

潜水气体手册

俞海泉 主编



海洋出版社

潜水气体手册

主编：俞海泉

编者：俞海泉 胡明洋

陈加法 杨德恭

张仁存 刘富友

黄永新 林颂欣

海洋出版社

1994年·北京

内 容 简 介

本书介绍了潜水中使用的气体及有关气体的物理知识、潜水时储气量和用气量的计算与估算、潜水用混合气体的配制、气体分析技术、潜水呼吸用氮的回收与精制技术、配气中常用设备。另外，附有潜水呼吸气体的纯度标准、配制5%~20%氮-氧混合气纯氮加氧的23幅检索表及氮-氧混合气配制、使用记录表等，有插图60余幅，便于读者认识与理解。本书从实际使用出发，结合理论进行了总结，为我国潜水现场有用的配气工具书。

本书主要适用于从事潜水（高气压）事业的教学、研究、医疗、工程技术人员。

责任编辑：钱晓彬

(京)新登字087号

潜水气体手册

主编：俞海泉

编者：俞海泉 胡明洋 陈加法 杨德恭

张仁存 刘富友 黄永新 林颂欣

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

新华书店北京发行所发行 马池口印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：9.75 字数：210千字

1994年4月第一版 1994年4月第一次印刷

印数：1—1000

*

ISBN 7-5027-3894-0/U·37 定价：8.00元

前 言

随着海洋的开发，特别是近海石油和天然气的开采，潜水事业亦得到了迅速的发展，从普通的空气潜水发展到混合气潜水，从一般的常规潜水发展到大规模的饱和潜水。对潜水员而言，呼吸气体的质量和成份合宜与否是成败甚至生死攸关的决定因素，潜水用混合气体的配制越来越成为大深度潜水的一项重要的重要的医疗保障工作。配制供潜水员呼吸用气，从用气量的估算，配制的计算到配制的操作，浓度的分析及使用的验证都十分重要，它是现场潜水医疗保障工作中一项极为重要的内容，作为潜水员、潜水医生要掌握，潜水配气人员更要熟悉，但目前尚缺乏这样的专门书籍。为了便于广大潜水医生、潜水员及有关配气人员和其他潜水工作人员的工作、学习，我们结合了军队与地方潜水部门的实际和目前潜水事业发展的状况，结合了大量的实验室的实践与体会，参考了《美国海军潜水气体手册》(U.S. Navy Diving Gas Manual)及其他国内外有关资料，在1989我们编印《潜水配气手册》的基础上进行了修增，写成了这本潜水配气工具书。

本书除介绍潜水常用气体及有关物理知识外，着重介绍潜水储气量和用气量的计算和估算；潜水用混合气体的配制；气体分析技术；氮气的回收和精制技术及配气的常用设备等。书中还列举了大量的例题，都是根据我们历次潜水现场和实验室工作中的实例经整理所编。潜水配气是一项涉及面很宽的技术，既要熟悉潜水医学知识，又要掌握各种仪器设备的

使用技巧，既有物理现象，又有化学原理。由于上述原因及我们知识和水平所限，书中介绍的内容有一定的局限性，需在今后的实践中不断提高和充实，在书中有错误或不妥之处望读者批评指正。

本书的出版得到了第二军医大学海医系和海军司令部航海保证部领导的支持与关心。在1989年编印的《潜水配气手册》的初稿得到过第二军医大学海医系潜水生理教研室顾明元、马文彬、杭荣椿副教授和海军医学研究所蒋建勇、王世华、韩海文等同志的审修，封面设计得到过第二军医大学海医系章承忠教授的指导，在此再次表示谢意。另外也得到了海军司令部航保部张诗温高级工程师及海洋出版社的同志们大力支持与无私的帮助，在此一并表示谢意。

