


潜水气体与潜水

李晓虹 编著

 海洋出版社

潜水气体与潜水

李晓虹 编著

海洋出版社

2016年·北京

内容简介

本书介绍了潜水气体和潜水的基础知识,力求在详尽介绍空气潜水、氧气潜水、混合气潜水和饱和潜水中的气体问题的同时,展示出潜水气体和潜水之间密不可分的关系。

本书是一本兼具专业性、实用性和趣味性的潜水技术读物,适合具有中等以上文化程度潜水爱好者了解潜水气体、潜水的总体情况和相关知识,可供潜水技术、深潜救生、救捞工程等专业在潜水教学和培训时作为参考书,也可供从事援潜救生、沉船打捞、水下侦察、水下勘探与施工、水产养殖、海洋考察、旅游潜水等工作的人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

潜水气体与潜水/李晓虹编著. —北京:海洋出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-5027-9424-8

I. ①潜… II. ①李… III. ①潜水-气体-研究②潜水-研究
IV. ①P754. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 094772 号

责任编辑:杨传霞

责任印制:赵麟芬

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店发行所经销

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.25

字数:210 千字 定价:58.00 元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

潜水呼吸气体（简称潜水气体）在潜水作业中最为关键。潜水气体的问题主要涉及潜水作业过程中呼吸气体的选择、使用和配制，是直接决定潜水作业成败乃至潜水员生命安危的重要问题。

随着援潜救生、沉船打捞、水下侦察、水下勘探与施工、海洋考察、近海石油和天然气的开发、旅游潜水等的广泛开展，特别是随着人们物质生活水平的提高，潜水已成为经济建设、国防建设、科学研究以及休闲娱乐中不可缺少的一个技术门类，与之紧密相关的潜水气体和潜水技术是许多人感兴趣甚至迫切想了解的。然而，以潜水气体为主题的书籍，国内外都比较少，很强的专业性使得读起来比较枯燥，难以满足读者的多样化需求。

针对这种情况，笔者根据多年来从事潜水气体教学和研究实践的积累，查阅了大量手册、报告和文献，继2007年《潜水气体》出版之后，又以新的、更宽的视角，编撰了这本深入浅出的小册子，可供潜水技术、深潜救生、救捞工程等专业辅助教学使用，亦可供相关专业人员在潜水培训和作业时参考使用，更希望能为那些

对潜水气体和潜水感兴趣的人们提供一点帮助。

全书共五章，在内容的编排上，将潜水气体置于潜水这个更大的背景下，充分注意到了潜水技术发展由低级到高级的递进过程，以潜水业界沿用的和通用的空气潜水、氧气潜水、混合气潜水和饱和潜水为叙述脉络，对有关潜水气体和潜水的基本概念、知识、计算方法和实际应用由易到难地进行介绍，力求既具有相对独立性、实用性，又具有普及性、可比性和趣味性。书中附有较多的图表，可方便读者查阅和使用。

本书在编写过程中得到了海军潜艇学院有关领导和同事的大力支持，海洋出版社杨绥华社长对本书出版给以热情帮助，在此表示衷心感谢。书中存在的不足、纰漏乃至错误，恳望读者不吝指教。

李晓虹

2016年春于海军潜艇学院·青岛

目 录

| | |
|----------------------------|------|
| 第一章 潜水和潜水气体 | (1) |
| 潜水的种类 | (2) |
| 潜水气体 | (6) |
| 供气方式与潜水装具 | (12) |
| 气体与安全上浮 | (22) |
| 第二章 空气与空气潜水 | (27) |
| 呼吸管潜水——最原始的装具潜水 | (29) |
| 屏气潜水——“不呼吸的”潜水 | (30) |
| 通风式空气潜水——依赖源源不断的压缩空气 | (37) |
| 需供式空气潜水——压缩空气随用随取 | (45) |
| 自携式空气潜水——自给自足 | (48) |
| 气泡与减压 | (53) |
| 水面供气压力 | (60) |
| 压缩空气的制备 | (64) |
| “油雾和颗粒物”与压缩空气污染 | (72) |
| 一氧化碳中毒——潜水时的无形杀手 | (75) |
| 氮麻醉——大深度空气潜水的拦路虎 | (79) |
| 第三章 氧气与氧气潜水 | (84) |
| 自携式氧气潜水 | (88) |



