高原矿山应急救援空气呼吸器的设计与性能试验研究*

陈志峰[1]，塞娜瓦尔·阿布拉[1]，贾天毅[1]，陆卫东[1]，郭梁辉[1,2]，丁永明[1]，马寒箫[1]

（1.新疆工程学院 新疆煤矿灾害智能防控与应急重点实验室， 新疆 乌鲁木齐 830023；
2.东北大学 资源与土木工程学院， 辽宁 沈阳 110819）

摘要：针对高原地区传统固定式吸氧站机动性不足、碳纤维氧气瓶与氧气袋等便携设备续航时间有限的难题，开发了一款新型应急空气呼吸器。该设备采用智能混合供氧技术，集成螺旋式氧氮分离器，在提升气体分离效率的同时有效缩小了整机体积，实现了氧氮的高效分离，可持续稳定提供空气氧浓度为21%的呼吸气体。针对高原低压、低温等复杂工况，系统通过集成化与优化设计，显著弥补了传统设备续航能力不足的短板。试验结果表明，在5 445 m的高海拔条件下，采用该新型应急空气呼吸器后，使用者血氧饱和度由约68%的危险水平提升至约92%的相对安全水平；电池最长续航可达(296±6) min(海拔−154 m)，具备制氧效率高、响应迅速、操作简便及安全节能等优势。研究结果为高原矿区应急救援与井下作业提供了更为可靠的安全保障。

关键词：高原矿山；应急救援；空气呼吸器；空气氧浓度；血氧饱和度；电池续航
中图分类号：TD77+4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0245-09

Design and Performance Testing Research of Emergency Rescue Air Respirators for High-Altitude Mines

Chen Zhifeng[1], *Sainawaer Abula*[1], *Jia Tianyi*[1], *Lu Weidong*[1], *Guo Lianghui*[1,2], *Ding Yongming*[1], *Ma Hanxiao*[1]

(1.Xinjiang Key Laboratory of Coal Mine Disaster Intelligent Prevention and Emergency Response, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To address the challenges of insufficient mobility of traditional stationary oxygen stations and the limited operational duration of portable equipment such as carbon fiber oxygen cylinders and oxygen bags in high-altitude areas, a novel emergency air respirators was developed. The apparatus adopted intelligent mixed oxygen supply technology and integrated a spiral oxygen-nitrogen separator. It effectively reduced the overall volume while improving the gas separation efficiency, achieved highly efficient oxygen-nitrogen separation, and continuously and stably provided breathing gas with an oxygen concentration of 21%. Tailored for complex operating conditions such as low pressure and low temperature in high-altitude regions, the system overcame the shortcoming of insufficient operational duration of traditional equipment through integrated and optimized design. The test results indicate that under the high-altitude condition of 5 445 m, after adopting the novel emergency air respirators, the blood oxygen saturation of users increases from a dangerous level of approximately 68% to a relatively safe level of 92%. The maximum battery duration reaches (296±6) min (altitude −154 m), and the apparatus possesses advantages such as high oxygen production efficiency, rapid response, easy operation, as well as safety and energy conservation. The research results provide a more reliable safety guarantee for emergency rescue and underground operations in high-altitude mining areas.

Key words: High-altitude mine, Emergency rescue, Air respirator, Air oxygen concentration, Blood oxygen saturation, Battery duration

0 引言

在矿山应急救援中，氧气呼吸器是井下作业与救援的关键装备，其性能可靠性直接关系到救援人员的生命安全和救灾成效[1-2]。目前市售呼吸器多针对平原工况设计，在高原环境下易出现供氧不稳、电池续航衰减及过滤效率降低等问题[3-5]。在救援过程中，长时间吸入高氧浓度空气虽可维持生命体征，但使用正压或压缩氧气呼吸器可能导致氧中毒等次生危害[6]。高海拔矿山作业的最大挑战是高原反

* **收稿日期**：2025-10-15
作者简介：陈志峰(1968—)，男，新疆乌鲁木齐人，高级实验师，主要研究方向为矿山安全生产。E-mail:908104365@qq.com
通信作者：丁永明(1967—)，男，浙江绍兴人，硕士，教授，主要从事矿山通风与安全方面的研究。E-mail:24051858115@qq.com

应,诱因是缺氧。研究显示,海拔每升高 1 000 m,大气压力降低约 11.5%,空气密度降低 9%,这种低压缺氧环境会显著影响人体机能与作业人员心理[7-8]。

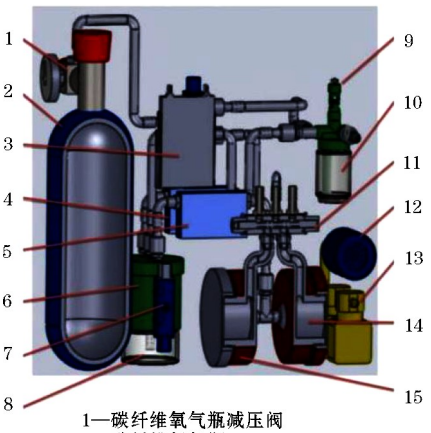
在当前高原供氧领域,固定式吸氧站机动性不足,碳纤维氧气瓶与氧气袋续航有限,均难以满足高海拔环境下长时间作业的需求[9-10]。因高原空气含氧量低,小型制氧机制氧效率难以达到理想水平,井下配备的 40 min 压缩氧自救器无法支撑救援过程中的长时间等待[11-12]。高原纯氧机虽能缓解缺氧,但长时间吸入会损害人体脏器[13]。由此可见,现有高原制氧技术局限性明显。孙靖濛等[14]虽构建了便携式制氧机,但该制氧机在高海拔低氧环境下制氧效率未达到预期。李长刚[15]设计的手摇式微型制氧机解决了电力供应问题,却未突破传统制氧技术局限。孙嘉增等[16]研制的基于应急救援的远程测控便携式制氧机具有转运便捷、操作简易、制氧效率高等优势,但受电源管理控制技术的限制,其电池供电的制氧机功耗大、室外工作时长有限。