编 者

1993年12月于上海

说 明

根据水的相对密度计算，每10m水深正好为一个大气压的压力 (1kgf/cm^2 ， 0.1MPa 或 100.0kPa)，所以在潜水部门均习惯以 1kgf/cm^2 气压为水下10.0m的压力 (1.0m为 0.1kgf/cm^2) 进行计算，20.0m为 2kgf/cm^2 、100.0m为 $10.\text{kgf/cm}^2$ …。根据国务院“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”的规定，压力计量单位以Pa (帕) 为标准计量单位，考虑到潜水部门现有设备的实际状况，为便于读者阅读交流及避免实际工作时的误操，我们在本书中的压力的标准计量单位 (Pa、kPa、MPa) 后面均加了一个 kgf/cm^2 的括号，作为过渡。

例如： 15.0MPa (150.0kgf/cm^2)，
 100.0kPa (1.0kgf/cm^2)。

编 者

1993年12月

目 录

第一章 潜水中使用的气体及有关气体的物理

知识..... (1)

第一节 潜水中使用的各种气体..... (1)

第二节 大气压..... (5)

第三节 气体定律..... (10)

第四节 气体的其他特性..... (25)

第二章 潜水时储气量和用气量的计算与估算..... (30)

第一节 气瓶储气量的计算方法..... (30)

第二节 常规潜水用气量的估算..... (53)

第三节 饱和潜水用气量的估算..... (71)

第三章 潜水用混合气体的配制..... (90)

第一节 配气的基本原则..... (91)

第二节 分压配气法的计算..... (96)

第三节 分压配气的方法..... (112)

第四节 氮氮氧配气、供气装置..... (136)

第五节 供气..... (150)

第四章 气体分析技术..... (153)

第一节 何氏气体分析仪..... (154)

第二节 改良奥氏气体分析仪..... (167)

第三节 控氧仪..... (173)

第四节 气相色谱仪..... (178)

第五章 潜水呼吸用氮的回收与精制..... (197)

第一节 潜水呼吸用氮的回收..... (197)

第二节	氮气的精制	(201)
第六章	配气常用设备	(211)
第一节	压力表	(211)
第二节	气瓶	(219)
第三节	膜式压缩机	(227)
第四节	氧气充填泵	(239)
附录		
附录一	潜水呼吸气体的纯度标准	(248)
附录二	“配制(5%~20%)氮—氧混合气体纯 氮加氧”检索表	(252)
附录三	氮—氧混合气体配制、使用记录	(300)

第一章 潜水中使用的气体及 有关气体的物理知识

人潜入水下（或在加压舱内模拟潜水），必须呼吸与外界水压相等的高压气体。其中有的用空气或氧气，有的用人工配制的混合气体。随着潜水技术的更新和潜水深度的不断增加，用混合气体潜水日趋广泛。因此，混合气体的配制就成为一项重要的潜水保障工作。

为了安全使用各种气体，正确进行混合气体的配制，必须了解潜水中各种气体的性质、大气的压力及表示法，以及有关的气体定律等物理知识。

第一节 潜水中使用的各种气体

潜水中，空气是最常用的天然混合气体。也可用这些气体中的一种或数种与氧气混合，组成各种人工混合气体。如氮—氧混合气 (Nitrox)、氦—氧混合气 (Heliox)、氮—氮—氧混合气 (Ttimix) 等。

空气 覆盖地球表面，高达几十公里，形成保护地球的大气层。它由各种比较固定的气体成份组成，包括氮、氧、惰性气体（氦、氖、氩、氪、氙等）和二氧化碳、水蒸气等，通常把惰性气体与氮气归在一起，简化为氮占79%，氧占21%（表1-1）。压缩空气可用于40~60m深度的潜水。超过此深度，必然提高氮分压，而过高的氮分压会使潜水员

产生氮麻醉。

下面就潜水中常用（可能遇到）的各组分气体的性质作一简单介绍。

表1-1 干燥空气的组成

成 份	所 占 的 百 分 比
氮	78.084
氩(惰性气体)	0.934
氧	20.946
二氧化碳	0.033
稀有气体	0.003
氦	
氖	
氬	
氪	
氙	
一氧化碳	
通常简化为	
氮	79
氧	21