| | |
|-------------------------------|--------------|
| 氧中毒 | (94) |
| 二氧化碳中毒 | (97) |
| 缺氧症 | (102) |
| 潜水员可以像鱼一样直接从水里吸取氧气吗? | (105) |
| 第四章 混合气体与混合气潜水 | (108) |
| 氮氧混合气潜水——不需要减压的水下停留时间更长 | (109) |
| 氮氧混合气潜水——向更深处下潜 | (119) |
| 氮氧混合气潜水及其转换技术 | |
| ——更经济的大深度潜水 | (126) |
| 混合气潜水装具 | (135) |
| 混合气体的配制方法 | (142) |
| 气体的压缩性对分压配气准确度的影响 | (149) |
| 第五章 饱和潜水 | (154) |
| 饱和潜水——创建理论和艰辛探索 | (155) |
| 饱和居住舱和潜水钟——潜水员的住房和交通车 | (173) |
| 饱和潜水气体的选择与净化 | |
| ——营造安全舒适的高压环境 | (178) |
| 模拟潜水——饱和潜水技术发展的探路先锋 | (190) |
| 饱和潜水与深潜器——人类探索深海的两大利器 | (196) |
| 主要参考文献 | (204) |

第一章 潜水和潜水气体

我们赖以生存的地球上，71%的面积被蔚蓝色的海洋所覆盖。浩渺无垠的海洋，神奇、神秘，充满无尽的奥秘。千百年来，人类以极大的兴趣和无限的遐思，梦想着探访和了解海底王国。

潜水起源于人类从海洋中获取食物以及对打捞作业、军事活动的需求，经由潜水先驱的探索和牺牲，终成一种职业，其漫长的历史可以追溯到五千多年以前。早期的潜水大多做一些从水里捞取食物、海绵、珊瑚、珍珠的工作，或者从沉船中打捞贵重物品。军事潜水从早期一直延续到今天，从水下格斗、船底凿洞、建造和破坏港口工事到水下侦察、检修舰船、爆破、水下建筑和海上搜救打捞等，其规模和作用对潜水技术的发展皆不可忽视，军事潜水一直是潜水技术日新月异、不断发展的强大推动力。

人的生存离不开呼吸，人每时每刻都在吸入空气，利用其中的氧气，同时呼出人体代谢产生的二氧化碳。同样，当人潜入水中时也离不开呼吸，只不过这时对呼吸气体即潜水气体有了特殊要求。潜水气体是潜水作业中最为核心的问题，直接决定潜水作业的成败乃至潜水员的生命安危。可见，潜水和潜水气体是紧密联系在一起的整体。很多潜水作业的名称均取自潜水气体的名称，如呼吸空气的潜水叫空气潜水、呼吸氧气的潜水叫氧气潜水等等，正说明了潜水和潜水气体的密不可分。时至今日，潜水深度从数米直达万米，“可下五洋捉鳖”已经变成

了现实。与此同时，潜水气体也从常压空气到压缩空气，从空气到氧气再到人工配制的氮氧混合气体、氦氧混合气体、氮氮氧混合气体以及氢氮氧混合气体等等，通过潜水气体组成和浓度的配置，伴随着潜水技术与潜水装备的进步，人类已经可以潜得更深，在水下待得更久、更安全、更舒适。

潜水的种类

潜水的名称花样繁多，说明潜水的种类多样，分类比较复杂。

根据目的和任务的不同，可分为军事潜水、运动潜水、工程潜水、科研潜水和休闲潜水等。

根据呼吸气体种类的不同，可分为空气潜水、氧气潜水和混合气潜水，其中，混合气潜水又可依据潜水员所使用的混合气体种类，进一步细分为氮氧混合气潜水、氦氧混合气潜水、氮氮氧混合气潜水、氢氧混合气潜水、氢氮氧混合气潜水等。

