



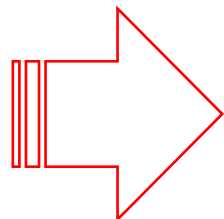
高寒高海拔金属矿山人机工 效安全技术应用与发展

中国安全生产科学研究院 廖国礼

2025年12月2日 四川·成都

Contents 目录

高寒高海拔
金属矿山



一、问题

环境特征分析

二、技术

个体安全与保障技术

智能与绿色开采技术

三、发展

未来发展趋势

(一) 前言 (概念)

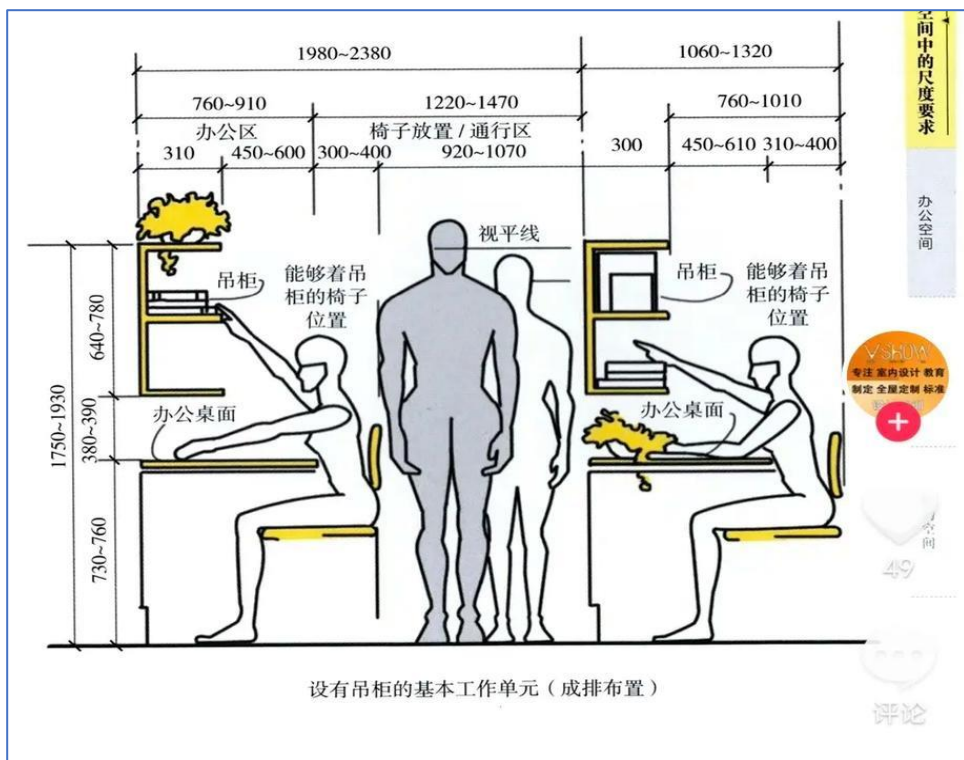


人机工效 (Ergonomics)，研究人-机-环境系统的交互优化。

以人为中心，以人为目的，研究人、机器、环境系统的协调性。

目标提升安全、健康、舒适与效率。

生活与各门类工业生产都有需求，高海拔高寒地区资源开采，更迫切、更需要开展相关技术的研究与应用。



“十三五”国家重点研发计划项目（**课题名称：高海拔高寒地区矿山人机功效与应急救援技术**），作为课题负责人开展了系列研究与技术应用。

(一) 前言 (研究成果)

国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项2020年中期检查汇报



**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)

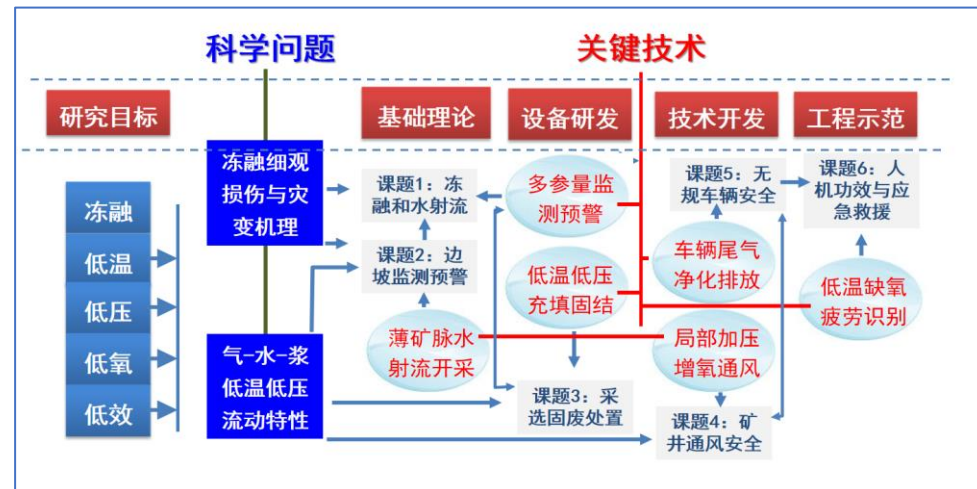
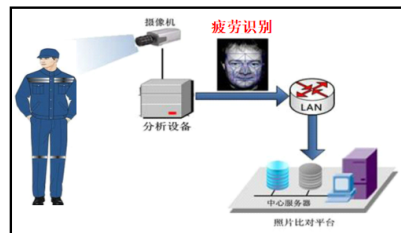
牵头单位：中国安全生产科学研究院

课题6：高海拔高寒地区矿山人机功效与应急救援技术

- 缺氧低温条件下人员疲劳识别算法与人机功效分析模型
- 高海拔高寒矿区无人机自动巡检和应急侦查平台
- 高海拔高寒金属矿山典型灾害事故情景构建与演练系统
- 高海拔高寒地区容许采矿活动的安全性判定标准

解决

缺氧低温人员疲劳评价和
制定采矿标准

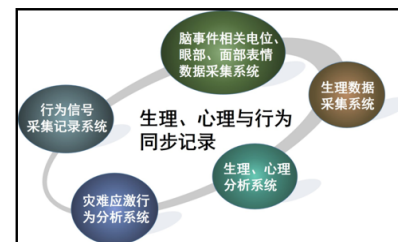
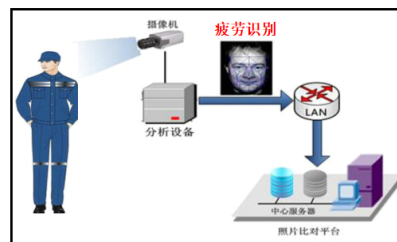


拟解决的关键技术

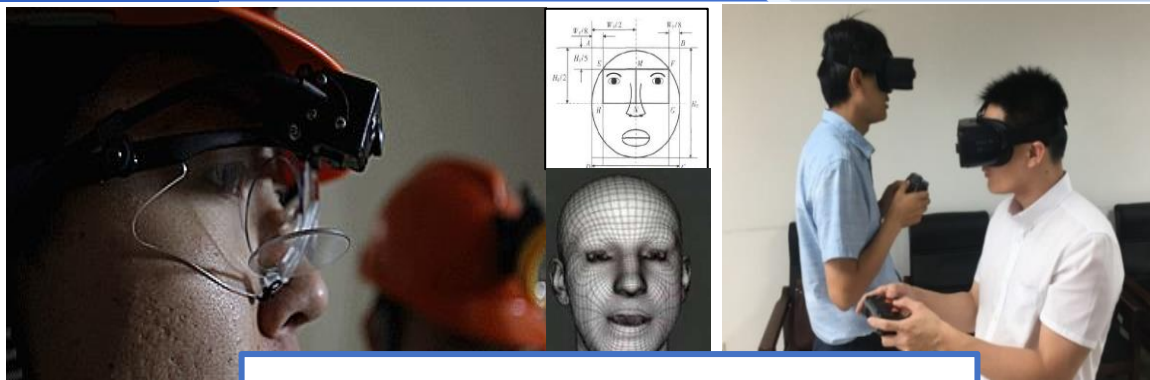
低温缺氧人员疲劳识别与设备效能评价技术。

课题创新点

建立典型缺氧低温条件下典型工种人员疲劳模型、人机功效评价方法，制定高海拔高寒地区容许采矿活动的安全性判定标准。



特征与问题



低温缺氧人员疲劳识别与管理



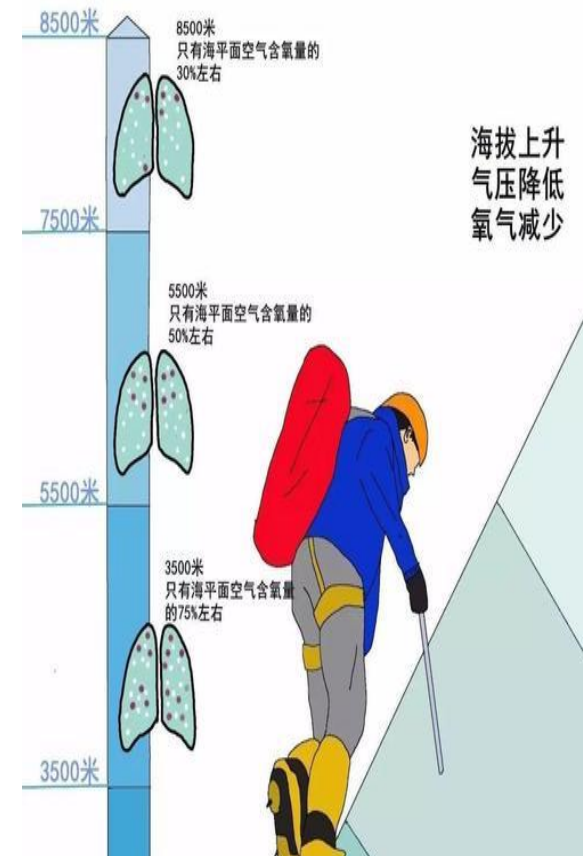
自然特点



客观现象



开采难题



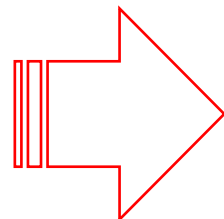
- ◆ 气压低 (0.5-0.7bar)
- ◆ 温差大 (昼夜差40°C)
- ◆ 气温低 (年均5°C以下)

