

董宪伟 著



# 高原非煤矿井增氧技术研究

本书系统地分析了高原缺氧、制氧及膜分离技术理论，研究了高原矿井膜分离技术制氧原理和工作面集中供氧的增氧方式；研究了不同海拔高度与受试人员疲劳程度之间的关系；采用数值模拟的方法对巷道内的空气流和氧气流进行仿真研究。

河北人民出版社



**董宪伟**，山东泰安人，博士，国家注册安全工程师，河北联合大学矿业工程学院安全系教师，主要从事安全科学与工程、安全技术及管理等方面的教学与科研工作。参加国家、省部级等多项课题的研究。参加编写《高等硬岩采矿业》等5部教材和专著，发表论文20余篇。

# 高原非煤矿井增氧技术研究

董宪伟 著

河北人民出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高原非煤矿井增氧技术研究/董宪伟著.—石家庄:河北人民出版社,2014.6  
ISBN 978-7-202-08831-9

I. ①高… II. ①董… III. ①高原-矿山通风-研究②高原-煤矿开采-井下作业-供氧系统-研究 IV. ①TD724

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第124015号

---

书 名 高原非煤矿井增氧技术研究  
著 者 董宪伟

---

责任编辑 沈鸿雁  
美术编辑 吴书平  
责任校对 付敬华

---

出版发行 河北人民出版社 (石家庄市友谊北大街330号)  
印 刷 河北理工大学印刷厂  
开 本 787毫米×1092毫米 1/16  
印 张 8  
字 数 130 000  
版 次 2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-202-08831-9/TD·58  
定 价 26.00元

---

版权所有 翻印必究

## 内 容 提 要

本书在系统分析了高原缺氧、制氧、供氧、膜分离技术理论的基础上，指出了在高原矿井利用膜分离技术制氧原理和工作面集中供氧的增氧通风方式；研究了不同海拔高度与受试人员疲劳程度之间的关系，找出增氧的海拔高度范围值；应用逼近理想解的决策方法，定量分析工作面环境优劣和影响因素主次程度，针对性地采取应对治理措施；采用数值模拟方法对巷道内的空气流和氧气流进行仿真分析，研究空气流和氧气流不同工况下的使用效果；根据增氧量大小、使用环境、工作要求、系统特点等技术指标设计制氧系统，再结合工程地质状况制定供氧路线。

本书可供矿业、安全等学科领域的工程技术人员使用，也可作为科研院所科研人员、矿业安全专业本科生及研究生参考用书。

# 前 言

高原地区由于其所处的特殊地理位置而具有巨大的金属矿产开发潜力，目前，西藏已经探明的矿种多达101种，探明矿产地1858处，探明储量的矿床达132个。其中铬、铜、铁、硼、黄金不仅是目前中国短缺的矿产资源，也是今后一个时期此类矿产的重要后备基地。在已经发现的矿产资源中，西藏有17种矿产位居全国各省前9位。除此之外，西藏的金、铅、锌、钼、锑、铁、铂族金属以及石油、天然气等非金属矿产也都具有广阔的勘查前景。西藏矿产资源的潜在价值在6000亿元以上。

缺氧是高原地区施工中遇到的首要难题，由于缺氧，施工人员会出现一系列高原病，而且人的工作能力也会随着海拔高度的增高而降低。因此，在高原矿井进行增氧技术研究，为广大施工人员提供方便、及时的增氧条件和吸氧环境，对于保障施工人员的健康和生命安全，提高工作效率，具有重要意义。本书系统地分析了高原缺氧、制氧、供氧、膜分离技术理论，采用理论分析、井下环境测量调查、低氧测试实验和数值模拟等方法，对锡铁山铅锌矿的增氧技术和集中供氧系统进行了一些研究工作。

本书中引用了许多专家学者和相关研究人员的研究成果和论著，作者深表谢意。本书得以出版，与北京科技大学蔡嗣经教授、北京联合大学杨鹏教授的悉心指导是分不开的，在此表示衷心的感谢。北京科技大学吕文生老师和唐志新、陈赞成、梅栋梁、李昶、张崇、曹思远、卫欢乐、何磊、何丹、于跟波、门瑞营等师弟师妹，北京体育大学低氧科学研究中心的胡杨教授、衣龙彦实验员以及河北联合大学矿业工程学院的同事王福生、朱令起、刘建庄、张嘉勇、张九零、王月红、柳晓莉、侯欣然及齐艺裴等老师，他们都提供了各种帮助，在此一并表示感谢。

