



# 潜水实践的生理学 原理和医学问题

主 编

倪 国 坛

编 者

(按姓氏笔划为序)

马文彬	王 民	王希杰	张文康	杨树栋
陈鸿钧	练庆林	杭荣椿	俞海泉	顾明元
夏建平	倪国坛	陶恒沂	崔海良	

人 民 卫 生 出 版 社

**潜水实践的生理学原理和医学问题**

倪 国 坛 主 编

人民卫生出版社出版  
(北京市崇文区天坛西里10号)

中国科学出版社印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 22<sup>1</sup>/<sub>2</sub>印张 4插页 530千字  
1987年12月第1版 1987年12月第1版第1次印刷  
印数：00,001—880

ISBN 7-117-00289-1/R·290 定价：7.20元

统一书号：14048·5557

【科技新书目 156—79】

## 前 言

本书——《潜水实践的生理学原理和医学问题》是我系潜水生理教研室继《实用潜水医学》（人民卫生出版社，1980）之后编撰的另一部专著。《实用潜水医学》出版后，曾被有关单位用作大学本科学生或专业训练班学员的教科书，或用作潜水现场操作和治疗潜水疾病具体措施的指导书；还被临床医务人员和科研人员等用作参考。相对而言，起到了一定的普及作用。但近来水下事业突飞猛进，随着潜水深度-时程的增加和水下作业难度的升级，对相应的生理学和医学问题，需要更深入的研究和完满的解决。所以，创造条件，尽快提高专业人员的理论水平和实际工作能力，成为当务之急。许多单位和个人纷纷来信或口头要求我们结合实际编写一本着重阐明和探讨潜水生理学和医学的理论专著，以满足需要。人民卫生出版社热情地鼓励我们完成这一使命。为此，我们组织了潜水生理教研室和有关单位的人员，于搜集和整理资料后着手编撰了本书。

本书着重阐明《实用潜水医学》中未曾涉及或未充分阐明的内容，尤其针对一些与潜水实践有密切联系的重要理论。为了清楚地阐明理论，文字力求深入浅出，并辅以插图和附表；对于引用的公式或计算，尽量作出推导或演算举例。为了推导、演算和表达准确，一些计量的单位，都按原资料，大都未予换算，表达时采用名称或符号亦随方便而定，不强求一律。至于《实用潜水医学》中已经叙述过的内容，在本书的连贯性方面有必要时，作简略的文字概括或简明的图解或表解，一般不作重复。

本书体例主要参照Bennett等主编的《潜水和压缩空气工作的生理学和医学》（第二、三版）也参考 Shilling 等主编的《水下手册》，全书除绪论外共设二十四章，即每题一章，不予按类归并，以利独立撰写。取材则除此二书外，还参阅国内外其它资料，并结合我们自己的一些工作。

本书编撰工作，经过集体讨论后分工执笔，最后由主编倪国坛教授审校修改定稿。定稿后由练庆林同志统一誊清。在编撰过程中，得到各有关兄弟单位的多方面支援和鼓励，本校绘图室刘萍、刘履端等同志绘制插图，海军医学研究所潜水装具研究室高风主任校阅了本书第一章，特此一并志谢。