综上,当前制氧设备存在续航时间短、能耗高且供氧模式缺乏可调节性等技术瓶颈[17-18]。此外,现有技术多采用纯氧供给模式,而长时间吸入纯氧易引发氧中毒[19-20]。针对该问题,本文研发出一款新型应急空气呼吸器,该设备应用智能混合供氧技术,集成了螺旋式氧氮分离器,在提升气体分离效率的同时,有效缩减了整机体积,达成了氧氮的高效分离,且能够持续、稳定地提供空气氧浓度为 21%的呼吸气体。在应对高原低压、低温等复杂工况时,该系统借助集成化与优化设计,有效突破了传统设备续航能力不足的局限。

1 空气呼吸器装置及原理

该高原矿山应急救援空气呼吸器由以下核心系统构成:空气进气通道系统、高效制氧系统、碳纤维氧气瓶补气系统、智能空气氧浓度监测调控系统。其创新性结构设计如图 1 所示。

设备启动后,往复式膜片抽气泵从外界抽取空气。空气先经空气滤净器的干燥剂、活性炭及防尘滤膜储罐过滤,再进入抽气机加压,随后送入双重管式冷却器降温。冷却后的空气经三通管分为两路:一路经空气氧浓度调整混合罐的两位三通电磁阀,系统检测自然空气是否有毒,若无毒则直接进入混合罐,若有毒则切换至防毒过滤罐通道,经过滤罐滤毒后再进入混合罐;另一路空气经两位五通电磁阀进入螺旋式氧氮分离器的左室进行氧气分离,氮气从右室排出口排出。从左室分离出的氧气经出口流量计调整后,进入混合罐调整空气氧浓度至 21%。



1—碳纤维氧气瓶减压阀
2—碳纤维氧气瓶
3—控制器及 4.5 V 电池组
4—氧气瓶出口流量计
5—螺旋式氧氮分离器出口流量计
6—空气氧浓度调整混合罐
7—混合罐两位三通电磁阀
8—防毒过滤罐
9—万向结
10—湿化瓶
11—两位五通电磁阀
12—净化罐
13—往复式膜片抽气泵
14—螺旋式氧氮分离器左室
15—螺旋式氧氮分离器右室

图 1 空气呼吸器结构

Fig.1 Air respirator structure

当用氧量激增且空气氧浓度调整混合罐内自然空气的氧浓度未达 21%时,系统控制碳纤维氧气瓶出口流量计,将气瓶中的氧气补充至混合罐,直至氧浓度满足要求,此时,空气从空气氧浓度调整混合罐出口流出,经过空气氧浓度传感器检测后,进入湿化瓶加湿,再通过吸氧管供使用人员吸入。

空气呼吸机的基本原理:压缩空气进入螺旋式氧氮分离器左室,此时两位五通电磁阀的状态确保空气只能进入螺旋式氧氮分离器左室,而右室与大气相通。分离器内的药剂会吸附压缩自然空气中的氮气,其内部螺旋隔断结构增加了空气的运行距离,从而提高了吸附效率,减小了设备体积。分离出的氧气经三通管流出,一部分用于反吹处于解吸状态的右室,另一部分经过螺旋式氧氮分离器出口输出。在左室吸附剂达到饱和前,控制系统切换两位五通电磁阀,使进气转入右室进行吸附,左室同步减压解吸,解吸出的氮气经电磁阀排出。左右两室交替工作,实现氧气的连续制备。

碳纤维氧气瓶中的高压氧气经减压阀减压后,通过两位三通电磁阀选择单独供氧或参与氧气浓度混合调整。若单独供氧,系统将关闭往复式膜片抽气泵,纯氧经电磁阀进入湿化瓶加湿后直接供用户使

用;若参与氧气浓度混合调整,纯氧则经电磁阀,通过氧气瓶出口流量计调整流量后,再进入氧气浓度调整混合罐。

该设备采用环境空气制氧与氧气瓶补氧相结合的双路供氧方式,能够在高海拔低氧环境下保障稳定的氧气供应。同时,智能空气氧浓度调控技术将输出空气氧浓度精准控制在21%±3%的安全区间内,有效规避了氧中毒风险。此外,经过优化的系统集成设计,设备的续航能力大幅提升,可满足井下长时间作业需求。该装置专门为高原矿山应急救援及井下作业等特殊工况设计,有效解决了传统供氧设备在高海拔地区适应性不足的难题。

该空气呼吸器智能控制系统的控制流程如图2所示。系统启动后,往复式膜片抽气泵抽取外界空气,依次经干燥剂、活性炭、防尘滤膜三级过滤,净化后的空气经加压、双管冷却器降低温度处理后分为两路。其中,安全通路借助毒气检测模块智能筛选洁净空气,或启动防毒过滤罐进行深度净化。洁净后的空气再次进入制氧通路,通过螺旋式氧氮分离器进一步提纯氧气。

