



中国五矿

长沙矿山研究院有限责任公司  
CHANGSHA INSTITUTE OF MINING RESEARCH CO.,LTD

# 高寒高海拔装备安全技术要求与典型案例

李富伟

深部金属矿安全智能开采国家矿山安全监察局  
金属矿山安全技术国家重点实验室  
金属非金属矿山重大灾害事故分析鉴定实验室  
国家安全生产长沙矿山机电检测检验中心  
长沙矿山研究院有限责任公司

一

高寒高海拔装备安全现状

二

机械部件安全技术要求及案例

三

电气部件安全技术要求及案例

四

非金属材料安全技术要求及案例

五

通风与个体防护安全技术要求及案例

六

高寒高海拔装备安全展望

# 1. 高寒高海拔装备安全现状

# 1.1 高寒高海拔装备安全现状

## □ 高寒高海拔矿山发展趋势



东部地区

平原、海拔低  
(矿产枯竭)

转移

西部地区

高原、高寒、高  
海拔 (矿产丰富)

近年来，资源供给与消费需求矛盾日益突出，西部地区是重要的矿产储备基地和接替地区，铜矿新增资源量占全国的**70%**，铅锌矿新增资源量更达**83%**，**矿业向西部转移是必然趋势**。西部地区普遍为高原，**高寒高海拔地区开展矿业开发面临显著的低温、低氧、低气压等因素影响，导致开采装备存在工作效率低下、安全性和可靠性降低等问题**。

# 1.2 高寒高海拔装备安全现状

## 高寒高海拔环境特点

- **低气压**：海拔每升高1000米大气压力下降约100kPa；**海拔在4000m以上**，年平均气压**544~620kPa**，为平原的60%~70%。
- **低温**：极端低温可达-40℃以上，年平均气温**-2℃~8℃**、全年热量条件严重不足；**昼夜温差极大**，超过20℃。
- **低氧**：当海拔为4000m时，氧含量在**12%~14%**之间，仅为海平面的**60%**。
- **高辐射**：青藏高原年总辐射量超过**1800 kWh/m<sup>2</sup>**，相比之下，四川盆地等地区年总辐射量低于**1000 kWh/m<sup>2</sup>**。

海拔、气压及空气密度对照表

海拔高度/m	大气压力/Pa	空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )
0	101325	1.225
2000	79486	1.006
3000	70101	0.909
4000	61635	0.819
5000	54009	0.716

不同海拔大气压及含氧量的关系

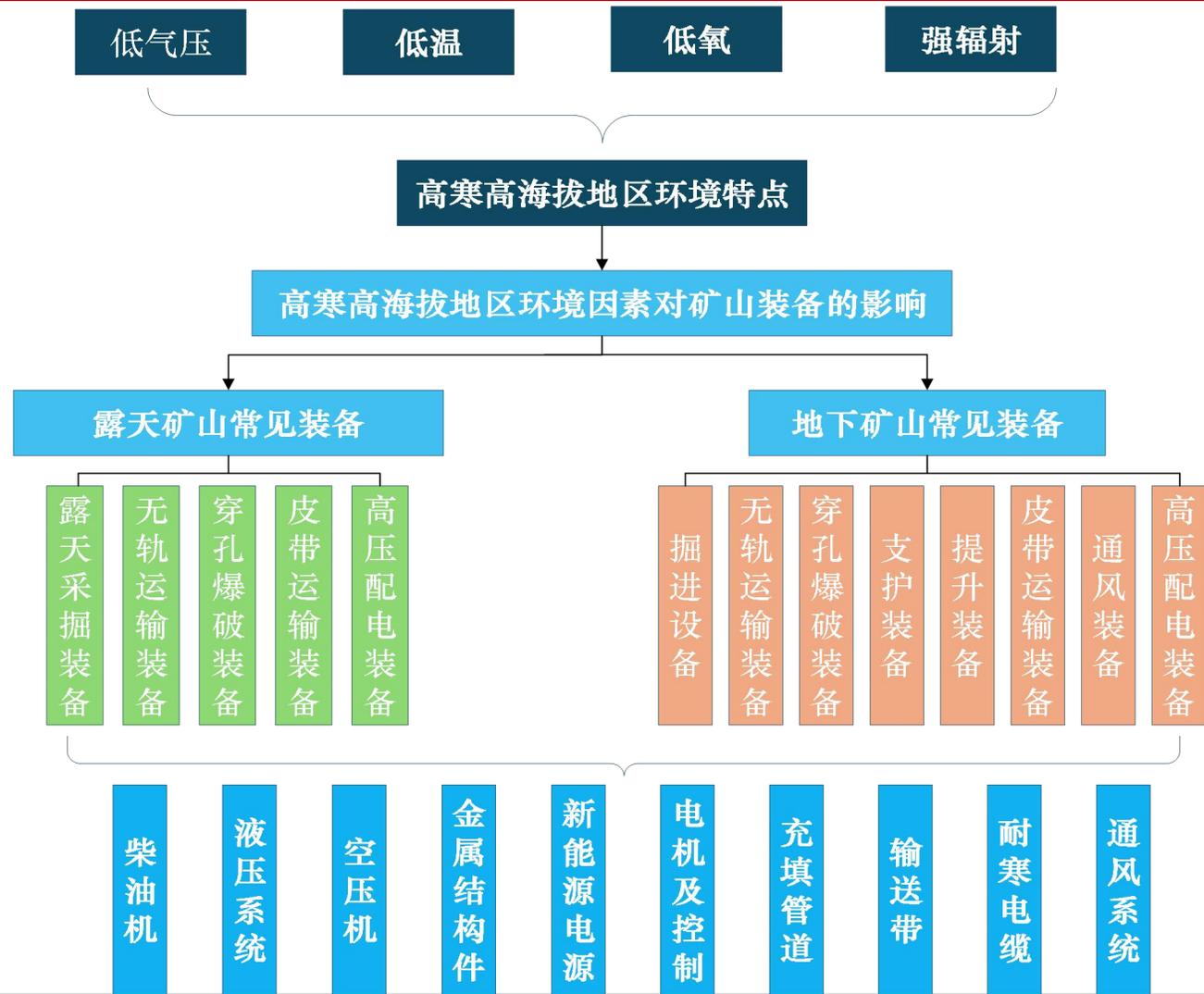
海拔高度 m	0	1000	2000	3000	4000	5000
年平均气压 kPa	101.5	90.0	79.5	70.0	61.5	54.0
含氧量 g/m <sup>3</sup> (20℃)	323.0	280.5	253.4	223.4	196.4	172.1



# 1.3 高寒高海拔装备安全现状

## 高寒高海拔矿区常见装备

适用于高原高海拔露天与地下开采的装备与低海拔地区矿山开采种类相同，但因低温、低氧、低气压、高辐射“三低一高”的特殊环境，对机械装备、电气装备、非金属材料、通风系统及个体防护装备的可靠性和安全性提出了新的要求，包括柴油机、液压系统、空压机、电气系统、输送带等关键部件。



## 1.4 高寒高海拔装备安全现状

### □ 高寒高海拔环境因素对设备的主要影响

- **低气压**：电气绝缘强度降低、散热能力降低、密封性能下降、通风系统的压力
- **低温**：材料脆性增加、油黏度增大、蓄电池容量衰减
- **低氧**：动力效率下降、积炭与磨损加剧、设备效率降低
- **高辐射**：非金属材料加速老化、材料表面粉化

设备性能衰减，人工效率下降，安全风险加大

- 目前我国矿山装备制造企业、科研院所、大专院校等针对上述问题进行了研究和技术攻关，取得了一定的技术成果。

## 2. 机械部件安全技术要求及案例

## 2.1 机械部件安全技术要求——综合影响

■ 高寒高海拔环境下，“低温、低气压”的双重作用会对机械设备的性能产生不利影响，具体表现为**功率下降、燃烧不充分、油黏度增大以及结构件强度降低**等问题

### ■ 功率下降

- 低气压导致发动机进气量不足、燃烧不充分，直接造成设备功率下降



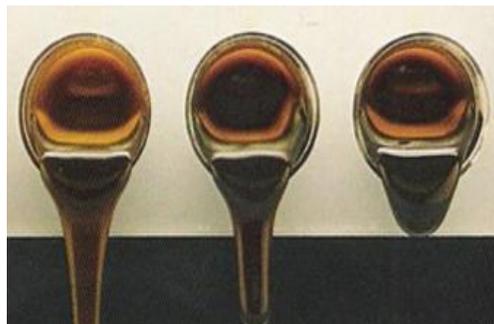
### ■ 燃烧不充分

- 低氧环境导致燃料燃烧不完全，未燃烧的燃料颗粒随废气排出，形成冒黑烟，污染环境且降低燃油利用率



### ■ 油黏度增大

- 低温环境使润滑油、液压油、冷却液黏度增大，造成使用性能降低



### ■ 结构件强度降低

- 低温削弱金属韧性、增强脆性，叠加低气压下设备受力变化，导致受力件损伤、开裂甚至结构失效



## 2.1 机械部件安全技术要求——综合影响

■ 高海拔高寒环境通过“**低温、低气压**”叠加作用下，会对矿山设备的柴油机、液压系统、空压机及金属结构件分别产生不同负面影响

**柴油机**：启动难、燃烧差、油耗增加、功率降低，部件磨损与故障风险升高



**液压系统**：油液黏度升高、响应慢、密封失效、泄漏，易空化、结冰堵塞

**空压机**：进气量减少、产气效率下降，冷凝水结冰堵塞，部件磨损加速

**金属结构件**：材料冷脆、韧性降，易锈蚀、疲劳开裂，连接部位松动

## 2.2 机械部件安全技术要求——柴油机

■ 在高寒、高海拔矿山环境下，柴油动力设备因技术成熟、动力输出稳定且对复杂环境适应性较强成为主要选择，但受“低温、低气压”叠加影响，柴油机存在**动力衰减、启动困难**等问题