由于我们的水平有限，经验不足，本书难免存在某些缺陷和差错，敬希广大读者批评指正。

中国人民解放军第二军医大学海军医学系

一九八三年十二月

# 目 录

## 前言

绪论	倪国坛	(1)
第一章 潜水装具的基本生理学原理	倪国坛	(10)
第二章 生命支持系统	倪国坛 崔海良	(25)
第三章 静水压生理学	倪国坛	(42)
第四章 潜水-高气压环境下肺呼吸功能的变化	夏建平	(50)
第五章 水下操作行为	张文康	(89)
第六章 惰性气体麻醉	杭荣椿	(100)
第七章 高气压下CO <sub>2</sub> 对机体的影响	王希杰 王 民	(110)
第八章 氧中毒	袁洪昌 王 民 倪国坛	(120)
第九章 等压气体逆向扩散综合征	倪国坛	(136)
第十章 高压神经综合征及加压性关节炎	张文康 倪国坛	(140)
第十一章 潜水员寒冷暴露	张文康	(154)
第十二章 潜水时的听觉和前庭功能	杨树栋 倪国坛	(167)
第十三章 水下视觉	倪国坛	(177)
第十四章 减压病的病理生理学	顾明元 倪国坛	(189)
第十五章 减压性骨坏死	夏建平	(202)
第十六章 Doppler超声血流气泡探测仪及其在潜水医学上的应用	顾明元	(209)
第十七章 非饱和潜水的减压	倪国坛 王 民 俞海泉 陈鸿钧	(218)
第十八章 饱和潜水的减压	马文彬 张文康	(231)
第十九章 减压的生物物理学概要	马文彬 倪国坛	(240)
第二十章 减压病的药物预防	顾明元 袁洪昌	(257)
第二十一章 减压病的加压治疗	倪国坛 张文康	(264)
第二十二章 急性减压病的药物治疗	顾明元	(283)
第二十三章 潜水时的气压伤	倪国坛 陶恒沂	(286)
第二十四章 潜水事故	陶恒沂	(293)
附表一: 肺氧中毒剂量单位检索表		(303)
附表二: 空气反复潜水减压表		(311)
附表三: 高海拔水域空气潜水减压方案表		(324)
附表四: 氮氧饱和潜水减压表		(338)
附表五: 氮氧饱和-空气巡回潜水表		(340)
附表六: 氮氧饱和潜水减压表		(342)
附表七: 氮氧饱和-反复不减压巡回潜水表		(344)
索引一汉英	练庆林 陶恒沂	(346)
索引二英汉	倪国坛 练庆林 陶恒沂	(353)

# 绪 论

## 一、潜水生理学和潜水医学在潜水科学中的作用

近20多年来，由于对被称作地球“内层空间”的海洋水面以下深广而富饶的领域进行研究勘探和开发利用的需要，潜水科学的进展空前迅速。作为正常生理学和一般医学在水下环境这一特殊条件下应用的潜水生理学和潜水医学，也有相应的新的突破和长足的进展。

采取一定的方式，主动没入水面以下（入水）、向深处进发（下潜），到达水底或目的深度（着底）后逗留一段时间从事一定的活动（水底逗留），又从水底或所潜的深度离开（离底），向浅处返回（上升），经过一定的步骤（如减压），最后露出水面（出水）的全过程，称为“潜水”。潜水，作为人类进入水下环境中以求获取一定利益的一种手段，在人类的原始时代即已开始，发展到现在，已成为经济、国防、体育运动和科学研究中一种不可缺少的技术。但是，水下对人体来说，毕竟是严酷的异常环境：呼吸气体的供应、静水压、水温、水的密度和阻力、光和声的传播、水下生物影响等因素，都与正常大气中迥然不同。人能否安全、顺利地完潜水过程，达到潜水目的，每一个环节都受水下环境中相应因素的制约。为了克服或限制客观因素对机体的作用，潜水者常使用不同的潜水装具、装备。但使用装具、装备，又会带来一些新的问题。当然，除了环境因素外，潜水者自身的某些因素，有时也成为圆满完成潜水过程的制约因素（图0-1）。在许多制约因素的作用下，机体必然会受到一系列的影响和产生相应的反应。在某