由于时间原因及作者水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请同行专家和广大读者提出宝贵意见。

# 目 录

前 言 .....	I
引 言 .....	1
一、锡铁山矿介绍 .....	1
二、研究目的 .....	3
三、研究意义 .....	3
四、主要研究内容 .....	3
本章小结 .....	4
第一章 文献综述 .....	5
一、高原低氧及其影响综述 .....	5
1.高原病及其机理概述 .....	5
2.国内外研究现状 .....	6
3.高原习服机理 .....	6
4.富氧对人的影响 .....	10
5.高原低氧对设备的影响 .....	13
二、制氧理论综述 .....	16
1.制氧方法概述 .....	16
2.制氧工艺比选 .....	17
3.参数比较分析 .....	19
4.经济费用比较 .....	20
三、供氧理论综述 .....	23
1.供氧概述 .....	23
2.供氧方式 .....	24
四、供氧国内外研究现状 .....	24
五、供氧的未来发展趋势 .....	26
六、膜分离技术原理 .....	27
1.膜的特点及分类 .....	27

2.气体分离膜应用 .....	28
本章小结 .....	34
<b>第二章 模拟高原的疲劳程度指标测试研究 .....</b>	<b>35</b>
一、测试目的 .....	35
二、测试环境及设备仪器 .....	35
1.测试环境 .....	35
2.测试设备 .....	36
3.测试仪器 .....	36
4.测试指标及说明 .....	38
三、测试结果及讨论 .....	42
本章小结 .....	42
<b>第三章 锡铁山矿井增氧条件研究 .....</b>	<b>43</b>
一、现场测试与调研 .....	43
二、锡铁山矿井氧气浓度状况 .....	46
三、锡铁山矿井气候特点 .....	48
1.气压 .....	48
2.含氧量 .....	49
3.环境温度湿度 .....	49
四、高原缺氧对人体的影响 .....	49
五、高原缺氧对矿山设备的影响分析 .....	53
六、矿井人——机——环系统综合安全评价 .....	54
1.高原矿山井下作业环境对人的影响 .....	55
2.逼近理想解的排序评价方法 .....	57
3.高原矿山作业工作面环境安全定量评价 .....	59
4.工作面环境评价结果及原因分析 .....	61
本章小结 .....	61
<b>第四章 锡铁山矿井增氧量计算及矿区富氧室设立 .....</b>	<b>63</b>
一、矿井增氧量 .....	63
1.矿井新风量 .....	63
2.矿井新风量氧气消耗量 .....	66
3.矿工氧气消耗量 .....	66



4. 矿井漏风氧气消耗量 .....	67
5. 锡铁山矿井的增氧浓度 .....	67
6. 高原环境影响供氧水平的其他因素 .....	69
二、矿区富氧室设立 .....	69
1. 职工寓所富氧室 .....	69
2. 工作区域富氧休息室 .....	70
3. 富氧室建立的工程应用 .....	71
本章小结 .....	72
<b>第五章 锡铁山矿井增氧系统设计</b> .....	<b>73</b>
一、矿井制氧设计 .....	73
1. 膜分离制氧流程 .....	75
2. 制氧设备配件 .....	75
3. 制氧可行性分析 .....	76
二、矿井供氧设计 .....	78
1. 供氧方案分析 .....	78
2. 供氧方案的经济性比较 .....	79
3. 供氧路线选择 .....	80
4. 供氧系统的自动控制系统 .....	80
本章小结 .....	80
<b>第六章 矿井工作面增氧模拟及火灾安全分析</b> .....	<b>81</b>
一、Fluent 软件应用 .....	81
1. Fluent 软件分析步骤 .....	84
2. 通风风流中的紊流方程 .....	84
二、工作面增氧通风模拟 .....	87
1. 增氧通风描述 .....	87
2. 模拟操作步骤 .....	88
3. 采掘工作面需风量计算 .....	95
三、矿井增氧的火灾安全分析 .....	101
1. 氧气安全浓度 .....	101
2. 矿井火灾控制 .....	102
一、矿井外因火灾 .....	102
1. 明火引起的火灾 .....	102

