



金属矿山“三下”开采技术与应用

王炳文 教授 博导

中国矿业大学 (北京)

13693006633 (微信号同)

wbw@cumtb.edu.cn

2025-05-22

汇报内容

1

现状与面临的问题

2

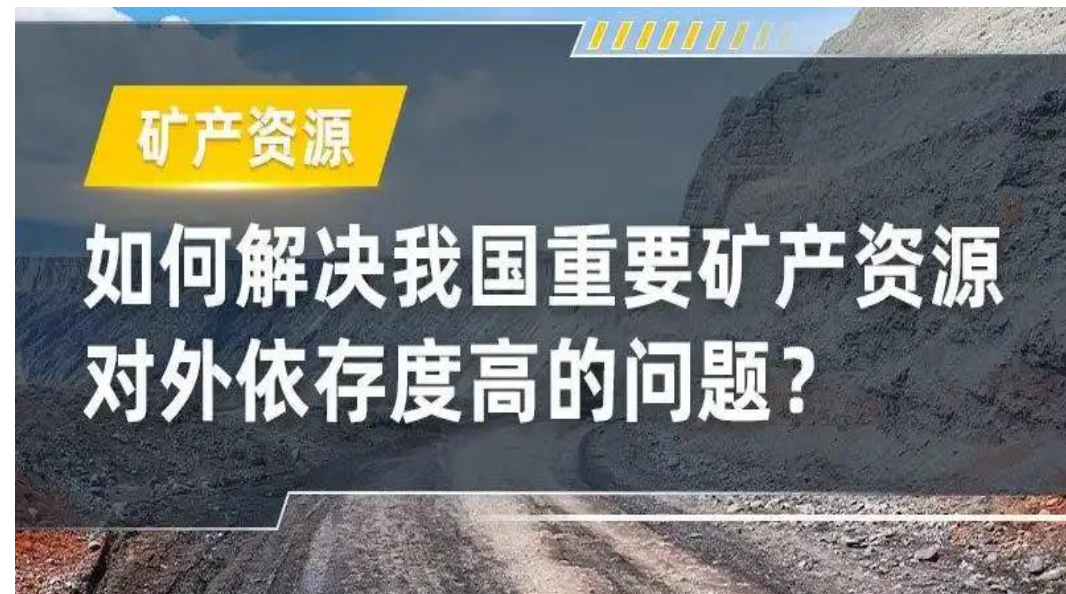
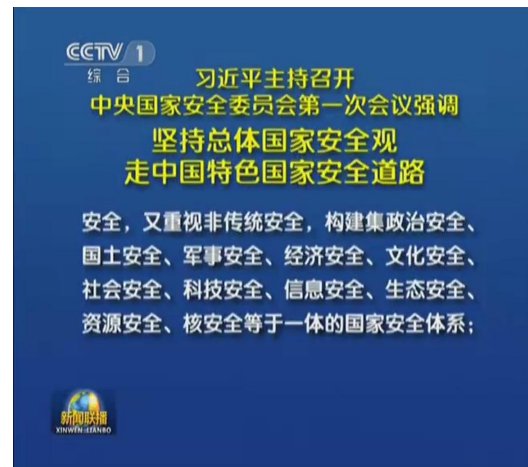
开采技术与方法

3

发展前景与建议

□ 矿产资源是经济社会发展的重要物质基础，是国家安全的基础保障

- 在当今社会，90%以上的一次能源、80%左右的工业原材料和60%以上的农业生产资料均取自于矿产资源
- 习近平总书记在中央国家安全委员会第一次会议中提出了11种国家安全，包括政治安全、国土安全、军事安全等，还提到了资源安全和核安全
- 在国家安全体系中，资源安全是现代社会的基础和保障。资源安全，包括矿产资源的安全



1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采定义

- 是指对位于建筑物下、铁路（公路）下和水体下的矿床开采
 - ✍ **建筑物下开采**：涉及居民区、工厂、基础设施等下方矿体开采
 - ✍ **铁路(公路)下开采**：涉及江河、湖泊、海洋或含水层下方矿体开采
 - ✍ **水体下开采**：涉及铁路干线、桥梁、隧道等交通设施下方矿体开采
- 随着矿产资源消耗迅猛增长，开采条件好、品位高的矿床基本已投入开采，而 **“三下”** 等复杂难采矿床逐步被开发利用
 - **要根据矿床具体赋存条件，采取相应的回采工艺技术**



1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采现状

▪ 建（构）筑物下开采



地下开采导致的**地表沉降**和闭环**裂缝**对周边厂房、道路等建（构）筑物构成潜在威胁



按开采至-340m水平圈定岩石移动范围，地表472~463线之间的民房位于**地表移动范围**内



地表移动带内存在包括主井、回风井、主井工业场地、公寓楼等**重要的建（构）筑物**

1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采现状

▪ 铁（公）路下开采



矿山采选扩建后，大莱龙**铁路**从矿区西侧通过



某市政**公路建设项目**位于矿区北侧，项目选址及保护带与矿区范围部分重叠



矿体东端地表有**铁路**和**公路**，根据市政府规划，矿区上部未来还要新建公路通过

1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采现状

▪ 水体下开采

- ✎ 地下开采时，常遇各种水流流入采掘空间，一般性涌水可影响工作条件，增加生产成本，突发性的巨大涌水则可能淹没巷道、摧毁设备，甚至造成人员伤亡

▪ 水体下开采分类

- ✎ 江河下及周边资源开采：白象山铁矿、大冶铁矿、冬瓜山铜矿、朱兰铁矿等
- ✎ 海底矿床开采：三山岛金矿、海域金矿等





1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采存在的问题

- **开采方法问题。** 此类矿床赋存条件复杂，② 矿体开采受多种因素限制，② 可供选择的采矿方法受限，② 采矿效果较差
- **资源回收率问题。** 此类矿体开采尚无成熟、可行的开采技术，② 开采时可能造成大量矿产资源浪费，② 且一旦开采并造成资源丢弃，② 基本无法再回收，资源损失将是永久性的
- **地表塌陷问题。** “三下” 矿体开采② 因上覆岩层的特殊性，需严格控制其塌陷范围和高度，② 确保矿山开采安全，② 目前国内尚无成熟的成套矿山开采技术，② 地表塌陷控制难度大
- **采掘废石、尾矿占地和环境污染。**
 - ✓ 平均每产出1万t矿石，将产出约0.93万t尾砂、0.34万t废石
 - ✗ 2021年，我国尾矿产生量13.08亿t，其中铁尾矿产量5.43亿t、铜尾矿产量3.34亿t、**黄金尾矿产量1.95亿t**
 - ✗ 2021年，我国尾矿堆积量增至235.1亿t，综合利用4.28亿t



1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采现状

▪ 我国部分金属矿床水下开采案例

矿山名称	水文地质	采矿方法	防治水措施
水口山铅锌矿	上部溪水，裂隙导水	上向分层充填采矿法	地面抗洪，防渗，帷幕注浆
张马屯铁矿	奥陶灰岩及第四系松散层含水	空场嗣后全尾胶结充填	以堵为主，堵排结合
凡口铅锌矿	白云岩岩溶含水	机械化盘区上向分层充填	地下浅部截流和地表防渗相结合
新桥硫铁矿	地表河床、水库，矿体顶板栖霞灰岩含水层	空场嗣后块石胶结充填	河流改道防渗，巷道放水孔疏干
铜录山铜铁矿	大理岩岩溶水为主	上向分层点条柱充填	帷幕注浆
莱芜业庄铁矿	顶板奥陶灰岩为强含水层	上向分层点柱充填	顶板注浆堵水，下部疏干
三山岛金矿	滨海矿床，裂隙充水矿床	上向分层点柱充填	平行疏干与注浆加固堵水



1. “三下” 开采现状与面临的问题

□ “三下” 开采现状

▪ 我国部分金属矿床水下开采案例

矿山名称	水文地质	采矿方法	防治水措施
南京铅锌银矿	长江滨河矿床	上向分层点柱充填	
高峰锡矿		分段空场嗣后充填、上向水平分层充填	
锡矿山南矿	矿体上面为河流	充填采矿法	河床加固防渗
油麻坡钼矿	矿体上面为河流	空场嗣后充填采矿法	河流改道，留隔水矿柱
南谿河铁矿	季节性河流，奥陶灰岩含水层	空场嗣后胶结充填	超前疏干
云驾岭铁矿	奥陶灰岩含水层	上向分层点柱充填	超前疏干
白象山铁矿	上部为河流，第四系孔隙含水层和基岩裂隙含水层	上向分层点柱充填	局部疏干为主，注浆堵水为辅
草楼铁矿	矿体顶板风化带含水层，第四系底部碎石含水层	空场嗣后充填采矿法	保护顶板

1. “三下” 开采现状与面临的问题



□ 面临的挑战与困难

- 随着经济发展和资源需求增加，“三下” 开采对提高资源回收率、延长矿山服务年限等具有重要意义

- ✍ **技术难题：**不同类型的“三下” 开采面临不同的技术挑战，如建筑物下的**地基处理**、水体下的**防水和排水**等，需要进一步研发和改进开采技术，提高技术水平
- ✍ **安全风险：**“三下” 开采可能会对周边环境和设施产生一定影响，如**地表下沉**、**裂缝**等，存在一定的安全风险，需要加强安全管理和监测，确保开采过程的安全
- ✍ **法规政策限制：**“三下” 开采涉及**土地**、**环境**、**安全**等多个方面的法规政策，需要严格遵守相关规定，办理相关手续，这在一定程度上限制了“三下” 开采的发展
- ✍ **经济效益平衡：**虽然“三下” 开采可提高资源回收率，但**开采成本**相对较高，需要在经济效益和社会效益之间找到平衡

汇报内容

1 现状与面临的问题

2 开采技术与方法

3 发展前景与建议

2. “三下” 开采技术与方法



□ “三下” 开采损害类型及特征

▪ 地表构筑物损害类型

✎ 地下开采对地表房屋的损害主要是由采动地表在**垂直方向的移动变形**和**水平方向的移动变形**以及**地表平面内的剪应变**引起

- ✓ **下沉损害**。若出现均匀下沉，房屋结构不会产生附加应力，但会影响地下管缆设施
- ✓ **倾斜损害**。导致构筑物重心偏离，产生附加倾覆力矩，承载结构内部产生附加应力
- ✓ **地表曲率损害**。地表曲率变形造成建筑物的荷载与基础土壤反力间的初始平衡状态遭到破坏，在正、负曲率影响下，构筑物墙壁在竖直面内受到附加弯矩和剪力作用
- ✓ **水平变形损害**。构筑物抗拉能力远小于抗压能力，拉伸变形使其产生开裂性裂缝
- ✓ **剪切变形损害**。在地表剪切变形作用下，构筑物的纵横基础间将产生相对转动，从而改变了原有的平面形状
- ✓ **扭曲变形损害**。地表倾斜值的不同导致沿构筑物纵轴中心线产生扭曲甚至扭转变形

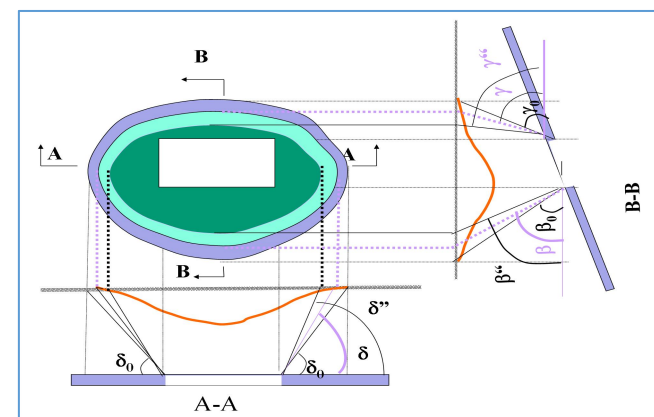
2. “三下” 开采技术与方法



□ “三下” 开采损害类型及特征

▪ 地下开采对铁（公）路的损害

- ✎ 按开采沉陷引起地表变形特点，可将沉陷对道路损害分为
- ✓ **地表横向倾斜移动变形损害。** 横向不均匀移动变形导致铁路轨道横向移动扭曲变形两条轨道分离或挤压，使高速行驶的火车行驶困难，脱轨掉道，甚至发生翻车事故
 - ✓ **地表纵向倾斜移动变形损害。** 增大道路坡度，破坏列车正常运行和调车场的工作
 - ✓ **地表波浪起伏沉陷损害。** 开采地表压缩变形的挤压力，通过路基传递给路面，挤压变形作用造成路面波浪起伏
 - ✓ **地表拉伸变形损害。** 引起钢轨衔接处鱼尾板的断裂、轨缝闭合以及钢轨的纵向弯曲；引起公路路基、路面开裂破坏或挤压隆起形成波浪起伏路面



2. “三下” 开采技术与方法



□ “三下” 开采损害类型及特征

▪ 水体下开采

✍ 水体类型

- ✓ **地表水体**。积聚在江、海、河、湖、水库、沼泽、水渠、坑、塘和塌陷区中的水
- ✓ **地下水体**。积聚在岩石和松散层空隙中的水，如松散层水体（第四纪和第三纪松散层）、基岩含水层水体（砂岩、砾岩、砂砾岩及石灰岩岩溶含水层）、空区积水

✍ **矿岩的隔水和导水性能**——隔水性和导水性能取决于颗粒大小和矿物成分，颗粒愈细，隔水性能愈好

✍ 水体下开采特点

- ✓ 主要考虑矿体与水体之间有无**隔水层**，开采后隔水层能否破坏，开采引起的上覆岩层裂隙是否波及水体
- ✓ 水体下回采保护对象是矿井工程本身，为保护系统工程本身必须保护水体下方岩层
- ✓ 水体下回采的主要对策是**隔离**和**疏降**