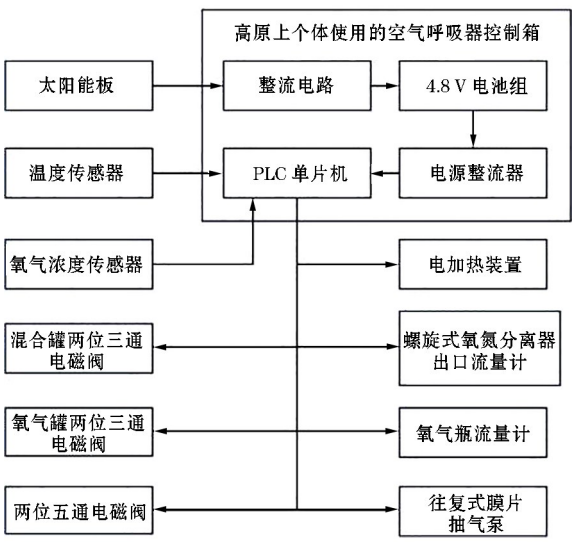


图2 空气呼吸器控制流程

Fig.2 Control flowchart of air respirator

系统采用闭环控制方式精确调节空气氧浓度,当混合罐内的空气氧浓度低于21%时,自动启动碳纤维氧气瓶补充氧气。达标后的气体经过湿化处理后供使用者使用。整个流程由单片机集中控制,可通过触摸屏实现人机交互。

螺旋式氧氮分离器采用双腔体交替工作模式。压缩空气经两位五通电磁阀控制进入左侧腔体时,右侧腔体连通大气。在螺旋隔断结构作用下,空气流动路径延长,吸附剂高效吸附氮气。分离出的氧气一部分用于右侧腔体反吹解吸,其余氧气输出供使用。当左侧腔体吸附剂接近饱和时,控制系统切换电磁阀,使右侧腔体转入吸附状态,左侧腔体同步减压解吸,排出富含氮气的废气。通过交替吸附-解吸机制,实现氧气持续稳定生产。该系统在保证分离效率的同时,缩小了设备体积。

系统采用智能控制策略实现高原环境下动态供氧调节。高压氧气经减压阀降压后,由两位五通电磁阀切换供氧模式。纯氧供给时,关闭空气加压机,氧气经湿化瓶加湿后直接输出;混合调节时,STC单片机通过空气氧浓度传感器监测环境参数,以海平面21%空气氧浓度为基准,智能控制螺旋式氧氮分离器与碳纤维氧气瓶双路流量输出。当环境氧浓度低于设定阈值(如海拔4 000 m对应约16%氧浓度、5 000 m对应约12%氧浓度)时,设备自动激活制氧系统。若因用户需氧量突增导致制氧能力不足,则智能启用碳纤维氧气瓶补充供氧,通过闭环控制维持输出空气氧浓度稳定在21%左右。控制系统采用模块化设计,集成了电源管理、MAX518数模转换、人机交互界面(LCD显示屏及键盘)、通信接口(网口及串口)、报警指示和继电器控制等功能单元,以构成完整的智能供氧解决方案。

2 空气呼吸器系统核心组件设计

2.1 各子系统设计

高原上个体使用的空气呼吸器控制系统包含5大子系统,其框架如图3所示。系统初始化后进入状态监控模式,当控制器正常工作时,LED发光二极管以1 Hz的频率闪烁。当环境中二氧化氮、一氧化碳、硫化氢的含量超标时,呼吸器将对空气中的有毒有害气体进行过滤,并发出声光报警。当环境氧气浓度低于20%时,系统则会自动切换至制氧模式。

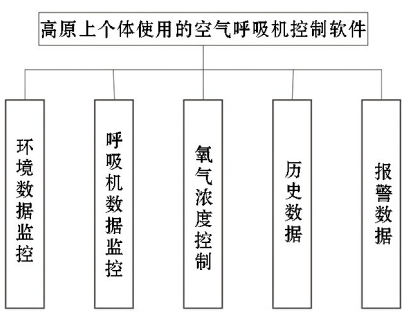


图3 空气呼吸器控制软件框架

Fig.3 Air respirator control software framework

2.1.1 环境数据监测

呼吸器实时监测环境空气中的二氧化碳、一氧化碳和硫化氢浓度,以保障其使用安全。当二氧化碳浓度超过 0.08%、一氧化碳浓度超过 0.04%或硫化氢浓度超过 10 mg/m³ 时,系统即刻置位对应报警标志位,同步记录超标起始时间与具体数值。同时,系统持续累计各气体的浓度超标总量,以评估潜在危害。检测到有害气体超标时,呼吸器自动启动过滤程序进行净化处理后再制氧。所有监测数据实时存入显示缓存区,并通过人机界面动态展示,系统自动保存完整的运行日志以供后续分析。其系统检测控制流程如图 4 所示。

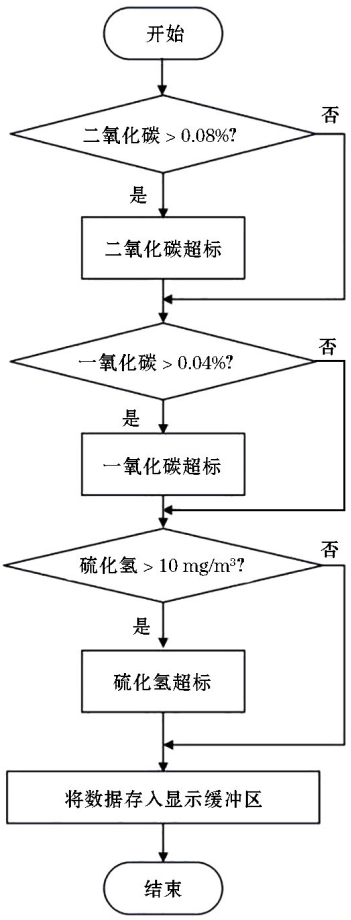


图 4 环境数据监测流程

Fig.4 Environmental data monitoring flowchart

2.1.2 呼吸器数据监控

呼吸器采用内置电池供电,实时监测电池电压、剩余电量、工作模式、当前海拔及设备运行状态。控制系统持续检测环境氧浓度与海拔,当电池电量低于 20%时,自动切换至节能模式并提示用户及时更换电池,确保设备持续稳定运行。空气呼吸器数据监控流程如图 5 所示。