- ◆ 冻融循环
- ◆ 氧含量低
- ◆ 生态脆弱

- ◆ 致灾机理复杂
- ◆ 人机效率低
- ◆ 环保压力大



Contents 目录



一、问题

环境特征分析

二、技术

个体安全与保障技术

智能与绿色开采技术

三、发展

未来发展趋势

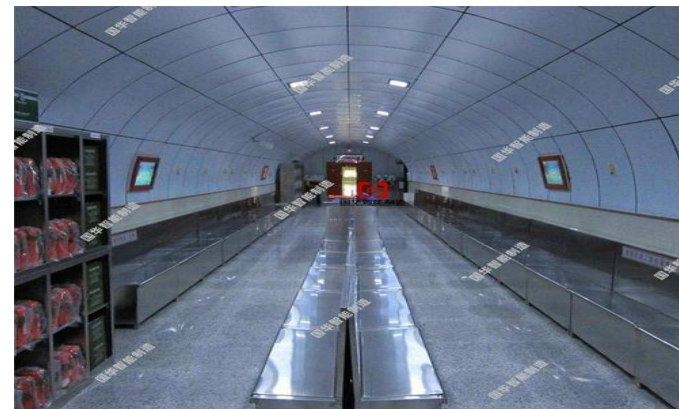
保障人员安全、提高生产效率、降低环境影响和实现可持续发展。

(一) 个体安全与人员保障技术



弥散供氧：

在固定的工作场所（如硐室、休息室、调度室）通过制氧机集中制造富氧空气，将局部环境氧浓度提高到23%-25%，相当于将海拔高度降低1000-1500米，极大缓解人员高原反应。

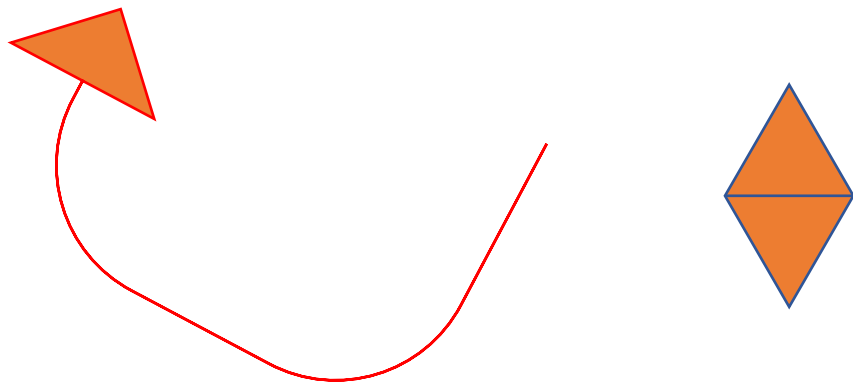


(一) 个体安全与人员保障技术



便携式供氧：

为井下或露天作业人员配备随身携带的小型氧气瓶或便携式制氧机，在体力消耗大或感觉不适时直接呼吸。



(一) 个体安全与人员保障技术



高压氧舱：

在矿区生活区设立高压氧舱，用于对出现急性高原病的人员进行紧急救治和工作人员的日常保健恢复。

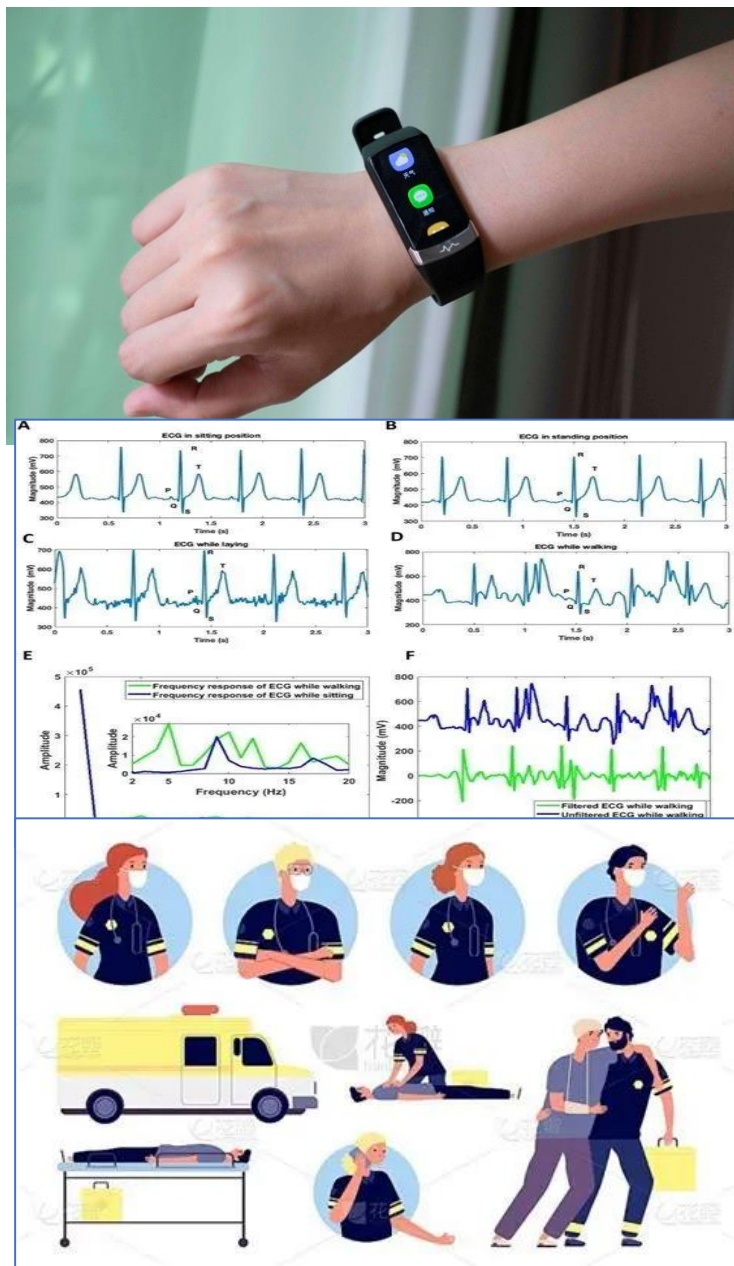


非航空产品

民用产品以医用高压氧舱、车载氧舱、微压富氧舱、常压低氧设备、增压舱、环境模拟设备、高原环境模拟舱等产品的研制生产为主。



(二) 智能健康监测与应急救援技术



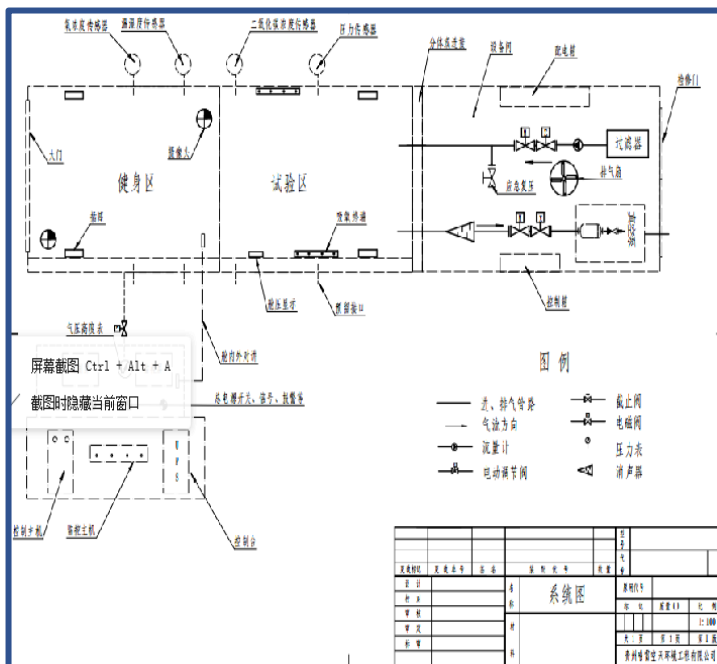
实时生理参数监测：

为员工配备智能手环或穿戴设备，实时监测心率、血氧饱和度、活动轨迹等数据。一旦出现异常（如血氧持续过低），系统会自动报警，调度中心可及时干预。



(二) 智能健康监测与应急救援技术(实验室建设)

在中国安全生产科学研究院非煤实验基地建设一套低压低氧环境模拟实验舱，模拟高原环境开展了大量的人机工效测试实验。



(二) 智能健康监测与应急救援技术(实验室与现场测试)

开展模拟与高原矿山现场高海拔环境人员疲劳测试：

对于体力疲劳岗位，测试的指标有心电、脉搏、三轴加速度、呼吸、血压、肺活量、关节角度、肌电、皮电、皮肤温度、握力、时间知觉、反应时。

对于脑力疲劳岗位，测试的指标有心电、脉搏、三轴加速度、呼吸、关节角度、肌电、皮电、皮肤温度、握力、快速体温、时间知觉、反应时、眼动。

环境参数：工作地点的温度、湿度、风速、噪音、亮度、WBGT、大气压力。

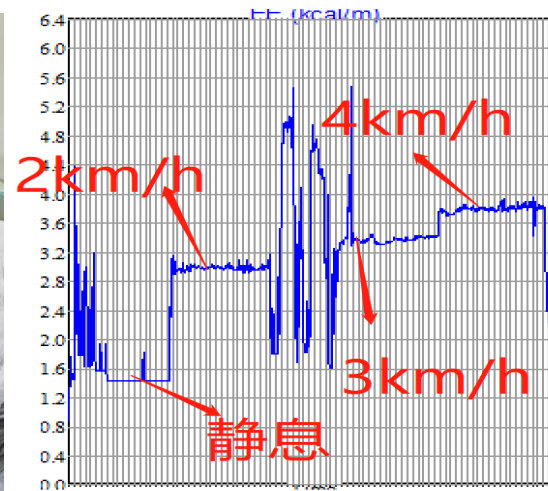


(二) 智能健康监测与应急救援技术(常见岗位强度测试)

应用低压低氧仿真模拟实验舱实验研究得到了不同海拔高度条件下作业人员的血氧饱和度、静息心率、肺活量、血压的变化规律。

研究了金属矿山常见的12个作业工种，将12个常见的工种按照体力劳动强度标准进行了劳动强度分级。在实验室利用能量代谢测试仪，采用相似原理，对分级后的四个强度等级的作业工种建立了相应的运动跑步模型。

