

高寒高海拔地区矿产资源开采技术的 挑战与发展方向

报告人：杨小聪 首席专家

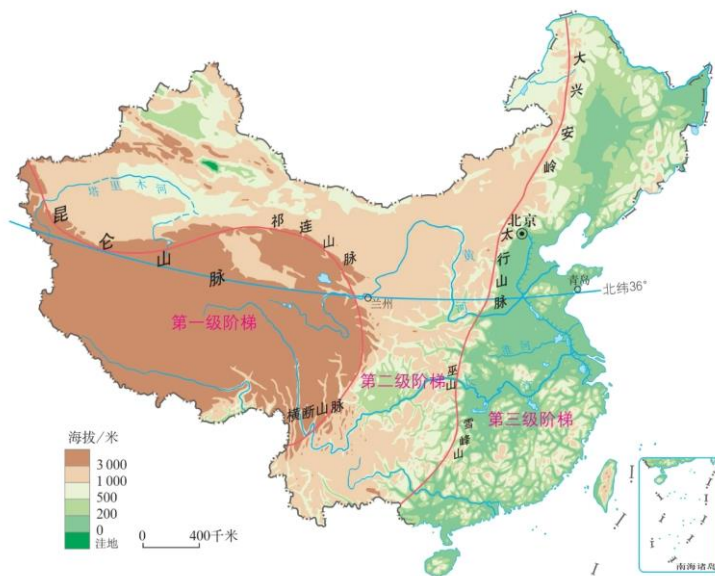
提纲

- 一、矿产资源及开发现状
- 二、开发条件及其影响
- 三、面临的技术挑战
- 四、已取得的成就
- 五、未来发展展望

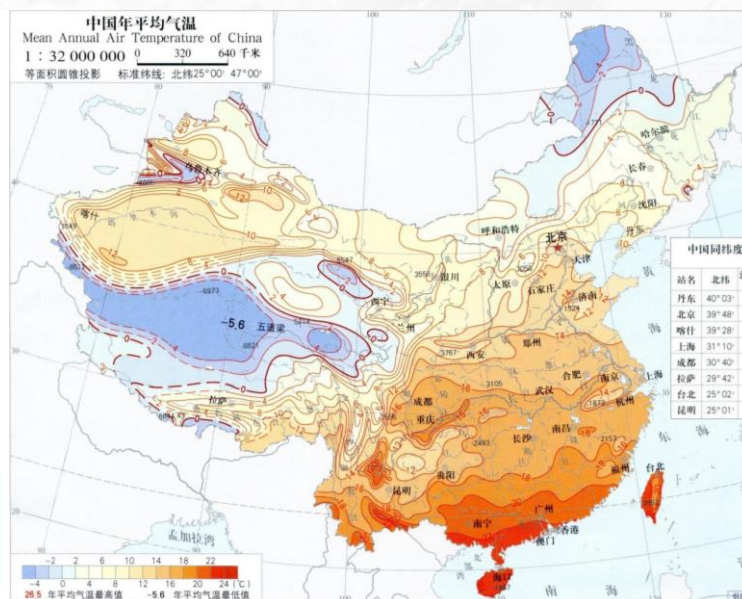
1、矿产资源及开发现状

1.1 高寒高海拔地区的界定

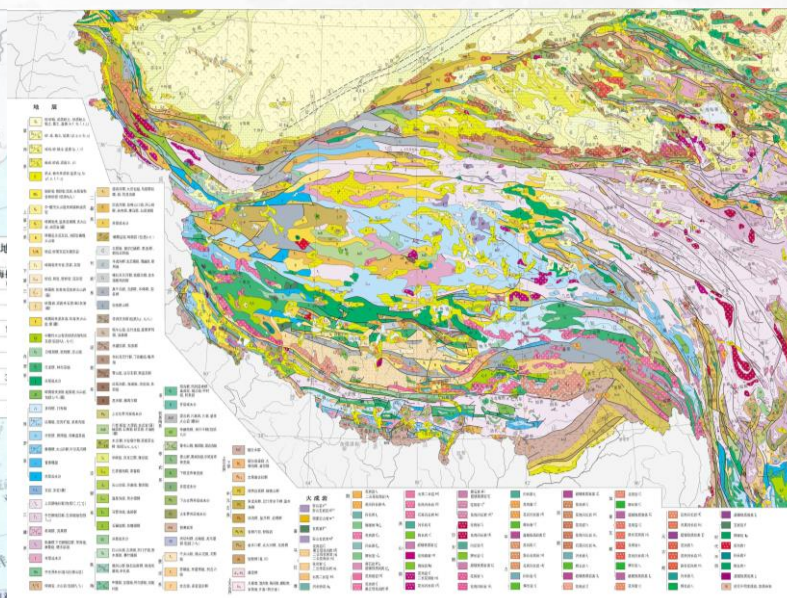
- 高海拔地区按照国际通行划分一般指海拔在1500m以上的地区；对于矿产资源开发，根据环境对人体生理状态、机械设备效能及岩土体力学性能的影响，可将海拔3000m以上的地区列为高海拔地区。



海拔等高线



年平均气温

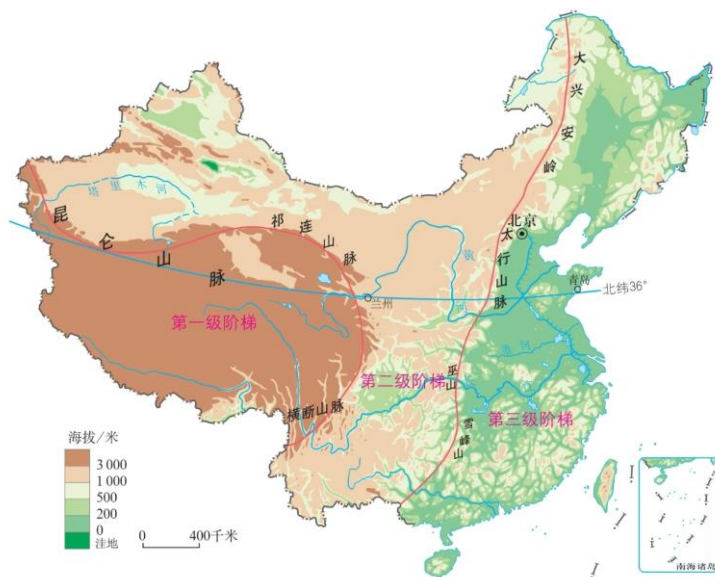


青藏高原地质图

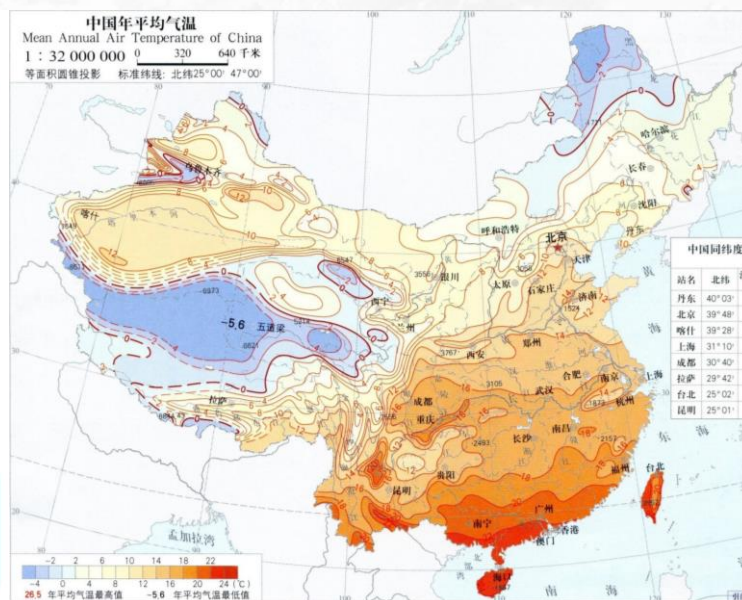
1、矿产资源及开发现状

1.1 高寒高海拔地区的界定

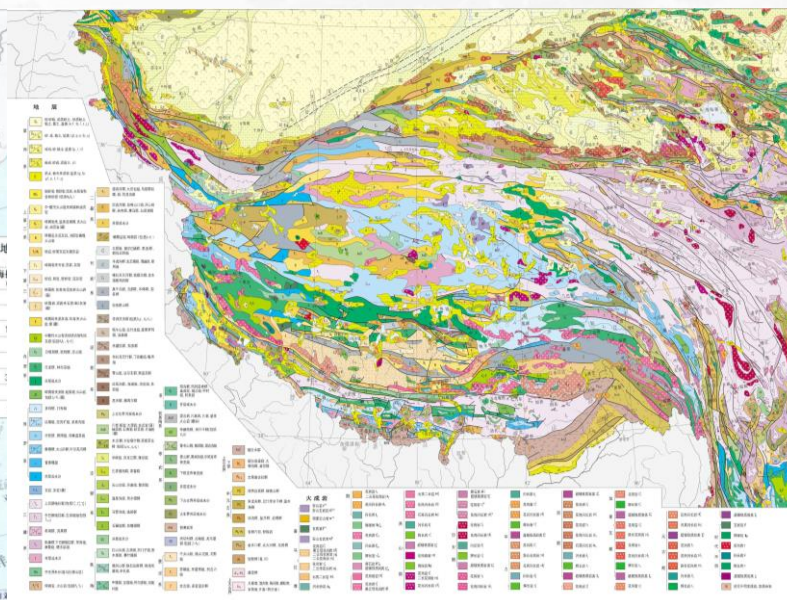
- 高寒地区一般指年平均气温低于 0°C ，或者最热月平均气温 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 且积温低于 2000°C 的地区。高寒地区一般地处高海拔地区或高纬度地区。海拔对气温有直接影响，一般海拔每升高100米气温下降约 0.6°C ，因此高海拔地区通常也是高寒地区。