项目	环境因素	核心影响	特殊技术要求
动力性能	低气压	燃烧氧气供给不足导致动力衰减、燃烧不充分、积碳增多	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 海拔2000 m：标定功率无下降；燃油消耗率上升<math>\leq 3\%</math></li><li>➢ 海拔3000 m：标定功率下降<math>\leq 6\%</math>；燃油消耗率上升<math>\leq 5\%</math></li><li>➢ 海拔4000 m：标定功率下降<math>\leq 10\%</math>；燃油消耗率上升<math>\leq 8\%</math></li><li>➢ 海拔5000 m：标定功率下降<math>\leq 14\%</math>；燃油消耗率上升<math>\leq 10\%</math></li></ul>
启动性能	低温	启动困难、润滑不良	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 进气预热启动：最低环境温度<math>-15^{\circ}\text{C}</math>；预热时间无要求</li><li>➢ 机油预热启动：最低环境温度<math>-25^{\circ}\text{C}</math>；预热时间<math>\leq 25\text{ min}</math></li><li>➢ 液循环预热启动：最低环境温度<math>-25^{\circ}\text{C}</math>；预热时间<math>\leq 25\text{ min}</math></li><li>➢ 起动机时间：均<math>\leq 25\text{ s}</math></li></ul>

□ 针对上述影响，需对柴油机进行整体改善，重点优化增压机、排气管、预热装置等部件

## 2.2 机械部件安全技术要求——柴油机

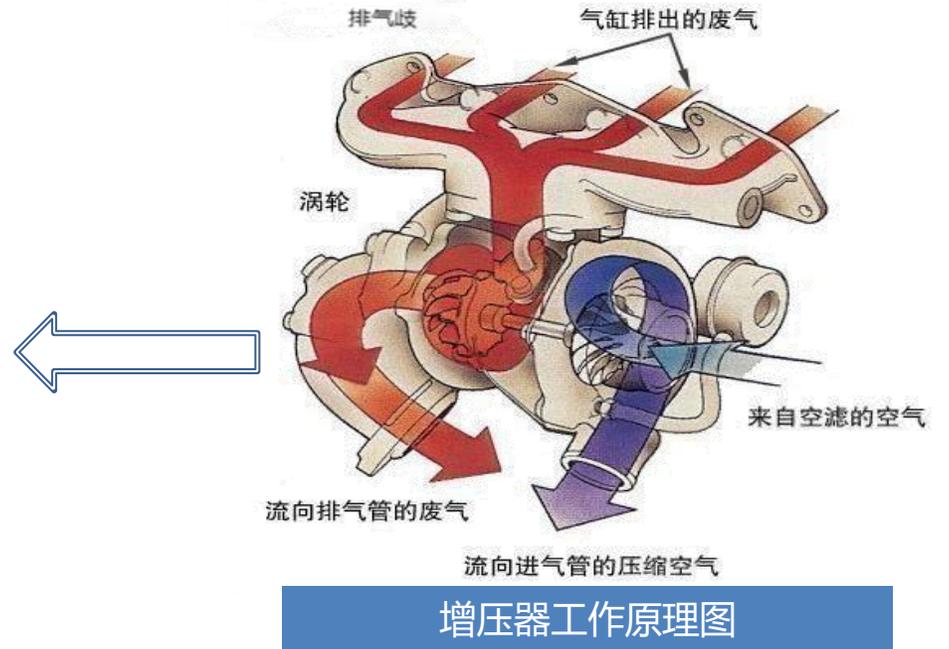
### □ 1、柴油机动力衰减

- 针对高寒高海拔环境下柴油机动力衰减问题，可采用4项关键措施：（1）合理选配高效增压器；（2）采用压力脉冲排气管；（3）合理选配喷油器；（4）采用恒温润滑系统

#### 常见措施1：

#### 合理选配高效增压器

- 采用高原高寒专用增压器，增加进气压力，改善燃烧，弥补低气压和低温导致的进气不足
- 气缸排出的废气进入排气歧管后驱动涡轮旋转，涡轮通过轴带动压气机叶轮转动，将来自空滤的空气压缩，压缩后的空气流向进气管为发动机提供更充足的进气，从而提升发动机动力；驱动涡轮后的废气则流向排气管排出



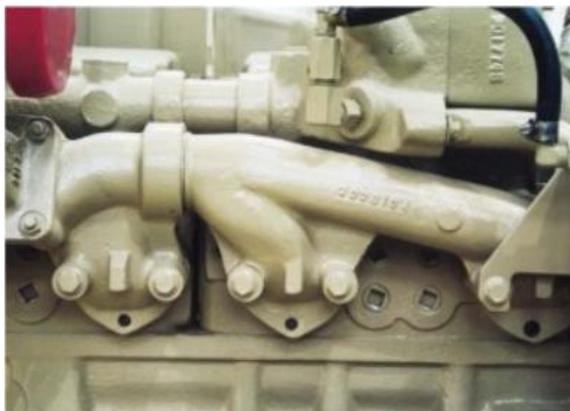
## 2.2 机械部件安全技术要求——柴油机

### □ 1、柴油机动力衰减

常见措施2:

采用压力脉冲排气管

- 减少排气阻力
- 提高废气能量利用率
- 增加发动机低负荷效率



压力脉冲排气管

常见措施3:

合理选配喷油器

- 进气更加均匀混合
- 提升燃烧效率
- 减少油耗和积碳



喷油器

常见措施4:

采用恒温润滑系统

- 机油泵消耗功率降低
- 发动机部分负荷时摩擦功减少



润滑系统

## 2.2 机械部件安全技术要求——柴油机

### 2、柴油机启动困难

■ 针对高寒高海拔柴油机启动困难问题，可采取**进气系统预热、燃油加热、燃油管路加热及油底壳加热**措施进行改善，达到提升进气温度、保证燃油流动性、避免管路燃油结冰效果

#### ➤ 常见措施1：进气系统预热装置

通过柴油机进气加热装置，对柴油机进气进行加热，降低进气中燃油的冷凝趋势，提高混合气形成质量，使柴油机在低温环境下能顺利启动并稳定运行。图2除了**进气歧管**，还有额外的蓝色管路和部件，这些就是用来给进气加热的**预热装置**，能帮柴油机在低温环境下更容易启动。

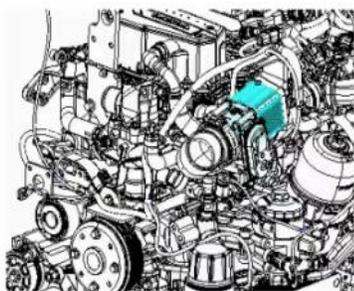


图1 普通柴油机

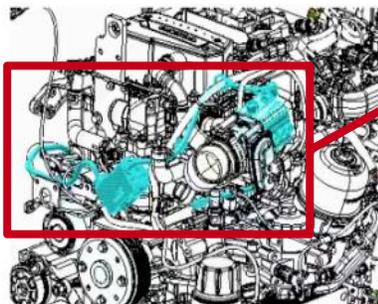


图2 加装了进气预热装置柴油机

预热装置



图3 进气加热装置实物图

预热装置

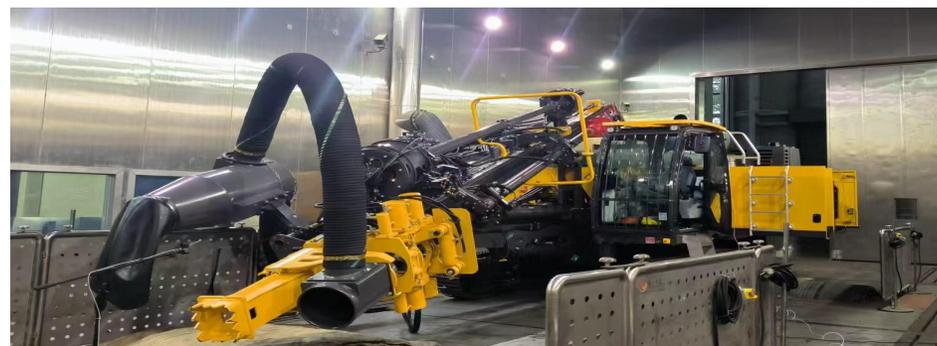
## 2.2 机械部件安全技术要求——柴油机

### □ 2、柴油机启动困难

- 低温会让柴油粘稠、结蜡，堵塞燃油系统核心部件，造成供油不足，引发柴油机启动失败、功率骤降或熄火等问题

#### ➤ 常见措施2：燃油加热器

- 在发动机上装配液体燃油加热器，保障低温条件下发动机启动可靠性。同时，对搭载该加热器的柴油机开展整车低温仓打火试验，进一步验证其在低温环境下的正常启动性能，确保适配高海拔高寒矿山的使用需求