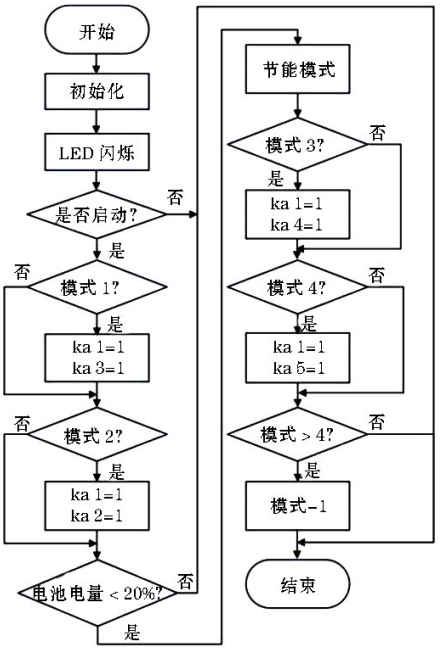


图 5 空气呼吸器数据监控流程

Fig.5 Data monitoring flowchart of air respirator

2.1.3 空气氧浓度控制

呼吸器控制系统以 10 ms 为周期,实时采集氧气流量与浓度传感器数据,结合当前制氧量及储气瓶压力动态调节制氧过程。当检测到储气瓶内空气氧浓度超过 22%时,系统自动增大空气混合比例,确保输出的空气氧浓度稳定在 20%～22%的安全范围内。空气氧浓度控制流程如图 6 所示。图 6 中 P 代表传感器异常循环次数。

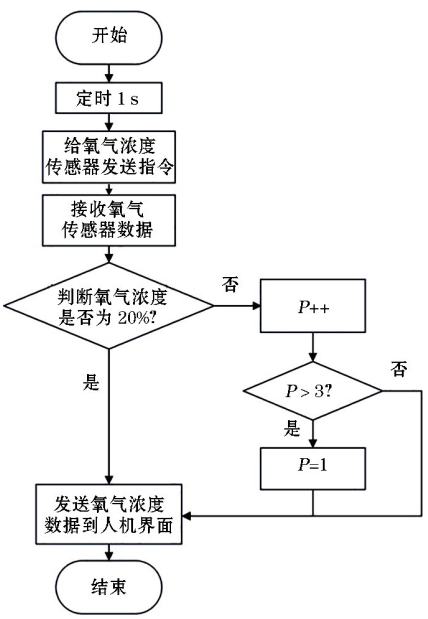


图 6 空气呼吸器空气氧浓度控制流程

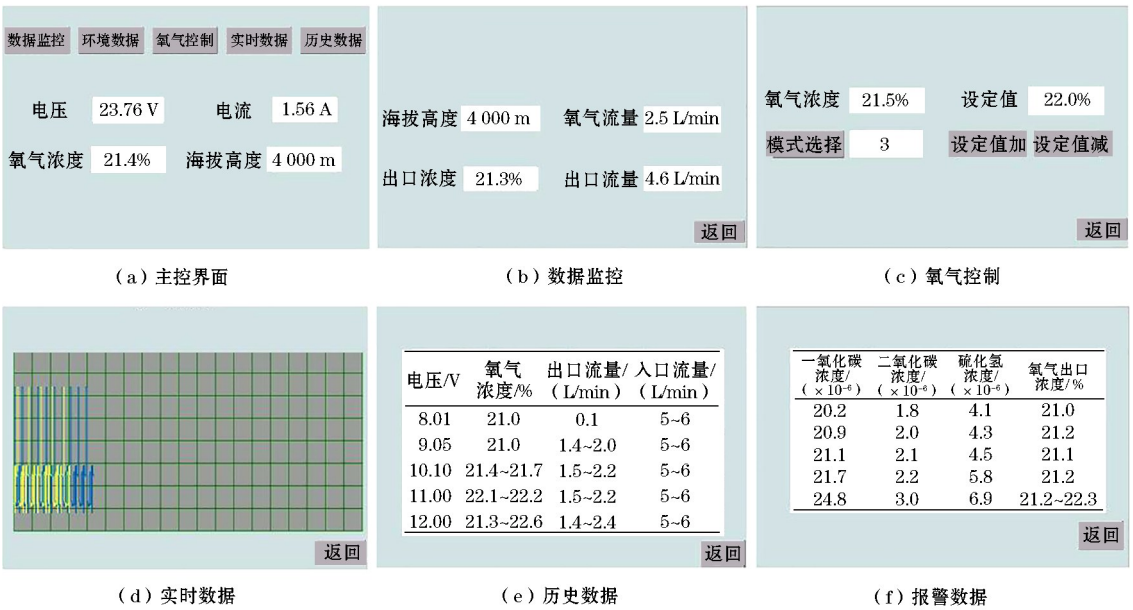
Fig.6 Air oxygen concentration control flowchart of air respirator

2.1.4 报警控制系统

控制器设有报警控制模块,模块设置有监控设备和多媒体设备,当监控设备中显示有异常状态时,系统会自动进入报警模块,且会自行语音报警。

2.1.5 触摸屏界面

系统主界面涵盖数据监控、环境数据监控、氧气控制、实时数据及历史数据等核心模块,能够直观呈现呼吸器的关键运行参数,整体界面如图 7 所示。



(a) 主控界面 (b) 数据监控 (c) 氧气控制

(d) 实时数据 (e) 历史数据 (f) 报警数据

图 7 空气呼吸器触摸屏界面

Fig.7 Touch screen interface of air respirator

主控界面集中展示电压、电流、空气氧浓度及海拔高度信息。数据监控界面提供氧气流量、出口氧浓度、出口流量及高浓度氧气出口流量等数据。氧气控制界面支持浓度设定、工作模式选择及参数调节操作。实时数据界面可查看出口空气氧浓度、电池电量、储气瓶压力、环境温度及空气中氧气浓度。历史数据界面记录电压、空气氧浓度、出口及入口流量。报警数据界面监测一氧化碳、二氧化碳、硫化氢及出口浓度异常情况。