海拔等高线



年平均气温

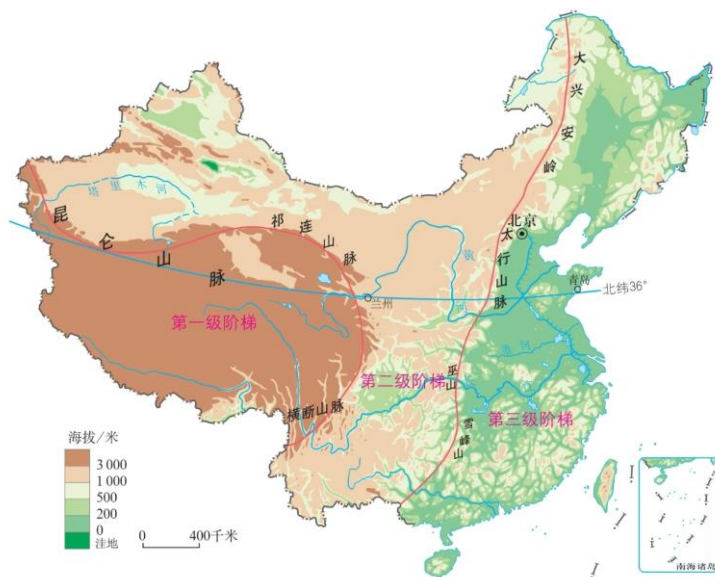


青藏高原地质图

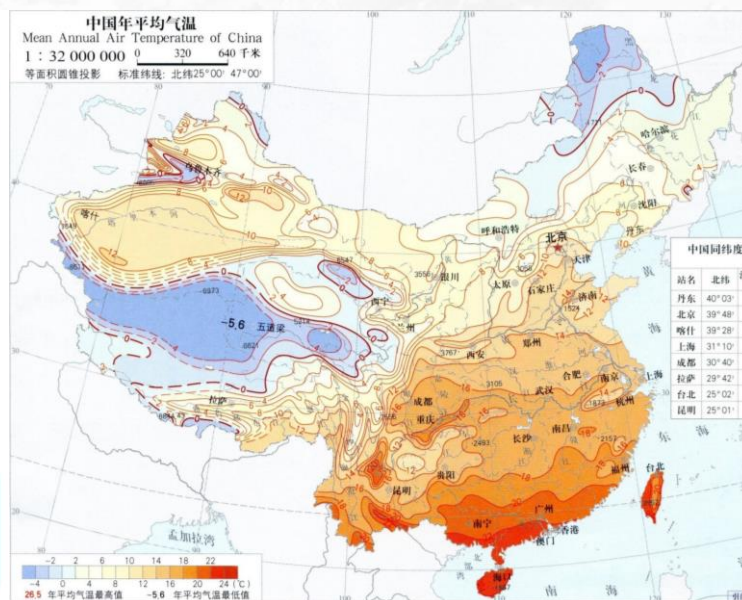
1、矿产资源及开发现状

1.1 高寒高海拔地区的界定

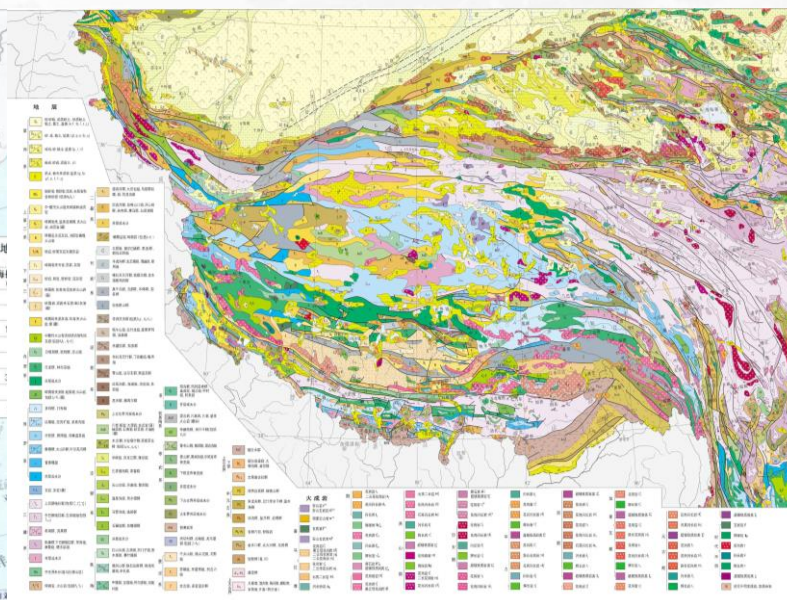
- 我国高寒、高海拔地区的矿产资源主要分布在青藏高原、内蒙古高原、阿尔金山脉和大兴安岭地区，涉及的省份主要有西藏、青海、新疆、甘肃、四川、云南、内蒙古和黑龙江等。其中由西藏、青海全境，新疆、甘肃、四川、云南部分地区构成的青藏高原是我国高寒高海拔地区矿产资源开发的重点区域。



海拔等高线



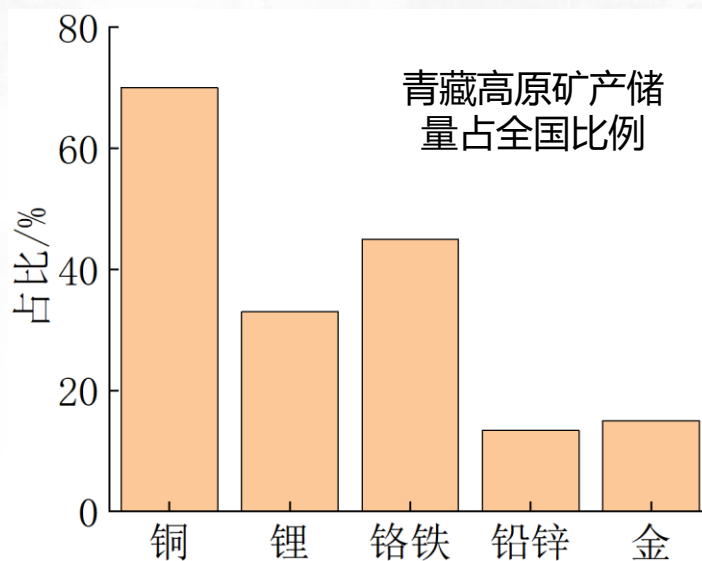
年平均气温



青藏高原地质图

1.2 高海拔高寒地区矿产资源储量与分布情况

- 以青藏高原为例，存在**三江、班公湖-怒江、冈底斯、北喜马拉雅**多个成矿带，已发现矿床、矿点及矿化点超过3000处，已探明储量的矿产有近70种，具体包括驱龙、甲玛、雄村等**7个超大型和25个大型矿床**
- 青藏高原地区的铜、铬、锂、铅、锌、金、银等12种关键矿产资源储量位于全国前5位



1.3 高海拔高寒地区的矿山及开采总体情况

- 青藏高原地区铜成矿带及主要超大型-大型铜矿床分布广泛，为大型露天开采创造了有利条件，形成了一批**千万吨级的大型露天铜矿**。
- 对于**地下开采**，代表矿山包括锡铁山铅锌矿、普朗铜矿等，采用可实现地下矿山规模化开采的自然崩落法和分段空场法（嗣后充填）。由于我国高海拔高寒地区早期矿产资源地质勘探和开发水平低，**目前多数地下矿山仍属于中小型矿山**。

我国高海拔寒区典型金属矿山开采现状

矿山名称	所在地	主要开采方法	生产能力	备注
驱龙铜矿	西藏	露天开采	4500万t/a	贫化率3%；损失率3%
玉龙铜矿	西藏	露天开采	2000万t/a	
德尔尼铜矿	青海	露天开采	240万t/a	
镜铁山铁矿	甘肃	露天开采（黑沟矿区） 无底柱分段崩落法（桦树沟矿区）	1100万t/a	贫化率8%； 回采率85.7%（桦树沟矿区）
甲玛铜矿	西藏	空场嗣后充填采矿法	1200万t/a	贫化率2.06%；损失率5.61% 原采用留矿法
罗布莎铬铁矿	西藏	分层崩落法	13万t/a	
扎西康铅锌锑多金属矿	西藏	上向水平分层充填法	45万t/a	
普朗铜矿	云南	自然崩落法	1250万t/a	贫化率7.2%；回采率98.5%
锡铁山铅锌矿	青海	分段空场嗣后充填法	135万t/a	贫化率13.45%；回采率86.6%

1.4 高海拔高寒地区矿产资源开发的战略意义

保障矿产供应链安全

服务国家能源转型战略

提升边疆“造血”能力

极端环境下的科技创新

1.5 国家和西藏自治区关于西藏矿产资源开发的主要政策

“要将西藏建成重要的**战略资源**储备基地”

“有重点地发展**优势矿产业**”

“建设重要的**战略资源**储备基地”

“合理有序发展**优势矿产业**”

“加快发展**绿色**矿业”

--2010年，中央第五次西藏工作会议

--2011年，西藏自治区《“**十二五**”时期国民经济和社会发展规划纲要》

--2016年，西藏自治区《“**十三五**”时期国民经济和社会发展规划纲要》

--2020年，《中共西藏自治区委员会关于制定国民经济和社会发展的“**十四五**”规划和二〇三五年远景目标的建议》

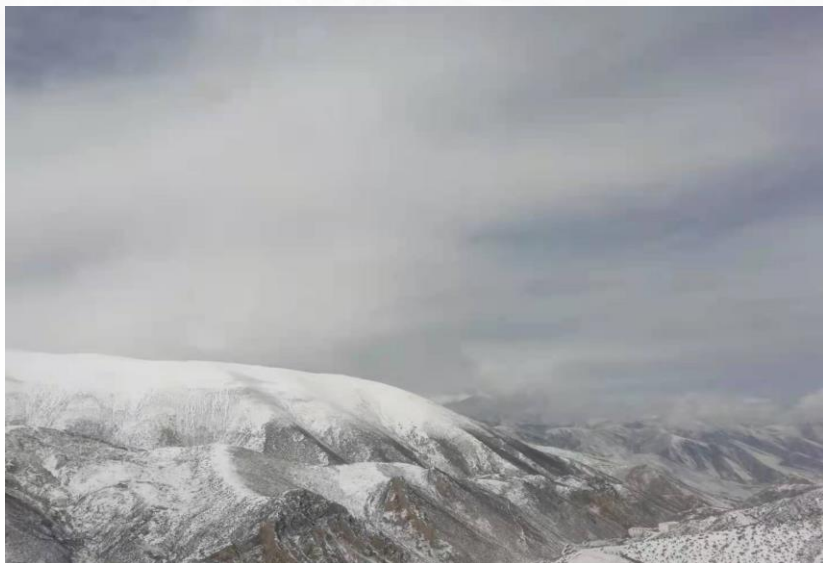
- 合理有序开发优势矿产资源
- 加快发展绿色矿业

提纲

- 一、矿产资源及开发现状
- 二、开发条件及其影响
- 三、面临的技术挑战
- 四、已取得的成就
- 五、未来发展展望

2.1 低压缺氧、寒冷高温差等恶劣环境条件及其影响

- **低压缺氧**：海拔5000m以上，空气含氧量**不足平原60%**，导致人员**高原反应**严重（如头痛、头晕、失眠、呼吸加快、心率加快、血压升高、认知能力下降等），工作效率较平原地区降低至**50%或更低**。
- **极端低温**：冬季气温可低至**-30°C以下**，机械设备启动困难，金属材料脆化，液压系统易失灵。
- **巨大温差**：昼夜温差可达**30°C以上**，加速材料疲劳，对设备密封性和结构稳定性构成挑战。
- **其他挑战**：强紫外线、复杂多变的气候（如突如其来的暴风雪）进一步增加户外作业风险。