低温仓打火试验



液体燃油加热器

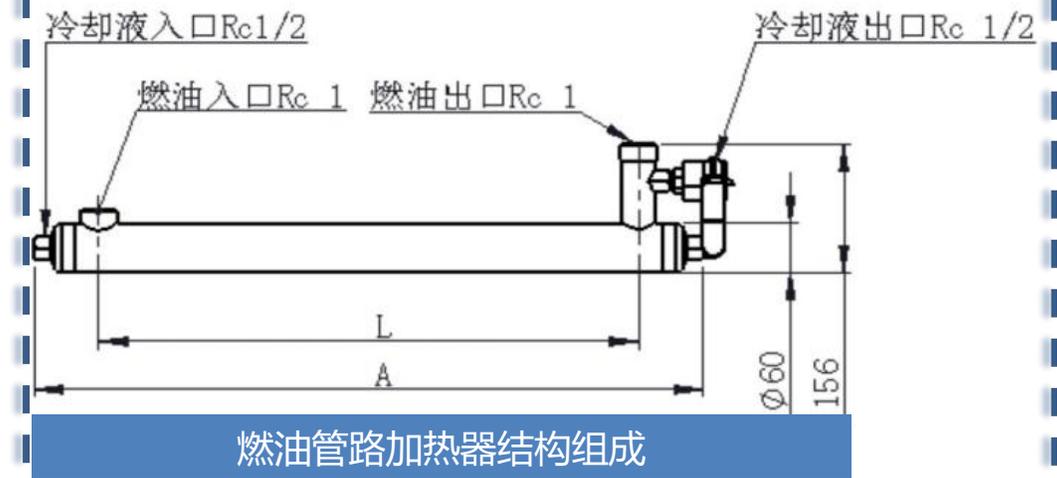
### □ 2、柴油机启动困难

#### ➤ 常见措施3：燃油管路加热

- 可以快速提升油温，为柴油机提供适宜温度的燃油，减轻柴油机磨损以延长其使用寿命，同时适用于该环境下矿山机械燃油系统的预热保温

#### □ 技术原理

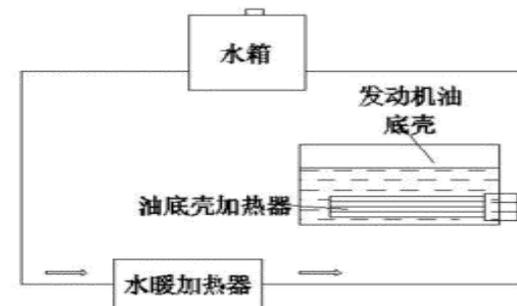
- 防冻冷却液经进水口进入管路加热器水路，柴油由进油口流入油路，二者在此完成热交换。冷却液降温后从出水口流出，返回循环加热系统；加热后的柴油经出油口输送至柴油机等设备，既保障柴油适配工作温度，又提升油料雾化与燃烧效率，延长柴油机使用寿命



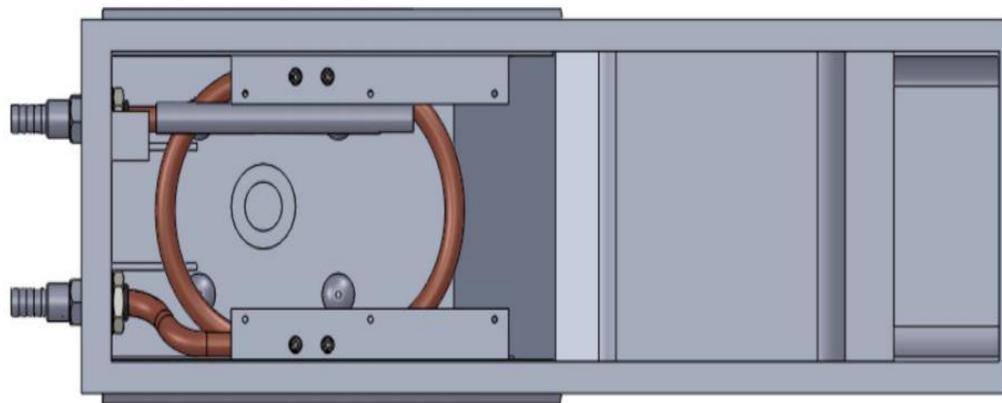
### □ 2、柴油机启动困难

#### ➤ 常见措施4：油底壳加热

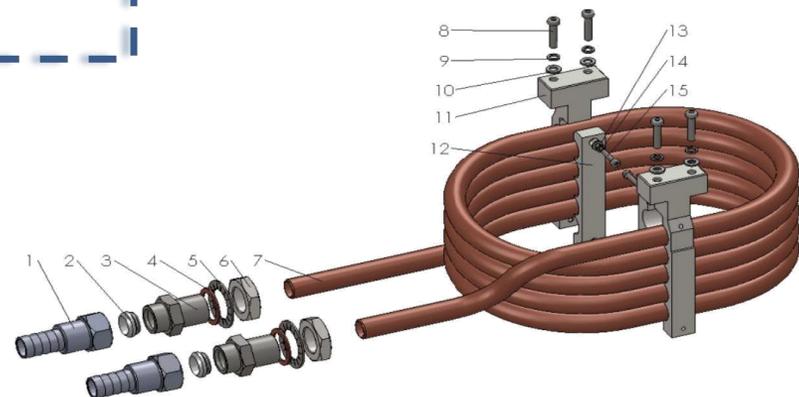
- 油底壳加热器置于柴油机油底壳内，通过外置水暖加热器提供的防冻冷却液，经散热管为润滑油加热，降低其油粘度、增强流动性，保障柴油机正常启动并延长使用寿命



油底壳加热技术原理图



油底壳加热器安装位置



- 1.卡套接头 2.卡套 3.过板接头 4.紫铜垫圈 5.齿形垫圈 6.六角螺母 7.散热管
- 8.内六角螺钉 M6\*20 9.弹簧垫圈 10.平垫圈 11.散热管支架 12.散热管支架 2
- 13.平垫圈 14.弹簧垫圈 15.内六角螺钉 M4\*20

油底壳加热器结构图

## 2.3 机械部件安全技术要求——液压系统

### □ 液压系统安全技术要求

- 高原的**低气压**环境会减小液压系统吸油压力，导致**吸油不足**并引发空化。同时，泵、阀等元件因局部压力突变和结构不合理，容易产生**气蚀**，破坏系统稳定性与正常运行

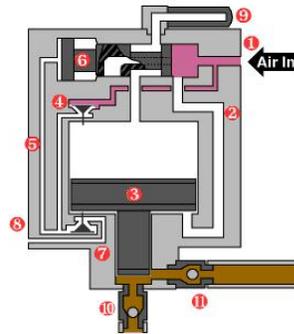
液压系统	核心问题	要求
高原产品	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 低气压→吸油不足</li><li>➢ 元件气体蚀</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 当油面低于发动机供油泵 500 mm 时，油面应考虑 0.03 MPa~0.05 MPa 的加压</li><li>➢ 元件流道优化+抗气蚀涂层</li></ul>

#### □ 技术措施1

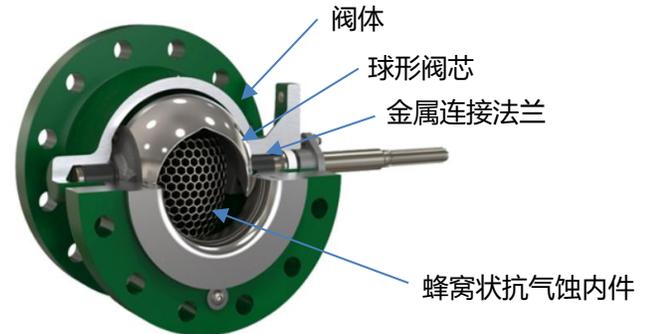
- 采用带抗气蚀结构的泵、阀，如泵的配流盘增加卸荷槽，阀口采用流线型设计，减少局部压力损失

#### □ 技术措施2

- 可以采用惰性气体（如氮气）增压，使油箱内压力维持在一定范围，补偿低气压导致的吸油压力不足。右图中红色为惰性气体，蓝色为液压油



惰性气体增压原理图

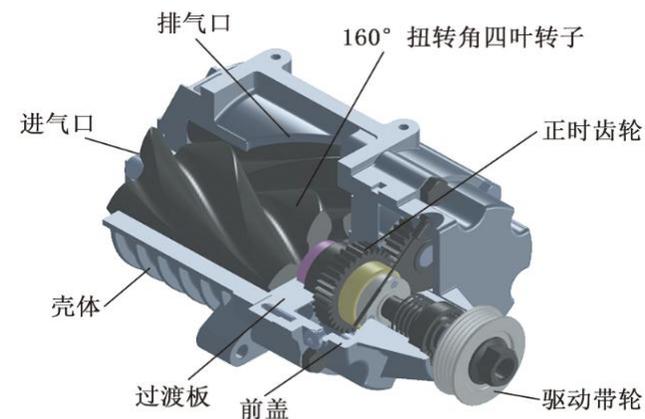


带抗气蚀内件的球阀

## 2.4 机械部件安全技术要求——空压机

- 技术要求：高原高海拔环境**气压低、氧气含量低**，在此环境下固定式空压机需符合 **AQ2055-2016** 标准：配备有效排气压力自动控制装置，公称容积流量不小于 **0.85Q<sub>e</sub>**；公称容积流量 **> 20m<sup>3</sup>/min** 时，第一压缩级后装安全阀，**≤20m<sup>3</sup>/min** 时于末级压缩级后安装，适配高原环境下的稳定运行需求

