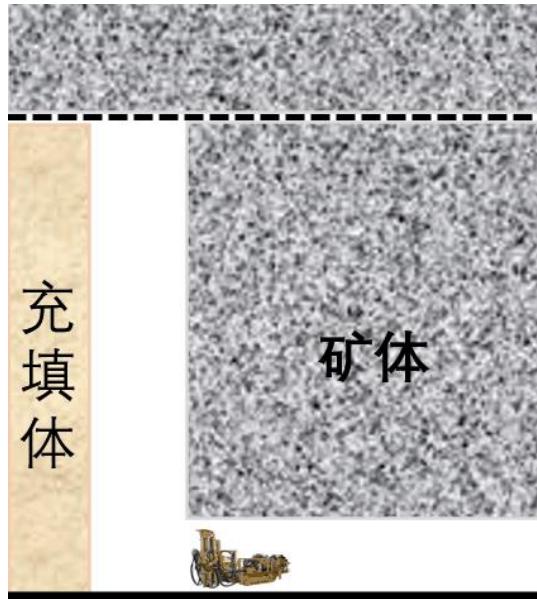
采切工程量降低40%、矿石回收率≥95%，生产连续、安全性好

## 开发了采场预控顶+下向扇形孔+平底结构采场结构——“门拱式采场结构”空场嗣后充填采矿法



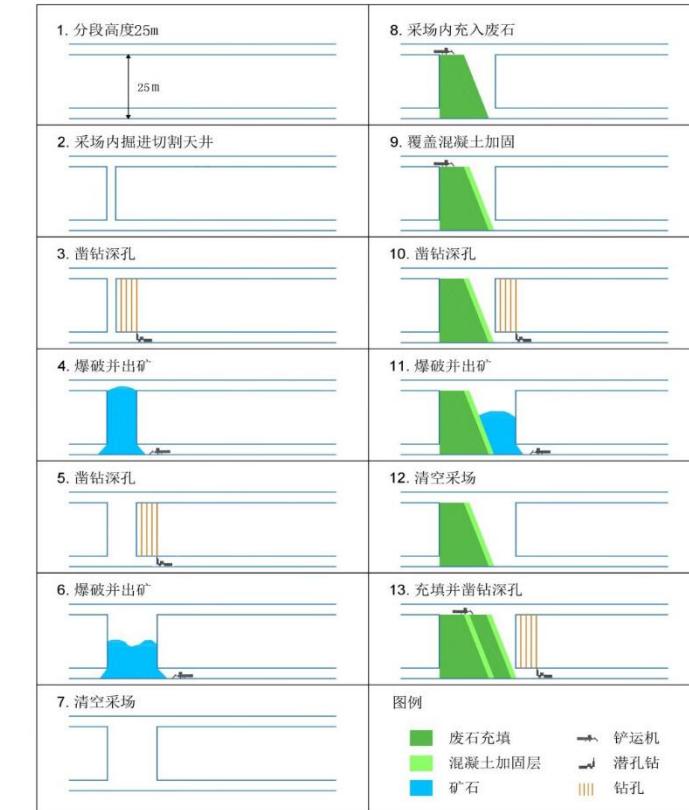
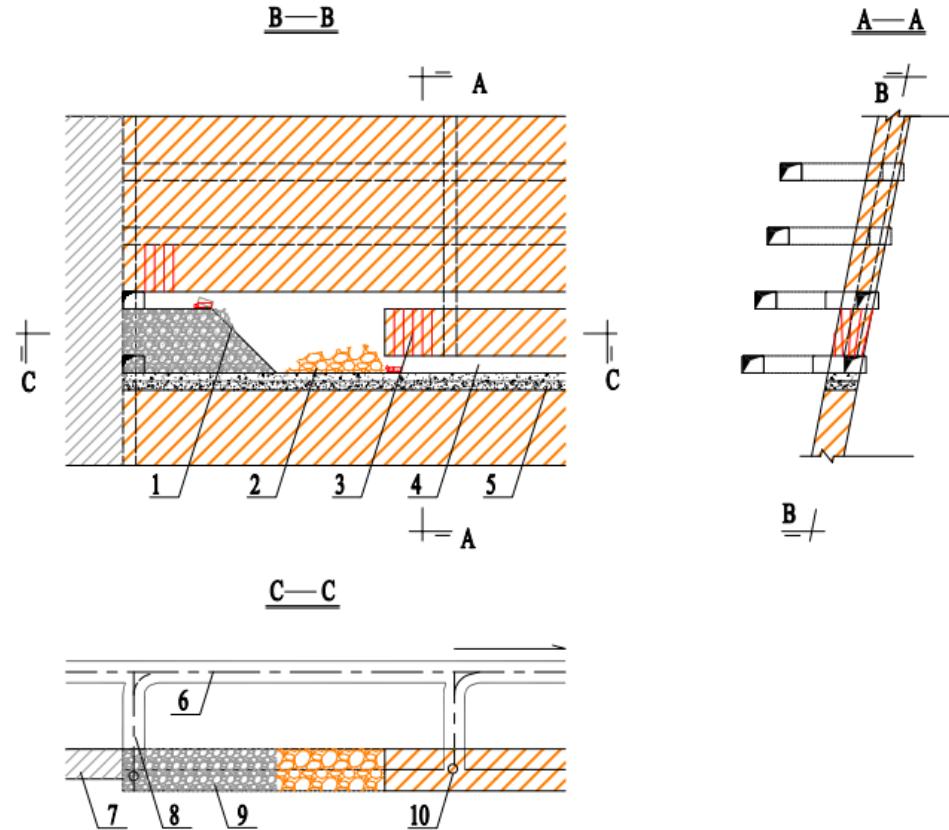
该方法可以使矿石处于流动状态，预防矿石板结。

## 开发了下向序次梯段式爆破落矿技术

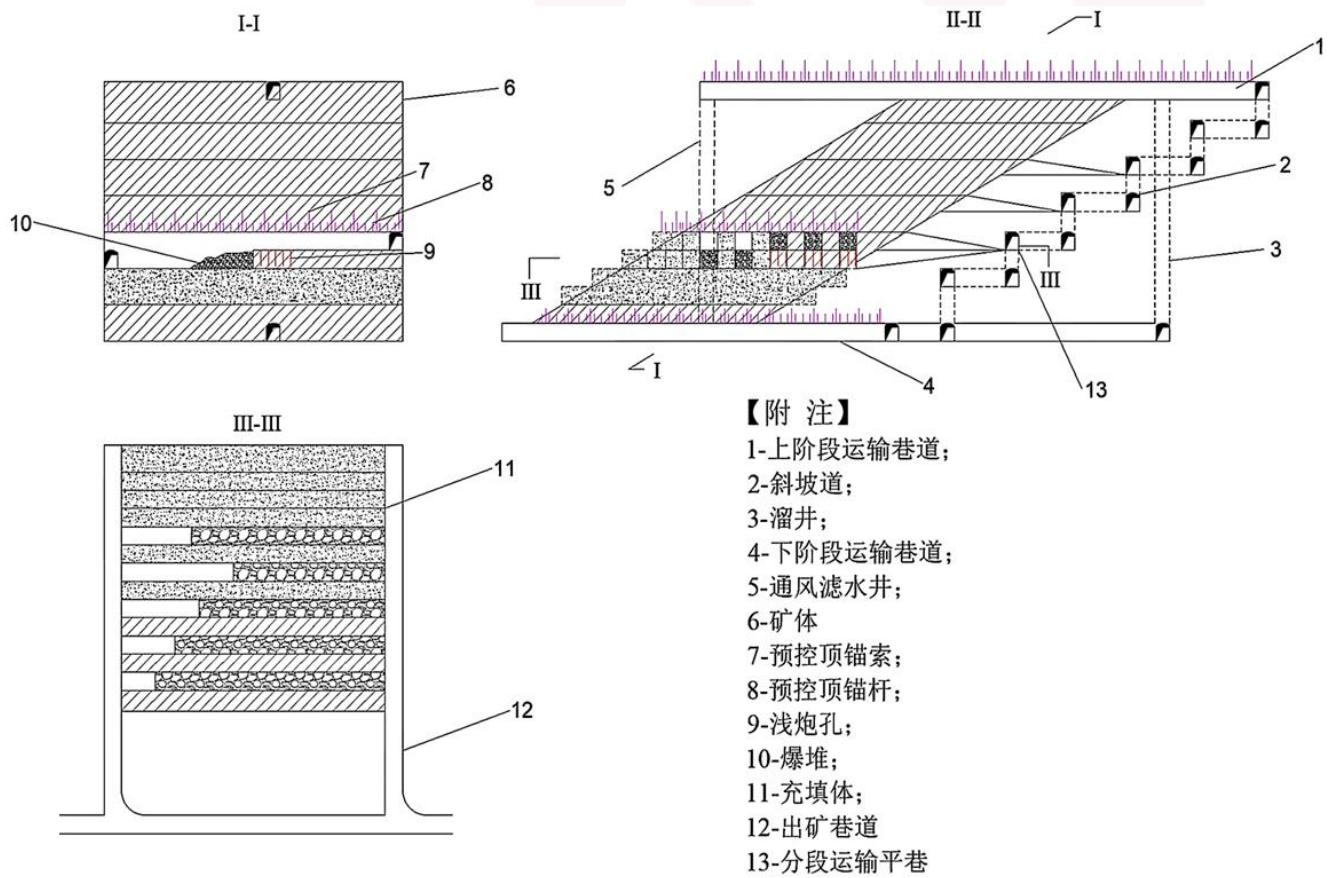
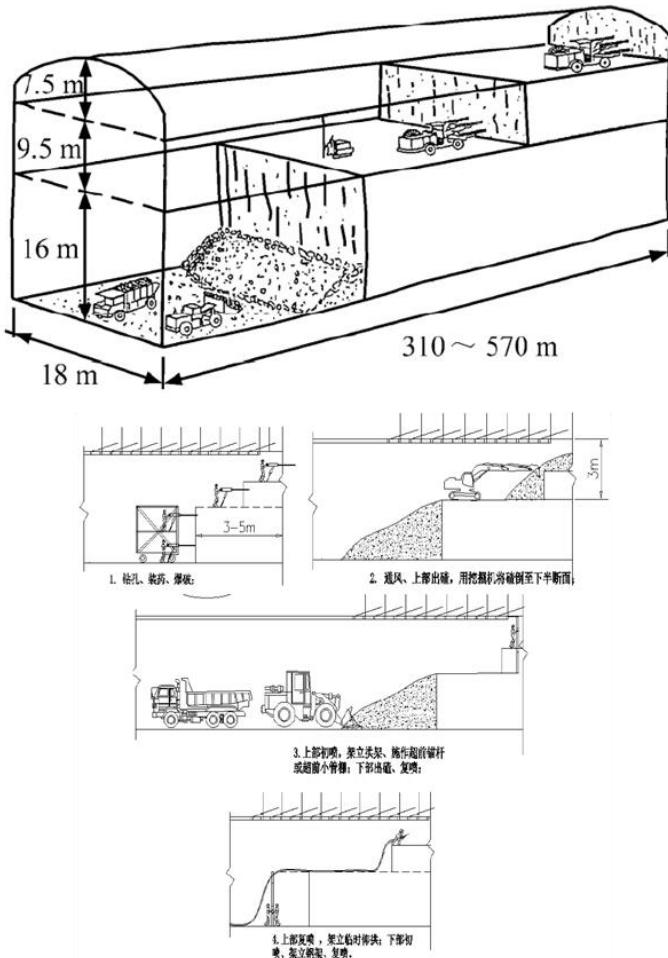