根据人的机体对惰性气体的吸收情况，又可分为常规潜水（或称非饱和潜水）和饱和潜水*。

* 随着潜水时间的延长，呼吸气体中的惰性气体会逐渐溶解在机体组织中，当潜水时间达到或接近 24 h，惰性气体在体内的溶解即达到完全饱和状态。按惰性气体在人体内的饱和程度分类，把体内惰性气体达到完全饱和状态的潜水称为饱和潜水，未达到饱和状态的潜水称为常规潜水。出于安全考虑，国际上常规潜水的最大安全深度一般限制在 120 m 以浅，而且常规潜水的潜水时间通常也相对较短。对水深超过 120 m、时间超过 1 h 的长时间潜水，通常采用饱和潜水。

根据供气方式不同,可分为管供式潜水和自携式潜水。呼吸气体由水面通过软管提供的,称为管供式潜水;由于与水下潜水员连接的软管恰如胎儿的脐带,所以此种潜水方式也称为脐带式潜水。如果潜水员的呼吸气体是由潜水员通过气瓶自己携带的,称之为自携式潜水。

按呼吸气体在所用装具中流动的情况,又可分为开式回路、闭式回路和半闭式回路三种。呼吸气体被潜水员吸入体内后,氧气被吸收,二氧化碳等气体被潜水员排出装具之外,潜水员的呼吸路径不闭合、是开放的,这种潜水方式为开式潜水。如果潜水员呼吸气体的流动路径构成回路,则称作闭式潜水;闭式潜水装具中设计有二氧化碳吸收装置,可将潜水员呼出的气体进行吸收净化,再重新供潜水员使用;在闭式潜水过程中,没有气体排入水中,提高了呼吸气体的利用率,降低了成本(尤其是惰性气体配制的混合气体);同时,由于没有气泡冒出,因而具有隐蔽性好的特点。半闭式潜水则是介于开式潜水和闭式潜水之间的一种潜水方式,呼吸气体的循环回路与闭式回路类似,只是把很少部分的气体,在呼气时,或是不间断地、或是周期性地排到水中。

按潜水员肺内气量的变化情况,则可分为屏气潜水、呼吸管潜水、装具潜水和潜水器潜水。屏气潜水时,肺脏的大小变化最大,呼吸管潜水时次之,而装具潜水和潜水器潜水时,肺脏的大小保持不变。不过,装具潜水和潜水器潜水时,肺内承受的压力却不同,前者根据潜水深度相应增加了承受压力,后者的压力却依然是一个大气压,因为潜水器潜水实际上是在水下创造了一个与陆地大气环境类似的封闭空间。图 1-1 所示为四种不同潜水方式下的肺内压力和气量。

如果按潜水员是否承压分类,则可分为承压潜水和非承压潜水。承压潜水时,潜水员的机体直接承受外部静水压力。非

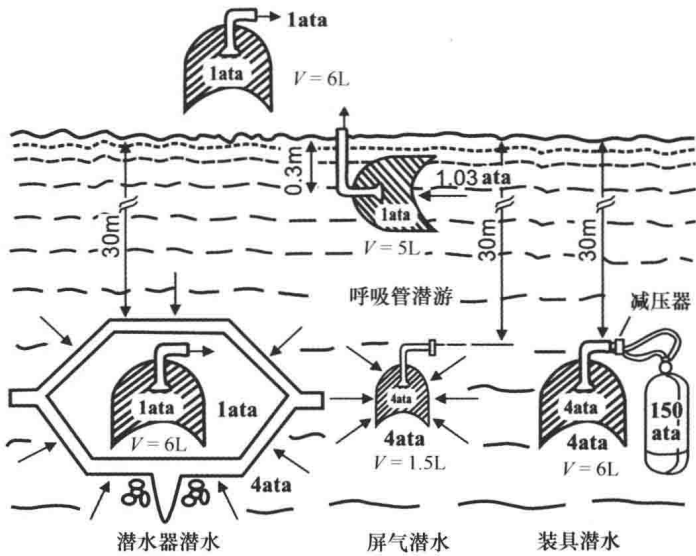


图 1-1 四种不同潜水方式下的肺内压力和气量 (海·马杜斯, 1984)