- 针对“**进气压力不足、吸气量不稳定**”的技术措施
  - 采用**低气压吸气增压技术**，在空压机进气口串联**机械增压装置（如罗茨式增压器）**，通过皮带传动与空压机主轴联动提升进气压力；增压器与进气流量传感器联动，根据海拔自动调节增压比，确保吸气量稳定



罗茨机械增压器基本结构图

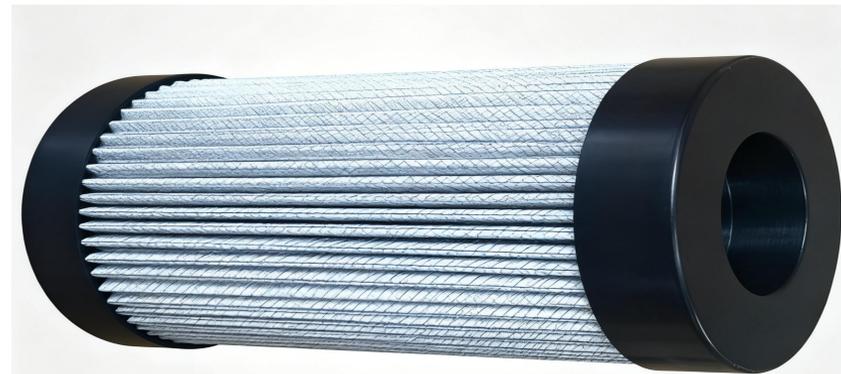
## 2.4 机械部件安全技术要求——空压机

➤ 针对“**进气含沙尘等杂质、易堵塞滤芯、污染设备**”的技术措施

- 配置“**粗滤 (10 $\mu$ m) + 中滤 (5 $\mu$ m) + 精滤 (1 $\mu$ m)**” **三级过滤系统，进气滤芯选用覆膜玻纤材料**
- **配备压差传感器，当滤芯堵塞导致压差大于设定值时，触发声光报警并提示更换，避免进气不畅**

➤ 针对“**排气压力不足、管网压力波动大**”的技术措施

- **选用高海拔专用螺杆空压机，优化转子型线设计，将压缩比提升至 11-15（平原工况常规压缩比 8-10），确保海拔 3000-5000m 时仍能输出额定排气压力**
- **搭配大容量压力缓冲罐，使管网压力波动  $\leq \pm 0.05\text{MPa}$ ，保障压力稳定输出**



覆膜玻纤材料滤芯



高海拔专用螺杆空压机

## 2.6 机械部件安全技术要求——带式输送机

■ 对带式输送机的影响：高寒高海拔环境对长距离大运量带式输送机的**输送带、传动系统、制动系统、托辊、清扫器**等关键部件影响很大，整体运行效率降低、安全风险增大

主要隐患	解决方案
输送带应老化、成槽性变差	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 选用<b>耐寒输送带</b>（能在指定低温下（如-40℃至-60℃）保持柔韧性）</li><li>➢ 建设<b>廊道</b>，避免阳光直射、保温</li></ul>
传动系统效率降低、制动系统效果差	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 传动系统采用专用<b>高海拔电机或电动滚动</b></li><li>➢ 关键传动部件、制动部结构件采用<b>耐低温材料</b>（如Q345D/E型钢材）</li></ul>



输送带



传动机头架



机头传动系统



盘式制动装置

## 2.6 机械部件安全技术要求——带式输送机

主要隐患	解决方案
托辊运行阻力增大，整机运行功率消耗大，严重时急剧磨损托辊和输送带	➤ 选用 <b>防冻型托辊</b> ，如迷宫式密封和低温润滑脂的专用托辊，确保其在低温下仍能灵活转动
清扫器效果差，低温下物料粘附和冻结，造成回程带面磨损和撕裂	➤ 采用 <b>聚氨酯等耐低温材料制成的清扫器</b> ，并设计多级清扫（如合金清扫器、空段清扫器）以有效清除粘附物，消除风险隐患
维护周期长、难度大、不及时，设备易长期带病工作，带来极大风险隐患	➤ 采用 <b>智能化监控系统</b> ，对输送机带速、跑偏及平稳性、清扫效果进行实时监控，发现问题及时维护



托辊及防跑偏装置



滚筒清扫器



梨式回程清扫器

## 2.7 机械部件安全技术要求——钻探设备除尘

□ 相较于平原，**高寒环境空气对流减缓，粉尘颗粒悬浮更久**，钻探作业使粉尘浓度骤升，危害作业人员健康。

表5 作业场所空气中粉尘浓度限值

游离 SiO <sub>2</sub> 的质量分数/%	时间加权平均浓度限值/(mg/m <sup>3</sup> )	
	总粉尘	呼吸性粉尘
<10	4	1.5
10~50	1	0.7
50~80	0.7	0.3
≥80	0.5	0.2

注：时间加权平均浓度限值是每天 8 h 工作时间内接触的平均浓度限值。

GB 16423 《金属非金属矿山安全规程》



除尘作业

□ 技术措施：采用**高规格、干湿混合**的除尘系统，冬季用通风机除尘防止结冰，夏季用湿式除尘增强力度，有效降低钻机作业产生粉尘浓度。

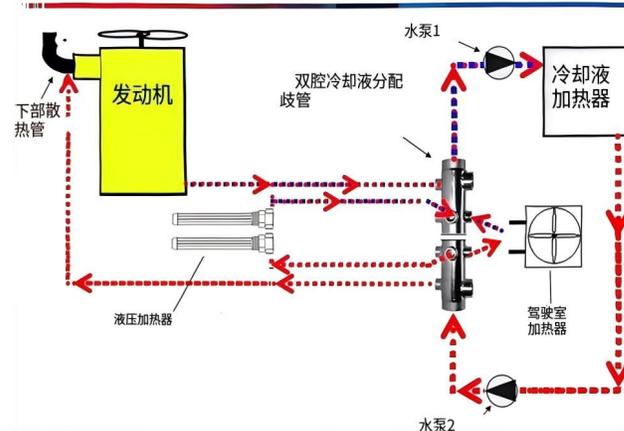
## 2.8 案例——整机加热

### □ 整机加热系统（解决低温问题）

➤ 某厂家针对高寒高海拔地区铲装运设备，加装了整机加热系统

- 该系统搭载单缸柴油机，在主柴油机启动前提前启动该系统，加热冷却液并驱动其在专用回路中循环，精准预热燃油、液压油、驾驶室、柴油机及缸体等关键部件（其中泵仅负责提供循环动力，不具备加热功能），能有效消除低温对装备的影响，保障设备在高寒高海拔环境下顺利启动、稳定运行

动画流程图



工作原理图



加热选用的单缸柴油机



液压油箱增加的加热器

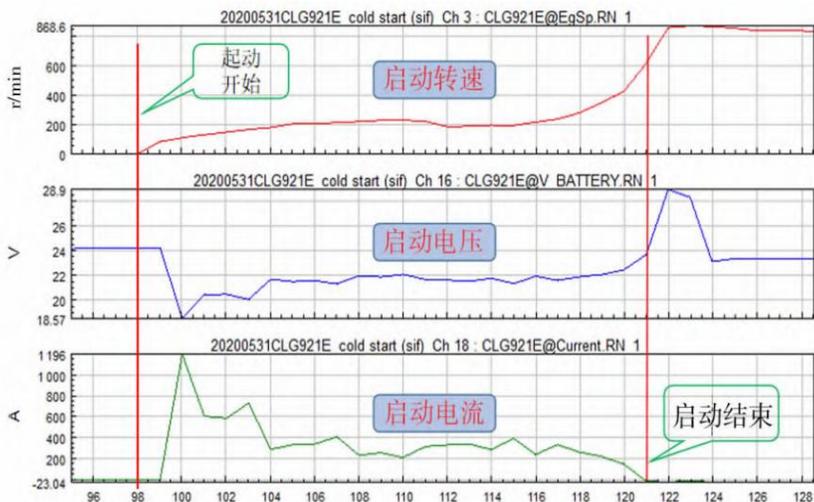


柴油箱增加的加热器

## 2.9 案例——高原隧道挖掘机

### 高原隧道挖掘机（解决低温、低氧、低气压问题）

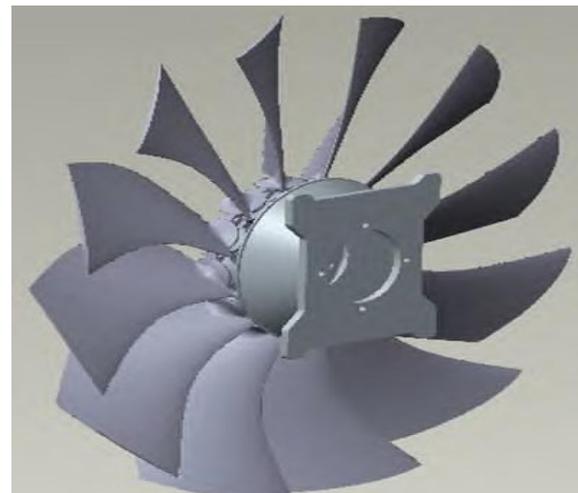
- 某厂家开发了高原自适应程序，可实时根据发动机进气含氧量变化，调整发动机的喷油提前角和喷油策略，通过整车控制器和发动机控制器通信协同，匹配控制发动机油门加载斜率和液压泵功率的加载响应，解决缺氧导致的功率下降和冒黑烟问题
- 配置发动机进气加热格栅对进气进行加热，配置大功率启动马达，使启动转速更快、扭矩更大，满足-30 °C冷启动需求
- 根据使用的海拔及温度，加大风扇叶片角度，增加散热器组的进风量，改善散热能力