2.电弧和电火花引发的火灾 .....	103
3.过热物体引发的火灾 .....	103
二、矿井内因火灾 .....	103
本章小结 .....	104
第七章 结论及展望 .....	105
一、主要研究结论 .....	105
二、主要创新点 .....	106
三、展望 .....	107
参考文献 .....	108
作者简介 .....	116

# 引言

## 一、锡铁山矿介绍

锡铁山矿隶属于西部矿业公司，是2000年改制组建的西部矿业公司，由一个资源即将枯竭的单一矿山企业，现已发展成为拥有铜铅锌、盐湖化工、煤电铝、能源、稀有金属、地勘、再生资源、黑色金属等八大产业的多品种、跨区域、以资源为依托的大型矿业企业。公司成立的当年利润不足2000万元，资产仅有2亿元，至2006年利润已达20亿元，总资产超百亿元<sup>[1]</sup>。

锡铁山铅锌矿位于海西地区柴达木盆地北缘，海拔高度3050m。距格尔木市135km，距大柴旦镇75km，距省会西宁市690km。矿区气候干燥、少雨，昼夜温差较大，属于内陆沙漠干旱气候。年降水量不足100mm，年蒸发量为2187mm，湿润系数为0.038；年平均气温为1.2℃，最高气温为31℃，最低气温为-33.6℃，每年7~8月为盛暑期，11月到次年的4月为冰冻期，2~5月为风季，多为西风及西北风，最大风力可达9级<sup>[2]</sup>。

锡铁山所处的大地构造位置为南祁连加里东褶皱带，矿床赋存于柴达木盆地北缘的北西向锡铁山——绿梁山——赛什腾山绿片岩带中。绿片岩带形成于晚奥陶世的古裂谷，岩性为海相基性火山喷发—沉积岩相。矿床构造以断裂构造为主，矿体受控于绿岩带。绿岩带北与下元古界达肯大板群花岗岩片麻岩，南与上古生界碎屑岩均呈断层接触<sup>[3]</sup>。矿区内出露地层为下元古界达肯大板群主要分布于北部，岩性为白云母石英片岩、二云片岩、斜长片麻岩及混合岩代斜长角闪岩系。矿床产于一个复式向斜构造，该构造可以进一步分为锡铁山中央次级向斜、断层沟隐伏次级背斜、锡铁山次级向斜和山前次级背斜。目前已知的工业矿体主要赋存于锡铁山次级向斜南西翼中<sup>[4]</sup>。

锡铁山所处地区平均海拔达到3300多米，年平均气温0.8℃，这种地形在我国属于高寒地形。高寒地区的特点是缺氧，气压和水的沸点低，气温低，昼夜温差大。在高寒地区，由于缺氧，人们会出现头痛、头晕、心悸、胸闷气短、乏力、记忆衰退、紫绀等症状，严重时会出现昏迷、肺水肿、脑水肿等病，如多次重返高寒地区，反应会一次比一次加重。人的工作能力也随着海拔高度的增高而降低。海拔高度3000m时，人的工作能力降低20%，海拔

高度 4000m 时，人的工作能力降低 35%，海拔高度 5000m 时，人的工作能力降低 50%。设备在这种地区运转，效率低，而且使用寿命也短<sup>[5, 6]</sup>。

氧气是一种重要工业原料，在化学工业中用途广泛<sup>[7, 8]</sup>。如用于节能富氧燃烧、化学氧化、生物法处理工业和日常废水、水产养殖、人体呼吸以及实验室用氧等各种供养场所。氧气是人类赖以生存的生命之气、养身之气，是维持人体生命活动的必要物质。氧与生命，可谓生死攸关。人一断空气（正常空气中含氧 20.95%，如表 1-1 所示），就会死亡。正常人 16 分钟需消耗氧气 250~400 毫升，一天约需 360~500 升氧气，而且是“现吸现用”，因此人就一刻不停地进行呼吸，吸空气中所含的 20.95% 氧气组分。一旦环境大气中含氧量不足，也就是供氧不足，人的脑功能就会马上下降，出现缺氧症状，“缺氧是万病之源”。空气中含氧量低于 18% 就不行，再低就会出现“缺氧症”。日本划分的界限为 16%，即当空气中氧浓度低于 10%~6%，人就会出现意识不清，严重的濒于死亡<sup>[9]</sup>。