承压潜水时，潜水员借助耐压潜水器的外壳，抵御环境的静水压，潜水过程中潜水员的机体始终处于常压（ 1 atm ，约 100 kPa ）环境，潜水员的肺脏不受外部挤压，肺的大小不变，肺内气量与肺在水面上时的气量相等。潜水器潜水即属于非承压潜水，其所使用的潜水器（或潜水艇、水下舱室等）都有相应的耐压结构，潜水器外部的水压由耐压的器壁所承受，内部压力则为常压，故潜水器内部人员的机体不再承受压力负荷，中国“蛟龙”号深潜器就是这类潜水器（图 1-2）。非承压潜水的最大优势是下潜深度大，潜水员工作环境舒适，当然相应的技术要求和成本也高。由于随着潜水深度的增加，潜水的安全隐患随之增加，为保证潜水员的安全，避免潜水疾病的发生， 100 m 以深的大深度、长时间潜水已普遍推荐使用非承压的常压潜水装具，即潜水艇、水下舱室、深潜器等。

从更广阔的视角看，根据在潜水过程中潜水员是否身临其

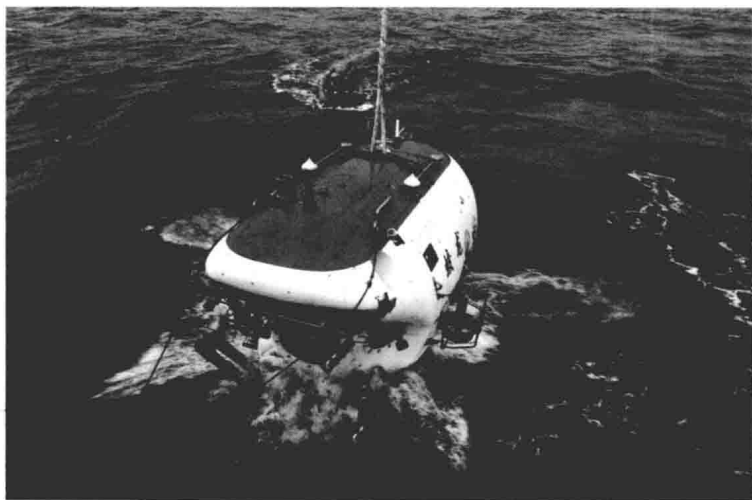


图 1-2 中国“蛟龙”号深潜器

境，还可以分为载人潜水（图 1-2）和非载人潜水（图 1-3）。中国的“蛟龙”号深潜器（HOV）进行的潜水活动即属于载人潜水，而功能和类型多种多样的水下机器人，像中国的“海马”号有缆潜水器（ROV）和“潜龙一”号无缆潜水器（AUV）进行的潜水活动则属于非载人潜水。在执行海底施工、救援等精细化的工作方面，机械手通常远比不上潜水员的手工作业精准，所以载人潜水还是不可或缺的。这有点像航天员在太空出舱维修，尽管有辅助的机械手帮忙，但许多工作还是离不开航天员的手工作业，是同一个道理。

潜水的各种分类方法并非完全独立，其往往彼此交叠。比如，当潜水员呼吸空气潜水时，称为空气潜水，而当呼吸人工配制的混合气体时，称为混合气潜水；如果潜水时间较短，上述空气潜水和混合气潜水则又皆可划归为常规潜水。目前，业界比较通行的分类方法，是以呼吸气体种类为主，分为空气常规潜水（简称空气潜水）、混合气常规潜水（简称混合气潜水）和空气饱和潜水、混合气饱和潜水等。这种划分方法虽然突出



图 1-3 中国 4 500 m 级无人有缆潜水器

(http://www.mlr.gov.cn/xwdt/hyxw/201501/t20150118_1341789.htm)