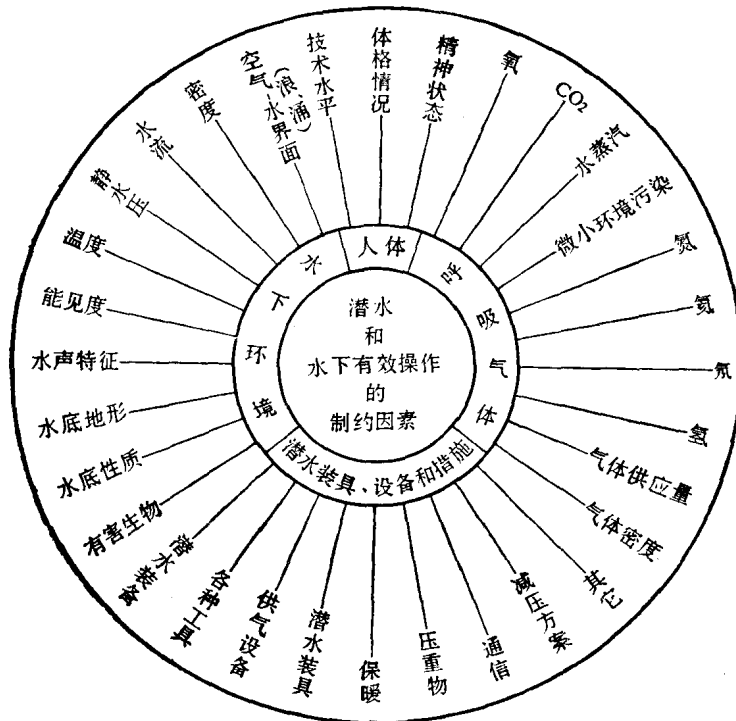


图0-1 制约潜水及人在水下有效操作的各种因素

些很不利的条件下，还可能发生特殊的病症或/和创伤，这就是潜水疾病（图0-2）。所以，对于潜水人员，无论平时或潜水全过程的各个环节，自始至终都需要生理学和医学的工作给予保障（生活、训练和作业时的医学-生理学方面的监督和卫生保健、潜水疾病的预防和治疗等），这是人在通常条件下的任何活动都不能和它比拟的。常常是由于医务保障工作的缺乏或某种不当、差错，使潜水失败、作业不能完成，甚至造成人身事故。尤其是大深度的或/和长时间的潜水，离开了医务保障，就完全不可能安全顺利地进行。在现代，潜水医务工作同潜水作业，已成为不可分割的一个整体。不但如此，对于任何具体潜水，大量的潜水生理学和潜水医学方面的工作，包括潜水员的医学选拔，必须在潜水进行之前做好；潜水向更大深度，更长时间（包括潜水装具的更高效、更安全）的发展，必须先解决相应的生理学和医学问题，并且具体实施到潜水站和潜水平台。或者说，潜水的发展，在相当程度上依赖于人们对潜水生理学和潜水医学规律的掌握。

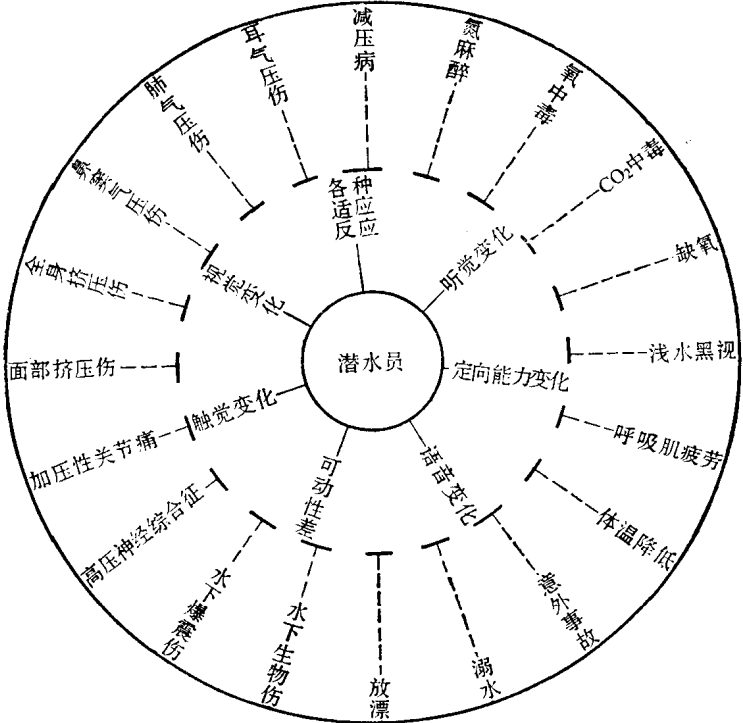


图0-2 人在水下所面临的生理学、医学问题(实线表示必然，虚线表示可能遇到的问题)