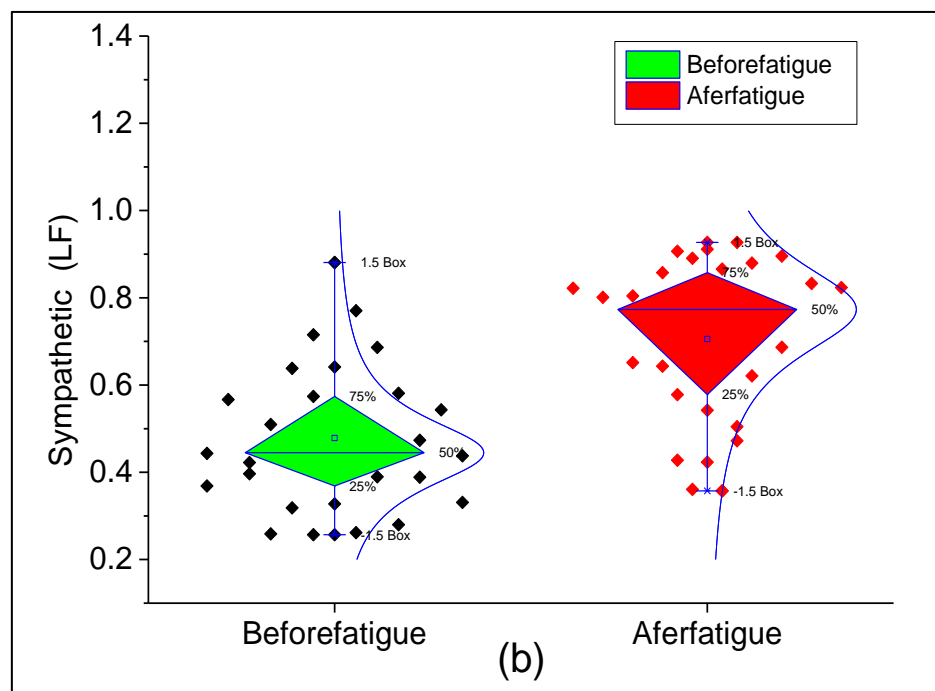
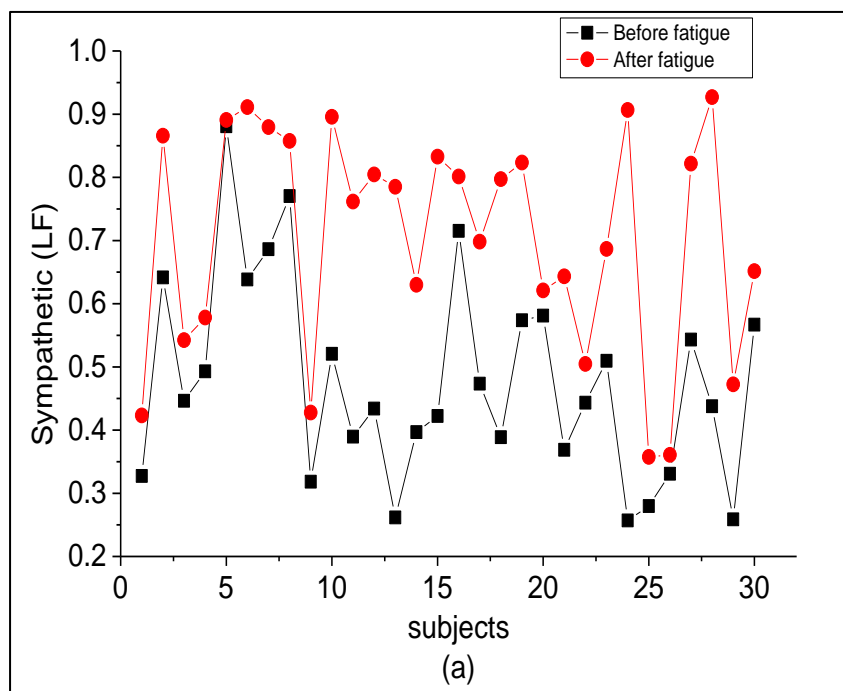
研究了不同劳动等级下的作业人员所受海拔高度的影响，得到了作业人员心率和血氧饱和度受海拔高



(二) 智能健康监测与应急救援技术(实验室数据处理与分析)

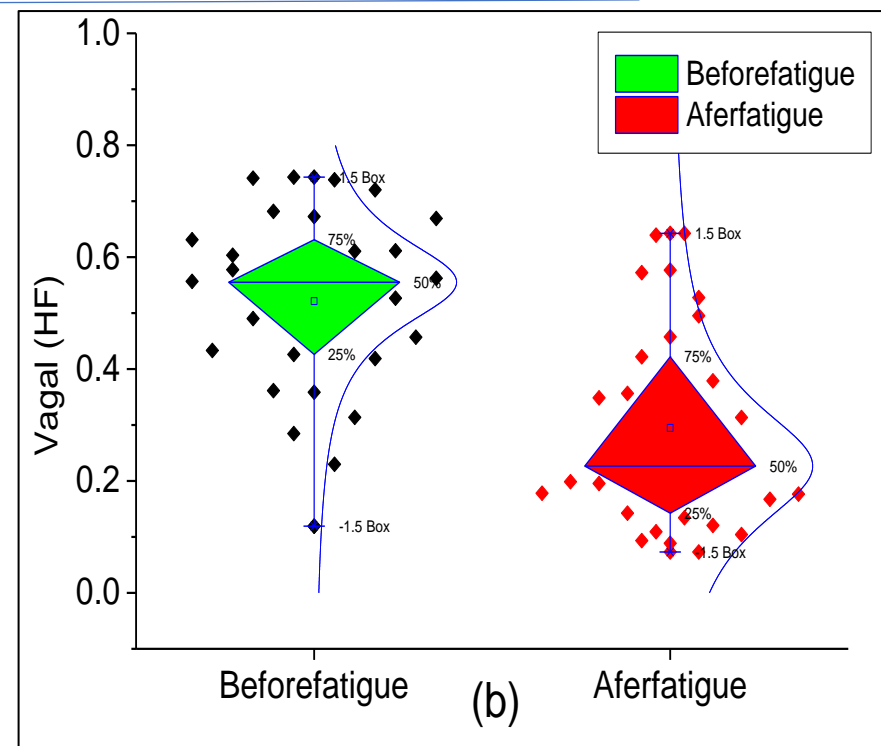
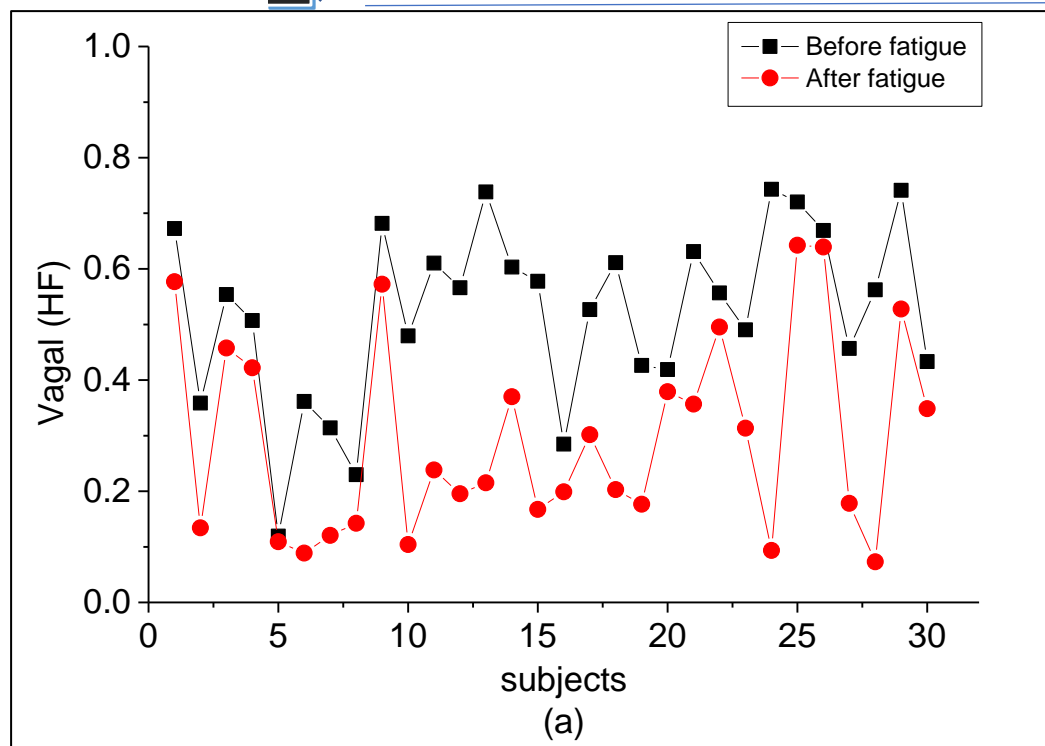


使用线性和非线性动力学分析了矿工疲劳前和疲劳后的HRV (Heart rate variability) 信号并对所测指标进行Pearson相关系数与T显著性检验。