氧气（分子式 O_2 ，分子量31.998）是人类生命过程不可缺少的气体，也是地球上所有元素中最丰富的元素之一，占大气的20.94%（按21%计）。它由两个氧原子结合而成，以游离状态存在，是无色、无臭、无味的“活泼”气体，易与其他元素相结合。水本身89%的重量是氧，没有氧，就不能燃烧，一切生物也不能生存。

在我们所呼吸的空气中，实际需要的仅仅是氧气，占

79%的其余气体用于稀释和输送氧气。纯氧可以用于浅潜水和治疗某些潜水疾病等，但在高压下吸纯氧就有可能发生严重的氧中毒。

氮气（分子式 N_2 ，分子量28.01）是无色、无臭、无味的气体，是所有有生命生物的组成元素，但它不能支持生命，不能助燃，也不易和其他元素结合。空气中的氮气是一种处于游离状态的惰性气体，而且基本上作为氧气的“载体”。对于潜水员来说，可将氮气视为氧气的一种稀释剂。在某些条件下，氮气可导致潜水员发生氮麻醉而失去定向和判断能力。由于这个原因，在大于指定深度的潜水作业中，就不能使用压缩空气作为呼吸气体。

氦气（分子式He，分子量4.00）是无色、无臭、无味的气体，是单原子物质，在游离状态时以单原子存在，是一种很轻的元素，仅次于氢气，比空气轻7倍。它几乎完全是惰性的，以至于和它自己都不能结合，在水中实际上也是不可溶的。

氦气是一种稀有元素，在空气中含量极少（约1/200 000），在1868年对太阳（希腊语helios意即“太阳”）进行光谱分析时首次发现，它和天然气共存于某些矿井中。我国四川自贡天然气矿含氦气成分较高，从这些矿井中分离出的纯氦可供潜水或其他之用。由于氦气稀少，不易提炼故价格昂贵，所以在配气时应精打细算。在潜水中用氦气代替氮气稀释呼吸混合气中的氧气，就不会引起氮麻醉。但也有其缺陷，如氦气环境中的语言失真，所谓“氦气性语言”就是由其独特的声学特性引起的，以致妨碍深潜时语言通讯。另外，氦气导热性强，会迅速引起体热大量丧失。

氖气 (分子式 Ne, 分子量 20.18) 是一种无色、无臭、无味的单原子惰性气体, 在大气中含量极少。在非常低的压力下, 氖是电的良导体, 能够发出独特的橙黄色光 (被用于制造信号灯和广告招牌)。氖是一种重气, 作为呼吸介质使用时, 没有氮气那样的麻醉作用。由于氖气不会引起氮气那种语音失真问题, 而且又有优良的绝热性, 因此已成为某些实验性潜水研究的课题。

氢气 (分子式 H_2 , 分子量 2.02) 是由两个原子结合而成的无色、无臭、无味的气体。它相当活泼, 以至于在地球上很少发现以游离状态存在的氢。但在宇宙的其他部分, 氢却是最丰富的元素——太阳和星球差不多都是纯氢。氢在所有元素中最轻, 有人曾用氢气 (代替氮和氧) 混合配制成氢-氧混合气用于深潜水作业。但当氧含量超过 5.3% 时, 氢气具有强烈的爆炸性。有关氢在潜水中的应用, 尚在研究中。

二氧化碳 (分子式 CO_2 , 分子量 44.01) 当空气中存在少量的二氧化碳时 (在大气中约占空气总量的 0.03%), 它是一种无色、无臭、无味的气体; 当二氧化碳浓度较高时, 则具有一种酸味和臭味。