低温、低压和寒冷的天气



风雪钻探

2.2 生态环境脆弱性及其影响

- **生态本底脆弱：**高寒草甸、冻土等生态系统一旦破坏，**自然恢复周期极长（10年或以上）**，甚至不可逆。
- **典型环境风险：**
 - 土壤与重金属风险：青藏高原土壤存在**天然高砷背景值**（西藏土壤平均砷浓度为**18.7mg/kg**，显著高于中国背景值**11.2mg/kg**），采矿活动可能加剧砷等重金属的活化和迁移。
 - 冻土破坏：工程扰动可能导致冻土层退化、地表塌陷，并影响周边草甸。
- **修复成本高昂：**在青海某矿区，通过**土壤重构、筛选适生草种**等方式进行生态修复，技术和资金投入巨大。



植被稀少的山脉



土壤环境监测

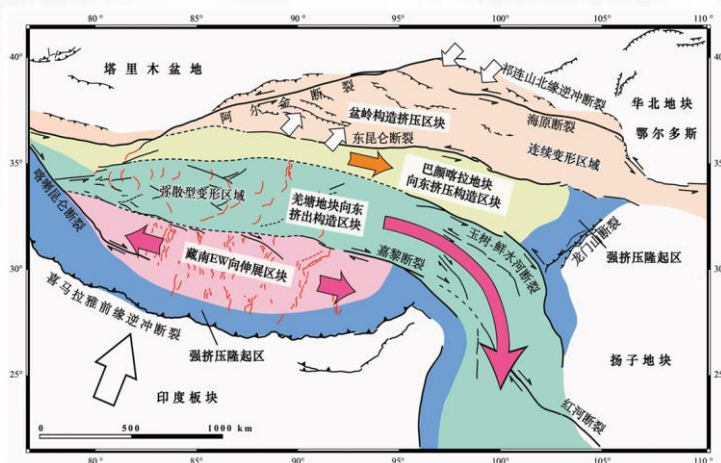


青海某矿修复前后对比图

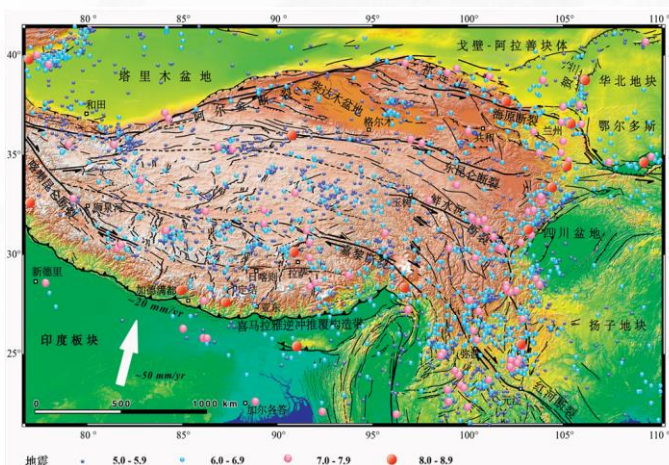
2、开发条件及其影响

2.3 复杂的地质构造及其影响

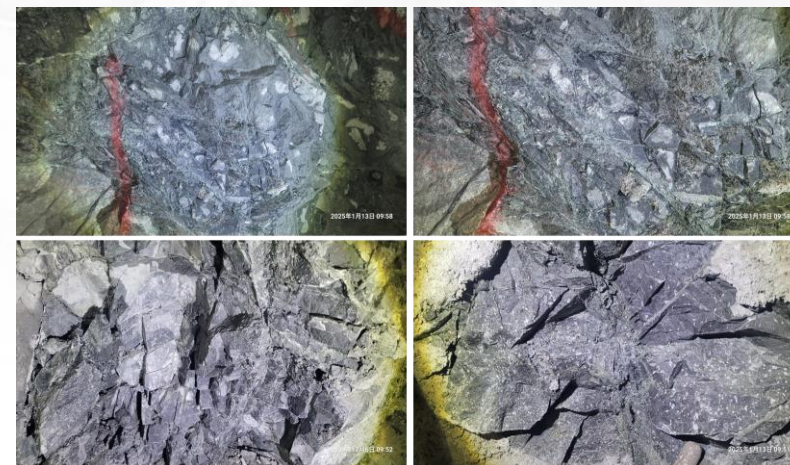
- **构造活动强烈：**青藏高原是由印度板块与欧亚板块碰撞挤压而成，是大陆构造变形的典型实例，具有**不同构造变形的分区特征**。高原北缘等地**新构造运动活跃**，如东昆仑地区现今抬升速率可达**1-2毫米/年**。
- **地震活动与地质灾害突出：**历史大地震（ $M \geq 8$ ）主要发生在高原东北、东南部及边缘的大型断裂带上。高原内部也广泛分布活动断裂，**地震风险高**。



青藏高原现今构造变形分区



青藏高原活动构造及周缘地震分布

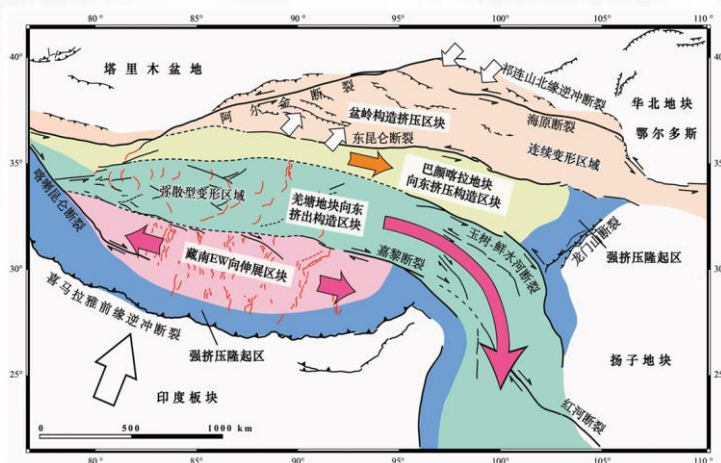


破碎矿岩 (GSI=20~25)

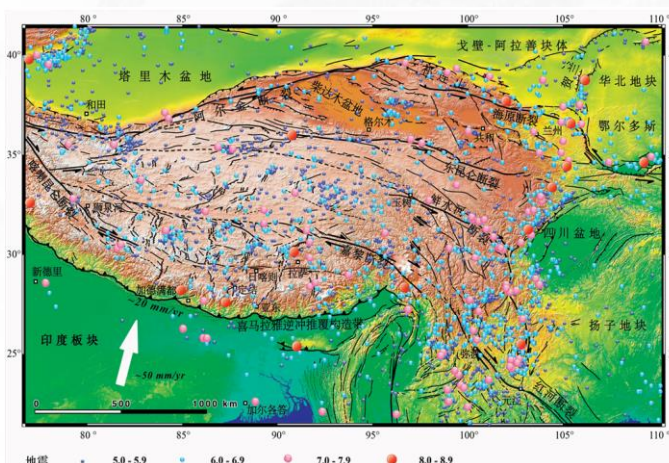
2、开发条件及其影响

2.3 复杂的地质构造及其影响

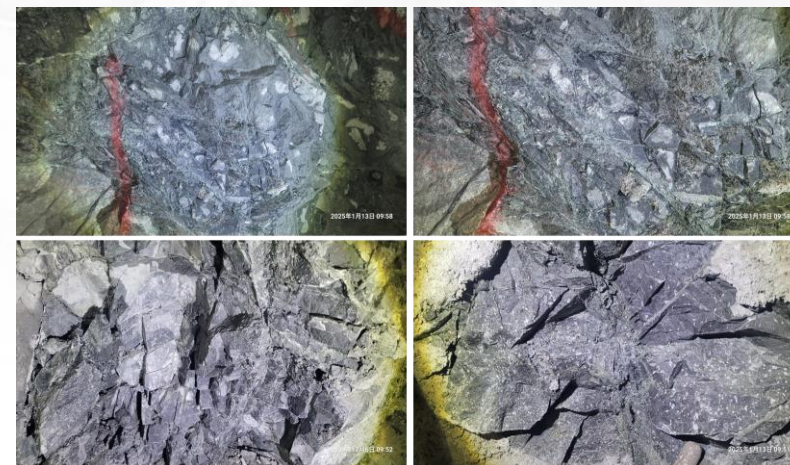
- **工程地质挑战：**强烈的构造活动导致**基岩破碎、溶蚀裂隙发育**，严重影响**井巷围岩稳定性和边坡设计**，大幅增加支护成本与施工风险。
- **冻土层的冻融效应加剧：**高寒高海拔矿区冻土层深厚，受季节温差和昼夜温差影响，冻融效应加剧，边坡滑坡、泥石流、路基沉陷、建筑和设备基础变形等问题频发，严重影响露天矿边坡的稳定性，影响矿区的交通运输和安全生产。



青藏高原现今构造变形分区



青藏高原活动构造及周缘地震分布



破碎矿岩 (GSI=20~25)