分析部分被试疲劳特性的时域、频域和非线性特征。研究发现六个时域特征在疲劳前后都分别有所增减。



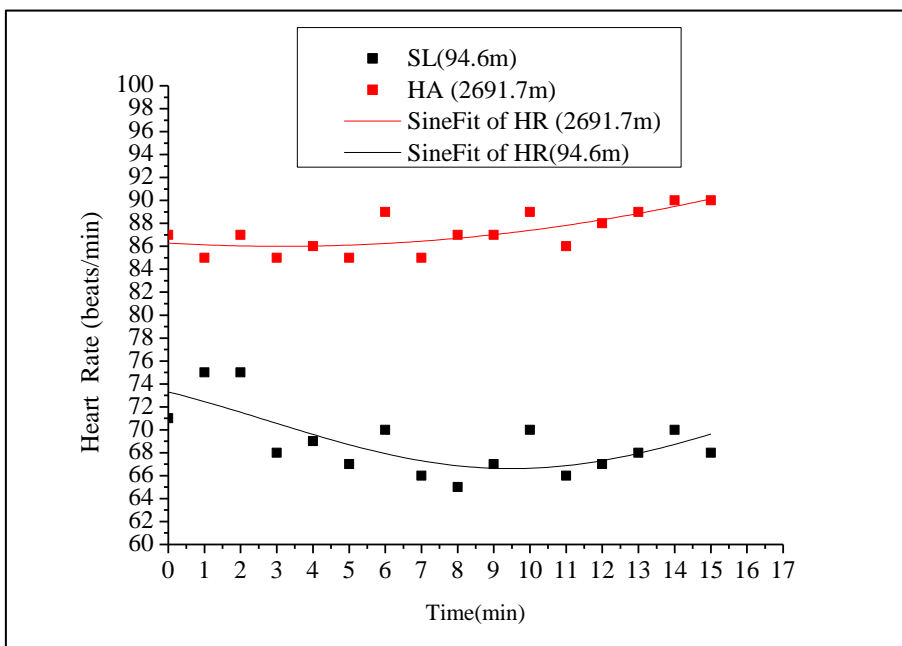


图1 平原与高原心率变化拟合曲线

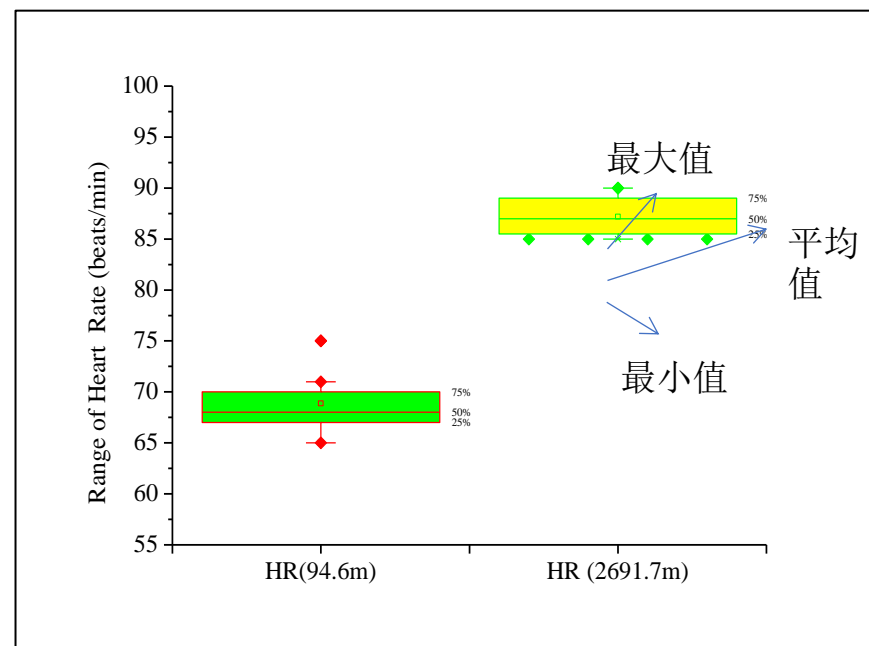
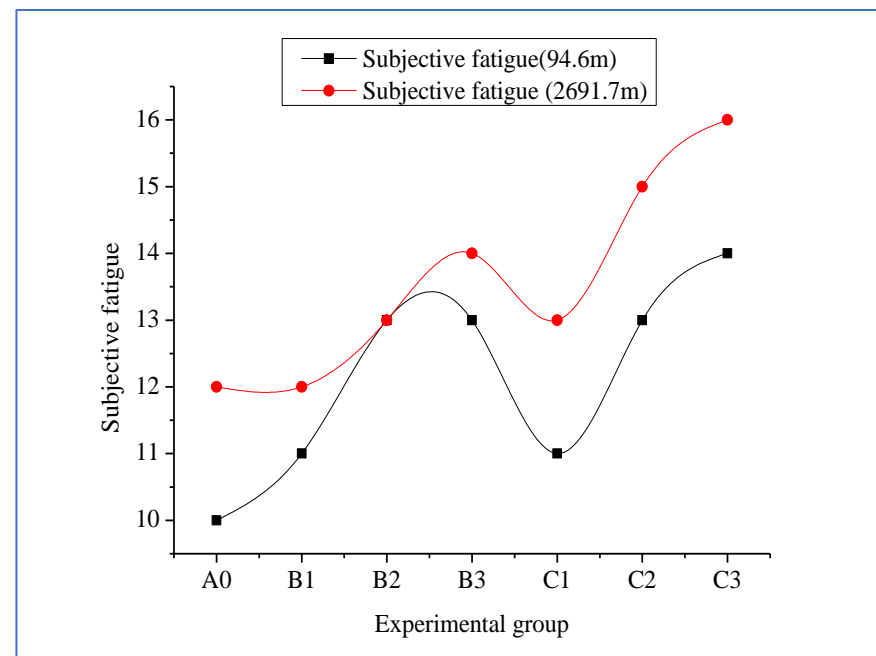
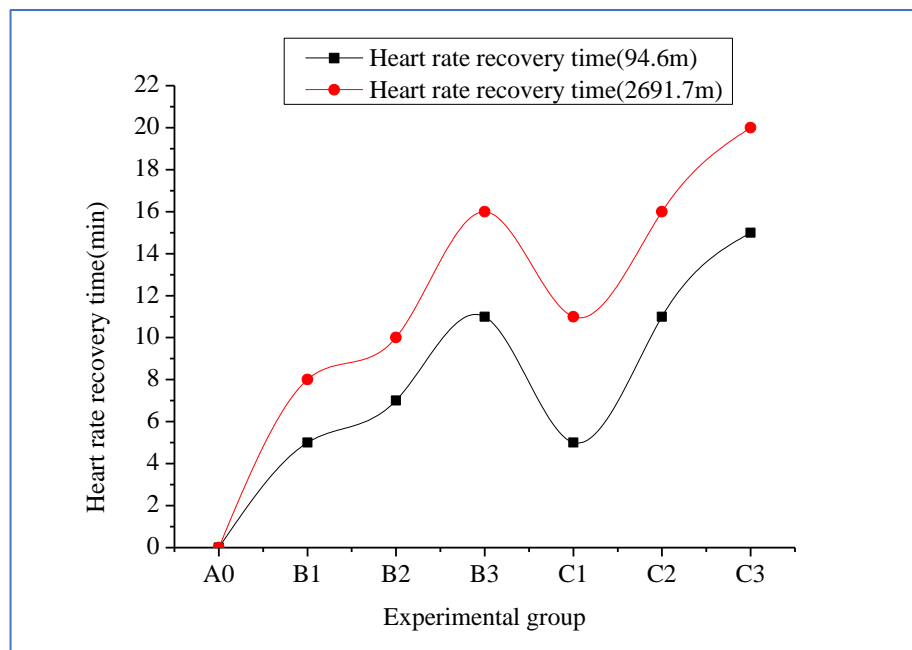


图2 平原与高原心率变化的箱线图比较

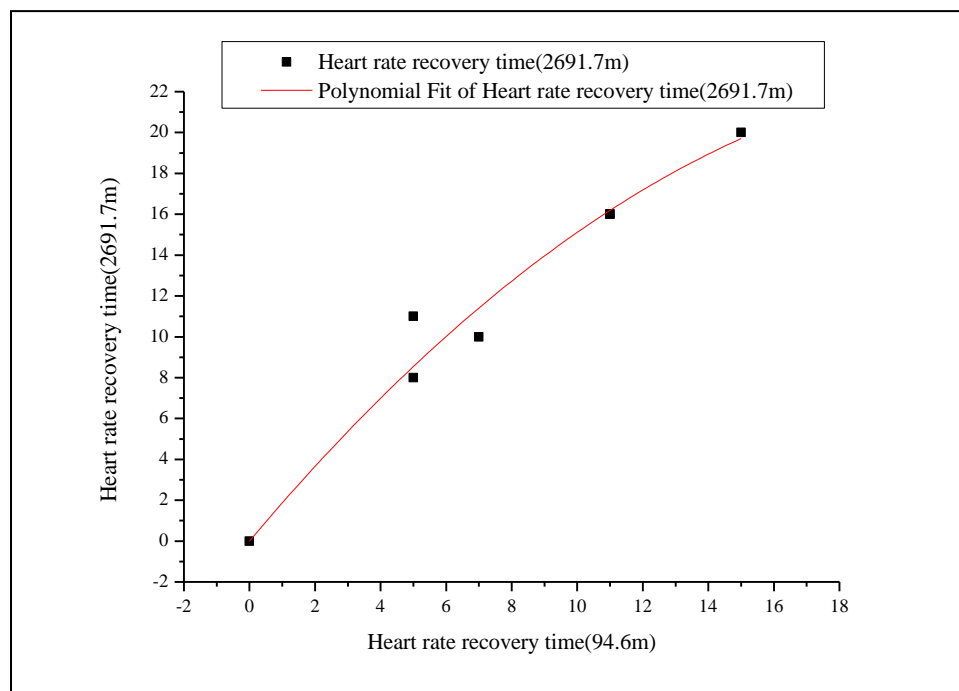
依据心电频谱分析仪一般以正峰值进行分析，利用Sine函数作拟合的曲线，图1中因缺氧高原心率明显加快；通过图2的箱线图中更为直观表明高原心率最大值、最小值、平均值均大于平原。

心率恢复时间与主观疲劳程度分析



心率恢复时间的长短作为人体疲劳程度的**客观**标志，心率恢复滞后于氧耗的恢复，疲劳越重时心率恢复得越慢，对应人的**主观**疲劳程度变化通过比较疲劳评分曲线，可以看出心率曲线的变化趋势与主观疲劳程度问卷得分趋势基本保持一致，说明**心率可以反映人的生理疲劳状况**。可根据作业后的**心率恢复时间**制定合理的轮班制度。

高原与平原心率恢复时间拟合



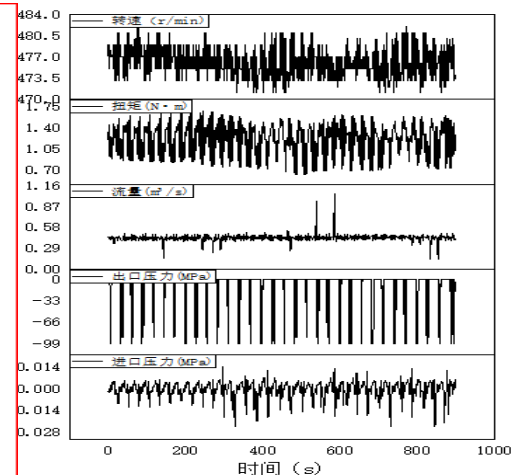
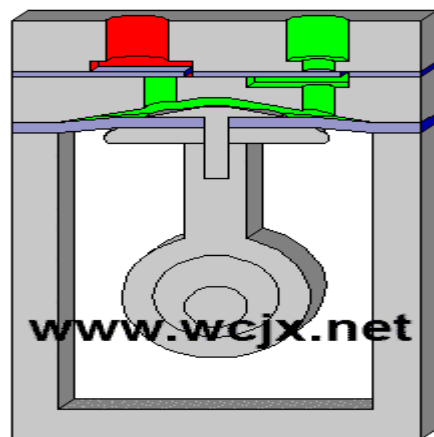
$$y = 1.91x - 0.04x^2$$

