

缺氧环境

制氧供氧技术

刘应书 张 辉 刘文海 李永玲 著



QUEYANG
HUANJING
ZHIYANG
GONGYANG
JISHU



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

缺氧环境制氧供氧技术

刘应书 张 辉 刘文海 李永玲 著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 简 介

缺氧环境制氧供氧技术是一门新的边缘技术,主要研究因海拔升高、场所封闭、环境污染等因素导致形成的缺氧环境下增加和补充氧气的方法、工艺、装置设备、安全控制等方面的理论与技术。本书共分 11 章,包括人体缺氧机理、缺氧危害、缺氧环境、制氧方法等基础知识;微型变压吸附制氧技术;高海拔变压吸附制氧技术;室内富氧安全及其控制技术。

本书可供气体分离、人工环境、职业安全与健康、医疗保健、应急救援、高原医学、高原医疗卫生保障、高原资源开发等领域有关的教师、本科生、研究生、科研人员、工程技术人员以及管理决策人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

缺氧环境制氧供氧技术/刘应书等著. —北京:冶金工业出版社,2010. 11

ISBN 978-7-5024-5356-5

I. ①缺… II. ①刘… III. ①氧气—制造 ②供氧系统 IV. ①TQ116. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 182593 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 楠 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5356-5

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 11 月第 1 版,2010 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm;20.5 印张;398 千字;313 页

62.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

人类对氧气的依赖如同鱼离不开水,一旦缺氧,生活质量严重下降,甚至危及生命。通常,在一个标准大气压下,环境大气中的氧含量是20.9%,这也是人类经过长期进化适应生存的正常氧浓度。一直以来,人们认为空气中氧气量小于18%为缺氧状态,但是,在该缺氧环境中进行作业仍存在潜在的危險,因此,国家标准《缺氧危险作业安全规程》(GB8959—2006)对“缺氧”的定义重新进行了调整,将缺氧危险作业氧气浓度由18%提高到19.5%。事实上,因海拔升高、场所封闭、环境污染等因素形成的缺氧环境一直严重影响着人民的正常生活和职业安全健康,阻碍了我国经济,尤其是西部地区经济的发展。因此,如何为缺氧环境增补氧气成为以人为本的现代经济社会亟需研究解决的新课题。

作者与同事们自1999年以来一直致力于缺氧环境制氧供氧技术的科学研究和工程应用,先后完成了“小型富氧技术研究开发”、“SARS患者专用变压吸附制氧机微型化原理研究”、“新型空气分离器研究开发”、“青藏铁路风火山隧道制氧供氧系统研制与应用”、“青藏铁路沱沱河制氧站研制与应用”、“青藏铁路雁石坪制氧站研制与应用”、“青藏铁路运营期间卫生保障及高原病防治”、“相对封闭环境供氧模拟技术研究”、“低气压条件下安全富氧浓度研究”等二十多项课题的研究开发工作。在微型化关键技术研究方面,创立了单阀切换同路节流反吹的两塔流程,发明了分段式、套筒式等高效微型吸附器,研制了微型无油空气压缩机等关键部件,成功开发了移动式个人制氧机、便携式制氧机等缺氧防护系列产品。在高原制氧技术研究方面,通过高原现场的实验研究,揭示了不同海拔地区氧气浓度与产氧量的关系,取得了变压吸附制氧装置的高原效率曲线和气源容量匹配曲线,为高海拔地区变压吸附制氧提供了设计依据。在相对封闭环境内氧气增补安全控制研究方面,深入研究了不同条件下相对封闭环境内氧气增补浓度的变化规律;系统地研究了不同海拔高度不同氧气浓度条件下可燃物的燃烧行为,发现高海拔地区氧气增补至与海平面氧含量相当时,存在物质自燃的重大隐患,揭示