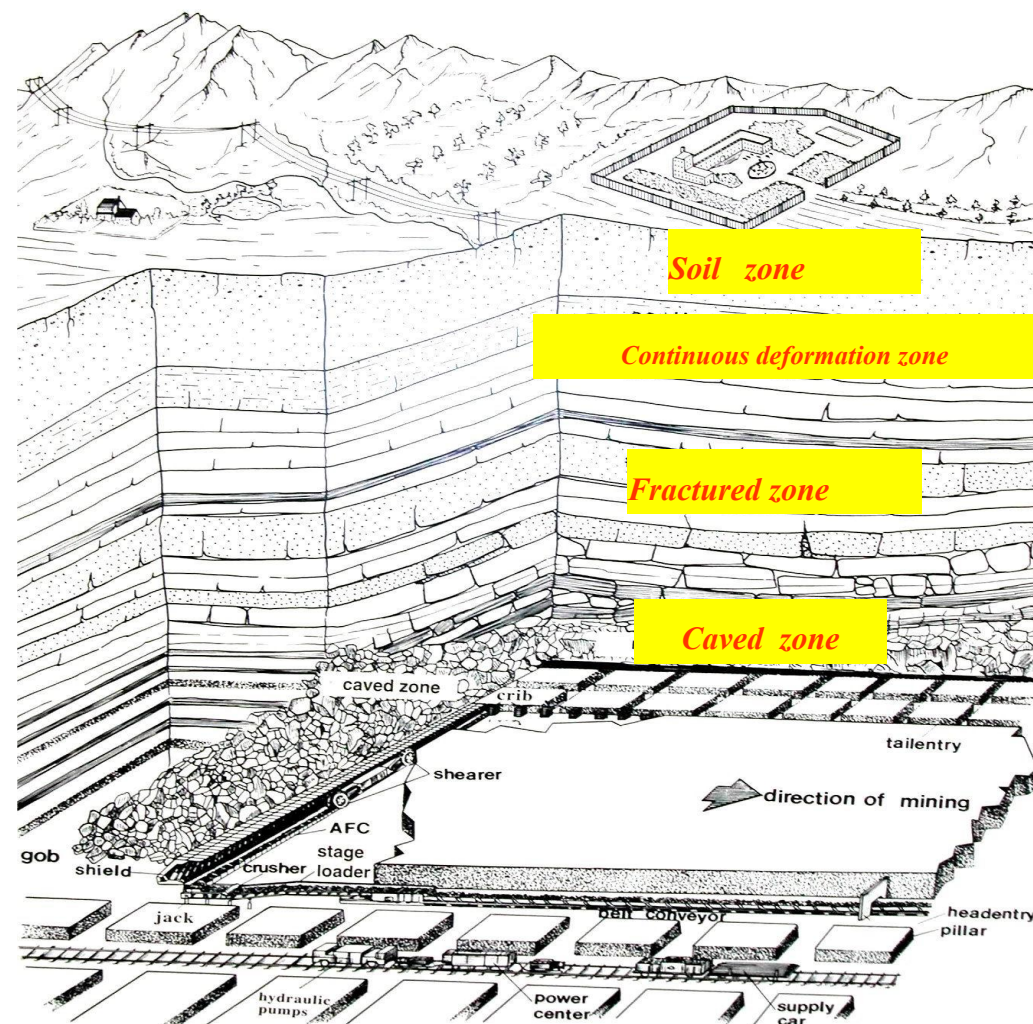
2. “三下” 开采技术与方法



□ “三下” 开采理论基础

▪ “三带” 理论

- ✎ 矿山开采后，使周围岩体产生移动，当移动和变形超过岩体极限变形时，岩体破坏
- ✎ 根据工程需要，岩层移动和破坏稳定后按其破坏程度，可大致分为三个不同的开采影响带
 - ✓ 冒落带 (Caved Zone)
 - ✓ 裂隙带 (Fractured Zone)
 - ✓ 弯曲带 (Continuous Deformation Zone)



2. “三下” 开采技术与方法



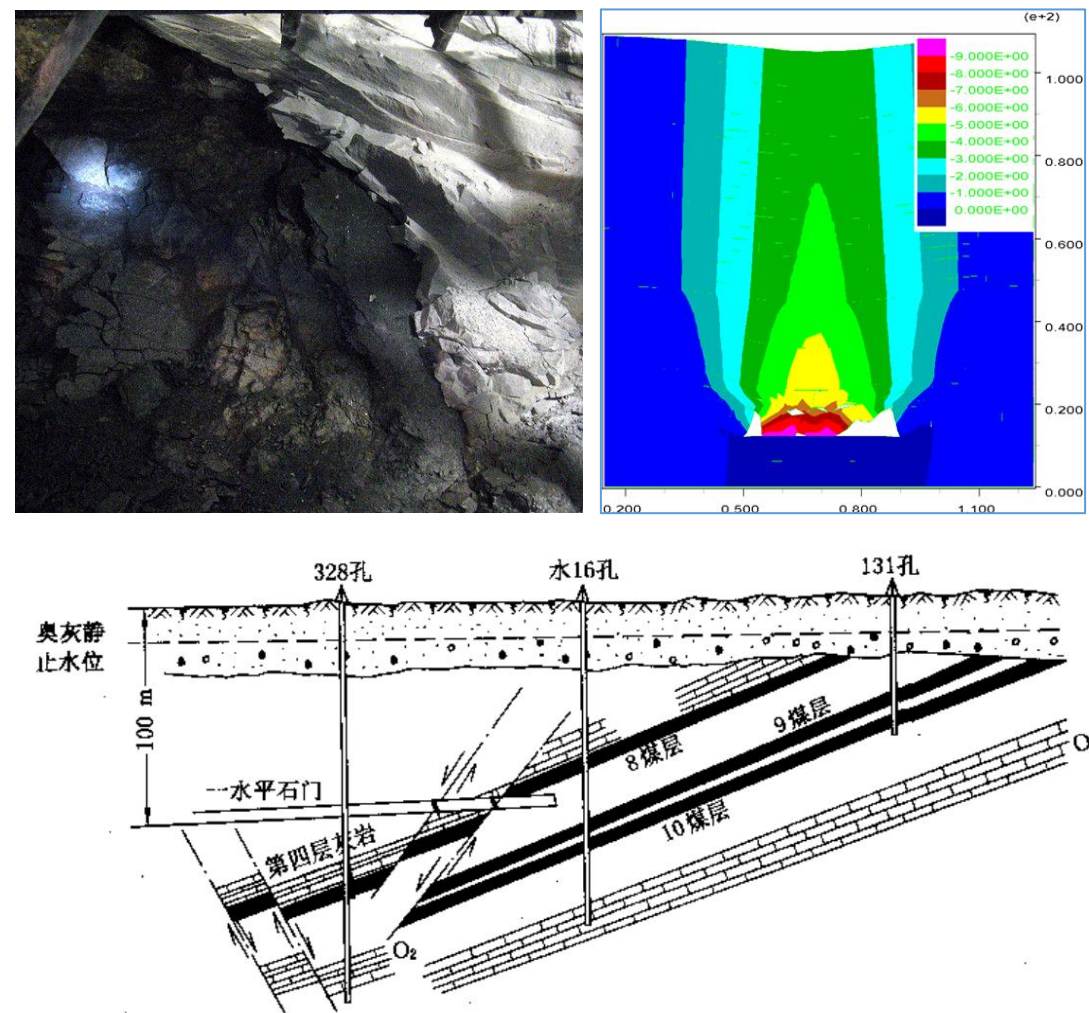
□ 水体下开采的理论依据

▪ “三带” 理论

- ✎ 对于地面水体、松散层底部和基岩中的强、中含水层水体、要求保护的水源等水体，不允许**导水断裂带**波及
- ✎ 对于松散层底部的弱含水层水体，允许导水断裂带波及
- ✎ 对于厚松散层底部为极弱含水层或可以疏干的含水层，允许导水断裂带进入，同时允许垮落带波及。

▪ 隔水层理论

- ✎ 水体底面与开采矿体之间应有相应厚度的**隔水层**，才能实现水体下安全回采



□ 地压显现与地压管理

- 岩体被开挖后，破坏了**原岩应力**平衡状态，岩体中的应力重新分布，产生**次生应力场**，使巷道或采场周围的岩石发生变形、移动和破坏，这种现象称为**地压显现**
- **地压使开采工艺复杂化，并要求采取相应的技术措施，以保证安全生产**



□ 利用矿岩自身强度和留必要支撑矿柱，保持采场稳定性

- 将矿块划为**矿房**和**矿柱**，回采矿房时利用**矿岩自身稳固性**和**矿柱支撑作用**维护采场围岩稳定，而不进行人工支护，待矿房采完后再回采矿柱并同时处理**采空区**

■ 借助永久矿柱支撑空区顶板

- ✍ 采场中规则/不规则间隔矿柱
- ✍ 顶柱和底柱
- ✍ 为控制岩石移动而专门保留的盘区矿柱和隔离矿柱



上向水平分层充填-点柱

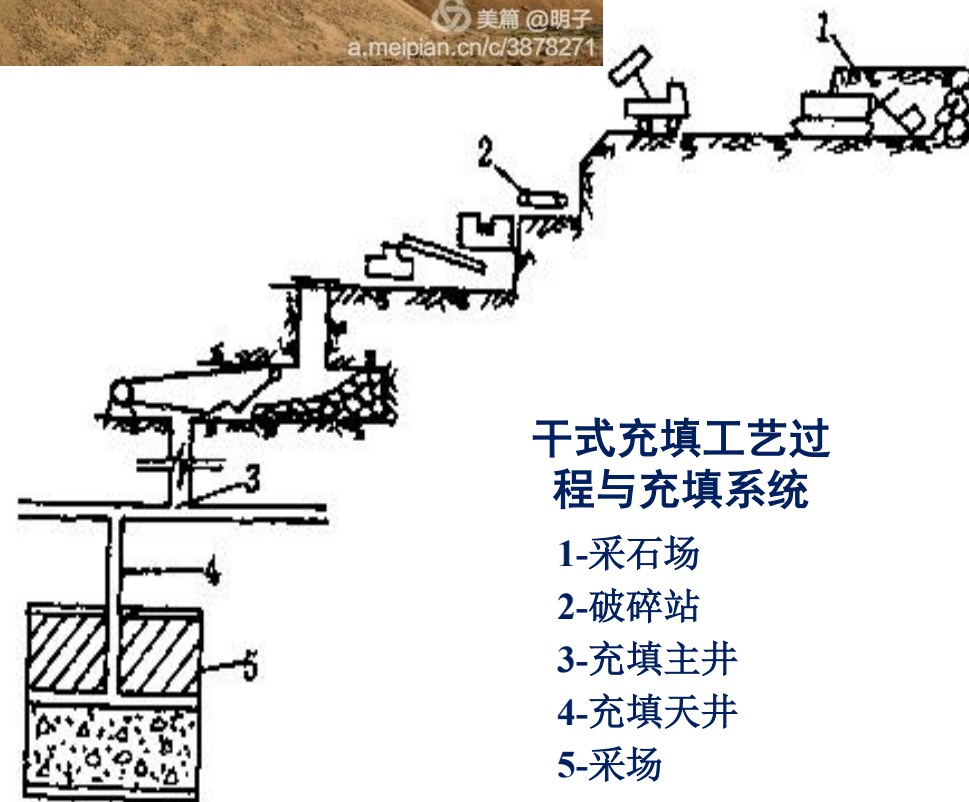
□ 充填采空区，支撑围岩并保持其稳定性

- **充填作用：**限制围岩和矿柱变形的发展，减缓岩层移动的危害，降低地表下沉的程度

✎ 根据充填材料成分和输送方法的不同，可分为干式充填、水力充填和胶结充填

- 因充填体强度低、刚度小，**只采用充填料不能有效防止围岩移动**

✎ 需留适量矿柱，再充填矿房，能有效控制地压和限制围岩移动，保持开采空间稳固性



干式充填工艺过程与充填系统

1-采石场

2-破碎站

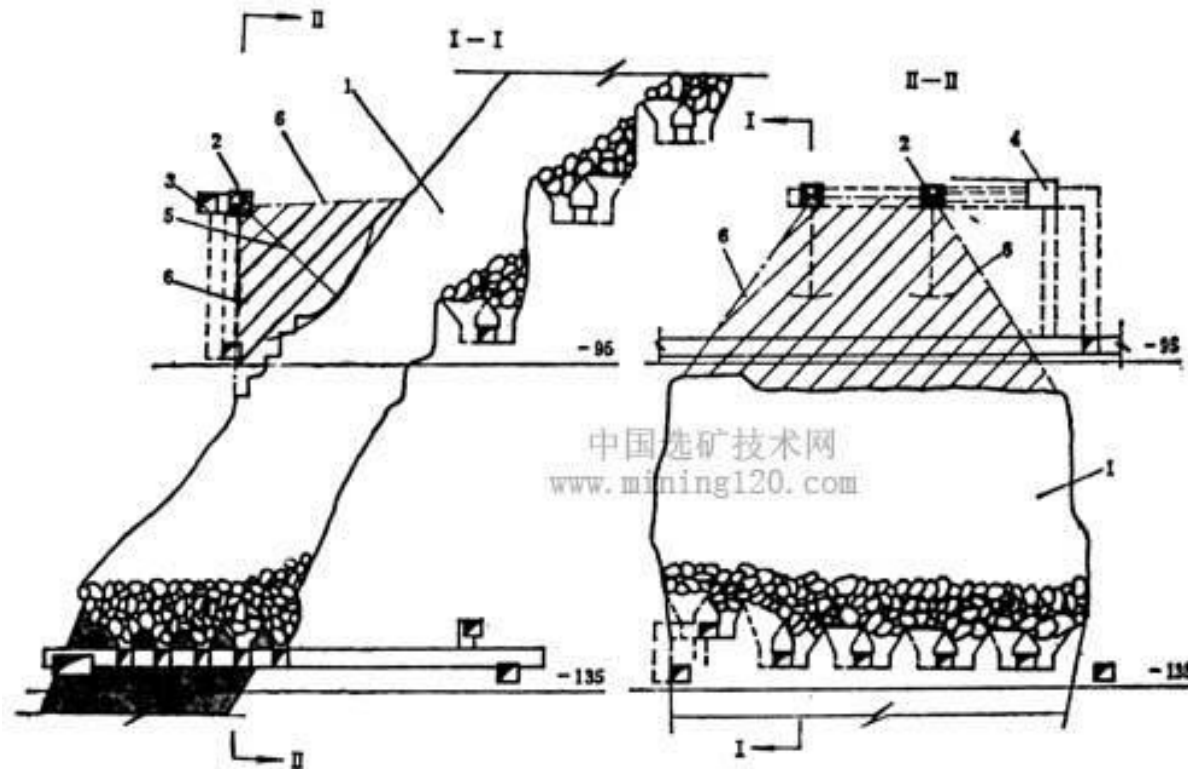
3-充填主井

4-充填天井

5-采场

□ 崩落围岩，降低采场围岩应力，并使其重新分布

- 在回采过程中或回采结束后，采用自然方式或强制方式**崩落围岩**充满采空区
 - ✎ 改变围岩应力分布状态，释放围岩应变能，减小应力集中程度，有效控制地压
- 用崩落围岩充填空区，在生产区域上部形成岩石**保护垫层**
 - ✎ 防上部围岩突然大量冒落时，冲击气浪和机械冲击对采准巷道、采掘设备和人员的危害