表 1-1 空气组成<sup>[9]</sup>

组分	分子式	体积(%)	质量(%)
氮	N <sub>2</sub>	78.084	75.52
氧	O <sub>2</sub>	20.95	23.15
氩	Ar	0.93	1.282
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	0.03	0.046
水蒸气	H <sub>2</sub> O	31.51*10 <sup>-4</sup>	1.005*10 <sup>-4</sup>
氖	Ne	18*10 <sup>-4</sup>	12.5*10 <sup>-4</sup>
氦	He	5.24*10 <sup>-4</sup>	0.72*10 <sup>-4</sup>
氪	Kr	1.14*10 <sup>-4</sup>	3.3*10 <sup>-4</sup>
氙	Xe	0.08*10 <sup>-4</sup>	0.36*10 <sup>-4</sup>
氢	H <sub>2</sub>	0.5*10 <sup>-4</sup>	0.035*10 <sup>-4</sup>
甲烷、乙炔及其他碳氢化合物		3.53*10 <sup>-4</sup>	2.08*10 <sup>-4</sup>

缺氧是高海拔地区施工中遇到的首要难题。锡铁山所处地区平均海拔达到 3300 多米，环境大气压力为 70kPa，氧气分压最低为 13kPa，空气含氧量相当于平原地区含氧量的 70% 左右，再加上施工环境中粉尘多，机械装载、运输设备耗氧大，局部通风效果差，矿井巷道内含氧量更低。施工人员在这样的条件下承担繁重劳动，缺氧严重，其健康保障和生命安全受到威胁。因此，在高原非煤矿井地区进行人体环境指标及增氧技术模拟研究，为广大施

工人员提供方便、及时的供氧和吸氧条件，保障施工人员健康和生命安全，提高工作效率，具有重要意义。

## 二、研究目的

高海拔气候的特点是大气压力低，空气稀薄缺氧，气候干燥寒冷。人们在高海拔地区常发生头痛头晕、心脏扩大、消化不良、呼吸道黏膜损伤等高原病症，且发病率随着海拔增高而增高。高海拔地区的矿山井下空气，由于在采掘过程中受释放有害气体和矿岩灰尘等污染，缺氧程度更大，严重地影响矿工的身体健康和劳动生产效率。因此高原非煤矿井采掘工作面实施增氧技术是一个值得研究和亟待解决的问题。

高原非煤矿井采掘工作面实施增氧技术对保护矿工的身体健康、提高劳动生产率，对西部矿产资源可持续的开发具有重要的指导和示范作用。课题实施中的工程实践探索，将形成高海拔非煤矿区增氧系统示范基地。

## 三、研究意义

我国是一个人口众多、资源相对不足、正处于工业化阶段需要消耗矿产资源的发展中国家，面对即将来临的新世纪，矿产资源保障供应将是我国国民经济和可持续发展的最主要课题。因此，合理开发利用西部地区丰富的矿产资源无疑是我国西部大开发战略的重点，也是西部地区经济的主要增长点之一。

西部地区以其富饶的资源、独特的区位和一定规模的经济技术积累，在整个国民经济中占据越来越重要的地位。因此，开发西部是全国的一个大战略、大思路。合理开发利用西部地区的矿产资源对于我国21世纪经济的可持续发展具有重要的战略意义<sup>[10]</sup>。

## 四、主要研究内容

本书研究的主要内容如下：

- (1) 对各种制氧方法进行比较选择，选取合理的制氧工艺；
- (2) 在矿区现场对不同的供氧方案进行比较选择，选择技术可行、经济合理、安全可靠的供氧技术路线；
- (3) 根据矿区所在青藏高原的气候特点，确定增氧的海拔高度；
- (4) 根据高原低氧生理学方面的研究成果，确定吸氧量和吸入氧浓度；
- (5) 对实施增氧后的矿井火灾安全性进行研究，确保矿井环境安全；
- (6) 研究在矿区建立富氧室。