了增补氧气安全浓度随海拔高度变化的规律。在缺氧环境氧气增补设备关键技术方面,研发了有压吸附、高原低气压直接解吸的制氧新工艺(LPSA),成功研制了世界上首台适合于海拔高度5000 m的分子筛制氧装置、高海拔隧道工作面弥散供氧装置和隧道氧吧车、相对封闭环境增补氧设备及安全浓度监控系统,形成了缺氧环境供氧工艺、设备与安全监控成套技术。这些研究成果已经得到了实际推广应用。其中微型变压吸附制氧系列技术推广至全国多个生产企业,形成了年产30余万台的微型变压吸附制氧机民族产业;高原变压吸附制氧系列成果推广应用至青藏铁路建设全线,确保了青藏铁路建设的顺利进行,为创造青藏铁路15万建设大军高原病零死亡的世界奇迹奠定了技术基础。相关成果先后获得了“国家科技进步特等奖”、“中国高等院校十大科技进展”、“中国铁道学会科学技术一等奖”、“国家安全生产科技成果二等奖”、“教育部科技进步二等奖”等多项奖励。

在多年的相关研究开发和工程应用过程中,作者及同事们掌握了缺氧环境氧气增补的原理和知识,积累了较为丰富的第一手资料和工作经验。本书是在这些基础上经过系统整理、提炼编撰而成的。全书共分11章。第3、4、5、6章分别从原理、工艺、设备以及可靠性等方面系统地介绍了微型变压吸附制氧技术;第7、8、9章对高原变压吸附制氧技术及其应用进行阐述和分析;第10、11章介绍室内富氧及其安全控制技术。为了便于读者系统掌握和了解,本书在第1章介绍了人体缺氧机理、缺氧危害和常见的缺氧环境;第2章介绍分析对比了深冷法、变压吸附法、膜分离法和化学制氧法等。

本书力求浅显易懂,内容详实,做到新颖性、系统性、实用性有机结合,以适用于气体分离、人工环境、职业安全与健康、医疗保健、应急救援、高原医学、高原医疗卫生保障、高原资源开发等领域有关的教师、本科生、研究生、科研人员、工程技术人员以及管理决策者参考。如果本书能为普及国民氧保健意识、提高健康水平、推动缺氧环境制氧供氧领域的理论和技术进步做点贡献,作者甚感欣慰和自豪。

本书由刘应书主笔并统稿完成,张辉完成第1~5章的编撰,刘文海和李永玲负责审查和修改工作。在本书研究工作的完成和素材的积累过程中,得到了国家自然科学基金委、北京市教委、铁道部、中国工业气体工业协会、中国通用机械工业协会气体分离设备分会、北京中关村国

际环保产业促进中心、中铁二十局集团公司、中铁三局集团公司、中铁四局集团公司、青藏铁路公司、江苏万泰科技股份有限公司、佛山市广顺电器有限公司、北京德海尔医疗技术有限公司、北京科技大学等单位的大力支持和帮助。吴天一院士、王梦恕院士、孙永福院士、姬永兴高级工程师、肖华军教授、梁渤洲主任医师、徐云博士、侯庆文博士、况成明高级工程师、丁守全高级工程师、段晋庆主任医师等专家给予了宝贵的指导和支持。作者在此表示衷心的感谢。

在撰写本书的过程中,作者参阅了相关图书和文献资料,从中汲取了知识营养和精华,在此深表谢意。

限于作者水平,错误不足之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2010年5月

目 录

1 缺氧与缺氧环境	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 血氧分压	1
1.1.2 血氧容量	2
1.1.3 血氧含量	2
1.1.4 血氧饱和度	3
1.1.5 动-静脉氧差	3
1.1.6 肺泡气-动脉血氧分压差	3
1.1.7 动脉血二氧化碳分压	4
1.1.8 P50	5
1.1.9 基本肺容积	5
1.1.10 肺容量	5
1.1.11 肺通气量	6
1.2 基础生理学	7
1.2.1 人体需氧量	7
1.2.2 缺氧与肺通气量	7
1.2.3 缺氧与生理反应	9
1.3 缺氧	11
1.3.1 缺氧概念	11
1.3.2 缺氧机理	12
1.3.3 缺氧的分类	21
1.3.4 缺氧的危害	25
1.3.5 缺氧的判断	28
1.4 缺氧环境	30
1.4.1 低氧浓度缺氧环境	31
1.4.2 空气稀薄缺氧环境	35
参考文献	36
2 制氧方法	38
2.1 深冷法	38