二氧化碳是人和动物呼吸的自然副产物 (当然还有其他来源), 它是由于碳在人体内氧化产生能量时形成的。对于潜水员来说, 当使用闭式回路或半闭式回路呼吸系统时, 要解决呼吸气中二氧化碳含量的控制, 以及呼出气中二氧化碳的排除或吸收问题。若该系统不能排除过多的二氧化碳, 可能会出现严重的二氧化碳中毒。

一氧化碳 (分子式 CO , 分子量 28.01) 是无色、无臭、无味的气体, 化学性质相当活泼, 空气中所有的一氧化碳都

不能自然发生的，而应看作是“人造的”，是燃料不完全燃烧的结果，在内燃机的排出气中最为常见。

一氧化碳对人的毒性很强，能够严重妨碍血液输送氧气的的能力。一氧化碳中毒的最初症状是嗜睡，伴有头痛，随后可失去知觉，如不及时采取措施，会引起死亡。当压缩机的发动机排出口排出未完全燃烧的一氧化碳，和空气一起被压缩并供潜水员呼吸时，会造成潜水员一氧化碳中毒。

水蒸气（分子式 H_2O ，分子量18.02）水蒸气呈气态，也遵循气体定律。在潜水的供气中水蒸气过多，会使潜水头盔的面窗模糊，供气软管冻结，潜水员自感寒冷；水蒸气过少，则引起鼻腔和咽喉干燥。然而与气体不同的是，在通常的温度下，水蒸气会冷凝成液态。

关于“潜水呼吸气体的纯度标准”见附录一。

第二节 大 气 压

调节一气瓶(舱室)内各组分气体的气压是人工配制混合气的主要手段。这里就气压及其表示法作些介绍。

地球周围的一层空气团具有复杂、多层的构造。尽管是看不见、摸不着，但如将玻璃管一端封闭，将开口一端插入水中无论多深，管内水面都不会上升到与外界水面平齐（见图1-1）。由此可见，大气和所有物体一样，也占有空间和具有重量，因而对地面物体施加压力。在单位面积上所承受的大气重量即称为大气压。科学家托里拆利(Toricelli)测定了大气的重量。他用一根1.2m长的玻璃管，一端封闭，用

比重比水大13.6倍的水银装满，手指将敞开的一端堵住倒置插入装有水银的槽内，移开手指，玻璃管内的水银柱下降至760mm的高度，玻璃管内的水银柱上方由于水银下降而形成真空。这表明压在槽内水银上的大气重量刚好抵消760mm水银柱的重量。就是说，一个大气压等于760mmHg(的重量)，这就是托里拆利发明的气压计(见图1-2)。



图1-1 玻璃管内的水平面



图1-2 托里拆利气压计

利用上述数据就可计算出大气压的计算单位。

由于水银的相对密度是水的13.6倍。所以水柱高度是水银柱高的13.6倍，因此，相当于一个大气压（即760mmHg）的淡水柱高度为

$$\begin{aligned} 760\text{mm} \times 13.6 &= 10336\text{mm} \\ &= 10.336\text{m} \end{aligned}$$

通常取10.3m淡水柱高的重量作为一个大气压。

海水的密度是淡水密度的1.03倍，所以，相当于一个大气压的海水水柱高度为

$$10.3 \div 1.03 = 10.0(\text{m})$$

通常取10.0m海水水柱高的重量作为一个大气压。潜水员在水中每下潜10m，相当于增加一个大气压。

这种用水柱重量产生的压强称为静水压。水面以下不同深处，单位面积(S)上所承受的水柱重量(F)，可通过下列公式算出压力：

$$p = 10.0h\rho \quad (1-1)$$

式中： p ——压力，kPa；

h ——水深，m；

ρ ——水的密度，kg/cm³；

10.0——换算系数。

从公式中可看出，当水的密度不变时，水愈深，静水压愈大。同样，水深不变，水的密度愈大，静水压也愈大。

在物理学中，重量(F)为物质的质量(m)乘以重力加速度(g)，

$$\text{即 } F = m \cdot g$$

质量为该物质的密度(ρ)乘以体积(V)，

$$m = \rho \cdot V$$

而体积又等于水面以下水柱的高度(h)乘以受力的单位面积(S)，即

$$V = h \cdot S$$

所以，静水压又可用公式表示为

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot h \cdot g \cdot S / S \\ &= \rho \cdot h \cdot g \end{aligned} \quad (1-2)$$