铜官山铜矿药室爆破崩落围岩处理空区

1—采空区；2—药室；3—联络巷道；4—深孔凿岩硐室；5—抵抗线；6—设计崩落围岩界线

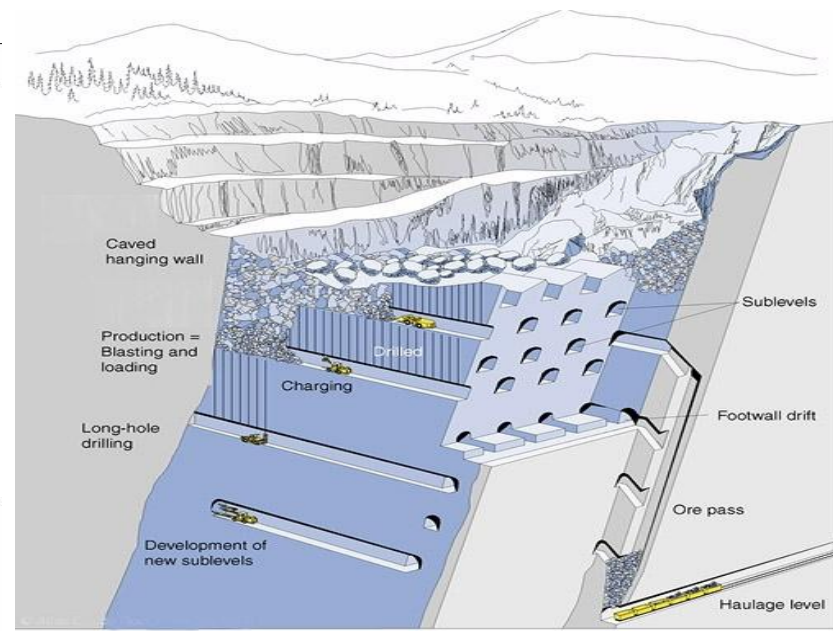
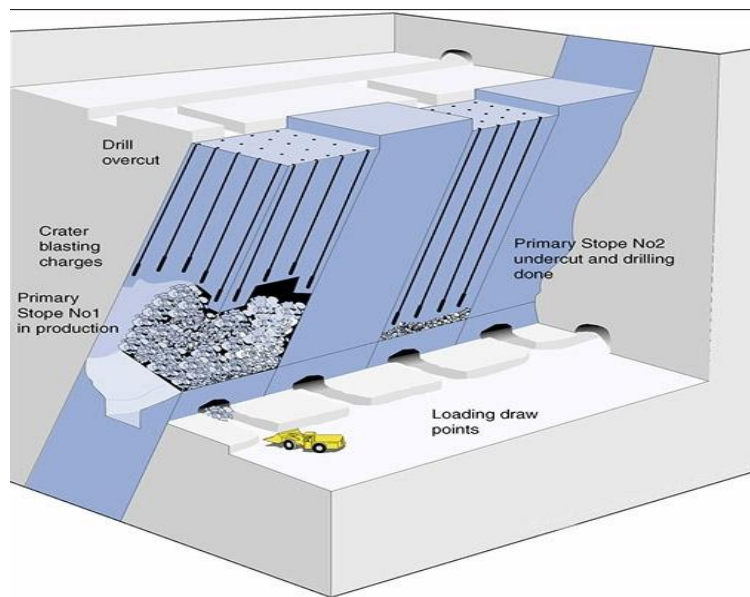
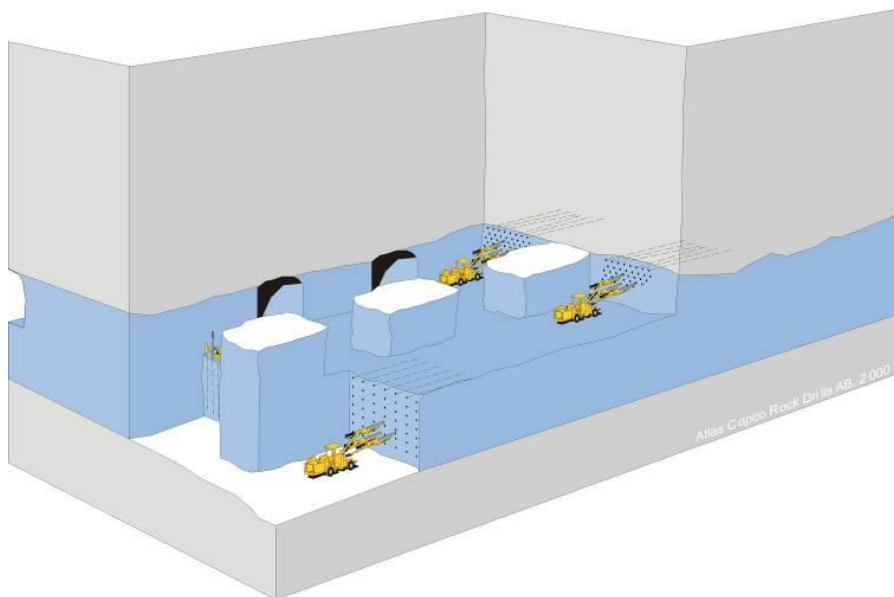
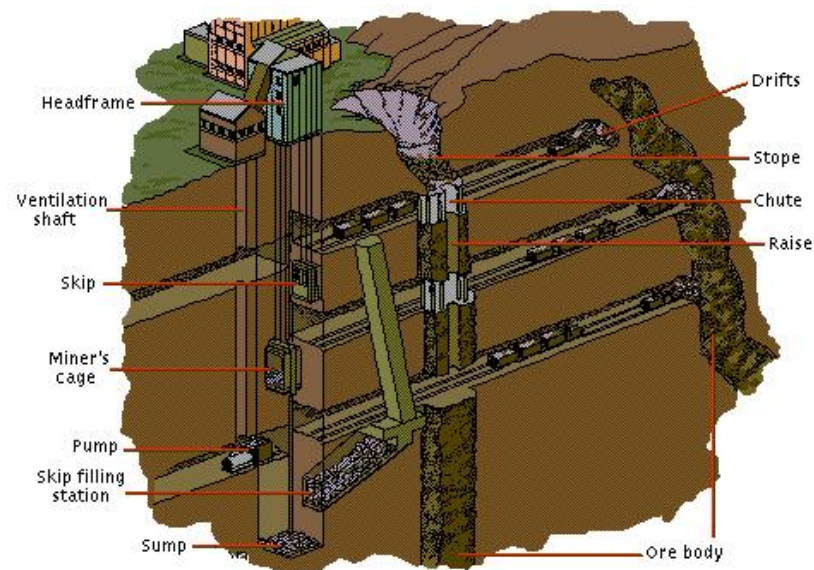
地下矿山采矿方法



采矿方法分类依据：回采时的地压管理方法

依此可将采矿方法划分为三大类：

- 空场采矿法
- 充填采矿法
- 崩落采矿法



2. “三下” 开采技术与方法



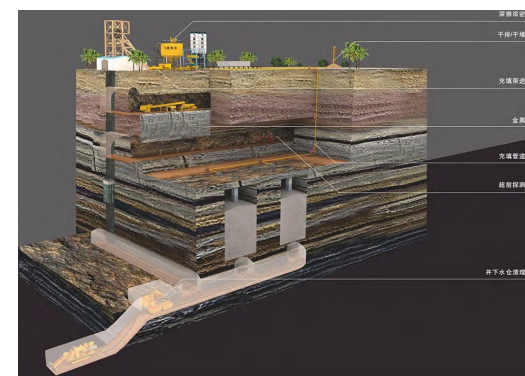
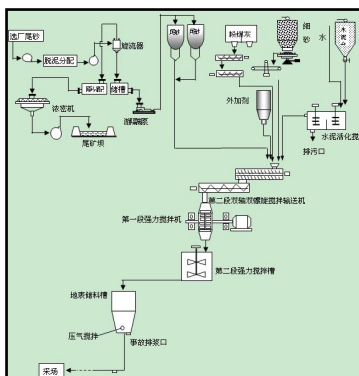
□ “三下” 开采技术方法

- 根据矿床赋存条件，采取相应回采工艺技术，使地下回采工作对地面建筑物、铁(公)路干线的变形控制在允许范围以内，同时防止地表水涌入井下造成水患

✎ 中国、美国、前苏联、加拿大、波兰、日本等国的地下矿山都先后用各种类型的充填采矿法成功地在地表河床下、地表建筑物下开采了矿床、采出了大量的矿产资源

▪ 充填采矿法

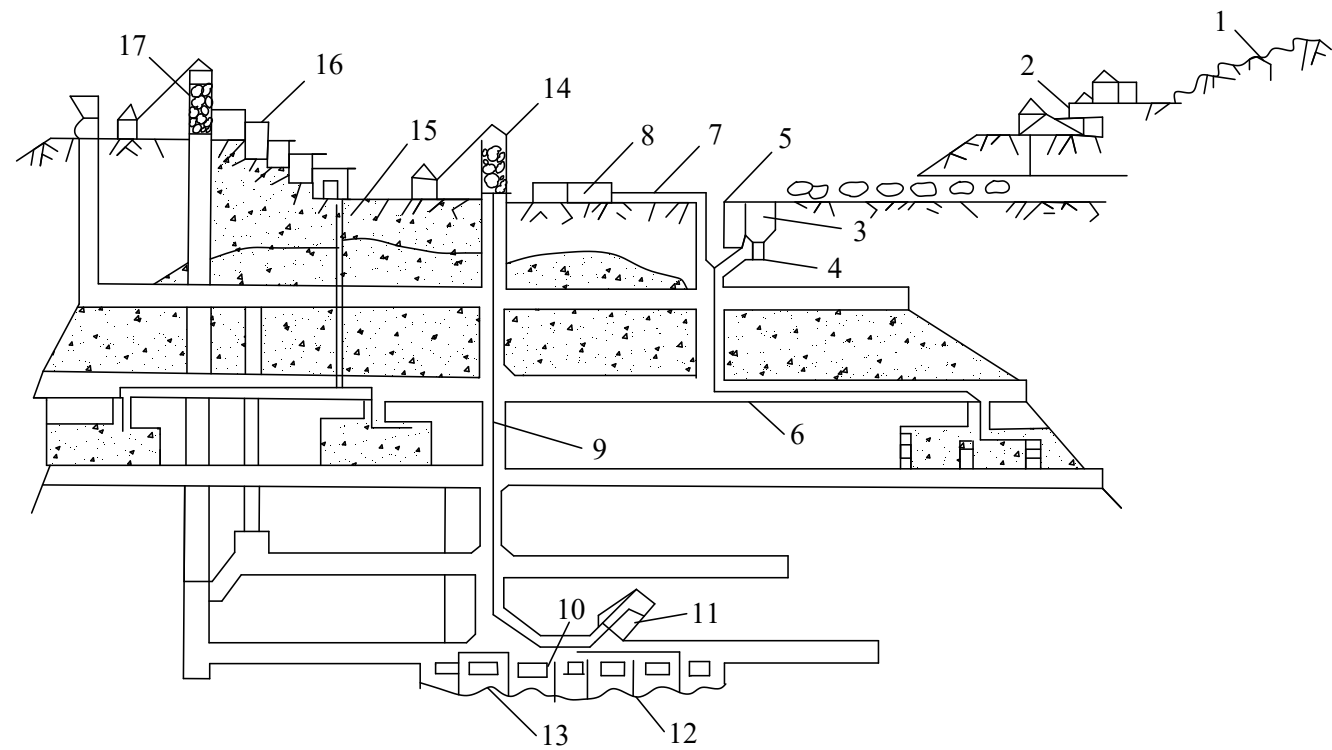
✎ 资源采出率高，同时可将地表堆积的固体废弃物回填至井下采空区，既可提高开采作业安全性，又能防止地表灾害发生，还可充分消纳地表固废，是保障金属矿山“三下”开采安全、高效、经济、绿色的重要方法





□ 充填采矿法

- 分**两步骤**进行回采
 - 回采**矿房**时，随回采工作面推进，逐步用充填料**充填采空区**，防止围岩片落，即用充填采空区的方法管理地压
- 不论**矿石和围岩稳固与否**，均可应用本类采矿方法



类别	组别	典型采矿方法
充填 采矿法	单层充填采矿法	壁式充填采矿法
	分层充填采矿法	上向水平/倾斜分层充填采矿法
		下向分层充填采矿法
		上向水平分层进路充填采矿法
	分采充填矿房法	分采充填采矿法
	分段充填采矿法	阶段/分段空场嗣后充填采矿法

□ 主要研究成果

- 20世纪80年代，中国矿业大学（北京）**孙恒虎**教授团队利用铝矾土等为原料研发高水充填材料，创新**高水固结充填理论与工艺模式**
 - ✎ **纯高水速凝材料充填技术**——主要应用于煤矿支护
 - ✎ **高水砂浆充填技术**——尾矿砂浆代替水，主要应用于金属矿

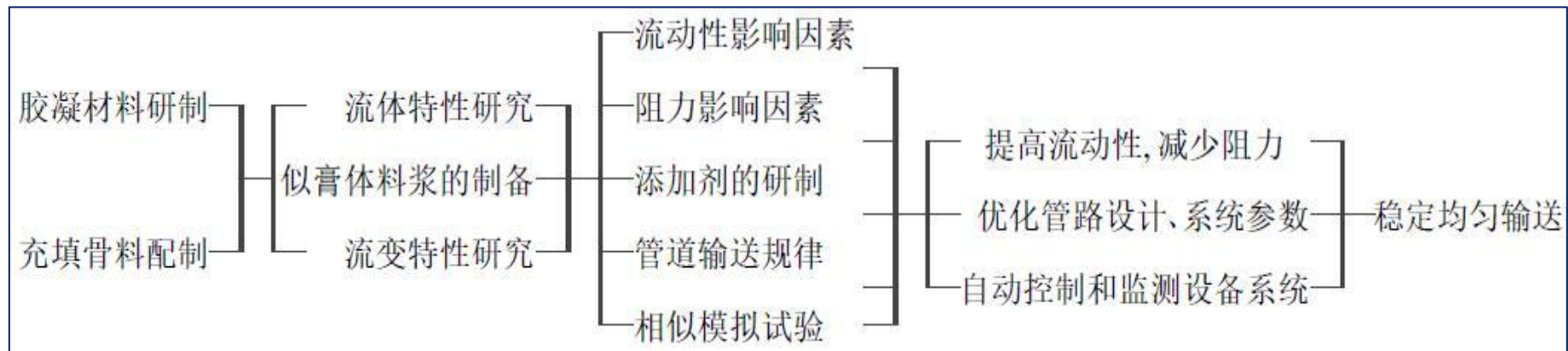
- 实现了**全尾砂不分级直接利用**
- 固化体含水率体积比**>90%**
- 形成了高水固结充填采矿方法

- 因生产成本高、原材料供应紧张及料浆配制操作易失控等问题，制约该技术进一步推广



□ 主要研究成果

- 20世纪末，中国矿业大学（北京）**孙恒虎**、**刘文永**教授团队研发成功硅铝基胶凝材料，并创建**似膏体充填**理论与技术体系



- 利用硅铝基胶凝材料做胶结剂，尾砂、矸石及建筑垃圾等作骨料，**配以15~30%的细粒级物料(-37 μ m)**，制成浓度为72~78%，外观近似膏体一样的浆体，称之为“似膏体”
- 采用重力自流或泵送的方式经管路输送至井下充填地点，充填料浆在井下不需脱水或微量脱水即可固结成充填体
- 采用固体废弃物作为矿山充填材料，目的是实现**绿色矿山充填开采**

□ 超细尾砂固结充填存在的瓶颈问题

■ 尾砂颗粒超细化的原因

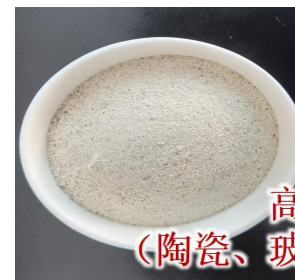
- ✎ 资源的逐渐枯竭，致使矿石开采**边界品位**不断下降，为实现有用矿物分离和富集，需将矿石磨碎至“超细”或“超微细”粒度
- ✎ 尾砂**综合利用**技术推广，粗粒级被提取用于建材和陶瓷等原料，造成尾砂趋于超细化
- ✎ 考虑到矿岩松散性，对于有色、黄金等矿山企业，尾矿回填所需空间大于采出矿岩体积，仍不能完全解决尾矿井下堆排问题，故多采用**分级尾砂**（粗尾砂）井下充填