总之，人进入水中执行任务，潜水是先决条件，而要达到安全顺利地完成任务的全过程，即所谓“下得去、呆得住、干得成、出得来”，必须在潜水前、潜水时，以及潜水之后有潜水生理学和潜水医学的切实保障。潜水技术、装具（备）要发展，先要有生理学原理在潜水中应用的成功，也要有医学科技能解决潜水中出现的新的医学问题。因此，可以肯定地说：潜水生理学和潜水医学在潜水工作的进行和潜水技术的发展中，具有关键性的、先行性的重要作用。而潜水生理学和潜水医学又以正常生理学及一般医学的理论和技术的根据。

## 二、潜水发展简史

为了解决人在水下受各种因素的作用和发生的医学生理学问题，而发明、创造和改进不同潜水装具和设备的过程，即形成了潜水的发展史。迄今，已有下列几种潜水方式：

1. 屏气潜水 吸一口气，停住呼吸，潜入水下后又回到水面上，才恢复呼吸动作。这种潜水方式称为屏气潜水（图 0-3①）。

屏气潜水是原始的潜水方式，具体起始于何时何地，已无从考证。潜水采拾珍珠，早在我国上古历史的文件汇编——《尚书》中，即有明确记载。该书的《禹贡》篇中，记载了夏禹时（约公元前21世纪）东方部落“淮夷”的“蜃珠”和“玕”（按：“蜃”即珠蚌，蜃珠是出于珠蚌的珍珠；“玕”是品位较低的珠）。据考古发掘所见推测，在美索不达米亚，开始有珍珠饰物的时代，比我国更早。

至于直接记载潜水（泳）的文字，最早见于我国的《诗经》，约公元前1066~前570年），其中《周南·汉广》及《邶风·谷风》等篇都明确地记载了“泳”。以后，春秋（《春秋左氏传·哀公十七年》）、战国（《列子·黄帝》；《庄子·达生》）、秦（《史记·秦始皇本纪》）、汉（《后汉书·循吏列传·孟尝传》）、晋十六国（王嘉：《拾遗记·秦始皇》）、南北朝（酈道元：《水经注·江水》）、五代十国（《十国春秋·南汉·后主本纪》）、宋（《宋史·列传·忠义五》；苏轼：《日喻》；孟元老：《东京梦华录》）、明（《明史·食货六》；宋应星：《天工开物》）等时期，都记载有潜水，且与探摸、战争、水产、体育等活动联系。

在希腊，关于潜水传说的记载有：①探摸沉物及破坏锚链（约公元前460年）；②用潜水于战争（约公元前330年）。

屏气潜水最明显的限制是潜水者可用的气体太少，故潜水的時間不可能长。有利的是很简便，人在水下的可动性相对地好。因此，在一定条件下仍不失为一种有用的潜水方式。在西班牙的战舰上，很长时间都设有不使用潜水呼吸装置的潜水-游泳专职人员。日本等地的裸潜水采珠者（如“海女”），现仍藉屏气潜水（戴护目镜或面罩）寻取珠贝，约可达40米深度。