落矿效率提高50%、爆破振动降低25%以上

## 开发了预控顶长矿房连续落矿干式充填采矿法



## 开发了预控顶高进路充填采矿法



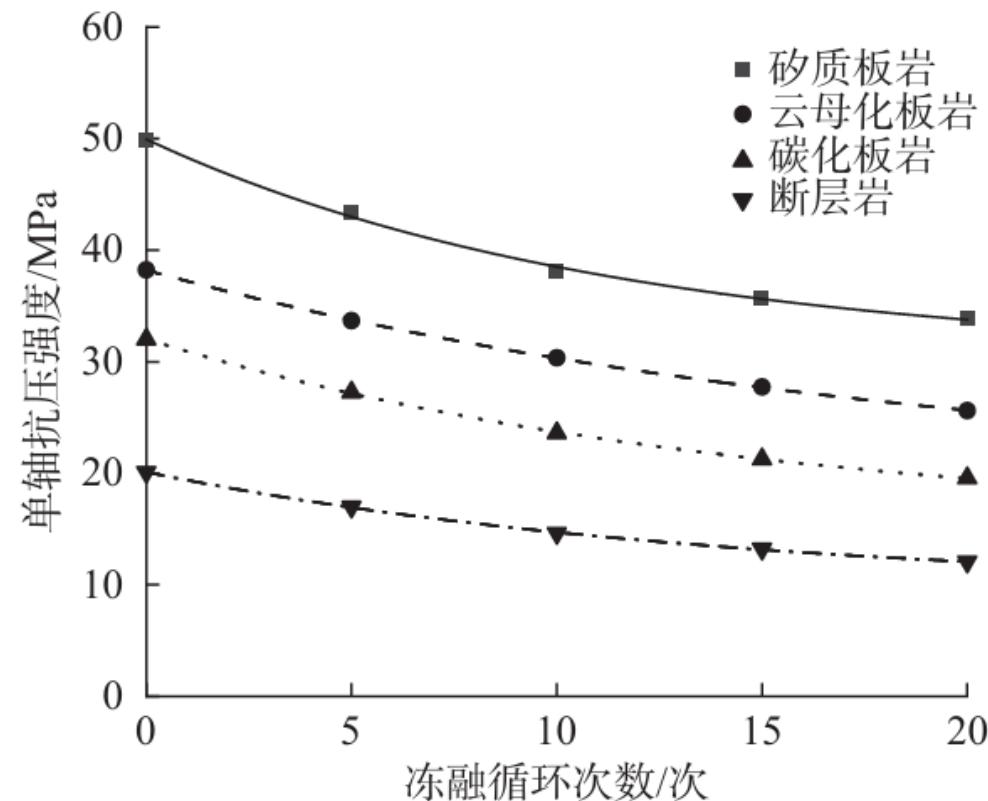
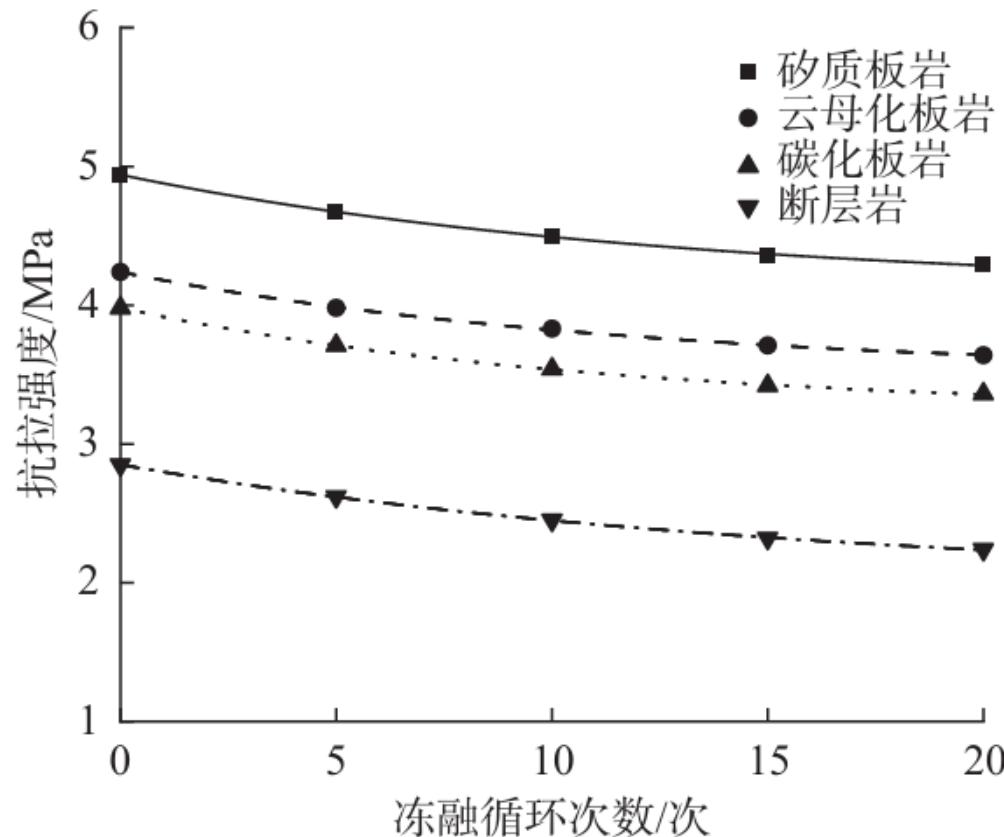
- 研究现状与意义
- 高寒高海拔地下开采技术
- **高寒高海拔环境采掘工程稳定性控制技术**
- 工程实例
- 结论

## 高寒高海拔矿山采场、井巷有结冰现象



## 冻融循环作用下围岩物理力学特性演化规律

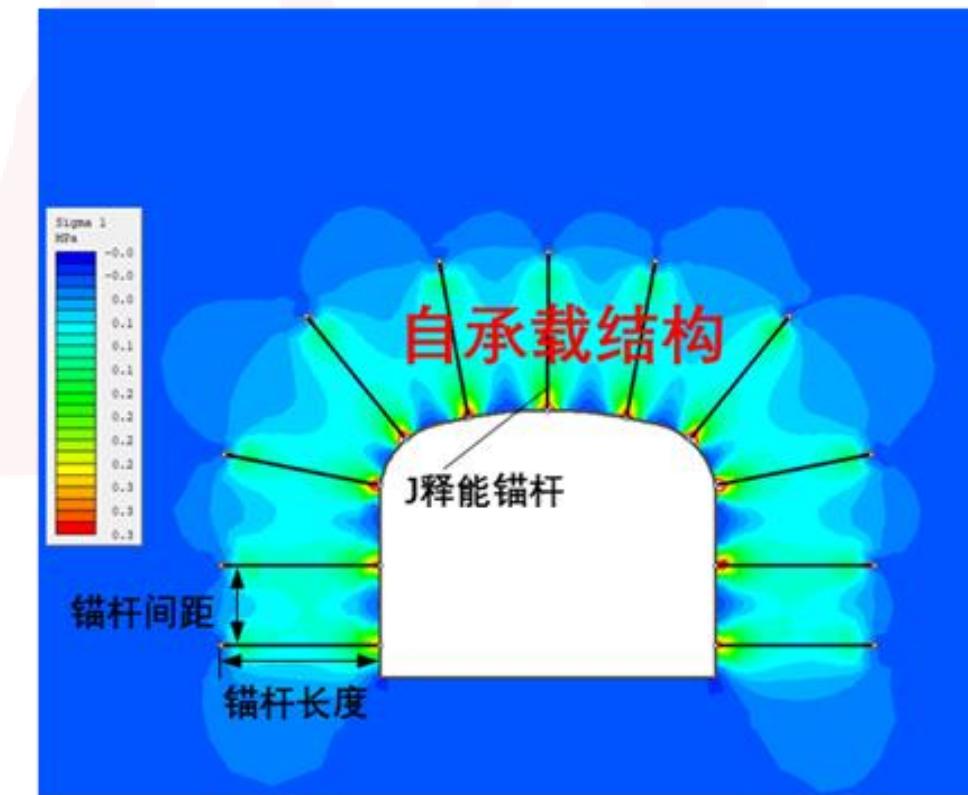
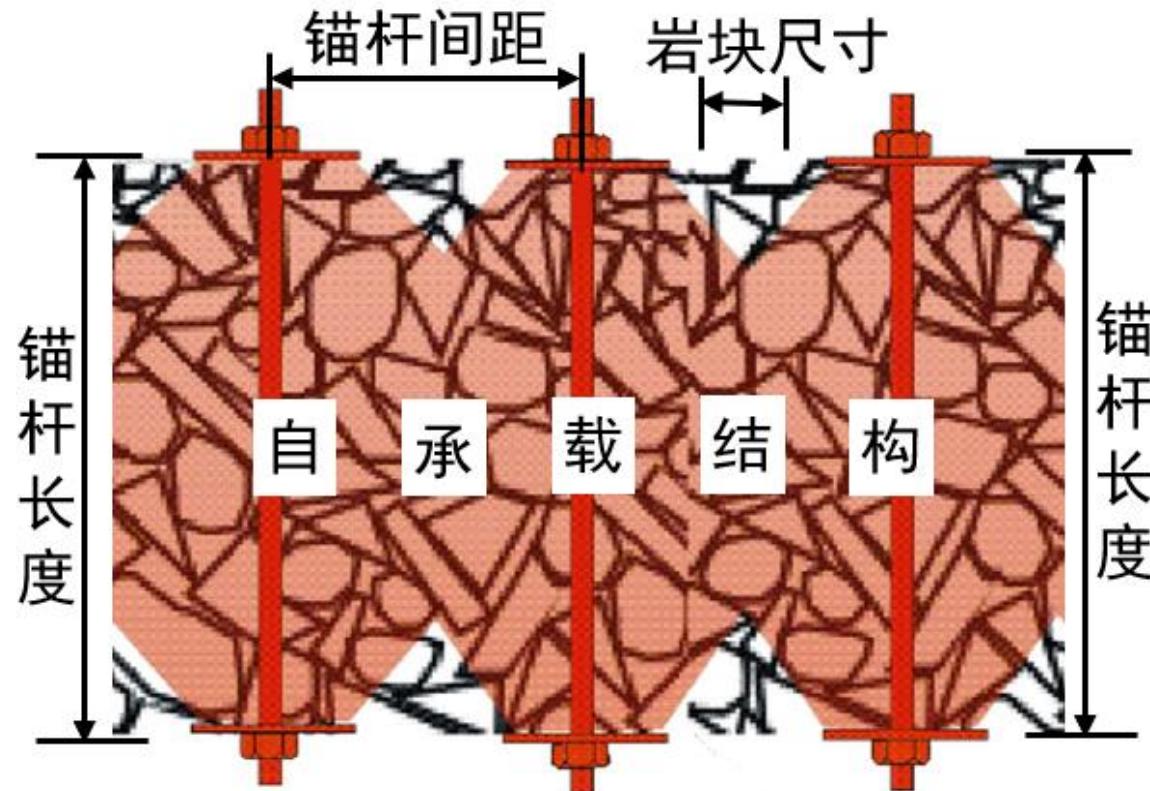
在季节性冻融循环期间，冻胀力萌生与消散导致节理、裂隙反复张开和闭合，改变了地质体的物理力学性质，严重影响岩体的强度、完整性和稳定性。