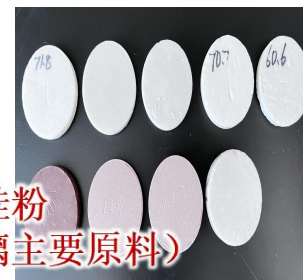
粗砂



超细尾砂

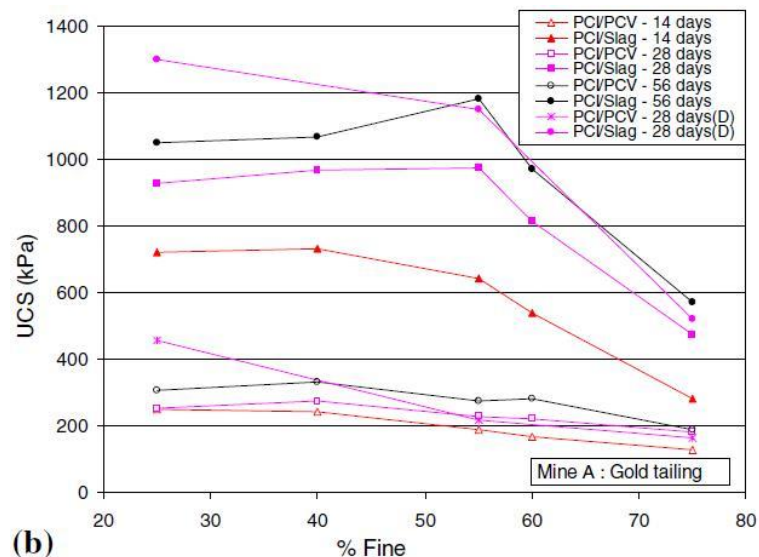


高硅粉
(陶瓷、玻璃主要原料)



□ 超细尾砂固结充填存在的瓶颈问题

- 超细尾砂个体差异大、含泥量高，传统的胶凝材料（如普通硅酸盐水泥等）固结困难，导致充填体物理力学性能差
 - ✍ 水泥不适宜固结土含量高的骨料，为达到相同强度需加大用量，导致充填成本增高
- 细颗粒含量高、比表面积大，具有较高保水性，相同流动状态下充填料浆的质量浓度偏低，导致井下充填体强度不高，难以满足矿山充填开采的要求



-20 μ m粒级含量
超出35~55%后，
充填体抗压强度
会显著降低



□ 拟解决思路

现实共性问题

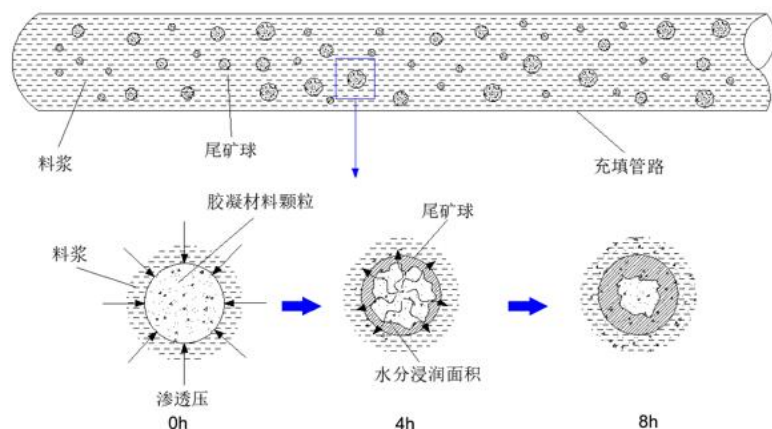
- 1 大宗固废产生强度高、利用率低**
累积堆存量大、产生强度高、末端消纳不足，如何高效处置大宗固废是企业亟需解决的问题
- 尾矿库库容不足、尾砂处置面临挑战**
常规的充填难以消耗大量的尾砂，分级粗尾砂充填造成采充不平衡，且选厂排放的尾砂趋于超细化（-19 μm ），细尾砂的排放面临挑战
- 细粒级尾砂高浓度胶结充填存在困难**
较大的表面积大和高含量的黏性矿物，制备充填料浆需水量增加、水泥固化效果不理想，水泥用量增大，充填成本和碳排放增加

关键解决思路

- 1 研发多源工业固废基胶凝材料**
采用具有潜在胶凝活性的多源固废复配成全固废基胶凝材料，作为水泥替代物，用于制备胶结充填材料，实现“以废治废”
- 2 工业固废协同尾砂造粒制备粗骨料**
以细粒级尾砂为基料、全固废基胶凝材料为辅料，协同制备成粗骨料，用作充填粗骨料，实现大宗固废的资源化、规模化利用
- 3 粗骨料对胶结充填体改性处理**
基于粗骨料的颗粒跨尺度优势，作为充填粗骨料用于制备胶结充填材料，以期实现对细粒级尾砂胶结充填体流动及力学性能的改善

研究成果：王炳文教授团队提出了超细尾砂基骨料梯级制备胶结充填材料及其性能调控

基于核壳效应和缓释胶囊原理，提出一种超细尾砂及其骨料的胶结充填料浆制备方法，利用超细尾砂制粗骨料，以“废”利废，实现充填料浆流动性与充填体力学性能调控



两相流场下料浆对尾矿球粒渗透作用及胶凝材料扩散规律示意图



超细尾砂制粗骨料调配充填材料

超细尾砂具有含泥量高、比表面积大、保水性强等特点，导致高流态的超细尾砂胶结充填料浆质量浓度和井下充填体强度偏低，难以满足金属矿山充填要求的难题，故开展超细尾砂基骨料胶结充填材料制备与性能调控的研究。

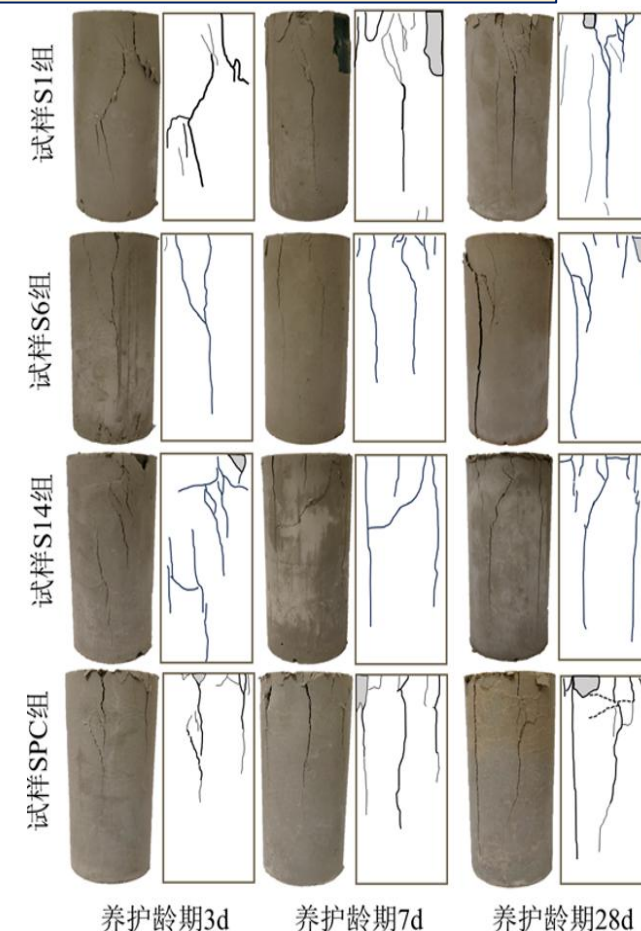
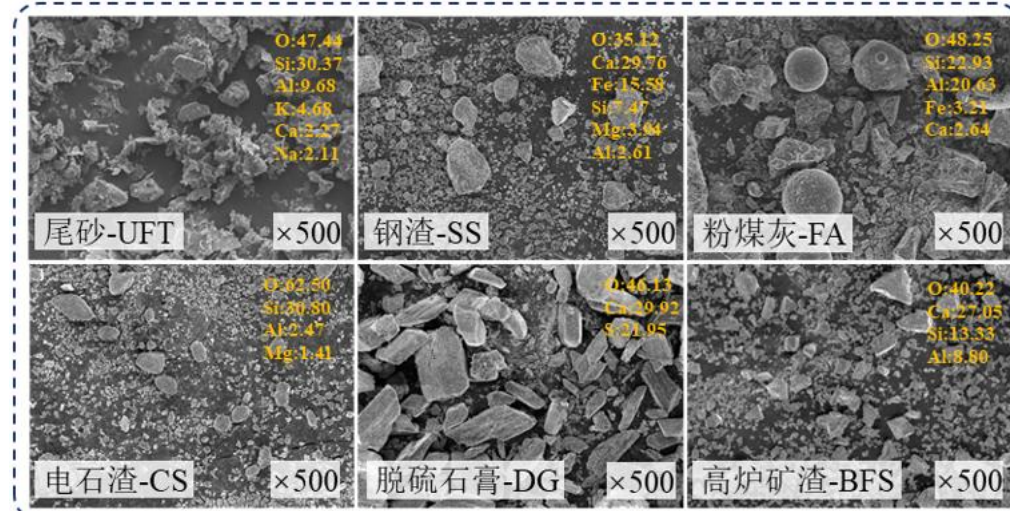
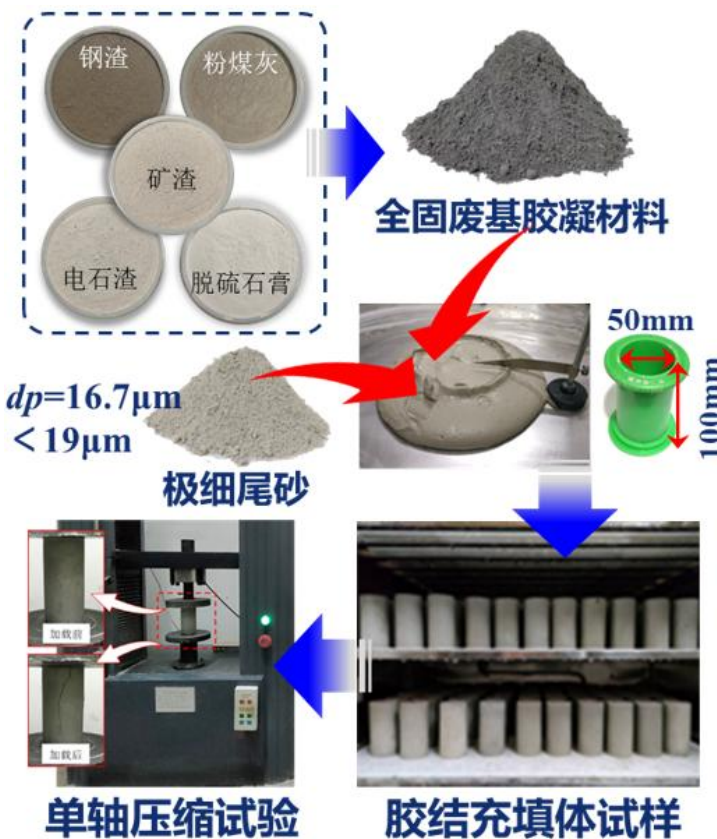
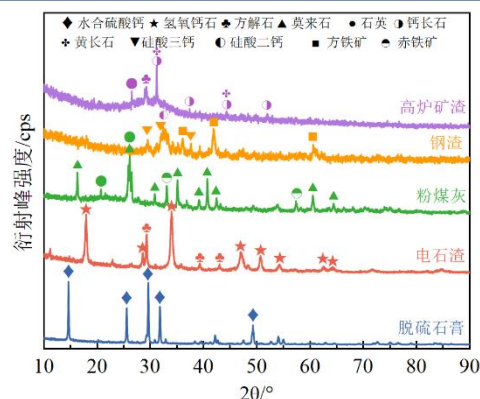
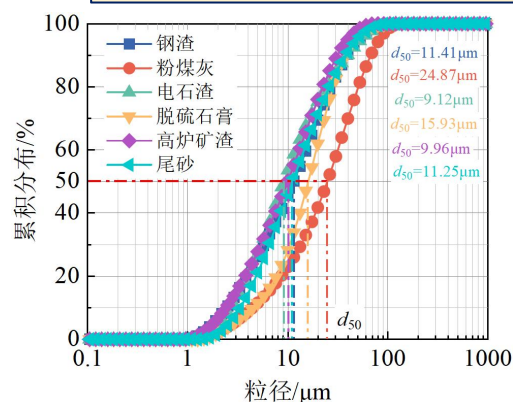
① 提出一种超细尾砂及其人造骨料的胶结充填料浆制备方法，阐述超细尾砂基骨料的“**释水-吸水**”分阶段调节效应对充填料浆流动性与充填体力学性能调控作用机理

② 分析了胶结充填料浆中超细尾砂基骨料的**颗粒级配调节**、**释水调节**及**滚珠效应**，揭示超细尾砂基骨料对超细尾砂胶结充填料浆流动性的影响及调控机制，构建了超细尾砂基骨料-超细尾砂胶结充填料浆流变与管输阻力损失计算模型以及料浆**流变性能调控**方法

③ 探究了超细尾砂基骨料-超细尾砂胶结充填体宏观力学特性和损伤演化规律，验证了超细尾砂基骨料**吸水特性**和微区泌水效应，揭示了基于超细尾砂基骨料的超细尾砂胶结充填体**力学性能增强机制**（**充填体结构重塑**）