环境温度-30 °C冷启动测试数据



环境实验室-30°整机冷冻测试



大角度风扇

## 2.10 案例——带式输送机

- 目前某矿山的带式输送机下运高差达到566米，最大运量可达11000吨/小时，并具备下运发电功能。

- 项目使用**ST6300智能型线圈防撕裂耐寒钢丝绳芯输送带**等，能够在**-40°C**的极寒环境中稳定运行，满足**9公里、11000吨/小时**长距离原矿输送需求。



带式输送机实景



带式输送机廊道

## 2.11 案例——某工程

□ 某工程的平均海拔3100米，昼夜温差达40°C，其中，最大埋深达2400米。

- 某厂家等企业通过**涡轮增压技术**优化发动机功率，采用**航空级低温液压油液**，使设备在
- **-30°C**环境下稳定运行，海拔**3000米**处功率保持率提升至85%以上



盾构机



盾构机作业

# 3. 电气部件安全技术要求及案例

# 3.1 电气部件安全技术要求——综合影响

■ 高寒高海拔环境严重影响电气设备的绝缘性能、散热效率、启动性能，导致设备运行风险急剧增加

## ① 低气压对电气设备的综合影响

海拔升高

现象1

大气压力降低

影响1

外绝缘强度降低

风险1

电气击穿

现象2

空气密度降低

影响2

散热效果降低

风险2

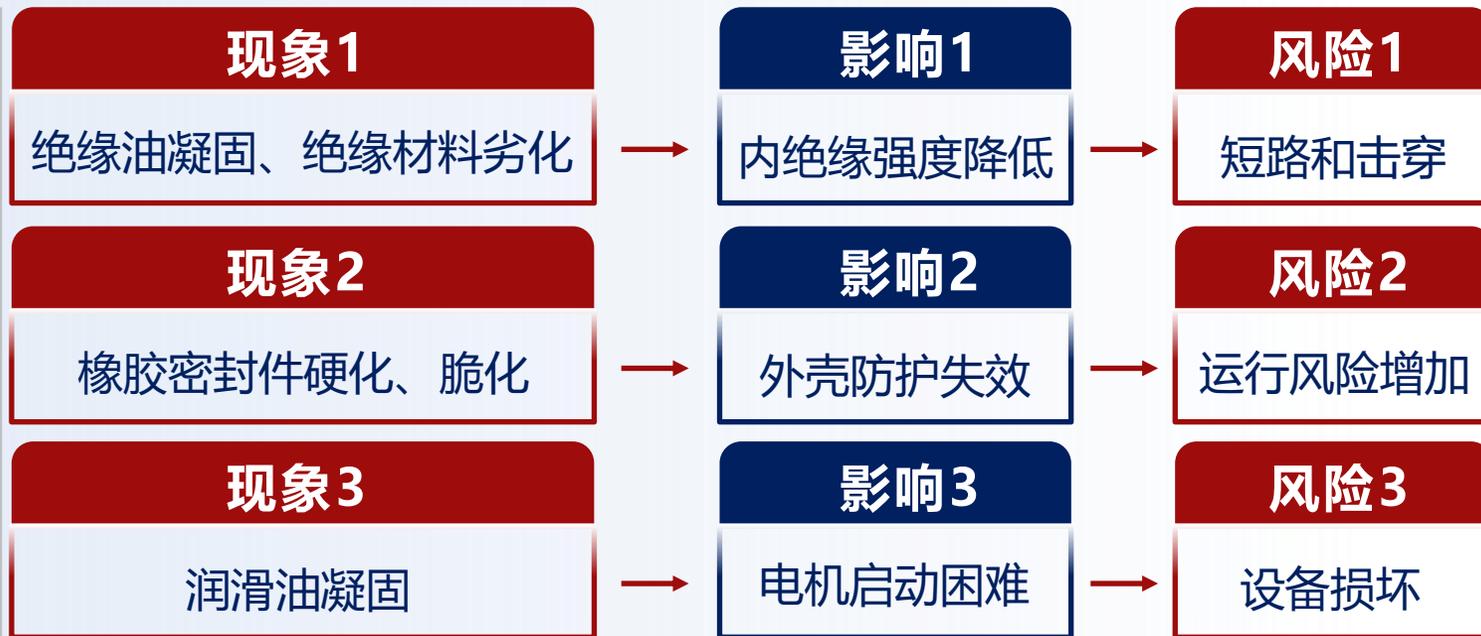
温升增加



# 3.1 电气部件安全技术要求——综合影响

## ② 低温对电气设备的综合影响

低温



□ 针对上述问题，需对电气设备进行整体强化设计，重点优化开关设备、电机及新能源电源等核心部件的性能

## 3.2 电气部件安全技术要求——开关设备

- 为应对低气压、低温等特殊环境对电气安全的制约，采用**复合绝缘材料、耐低温材料**，并依**海拔修正电气间隙**，以双重措施确保设备在低气压、低温环境下的绝缘安全

### 技术要求

项目	与常规产品的区别
温升	➤ 酌情降容或降流处理
绝缘性能	➤ 绝缘水平按海拔高度进行修正，如使用海拔4000米，试验海拔0米，工频耐压值增加63%
抗寒抗温差	➤ 应采用耐低温、高稳定性密封件

### 技术措施

- **产品选型**：宜选用更高容量的产品或选用采取了增强散热措施的产品。
- **采用复合绝缘材料**：如陶瓷与硅橡胶的结合，可显著提高设备的绝缘性能，有效降低电气击穿风险。
- **选用耐低温材料**：采用抗寒能力强，结构性能稳定的材料，或采取必要防护措施以保证产品在低气压、低温环境下的防护等级不会失效。



### 3.3 电气部件安全技术要求——旋转电机

□ 为应对低气压、低温等特殊环境对旋转电机的影响，采用**提高功率等级、温升、绝缘等级以及耐低温复合绝缘材料选型**等措施，来确保旋转电机的安全

#### 技术要求

项目	与常规产品的区别
温升	➤ 最大温升按海拔高度进行修正 例：使用海拔4000m，试验海拔1000m，温升限值降低24K
绝缘性能	➤ 绝缘水平按海拔高度进行修正 例：使用海拔4000m，试验海拔0m，工频耐压值增加63%
电气间隙和爬电距离	➤ 电气间隙和爬电距离设计值按海拔高度进行修正 例：使用海拔4000m，其电气间隙应乘以 1.29 系数

#### □ 技术措施

- **提高电机选型等级**：按更高级功率等级进行选型，避免电机过热
- **采用复合绝缘材料**：采用耐低温的复合绝缘材料，降低击穿风险
- **优化结构设计**：电气间隙和爬电距离应按修正后的值进行设计
- **防止润滑油凝固**：采用耐低温润滑油，或增加轴承加热装置



## 3.4 电气部件安全技术要求——新能源蓄电池

■ 高寒高海拔的低气压、低温环境，严重影响了新能源蓄电池的**绝缘强度、散热效率、外壳强度、容量及安全性**（热失控、燃烧、爆炸等）

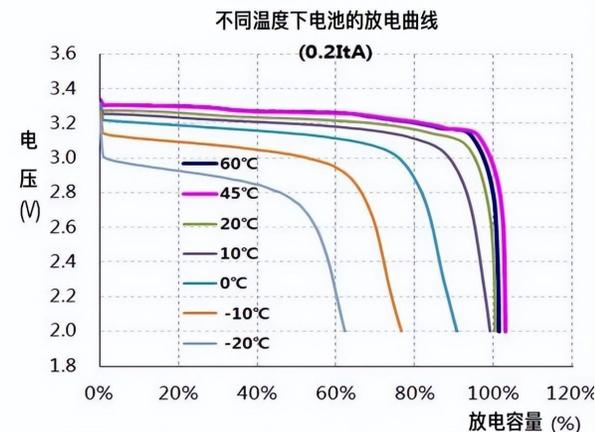
### ① 低气压对新能源蓄电池的影响

- 因空气稀薄易引发电晕放电，击穿风险增加，导致**绝缘性能下降**
- 因空气密度小，散热效果不佳，导致**散热效率降低**
- 内外压差大，出现壳体变形，导致**密封失效、外壳膨胀、电解液泄漏**等现象



### ② 低温对新能源蓄电池的影响

- 内部电解液“冻结”，内阻急剧增加，导致**容量骤减、发热量增加、能量效率降低**
- 内部电化学反应速率与离子迁移速度骤降，**锂枝晶**沉积物增加，易导致发生内短路而**热失控**

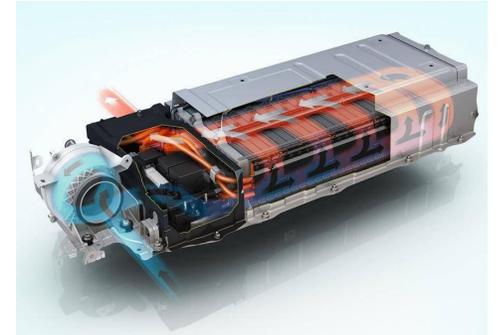


## 3.4 电气部件安全技术要求——新能源蓄电池

■ 解决“低气压”技术方案：应强化绝缘等级减小漏电与短路风险，优化散热系统降低电池温度升高，增强压力平衡设计防止电池鼓包漏液

### □ 技术要求

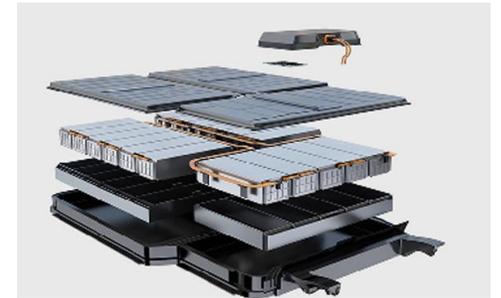
标准	绝缘电阻	浸水
高原产品	$\geq 500\Omega/V$	满足IPX8要求
常规产品	$\geq 100\Omega/V$	满足IPX7要求