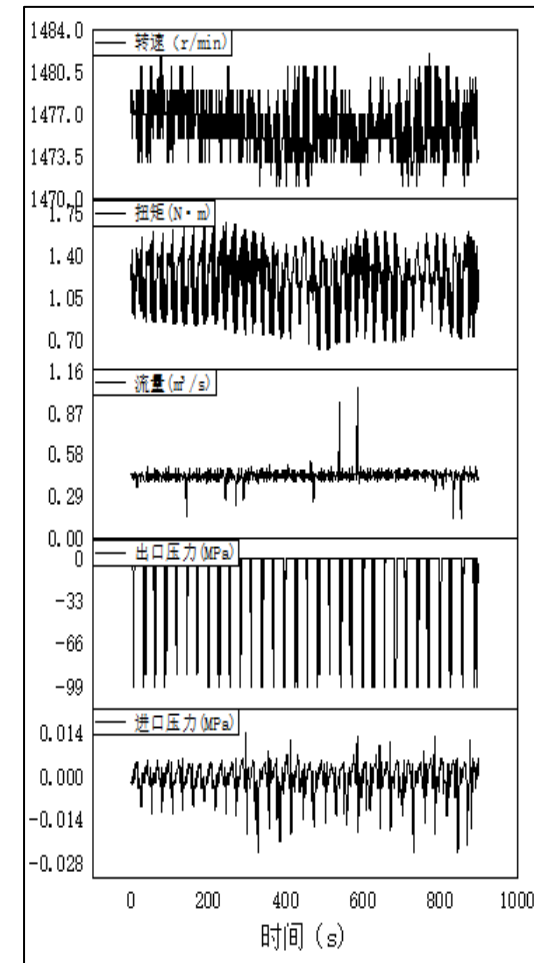
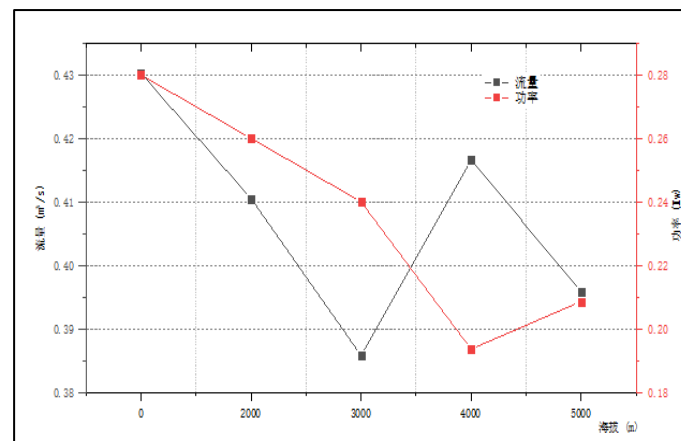
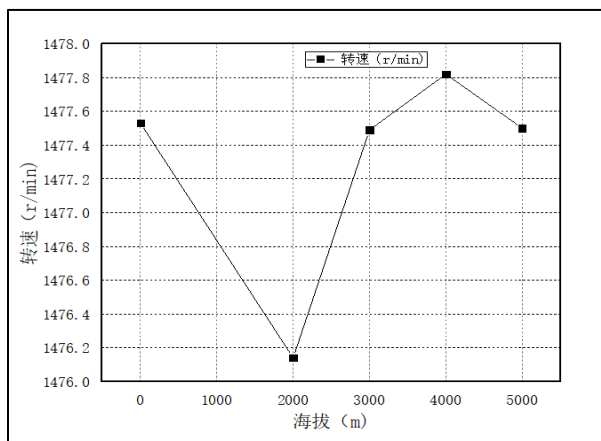
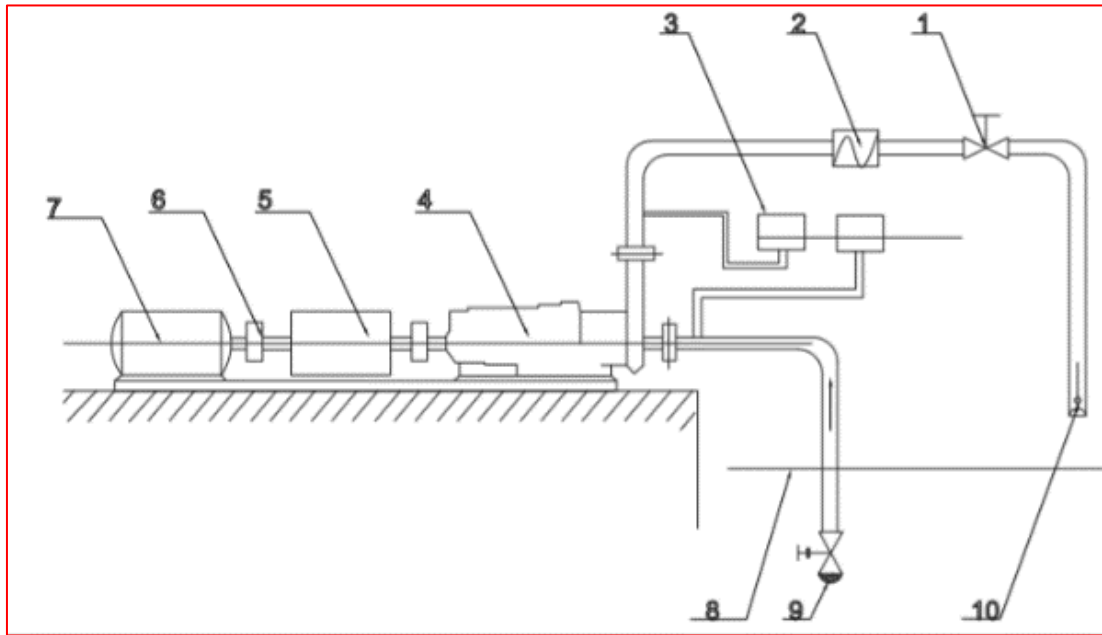
$$R^2 = 0.99$$

依据高原与平原心率恢复时间拟合公式，同一作业条件下，可对平原**制定的作业制度**做出相应调整，确保充足的休息时间，保证人体疲劳恢复。

(二) 高原环境模拟实验室设备性能测试

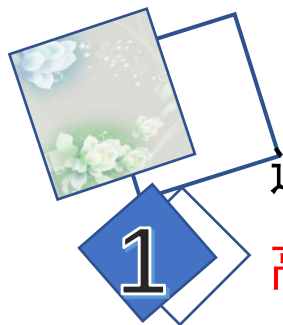
针对矿用电动隔膜泵在模拟舱模拟不同海拔地区的工作性能变化开展了系列实验研究。对比平原地区，对不同海拔高度下的**矿用电动隔膜泵**的扬程、流量、进出口压力、扭矩、转速和功率进行实验研究。实验结果表明，电动隔膜泵在高海拔地区运行时，大气压力和空气密度降低，导致电动隔膜泵的**功率和扭矩下降**，**海拔每升高1000m，电动隔膜泵的扭矩下降5.2%~15.8%，功率下降7.7%~16.6%，海拔达到5000m时，功率下降高达30%左右。**





水泵影响测试模型设计与数据分析

成果与应用



通过研究作业人员与作业机械、作业环境的协同关系，提出高海拔高寒金属矿山特有且相互制约的设计变量。



基于作业人员可靠性的采矿设计理论与方法研究。



高海拔高寒矿山设备功效及效率提升，设备选型标准。



制定基于人机功效的高海拔高寒地区矿山开采安全性判定标准

ICS
CCS D

KA

中华人民共和国矿山安全行业标准

KA/T XX—2025

高海拔高寒地区金属矿山
安全开采标准（送审稿）

Metal Mines in High Altitude and Cold Regions

Safety Mining Standards

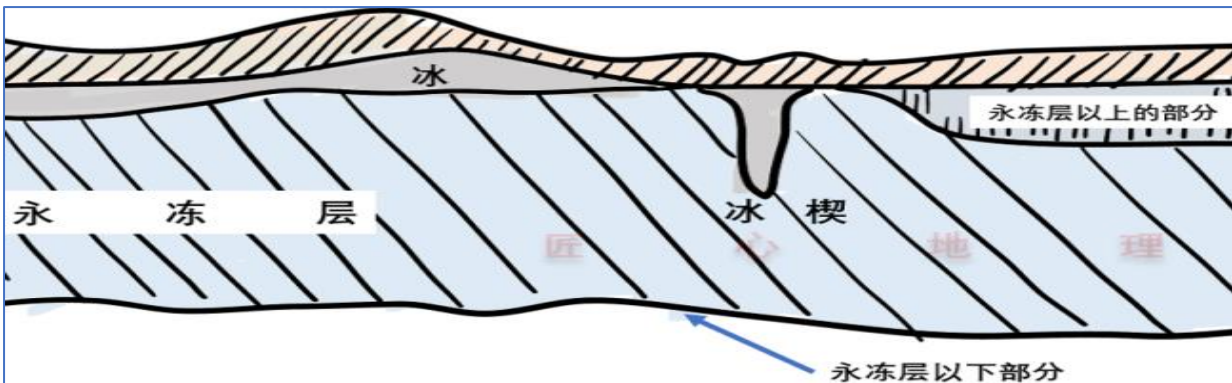
XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家矿山安全监察局 发布

一、露天矿山安全技术要求

- （一）设置专用的防冰、除冰设施。
- （二）冻融区警示。
- （三）采掘设备的供电电缆，绝缘、紫外线防护。
- （四）《厂矿道路设计规范》相关参数折减，譬如坡降折减1%，1km坡降不宜大于6.5%。
- （五）安全平台和清扫平台宽度设计标准。
- （六）冻融影响构成不稳定的潜在滑坡体的边坡，应进行安全稳定性论证并采取安全措施。



高海拔高寒地区金属矿山
安全开采标准（送审稿）

Metal Mines in High Altitude and Cold Regions

Safety Mining Standards

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家矿山安全监察局 发 布

二、地下矿山安全技术要求

（一）现场监测和预报；

（二）管理人员素质（相关知识与能力）；

（三）协同性：

1. 优先选用机械化高、工艺简单、操作简便的采矿方法。
2. 实 现矿山开采机械化，关键生产工艺流程数控化率不低于 50%。
3. 在回采过程中，优先选用机械化的设备，以降低作业人员的劳动强度。