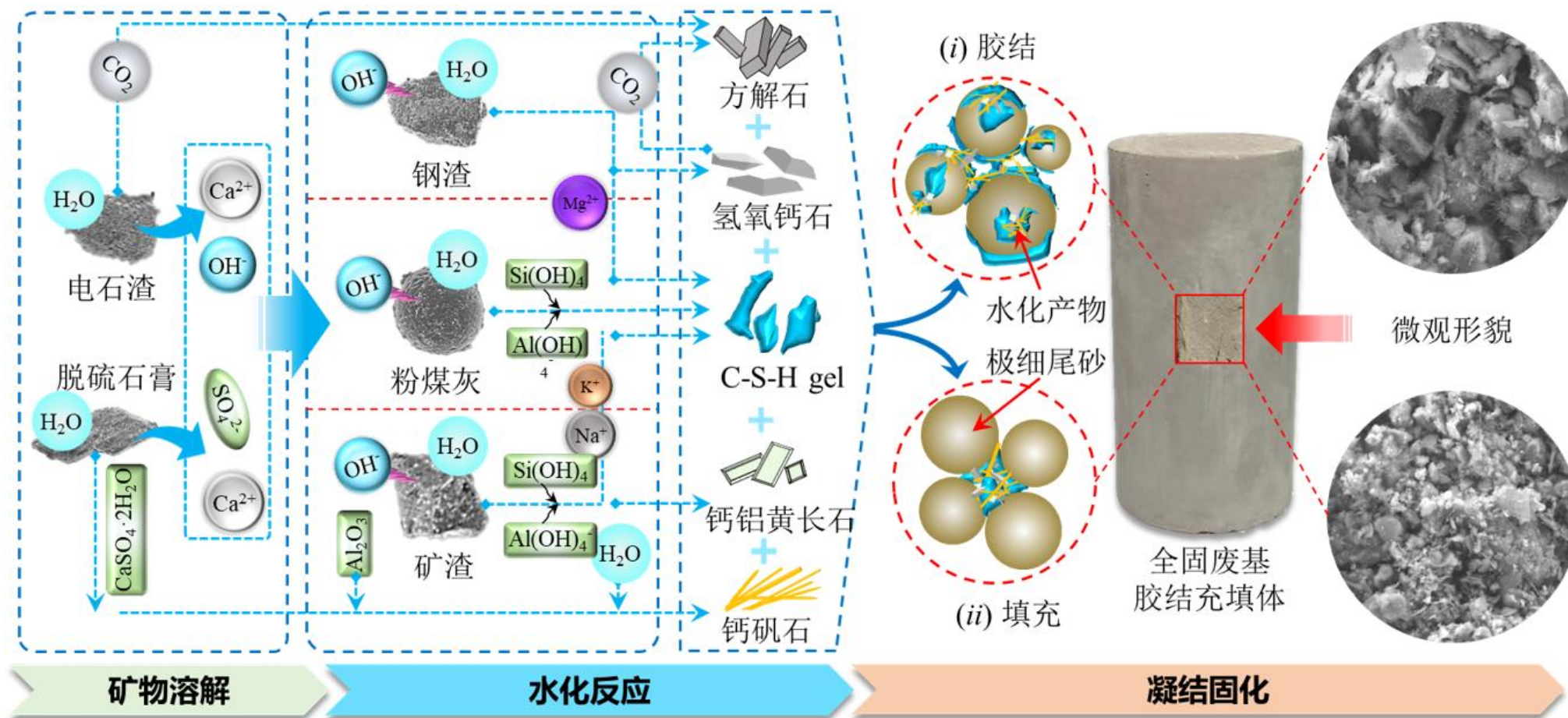
研究成果①：研发了多源固废协同极细尾砂制备胶结充填材料

- 基于协同水化效应原理，采用“碱+盐”双重激发方式，以钢渣、粉煤灰、电石渣、脱硫石膏、高炉矿渣复配合成了全固废基胶凝材料



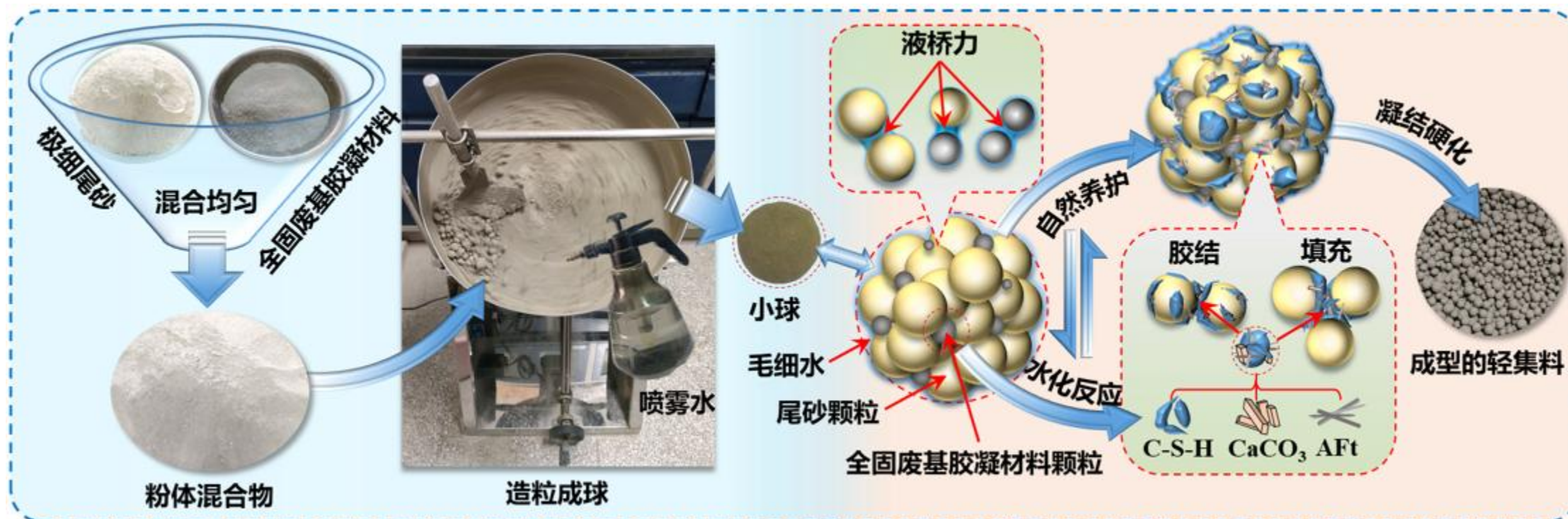
研究成果②：揭示了全固废基胶凝材料水化及其固化尾砂机理

- 电石渣和脱硫石膏形成“碱+盐”环境，激发富含铝、硅矿物成分的钢渣、粉煤灰和矿渣的水化活性，一系列的水化反应生成多种形态的产物，通过胶结、填充作用使极细尾砂凝结硬化



❑ 研究成果③：冷粘结尾砂基轻集料制备及其物理力学性能研究

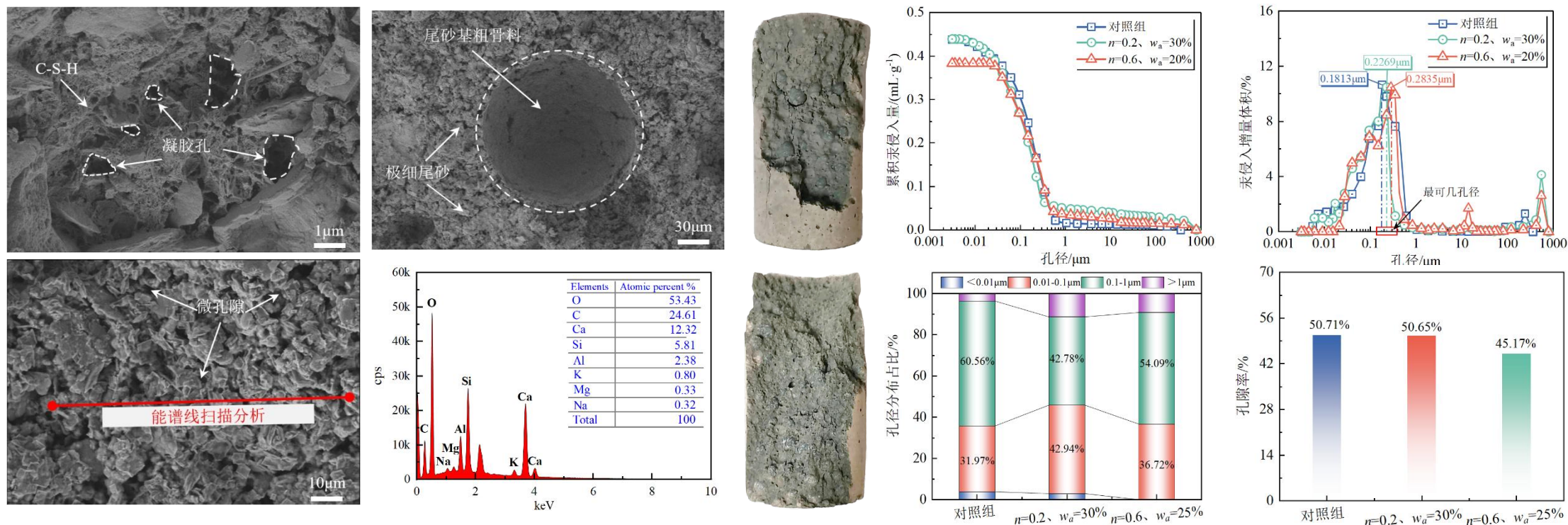
- 揭示了全固废基胶凝材料协同极细尾砂造粒成球机理。全固废基胶凝材料协同极细尾砂造粒成球是一个物理与化学相互作用的多阶段、渐进过程：(i) 吸附成核阶段、(ii) 团聚成簇阶段、(iii) 增长成熟阶段、(iv) 凝结硬化阶段



研究成果④：尾砂基粗骨料胶结充填体宏观力学性能研究

尾砂基粗骨料对胶结充填体改性增强机制

- 掺入超细尾砂基粗骨料，增加了体系中**自由水**的含量，为早期水化反应提供充足水分
- 在水化产物的粘合作用下，粗骨料形成**三维骨架结构**，抑制裂纹扩展，提高承载能力
- 多孔结构的粗骨料通过“吸水-饱水-释水”过程发挥**内养护**作用，促进长期强度提升



□ 研究成果⑤：尾砂基粗骨料胶结充填料浆流变及管输特性研究

- 确定了尾砂基粗骨料颗粒级配影响下胶结充填料浆的流变参数，探明了尾砂基粗骨料对胶结充填料浆管道输送性能的影响，构建了尾砂基粗骨料胶结充填料浆流变参数的预测模型

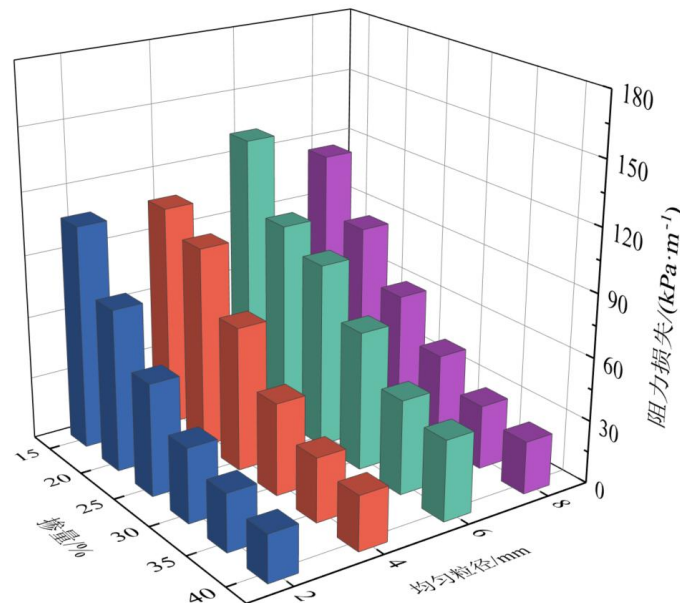
胶结充填料浆管道输送阻力损失计算公式：

$$j_m = \frac{16 \cdot \tau_0}{3 \cdot D} + \frac{32 \cdot v \cdot \eta}{D^2}$$

根据矿山现场充填工艺参数，
 $D=0.1\text{m}$ ， $v=1.0\text{m/s}$ ，管道输送阻力损失计算模型：

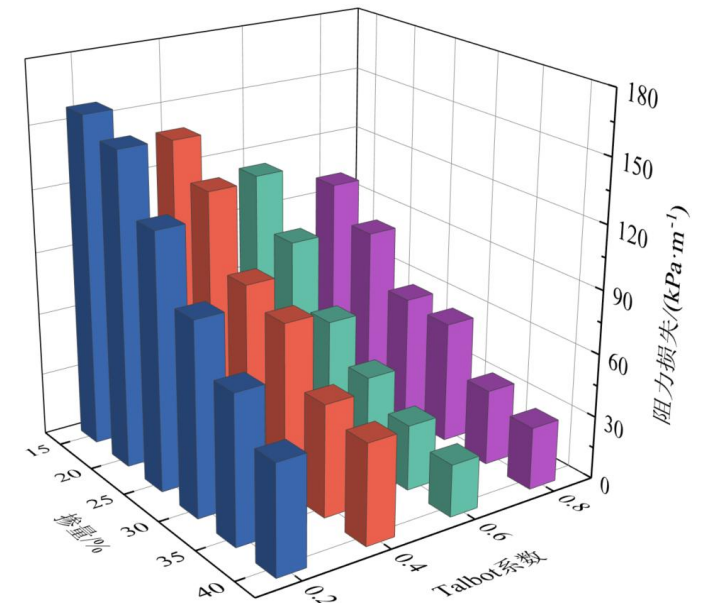
$$j_m = 53.33 \cdot \tau_0 + 3200 \cdot \eta$$

(i) 均匀粒径 d



管输阻力损失降幅为
70.71%~79.04%

(ii) Talbot系数 n



管输阻力损失降幅为
65.55%~78.13%

□ 技术经济可行性分析

■ 国家政策



中华人民共和国应急管理部
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China

对党忠诚 纪律严明
赴汤蹈火 竭诚为民

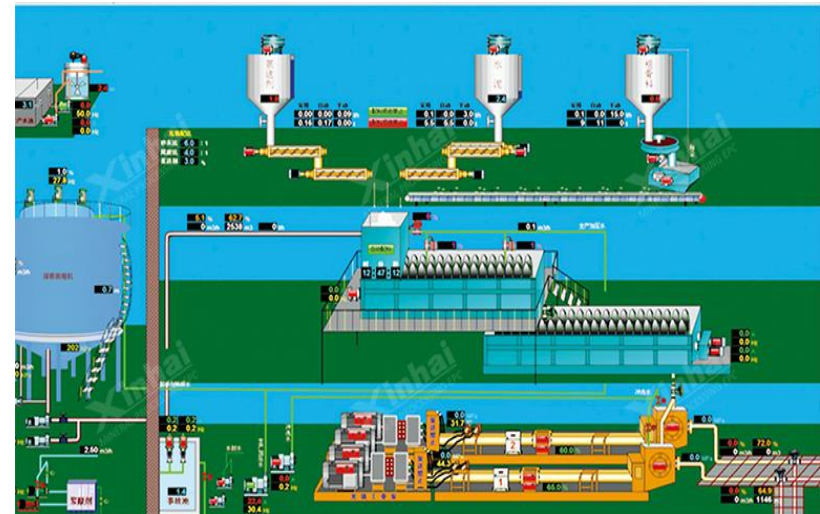
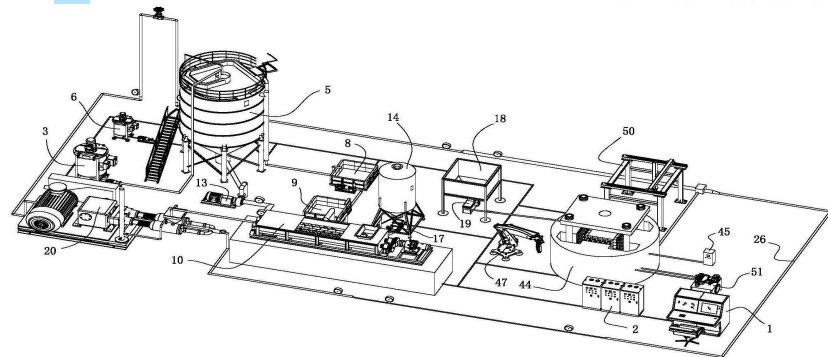
首页 机构 新闻 公开 服务 互动 党建 社会救援服务 应急科普

首页 > 公开 > 通知公告 > 通知

2020-03-02 17:27 来源：安全生产基础司 字体：【大中小】 打印 分享

关于印发防范化解尾矿库安全风险
工作方案的通知

应急〔2020〕15号



(二) 强化源头准入，严格控制尾矿库数量。

1. 严格实行总量控制。各省（自治区、直辖市）要结合本地区国民经济和社会发展规划、土地利用、安全生产、水土保持和生态环境保护等要求，采取等量或减量置换等政策措施对本地区尾矿库实施总量控制，自2020年起，在保证紧缺和战略性矿产矿山正常建设开发的前提下，尾矿库数量原则上只减不增。要实行尾矿库基本情况公告制度，每年年初将上年度尾矿库数量、名称、地址、所属或管理单位等信息在当地政府和有关部门网站以及当地其他主流媒体上公告，主动接受新闻舆论和社会公众监督。（各省级人民政府负责落实）