2.4 多民族地区的社会稳定性

- **履行社会责任：**践行“办矿一处、造福一方”理念，通过创造就业、乡村振兴等方式，促进地方经济发展。
- **尊重民族文化：**在西藏、青海等多民族地区，需尊重当地风俗习惯，积极营造**和睦相处的矿区社区关系**。
- **共建共享机制：**通过建设共享生活设施、排查周边地质灾害隐患、支援当地基础设施建设，形成**企地共赢**的良性发展格局。
- **政策引导：**西藏自治区政府强调统筹“**生态保护与经济发展相统一、国家所需与西藏所能相统一**”等关系，为矿业开发划定红线。



文化节日活动



现代化矿山的生活区和文体设施



提纲

- 一、矿产资源及开发现状
- 二、开发条件及其影响
- 三、面临的技术挑战
- 四、已取得的成就
- 五、未来发展展望

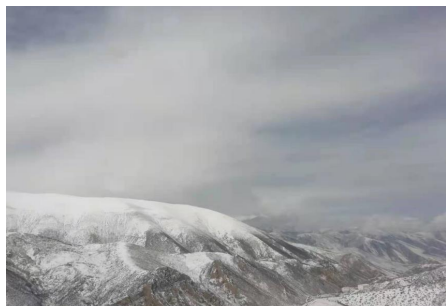
3、面临的技术挑战

❖ 青藏高原地区矿产资源开发面临的主要问题

生态环境脆弱



自然条件恶劣



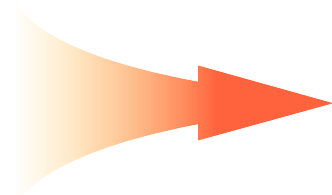
社会稳定要求高



3、面临的技术挑战

❖ 高海拔高寒环境对矿产资源开采提出的特殊要求

- 低生态损害
- 高劳动生产率
- 规模化与规范化
- 高安全保障性



- ✓ 地表低扰动
- ✓ 固废低排放
- ✓ 采矿方法与工艺技术高效率
- ✓ 装备机械化自动化智能化
- ✓ 低压条件通风供氧保障
- ✓ 可靠的安全监测管控
- ✓ 智能化、无人化作业

// 3、面临的技术挑战

3.1 高原矿山低生态扰动的安全高效采矿技术

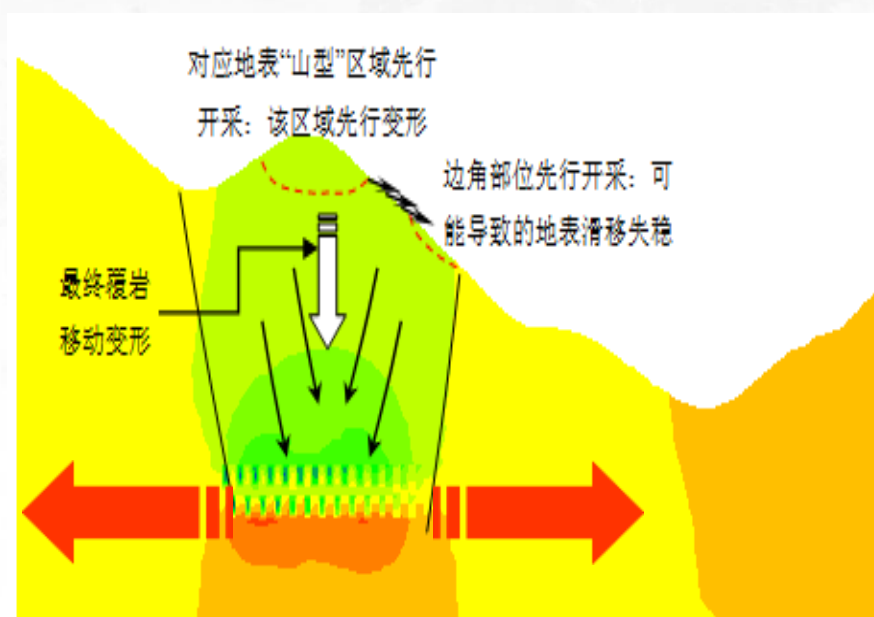
- 青藏高原地区**溶蚀裂隙发育**、地表地形陡峭、生态环境脆弱，大规模开采易导致采场垮塌和地表山体滑坡；
- 采矿技术难点主要在于高原复杂地质条件难实现高效率采矿，大规模采矿**难保证低生态扰动**，溶蚀裂隙岩体难实现岩层稳定性控制，高原缺氧条件下**人机效能难保证**等。



高陡地形，岩体不稳定



植被稀少，生态脆弱



大规模开采与地表扰动控制难题

3.2 适应于高寒高海拔极端环境条件的高可靠性采矿装备

- 在高寒高海拔的极端环境下，多数现有技术装备的适应性受到限制。如常规电气设备的**绝缘材料**和**润滑油脂**在**低温下易失效**，导致设备性能下降甚至故障频发；低温低氧的环境对**炸药的稳定性能**和**爆轰性能**产生直接影响，导致**炸药敏度降低**，**哑炮率**增加；低温环境导致**起爆设备失效**或**降效**，大幅降低起爆可靠性；
- 部分**机械设备的结构**和**材质**无法承受的低氧、低压环境，影响了设备的正常运行和使用寿命；
- 由于高寒高海拔矿区的地质条件复杂，设备在运行过程中易受震动、冲击等外力影响，导致设备部件损坏或性能下降，加剧了**设备的磨损**和**老化**，降低了设备的可靠性。
- **新能源采矿装备更能适应高寒高海拔的环境条件，应该是重要发展方向。**



露天矿山设备



地下矿山设备



绝缘材料



新能源采矿装备

// 3、面临的技术挑战

3.3 高寒高海拔矿山的高效高质充填及采选固废大宗量安全处置技术

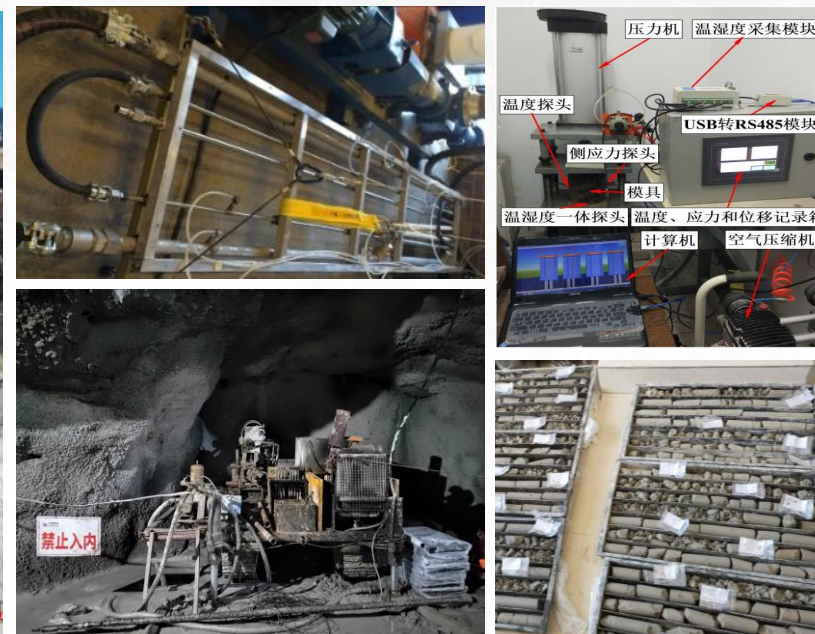
- 高海拔寒区生态脆弱，低温低气压、冻融循环等外部条件及高山深切峡谷的矿区地貌特征，对金属矿山开采过程中产生的**大量采选固废安全处置**提出了**更高要求**；
- 传统处置方式（如尾矿湿排）需建设高位势能坝体，安全风险高；而井下充填因站点选址困难、管道输送能耗大、**低温环境充填料浆质量差**，应用率不足。



高原矿山充填站（海拔：4820m）



大垂高、长距离管道输送

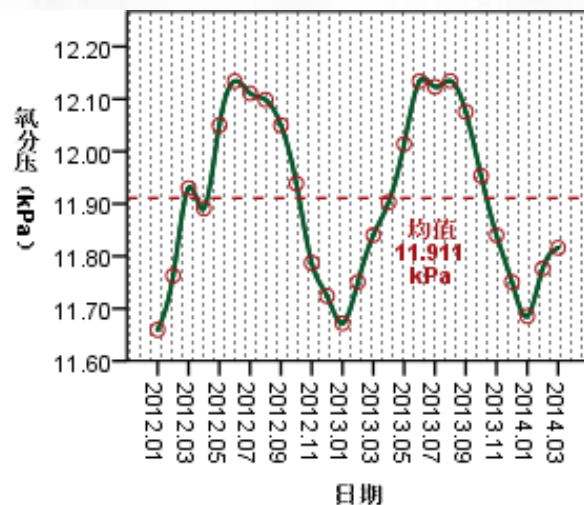


低温环境充填体原位取芯

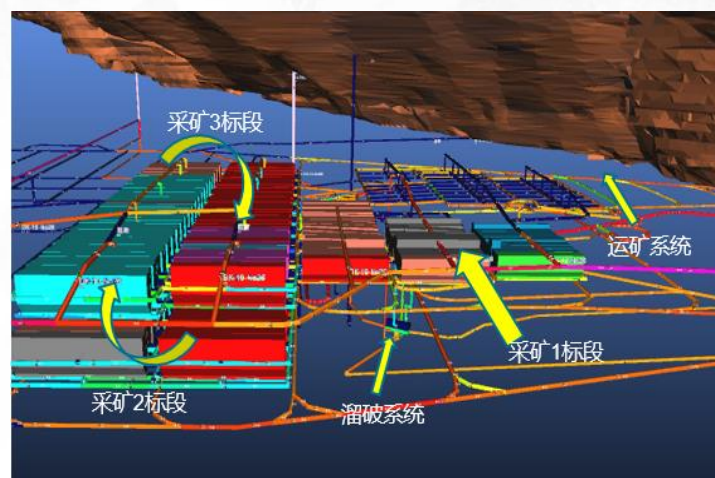
3、面临的技术挑战

3.4 高原地下矿山的通风安全技术

- 由于高寒气候和复杂地形条件，地面空气的**氧气含量**、**绝对湿度**、**矿井通风阻力**随海拔增高而降低，爆破排烟、风机工况等也随着发生变化，导致地下矿山开采通风效果不理想，难以满足安全生产需求。特别是在一些**深井矿山**，**通风问题**尤为突出，严重影响了矿山的安全生产和作业人员的健康；
- **低温环境**下通风设备的**启动**和**运行效率下降**，易发生故障；
- 矿区地形复杂，**通风管道铺设难度大**，且易受冻融循环等影响而损坏。