气象因素对人员、生活设施的要求

（一）弥散供氧设计与评价（GB/T35414-2017）

- ◆ 不同海拔高度范围的氧气浓度。
- ◆ 高原氧调供氧等级的选择要求。
- ◆ 供氧空间的最大氧气浓度。
- ◆ 供氧气体品质要求。
- ◆ 高原氧调装置的安装。
- ◆ 高原氧调供氧等级的选择

职业卫生管理要求

- （一）职业健康检查，重点关注高原反应，并建立健康档案；
- （二）职业病危害告知；
- （三）从业禁止
 - ◆ 活动性肺结核病及肺外结核病；
 - ◆ 急性高原反应者；
 - ◆ 从业者年龄55周岁以上。



高原环境供配电系统必须符合的标准要求是一个体系，而非单一标准：

1. GB/T20645-2006 废止。
2. 核心基础：GB/T 20626.1-2017。
3. 专业延伸：各类设备（变压器、开关柜、电缆等）需符合其各自的专业标准（如 GB/T 1094, GB/T 11022, GB/T 14048 等），并严格应用其中的“高海拔修正”条款。
4. 系统集成：整个系统的设计必须遵循 GB 50052、GB 50054 等设计规范，并充分考虑高原环境的累积效应。

总之，设备选型时要提出明确要求：向设备制造商声明使用海拔，并要求其提供符合 GB/T 20626.1 及相关产品标准、并经过相应海拔修正计算和设计的“高原型”产品或“高海拔适用”的认证。加强绝缘和防护：选择爬电距离更大、电气间隙更大的设备，并选用抗紫外线、耐低温的材料。

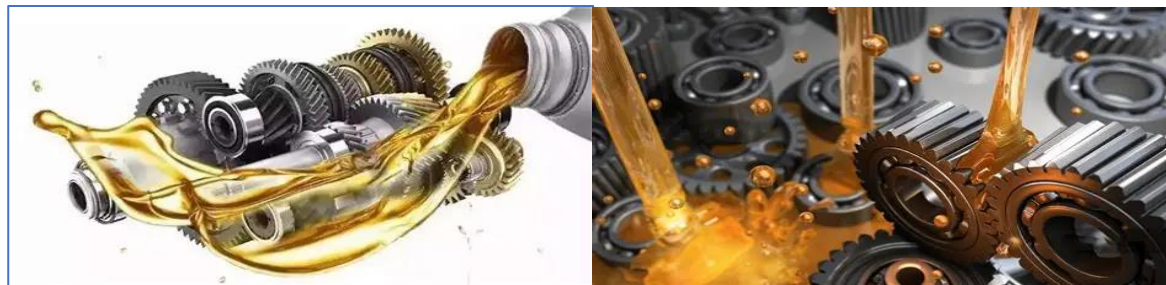
（七）设备选型

具备3200m海拔，零下30摄氏度环境正常工作的能力。符合基本工程机械相应标准的规定，如《高原型工程机械选型验收规范》GB/T20969-2007）。

设备润滑采用干油站的不使用稀油润滑，或者加装电加热器。

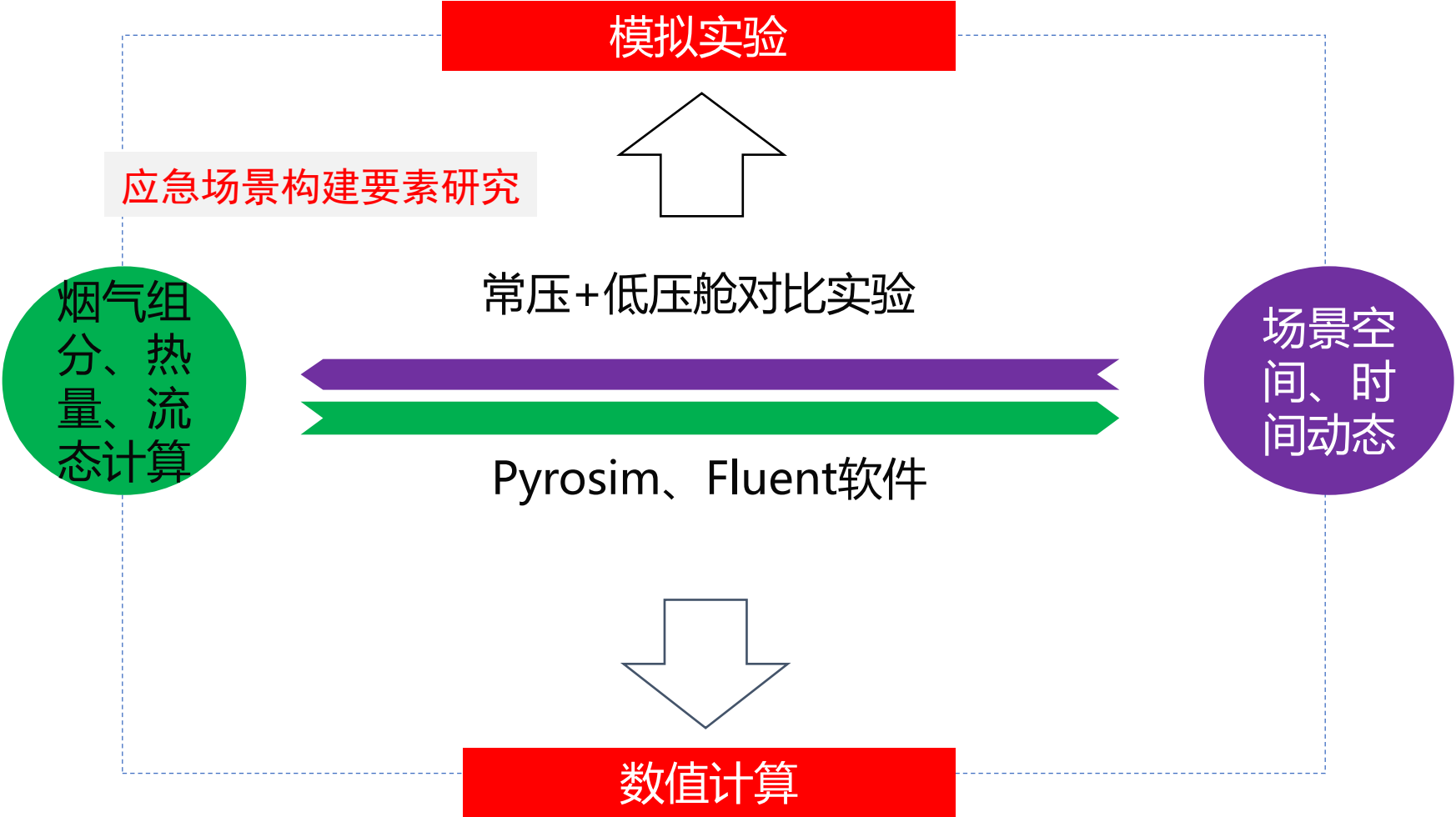
机油，优先保证低温启动性能，同时兼顾高温保护性能，粘度（流动性）等级（SAE/API）符合高海拔高寒地区要求（0W-20/5W-30）。

供配电系统要求符合GB/T20626.1-2017等相关要求。



开发高海拔环境灾害情景构建与演练系统

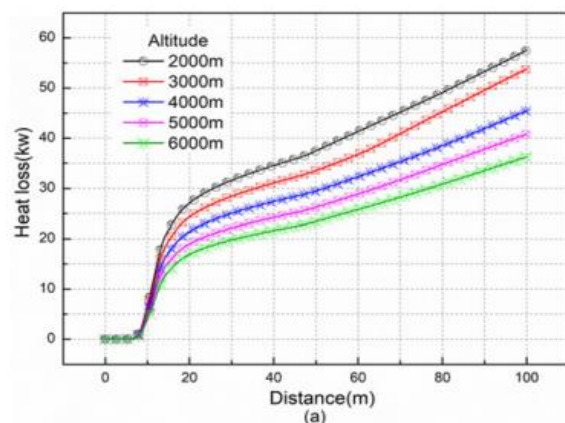
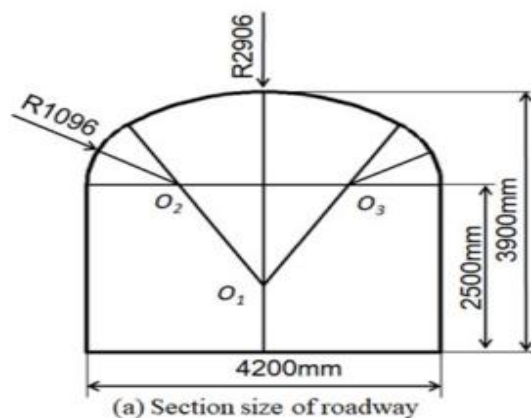
模拟实验+数值计算