上式表明，水面以下不同深处的静水压与该处水深和水的密度成正比；而在同一水深的各个方向上，其压强大小都相等。

在国际单位制中，压强单位名称是帕斯卡(Pascal)，符号Pa。

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2=1\text{kg}/\text{ms}^2$$

这里N为力的单位牛， m^2 为面积单位米²，m为长度单位米，s为时间单位秒；Pa是压强单位帕，常用千帕(kPa)，兆帕(MPa)。

我国现行的压强法定计量单位为帕(帕斯卡，Pa)。它与标准大气压、工程大气压、水柱间的换算关系如下：

标准大气压及毫米汞柱与帕斯卡(Pa)换算。已知水银密度(ρ)为 $1359.1\text{kg}/\text{m}^3$ ，高度(h)为 0.76m ，重力加速度(g)为 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ ，根据公式(1—2)，即

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot h \cdot g = 1359.1 \times 0.76 \times 9.80665 \\ &= 101325(\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$\text{所以 } 1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 101325\text{Pa}$$

$$= 101.325\text{kPa}$$

$$= 0.101325\text{MPa}$$

$$1\text{mmHg} = 0.133322\text{kPa}$$

工程大气压($1\text{kgf}/\text{cm}^2$)与帕斯卡(Pa)换算：在纬度为 45° ，质量为 1kg 的物质可获得 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 的重力加速度。因此

$$\begin{aligned} 1\text{kgf}/\text{cm}^2 &= 10000 \times 9.80665 = 98066.5(\text{Pa}) \\ &= 98.0665(\text{kPa}) \end{aligned}$$

毫米水柱与帕(Pa)换算：已知水的密度(ρ)为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，水柱高(h)为 10m ，重力加速度(g)为 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ ，

根据公式(1-2) 即

$$\begin{aligned}p &= \rho \cdot h \cdot g = 1000 \times 10 \times 9.80665 \\&= 98066.5 (\text{Pa})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{所以 } 10\text{mH}_2\text{O} &= 98066.5\text{Pa} \\&= 98.0665\text{kPa} \\&= 0.0980665\text{MPa}\end{aligned}$$

$$1\text{mH}_2\text{O} = 9.80665\text{kPa} \quad 1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$$

为便于实际计算, 水柱压力单位与帕(Pa)的换算, 可用公式(1-1)算成大气压。

上述的换算结果, 可约简为

$$\begin{aligned}1\text{atm} &= 760\text{mmHg} \\&\doteq 1\text{kgf/cm}^2 \\&\doteq 10\text{mH}_2\text{O} \\&\doteq 100\text{kPa} (\text{或 } 0.1\text{MPa})\end{aligned}$$

$$1\text{mmHg} \doteq 0.13\text{kPa}$$

$$1\text{mH}_2\text{O} \doteq 10\text{kPa}$$

尽管地平面上存在一个大气压, 但通常配气使用的弹簧管式压力表(见第六章)的指针显示为零。因此压力表测得的是大气压和容器(如气瓶、舱室)内气体压强的压差, 这个压差数为附加压(atm), 又称表压。有时计算还要包括已经存在于舱内的 1 个正常大气压, 这种舱内单位面积上实际承受的总气压称为绝对压(ATA)。它们间的关系用公式表示:

$$\text{附加压(atm)} = \text{绝对压} - 1 \text{ 个大气压}$$

$$\text{绝对压(ATA)} = \text{附加压} + 1 \text{ 个大气压}$$

由于两者的差别很大, 所以必须分清所指气压是附加压(表压), 还是绝对压。如果被测气压低于大气压, 称为负压