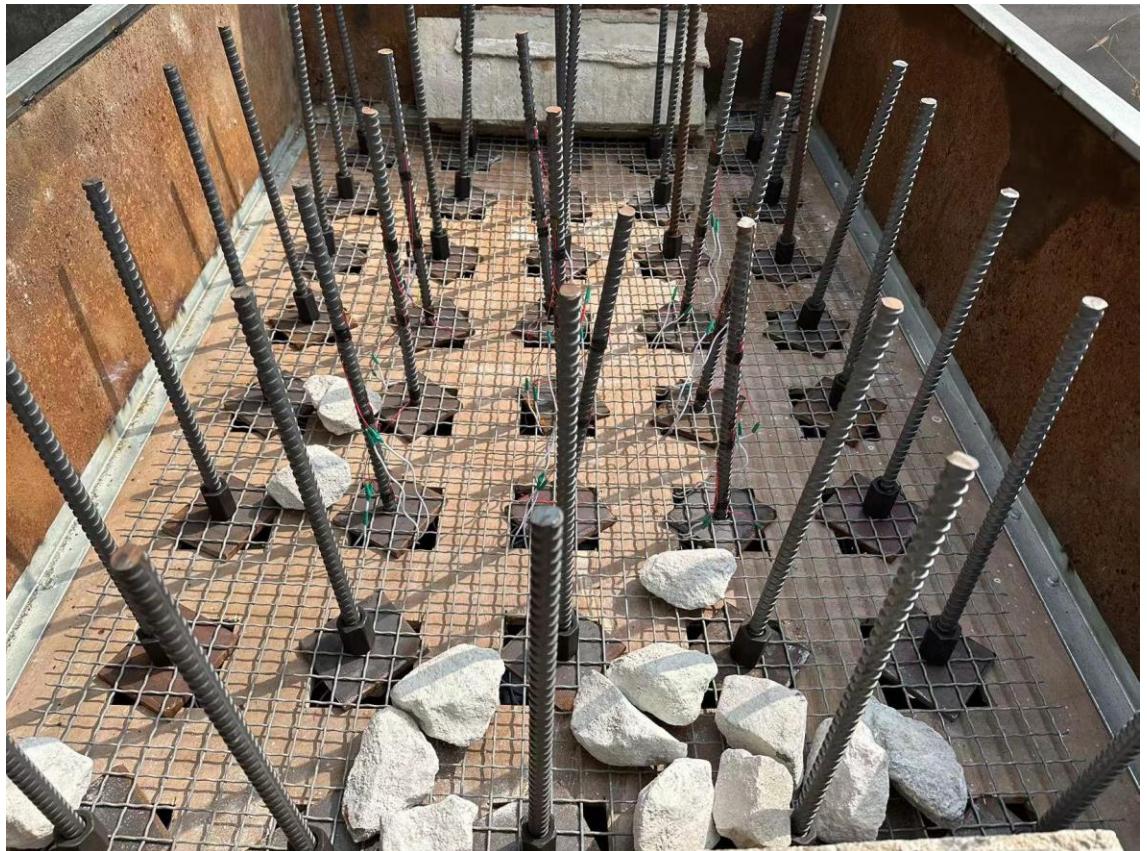
## 矿山支护存在“两级分化”现象



## 开发自承载主动释压支护技术—锚杆锚固采用抗冻水泥浆液胶结



## 开发自承载主动释压支护技术



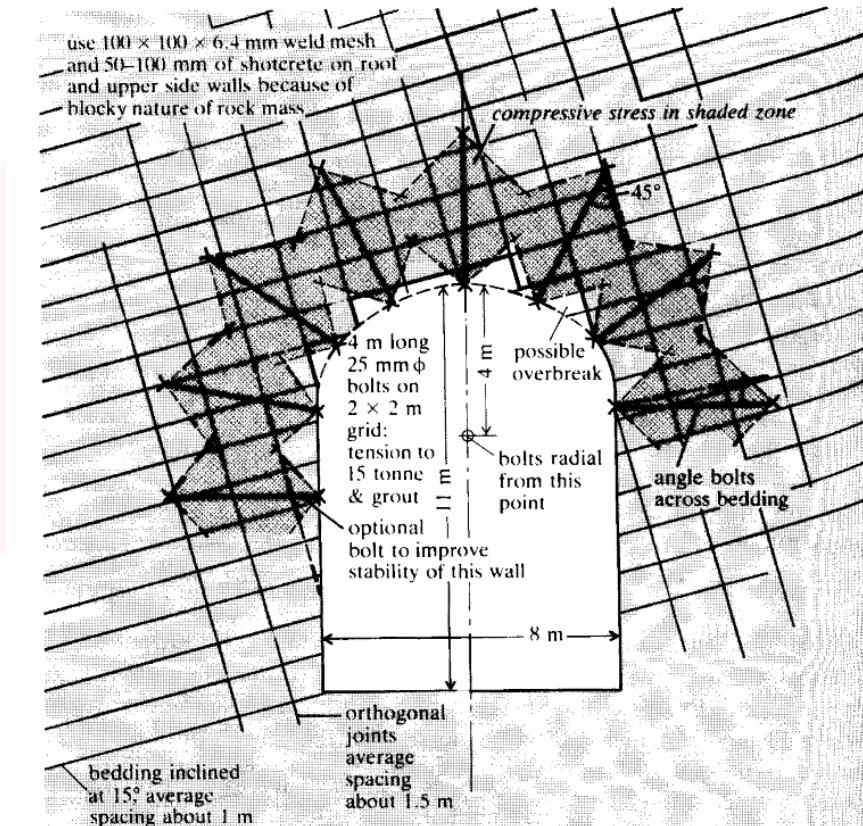
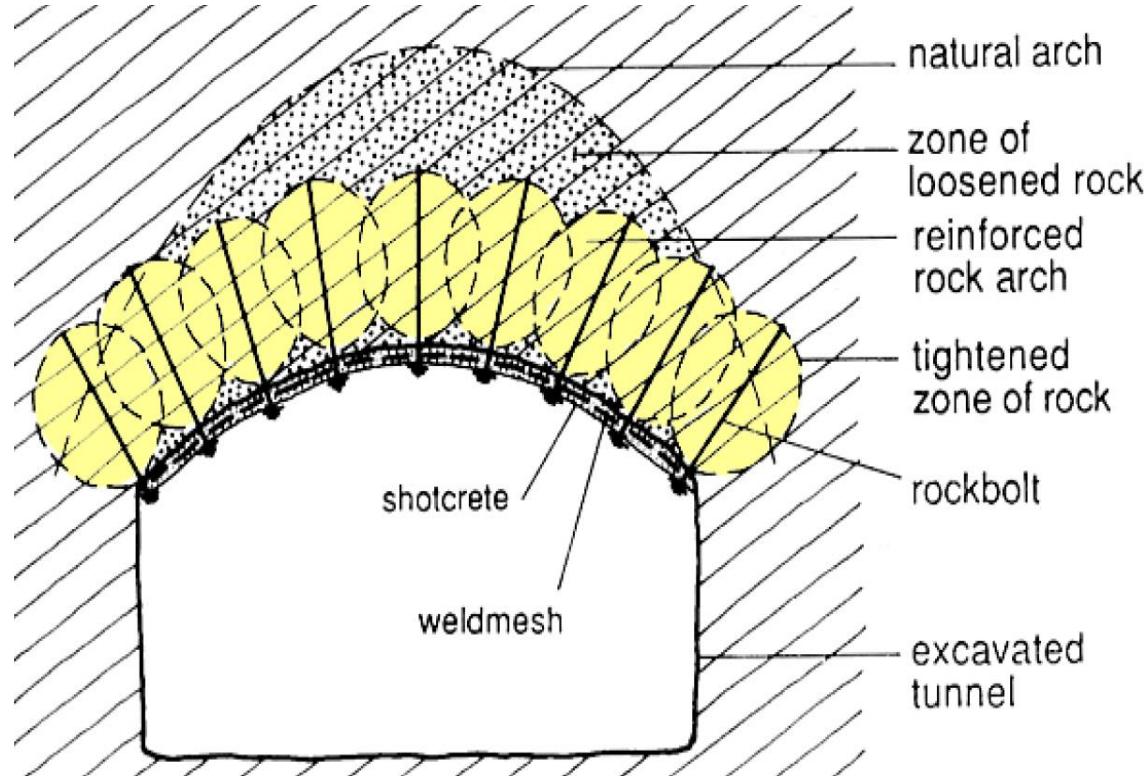
## 开发自承载主动释压支护技术



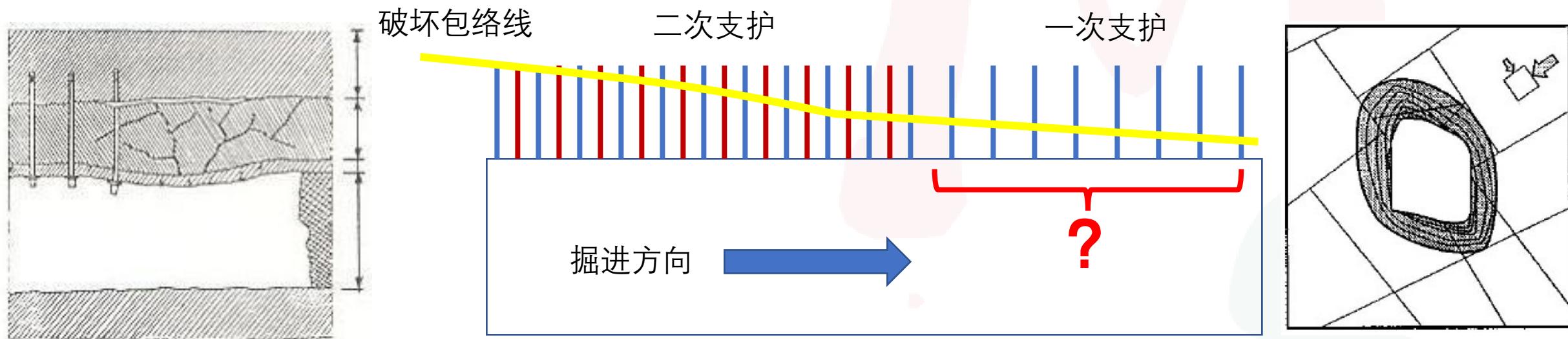
## 开发自承载主动释压支护技术



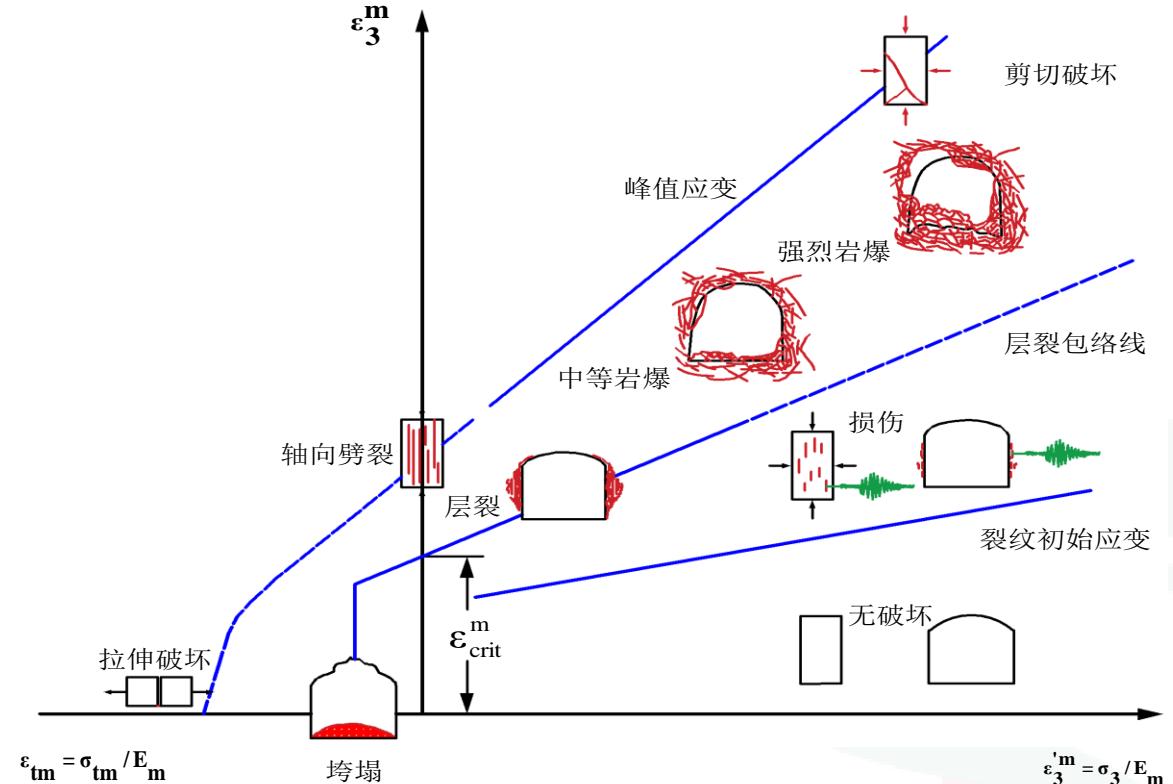
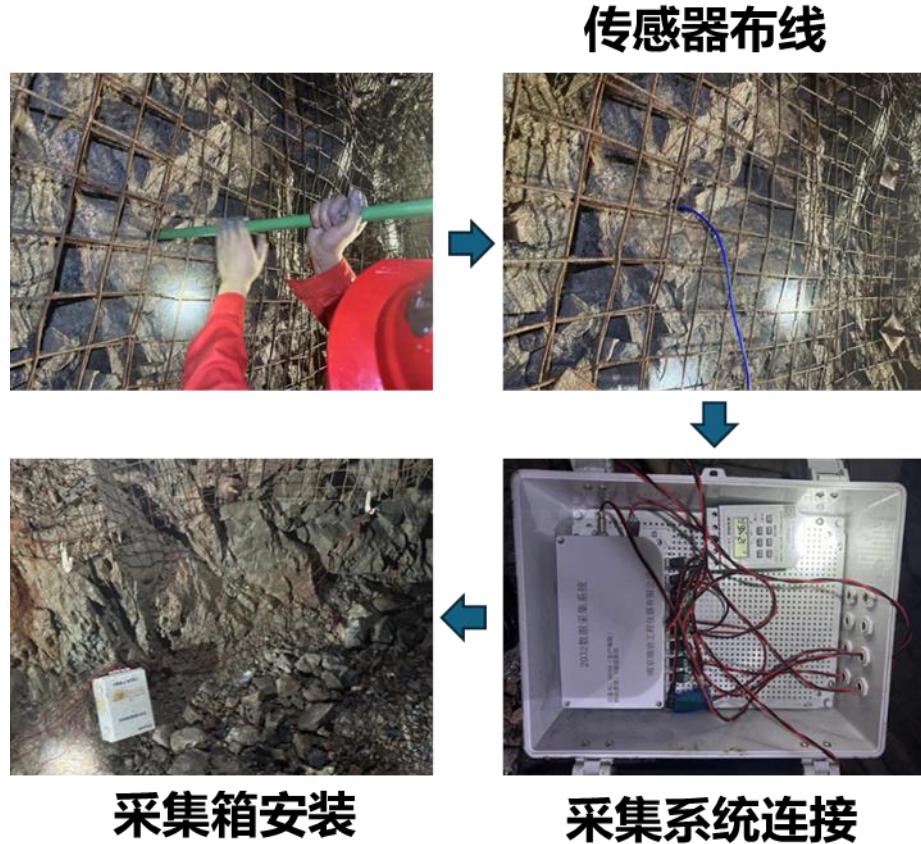
## 开发自承载主动释压支护技术