2.2 空气呼吸器主要功能和性能指标

该空气呼吸器采用脉冲供氧方式,能够依据使用者呼吸信号智能调节氧气输出量。此设备具备呼吸异常报警功能,当未检测到呼吸或者系统出现异常时,自动触发语音提示,提醒用户调整呼吸或检查管路连接。同时设有独立的氧浓度声光报警装置,当空气氧浓度低于 21%时会及时发出警示,从而避免缺氧风险。此外,呼吸器支持短路保护与电池电量可视化显示,进一步保障其使用安全。

在核心部件方面,呼吸器搭载螺旋式氧氮分离器,兼顾高分离效率与小体积。设备支持战时与非战时双通路切换,能够保障在有毒及无毒环境下的呼吸安全。低功耗、低噪音的往复式膜片抽气泵使输出空气保持适宜温度,并精准控制空气氧浓度稳定在 21%左右。

呼吸器针对高原低温环境进行设计,湿化瓶底部设有配重以防止倒灌,外壳采用牛皮与耐磨帆布复合材质,内置加热丝,能保持恒温 10 ℃,保障设备在低温环境下能正常运行。此外,呼吸器还配备太阳能充电功能,适用于高原应急场景;氧气瓶与电池分别采用碳纤维和钛酸锂电池,兼顾了轻量化、安全性与续航稳定性。自主研制的空气呼吸器的主要性能参数见表 1。

表 1 空气呼吸器主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of air respirator

产氧量/(L/min)	氧气浓度/%	质量/kg	噪声值/dB	氧气出口压力/MPa	启动时间/s	电压/V	适宜温度/℃	适宜湿度/%	适宜大气压/hPa
0.21~0.84	21	3.5	≤45	0.2~0.4	2	4.8	−35~40	10~90	540~1 060

3 空气呼吸器性能试验研究

3.1 高原试验

以克州亚曼达拉河谷高原矿业地区为工程背景,对两台自主研发的空气呼吸器样机及配套制氧机进行高原性能测试,主要评估氧气流量、空气氧浓度、设备持续使用时间及使用者血氧饱和度等关键指标。

3.1.1 测试装置

空气氧浓度测量装置如图 8 所示,采用比长式检定管,通过软管及三通接口连接至空气呼吸器。海拔高度与血氧饱和度分别使用 FR500 测高仪和 BSX231 血氧仪进行测量。

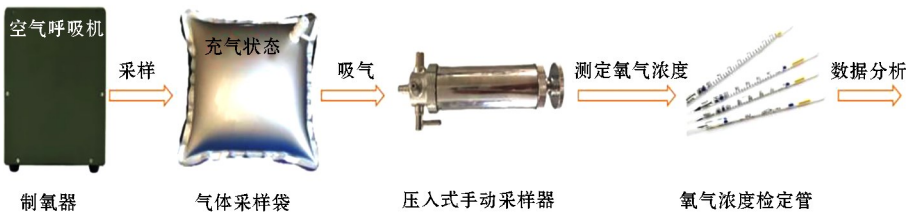


图 8 空气氧浓度测试装置

Fig.8 Air oxygen concentration testing device

3.1.2 测试方法

采用排水法测试脉冲供氧流量,每 5 s 按压吸气球一次,通过总排水容积与按压次数的比值计算单次氧气输出量,其计算公式见式(1),空气呼吸器氧气流量的测试方法如图 9 所示。

$$V_{single}=\frac{V_{total}}{N} \tag{1}$$

式中:V_{single}为单次氧气输出量,mL;V_{total}为总排水容积,mL;N 为按压总次数。

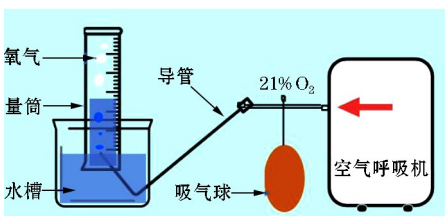


图 9 空气呼吸器氧气流量测试方法

Fig.9 Test method of oxygen flow in air respirators

测量空气氧浓度前,需先检查气体采样器的气密性及检定管的完好性。将阀门把手转至 45°位置,拉动活塞拉杆,若拉杆能够自动回位,则表明气密性良好。确认无误后,使用圆筒形压入式手动采样器采集气样。在高原环境下,每次测量前都要用空气对测氧仪进行校准,并同步测试医用氧气浓度,以此验证数据的可靠性。

具体操作步骤如下:将阀门把手调至水平位置,在测点处往复抽拉活塞杆 2~3 次以置换气样;随后将把手旋转至 45°,送入气体;按箭头方向打开检定管两端,迅速将其与采样器连接,把阀门把手扳至垂直位置,按规定时间均匀送入气样;拔出后读取变色环刻度并记录。测试血氧饱和度时,使用者通过鼻吸管连接制氧机进行正常呼吸,同时用血氧仪夹持食指进行监测。

3.1.3 测试结果及分析

不同海拔下空气呼吸器的氧气流量、浓度及气压等测试结果见表 2。

表 2 不同海拔高度下空气呼吸器的氧气流量、浓度、气压

Table 2 Oxygen flow rate, concentration and air pressure of air respirators at different altitudes

