

高原矿山供氧设备的研究现状与应用进展

陆春燕 陈辉*

新疆大学, 地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 高原矿山施工面临氧气稀薄、低温和高劳动强度等挑战, 严重影响施工人员的健康和效率。供氧设备的应用成为保障健康与提升效率的关键。论文综述了高原矿山供氧设备的研究现状与应用进展, 分析了特殊环境对供氧设备的需求, 介绍了常用设备类型及其优缺点, 如便携式供氧、固定供氧系统、加压氧舱和智能供氧设备, 同时探讨了高原矿山供氧设备的应用现状。最后, 论文展望了高原矿山供氧设备的研究与应用正在向更加高效、智能、环保、多功能化的方向发展, 以满足日益严苛的高海拔矿山作业需求。

关键词: 高原矿山; 供氧设备; 研究现状; 技术挑战; 智能化供氧

Research Status and Application Progress of Oxygen Supply Equipment in Plateau Mine

Chunyan Lu Hui Chen*

College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Plateau mine construction faces challenges such as thin oxygen, low temperature and high labor intensity, which seriously affects the health and efficiency of construction workers. The application of oxygen supply equipment has become the key to ensure health and improve efficiency. This paper summarizes the research status and application progress of oxygen supply equipment in plateau mines, analyzes the demand for oxygen supply equipment in special environment, introduces the types of commonly used equipment and their advantages and disadvantages, such as portable oxygen supply, fixed oxygen supply system, pressurized oxygen chamber and intelligent oxygen supply equipment, and discusses the application status of oxygen supply equipment in plateau mines. Finally, this paper looks forward to the research and application of oxygen supply equipment in plateau mines is developing towards more efficient, intelligent, environmental protection and multi-functional, in order to meet the increasingly stringent requirements of high-altitude mines.

Keywords: plateau mine; oxygen supply equipment; research status; technical challenges; intelligent oxygen supply

0 前言

随着全球矿产资源开发的深入, 高原矿山开采逐渐成为重点。高原自然环境的特点是低压、低氧、气候干燥寒冷、风速大、太阳辐射线和紫外线照射量增多等。高原地区由于其海拔较高, 大气压力较低, 导致空气中的氧气含量减少, 这种现象被称为高原低氧。这不仅对人的生理状况产生很大影响, 而且会引起感觉、记忆、思维判断、注意、情绪和人格等心理功能下降^[1-4]。高原矿山的施工因低氧、低气压和恶劣的气候条件, 给工作带来了许多严峻的挑战。施工人员不仅需要极端寒冷的气候条件下长时间作业, 还要面对空气中氧气含量不足的现实。尤其是矿山开采的重体力劳动性质, 更加加剧了施工人员对氧气的需求。缺氧和高原反应使得施工人员容易出现体力不支、注意力涣散等问题, 极大地影响了矿山作业的安全性和效率。如何有效解决高原缺氧问题, 成为保障施工人员健康和提高工作效率的关键。供氧设备是解决高原缺氧问题的重要手段, 这些设备为施工人员提供氧气支持, 改善其生理状态。但在实际应用中, 供氧设备仍面临诸多技术挑战。

1 高原矿山环境特点与供氧需求分析

高原矿山通常位于海拔 2500 米以上的区域, 这些地区具有低氧、低气压、低温以及恶劣气候等独特的环境特点。积雪山脉、干旱裸露的地貌、稀疏植被等复杂的地质条件是高原矿山的典型自然特征^[5]。陡峭的地形和不稳定的地质条件也对基础设施的建设、物资运输和安全生产提出了更高要求。

高原地区空气稀薄, 氧气含量较低只有平原地区的 60%~70%, 施工人员长期暴露在这种低氧环境中, 容易出现各种高原反应。这严重影响施工人员健康和工作效率, 甚至可能引发安全事故。高原矿山供氧需求不仅是保障施工人员健康和基本的安全条件, 也是提升施工效率和降低安全风险的重要手段。针对这种需求, 供氧设备的设计和应用需要结合高原环境特点, 满足持续性、适应性和多样化的要求, 从而为高原矿山施工提供强有力的支持。