高散热循环系统

### □ 技术措施

- **强化绝缘等级**
- BMS的电路板采用整体灌封胶封装
- 电池包内部的连接线束采用更高耐压等级的产品
- **散热系统升级**：根据空气密度，优化散热系统设计
- **增加压力平衡设计**：采用**高强度结构密封设计**（IP68及以上），抵抗形变，配备**泄压阀**，以确保在内外压差过大时能**安全泄压**



电池箱体密封

# 3.4 电气部件安全技术要求——新能源蓄电池

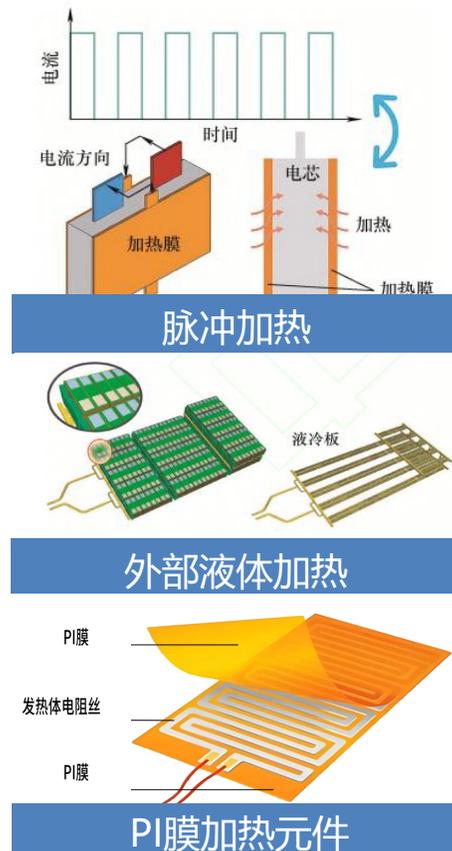
■ 解决“低温”技术方案：应配备电池热管理系统防止蓄电池容量骤减，采用热管理策略与BMS智能协同控制防止内阻急剧增大

## □ 技术要求

标准	循环寿命	内部温差
高原产品	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 100次循环后：≥85%SOC</li><li>➢ 200次循环后：≥80%SOC</li></ul>	≤15°C
常规产品	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 500次循环后：≥90%SOC</li><li>➢ 1000次循环后：≥80%SOC</li></ul>	≤10°C

## □ 技术措施

- 配备电池热管理系统：采用脉冲自加热技术、液体加热技术和全气候电池技术，实现快速、高效升温，以确保在极寒环境下电池系统的高效运行和长寿命
- 热管理策略与BMS智能协同控制：当BMS检测到电池温度过低时，自动启动加热系统，待电池达到最佳充电温度 ( $5^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < 15^{\circ}\text{C}$ ) 时，才允许充电，防止内阻急剧增加，以保障电池在低温环境下的最佳性能



### 3.4 电气部件安全技术要求——新能源蓄电池

□ 解决“低温”技术方案：使用**脉冲自加热技术、液体加热技术、全气候电池技术等加热技术**

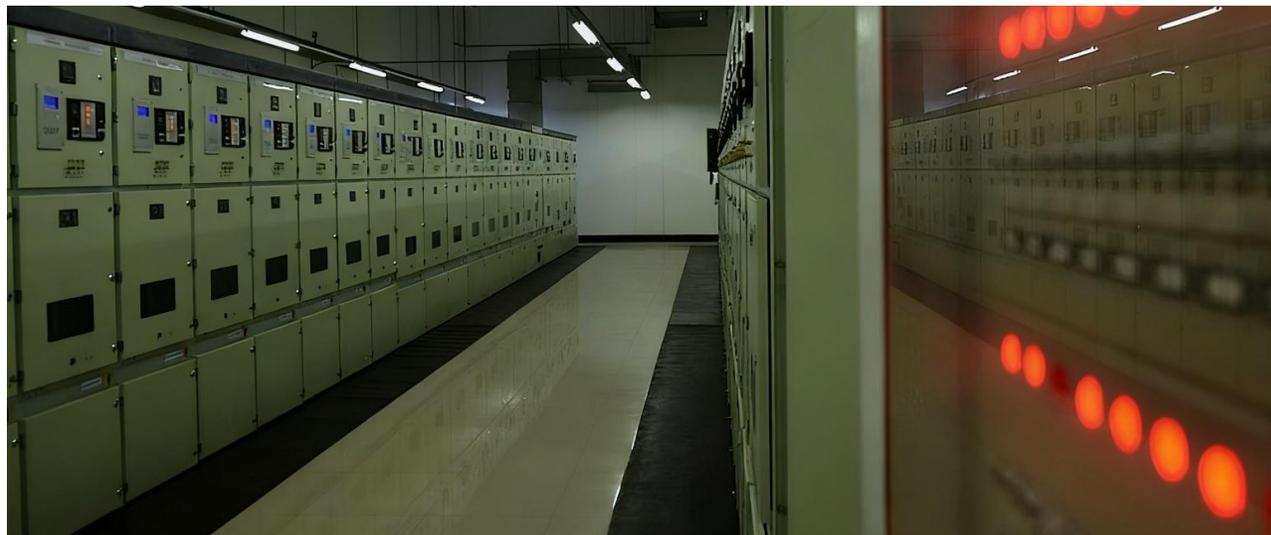
加热技术	工作原理	核心优势	主要局限
脉冲自加热技术 (内部加热)	通过电驱系统产生高频脉冲电流，利用电池自身内阻发热。	加热速度快、能耗低、电池内部升温均匀。	技术较新，对电池寿命的长期影响待深入研究。
液体加热技术 (外部加热)	加热冷却液，通过液冷板与电池换热。	温度控制精准、均匀性好，可与冷却系统集成。	加系统复杂、响应慢、有泄漏风险。
全气候电池技术 (外部加热)	在电池内部或表面集成加热膜，直接对电池进行加热。	快速自加热、改善低温性能、结构紧凑。	能耗高、温度均匀性不高。

□ 目前主流加热技术为**液体加热技术和全气候电池技术**

## 3.5 案例——高寒高海拔矿用高压开关设备

□ 通过采用复合绝缘材料、采用耐低温密封件与优化结构设计，可解决高寒高海拔环境下高压柜的运行故障，确保生产安全稳定

- 某企业采用**复合绝缘材料**，**增加电气间隙**，**优化散热系统**，并采用了耐低温材料的密封件



- 改造后的高压柜在低气压和低温环境下运行稳定，未出现闪络和超温保护问题，设备可靠性显著提高，矿山生产效率大幅提升

## 3.7 案例——高寒矿区无人驾驶纯电矿卡

### □ 全球首次百台无人纯电动矿卡在露天矿正式投入运营



- 针对-40°C极寒气候，电池系统采用**双机组**和**液热**温控架构，系统**内置保温层**，保证电池能够在**-40°C**以下极寒天气下发挥最佳性能
- 下箱体与**液热系统**有机耦合，并采用**高导热介质**，使电池时刻处于理想工作环境

## 3.6 案例

- 某单位设计的高海拔水轮发电机组及配套配电设备采用“零公差”密封技术、高等级绝缘及防晕系统技术，将发电机的防晕等级提升至28kV,效率提升至96%以上；在特高压直流工程采用晶闸管串联技术，使单阀组耐压达400kV，功率损耗 < 0.8%。



水轮发电机组



特高压晶闸管

# 4. 非金属材料安全技术要求及案例

# 4.1 非金属材料安全技术要求——综合影响

■ 高寒高海拔环境的**低温、强紫外线**会引起非金属材料易**老化脆化、物理性能下降及功能可靠性降低**等风险（如矿用管材、矿用输送带、矿用电缆等）

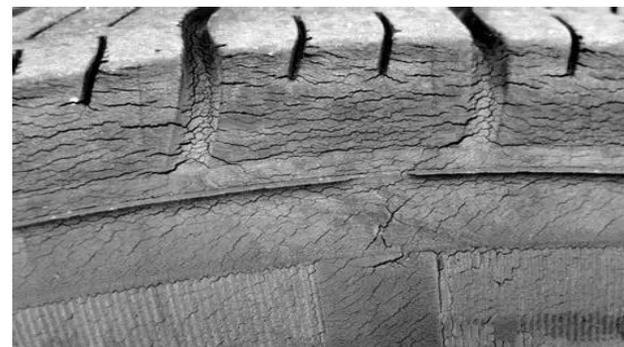
## ① 加速材料老化与性能劣化

强紫外线与极端温差导致分子链断裂，使管材、护套、输送带等材料出现老化脆化，耐候性显著下降，缩短使用寿命。



## ② 降低材料柔韧性与抗冲击性

极端低温使橡胶、聚合物等材料的柔韧性降低，抗冲击性能减弱，导致接头牢固度下降，易引发开裂风险。



## ③ 影响材料绝缘与防护性能

高寒环境导致电缆护套弹性降低，绝缘材料性能变化，影响材料的防护效果与长期可靠性。

## 4.2 非金属材料安全技术要求——管材

■ **对管材的影响：**高寒高海拔地区矿用管材易老化、冻结，恶劣工况下维护保养不及时，造成生产效率降低，更有甚者造成泄漏爆管等安全隐患。

➤ **技术要求：**针对高寒、强紫外线等恶劣工况，矿用管材应具有**耐低温韧性、抗紫外线老化性及耐磨性**，才能确保管材的安全与稳定，以保障工况安全，杜绝安全事故的发生