## 开发自承载主动释压支护技术

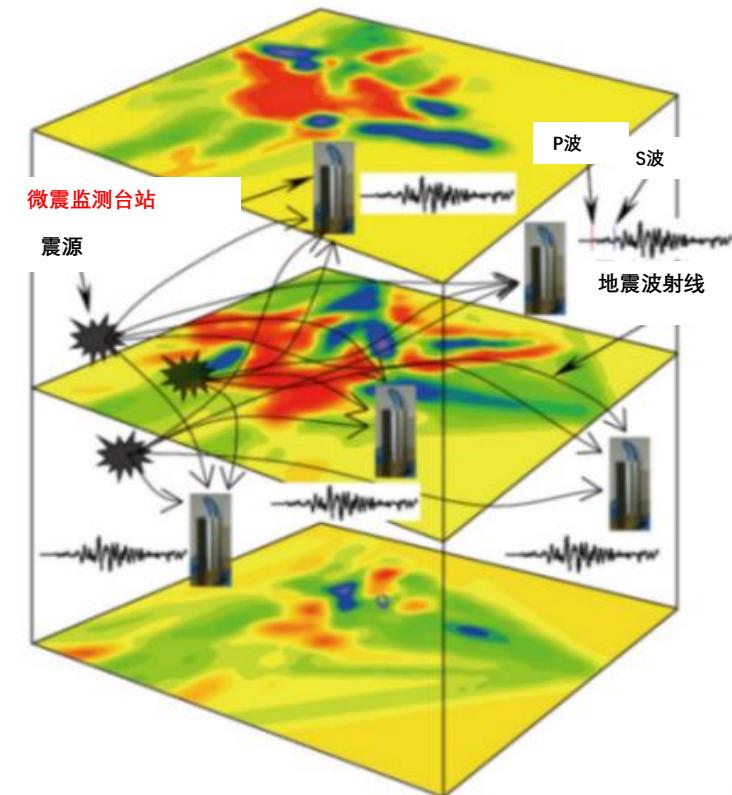


开发了微应变监测技术，首创采动岩体应变失稳判据



地压监测灵敏度提升超90%

## 开发了地表微地震监测层析成像技术



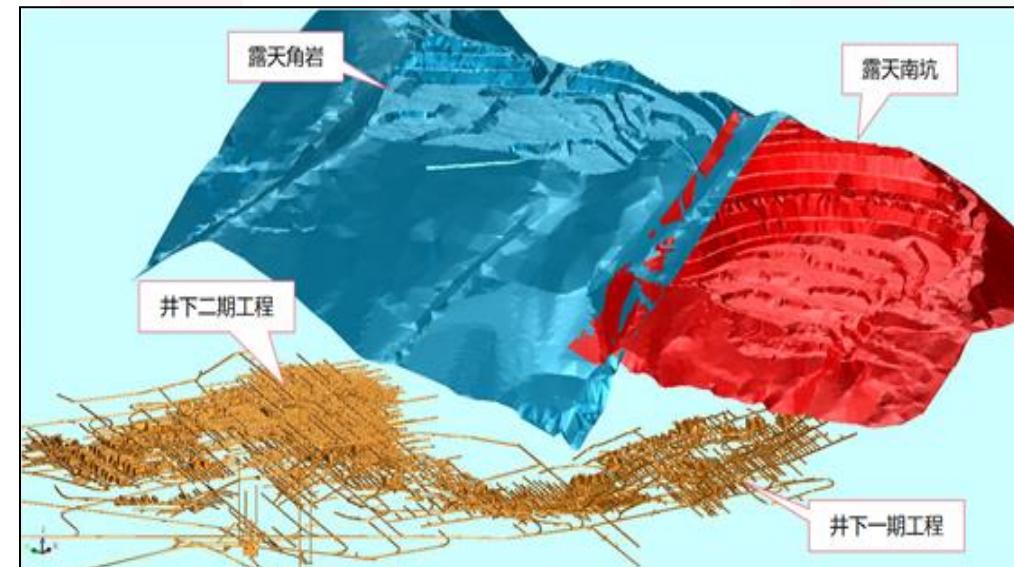
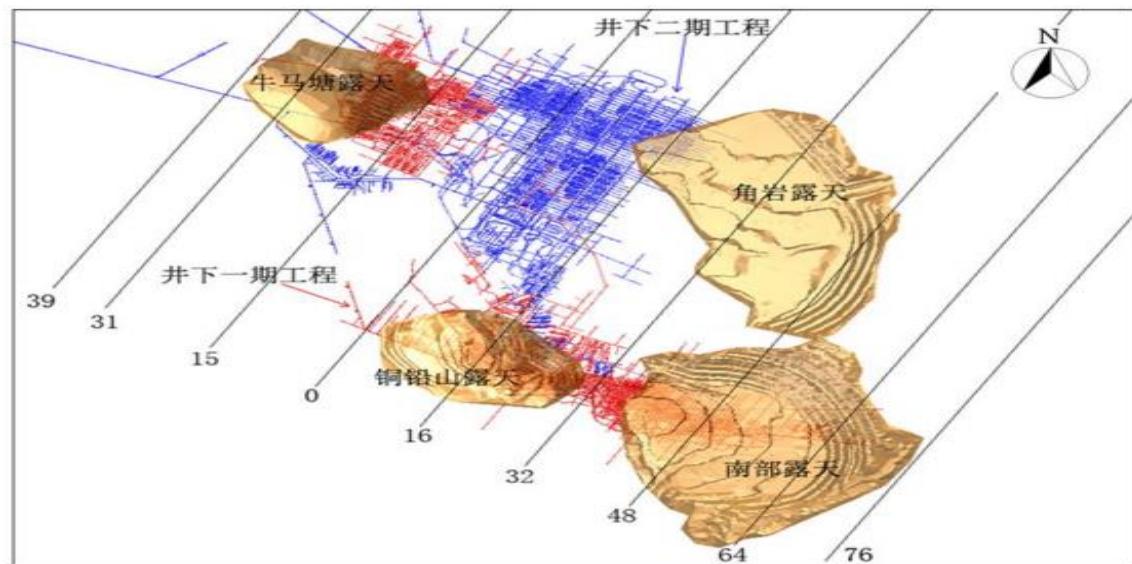
- 研究现状与意义
- 高寒高海拔地下开采技术
- 高寒高海拔环境采掘工程稳定性控制技术
- 工程实例
- 结论

## 4.1 西藏华泰龙矿业公司

矿山海拔4000~5407m，年平均气温为0°C。位于拉萨市甲玛乡境内，距拉萨市中心68公里，公司目前拥有采矿权1宗、面积6.74平方公里，探矿权2宗、面积77.17平方公里，当量铜资源储量已达世界级矿山规模。

角岩露天、南部露天、矽卡岩地下北采区以及矽卡岩地下南采区部分，目前总体生产能力为 $1260 \times 10^4 \text{t/a}$ 。

矽卡岩型矿体地下开采分北采区和南采区，其界线为矽卡岩型矿体产状急剧变化部位，北采区为缓倾斜矿体，赋存于47~48勘探线之间，4550m标高以下；南采区为倾斜、急倾斜矿体，赋存于27~88勘探线之间，5100~4400m标高之间。



## 4.1 西藏华泰龙矿业公司

### ➤ 矿岩破碎、自稳定性差

氧化矿带矿体内成巷困难、巷道支护成本高、作业安全性差；

回采时顶板及侧帮极易垮落，采场垮塌导致矿石无法回收，造成大量矿石损失；

增加支护工作量，劳动者工作强度大，采场综合生产能力较低。

### ➤ 吨矿价值较低

氧化矿带Cu品位在1%左右，选矿回收率 $\leq$ 70%，加上伴生Au、Ag等，矿石吨矿价值600元/吨。

矿石吨矿价值不高，影响采矿方法方案选择。

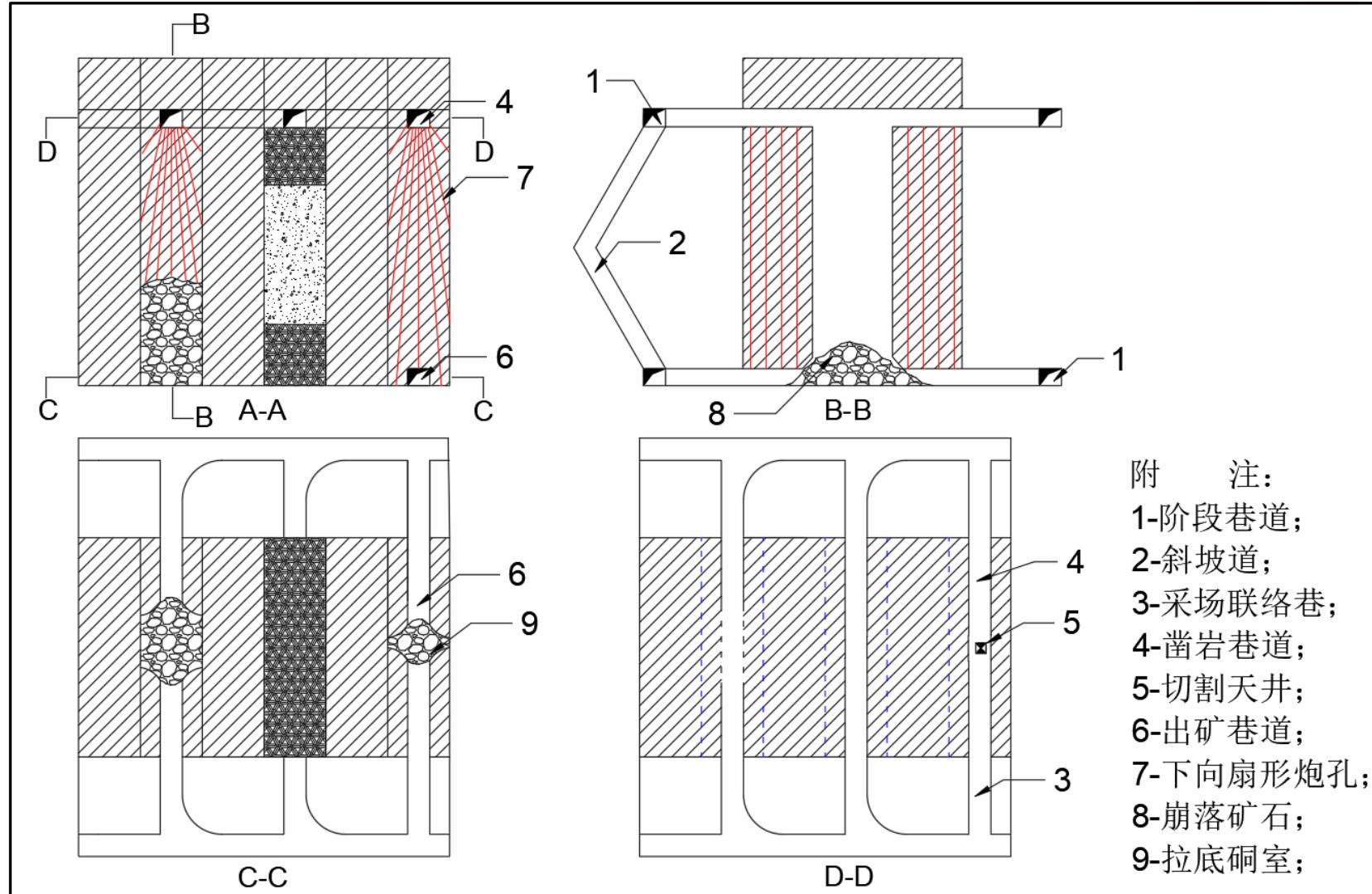
### ➤ 要求采场生产能力大

由于地表不允许塌陷，无法采用生产能力较大的崩落采矿法；

矿岩破碎，采用大跨度和较大暴露面积及时间的空场法较困难。

## 4.1 西藏华泰龙矿业公司

### 采矿方法



### 技术经济指标

采切比 **37.3m<sup>3</sup>/kt**

矿石损失率 **4.4%**

矿石贫化率 **9.2%**

采场生产能力 **1100t/d**

### 技术优势

1. 采准工程量 **减少50%以上**
2. 采准工程时间 **缩短60%以上**
3. **地压便于防控**

## 4.1 西藏华泰龙矿业公司

### 矿山机械化采矿装备



(a) CKQ150潜孔采矿台车



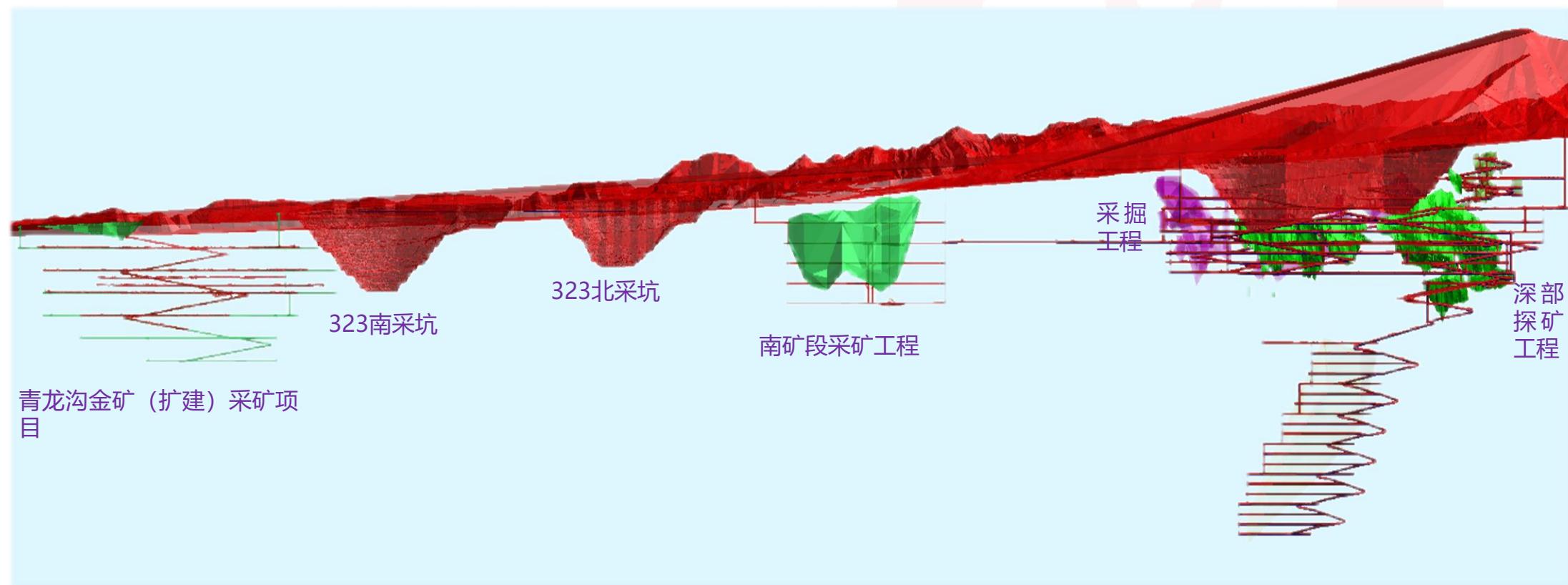
(b) Simba 1354型液压凿岩台车



(c) BOOMER281掘进凿岩台车

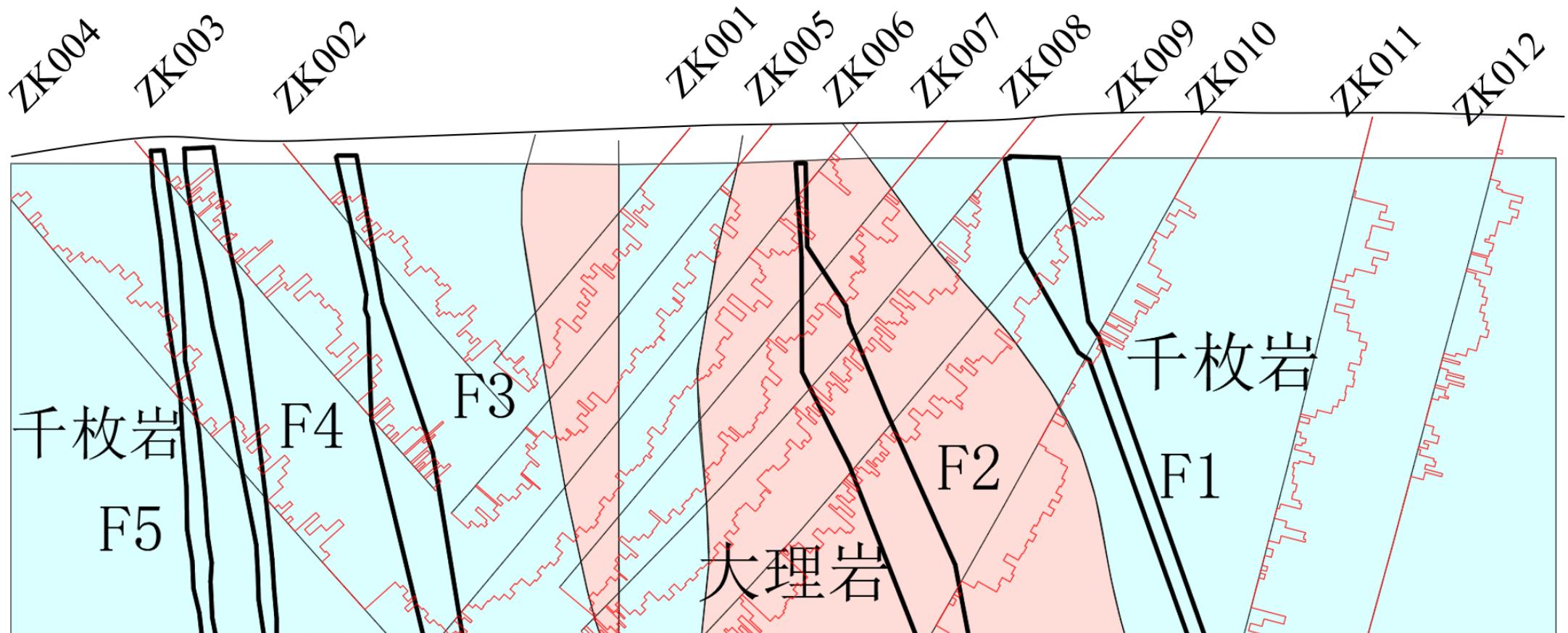
## 4.2 青海大柴旦矿业公司

矿山海拔3400m，年平均气温为6°C。青龙沟金矿60万吨/年，包含青龙沟北矿段、南矿段、二三矿带、323南露天、323北露天5个项目，其中323南采坑已开采至设计标高，323北采坑已闭坑回填。建设1460m深竖井及细晶沟露天项目也即将开始建设。