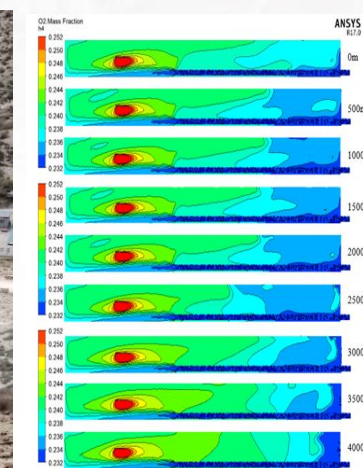
矿井氧分压月变化曲线



复杂通风系统



回风井风机



// 3、面临的技术挑战

3.5 可靠有效的安全监测监控、灾害应急救援等安全保障技术

- 高寒高海拔矿山的极端环境条件，要求矿山建设更为强大的安全保障系统，但是，传统的安全保障技术不能适应高寒高海拔矿山多因素叠加的复杂灾害特点，也往往不能适应低气温低气压的环境条件，设备或系统经常失灵失效。



高海拔露天矿山边坡



排土场



尾矿库

// 3、面临的技术挑战

3.6 满足高寒高海拔矿山智能化建设需求的智能采矿装备和智能生产系统

- 在高寒高海拔矿区，由于环境条件恶劣，人工操作难度大、风险高，加上现有高寒、高海拔的**技术装备智能化水平普遍较低**，更需要推进技术装备的**智能化升级**，实现**远程监控、自动控制**和**故障诊断**等功能，推动实现“机械化换人、自动化减人、智能化无人”。



高寒高海拔露天矿山边坡



边坡监测设备



边坡监测系统

提纲

- 一、矿产资源及开发现状
- 二、开发条件及其影响
- 三、面临的技术挑战
- 四、已取得的成就**
- 五、未来发展展望

在西藏矿产绿色高效开发利用方面，国家持续部署开展了一系列的研究项目，并在**矿产资源规划绿色开采、固废综合利用与智能矿山建设**等方面取得了很多成果。

一、国家重点研发计划项目

- (1) 西藏铜铅铋多金属资源绿色开采及选冶关键技术研发与应用
- (2) 西藏大型铜等战略性矿产资源基地绿色勘查与开发示范
- (3) 高寒及生态脆弱区大型矿山绿色开采技术 (2022YFC2903900)
- (4) 高海拔高寒地区金属矿山开采安全技术研究与装备研发 (2018YFC0808400)
- (5) 深部金属矿协同开采理论与技术 (2016YFC0600709)

二、国家科技支撑计划项目

- (1) 西藏特大型多金属矿600万吨/年高效采矿技术 (2012BAB01B01)
- (2) 西藏高海拔矿山开采安全保障技术研究 (2012BAB01B04)
- (3) 矿山主被动结合高精度微震监测技术与装备研发 (2012BAK09B03)

三、国家安全生产监督管理总局安全科技“四个一批”项目

- (1) 超大规模金属矿井运输系统与大流量高浓度充填关键技术研究

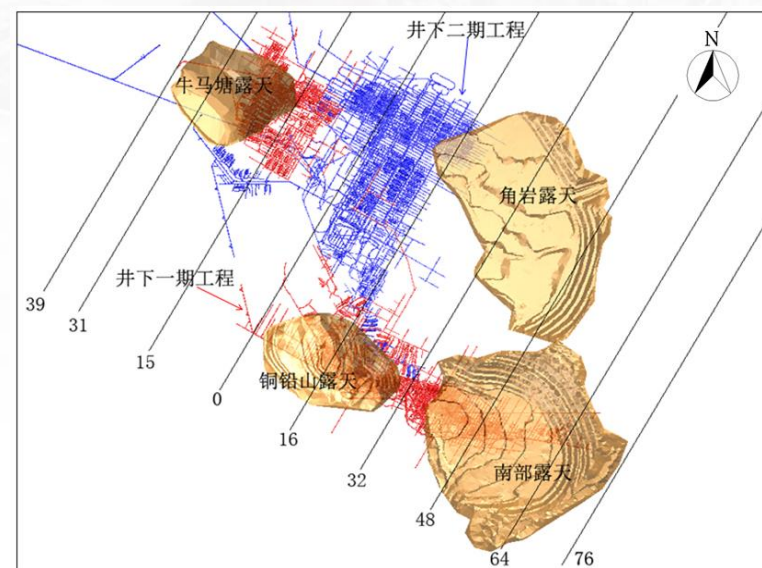
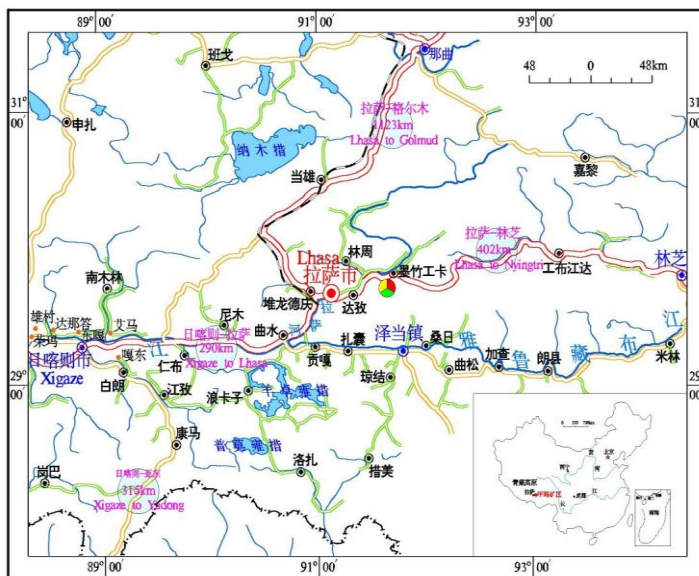
四、西藏自治区重大科技专项

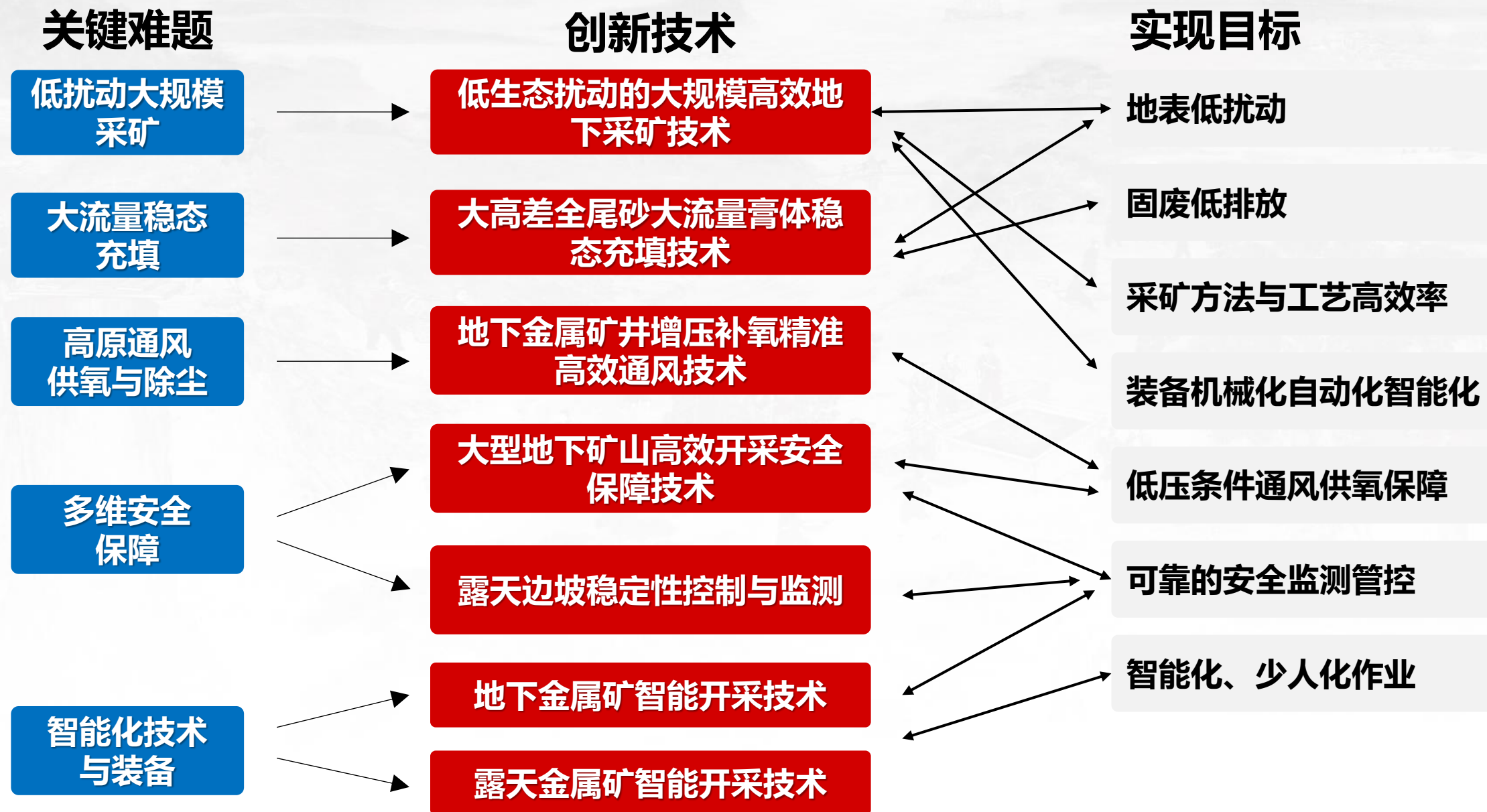
- (1) 西藏超大型铜铅战略性矿产绿色高效开发利用关键技术及示范
- (2) 西藏冈底斯成矿带超大型斑岩铜多金属矿资源基地建设关键技术研究与应用示范