2.1.1 深冷制氧原理	38
2.1.2 深冷制氧工艺流程	42
2.1.3 深冷制氧设备	46
2.2 变压吸附法	50
2.2.1 工作原理	50
2.2.2 吸附剂	51
2.2.3 制氧工艺	52
2.2.4 制氧设备	57
2.3 膜分离法	58
2.3.1 膜分离制氧原理	59
2.3.2 膜材料	60
2.3.3 富氧工艺流程	64
2.4 化学试剂法	65
2.4.1 过氧化物与超氧化物	65
2.4.2 氯酸盐	68
2.5 电解法	74
2.5.1 电解纯水	74
2.5.2 电解酸性或碱性溶液	75
2.5.3 SPE 电解水	75
2.6 氧泵	80
参考文献	81
3 变压吸附制氧微型化	83
3.1 微型化的现状	83
3.1.1 家用制氧机	84
3.1.2 车载制氧	87
3.1.3 便携式制氧机	90
3.1.4 机载制氧	90
3.2 微型化的技术要求	95
3.2.1 民用产品对微型化的技术要求	95
3.2.2 军用产品对微型化的技术要求	97
3.3 微型化的主要方法和途径	99
3.3.1 开源节流	99
3.3.2 简化工艺	106
3.3.3 高效吸附剂	108
3.3.4 高度集成	110

3.3.5 轻质材料	114
参考文献	115
4 微型变压吸附制氧系统	118
4.1 空气过滤器	118
4.2 空气压缩机	120
4.3 热交换器	121
4.4 吸附器	123
4.4.1 吸附器结构	123
4.4.2 吸附器两端间隙	125
4.4.3 高径比	128
4.4.4 布气装置	131
4.4.5 分子筛填装	134
4.4.6 压紧部件	135
4.5 阀门	136
4.5.1 控制阀门	136
4.5.2 单向阀门	140
4.6 储氧罐	142
4.7 消声器	143
4.7.1 消声原理	144
4.7.2 消声部件	145
4.8 控制系统	149
参考文献	150
5 微型变压吸附制氧工艺及参数	152
5.1 微型变压吸附制氧工艺	152
5.1.1 Skarstrom 循环	152
5.1.2 单节流反吹流程	153
5.1.3 双节流反吹流程	154
5.1.4 均压流程	154
5.2 吸附时间	156
5.2.1 PSA 过程	156
5.2.2 VPSA 过程	157
5.3 反吹	159
5.3.1 反吹流程和无反吹流程的对比	160
5.3.2 增压反吹与恒压反吹的对比	161

5.3.3	反吹气量对氧气浓度的影响	162
5.3.4	不同吸附时间下反吹气量与氧气体积分数的关系	163
5.3.5	不同节流阻力下反吹气量和反吹比与氧气浓度的关系	164
5.3.6	不连续反吹的影响	165
5.4	清洗	168
5.4.1	清洗时间对产氧浓度的影响	170
5.4.2	清洗时间对吸附压力的影响	171
5.5	均压	171
5.5.1	高径比对最佳均压时间的影响	172
5.5.2	均压时间对最佳切换压力的影响	173
5.5.3	均压时间对氧气浓度的影响	174
5.5.4	均压对吸附塔进出口压力的影响	174
5.6	吸附压力	176
5.6.1	吸附器压力变化曲线	178
5.6.2	均压时间对压力曲线的影响	179
5.6.3	反吹阻力对压力曲线的影响	180
5.6.4	储气罐内压力的变化	181
5.7	解吸压力	181
5.7.1	真空解吸环境对制氧效果的影响	183
5.7.2	真空解吸条件下进气压力对氧气浓度的影响	185
5.7.3	真空解吸条件下产氧量对氧气浓度的影响	185
5.7.4	真空解吸条件下均压时间对氧气浓度的影响	186
	参考文献	186
6	微型制氧机可靠性风险分析	188
6.1	风险管理	188
6.2	可靠性分析方法	190
6.2.1	故障树分析	190
6.2.2	失效模式与效应分析	193
6.3	微型制氧机的故障树分析	197
6.4	微型制氧机的失效模式和效应分析	198
6.4.1	系统的定义	198
6.4.2	FMEA 安全性特征	200
6.4.3	FMEA 可能危害的判定	201
6.4.4	FMEA 危害的风险性估计	203
	参考文献	206