□ 技术经济可行性分析

▪ 国家政策

**中华人民共和国中央人民政府**
www.gov.cn

Q 首页 | 简 | 繁 | EN | 登录 | 邮箱 | 无障碍

首页 > 国务院公报 > 2023年第26号

字号: 默认 大 超大 | 打印

中共中央办公厅 国务院办公厅 关于进一步加强矿山安全生产工作的意见

矿山安全生产事关人民群众生命财产安全，事关经济社会发展和社会稳定大局，是安全生产的重中之重。为深入贯彻党的二十大精神，进一步加强矿山安全生产工作，经党中央、国务院同意，现提出如下意见。

一、严格矿山安全生产准入

(七) 加快矿山升级改造。推动中小型矿山机械化升级改造和大型矿山自动化、智能化升级改造，加快灾害严重、高海拔等矿山智能化建设，打造一批自动化、智能化标杆矿山。地下矿山应当建立人员定位、安全监测监控、通信联络、压风自救和供水施救等系统。**新建、改扩建金属非金属地下矿山原则上采用充填采矿法，不能采用的应严格论证。**中小型金属非金属地下矿山不得有4个以上生产水平同时采矿。尾矿库应当建立在线安全监测系统，新建四等、五等小型尾矿库应当采用一次性建坝。

2. “三下” 开采技术与方法



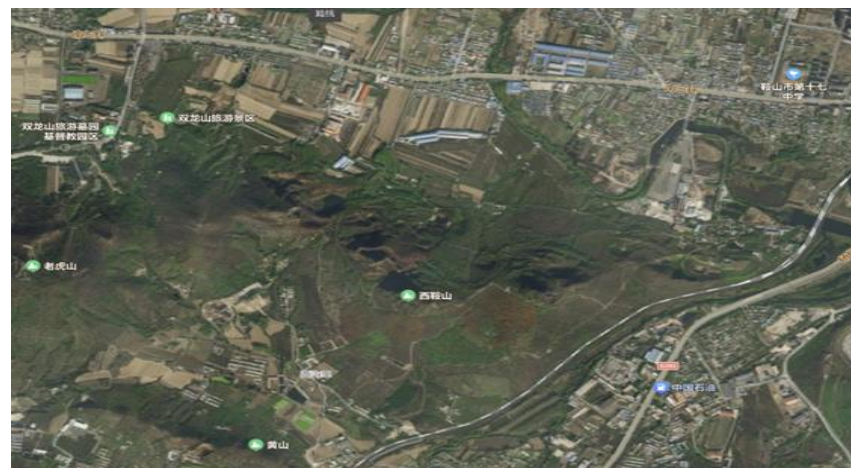
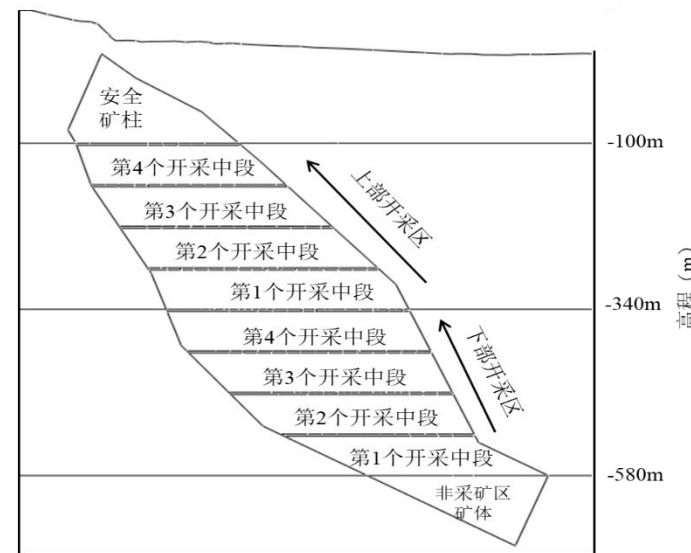
□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 研究背景

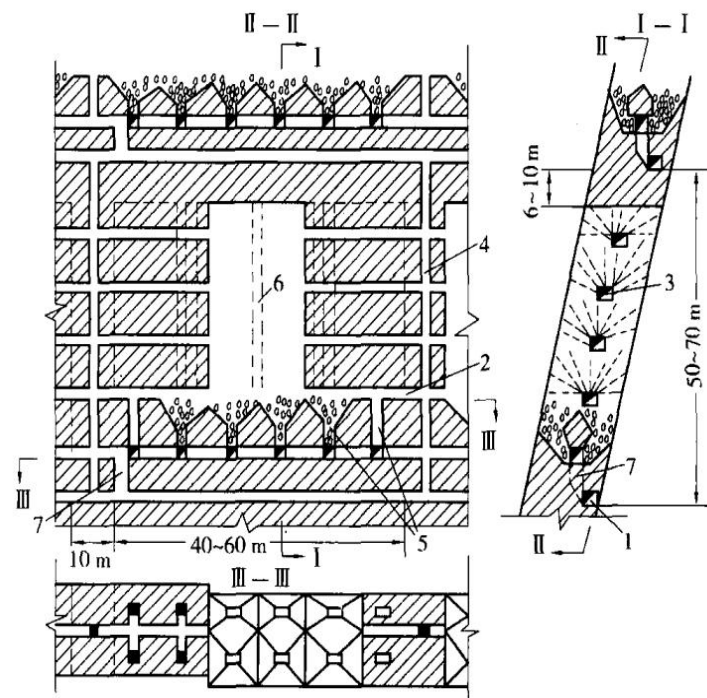
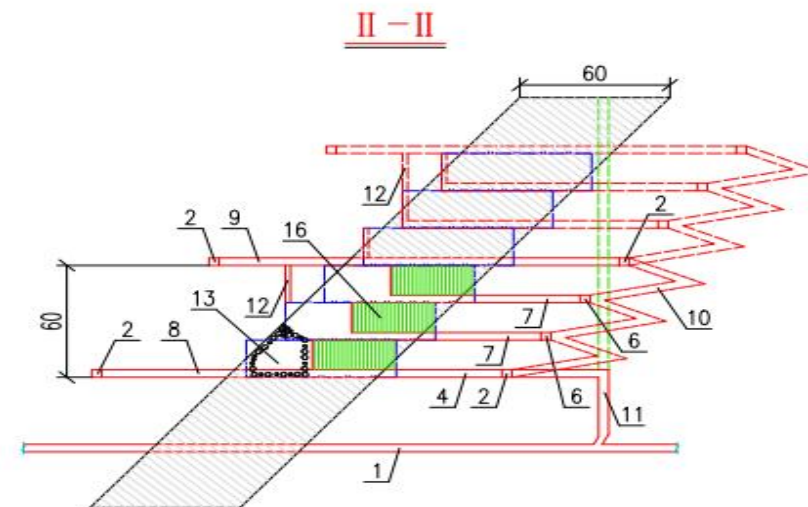
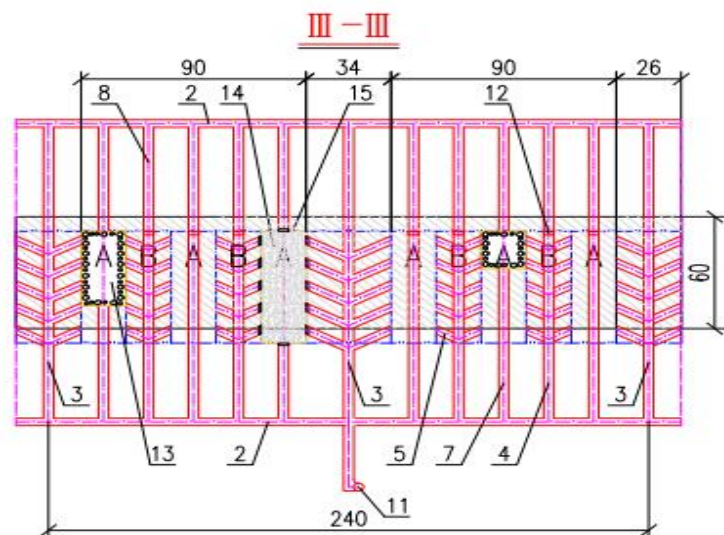
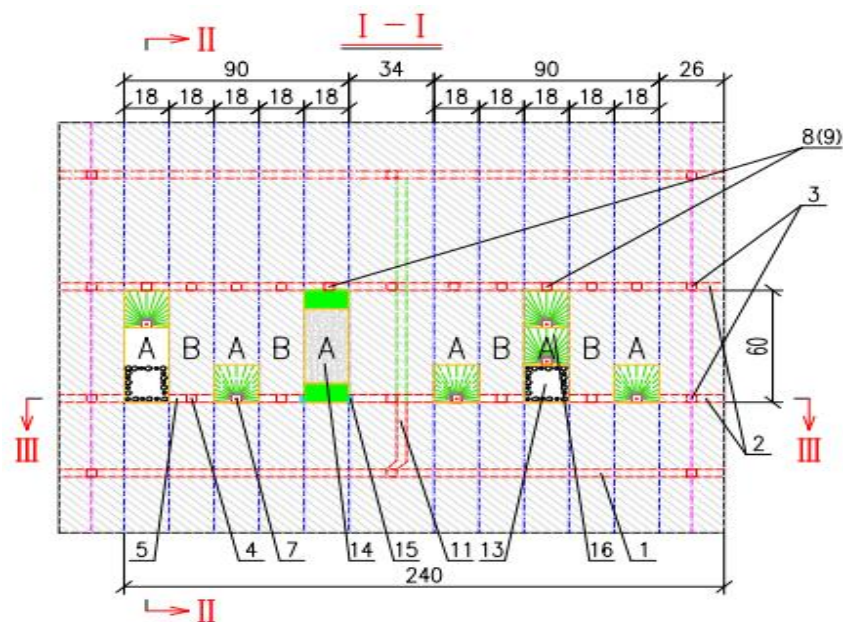
- ✎ 地表环境复杂，矿权范围内有河流、铁/公路及村庄，属“三下”开采，地表允许变形较小，若井下采动诱导围岩发生失稳并通过上覆岩层蔓延至地表，将给生命财产安全造成极大损失

▪ 采矿方法

- ✎ 为保护地表生态环境、交通设施、重要区域以及防止地表水对地下开采造成影响，拟采用空场嗣后充填开采地下铁矿资源
- ✎ -100m水平以上矿体留作矿柱以及矿体东端10勘探线以东矿体留作矿柱，矿柱暂时不回采体



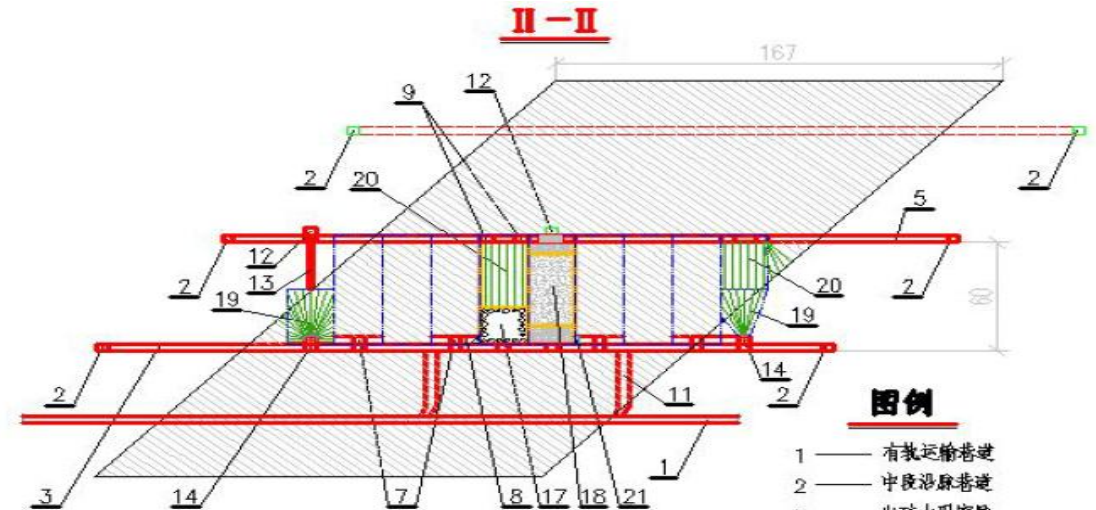
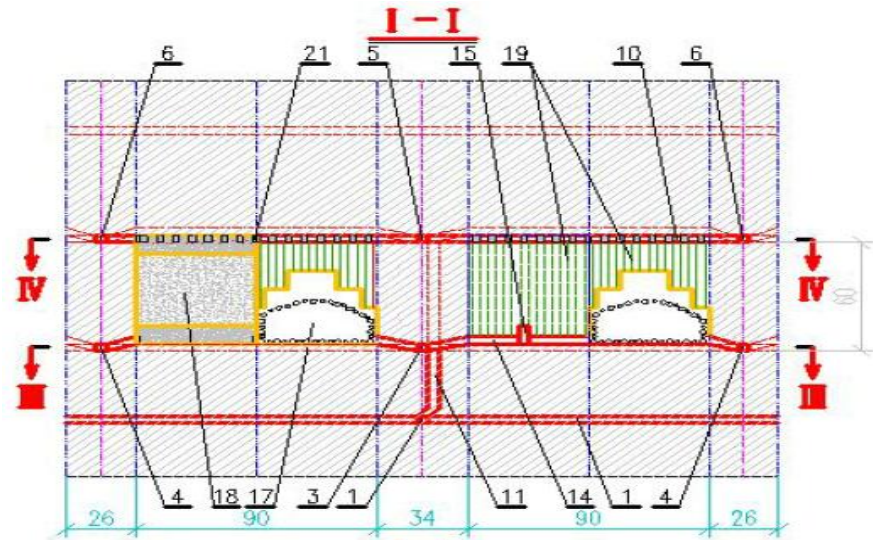
分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿方法