4、已取得的成就

甲玛铜多金属矿位于西藏拉萨市墨竹工卡县境内，青藏高原高海拔高寒地区矿山的典型代表。矿区海拔为4490~5407.5m，地形呈现**坡度大、海拔高、相对高差大**的特点。

甲玛矿以矽卡岩型矿体为主，辅以角岩型矿体，矽卡岩型矿体具有上陡下缓的特点。经过多年开采，已形成了**露天矿与地下矿联合开采**的布局，主要包括角岩露天、南部露天、地下北区和地下南区。矿山总**生产规模为1440万t/a**，其中，地下开采生产规模540万t/a，露天开采生产规模900万t/a。露天开采采用分台阶开采工艺，地下开采采用分段空场嗣后充填采矿法。





创新技术1：高海拔高寒地区低生态扰动的大规模高效地下采矿技术

关键难题

- 高原复杂地质条件的**高效率**采矿
- 大规模采矿地表**低扰动**
- **溶蚀裂隙**岩体岩层控制

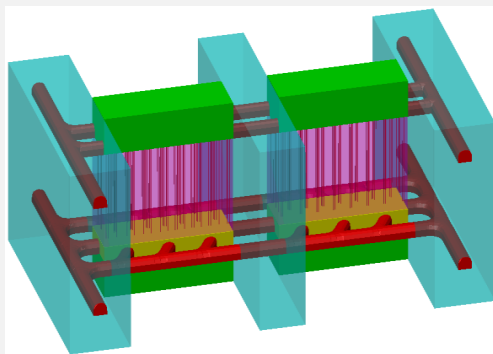


技术内容

- (1) 中孔径束状孔高分段空场嗣后充填采矿法
- (2) 大规模开采的低扰动多盘区协同回采技术
- (3) 软弱溶蚀岩体三维分级分区支护技术
- (4) 基于智能装备的高效机械化采矿生产系统

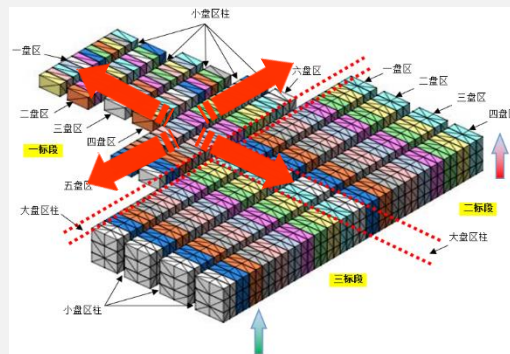
4、已取得的成就

中孔径束状孔高分段空场嗣后充填采矿法



- 分段高度**20~25m**，拉底高度5~8m，爆破高度**10~13m**
- 损失率10.5%，贫化率5.6%
- 空场嗣后一次充填，**强采强出强充**

大规模开采的低扰动多盘区协同回采技术



- 厚大矿体大规模开采的**采区-盘区-采场**多层次协同划分
- 以对**地表扰动最小**为目标的多盘区多采场回采顺序优化
- 多采场高效**协同作业**

软弱溶蚀岩体三维分级分区支护技术

2. Ⅲ、Ⅳ级岩体支护		特征照片		使用特性	支护方式
岩体特性描述	破坏特征界定			永久巷道	拱顶锚杆+锚杆+锚杆+喷射混凝土
1. 砂卡岩：一般风化氧化，裂隙发育，后呈大块状，破碎，但大块子不碎，裂隙发育，裂隙表面无明显节理面。	1. 爆破后，巷道暂时稳定，但大块子不碎，裂隙发育，裂隙表面无明显节理面。			临时巷道	拱顶锚杆+锚杆+锚杆+喷射混凝土
2. 角闪、灰岩：岩体中央各条，块状大理岩，砂卡岩，节理裂隙发育，浮石不易掉落。	2. 爆破后，巷道暂时稳定，但大块子不碎，裂隙发育，裂隙表面无明显节理面。			充填体中巷道	全充填体+喷射混凝土
3. 大理岩：节理裂隙发育，局部充填泥质胶结。	3. 巷道出露后暂时稳定，但短期内受到围岩控制发生节理裂隙控制性冒顶，冒顶高度≤1.5m。				
4. 多种岩性在掌子面同时暴露：自稳性较好。					

- 建立了甲玛铜矿岩体分级分区支护**技术标准**
- 提出了溶蚀裂隙发育区域的大垮塌不均质松散岩体可控灌注浆技术，**解决了软弱溶蚀裂隙岩体的支护难题**

基于智能化装备的高效率机械化采矿生产系统



- 建成了**盘区机械化采矿生产系统**，通过实时监控与智能调度，提高了生产系统的协同作业效率，实现了矿山高效大规模生产

A 3D schematic diagram of a multi-layered composite structure. It features a central yellow layer with red wavy patterns, sandwiched between two green layers. The entire assembly is held within a light blue frame. The structure is supported by two horizontal red bars. The top and bottom layers are green, and the central layer is yellow with red wavy patterns. The entire assembly is held within a light blue frame. The structure is supported by two horizontal red bars.



创新技术2：高寒高海拔地区全尾砂大流量膏体稳态充填技术

关键难题

- 高陡地形、低温环境高浓度浆体**大垂高、长距离**输送
- 大流量膏体充填料浆的稳态制备
- 低温环境大规模采场充填质量控制



技术内容

- （1）高寒地区高浓度浆体大垂高、长距离安全稳定输送技术
- （2）深锥浓密机与立式砂仓协同膏体稳态制备技术与装备
- （3）低温环境大规模采场充填性能发展过程监测和质量控制技术

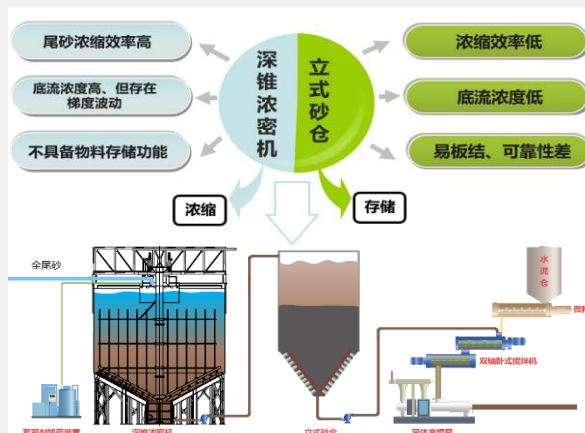
4、已取得的成就

高浓度浆体大垂高、长距离 安全稳定输送技术



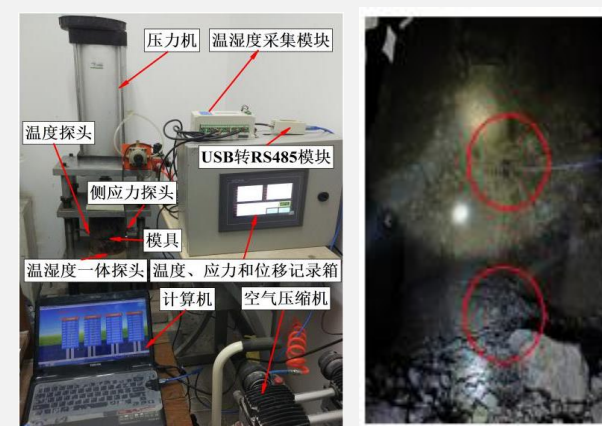
- 开发了浆体**温变-流变耦合**试验分析系统
- 建立了基于温度效应的全尾砂浆体**流变模型**
- 攻克了**高浓度浆体大垂高、长距离安全稳定输送难题**

深锥浓密机与立式砂仓协同 膏体稳态制备技术与装备



- 提出了**深锥浓密机与立式砂仓协同的膏体大流量制备工艺**
- 构建了湍流漩涡试验系统
- 研发了螺旋栅板给料装置
- 建立了长短列管组合的绕壁造浆技术

低温环境大规模采场充填体强度 发展过程监测和质量控制技术



- 揭示了充填体内温湿度、基质吸力的**发展规律**
- 提出了基于充填体基质吸力的**原位强度预测方法**
- 提出了基于理论模型的**多点交替下料方案**

4、已取得的成就

支撑了甲玛铜多金属矿海拔4800m的全尾砂膏体充填系统的建设，**充填流量大于 $180\text{m}^3/\text{h}$** ，**浓度波动在 $\pm 1\%$** ，首次实现了高海拔高寒地区全尾砂大流量膏体稳态充填，保障了低生态扰动的高效采矿，并大幅减少了尾矿固废排放。



创新技术3：高海拔地下金属矿井增压补氧精准高效通风技术

关键难题

- 高海拔低氧环境生理与劳动耐受限度
- 低氧低压条件通风安全保障
- 低气压条件工作面粉尘危害及治理

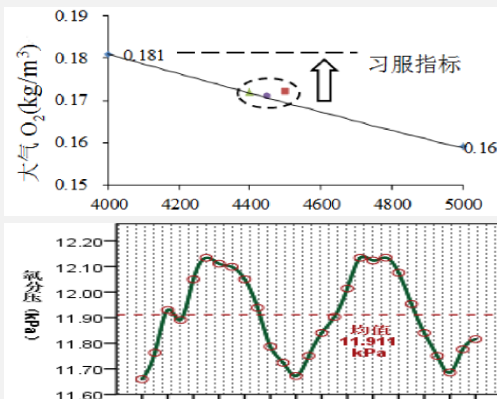


技术内容

- (1) 高原通风系统目标补偿参数确定
- (2) 分区增压技术与通风网络优化
- (3) 工作面粉尘运移规律与通风除尘
- (4) 高海拔矿井局部人工加压通风增氧调控技术与装备