7 高原环境对变压吸附制氧的影响	207
7.1 高原环境补氧的必要性	207
7.2 高原制氧方法的选择	211
7.3 高原低气压对变压吸附制氧的影响	212
7.3.1 标准大气随海拔高度的变化规律	212
7.3.2 低气压对压缩机的影响	216
7.3.3 低气压对吸附剂性能的影响	221
7.4 高原环境温度对变压吸附制氧的影响	222
7.4.1 温度对分子筛吸附氮气的影响	222
7.4.2 温度对分子筛解吸水分的影响	225
参考文献	226
8 高海拔变压吸附制氧站研制	227
8.1 高海拔变压吸附制氧实验研究	227
8.1.1 高海拔地区产氧流量与氧浓度的关系	229
8.1.2 高海拔地区变压吸附制氧效率	230
8.1.3 高海拔地区变压吸附制氧气源容量匹配曲线	231
8.1.4 气源温度的控制	232
8.1.5 分子筛优选研究	233
8.2 高海拔变压吸附制氧站	234
8.2.1 高海拔变压吸附制氧工艺流程	234
8.2.2 高海拔变压吸附制氧系统	235
参考文献	243
9 高原隧道施工供氧	244
9.1 缺氧等效高度	244
9.2 高原隧道供氧方式	246
9.2.1 隧道通风供氧	246
9.2.2 施工个体供氧	250
9.2.3 工作面局部送风供氧	251
9.2.4 工作面弥散供氧和洞内氧吧	254
9.3 隧道弥散供氧装置	254
9.4 隧道氧吧车	255
9.5 高原隧道施工供氧效果	259
参考文献	263

10 相对封闭环境增氧	265
10.1 供氧方式与模型计算.....	266
10.1.1 弥散供氧模型	266
10.1.2 算例分析	269
10.2 缺氧环境增氧设备及流程.....	270
10.2.1 除尘	271
10.2.2 除湿与加湿	272
10.2.3 制冷与加热	274
10.2.4 增氧	276
10.3 增氧的效果.....	276
10.4 二氧化碳的去除.....	279
10.4.1 化学吸收	279
10.4.2 物理吸收	280
10.4.3 吸附分离	280
10.4.4 Sabtier 还原法	281
10.4.5 生物降解	281
10.5 安全监控技术.....	282
10.5.1 氧传感器及放大电路	282
10.5.2 系统结构设计	285
10.5.3 系统结构硬件	287
10.5.4 系统软件设计	289
参考文献.....	291
11 室内富氧安全	292
11.1 室内富氧安全研究现状.....	293
11.2 燃烧速率测试装置.....	295
11.2.1 气源	295
11.2.2 配气系统	296
11.2.3 燃烧室	296
11.2.4 点火装置	297
11.2.5 定位装置	298
11.3 大气压对着火点的影响.....	299
11.4 火焰的传播速度.....	301
11.4.1 大气压力对火焰传播速度的影响	303
11.4.2 氧气体积分数对火焰传播速度的影响	304

11.4.3 富氧对火焰传播速度的影响	305
11.4.4 温度对火焰传播速度的影响	307
11.5 不同海拔高度下的富氧效果分析	308
11.5.1 室内富氧的安全氧浓度上限	309
11.5.2 室内富氧安全分析	311
参考文献	312