主要隐患	解决方案
管材老化、脆化，耐压性能降低，带来 <b>泄漏及爆管</b> 安全隐患	➤ 选用改良生产配方及工艺，添加约 <b>2%专用炭黑</b> 或共挤抗紫外线与约 <b>3mm抗刮擦外层</b> ，可显著提升管材耐候性，极高要求场合可直接采用耐候专用树脂
管材低温下 <b>易冻结、堵管</b>	➤ 现场安装管材后，可在管外壁包裹 <b>聚氨酯保温管壳</b> ，此法广泛用于各种供热、制冷等管道，且施工便捷
维护保养不及时	➤ 建立 <b>智能化监控与维护系统</b> ，实时监控系统的温度、压力等重要参数

## 4.2 非金属材料安全技术要求——管材

### □ 工程案例

- 某企业使用的尾矿管道：通过改良生产配方及工艺，管材可耐高紫外线辐射、冻土施工、适应低氧环境，耐极端温差及抗冻胀变形。 ( $-25^{\circ}\text{C}\sim+30^{\circ}\text{C}$  (昼夜温差  $>40^{\circ}\text{C}$ ))
- 某矿山充填管道系统：冬季极寒 ( $-35^{\circ}\text{C}$ )、夏季强风沙，管道能够抗低温脆裂及风蚀磨损
- 某矿山选矿高压输送管道系统：高原戈壁气候，干燥多风，管道能够耐盐碱腐蚀及频繁压力波动



# 4.3 非金属材料安全技术要求——矿用输送带

**对矿用输送带的影响：**矿用输送带在高寒高海拔工况下**易老化、硬化及脆化，成槽性降低且易撕裂**，严重影响生产效率，更有甚者造成断带等安全事故

**技术要求：**通过对比一般用途输送带和耐寒输送带标准对覆盖层机械性能要求发现，耐寒输送带**不低于一般输送带的技术指标**（见下表）

表2 覆盖层物理性能

项 目	指 标		
	H	D	L
拉伸强度/MPa	不小于 24	18	15
拉伸伸长率/%	不小于 450	400	350
磨耗量/mm <sup>3</sup>	不大于 120	100	200
老化试验(70℃×168h)			
拉伸强度变化率/%	±25	±25	±25
扯断伸长率变化率/%	±25	±25	±25
耐寒性能	拉伸强度变化率/%	C <sub>1</sub> (-45℃)	±20
		C <sub>2</sub> (-50℃)	±25
	扯断伸长率变化率/%	C <sub>1</sub> (-45℃)	±20
		C <sub>2</sub> (-50℃)	±30

注：C<sub>1</sub> 使用环境温度为-45℃~+45℃；C<sub>2</sub> 使用环境温度为-50℃~+45℃。

HG/T 3973—2023

表9 覆盖层物理机械性能

项 目	单 位	指 标		
		覆盖层性能类别：H	覆盖层性能类别：D	覆盖层性能类别：L
拉伸强度	≥ MPa	20	18	15
扯断伸长率	≥ %	400	400	350
磨耗量	≤ mm <sup>3</sup>	150	120	200
热空气加速老化后(70℃×168h)	拉伸强度变化率	±25		
	扯断伸长率变化率	±25		
耐臭氧龟裂*	—	无龟裂		

耐臭氧龟裂静态拉伸试验条件：臭氧浓度(50±5)×10<sup>-6</sup>B(体积分数)，温度(40±2)℃，伸长率(20±2)%，时间24h。

HG/T3647-2014 《耐寒输送带》

HG/T 3973-2023 《一般用途钢丝绳芯阻燃输送带》

## 4.3 非金属材料安全技术要求——矿用输送带

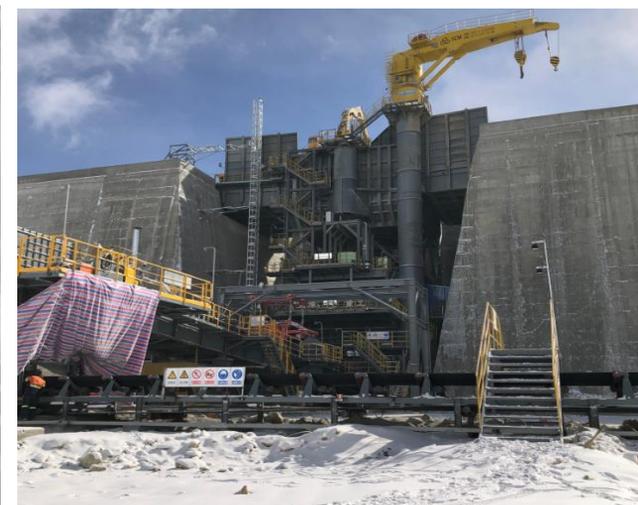
主要隐患	解决方案
输送带老化、硬化及脆化，造成断裂	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 采用新材料输送带，如天然橡胶与顺丁橡胶组合、N330炭黑补强剂、对苯二胺类IPPD高效抗臭氧剂</li><li>➤ 优化带体结构和耐寒接头</li></ul>
输送带低温、紫外线，引起增大皮带机各部件的摩擦力、输送带强度和韧性降低	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 将输送线布置在封闭的廊道内，从根本上避免雨雪、紫外线的直接侵害，并形成相对温和的微环境。</li></ul>



长距离皮带机廊道



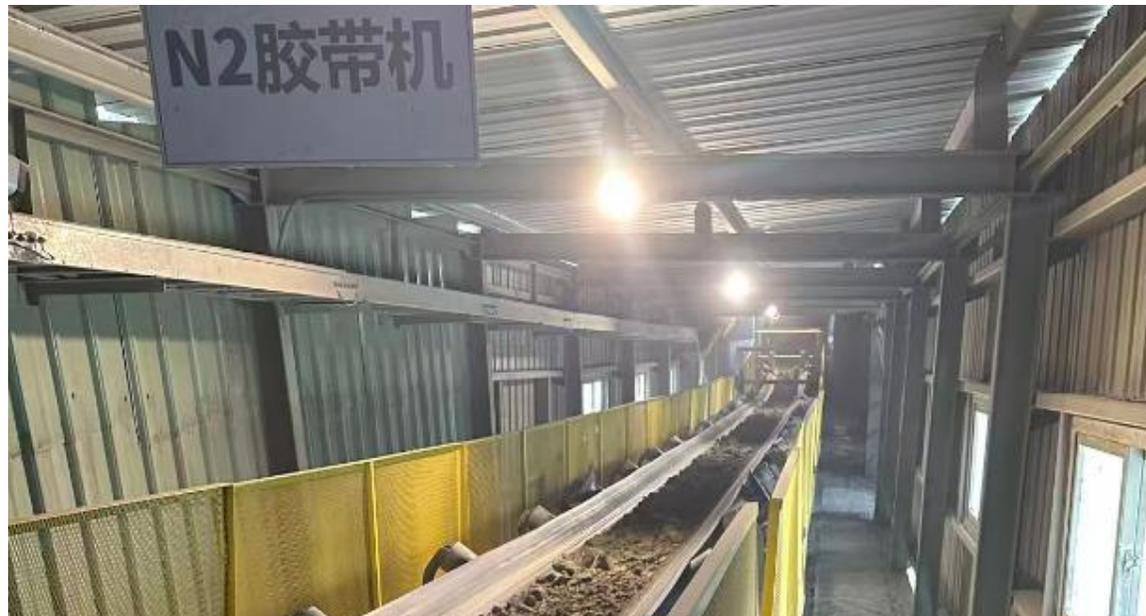
廊道内输送实景



皮带机廊

## 4.3 工程案例——矿用输送带

- 某矿山使用改进的耐寒输送带在**结构强度、耐紫外老化、耐寒性能**方面表现出卓越的稳定性，在海拔3800m左右运行良好，相关参数满足标准规定。



## 4.4 非金属材料安全技术要求——矿用电缆

■ **对矿用电缆的影响：**矿用电缆在高寒高海拔工况下**易老化、硬化及脆化**，**机械性能及电气性能降低**，敷设难度增大，使用寿命缩短，严重影响生产效率，导致用电安全事故发生

➤ **技术要求：**能够在极低的温度下保持良好的**弹性和弯曲性能**，**不易断裂**，当环境温度达到**-60℃**时，仍然能够正常工作；**额定电压和测试电压均符合T/CEC 903-2024**等相关标准，确保在低温环境下的电力传输和信号控制稳定可靠

试验项目	DH I级	DH II级	DH III级	DHIV/ DH/HD	试验方法
1 绝缘低温弯曲试验					
1.1 试验条件： ——温度 ℃ ——施加低温时间	-60℃	-55℃	-50℃	-40℃	GB/T 2951.14中8.1
1.2 试验结果	见GB/T 2951.14中8.1.4和8.1.5 不开裂				
2 绝缘低温拉伸试验					
2.1 试验条件： ——温度 ℃ ——施加低温时间	-60℃	-55℃	-50℃	-40℃	GB/T 2951.14中8.3
2.2 试验结果 ——最小伸长率，%	20	20	20	20	