结合某年某高海拔铜矿调研和高原气候特点，构建矿山应急场景
空间几何要素+灾害形态要素+应急救援要素

空间几何要素

确定应急场景空间
尺寸、断面形状等

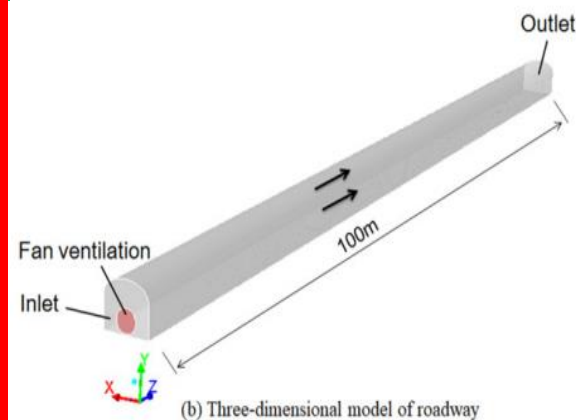


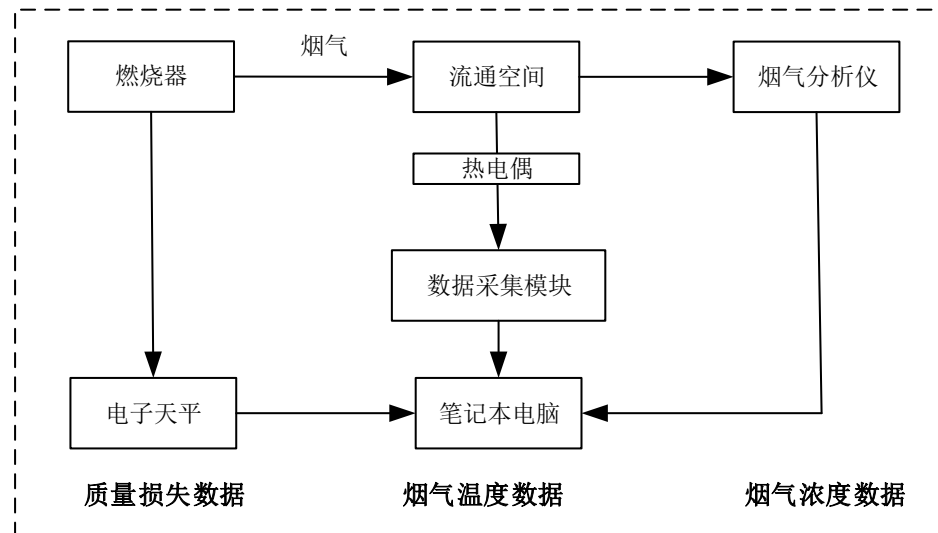
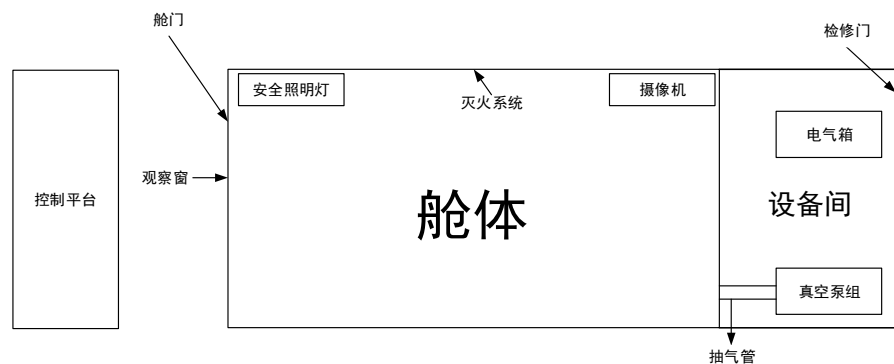
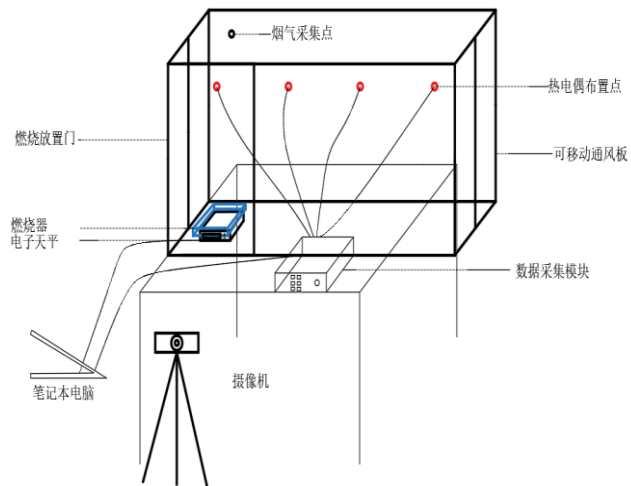
应急救援要素

生命探测、通风给
氧、疏散技术实施
条件

灾害形态要素

火灾、窒息等事故
形态主要描述参数

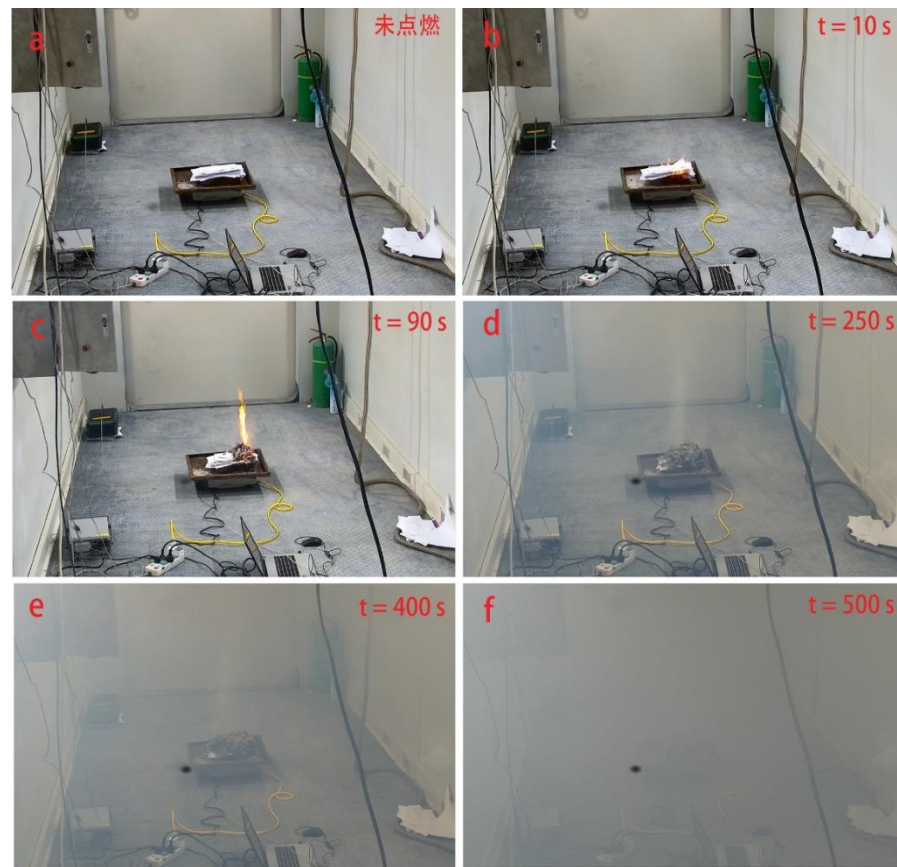
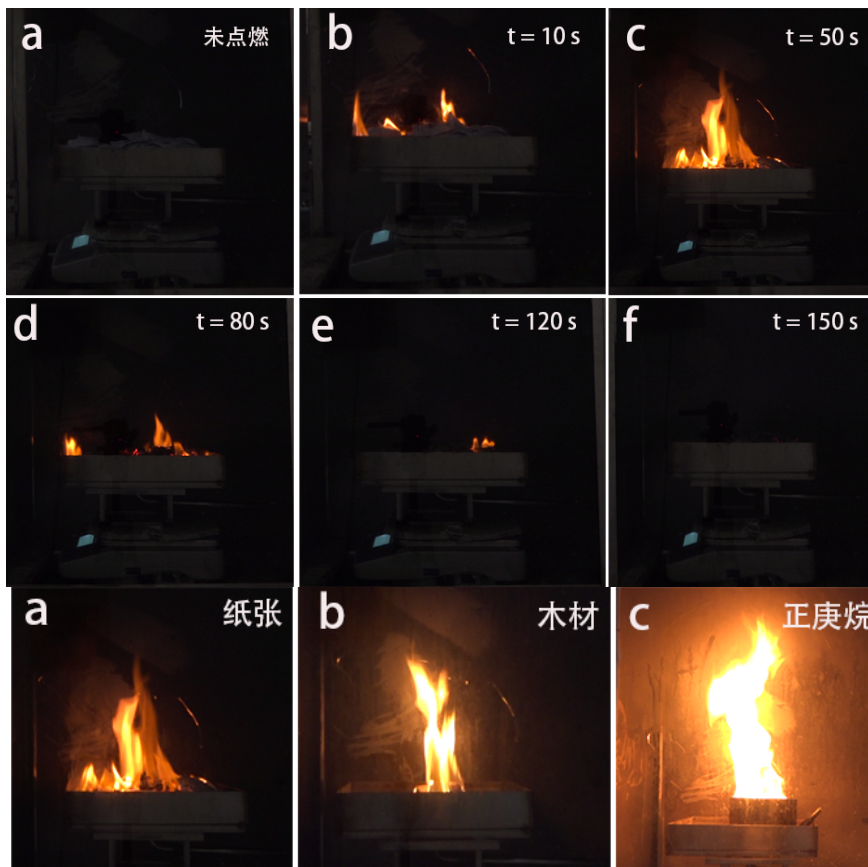




A 常压实验

B 低压实验

火灾动力演化模拟实验装置系统



A

常压实验

实验测量过程

B

低压实验



应急救援体系：

建立覆盖矿区的应急通信网络，配备卫星电话，高原型救护车、移动ICU和专业的高原医疗团队，确保事故或疾病发生时能快速响应。

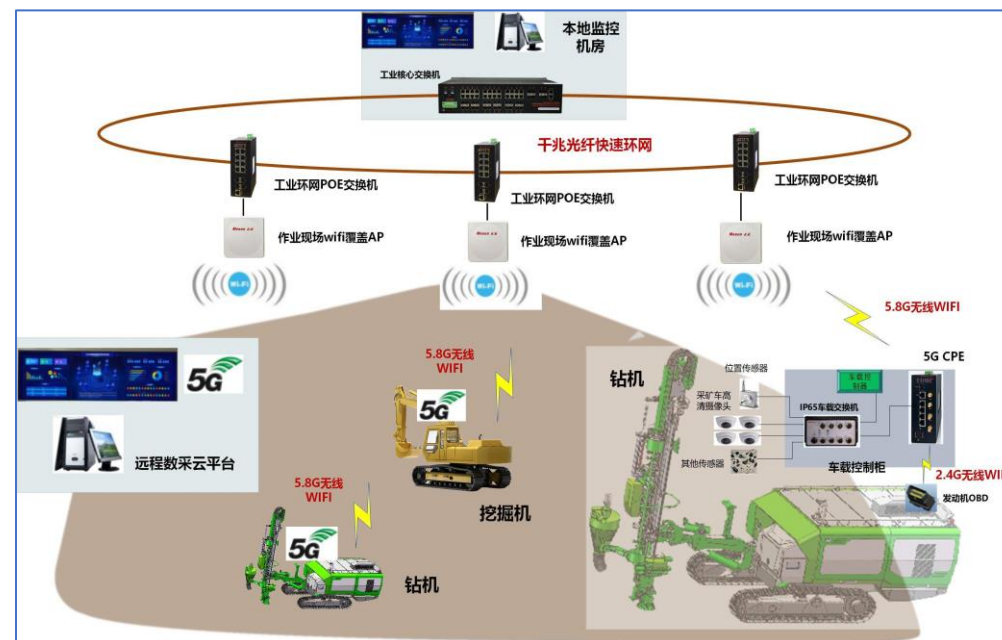


(三) 远程遥控与无人驾驶技术



无人驾驶矿卡：

应用基于5G、北斗/GPS高精度定位和车联网技术的无人驾驶矿用卡车，实现运输环节的24小时不间断作业。这在低氧环境下意义重大，完全将驾驶员从危险、艰苦的岗位上解放出来。