2 高原矿山供氧设备的技术现状与应用现状

2.1 高原矿山供氧设备发展历程

高原矿山供氧设备的发展历程可以概括为从简单的个

体供氧装置到系统化、智能化的供氧技术体系逐步完善的过程。早期阶段，由于技术和条件的限制，供氧设备主要以便携式氧气瓶和鼻导管吸氧等简单形式为主。这些设备体积小、使用便捷，能够为个体工人提供短时间的氧气支持，但持续供氧能力有限，无法满足长期或大范围的作业需求^[6-7]。随着矿山规模扩大和作业环境复杂化，固定式制氧机和集中供氧系统逐渐被应用。这一阶段的供氧设备通常包括氧气浓缩器和制氧机，可在矿山隧道或固定工作点集中输送氧气，显著提高了作业环境的氧气浓度。与此同时，户外氧气帐篷和集成式宿舍舱开始用于高原矿区的生活区，为工人提供长期的富氧休息环境^[8-11]。高原供氧设备演变过程如图 1 所示。

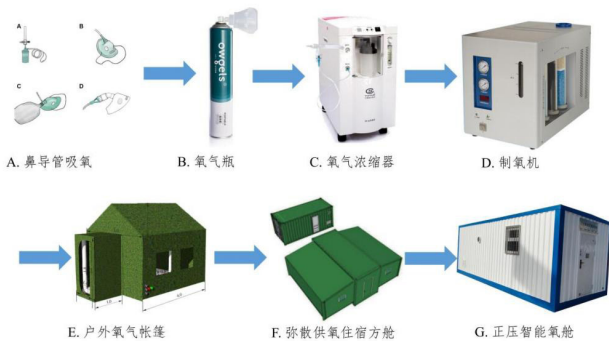


图 1 高原供氧设备演变过程

2.2 技术现状

高原供氧技术的核心在于针对高海拔地区空气稀薄、氧气分压低的特点，通过物理或化学方法提高氧气浓度，满足人体对氧气的生理需求。通过变压吸附、深冷分离、膜分离、化学制氧等多种方法，结合智能化动态调节与绿色能源驱动，有效解决了高原低氧环境对施工人员健康和工作效率

的影响，如图 2 所示^[12-16]。

表 1 展示了几种高原供氧设备的类型及其优缺点。常用的几种制氧技术如下：

①变压吸附制氧技术：该技术通过吸附剂在不同压力下吸附和释放氧气，制备高纯度氧气。其设备简单、能耗低，适用于高原地区。随着吸附剂性能的提升，变压吸附制氧技术在高原地区的应用前景广阔。

②膜分离制氧技术：利用膜的选择透过性分离氧气和氮气，制备氧气。该技术设备紧凑，但受膜材料性能限制，适用于小规模供氧。

③冷凝法制氧：通过冷却空气至液化，分离氧气。该方法能耗高，设备复杂，适用于大规模供氧，但在高原地区应用受限。

④化学试剂法制氧：利用化学反应释放氧气，适用于应急供氧。但其氧气浓度和供应时间有限，适用于短时应急情况。

2.3 高原供氧设备在矿山的应用现状

高原供氧设备在矿山的应用现状呈现出多样化和实用化的发展趋势，成为保障高原矿山作业的重要技术手段。目前，固定式集中供氧系统广泛应用于隧道掘进和矿井作业中，通过制氧机或液氧储罐，输送氧气至作业区域，有效提升环境氧浓度。便携式供氧设备也被广泛使用，为地面移动作业提供灵活的氧气支持，同时在应急救援中，化学制氧装置和高压氧舱等特殊供氧设备发挥了重要作用。此外，为改善工人的休息条件，集成式供氧宿舍舱和氧气帐篷逐渐推广，为工人提供富氧休息环境，帮助恢复体力。近年来，智能化供氧技术开始应用，通过传感器监测环境和人员生理状况，动态调节供氧量，提高了供氧效率。