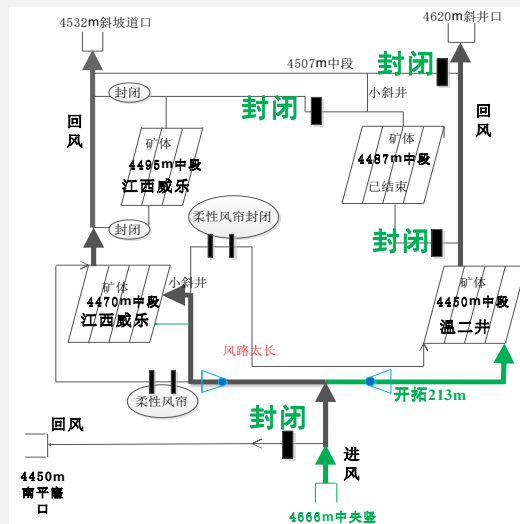
4、已取得的成就

首次获得了高原矿井通风系统目标补偿参数



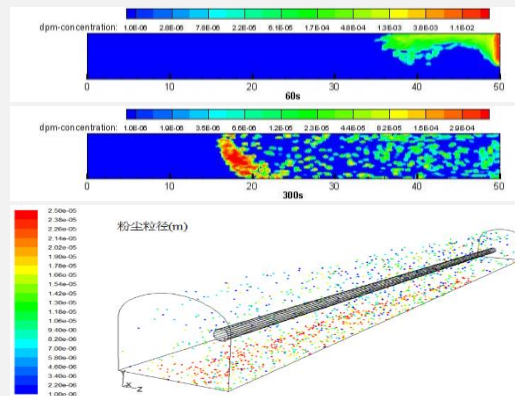
- 揭示了不同海拔矿井大气压强、空气密度、相对湿度和氧含量的**季节性变化规律**
- 基于高原地区人体习服试验，得出了不同区域**风压目标补偿值**

高原矿井分区增压技术与通风网络优化技术



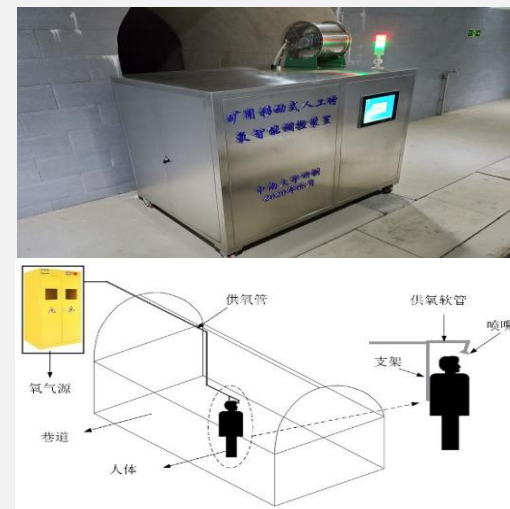
- 依据**分区分时需氧**原则建立了增能增阻调节测算模型，构建了高海拔地区地下矿山**增压补氧**和通风网络系统

高海拔地下矿山工作面除尘除油烟强化通风技术



- 揭示了高海拔矿山地下空间**粉尘分布与运移规律**
- 模拟了工作面局部强化通风**风流矢量场分布**
- 提出**长压短抽式**的高原矿井工作面通风方式及**关键参数**

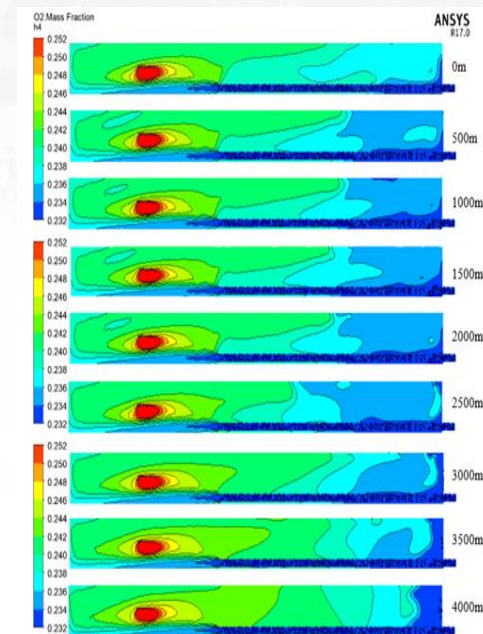
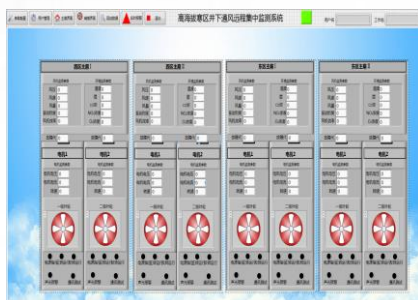
高海拔矿井局部人工加压通风增氧调控技术与装备



- 研发了矿用移动式人工增氧调控装置等设备，提高了氧气利用率、作业面氧含量 (**提升约 5.1%~7.4%**)

4、已取得的成就

支撑了首套高原**增压增氧**通风系统的建设，实现了高海拔高寒地区大规模地下矿井复杂通风网络的**按需调控分区增压**通风。



创新技术4：高海拔高寒地区大型地下矿山高效开采安全保障技术

关键难题

- 大规模开采引起的地压风险高
- 恶劣作业环境对安全风险产生叠加和延伸作用
- 人员安全敏感度下降
- 西藏地区安全培训受众群体有限、难度大



技术内容

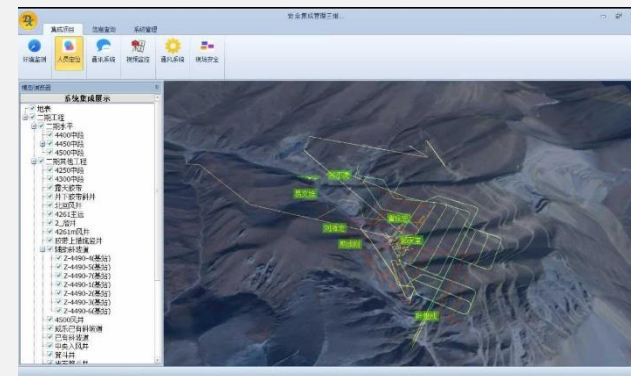
- (1) 多尺度分布式协同安全监测监控技术
- (2) 复杂条件耦合作用下的安全风险大数据分析
- (3) 面向VR的沉浸式安全防控一体化管控平台

复杂耦合作业条件下的高原矿井 安全生产要素大数据分析系统



- 提出了一种主被动结合的地压监测动态优化方法
- 构建了区域与局域结合的多尺度分布式协同监测系统
- 实现了从采场围岩微观损伤到矿区岩体变形破坏的综合预警

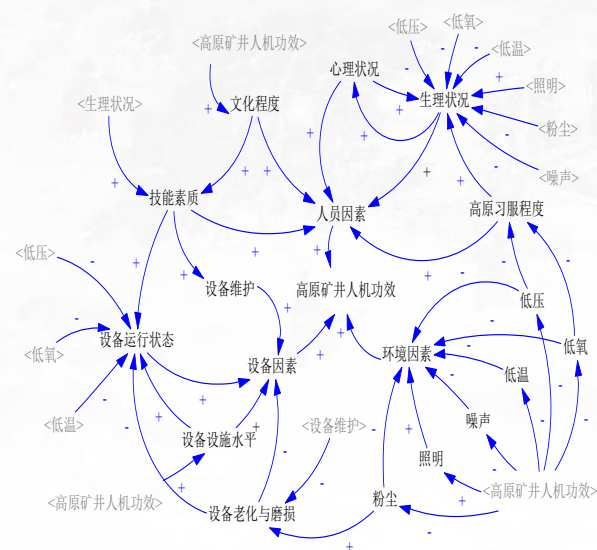
基于多源融合的沉浸式井下安全避险一体化协同管控平台



- 建立了基于3D-GIS信息技术的安全生产监控平台，实现高原矿山安全生产综合管控
- 形成**汉藏双语软件教学系统**，完成国内首套关于高寒高海拔地区矿区高原反应认知及应急处理的虚拟现实安全培训体系

4、已取得的成就

支撑了甲玛铜多金属矿安全监控系统建设与运行，保障了高海拔高寒地区地下金属矿大规模开采过程生产安全。



创新技术5：高海拔高寒地区地下金属矿智能开采技术与装备

关键难题

- 工艺与智能化装备不适配
- 安全生产数字化管控难落地、成效低
- 采掘环节智能装备作业效率难发挥

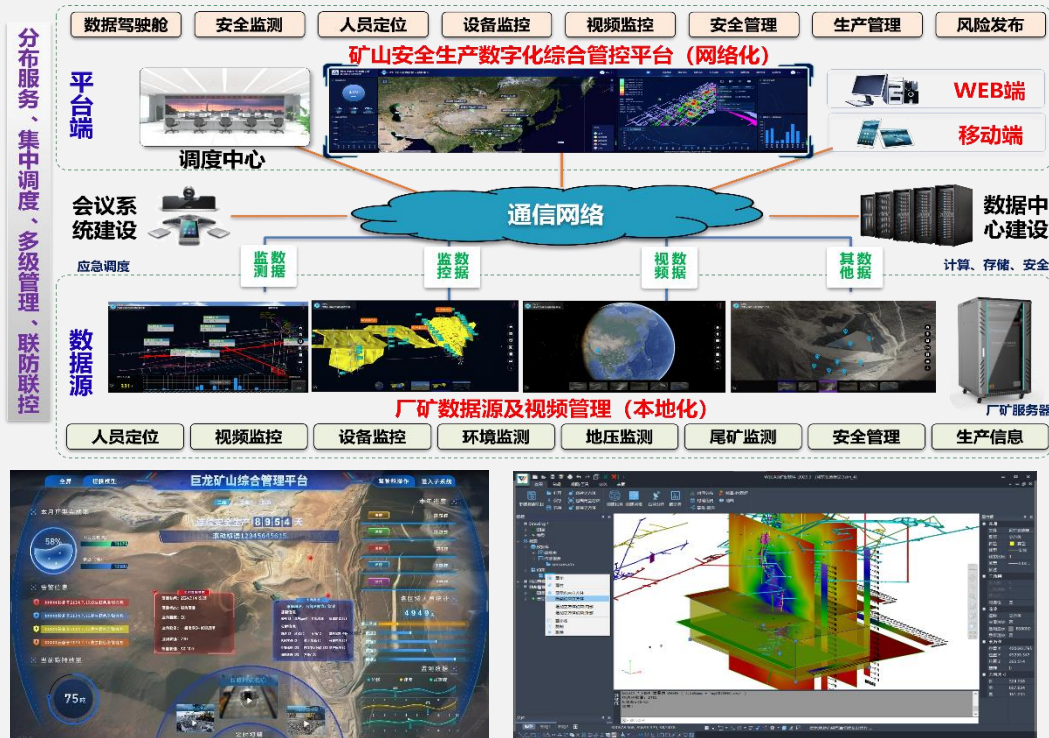


技术内容

- (1) 高海拔高寒地区矿山智能采矿工艺需求分析方法
- (2) 矿山安全生产数智化综合管控系统及平台
- (3) 采掘环节工程-工艺-装备一体化智能开采关键技术