远程遥控铲装与钻掘：

操作员可以在舒适的远程控制中心，在远程对电铲、钻机等大型设备进行精准操作。这不仅改善了工作环境，也允许专家在非高原地区提供技术支持。

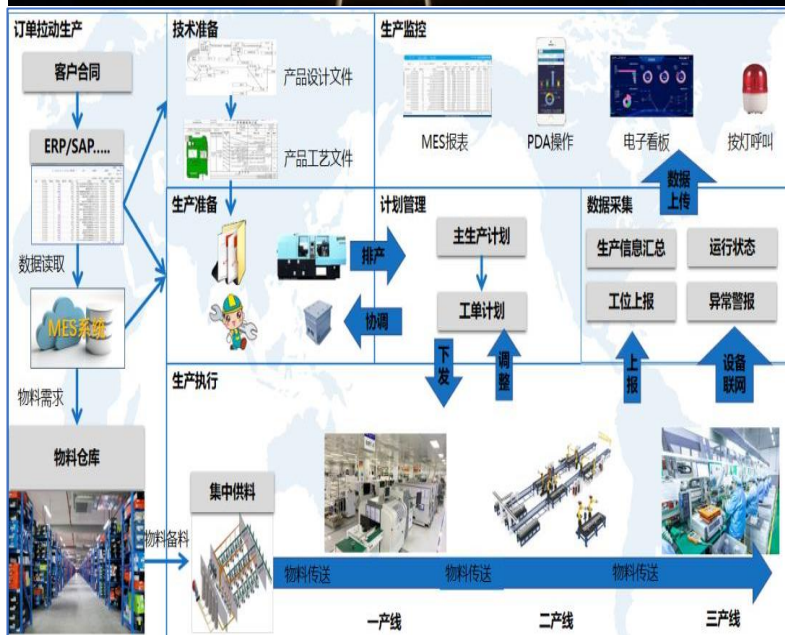


(四) 数字孪生与智能调度



数字孪生矿山：利用三维建模、物联网传感器和数据分析，在虚拟空间中创建一个与物理矿山完全对应的“**数字双胞胎**”。可以用于**模拟生产、优化流程、预测设备故障**和进行安全演练。

智能生产执行系统：集成地质模型、设备状态、生产计划等信息，通过人工智能算法进行实时优化调度，自动分配任务给无人矿卡、自动化设备，实现整体生产效率最大化。



(五) 绿色开采技术



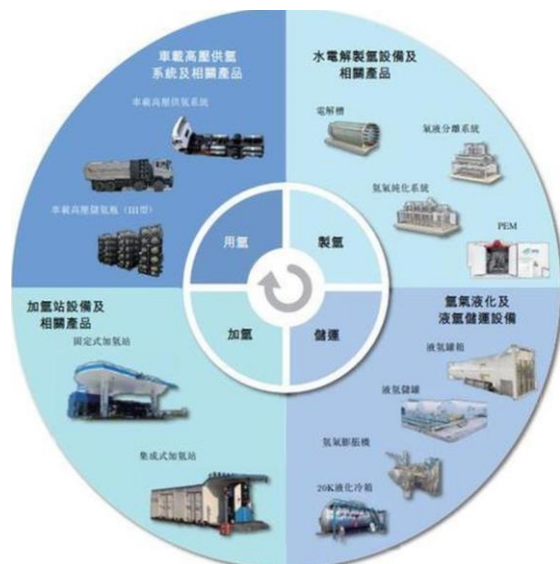
原位溶浸采矿法： 对于某些特定矿种（如铀、铜），采用“原地溶浸”技术，通过向地下注入化学溶液，将矿石中的有价值元素溶解并抽出地表，而不需要大规模开挖和剥离。这几乎不破坏地表结构和植被。

边开采边复垦： 采用表土单独剥离、存放和回填技术，在开采完毕的区域立即进行土壤重构和植被恢复。在高寒地区，会筛选和培育耐寒、耐旱的本地草种进行生态修复。

干式堆存尾矿技术： 将尾矿进行高效脱水，形成膏体或干饼状后进行堆存。这大大减少了传统尾矿库存在的渗漏风险和水资源消耗，特别适合水资源宝贵且冰冻期长的高原地区。



高海拔生态系统极其脆弱，环境保护是生命线

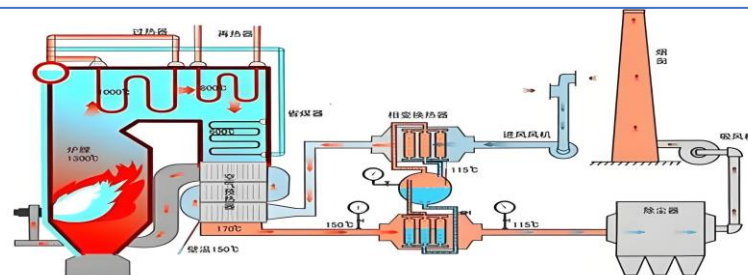
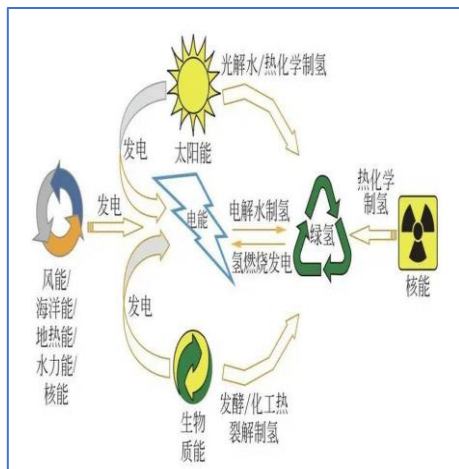


节能减排与能源综合利用：

电动化与氢能化： 逐步采用纯电动或氢燃料（绿氢）驱动的矿用设备，实现运输环节零碳排放，同时减少矿区空气污染和噪音。

余热回收利用： 回收利用柴油发电机、空压机等设备运行时产生的大量余热，为矿区建筑供暖、加热生活用水，降低燃油消耗。

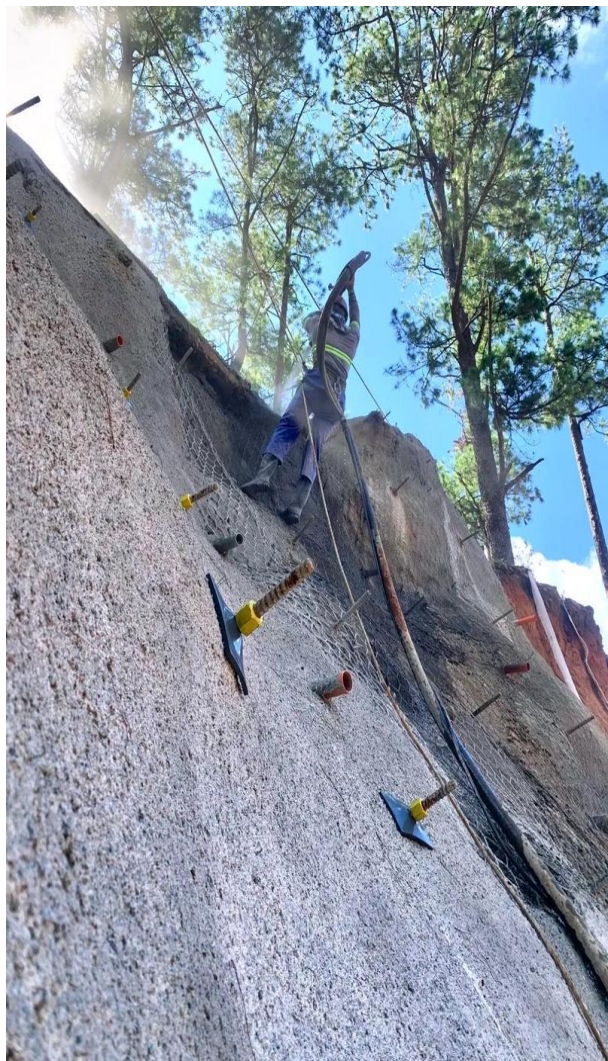
可再生能源应用： 高海拔地区太阳能资源丰富。大规模部署光伏电站，为矿区生产生活提供清洁能源，降低对柴油发电的依赖和运输成本。



烟气余热回收通常有两种方式：一种是利用余热制热水，产生的热水可以用来到生活、生产中去，另一种是利用烟气预热空气助燃，能够强化燃烧，提高炉子的升温速度，均能获得显著的综合节能效果。



(六) 支护技术



高原冻土区巷道与边坡支护技术：

适用于冻土环境的特种注浆材料和保温支护结构，防止因冻融循环导致的巷道变形和边坡失稳。

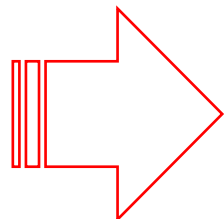
高效破岩与低温炸药技术：

在低温环境下性能稳定、起爆可靠的专用工业炸药，并优化爆破参数，提高在高原硬岩条件下的破岩效率。



Contents 目录

高寒高海拔
金属矿山



一、问题

环境特征分析

二、技术

个体安全与保障技术

智能与绿色开采技术

三、发展

未来发展趋势

高海拔矿山开采的先进技术不是单一技术的应用，而是一个集成了安全保障、智能自动化、绿色环保和特殊工程技术的系统性解决方案。发展趋势：

- ✓ 从“人适应环境”到“环境适应人”：通过供氧和自动化，最大限度减少人员在极端环境下的暴露。
- ✓ 从“经验驱动”到“数据驱动”：利用大数据和人工智能实现精细化管理和科学决策。
- ✓ 从“资源掠夺”到“生态共生”：将环境保护置于与经济效益同等重要的位置。

这些技术都有成功应用案例，期待有更多的高海拔矿山决策管理层思考、合作研究、引进与广泛应用，实现高海拔地区矿山安全、高效和绿色可持续发展。

谢谢，不足之处请指正！
欢迎交流探讨！

廖国礼