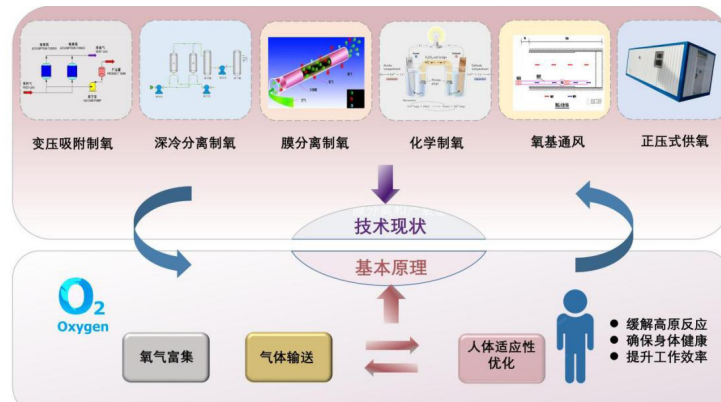


图 2 高原供氧的基本原理及技术现状

表 1 高原供氧设备类型及其优缺点

类型	代表	优缺点	适用场景	类型
便携式供氧设备	氧气瓶、氧气袋	便于携带、操作简单但是氧气供应有限	短时间、高强度作业	便携式供氧设备
固定式供氧系统	矿井内的供氧管道系统和隧道内的固定氧气设备	能持续提供氧气但是设备成本高、固定性强、维修难度大	长时间作业环境	固定式供氧系统
局部供氧装置	环形空气幕供氧装置	成本高、适用规模有限	特定作业区域	局部供氧装置

在高原矿山，人们多采用氧气瓶或中型及以上制氧机来解决缺氧困扰，制氧机因体积较大或质量较大、存在使用不便、用户吸氧体验不佳等问题难以忽视，一种基于制氧功能和减重优化改进后的便携式高原用制氧机，在满足基础制氧需求的基础上，各项技术性能指标均得到有效提升，集中式供氧系统是高原矿山供氧的核心技术，适用于固定作业场所和长期施工项目^[17]。主要通过制氧机或液氧储罐，将氧气通过管网输送至矿井内、隧道掘进面等重点作业区域，如图 3 所示。这种方式能够整体提升环境氧浓度，有效改善施工条件。

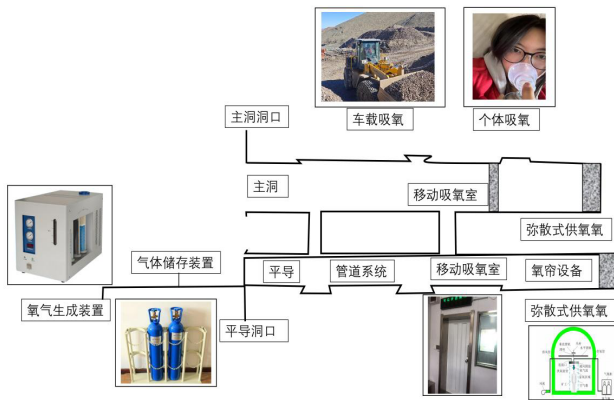


图 3 高原隧道施工供氧体系

在矿山作业中，供氧设备具有重要的应用价值，尤其是在高海拔地区或氧气稀薄环境下的矿山作业中，作业环境氧气浓度能提高至平原水平（20%~22%）。李孜军等人^[18]将供氧管与环形空气幕相结合，空气幕在作业人员四周形成空气屏障，设计出一种用于高海拔矿山掘进工作面的新型供氧装置。李蓉蓉等人^[19]基于 CFD 模拟软件，以矿山巷道内原有氧气质量分数提高 5% 为目标，设计正交试验，在“长压短抽”通风方式下，优化压入风筒放置高度，分析压入风

筒与掘进面距离、供氧管与压入风筒出口水平距离、抽压比 3 个因素对氧气质量及分布规律的影响。两种矿山巷道弥散型供氧装置如图 4 所示。

2.4 集成式供氧宿舍的应用

为保障矿区工人在休息期间的健康状态，集成式供氧宿舍舱和氧气帐篷逐渐得到推广。通过供氧系统与宿舍建筑的有机结合，为住户提供稳定的氧气供应和舒适的生活环境，这些设施能够在休息区提供恒定的富氧环境，使工人的体力恢复时间缩短约 30%，有助于工人快速恢复体力，提升工作效率。