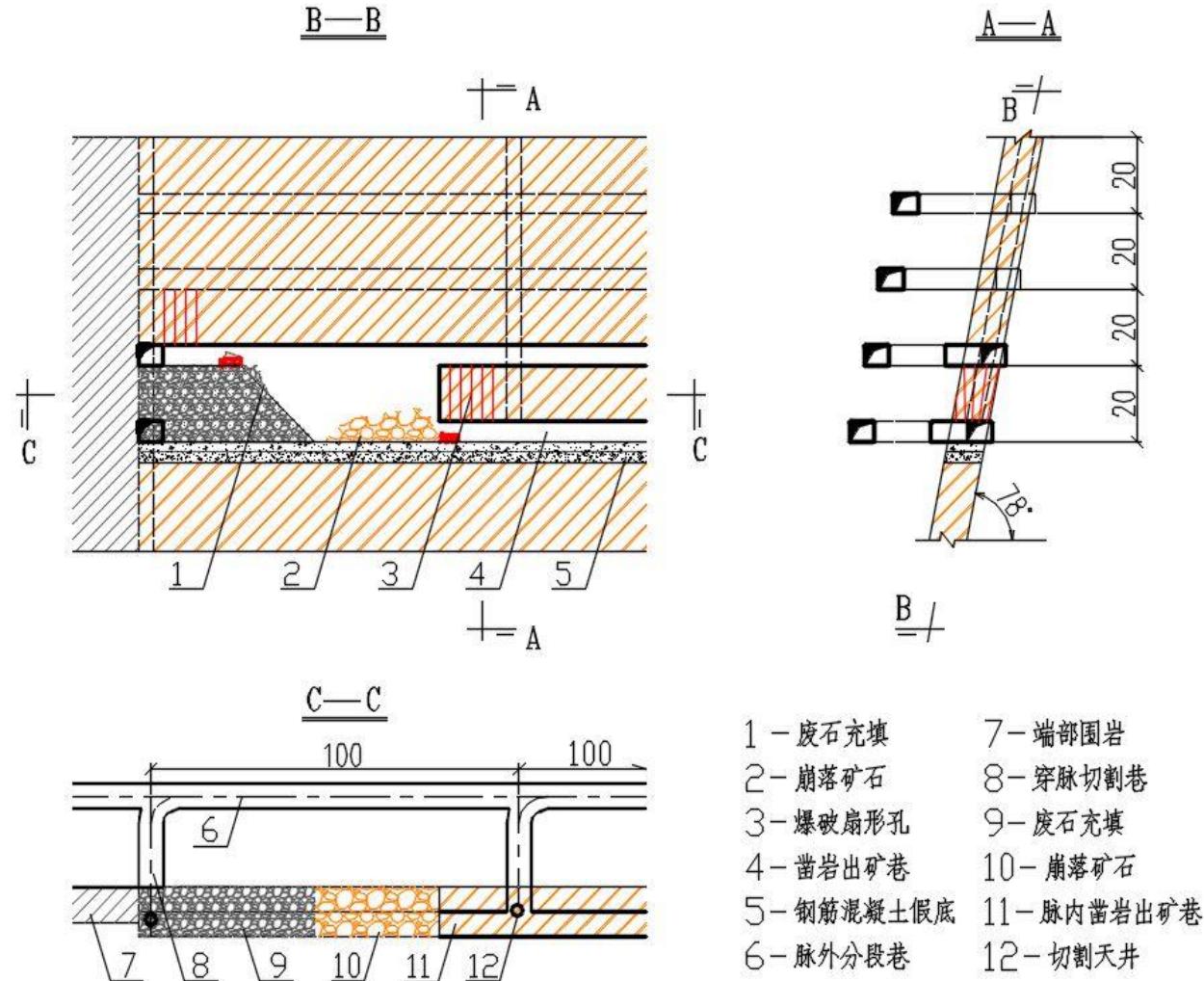
## 4.2 青海大柴旦矿业公司

已探明黄金金属量超过100t

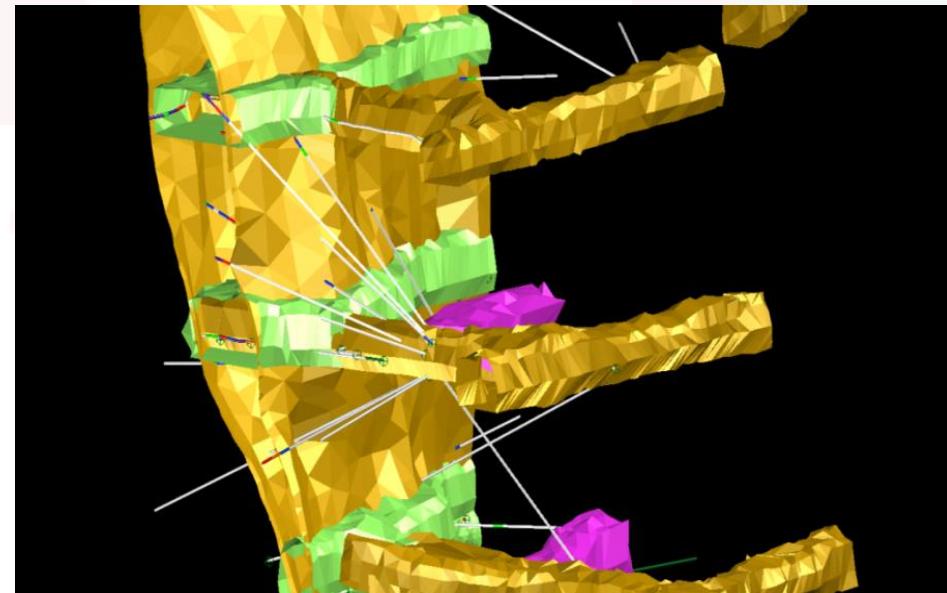


## 4.2 青海大柴旦矿业公司

### 预控顶长矿房连续落矿干式充填联系采矿工艺

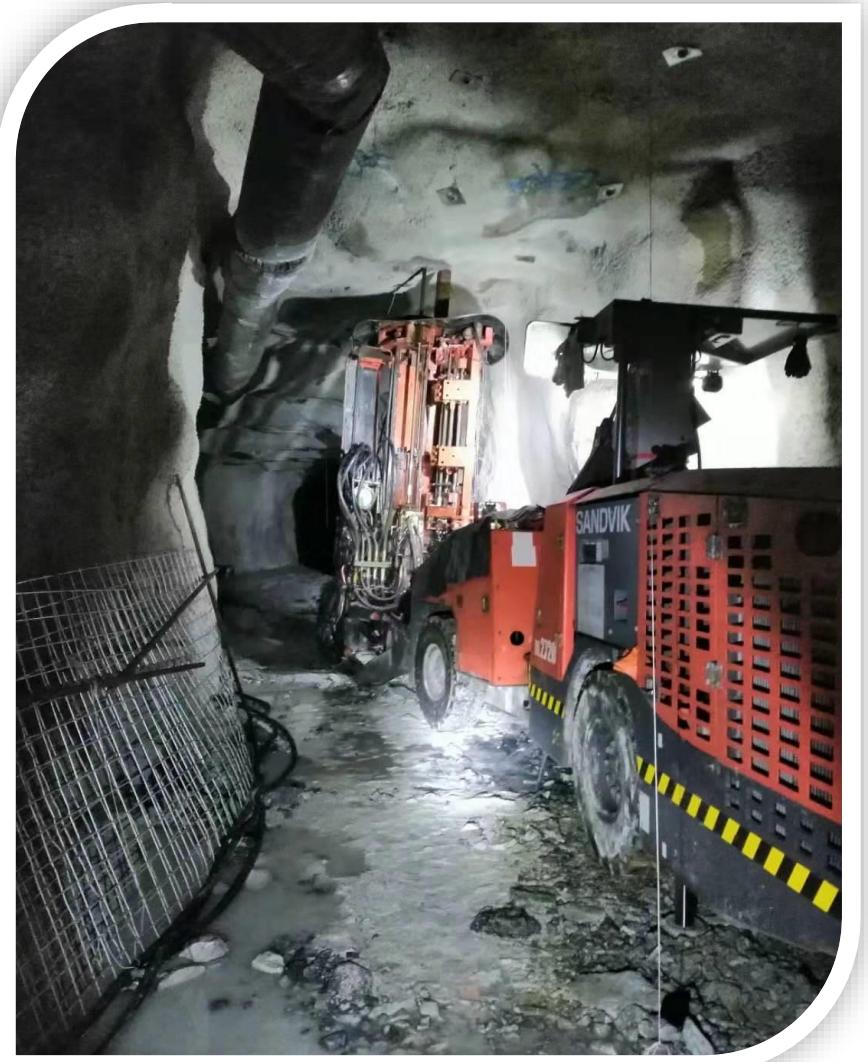


**采矿方法:** 连续充填分段空场采矿法, 分段高度为20~25m。每个分段内在矿体底板处掘进脉内平巷, 上部作为充填平巷, 下部作为凿岩出矿平巷。该采矿方法机械化程度高, 生产效率高, 安全性有保障。



## 4.2青海大柴旦矿业公司

### 预控顶长矿房连续落矿干式充填联系采矿工艺



#### 技术经济指标

采切比 $89.5\text{m}^3/\text{kt}$

矿石损失率 $9.6\%$

矿石贫化率 $7.5\%$

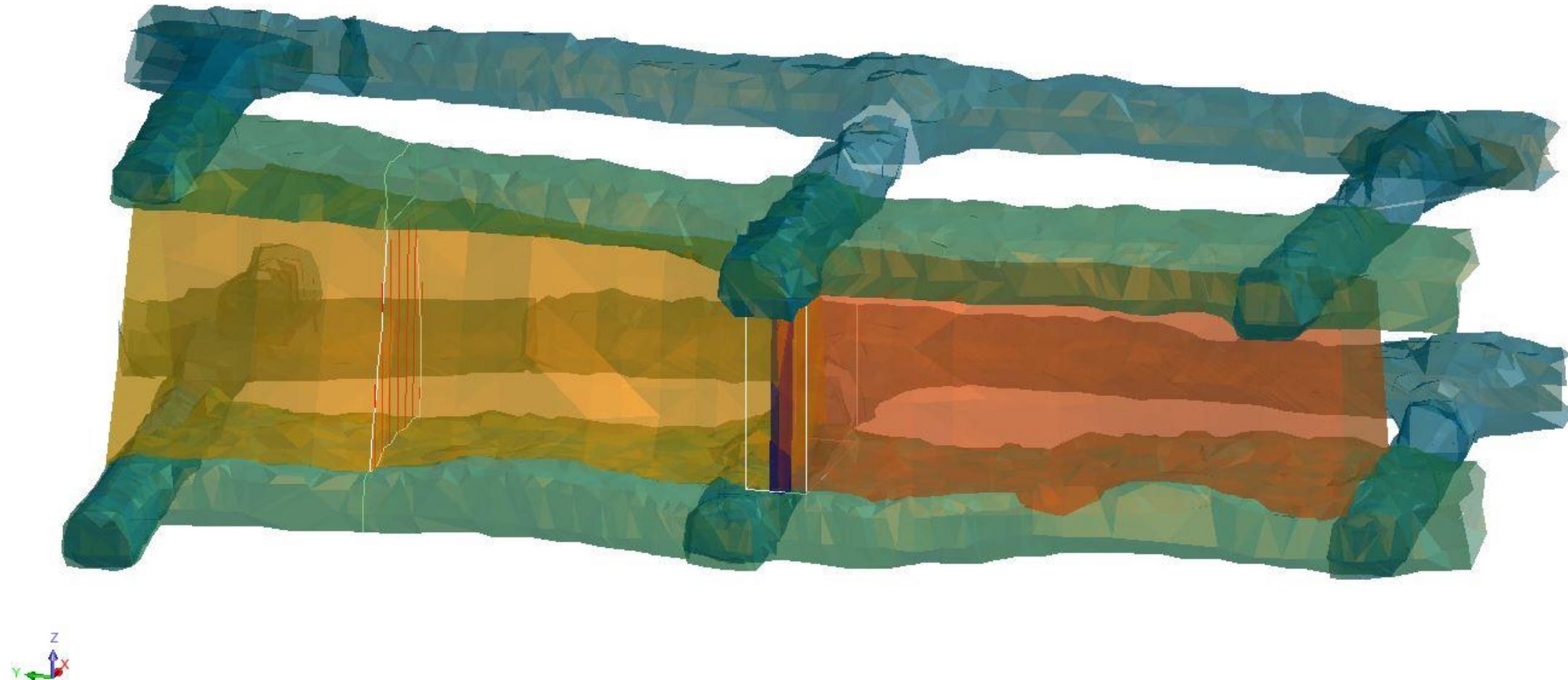
采场生产能力 $310\text{t/d}$

#### 技术优势

1. 采矿效率高，成本低，作业环境好，全工序机械化设备施工，安全有保障等特点。
2. 采用全工序机械化施工，极大的改善了工人作业环境，降低了工人劳动强度，保障安全生产。
3. 采用中深孔采矿方法，**成本节约22元/吨**，施工**效率提高3倍**以上。