海拔高度/m	氧气流量/(L/min)	空气呼吸器制空气氧浓度/%	气压/hPa	吸氧前心率/bpm	吸氧后心率/bpm
1 000	0.21	21±0.1	865	88±2.0	86±1.5
1 070	0.21	21±0.2	865	88±2.0	86±1.5
1 200	0.21	21±0.2	850	89±2.0	86.5±1.5
1 300	0.21	21±0.2	840	89.5±2.0	87±1.5
1 400	0.21	21±0.2	830	90±2.0	87±1.5
1 480	0.21	21±0.2	832	90±2.0	87±1.5
1 613	0.21	21±0.2	817	92±2.5	88±2.0
1 763	0.21	21±0.2	802	95±2.5	89±2.0
1 826	0.42	21±0.2	797	96±2.5	90±2.0
1 921	0.42	21±0.2	783	98±3.0	89±2.0
2 100	0.42	21±0.3	783	100±3.0	90±2.0
2 159	0.42	21±0.3	763	102±3.0	91±2.5
2 226	0.63	21±0.3	757	104±3.5	90±2.5
2 342	0.63	21±0.3	748	106±3.5	91±2.5
2 427	0.74	21±0.3	738	108±4.0	92±2.5
2 453	0.74	21±0.3	736	109±4.0	92±2.5
2 488	0.84	21±0.3	733	110±4.0	93±3.0
2 501	0.84	21±0.3	731	110±4.0	93±3.0
2 551	0.84	21±0.3	726	112±4.0	94±3.0

由表 2 可知,该制氧机于高原地区能够自适应调节氧气流量(随海拔升高而递增),从而维持输出氧浓度稳定在 21%左右。气压降低与海拔升高呈负相关,流量调节策略保障了氧气输出的有效性。

分别以吐鲁番盆地、亚曼达拉河谷、文秀山及博格达峰为测试地点进行测试，得到不同海拔高度下空气呼吸器的性能及血氧饱和度估算统计结果见表3。

表3　不同海拔高度下空气呼吸器的性能及血氧饱和度

Table 3　Performance and oxygen saturation of air respirator at different altitudes

测试地点	海拔高度/m	氧气流量/(L/min)	空气氧浓度/%	测试点吸氧前血氧饱和度/%	测试点吸氧后血氧饱和度/%
吐鲁番盆地	−154	0.21	21.0±0.6	89.0±0.5	96.0±0.5
亚曼达拉河谷	2 100	0.42	21.0±0.6	87.0±1.0	95.5±0.8
文秀山	4 200	0.49	21.5±0.8	80.0±1.5	94.8±1.3
博格达峰	5 445	0.52	21.0±1.5	68.0±3.5	92.0±2.0

由表3可知，当人体处于未进行额外吸氧的情况下，随着海拔升高，血氧饱和度呈急剧下降的变化趋势。具体来说，海拔越高，空气中的氧气含量越低，这使得人体吸入的氧气量减少，从而引发人体血氧饱和度显著降低。在使用自主研发的空气呼吸器后，缺氧情况得到了显著改善。该设备运用智能混合供氧技术，集成螺旋式氧氮分离器，在提高气体分离效率的同时，有效缩减了设备整机体积，可实现氧氮的高效分离，持续稳定输出空气氧浓度约为21%的呼吸气体。

图10为不同海拔高度条件下呼吸器的输出氧浓度及血氧饱和度。从图10中可以看出，当海拔高度从吐鲁番盆地(低于海平面)升高至博格达峰(约5 445 m)时，在未吸氧的情形下，人体的血氧饱和度随着海拔高度的升高而显著下降，说明在高原低氧环境中，人体从空气中摄取氧气的能力减弱，进而致使血液中的氧气含量不足。在每一个测试地点，特别是在高海拔地区(文秀山、博格达峰)，吸氧后的血氧饱和度明显高于吸氧前。而在低海拔的吐鲁番盆地，吸氧前后的血氧饱和度变化并不显著。在博格达峰，吸氧使血氧饱和度由约68%的危险水平提升至约92%的相对安全水平，提升幅度极为可观。

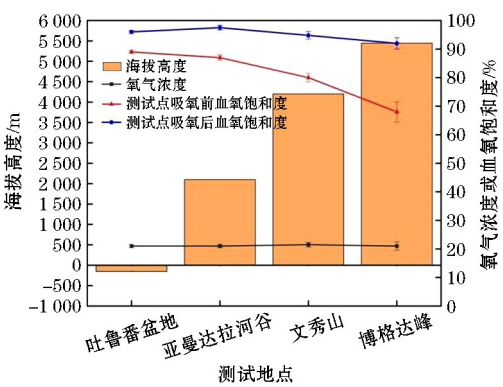


图10　不同海拔高度下空气呼吸器的输出氧浓度和血氧饱和度

Fig.10　Output oxygen concentration and oxygen saturation of air respirator at different altitudes

3.2　内置电池续航性能测试

为评估设备内置电池的续航性能，对两台自主研发的空气呼吸器所搭载的钛酸锂电池进行了测试。记录了不同环境下电池的单次使用时长及充电所需时间，测试结果见表4。

表4　钛酸锂电池在不同海拔高度与不同环境条件下的使用时间

Table 4　Usage time of lithium titanate battery at different altitudes and environmental conditions

海拔高度/m	环境温度/℃	大气压/hPa	设备充电所需时间/min	使用时间/min
−154(最低海拔)	32.2	1 022	180±4	296±6
5 445(最高海拔)	−35	415	135±7	199±10

由表4可知，海拔高度对电池续航能力影响显著，究其原因是压缩机电机在不同转速下的能耗差异大。由此可见，便携式空气呼吸器采用螺旋式氧氮分离技术、往复式膜片抽气泵以及具备保温功能的带加热丝外壳帆布，对降低整机功耗、适配高原工况具有重要意义。合理选用档位能够有效延长电池的单次使用时间，增加作业人员的有效工作时长，提升其在高原地区的应急作业能力。所选电池在高原的使用时间低于在平原的使用时间，这可能是由于高原环境下压缩机的排气压力降低，能耗相应减少所致。