## 本章小结

锡铁山铅锌矿位于海西地区柴达木盆地北缘，海拔高度3050m。空气中氧分压比较低，矿山工作人员在从事繁重的体力劳动时，很容易出现高原缺氧反应。本章首先综述了高原缺氧状况对人体工效的影响，说明矿山工作人员在高原矿区工作时很难保证正常的劳动效率，容易发生高原病，危害工人的生命健康。因此，在高原地区非煤矿井中实施增氧措施，为广大施工人员提供安全的工作环境，保障施工人员健康，提高工作效率，具有重要意义。

关于解决高原缺氧问题，主要有两个方面：第一是使人适应高原环境，通过筛选工人、海拔阶梯适应，药物促习服等方法使人尽快适应高原环境；第二是使环境适应人，通过改善工作环境，使之更适合和满足人的工作需要。第一方面的做法在高原地区已经比较普遍，第二个方面是论文研究的重点。

# 第一章 文献综述

## 一、高原低氧及其影响综述

### 1.高原病及其机理概述

高原环境对人类的影响涉及大气物理、地球化学和生态等多种因素，其中大气压低、低氧、低温、低湿、太阳辐射强等因素往往综合作用于人体，其中低氧是关键性的因素<sup>[11]</sup>。地球周围的大气层（200千米厚）对地球表面所产生的压力（大气压）随着地势增高而逐渐减低。例如纬度45°的海平面大气压力为101.1kPa（760mmHg）。我国西藏拉萨地区海拔3658m，大气压力仅为61.95kPa（465.79mmHg）（如表2-1不同海拔高度的大气压力、氧分压、血氧饱和度、含氧量）所示。高原地区大气压力低，空气内氧分压相应减少，人的肺泡气、动脉血氧分压也相应减少。海拔5000m的高原地区大气压力为53.9kPa（405mmHg），氧分压11.3kPa（84.8mmHg），肺泡气氧分压仅有8.0kPa（60mmHg），动脉血氧分压约为7.3~7.7kPa（55~58mmHg）。由于高山地区空气稀薄，大气压力低，空气和肺泡气氧分压也相应低，导致人体缺氧。缺氧是高山病的主要病因。故进入高原地区的人主要受到缺氧的危害。如果不能适应高原的低氧环境，将发生高山不适应症即高山病。高山病包括：急性高山病（急性高山反应症、高山肺水肿、高山脑水肿）和慢性高山病（慢性高山反应症、高山性心脏病、高山性红细胞增多症、高山性高血压、高山性低血压）<sup>[12]</sup>。急性高原病平均发生率约为39.5%，但随着海拔高度

表2-1 不同高度的大气压力、氧分压、血氧饱和度

海拔 (km)	0	1	2	3	4	5	6
大气压 (mmHg)	760	674	594	526	462	405	345
空气氧分压 (mmHg)	159	140	125	110	98	85	74
肺泡气氧分压 (mmHg)	105	90	70	62	50	45	40
血氧饱和度 (%)	95	94	92	90	85	75	70
含氧量 (g/m <sup>3</sup> )	299.3	265.5	234.8	209.63	182.08	159.71	141.69

升高发生率也明显提高，如海拔4000m以上就高达86.14%。慢性高原病患者

率2.80%，4000m以上可达6.63%。我国将在高原低氧环境下从事职业活动所致的急性高原肺水肿、急性高原脑水肿、慢性高原心脏病和慢性红细胞增多症定为职业性高原病<sup>[13]</sup>。

高原病的发病根本原因是高原环境的特殊性所致，低气压、低氧、寒冷、劳累、情绪紧张、心理素质差、恐惧、上呼吸道感染、饮酒等是诱发因素<sup>[14]</sup>。

## 2.国内外研究现状

从生物学和医学角度看，“高原”是指海拔3000m以上的广阔地区。因为一部分人到达这个高度时，不能立即适应这里的低气压、低氧为特征的高原环境，而出现“高原反应”，如果超过这个高度，“高原反应”在临床上的表现会更为明显，甚至可能发生“高山病”。地球上两个最高的高原为青藏高原和安第斯山区，是高山病的高发区，也是高原医学的科研现场和基地。国外对安第斯山区自20世纪以来，做了长期卓有成效的研究，开创了现代高原医学研究的先河。我国50年代起对青藏高原为主要对象的高原医学及高山病防治进行研究，随着高原的经济开发和国防建设的需要，研究工作不断深入，获得了丰硕的成果。这不仅有助于西部开发和青藏铁路西进，也有助于青藏高原医学的研究和学术交流<sup>[15]</sup>。