了潜水气体的种类，但实际上不纯粹属于上述分类方法中的任何一种，而显然是潜水技术不断发展历程的一个缩影。

潜水气体

几百万年以来，人类一直生活在常压的空气环境中，人的机体只适于地球表面的环境。当我们在海平面时，我们机体内的血液日复一日地从心脏流向各个器官和四肢，心脏以每分钟 60~100 次的频度不停地跳动着，空气源源不断地被吸入肺中，新陈代谢的产物二氧化碳也循规蹈矩地不间断排出。

但是，在海面之下，一切都变了。海水包围着我们，随着向大海深处潜去，加在我们身上的压力越来越大了，呼吸和人体的生理代谢也随之发生变化。都知道“上天容易，下海难”，到底难在哪儿呢？关键是两个问题，一是人体难以承受水下很高的压力，这是直接的作用；二是高压下潜水员的呼吸气体需要发生改变，这是对人体的间接影响。

先说人体难以承受水下很高的压力。

我们知道，水的密度远高于气体，所以，当潜水员在水下时，他要承受来自身体上方水的高压。当潜水员在水下某一深度潜水时，他实际承受的总的压力为绝对压，是其所处深度的水柱重量产生的静水压*与水面上大气压两部分之和。例如，潜水员在海水中每下潜 10 m，静水压增加 1 个大气压，因此，如果下潜到 100 m 深度，潜水员将承受地面上 10 倍的压力。

* 静水压是潜水中一个十分重要的概念。水的压强是由水本身的重量直接产生的，而且是累积的，上面的水压迫下面的水，一直压到水底。这种由水柱重量产生的压强称为静水压。静水压作用在浸没于水中的所有物体或结构上。在海水中，每下潜 10 m，静水压增加 1 个大气压（0.1 MPa）；在淡水中，每下潜 10.3 m，静水压增加 1 个大气压。因此，下潜到海平面下 100 m 深的潜水员，将承受 10 个大气压，是地面上 10 倍的压力。

水面以下不同深度静水压的求算公式为：

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\rho \cdot h \cdot g \cdot S}{S} = \rho \cdot h \cdot g$$

式中： P ——压力，Pa；

ρ ——水的密度， kg/m^3 ；

h ——水深，m；

g ——重力加速度，其数值为 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

对于相同压强的汞柱和水柱，由于水银（汞）的密度是淡水密度的 13.6 倍，所以，水柱的高度是水银柱高度的 13.6 倍。而一个大气压等于 760 mmHg，因此，相当于一个大气压的淡水柱高度为：

$$760 \text{ mm} \times 13.6 = 10\,336 \text{ mm} = 10.336 \text{ m}$$

通常取 10.3 m 淡水柱高的重量作为一个大气压。

由于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：

$$10.3 \text{ m} \div 1.03 = 10 \text{ m}$$

通常取 10 m 海水柱高的重量作为一个大气压。

科学研究和潜水实践都表明，呼吸适宜浓度的混合气体，潜水员可潜到 300~600 m 深处（甚至在模拟潜水时达到 701 m 深度），此时所承受的压力，是海平面的 30~60 倍。在如此巨大的压力下，潜水员并未因受压而发生什么病理损伤性变化，原因何在？原来，在人体的组成成分中，水约占 70%，而液态的水实际上是不可压缩的。所以，对一般不含气腔室的器官而言，潜水（加压）时只要增高的压力从各个方向均匀作用于机体并且来自各个方向的压力都相等，这些巨大的压力就会互相抵消，因而就不会引起组织的位移和变形。对于含气腔室的器官，当潜水员着装具潜水时，由于潜水员借助潜水呼吸器呼吸的是与周围环境压力相等的高压气体，这些气体进入呼吸道和肺内，会经由相应的通道进入中耳鼓室和副鼻窦，这样，含气腔室的内外压力相等，与机体各部之间并无压差存在，因而腔室壁也就不会被压缩或位移。简言之，只要压力在整个机体中分布均衡，人体均匀受压，就目前潜水的最大深度来说，高压本身对机体未显示出机械损伤性作用，人体是可以耐受相当高的压力增加的。