1 缺氧与缺氧环境

人类对氧气的依赖如同鱼离不开水,但是,由于海拔升高、空间封闭、气流阻塞以及生理特征等因素引起人体外部环境或内部环境出现短时急性缺氧或长期慢性缺氧,导致机体摄氧量减少,疾病发生率增加,生活质量严重下降,甚至危及生命。目前,因缺氧导致的疾病已涉及妇产科^[1]、儿科、神经科、五官科、骨科、整形科、皮肤科、肿瘤科、传染病学以及老年病学科等。与缺氧有关的研究扩展至航天航空、卫生保障^[2]、潜水作业、医疗保健、急救康复等领域。如何预防缺氧、应对缺氧成为目前各项研究新的发展方向,如高压氧疗^[3]、高氧压手术等。另一方面,人们对缺氧的认识越来越深刻,补氧意识日益增强,通过吸氧可以起到消除疲劳、增强记忆力、抗衰老、提高机体免疫力以及美容养颜、优生优育的作用^[4]。因此,近年来,氧保健又以迅猛的速度进入大众生活,正像人们对保健品的热情正在逐步取代对药品的热情一样,越来越多的人开始接受氧保健的理念,家庭氧疗成为时尚,各式各样的氧疗设备应运而生^[5],尤其是家用氧气浓缩器,已开始作为家电产品走向千家万户。氧保健的兴起代表人类文明的又一进步。因此,人们需要更加科学地了解人体缺氧机理和所处的缺氧环境,这对于改善人体缺氧状况、预防缺氧事故、配合疾病治疗等都具有重要的作用。

1.1 基本概念

缺氧与补氧是“病”与“药”的关系,即缺氧是人体产生的一种病态,只有通过各种补氧措施,即服用氧这种“药物”才能得到治疗。而补氧具有双重作用,如果使用不当,轻者产生副作用,严重时可出现氧中毒。例如,人的颈动脉窦化学感受器是通过感受氧压而反射性兴奋呼吸中枢的,如果患者的呼吸是靠这一反射兴奋维持(如肺心病),吸入高浓度的氧则抑制这一反射,抑制患者的自主呼吸。另外,高浓度氧吸入后,使肺泡内氮气量减少,当有支气管阻塞时,肺泡内氧被肺循环血迅速吸收,从而产生肺不张。长时间吸入高浓度的氧,造成氧中毒,使肺部水肿,肺间质纤维化,因此吸氧要适度。由此可见,要及时地判断人体缺氧,同时也要安全地吸氧补氧,这些都离不开对人体血氧参数和肺功能参数的正确理解与掌握,下面对常用的基本概念进行介绍。

1.1.1 血氧分压

血氧分压(partial pressure of oxygen, PO_2)是指溶解在血液中的氧分子所产生

的张力或压力,故又称血氧张力,是由氧(O_2)这种气体产生的压力(pressure),所以用符号“ PO_2 ”表示。它分为动脉血分压和静脉血分压,动脉血分压用“ PaO_2 ”表示,其中字母“a”是动脉英文单词“artery”的首字母;静脉血分压用“ PvO_2 ”表示,其中字母“v”是静脉英文单词“vein”的首字母。 PaO_2 取决于吸入气体的氧分压和肺的呼吸功能,同时,也是氧向组织弥散的动力因素,它作为缺氧的指标较血氧饱和度更为敏感^[6]。在一个标准大气压下,正常人的 PaO_2 约为12.0~13.0 kPa(90~100 mmHg)。 PaO_2 降低即为低氧血症,轻度缺氧时, $PaO_2 < 10.4$ kPa;中度缺氧, $PaO_2 < 7.98$ kPa;重度缺氧, $PaO_2 < 5.32$ kPa; PaO_2 低于6.65 kPa(50 mmHg)值时,将危及生命。 PaO_2 受年龄、血氧中二氧化碳分压的影响,一般情况下,老年人的 PaO_2 低于正常值,如表1-1所示。

表 1-1 低氧血症程度划分

程 度	PaO_2 /kPa	
	青 年	老年(60 岁以上)
轻 度	<10.64	<9.31
中 度	<7.98	<6.65
重 度	<5.32	<5.32

静脉血氧分压(PvO_2)反映了内呼吸功能的状态,在静息状态下,正常参考值为2.66~5.85 kPa(20~44 mmHg)。

肺泡内的氧分压是指肺泡内气相(atmosphere)氧产生的压力,为了区别于动脉血氧分压和静脉血氧分压,用“Atmosphere”单词的首字母“A”表示,即 PAO_2 。