研究证明<sup>[16]</sup>：在海拔4000~5000m，增加氧浓度1%可减少海拔高度300m，提高氧浓度5%，则可降低相当海拔大约3000m；在3800m高原现场试验表明，夜间小幅度提高室内氧浓度（O<sub>2</sub>含量24%），可改善睡眠和第二天的工作效率，提高思维、行为和工作能力。在3700m建立富氧室，结果表明是一种简单、经济有效的高原供氧途径<sup>[17]</sup>，能明显增强移居者心肺功能，提高动脉血氧饱和度，促进高原习服，提高人体劳动能力和健康水平。

## 3.高原习服机理

高原习服是指平原人进入高原后，由于低氧刺激，机体以自身的生理调节而发生的一系列代偿性反应，如肺通气增强、红细胞和血红蛋白增加、血红蛋白氧解离曲线右移、毛细血管增生等，可改善机体供氧和利用氧的能力，以适应高原低氧环境，最终达到新的内外环境统一的过程称之为习服。世居于海拔3000m以上地区的人群，在生化、生理、解剖等方面存在着世居于平原的人群所没有的高原适应性调整<sup>[17, 18]</sup>。

平原人进入高原低氧环境后，机体在神经——体液调节下，解剖和生理



功能发生一系列可逆性和非遗传性的改变，使之能继续生存，这一代偿性适应过程即为高原习服，这也是机体内环境由不平衡最终达到内外环境协调统一的过程。机体对高原低氧的反应既有系统器官、组织水平的，也有细胞和分子水平方面的变化，是非特异性和多层次的整体综合效应。机体对急性缺氧主要通过过度通气、血流加快、血液重新分布、红细胞增多、氧解离曲线右移和神经——体液调控等来增加对细胞的供氧，提高氧传递机能系统的能力和效率，即器官组织水平的习服；而机体对慢性缺氧则主要是通过核酸和蛋白质的合成、酶系统活性和线粒体功能的适应性改变来提高组织和细胞对氧的利用能力，此为细胞分子水平的习服。机体通过提高供氧和有效地利用氧的反应过程，逐渐与外部低氧环境达到平衡以适应高原<sup>[19]</sup>。所以，研究高原低氧对机体的影响、低氧适应机制及低氧防护措施势在必行，这不仅对顺利实施西部大开发具有深远的历史意义，对国计民生也具有重要的现实意义，而且对心肺等疾患引起的缺氧症防治也具有重要的理论意义和临床实际意义<sup>[20]</sup>。

大多数平原人在由平原进入较低海拔的高原后，通过机体的代偿适应性反应可以获得对高原环境的良好习服，能够正常工作、生活，但也有一部分人，在由平原进入高原后，由于上述代偿适应性反应不足或过于强烈而发生习服不良。从而出现各种急、慢性高原病。研究认为，人体对高原环境具有强大的习服适应能力，在一定限度内通过采取适当的措施和手段可以加快习服过程，促进高原习服<sup>[21]</sup>。

#### 现阶段高原习服的主要方法有：

(1) 阶梯习服：阶梯习服是指在进入高原的过程中，不是一次性抵达，而是阶梯上升，即平原人先在较低海拔的高原上居留一定时期，使机体对较低海拔的高原有一定的适应之后，再上到中等高度地区并停留一段时间，最后到达预定高度。阶梯习服的原则已被广大的高原医学工作者所接受，并广泛应用于登山运动员的训练和实际的登山活动中。

(2) 适应性运动锻炼：适应性运动锻炼是目前国内外公认的预防急性高原病、促进高原习服的有效措施。人们在平原坚持经常性的大运动量、耐力性的体格锻炼，有助于提高机体对高原环境的习服能力。如能结合阶梯习服，特别是组织好在海拔2000~2500m地区的适应性体格锻炼，则促习服效果更为显著，这是目前国内外公认的预防急性高原病、促进高原习服的有效措施。此外，有研究结果表明，平原人在进入高原前和在进入高原后坚持做深呼吸运动及呼吸操锻炼也能加速机体对高原的习服。