不过,不均匀受压下的情况则完全不同。研究表明,不均匀受压条件下,当外压超过了人体含气腔室的内压时,即使压差不大(约 6.3 kPa,相当于 0.063 atm),也可能会破坏有关组织的形状,引起损伤。潜水员在水下潜水时,三种情况下可发生不均匀受压:一是当外界压力变化时,机体本身的含气腔室(如耳、副鼻窦、肺)不能够或者来不及通过相应的管孔与外界压力相平衡,这就要求下潜速度不能过快,防止潜水员发生水中坠落;二是装具内供气不足或中断,如果此时继续下潜,或仍在排气(包括通风式潜水装具的排气、潜水员自行排气、潜水服破裂的漏气、排气阀或单向阀故障引起的自动排气等),均可使装具内气压迅速低于外界水压而造成挤压;三是不着装具的素潜(或称屏气潜水等)。

当潜水员不着装具下潜时,意味着他体内含气腔室里是常压气体,没有高压气体与外界环境的高压相抗衡。水下压力如此凶猛,在水下,随着深度的不断增加,我们会看到下面的一幕一幕:

水下 9 m,潜水员的肺就会被压缩为正常体积的一半。

水下 18 m,血液开始从四肢流向身体中更为重要的部位,心脏跳动的频率会降到水面上正常频率的一半,各种感官将变得迟钝,大脑进入深度冥想的状态。在 4 000 m 高原上,薯片袋会膨胀如球,与此相反,在水下 18 m 深处,薯片袋会变得像薄饼一样扁,面包也会被高压挤压得坚硬。

水下 90 m,此时潜水员所承受的压力是水面压力的 10 倍。心脏跳动的频率只能达到水面正常值的四分之一,这个数值甚至低于昏迷状态的心率。各类器官萎陷,生理感觉消失,大脑进入睡梦状态。肺的大小会缩小至可怜的两个棒球大小,压扁可乐罐易如反掌。

水下 180 m,此时水压接近水面的 20 倍。如此大的压力,

让人难以承受。有人曾经尝试，但几无生还。但在 200 m 甚至更深的地方，鲨鱼却可以畅游。

水下 250 m，这个深度对应的高压基本上就是人体能够承受的绝对极限，但是在海水中 300 m 深处，在压力高达水面压力 30 倍的冰冷海水中，黑暗无边，海豚们依靠“听”，自在地活在自己的世界里。

水下 750 m，压力近乎陆地上的 80 倍。在高压下的大海里，黑暗中，电鳐借助凶残的电击，享用着美餐，防御着捕食者。

水下 3 000 m，这是黑暗与无情的深度，压力达到了水面上的 300 倍。在这个地球上，与我们人类的文明和智力最接近的抹香鲸却把它们的家建在了那里。

水下 6 000 m 以深，水下压力是水面的 600 倍，黑暗的世界看似一片荒芜，人类绝无可能赤身进入这片幽冥之地，但这里却生长着形态奇异的虾蟹鱼类，或许这里还是地球上所有生命的诞生之地。

再说说第二个问题，随着潜水员下潜深度增大，呼吸气体需要发生改变。

如前所述，人类的机体与上面提到的鲨鱼、海豚、电鳐以及抹香鲸相比，真是不值得一提。人体肺脏里气体的压力和胸廓外部水的压力之间的压差，只有区区 13 kPa 时，呼吸器官的肌肉几个小时就疲倦了。当压差为 20 kPa 左右时，还能呼吸几口气。如再进一步增加压差，就会导致肺部组织损伤。怎么办？人类想到大海里去望一望，这个愿望如此强烈，千百年来，多少代人的内心就一直熊熊地燃烧着潜入海底的欲望之火，未曾熄灭片刻。潜水前辈卓绝的不懈努力换来了潜水技术和潜水装备的不断进步和发展，其中一个关键，就是解决了潜水员的呼吸气体问题，使得潜水员下潜（模拟）的最大深度达到了 701 m。