3 高原矿山供氧设备的未来发展趋势

高原矿山供氧设备的未来发展趋势将围绕效率提升、智能化应用、绿色环保和适应性增强等方面展开，以应对高海拔极端环境和矿山开采复杂需求。

① 高效低耗的制氧技术将成为未来发展的重点。现有的变压吸附（PSA）、深冷分离和膜分离技术在高原条件下虽然已广泛应用，但仍存在能耗较高、制氧效率有限的问题。高性能分子筛、复合材料膜等新型材料的应用，以及更加优化的工艺设计，有望提升供氧效率，降低能耗，从而减少对外部能源的依赖。

② 智能化供氧系统将进一步推广。通过传感器技术和物联网技术的结合，未来的供氧设备将具备实时监测矿山环境参数（如氧气浓度、温度、气压）和施工人员生理状态（如血氧饱和度）的能力，并能够根据需求动态调节供氧量。远程控制 and 数据分析功能将使供氧设备更高效、精准。

③ 绿色能源驱动也将成为未来的发展方向。在高原矿山资源有限的背景下，利用太阳能、风能等可再生能源为供氧设备供电，能够显著提升设备的可持续性。这种绿色能源供氧系统将为偏远和能源匮乏的矿山区域提供经济可靠的解决方案。

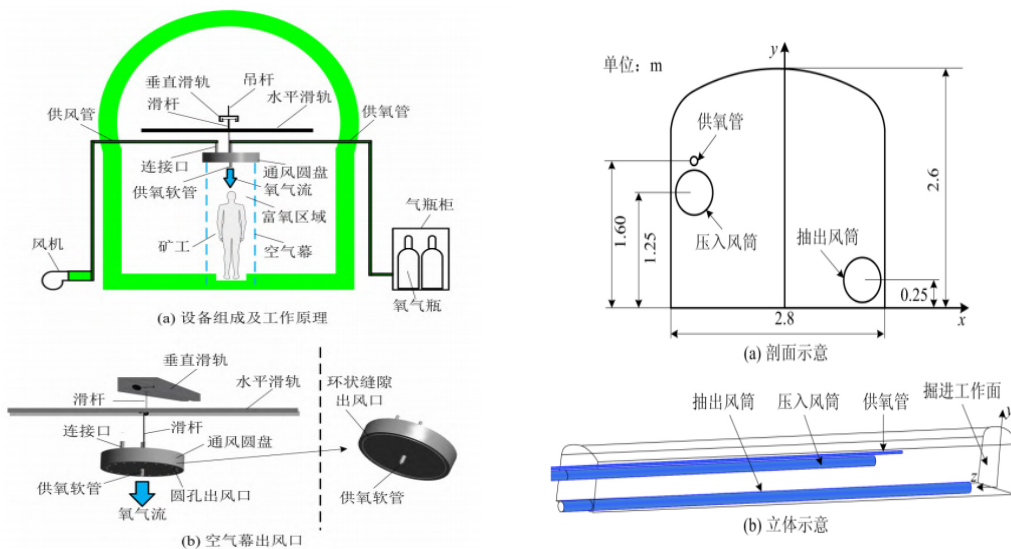


图 4 两种矿山巷道弥散型供氧装置

④供氧设备的多功能集成化趋势也将逐步显现。未来的设备可能结合供暖、通风、空气净化等功能，为高原矿山的复杂环境提供全面保障。这种多功能供氧设备能够在恶劣环境中提高工人的生活质量和工作效率。

综上所述，高原矿山供氧设备的未来发展将以技术进步和环境适应为核心，通过高效化、智能化、绿色化和多功能化的创新，为高海拔矿山的健康、安全和高效作业提供更强有力的支持。

4 结论

论文综述了高原矿山供氧设备的研究现状与应用进展，分析了高原矿山的特殊环境对供氧设备的独特需求，并探讨了供氧技术的发展历程、现有设备的优缺点以及其在矿山中的实际应用情况，得出以下结论。

4.1 供氧设备技术不断进步，应用效果显著提升

高原矿山供氧设备已从传统的便携式供氧瓶发展到集成化、智能化的供氧系统，能够有效缓解高原缺氧对施工人员的影响，保障其生理健康，提高工作效率。集中供氧系统在高原矿区的隧道掘进和矿井作业中发挥了核心作用，便携式供氧设备为动态作业提供了灵活支持，集成式宿舍供氧系统在改善生活条件和提升休息质量方面成效显著。