4、已取得的成就

矿山安全生产数智化综合管控系统及平台



- 多源多场数据（地质、采矿、力学、水文等）叠加、融合分析、数字可视化；
- 安全、生产数智化管控。

采掘环节工程-工艺-装备一体化智能开采关键技术



- 集约化开采工艺为智能化装备提供基础工艺平台；
- 固定设施实现远程智控作业；
- 采掘环节实现远程智控作业，作业效率需进一步提升；

创新技术6：高海拔高寒地区露天边坡稳定性控制与监测

关键难题

- 冻融循环作用劣化矿岩的力学性能
- 岩体破碎导致露天边坡成形效果较差
- 传统的边坡监测手段难以实时精确监测预警

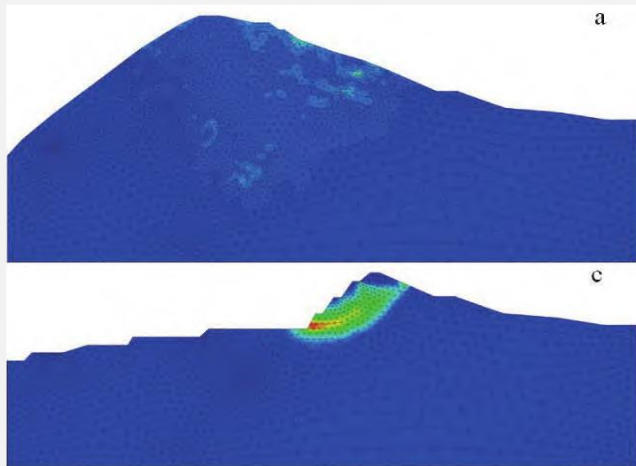


技术内容

- (1) 冻融循环条件下露天采场边坡失稳机理
- (2) 高寒高海拔金属露天矿精细化控制爆破技术
- (3) 高寒高海拔地区露天边坡多参量实时监测装备及安全预警技术

4、已取得的成就

冻融循环条件下露天采场边坡失稳机理



- 研究温度对边坡内部节理弱面的**冻融活化效应**，形成冻融劣化的岩体破裂度指标判定准则
- 分析**冻融循环**条件下流-固-气多相耦合边坡失稳时效特征与评价方法

高寒高海拔金属露天矿精细化控制爆破技术



- 建立了基于**岩温变异**的露天台阶精细爆破数值模型，揭示露天台阶爆破破碎机理
- 提出了考虑温度变异的高寒露天矿**精细爆破**设计方法

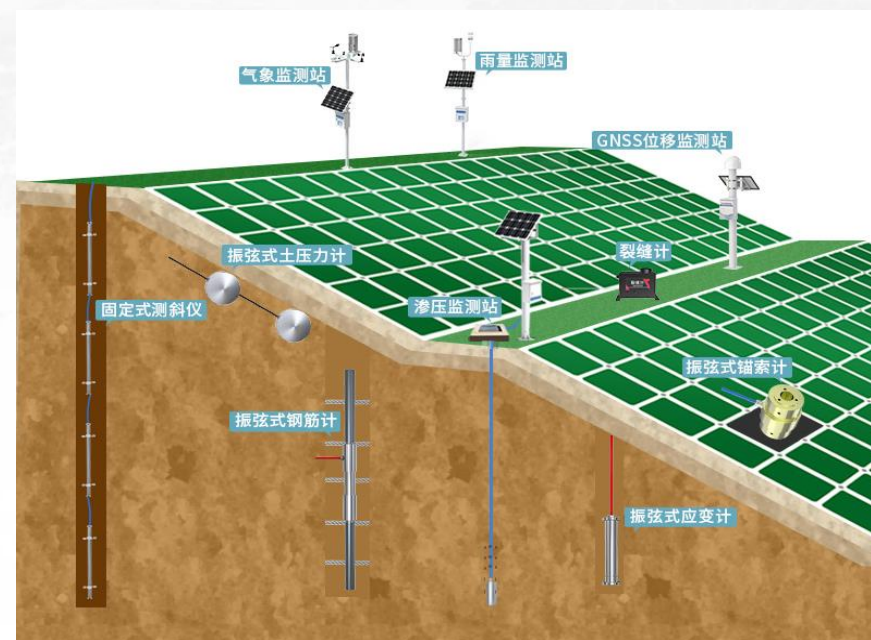
高寒高海拔地区露天边坡多参量实时监测装备及安全预警技术



- 研发**温度补偿自适应**模块以及基于边坡合成孔径雷达为主要监测手段的边坡**多参量安全监测系统**
- 建立高寒边坡三维时空预警模型，形成一套前兆信息获取与预警一体的边坡**失稳预警技术**

4、已取得的成就

构建露天边坡“天空地时”一体化动态监测体系，实现对露天边坡状态的实时精准感知与智能预警，为露天边坡提供了主动的安全保障。



创新技术7：高海拔高寒地区露天矿山无人驾驶技术与装备

关键难题

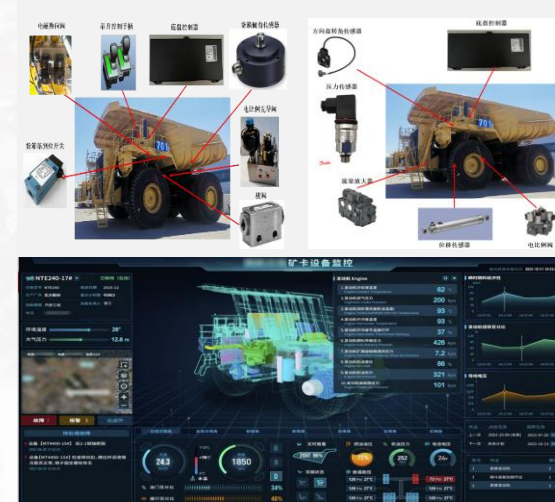
- 昼夜温差大、缺氧，极端天气复杂多变，运输安全风险高
- 路面易冻、非结构化道路，坡度及弯道复杂，对车辆性能提出更高要求



技术内容

- (1) 高鲁棒性环境感知技术
- (2) 高可靠性定位与导航技术
- (3) 智能决策与规划控制技术
- (4) 耐寒混动无人驾驶装备

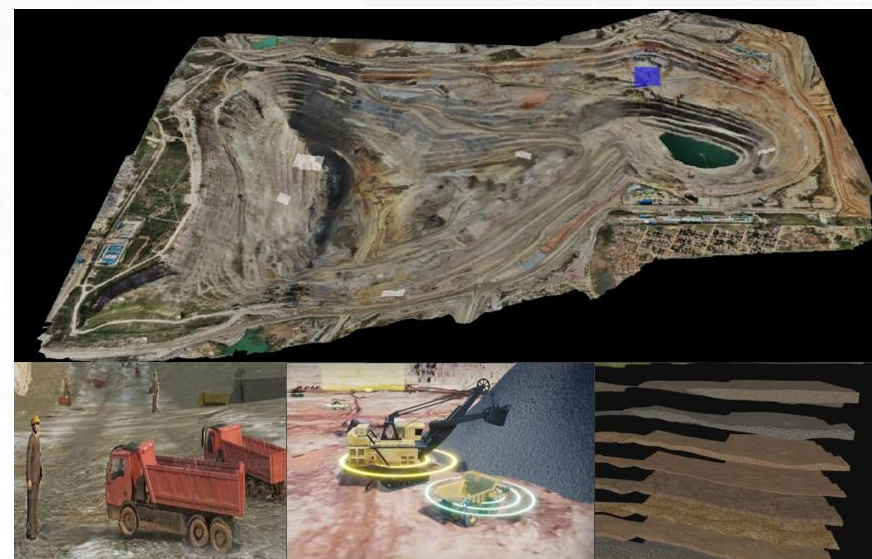
耐寒混动无人驾驶装备



- 耐寒混合动力矿车、无人驾驶系统及集群协同作业管控系统，为露天矿大规模绿色开采提供**装备支撑**

// 4、已取得的成就

通过新能源矿卡、无人驾驶、智能管控技术的应用，露天矿安全生产水平大幅提高，下一步将在**新型混合动力无人驾驶装备、多装备协同管控、多工艺-多装备体系化集成、无人作业高安全保障**方面快速发展，支撑高海拔大型、超大型露天矿山安全高效开发。



提纲

- 一、矿产资源及开发现状
- 二、开发条件及其影响
- 三、面临的技术挑战
- 四、已取得的成就
- 五、未来发展展望

智能化与无人化开采：从“人力密集型”到“技术密集型”

- **远程遥控与无人驾驶：**实现凿岩、爆破、装卸、运输等全流程的远程操控和无人化作业。操作员可在海拔较低的后方基地甚至千里之外富氧集控中心进行作业。
- **智能调度与数字孪生：**利用5G、物联网等技术，构建矿山全域的感知网络，通过数字孪生技术构建虚拟矿山，进行模拟优化和预测性维护。
- **机器人巡检与运维：**使用机器人替代人工进行设备巡检、险情排查等危险工作。

展望：未来的高海拔矿山趋向于“生产作业无人，地面管理少人，远程操控”的矿山模式，最大程度保障人员安全与健康。

绿色矿业与生态和谐：从“环境代价型”到“环境友好型”

- **绿色勘探与设计：**在设计阶段就将生态保护作为首要考量，采用对地表破坏最小的技术。
- **全生命周期环境管理：**从建设、运营到闭矿，进行全程环境监测与修复。
- **高效节能与循环利用：**采用高效的开采技术，对废石、尾矿进行资源化利用，建设“无废矿山”或“低废矿山”。
- **可再生能源利用：**充分利用高海拔地区丰富的太阳能和风能资源，实现清洁能源自给，降低碳排放和能源成本。

展望：高海拔矿山既是资源开采地，更是生态保护和修复的示范区，实现“开发一方资源，保护一方生态，造福一方百姓”的目标。



矿冶集团
BGRIMM

谢谢大家！
欢迎访问矿冶集团！