3.3　有毒有害气体过滤系统的集成与优化

高原矿山中，传统空气呼吸器单一过滤材料的过滤效率低，在复杂矿井及高浓度有毒气体环境下的防护性能差。对此，本研究开发了多层次有毒有害气体过滤系统，优化其在高原低压环境中的过滤效能，并通过试验验证该系统防护性能的提升效果。

该系统集成了三重过滤结构：第一层为高效颗粒过滤膜，过滤粉尘及微小颗粒物；第二层为活性炭吸附层，利用高比表面积吸附有毒气体；第三层为催化氧化层，通过纳米金属氧化物催化剂分解有毒气

体。为增强系统在高原低压环境下的性能,通过优化活性炭孔径分布和纳米催化剂颗粒尺寸,使吸附和催化反应效率达到最大化。

高原环境下有毒有害气体过滤系统性能对比结果如图 11 所示。

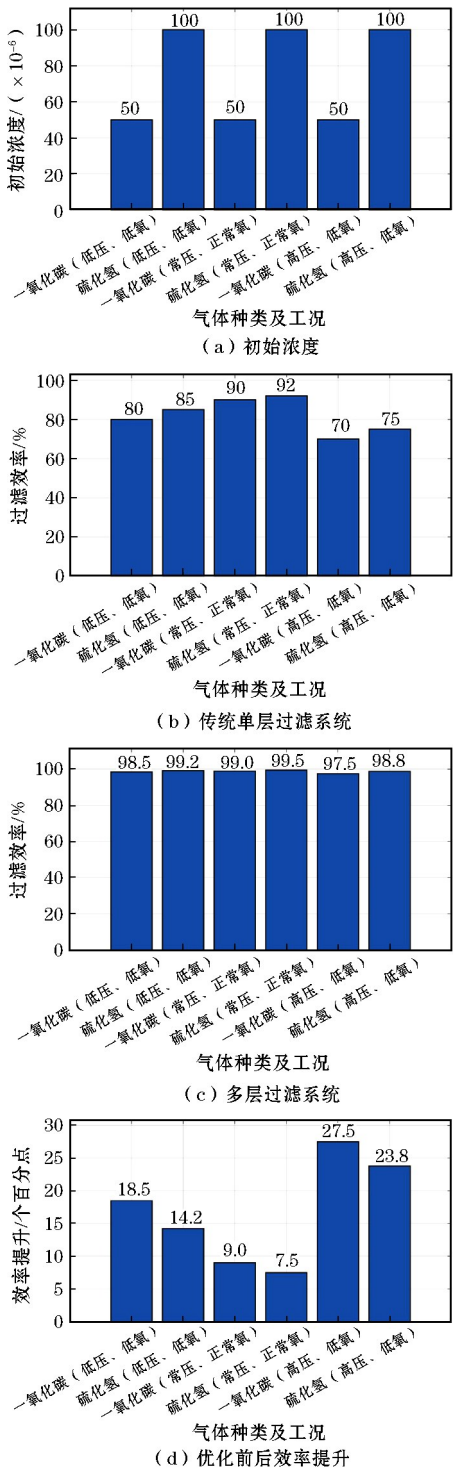


图 11 高原环境下有毒有害气体过滤系统性能对比

Fig.11 Performance comparison of toxic and harmful gas filtration systems in high-altitude environments

由图 11 可知,无论在何种环境下、针对何种气体,多层次过滤系统的性能均稳定优于传统单层系统。低压、低温环境对过滤系统(尤其是对 CO 的去除)的负面影响最为显著,而常压、正常氧环境最有利于过滤系统发挥最佳性能。现有技术条件下,过滤系统对 H_2S 的去除效率普遍高于 CO,说明 CO 是更难处理的有毒气体。

引入多层次过滤系统后,可在恶劣工况下提供更稳定、更安全的保障,尤其是在处理难过滤的 CO 气体时,系统性能提升更为显著。

为进一步增强系统稳定性与持久性,引入智能气体传感器和自动过滤模块。智能感应器实时监控有害气体浓度,超标时自动启动多重过滤系统;自动切换模块在吸附饱和后转移至备用过滤层,防止有害气体泄漏。通过集成与优化设计,过滤系统在恶劣环境下的稳定性显著增强,空气呼吸器的安全性与可靠性得到有效提升。

4 结论

本文开发了一款新型应急空气呼吸器,通过高原现场试验、电池续航测试及设备连续运行的可靠性测试试验,分析其设备性能,得出以下主要结论。

(1) 空气呼吸器的氧气流量随着海拔升高而逐渐递增,输出空气氧浓度则基本维持在 21%左右。

(2) 采用创新型螺旋式氧氮分离技术进行供氧后,在 4 000 m 以上的高海拔地区(文秀山、博格达峰),吸氧后的血氧饱和度明显高于吸氧前,特别是在博格达峰(海拔 5 445 m),吸氧使血氧饱和度由约 68%的危险水平提升至约 92%的相对安全水平,有效缓解了高原缺氧症状。此外,电池最长续航可达(296±6) min(海拔-154 m),实现 24 h 及以上的持续供氧。

(3) 改进后的智能化调节系统与多层次有害气体过滤系统,显著提升了设备的供氧稳定性、续航能力及安全性,能够在复杂高原环境中提供更为可靠的呼吸支持,同时提高了救援效率与人员安全保障水平。未来研究可进一步引入智能监测与数据传输技术,实现高水平的智能化管理与远程控制。

参考文献(References):

[1] 余秀清.智能氧气呼吸器的设计及试验研究[J].矿业安全与环保,2021,48(1):60-63.
Yu Xiuqing. Design and experimental study of intelligent oxygen respirator[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(1):60-63.