1.1.2 血氧容量

血氧容量(oxygen binding capacity, CO_{2max})是指100 mL血液中血红蛋白(Hb)所能结合的最大氧量,它表示与单位体积血液的血色素相结合的氧气量。血氧容量高低取决于血红蛋白量和质的影响,反映血液携氧的能力。正常每100 mL血液含15g Hb,每克血红蛋白可结合1.34 mL氧,故100 mL血液中血氧容量为20 mL(1.34 mL/g × 15 g)。

1.1.3 血氧含量

血氧含量(oxygen content, CO_2)是指100 mL血液中实际含有氧的毫升数,包括血浆中物理溶解的氧和与Hb化学结合的氧。正常情况下,在血液中运输的 O_2 中的97%是以与红细胞内血红蛋白相结合的方式存在的,其余3%以单纯物理溶解方式存在,所以,血氧含量主要是Hb实际结合的氧量。成年人动脉血氧含量(CaO_2)通常为19 mL/dL(1 dL=100 mL),静脉血氧含量(CvO_2)约为14 mL/dL,动

- 静脉血氧含量差约 5 mL/dL。

1.1.4 血氧饱和度

血氧饱和度 (oxygen saturation, SO_2) 是指与血红蛋白 Hb 所结合的化学氧百分数。

$$SO_2 = \frac{\text{氧容量}}{\text{氧含量}} = \frac{\text{氧含量} - \text{物理溶解的氧量}}{\text{氧含量}} \times 100\%$$

正常情况下, 动脉血氧饱和度 (SAO_2) 约为 95%, 静脉血氧饱和度 (SvO_2) 约为 75%。血氧饱和度主要取决于氧分压, 与 PO_2 之间呈氧合血红蛋白解离曲线的关系。此外, 红细胞内 2,3-二磷酸甘油酸 (2,3-DPG) 增多、酸中毒、 CO_2 增多及体温增高时, 可使 Hb 与 O_2 的亲合力降低, 以致在相同氧分压下血氧饱和度降低。

1.1.5 动-静脉氧差

动-静脉氧差 ($A-VdO_2$) 为动脉血氧容量 (CaO_2) 减去静脉血氧容量 (CvO_2) 的差值, 差值的变化主要反映组织从单位容积血液内摄取氧的多少和组织对氧利用的能力。正常情况下, 动脉血与混合静脉血的氧差为 2.68 ~ 3.57 mmol/L。当血液流经组织的速度明显减慢时, 组织从血液摄取的氧可增多, 回流的静脉血中氧含量减少, $A-VdO_2$ 增大; 反之, 血流速度增快时, 组织从血液摄取的氧减少, 利用氧的能力明显降低, 使回流的静脉血中氧含量增高, $A-VdO_2$ 减小。此外, Hb 与氧的亲合力异常增强、Hb 含量减少等因素也可以引起 $A-VdO_2$ 减小。

1.1.6 肺泡气-动脉血氧分压差

根据 PaO_2 来评价肺泡换气功能是不够的, 必须计算肺泡氧分压和动脉氧分压差, 用 $PA-aO_2$ 表示。肺泡气-动脉血氧分压差是指肺泡氧分压 (PAO_2) 与动脉血氧分压 (PaO_2) 的差值, 其计算方法如下所示:

$$PA-aO_2 = PAO_2 - PaO_2 = (PIO_2 - PACO_2 \times 1/R) - PaO_2$$

$$PIO_2 = (PB - PH_2O) \times FIO_2 = (100 - 6.3) \times FIO_2$$

式中 PIO_2 ——吸入气氧分压, kPa;

PB ——1 标准大气压, 100 kPa;

PH_2O ——人体正常体温时水的饱和蒸气压, 37℃时为 6.3 kPa;

FIO_2 ——吸入气氧浓度, %;

R ——呼吸商, 0.8;

$PACO_2$ ——肺泡 CO_2 分压, 与动脉血 CO_2 分压 ($PaCO_2$) 相等, kPa;