耐寒型电缆试验性能要求



## 4.4 非金属材料安全技术要求——矿用电缆

□ 技术措施：为解决高寒高海拔地区恶劣环境工况下电缆安全可靠运行，需从**设计与选材、生产与制造、测试与验证**等方面进行

环节	核心任务	关键技术/材料
设计与选材	确定耐低温、抗UV材料配方	➤ 护套材料首选热塑性聚氨酯，绝缘材料首选交联聚乙烯，各层之间紧密结合，减少内部气隙，防止在温差变化时因各层材料收缩率不同而产生间隙
生产与制造	通过精密设备和工艺（如三层共挤）实现设计	➤ 三层共挤、交联工艺（采用“干式化学交联”或“硅烷交联”工艺）、冷却工艺（冷却过程要平缓、均匀）
测试验证	进行严苛的低温、电气、环境模拟测试	➤ 低温性能测试（冲击、弯曲、拉伸）、电气性能测试（局放、耐压、绝缘电阻）、环境与老化测试（紫外线、热循环、阻燃）

# 4.4 非金属材料安全技术要求——矿用电缆

□ 技术措施：为解决高寒高海拔地区恶劣环境工况下电缆安全可靠运行，采用**材料选型、结构优化设计等技术措施**

## 主要隐患

矿用电缆在高海高海拔工况下易**老化、硬化及脆化**，机械性能及电气性能低下，敷设难度大，使用**寿命短**，严重影响生产效率，更会导致用电安全事故发生。



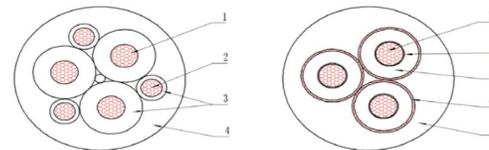
## 解决方案

- 护套材料首选热塑性聚氨酯，绝缘材料首选交联聚乙烯，各层之间紧密结合，减少内部气隙，防止在温差变化时因各层材料收缩率不同而产生间隙
- 三层共挤、交联工艺（采用“干式化学交联”或“硅烷交联”工艺）、冷却工艺（冷却过程要平缓、均匀）、在线检测
- 低温性能测试（冲击、弯曲、拉伸）、电气性能测试（局放、耐压、绝缘电阻）、环境与老化测试（紫外线、热循环、阻燃）



### 电缆设计

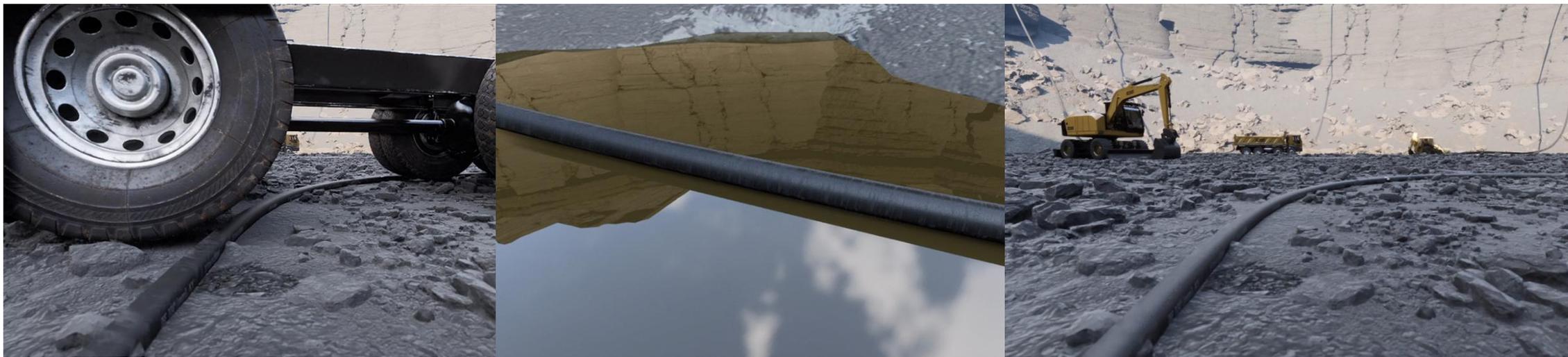
导体：导体为第5类或第6类特软铜绞线，针对移动型优化设计。  
绝缘材料：进口三元乙丙橡胶，电性能稳定，耐老化，使用寿命长。  
绝缘芯识别：可以根据客户要求分色或印数字识别，如无特别要求，优选色为白色、红色、蓝色、棕色、黑色。  
护套材料：高强度弹性体护套，耐低温、耐磨损、抗紫外线，抗拉强度可达30MPa，能够抵抗外力机械冲击。  
结构特点：电缆柔软，耐磨。耐寒电缆在-40℃环境下能够保持柔软状态。  
结构示意图



## 4.4 工程案例——矿用电缆

■ **某矿山改进的MYEFP或 MCP耐寒耐磨型电缆**（导体为第5或6类软铜绞线），在耐磨、耐碾压及耐酸碱腐蚀三重考验下均表现出卓越的稳定性，完全适应高海拔极端环境

- 碾压**200**次未出现明显痕迹，未击穿
- pH值为**4**的硫酸浸泡**20**天性能变化率不超过**10%**
- 尖石中拖磨**200**次仅有微痕



# 5. 通风与个体防护安全技术要求及案例

# 5.1 通风与个体防护安全技术要求——综合影响

## □ 低压低氧对通风系统及人员安全的影响

### ① 对通风系统的影响

- 对通风系统的影响主要是由低气压导致的空气密度降低，致使风机做功效率折减，有效风量不足，井下有害气体、粉尘难以排出
- 电机散热困难，引发设备过载烧毁风险增加



### ② 对人员安全的影响

- 高原缺氧导致急性高原病、高原反应等健康威胁
- 爆破产生废气 (CO、SO<sub>2</sub>)、柴油设备尾气 (CO、NO<sub>x</sub>) 等难以排出，导致急性中毒



## 5.2 通风与个体防护安全技术要求——通风系统

### □ 低压低氧环境下通风系统的技术措施

- 高原独特的环境，**机械的降效**是主要的困难，在青藏高原等高海拔地区风机的压力约为**平原地区的0.6倍**

技术措施	工作原理	核心手段
增压式通风	通过提高井下空气的静压，以 <b>提升局部环境大气压力</b> ，从而间接改善氧气分压的通风	采用 <b>压入式通风</b> 、 <b>调节通风系统阻力</b> 、或使用 <b>局部风机</b> 等方式，在目标区域形成并维持一个高于周围环境的气压
增氧式通风	通过向通风气流中 <b>直接添加氧气</b> ，以提高井下空气中氧气浓度的主动供氧	利用膜分离、变压吸附或深冷法等制氧技术生产氧气，并通过 <b>弥散供氧</b> 、 <b>集中供氧</b> 或 <b>氧吧车</b> 等方式，将氧气输送到特定工作区域

**增压所需的通风或供氧方案，均面临能耗、可靠性下降等问题**

## 5.3 通风与个体防护安全技术要求——个人防护

### □ 低压低氧环境下个人防护的技术要求与技术措施

- 在个人防护方面，通过增加个人防护用品，配备供氧设施，模拟平原富氧环境，保障人员人身安全及职业健康

#### □ 技术措施

- 配备人体健康实时监测仪、防寒与防紫外线装备，如血氧仪、高原防护服、护目镜等个体防护装备等
- 移动/固定式制氧、供氧设备，如：面罩供氧、弥散供氧等



个体防护装置



配有车载制氧系统的凿岩台车

## 5.5 案例——供氧系统

□ 某厂家在高原隧道使用的挖掘机上增加**随车供氧装置**，缓解操作手缺氧不适，保障施工安全，确保人员、设备安全

- 挖掘机增加了制氧机，可提供**面罩供氧和弥散供氧**两种模式。制氧机面罩供氧方式氧气浓度为 27.9%，弥散供氧 40 min 后驾驶室氧气浓度达到 22.3%



无制氧机挖掘机



含制氧机挖掘机

挖掘机作业

## 5.6 案例——综合性供氧设施

某厂家综合性供氧设施，借鉴飞机客舱运行原理，通过**增压**改变建筑空间内的**气压和氧分压**，将室内环境等效到低海拔地区水平，具有**缓解急性高原病症**，降低持续性低压损伤，改善人体健康指标的功能，可从根本上解决身体组织缺氧问题，有效改善**全身供氧**情况



## 6. 高寒高海拔装备安全展望

# 6.1 高寒高海拔装备安全展望

## 技术标准体系有待完善

- 缺乏针对机械、新能源、非金属材料及个体防护装备的专用技术标准与规范
- 设计、制造与选型无标可依，性能评价缺乏统一准则

## 技术验证能力有待提升

- 缺乏高寒高海波环境真实性的专项实验室与模拟验证平台
- 无法对装备的安全要求、可靠性进行有效测试与评价

## 系统性技术方案有待突破

- 现有技术措施多为孤立、分散部件的点状攻关，缺乏跨部件、跨系统的协同
- 未形成一体化技术方案，制约了装备整体效能与安全水平的提升

当前“点对点”技术成果和解决方案

研究通用技术与规律，形成技术标准体系与成套验证技术

系统提升高寒高海波装备的安全可靠性