[2] 马云龙.矿山用自救器及呼吸器检测检验技术现状与建议[J].矿山安全,2022,53(8):139-144.

Ma Yunlong. Current status and suggestions for testing and inspection technology of mine self-rescuers and respirators [J]. Mine Safety,2022,53(8):139-144.

[3] 钱微微,何成同,蒋臻,等.有毒气体导致急性肺损伤的作用机制研究进展[J].中国呼吸与危重监护杂志,2024,23(5):370-374.
Qian Weiwei, He Chengtong, Jiang Zhen, et al. Research progress on the mechanism of toxic gas induced acute lung injury[J]. Chinese Journal of Respiratory and Critical Care Medicine,2024,23(5):370-374.

[4] 于暑艳.融合认识模型的中考一轮复习课设计:以"氧气"一课为例[J].理科考试研究,2024,31(2):56-60.
Yu Shuyan. Instructional design for the first round of middle school entrance examination review integrating cognitive model: taking the lesson "Oxygen" as an example[J]. Research on Science Subjects Examinations,2024,31(2):56-60.

[5] 朱举贤.氧的制造及高原医用制氧机[J].河北企业,2019(6):173-174.
Zhu Juxian. Oxygen production and plateau medical oxygen generators[J]. Hebei Enterprise,2019(6):173-174.

[6] 魏恒达,黄林.高寒地区如何克服发动机"缺氧"[J].汽车维修,2000(9):52.
Wei Hengda, Huang Lin. How to overcome engine "oxygen deficiency" in alpine regions[J]. Automobile Maintenance, 2000(9):52.

[7] 张海雷.柴油机变海拔涡轮增压技术研究[D].北京:清华大学,2008.
Zhang Hailei. Study of the turbocharging system for diesel engine operating at varying altitude conditions[D]. Beijing: Tsinghua University,2008.

[8] 郭晓敏.压缩氧自救器在煤矿安全生产中的应用及发展[J].内蒙古煤炭经济,2022(23):98-100.
Guo Xiaomin. The application and development of compressed oxygen self-rescuers in coal mine safety production[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2022(23):98-100.

[9] 刘应书,曹永正,刘文海,等.便携式制氧机的工作原理及性能分析[J].高原医学杂志,2010,20(4):1-5.
Liu Yingshu, Cao Yongzheng, Liu Wenhai, et al. The working principle and performance analysis of portable oxygen generators [J].Journal of High Altitude Medicine,2010,20(4):1-5.

[10] 周国辉,洪波,王斌,等.高原便携式 PSA 制氧机设计与关键技术研究[J].现代计算机(专业版),2017(24):66-70.
Zhou Guohui, Hong Bo, Wang Bin, et al.Research on the key technology and design for portable PSA oxygen generator applying in plateau region [J]. SmartTech Innovations,2017(24):66-70.

[11] 孙传庆,李奇峰,刘维玉,等.高原内燃机车制氧系统研究与应用[J].铁道机车与动车,2023(2):32-34+6.
Sun Chuanqing, Li Qifeng, Liu Weiyu, et al. Research and application of oxygen generation systems for plateau diesel locomotives[J]. Railway Locomotives and Motor Cars,2023 (2):32-34+6.

[12] 张碧波.一种适用于高原地区的便携式制氧机:CN201210307733.0[P].2014-03-12.

[13] 曹惠芳.依达拉奉对大鼠高氧肺损伤保护作用的机制研究[D].上海:第二军医大学,2016.
Cao Huifang. Mechanism of edaravone protect against hyperoxia induced acute lung injury[D]. Shanghai: Naval Medical University,2016.

[14] 孙靖濛,朱孟府,陈平,等.便携式制氧机呼吸脉冲供氧系统设计[J].制造业自动化,2015,37(18):147-149.
Sun Jingmeng, Zhu Mengfu, Chen Ping, et al. Design of respiratory pulse oxygen delivery system for portable oxygen concentrator[J]. Manufacturing Automation,2015,37(18): 147-149.

[15] 李长刚.手自一体微型便携式制氧机:CN202020866164.3[P].2020-12-11.

[16] 孙嘉增,窦建洪,王裕东,等.基于应急救援的远程测控便携式制氧机的研制[J].中国医疗设备,2023,38(5):86-91.
Sun Jiazeng, Dou Jianhong, Wang Yudong, et al. Development of portable oxygen generator for remote control of disaster scene[J]. China Medical Devices,2023,38 (5):86-91.

[17] 王攀科,张文甫.矿山救援队伍 PssBG4 正压氧气呼吸器席位操作及故障分析[J].内蒙古煤炭经济,2021(20):117-119.
Wang Panke, Zhang Wenfu. Mine rescue team PssBG4 positive pressure oxygen respirator seat operation and fault analysis[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021 (20): 117-119.

[18] Ajmal B M, Usama M, Bangash Z, et al. Experimental evaluation of a portable oxygen concentrator based on pressure swing adsorption[J]. Materials Proceedings,2025, 23(1):25-25.

[19] 张禹海,姚昕.正压式空气呼吸器应急延时呼吸技术[J].中国人民警察大学学报,2022,38(6):38-41+46.
Zhang Yuhai, Yao Xin. Emergency breathing techniques for positive-pressure self-contained breathing apparatus [J]. Journal of China People's Police University,2022,38(6):38-41+46.

[20] 李伟东,张建福,李玉.空气呼吸器耗气速率差异性分析及救援场景模拟[J].消防科学与技术,2025,44(5):663-668.
Li Weidong, Zhang Jianfu, Li Yu.Analysis of differences in air consumption rate of breath apparatus and rescue scenario simulation[J]. Fire Science and Technology,2025,44(5): 663-668.