## 4.2青海大柴旦矿业公司

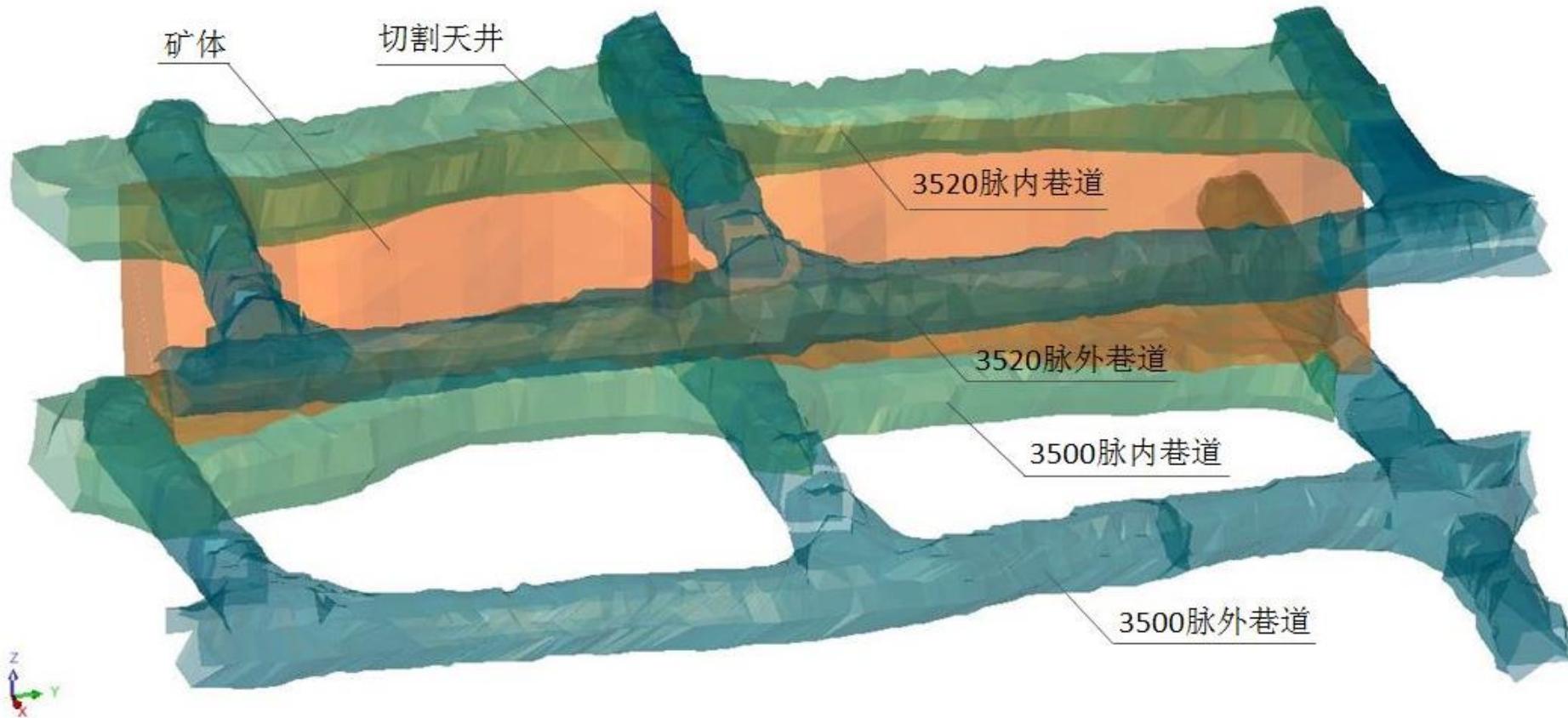
### 预控顶长矿房连续落矿干式充填联系采矿工艺



## 4.2 青海大柴旦矿业公司

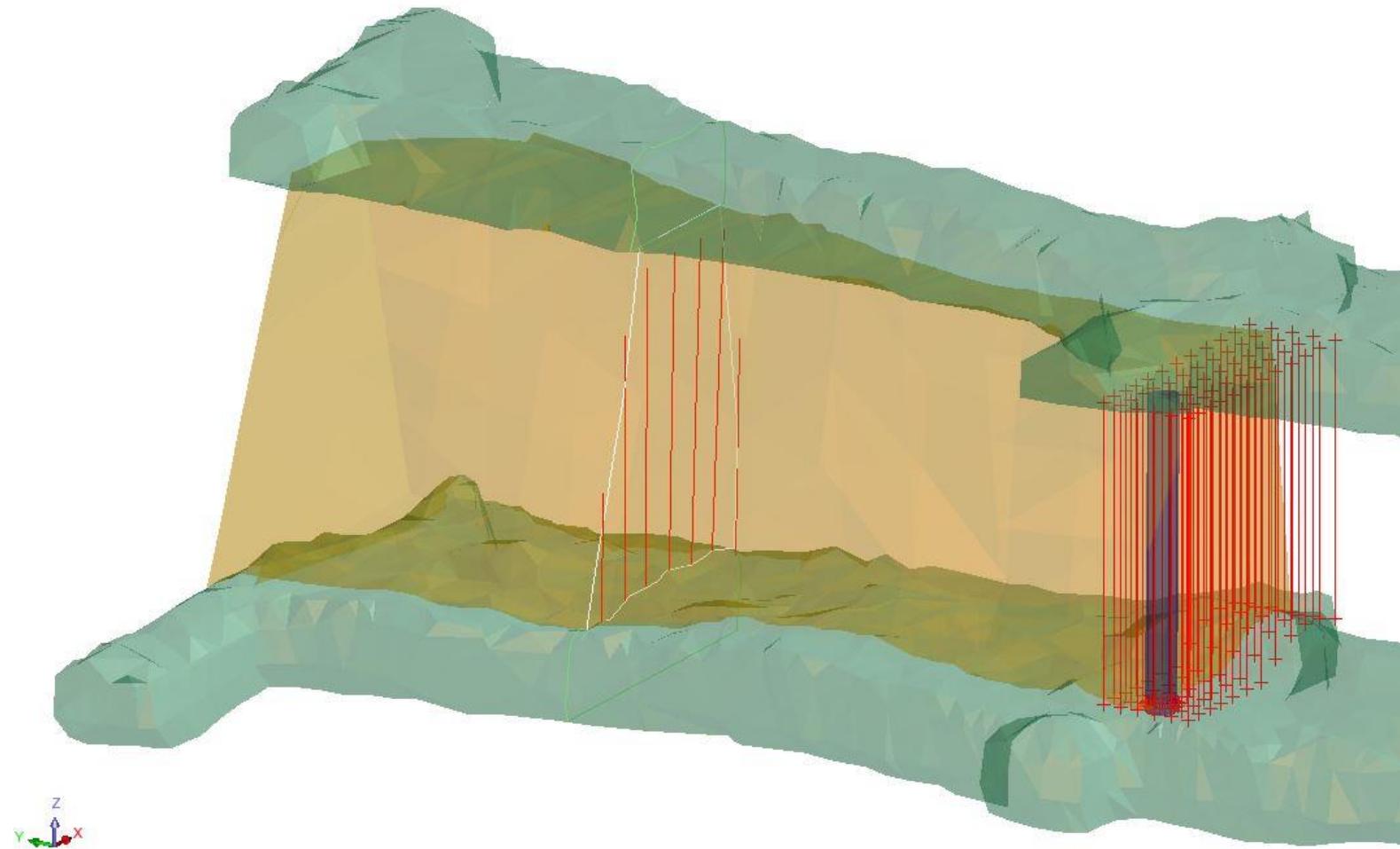
### 预控顶长矿房连续落矿干式充填联系采矿工艺

连续充填分段空场法采矿采准图



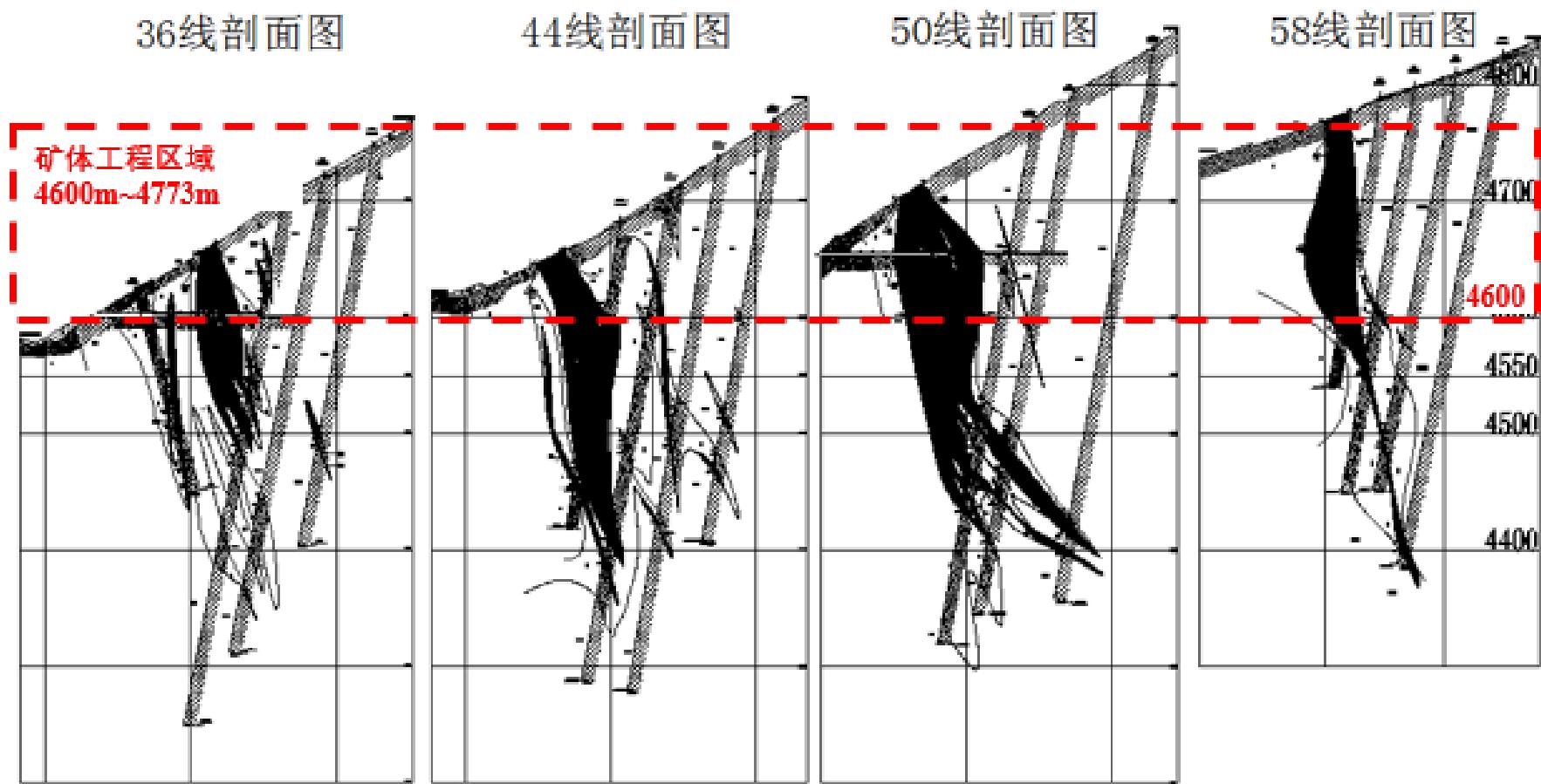
## 4.2青海大柴旦矿业公司

### 预控顶长矿房连续落矿干式充填联系采矿工艺



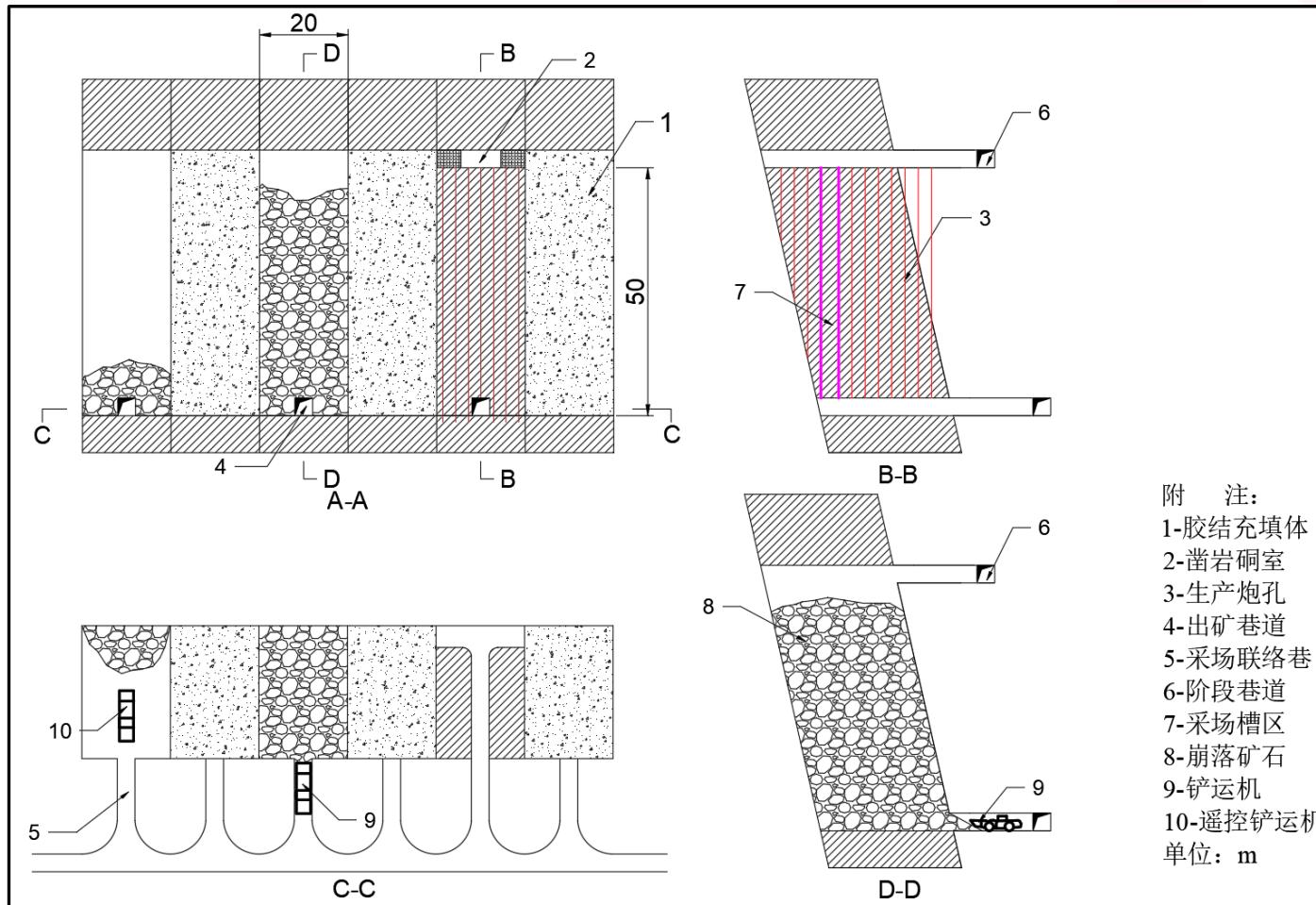
## 4.3 西藏中凯矿业公司

矿山海拔高度4500m, 年平均气温2.9°C。为高山深切割区, 高差大, 地形坡度较大, 地势陡峻。设计生产规模为50万t/年, 矿体平均厚度25m, 倾角73°。