沿走向布置的分段凿岩阶段矿房法

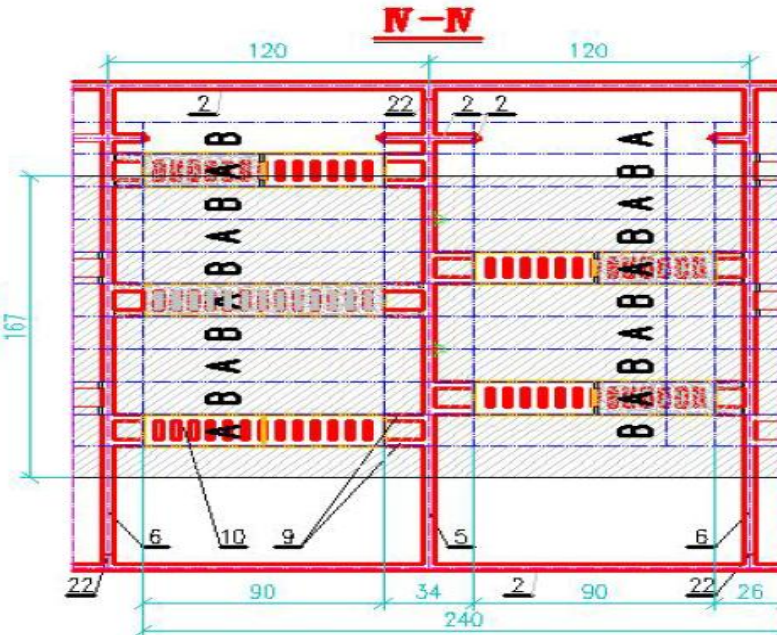
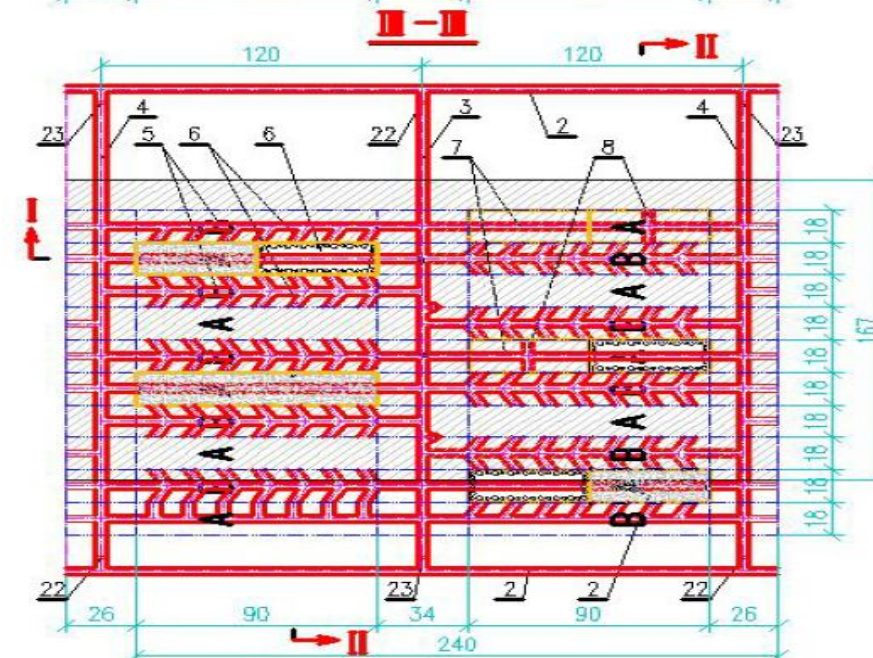
- 1-阶段运输巷道
- 2-拉底巷道
- 3-分段凿岩巷道
- 4-通风行人天井
- 5-漏斗
- 6-切割天井
- 7-溜井

大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿方法



图例

- 1 — 有轨运输巷道
- 2 — 中段沿脉巷道
- 3 — 出矿水平穿脉
- 4 — 出矿水平回风穿脉
- 5 — 凿岩水平穿脉
- 6 — 凿岩水平回风穿脉
- 7 — 出矿巷道
- 8 — 出矿进路
- 9 — 凿岩巷道
- 10 — 凿岩棚室
- 11 — 矿石溜井
- 12 — 充填联络道
- 13 — 充填钻孔
- 14 — 拉底巷道
- 15 — 切割槽
- 16 — 矿体
- 17 — 松散矿石
- 18 — 充填体
- 19 — 大直径深孔
- 20 — 扇形中深孔
- 21 — 充填挡墙
- 22 — 风门
- 23 — 门禁



2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 研究意义

- ✎ 因空区充填滞后性以及大体积充填体力学性能弱、易压缩沉降等特点，导致上覆岩层变形移动问题依然存在，尤其是面临地表岩石移动范围能否调整或采取何种措施予以保护地表重要设施等问题。
- ✎ 地表岩移变形与沉降背后的科学问题就是超大规模回采诱发的地压显现规律和上覆岩层及地表移动变形规律

▪ 研究思路

- ✎ 项目采用室内试验、理论分析、数值计算、物理模拟等研究方法，系统研究地下金属矿山超大规模高速率回采衍生的覆岩移动与地压显现规律、群空区稳定与采-充平衡、充填体自立与灾变机理、地表岩移范围与监测预警等关键技术问题，为我国超大规模地下矿山安全高效开采和地压监测预警提供理论指导和技术支撑，并形成超大型地下金属矿山安全、高效、可持续的开发模式

2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 主要研究内容

专题一	超大规模回采诱发的地压显现规律研究
专题二	采-充动态平衡分析及合理周转空区体积论证
专题三	地下岩体工程时-空稳定性分析与评价
专题四	采-充工艺优化与充填体稳定性研究
专题五	上覆岩层及地表移动变形规律研究
专题六	矿压监测与预警
专题七	地表岩移控制技术研究

2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 专题二：采-充动态平衡分析及合理周转空区体积论证

- ✎ **基于时空维度的采-充动态平衡分析。**采充平衡目的是采充作业与可充空间之间量的平衡以及作业进度的有序衔接，包括采充平衡系统维度分析、采充动态平衡仿真模型建立、充填量和充填进度与可充填空间的动态平衡、采充平衡管理保障措施等
- ✎ **合理周转空区体积论证。**结合以采空区安全稳定为基础，建立**合理周转空区体积**模型，分析周转空区的累积体积与矿岩、充填体稳定性之间的适配关系，确定合理的周转空区体积的上下限，保障采-充工艺全时性的动态平衡
- ✎ **采空区群灾变孕育机制研究。**基于采-充动态平衡分析，考虑嗣后充填工作滞后、合理周转空区留设等因素，建立投产采空区群三维模型，探究采空区群围岩的应力分布及其影响带延展范围，分析受相邻矿体采动时采空区群的应力叠加效应，明确采空区群潜在的灾变孕育机制，提出采空区（群）稳定性控制技术措施

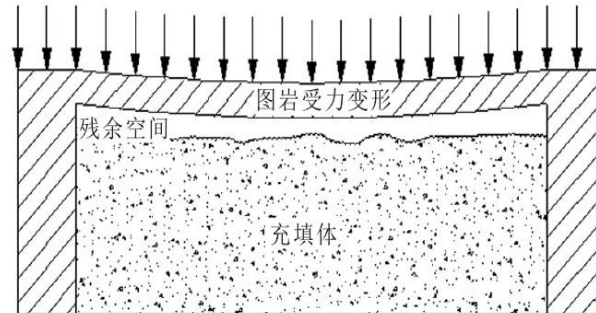
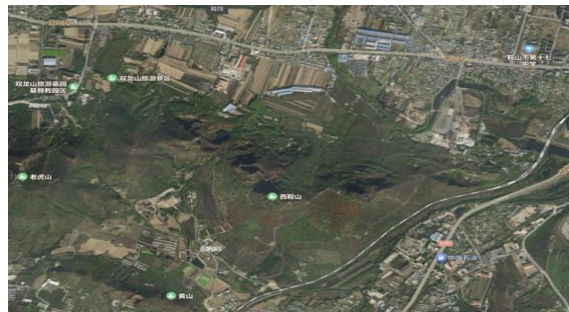
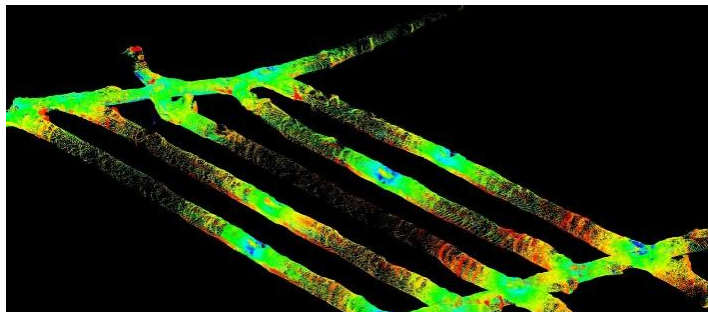
2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 专题五：上覆岩层及地表移动变形规律研究

- ✎ **采场上覆岩层移动变形规律研究。** 依据上覆岩层结构特征，建立以跨距为变量非均布载荷固支梁模型，揭示上覆岩层在采动过程中的移动变形规律，明确采-充过程中上覆岩层变形的非线性特征，论证充填体支护性能的可靠性
- ✎ **地下开采对地表建构筑物影响论证。** 基于数值模拟，开展地表岩体变形及等效移动角变化规律研究，利用概率积分法分析地表发生的最大曲率、倾斜及水平变形，明确地表移动范围，依据地表重要建构筑物安全保护等级，细化采场结构参数和采充工艺，减少矿井压矿量损失



2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 充填开采引起地表岩移因素分析

充填开采矿山地表变形仍不可避免，只是由于岩移滞后期比空场法岩移时间长，变形程度微小，变形时间延迟而已。充填开采地表岩移存在一定滞后性，导致岩移滞后的影响因素包括：

- ✎ **充填体强度。** 坚固刚性大、级配好、致密的充填材料的充填体支撑效果好，充填体压缩量也小；相反，充填体压缩量就大
- ✎ **回采顺序。** 不同的回采顺序和开挖过程，围岩具有不同的载荷响应变化，并直接影响到矿柱、采场及顶底板围岩的稳定性，进而影响围岩变形及地表岩移。
- ✎ **矿柱留设。** 留设一定的原岩矿柱可承受采场空区顶板围岩转移的应力，并起到减小空区跨度的作用，空区跨度减小有利于顶板围岩自稳和更小的变形沉降
- ✎ **充填接顶。** 因充填不可能完全接顶，故采空区中不可避免存在因充填产生的大量未接顶残余空间，大量空区的存在为岩移变形提供空间

2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 地表岩移控制技术措施

- ✍ **及时充填空区。** 建议西鞍山铁矿在生产过程中，对重点区域采场进行强采强出，并在出矿结束后及时充填空区
- ✍ **保证充填质量。** 建议严格按照设计要求，保证充填质量：a) 提高充填体的接顶率；b) 提高充填料浆的体积分数；c) 降低充填体的体积应变，对于一定的应力环境，也就是提高充填体的体积弹性模量；d) 降低充填料浆的泌水率
- ✍ **尽量充填接顶。** 在生产过程中，应采用一定的技术手段和措施，提高充填体的接顶率，采场局部因充填体沉降而导致的充填残余空间高度不宜超过2~3m
- ✍ **地表岩移监测。** 矿山沉陷和变形监测是矿山安全生产的重要技术手段，对确保主要井筒、重要建构筑物、边坡及沉陷区域的地表安全，解释沉陷与变形产生的原因、了解和掌握其规律具有重要意义。沉陷与变形监测体系包括：设计并建立科学的监测网、监测程序与方法、数据处理与分析方法、分析和预报体制、应急和处理体制等

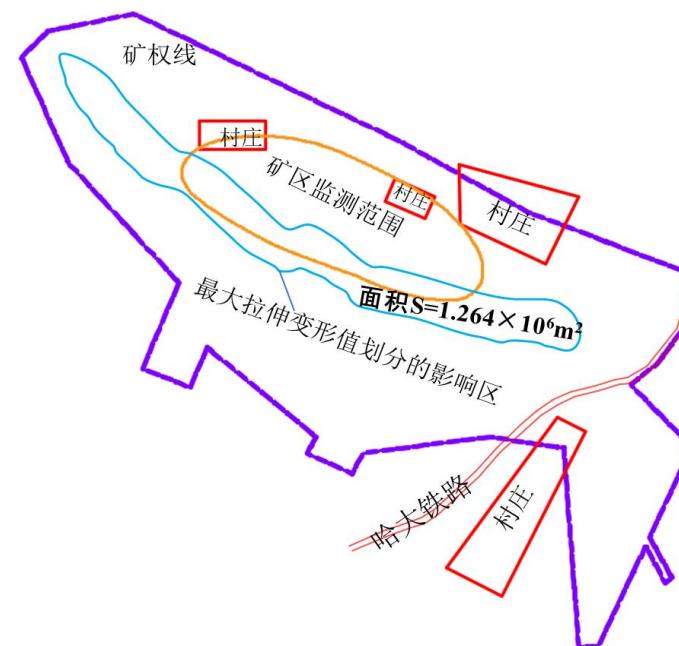
2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 井下开采诱发地表变形特征

- ✎ 基于地表及深部岩体变形分析，采用**概率积分法**获得半无限条件下，开采范围内地表及深部岩体的变形规律，即**不同深度处最大拉伸变形**位置
- ✎ -100m~-160m中段发生充填体沉降将导致与顶板之间存在残留空间，为岩层挠曲甚至破碎冒落提供自由空间，故重点分析并预测其影响地表最大范围
 - ✓ 地表发生最大变形的位置为各个边界外约64m处，其变形值计算可得为0.12mm，对地边影响较小
 - ✓ 以最大拉伸变形值划分地表影响边界为126.4公顷，以最危险参数划分影响区域，所得变形值对地表几可忽略不计，故圈定边界外变形对地表影响极低
- ✎ 计算依据：**假设充填率达95%，顶板与充填体存在2~3m残留空间**



2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 安全开采深度计算

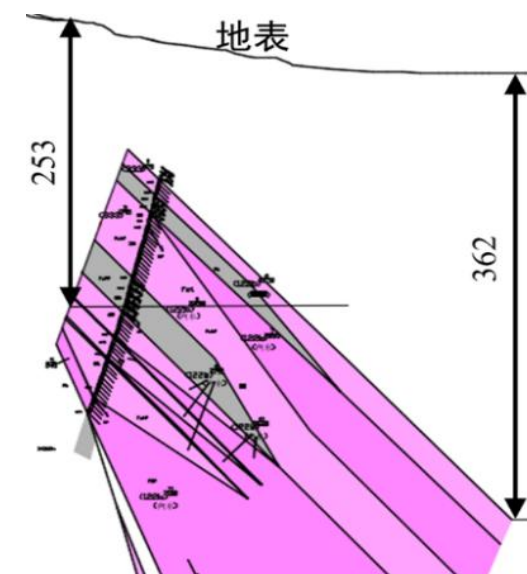
- ✎ 基于概率积分原理，重点研究深部开采范围内，Fe1主矿体以及Fe2、Fe3、Fe4、Fe5等分支矿体的**安全开采深度**
- ✎ 基于III级保护等级的地表变形，综合考虑水平位移、倾斜变形、曲率变形的安全开采深度，利用倾斜变形反算结果作为安全开采深度的参考值

$$H_{\varepsilon} = 1.52b \frac{W_{\max}}{\varepsilon_{\text{cri}}} \lg \beta$$
$$H_k = \sqrt{1.52 \frac{W_{\max}}{k_{\text{cri}}} \lg^2 \beta}$$

$$H_i = \frac{W_{\max}}{i_{\text{cri}}} \lg \beta$$
$$H_{\text{cri}} = \max(H_{\varepsilon}, H_i, H_k)$$

矿体编号	Fe1	Fe2	Fe3	Fe4	Fe5
安全开采深度/m	126.5	107.4	107.4	107.4	107.4
安全开采水平/m	-23.5	-42.6	-42.6	-42.6	-42.6
矿体赋存标高/m	-100	-300	-300	-520	-500

- ✓ Fe1主矿体开采时诱发地表变形应最为显著
- ✓ 矿体**安全开采水平远高于矿体拟开采深度**，故从理论计算井下开采对地表几乎无影响



2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 对地表建筑物破坏分析

✎ 以Fe1主矿体为例，因矿体形态及埋藏深度变化较大，故计算时选取最危险的状态参数进行组合计算；基于矿山**开采沉陷理论**，考虑充填不完全接顶，空顶高度3m

地表最大下沉值： $W_{\max} = m \times q \times \cos \alpha = 3 \times 0.4 \times \cos 47.5 = 810.71 \text{ mm}$