PaO_2 ——动脉血氧分压, 可以测得。

正常情况下, 吸空气时 $PA-aO_2$ 约为 1.333 ~ 2.0 kPa (10 ~ 15 mmHg); 吸纯氧

时 $PA-aO_2$ 约为 $3.32 \sim 10.0 \text{ kPa}$ ($25 \sim 75 \text{ mmHg}$)。 $PA-aO_2$ 随年龄变化较大,正常参考值为:21~40岁, $2.100 \text{ kPa} \pm 0.868 \text{ kPa}$ ($15.79 \text{ mmHg} \pm 6.53 \text{ mmHg}$);41~83岁, $3.351 \text{ kPa} \pm 2.03 \text{ kPa}$ ($25.20 \text{ mmHg} \pm 15.28 \text{ mmHg}$)。 $PA-aO_2$ 值随年龄增长而升高,这与老年人 PaO_2 下降有关。将40岁以上的正常参考值定为 3.325 kPa (25 mmHg),健康老年人可达 4.987 kPa (37.5 mmHg)。

影响 $PA-aO_2$ 的因素较多,吸空气时受解剖分流(占2%~3%)、气/血比失调(主要影响因素)和弥散障碍的影响;其次是年龄、体位、心排量、氧离曲线、闭合气量等。例如,通气不足的患者,虽有 PaO_2 下降,但 $PA-aO_2$ 正常;而由于肺内动静脉分流(动脉与静脉之间直接相通的管道)时的 $PA-aO_2$ 下降,吸纯氧也难以纠正;有弥散障碍(由于肺泡膜面积减少或厚度增加而引起的气体弥散量减少)、通气/血流比例失调时,除 PaO_2 下降外,尚有 $PA-aO_2$ 增高,具体表现在以下几点:

(1) 受肺泡内弥散因素的影响,肺泡弥散能力又受肺泡气与肺循环血气之间的分压差,以及弥散气体在肺泡间质中的溶解度和肺泡弥散面积的影响。例如肺不张、肺水肿、肺间质纤维化等疾病都可影响肺泡气和肺循环血的气体交换,使 $PA-aO_2$ 升高。

(2) 进入肺部的气体并不完全交换。在呼吸道终末细支气管以上的部分不参与气体交换。这部分称为解剖学分流或死腔,正常人约为2%。当分流增大时, PaO_2 就下降, $PA-aO_2$ 升高。在临床上抢救窒息、呼吸衰竭等进行气管插管和气管切开就是为了尽量减少分流,提高 PaO_2 。

(3) 通气与血流比,在安静状态下成人的通气与血流比(气/血)为4/5,若气/血比失调则 $PA-aO_2$ 升高,如肺部感染、肺淤血等。因此, $PA-aO_2$ 是换气功能的重要指标。

1.1.7 动脉血二氧化碳分压

动脉血二氧化碳分压($PaCO_2$)是指物理溶解在血浆中的 CO_2 所产生的张力。正常参考值为 $4.40 \sim 6.27 \text{ kPa}$ ($33 \sim 47 \text{ mmHg}$),是呼吸性酸碱指标。静脉血 CO_2 分压($PvCO_2$)正常参考值为 $4.65 \sim 6.57 \text{ kPa}$ ($35 \sim 49 \text{ mmHg}$)。

当呼吸道通气障碍、肺部气体交换不良时引起血液中 CO_2 增加。 $PaCO_2$ 超过 6.65 kPa (50 mmHg)即称为呼吸性酸中毒;当某种原因引起呼吸加深加快,大量 CO_2 被呼出,血液中 $PaCO_2$ 降低,低于 4.40 kPa (33 mmHg),即为呼吸性碱中毒。

当体内产酸过多和酸清除障碍时引起代谢性酸中毒。因此血液中 $[HCO_3^-]$ 减少,呼吸发生代偿,血液 $PaCO_2$ 亦可相应地降低,此时不一定是呼吸性碱中毒,而是调整代偿现象。

当体内碱性物质过多或酸性物质丢失过多而引起代谢性碱中毒时,呼吸可调整,使呼出的 CO_2 减少, $PaCO_2$ 增高。此时亦不一定是呼吸性酸中毒,亦是调整代