## 4.3 西藏中凯矿业公司

研发了遥控铲运机+平底结构出矿工艺



技术经济指标

采切比 $51.3\text{m}^3/\text{kt}$

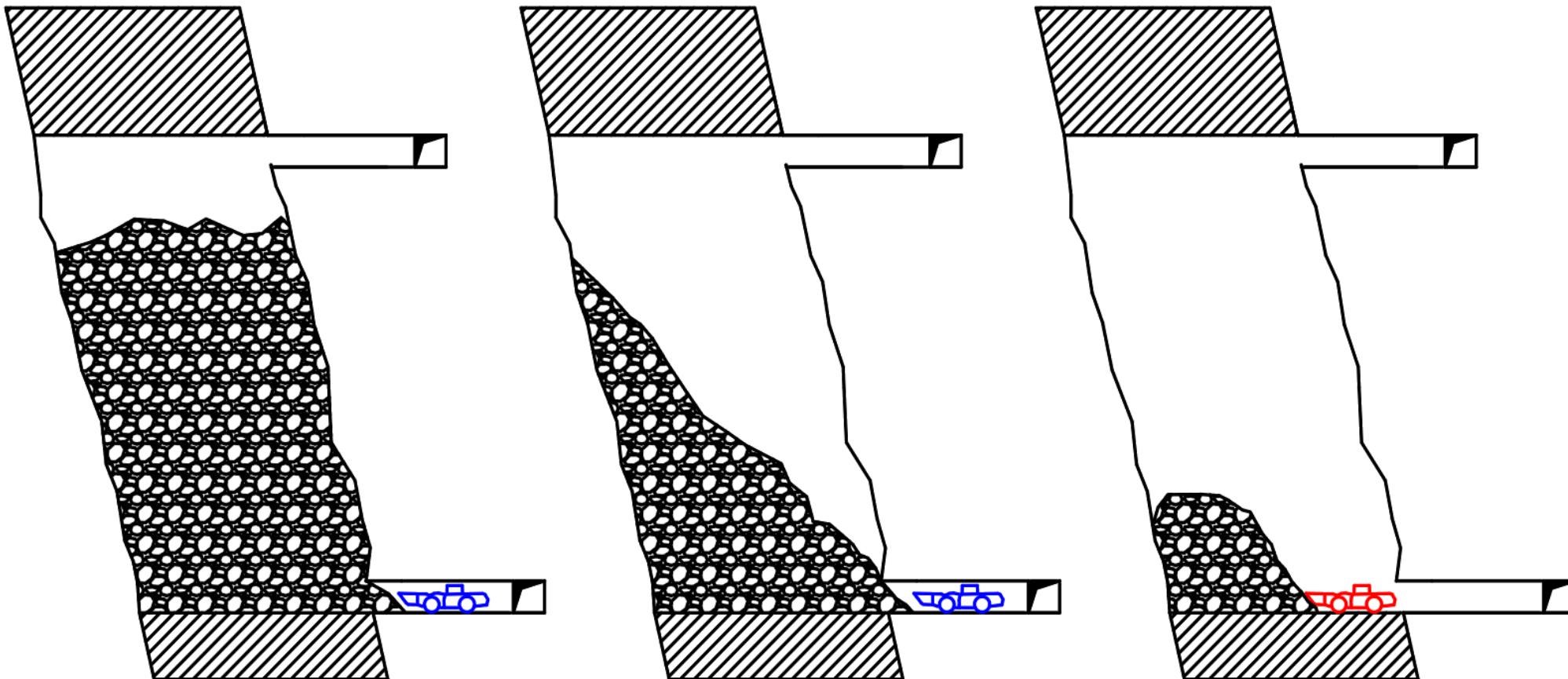
矿石损失率4%

矿石贫化率6.1%

采准工程量降低37%

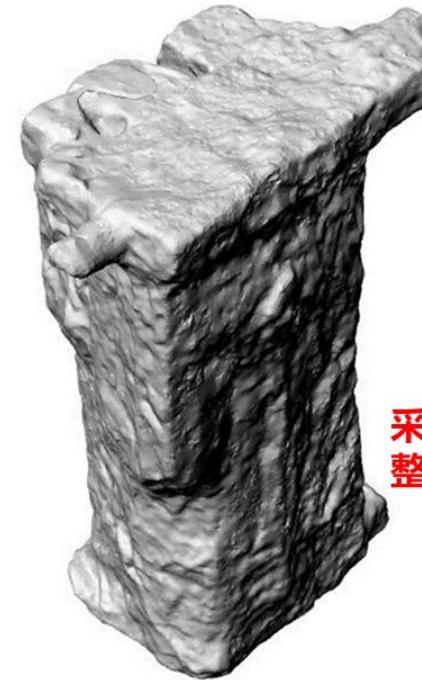
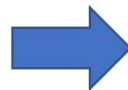
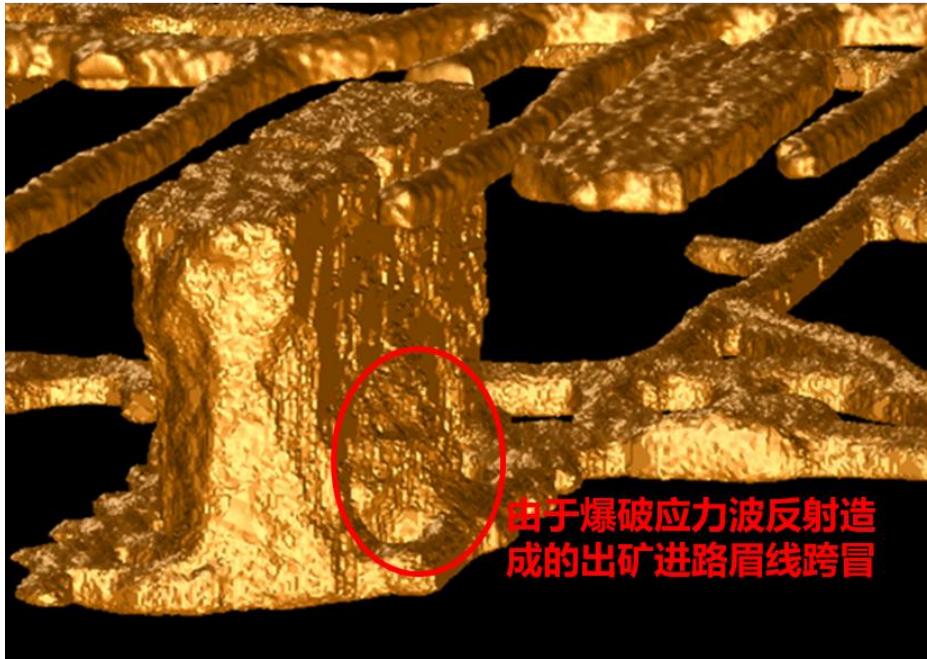
## 4.3 西藏中凱礦業公司

研發了遙控铲運機+平底結構出礦工藝



## 4.3 西藏中凯矿业公司

平底结构出矿技术体系提升了作业安全性，克服了原出矿结构存在进路眉线跨塌严重、安全性差的缺点。避免了在充填体内反掘巷道。



采场两帮完整，无跨冒



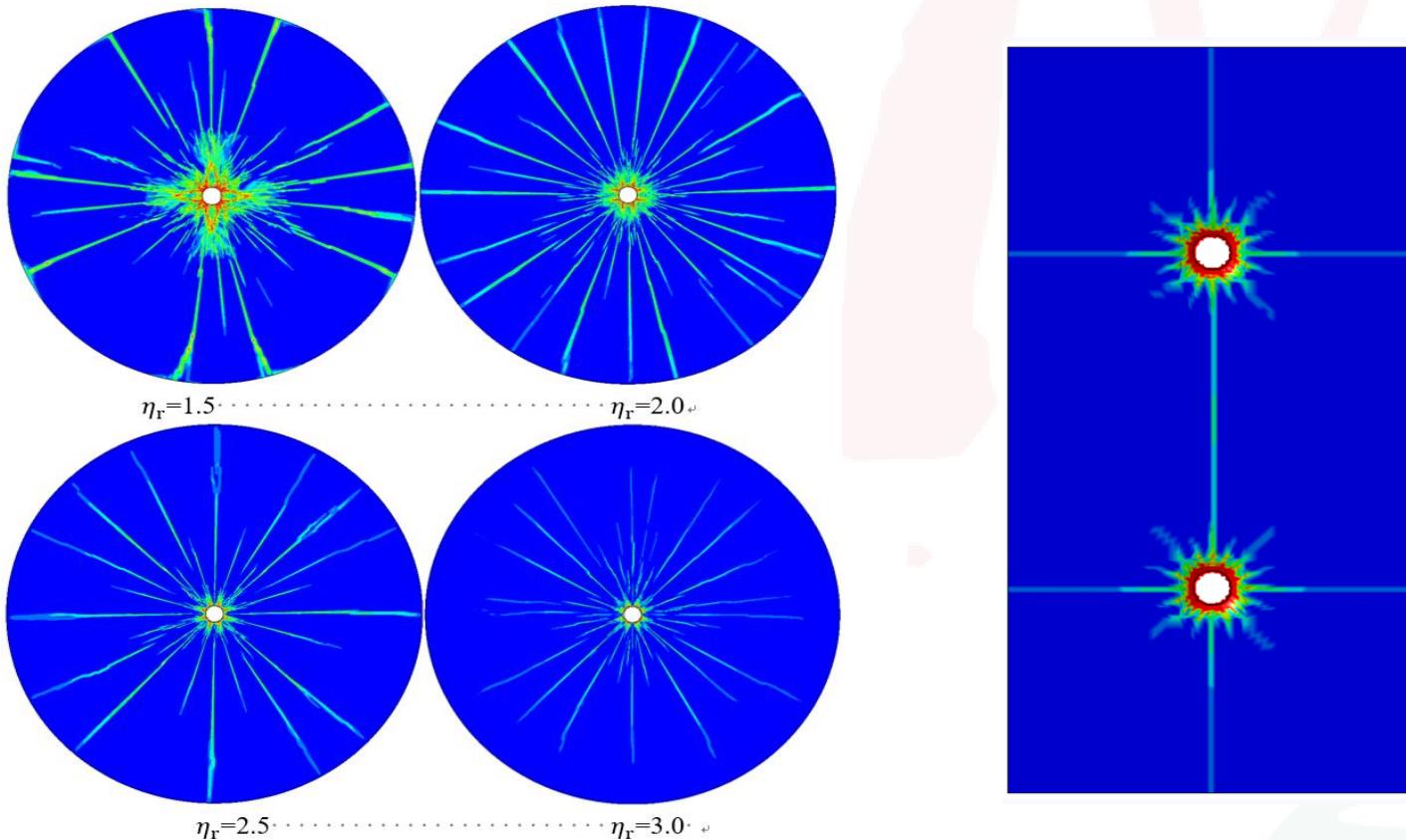
## 4.3 西藏中凯矿业公司

与传统“V”型堑沟出矿结构比，平底结构避免了留设桃型矿柱造成的矿石损失问题，**多采矿石量12%**



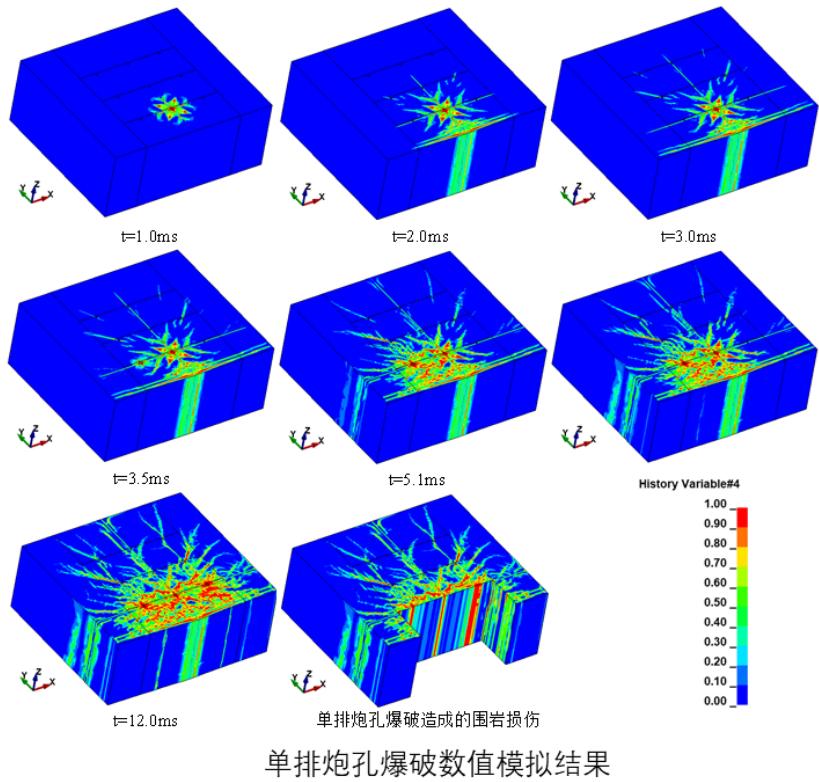
## 4.3 西藏中凯矿业公司

应用采场预裂控制爆破技术，精准控制采场爆破边界，降低爆破振动，减小对地表生态环境的扰动



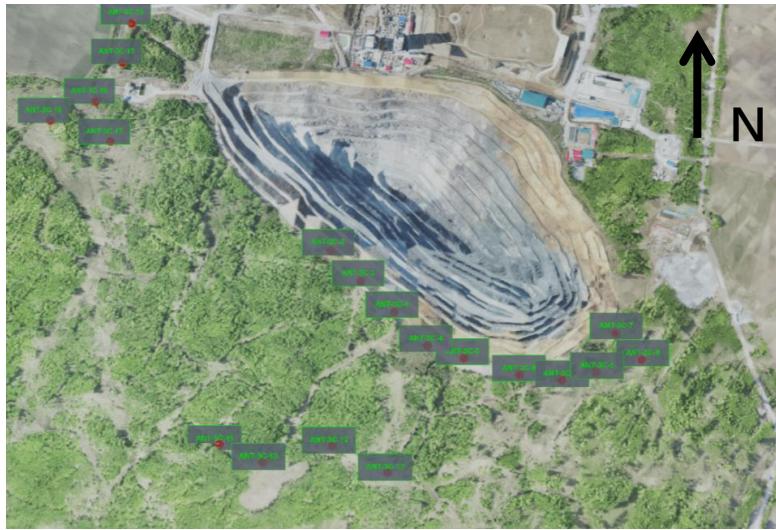
## 4.3 西藏中凯矿业公司

研发了采场大规模序次梯段式爆破落矿技术，通过协同优化多炮孔装药结构、延期时间、孔网参数，精准控制爆破能量分布，降低了爆破振动与围岩损伤，采场爆破块度均匀。**落矿效率提升了50%，爆破振动峰值降低25%以上。**