影响半径： $r = H / \tan \beta = (150 + 100) / 1.56 = 160.256 \text{ m}$

最大倾斜值： $i_0 = \pm W_{\max} / r = \pm 7.039 \text{ mm/m}$

最大曲率值： $K_0 = \pm W_{\max} / r^2 = \pm 0.0062 \times 10^{-3} / \text{m}$

最大水平变形值： $\varepsilon_0 = \pm 1.52 b W_{\max} / r = 1.52 \times 0.3 \times 246 / 465.8 = \pm 0.24 \text{ mm/m}$

- ✓ 井下空场嗣后充填开采Fe1号矿体，地表变形满足**III级保护等级**要求（水平变形 $\varepsilon \leq 6.0 \text{ mm/m}$ 、曲率 $K \leq 0.6 \times 10^{-3} / \text{m}$ 、倾斜率 $i \leq 10.0 \text{ mm/m}$ ）
- ✓ 若减少充填不接顶的空顶高度（<3m），由此导致的地表变形值将更小

2. “三下” 开采技术与方法

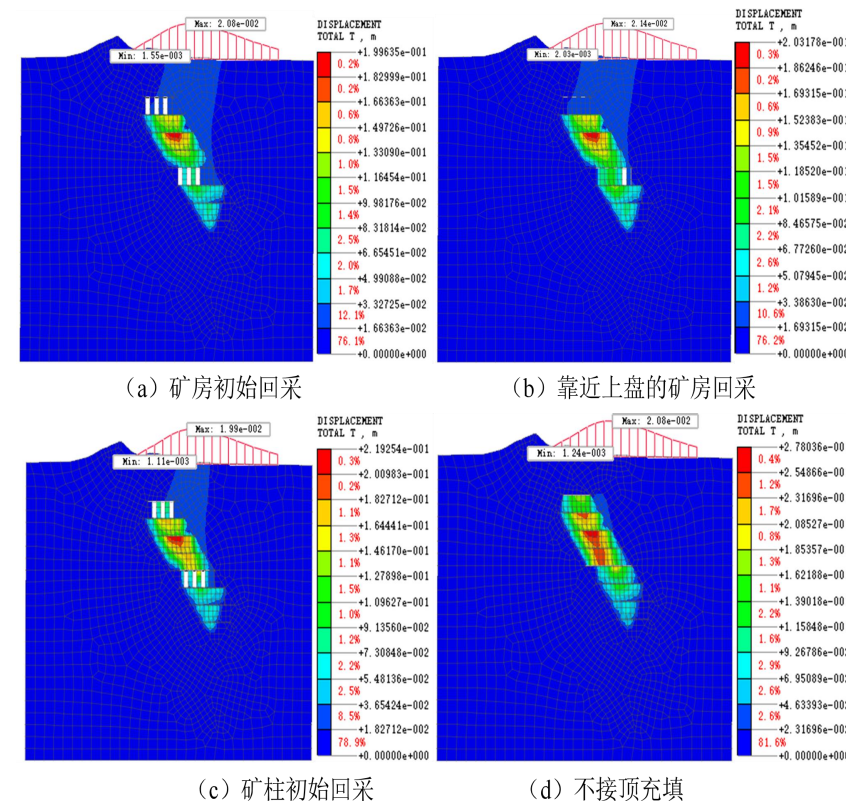


□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 地下开采诱发地表变形数值计算

- ✎ 计算模型：-340m水平以矿岩基于霍克-布朗准则，-340m水平以下采用摩尔-库伦理论
- ✎ 计算软件：二维模拟采用midas软件，三维采用FLAC3D
- ✎ 监测地点：主要选择矿体上盘、地表以及顶底板等位置，计算开挖过程中诱发围岩变形及其变形范围等；-160m和-400m中段按照不完全接顶处理

- ✓ -160m、-400m中段回采引发地表变形主要因素为该中段矿体回采行为
- ✓ 中段回采结束后因不完全接顶充填，地表最大变形值**20.8mm**，上盘最大变形值**24.4mm**，顶板最大变形值**242.2mm**
- ✓ 大变形集中于充填体，充填体弹性模量远小于围岩，发生的弹塑性变形要大于岩石
- ✓ -400m中段因充填体沉降原因，与顶板之间存在**3m**空间，为充填体的变形甚至破坏冒落提供了空间条件



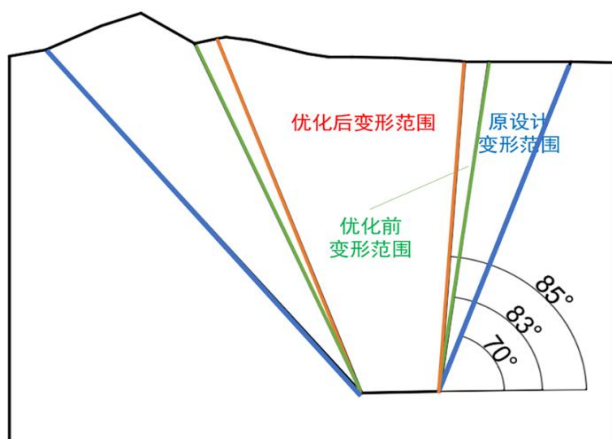
2. “三下” 开采技术与方法



□ 空场嗣后充填开采覆岩移动规律与控制技术

▪ 提高充填接顶率后地表变形范围圈定

- ✎ 针对不完全接顶充填存在的隐患，对充填工艺进行优化，以期提高充填率
- ✎ 优化方案取消-160m中段完全不接顶情况，对矿房（一步采）完全接顶，矿柱（二步采）仍保留原设计充填方案



- ✓ -160中段采用矿房完全接顶，变形区域缩小至与河流边界相离区域，优化后地表变形对河流影响大大降低
- ✓ 原设计中移动角为 70° ，按照-160~-100中段不接顶情况下，采矿作业产生的矿岩移动角为 83° ，经优化后矿岩移动角增至 85°



汇报内容

1 现状与面临的问题

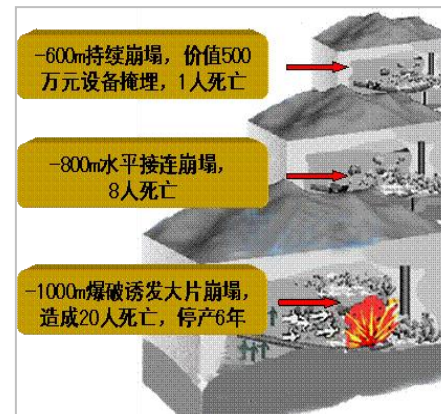
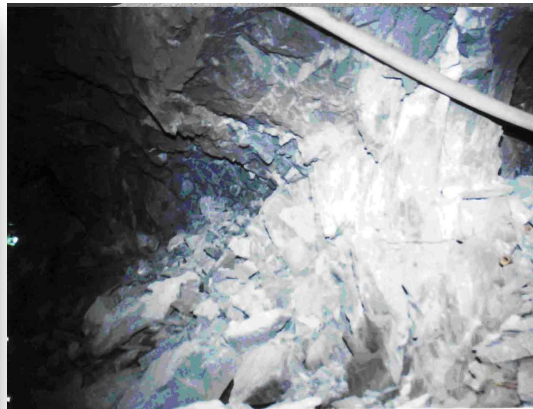
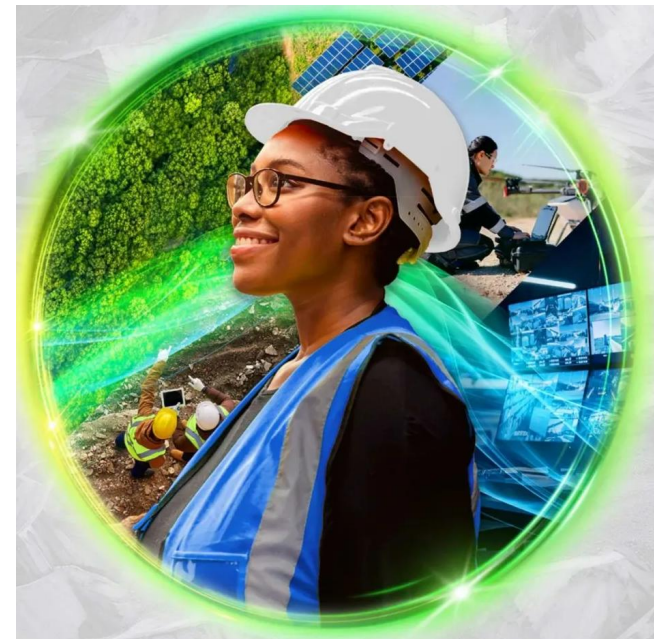
2 开采技术与方法

3 发展前景与建议

□ 矿业发展面临的挑战与机遇

■ 面临的挑战

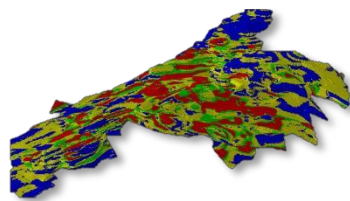
- ✎ 与全球**经济形势**密切相关，采矿业面临需求不稳、供应链波动等问题
- ✎ 矿业**全球化**发展，经营竞争全面**国际化**
- ✎ 矿山**采深日增**，成本增加，作业环境恶劣
- ✎ 人员老龄化严重，**技术人才**短缺，人力成本攀升
- ✎ **安全环保**要求日益提高，绿色发展需求迫切



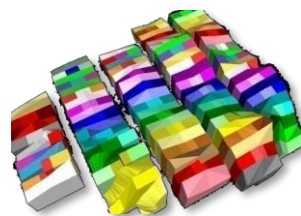
智慧矿山核心内容



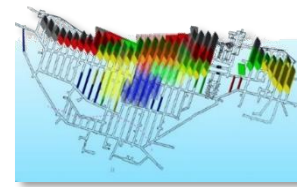
地质建模



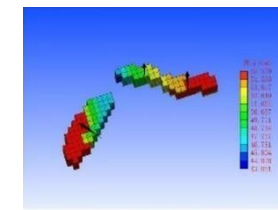
资源评估



开采设计



计划编制



采矿生产

围绕矿产资源全生命周期的矿山开采规划与生产过程智能管控

储量管理



生产执行



智能调度



三维管控



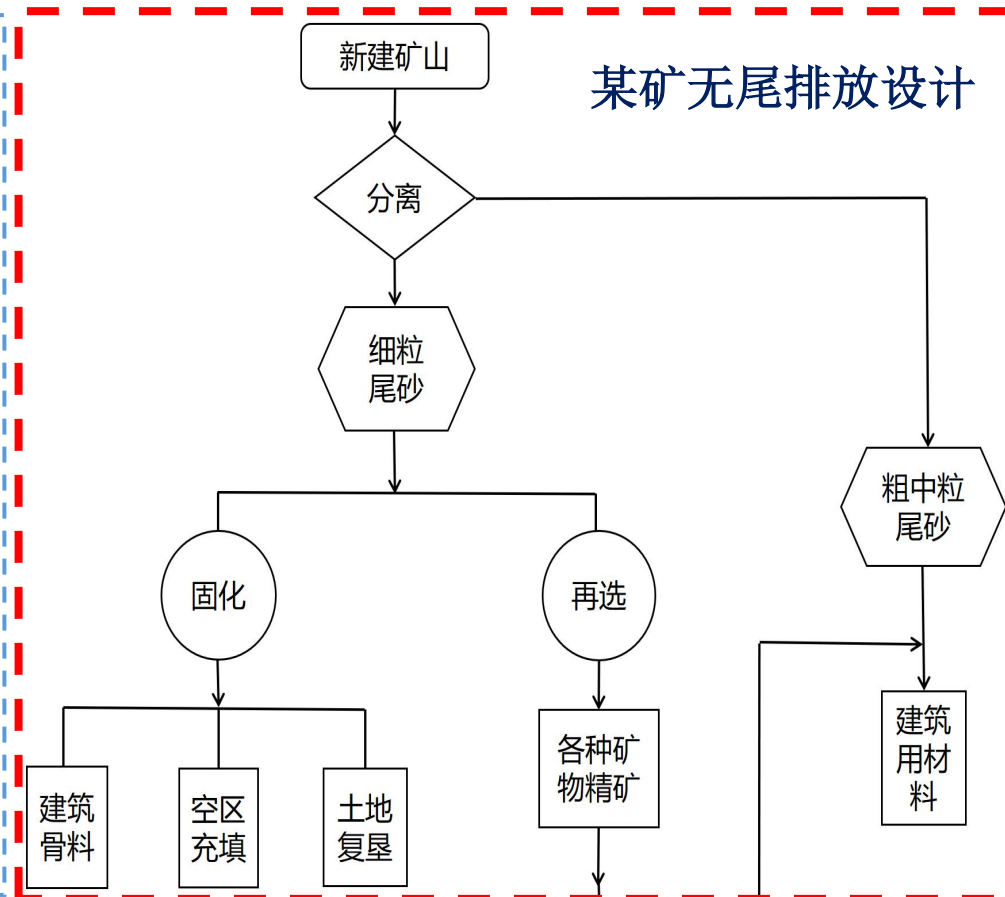
大数据分析



□ 应用前景

▪ 推进尾矿综合利用，建设无尾矿山：矿山企业可持续发展重要途径

- ✓ 将工业固废材料与矿山尾砂结合生产充填材料，输送到地下**采空区**，减少固体废弃物排放和相应的环境污染风险，为固体废弃物的清洁利用提供一种可行的方法
- ✓ 加强先进工艺技术应用与管理，建设**无尾生产系统**
- ✓ 通过**无尾矿山**高效生产组织管理，理顺生产组织和井下充填，保证整个系统健康运转，实现无尾排放，走可持续发展路线，建绿色矿山，社会效益明显

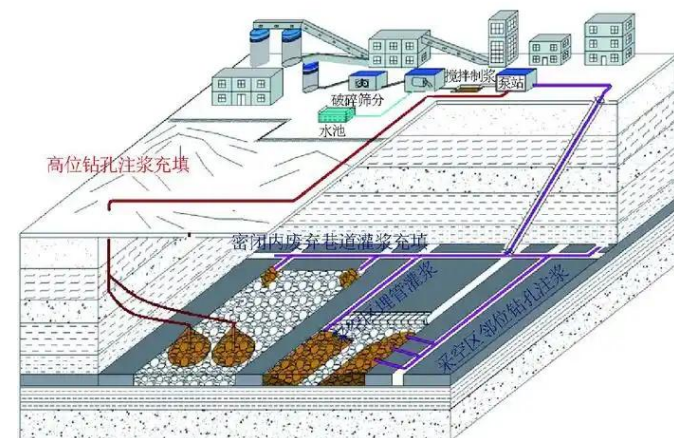


- **科研攻关。** 针对矿床赋存特点和技术问题，② 汇集科研机构、高等院校的科技力量，研发适合我国国情的安全、高效开采的综合配套技术② 并推广应用，② 提升矿山开采技术水平

- **技术优选。** 研究开采技术条件，优选不同采矿条件下的采矿方法及其合理矿床开采顺序，② 优化采场结构参数，简化回采工艺和充填工艺

- **充填先行。**②研究全尾矿浆料制备贮存输送与充填方法、全自动尾矿输送与充填系统，研究全尾矿充填体快速脱水方法，提升充填效率和支撑围岩效果并

- **监测保障。** 建立岩层变形破坏监测系统，②准确反映岩体应力、变形规律，实现地压（位移、应力）实时预测和预报等





感谢聆听

王炳文 中国矿业大学（北京）

Tel: 13693006633

E-mail: wbw@cumtb.edu.cn