4.2 技术创新推动供氧设备向高效化与智能化方向发展

变压吸附、膜分离和化学制氧等核心技术逐渐成熟，为高原矿山供氧提供了多样化解决方案。基于传感器与物联网的智能化供氧系统，能够根据环境和施工人员的生理状态动态调节供氧量，有效提高供氧效率，降低能耗。

4.3 供氧效果显著

供氧设备能够将作业环境氧气浓度提高至平原水平（20%~22%），显著降低了高原反应的发生概率，提高了工作安全性。集成式供氧宿舍使工人的体力恢复时间缩短约30%，并改善了其工作效率和生活质量。

智能化供氧系统通过动态调节功能，较传统供氧方式提高了15%~20%的供氧效率，节能效果明显。

4.4 未来发展方向

未来供氧设备的发展将以高效低耗、绿色环保、智能集成和多功能适应性为核心目标，通过应用新型材料、高效能源和智能控制技术，进一步提升设备在高原矿山作业中的适用性和可靠性，为高原矿山的安全、高效开采提供更加坚实的技术支持。

参考文献：

[1] 许帅,张昊鹏,董海龙.急性高原低氧对人体认知功能的影响研究

进展[J].解放军医学杂志,2023,48(9):1094-1099.

[2] 孔晓婷,汪元汲,沈国双,等.高原低氧环境对人体的影响及药物干预研究进展[J].现代医药卫生,2022,38(9):1523-1527.

[3] Yuan Li, Yan Wang. Effects of Long-Term Exposure to High Altitude Hypoxia on Cognitive Function and Its Mechanism: A Narrative Review[J]. BRAIN SCIENCES,2022(IF:3).

[4] 许帅.高原低氧对急进人群认知功能影响的研究[D].西安:中国人民解放军空军军医大学,2023.

[5] 高峰,周科平,熊信.我国高海拔寒区金属矿产资源开采现状及关键问题[J].矿业研究与开发,2022,42(10):1-5.

[6] 李超越,钱杰.富氧建筑的发展应用[J].科技视界,2024,14(2):69-71.

[7] 田朴,李宁,孔庆平,等.高原小型便携式供氧装置现状及发展趋势[J].现代盐化工,2021,48(3):106-108.

[8] 李孜军,李蓉蓉,许宇,等.高原矿山隧道内单个供氧装置富氧效果研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(2):54-60.

[9] 冉庄,陈郁,谭超,等.基于新型住宿方舱的弥散供氧对移居高原人员生理学效应的影响[J].第三军医大学学报,2021,43(8):707-714.

[10] 冉庄,王伟帅,孙徐川,等.新研发弥散供氧住宿方舱在高原高寒环境下实地应用效果评价[J].军事医学,2021,45(4):246-250.

[11] 单帅,申广浩,安军防,等.气助型弥散富氧充气帐篷的研制及性能测试[J].医疗卫生装备,2017,38(2):6-10.

[12] 谌桂舟,陈政,琚国全,等.高海拔隧道施工劳动强度与供氧浓度关系研究[J].现代隧道技术,2022,59(1):118-123.

[13] 冉庄,罗勇军.高原制氧供氧技术及合理用氧研究进展[J].人民军医,2019,62(5):401-404.

[14] 刘凯峰,杨涵,左小青,等.基于液氧储供的高原应急供氧保障模式探研[J].中国应急救援,2022(5):43-47.

[15] 龙林,万清良.高原弥散供氧技术发展与创新探讨[J].高原医学研究,2020.

[16] 王科.高海拔隧道施工供氧技术研究[J].国防交通工程与技术,2021,19(5):25-28.

[17] 杨枫,郑金龙,蔚艳庆,等.高海拔隧道施工氧含量变化及供氧方法[J].科学技术与工程,2019,19(8):282-288.

[18] 李孜军,李蓉蓉,徐宇,等.高海拔矿山掘进工作面局部供氧装置研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(10):109-115.

[19] 李蓉蓉,李孜军,赵淑琪,等.基于CFD的高海拔矿山掘进面通风增氧方案优化[J].中国安全生产科学技术,2020,16(2):54-60.

作者简介：陆春燕（2000-），女，中国河南信阳人，在读硕士，从事高寒高海拔矿山人机工学及安全保障研究。
通讯作者：陈辉，男，硕士生导师。