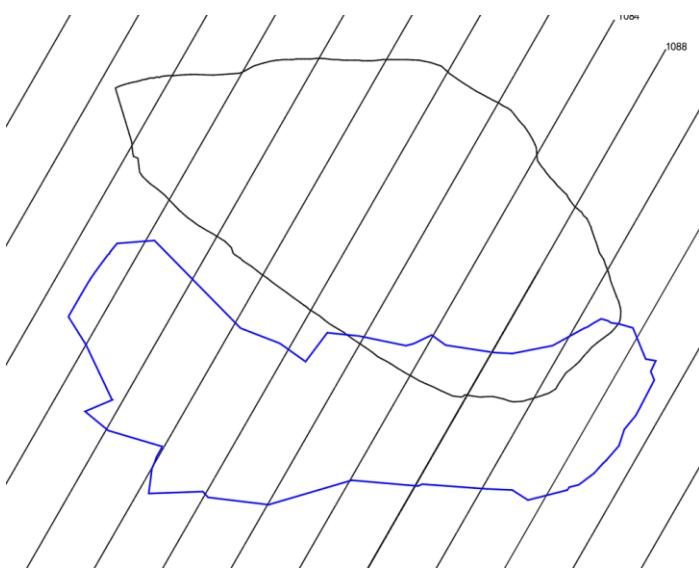


## 地表微地震监测系统——黑龙江多宝山铜矿

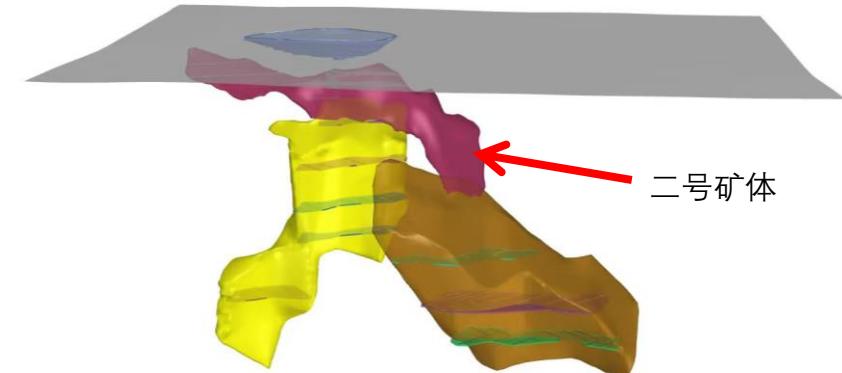
Ⅱ号矿体整体呈现西高东低，矿体倾角约为18°，西侧最高距离地表100m左右，东侧最低距离地表400m左右。采用无底柱分段崩落法开采，地表标高为515m，现已开采至350中段。2025年4月在二号矿体西北侧发现地表塌陷漏斗，面积较大，**推测Ⅱ号矿体西侧上方已出现大范围空区**。



监测区域地表卫星图像

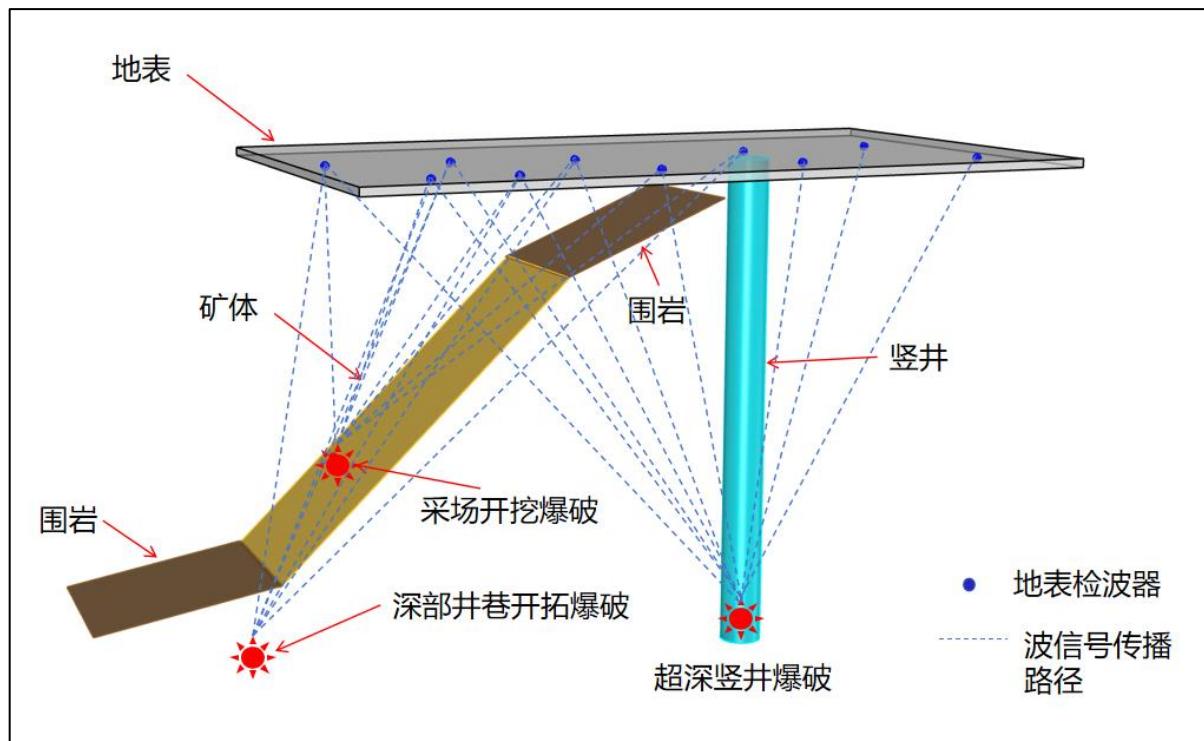


二号矿体地表投影图



二号矿体地下模型图

## 地表微地震监测系统——黑龙江多宝山铜矿



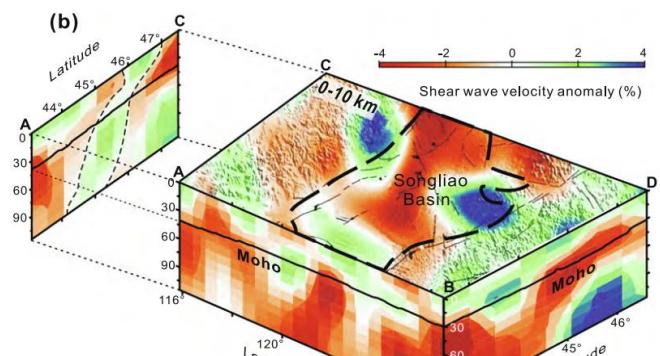
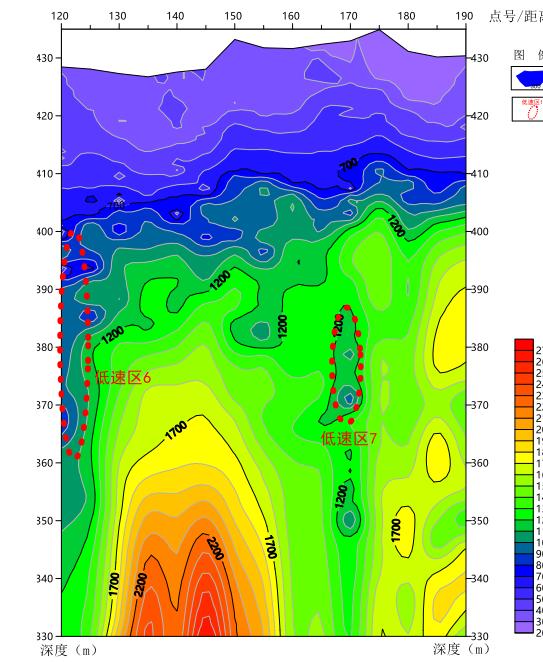
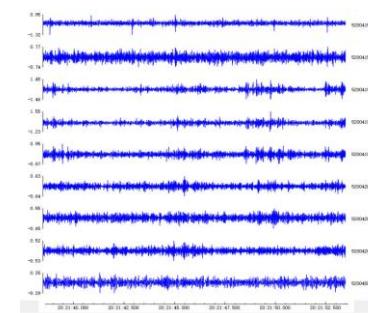
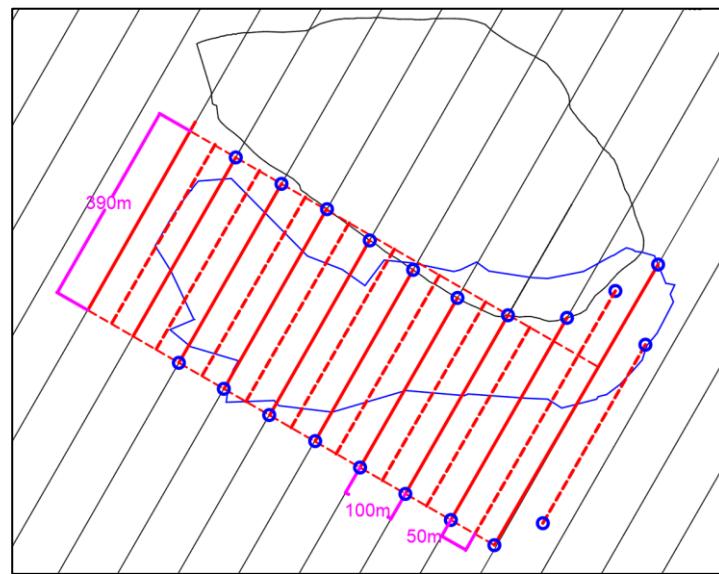
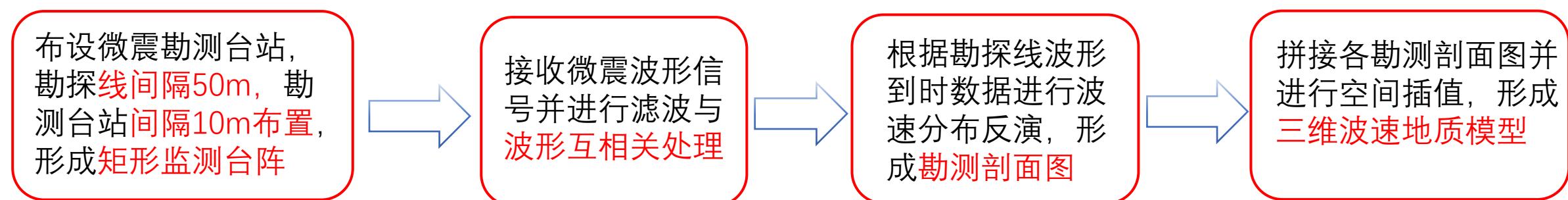
波速反演理论的核心基本原理在于费马原理，即地震波总是沿着**传播时间最短**的路径传播。

$$\delta t = \delta \int \frac{dl}{v(r)} = 0$$

波在不同介质中的传播特性表		
特性	致密岩石 (如花岗岩)	空气 (标准状况下)
典型传播速度	纵波(P波)速度约为 5000 - 6000 米/秒	纵波(声波)速度约为 340 米/秒 (在15°C时)
波型	可传播纵波(P波)和横波(S波)	只能传播纵波(声波)，因为横波需要在具有切变弹性的介质中传播，而气体不具备这种性质
核心影响因素	主要取决于岩石的 <b>弹性模量和密度</b> 。通常， <b>介质内部结构越完整、越致密，波速越大</b>	主要取决于温度和气体成分 (摩尔质量)。温度越高、气体摩尔质量越小，速度越快

由于**地层地质条件不均匀**，爆破震动波到达检波器的时间会与均质条件下的理论到达时间存在差异，故而能够根据该差异对勘测区域地质条件进行反演。

## 地表微地震监测系统——黑龙江多宝山铜矿



## 高寒高海拔采矿关键技术：

一是作业人员全方位闭环保障体系，通过智能监控、健康监测和应急救护等措施，有效保障高寒高海拔作业人员健康与安全；

二是研发高原特殊环境适应性采矿工艺，如预控顶高进路充填开采技术、“门拱式”空场嗣后充填法等，显著提高了开采效率和安全性，减少矿床开拓；

三是开发高寒高海拔矿区专用设备及智能化系统，如高原型凿岩台车、无人驾驶运输系统等，解决设备在极端环境下的性能衰减问题；

四是冻融岩体稳定性控制理论与技术，如自承载主动释压支护技术等，有效控制了冻融环境下岩体变形与破坏；

五是开发地表微地震监测层析成像技术，动态反映采动区域地层及其移动变化。



谢谢!

东北大学 赵兴东