曾有人屏气潜水创90多米深度的记录，当然不可能进行作业。

2. 潜水钟潜水 潜水钟为由倒扣桶发展而来的“罩器”状大型潜水装备。钟内的空气供潜水者呼吸。潜水者在钟内，随钟沉到水底，在钟所覆盖的范围内工作。

最早记载潜水钟，约在公元前300多年（希腊，Aristotle）。使用潜水钟，则在16世纪30年代。那些都是原始的潜水钟，下潜愈深，钟内水面愈高；而且钟内气体难以更新。直到17世纪末（Halley, 1690）至18世纪末，才实现了潜水钟的改进和用压气机械与之配套，注压缩空气入钟内，迫使钟内水面下降与钟口齐平，钟内的气体亦可更新（图 0-3②）。潜水钟（底部开放，钟内压与所在深处的压强相等）现已不常用。但潜水钟的原理却被直接或间接地用于沉箱、水底隧道、各型可潜舱（例如水下观察箱、下潜式减压舱或人员运载舱等）以及潜水头盔等。现在，有些场合，把某些立式的可潜舱（有底门，舱内压与所在深度处的压强可相等亦可不相等）叫做“潜水钟”。

3. 头盔-供气管潜水 从水面通过管道向潜水者所戴的头盔它是深潜系统中不可缺少的装备内送新鲜呼吸气体，头盔内含有呼出气的气体经另外的途径排出。这种方式的



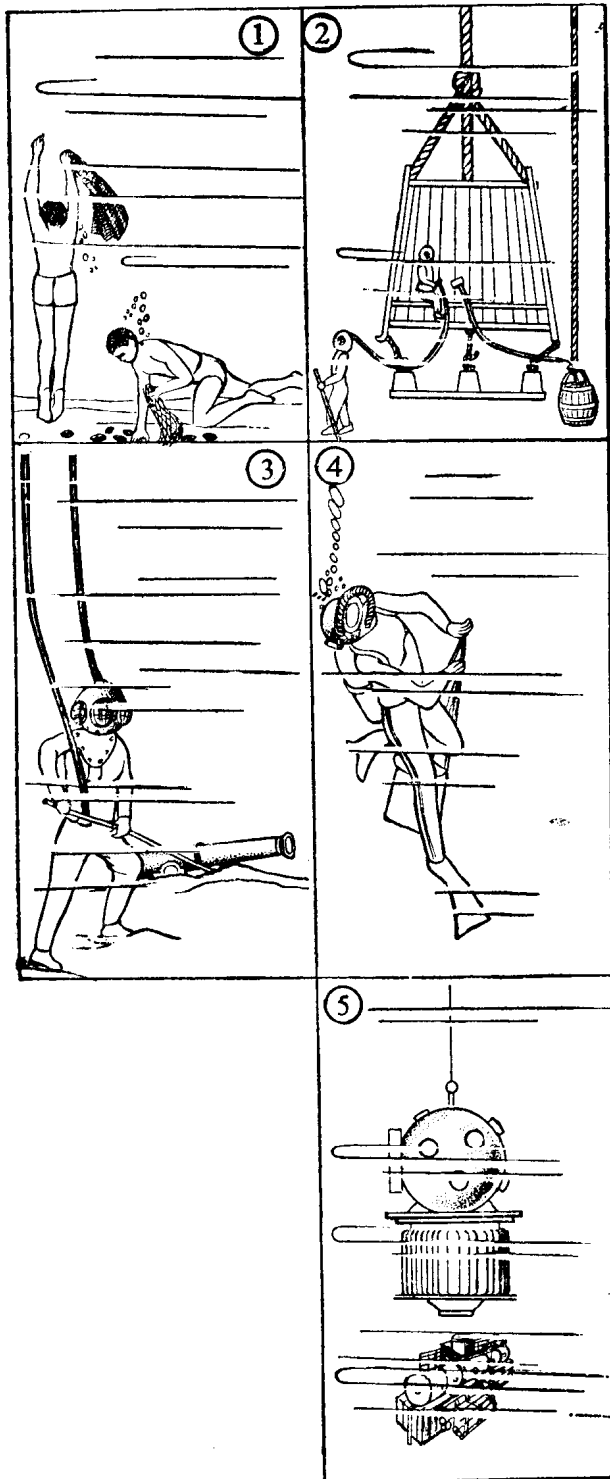


图0-3 潜水发展的几个主要时期

①屏气潜水(古代~) ②潜水钟潜水(公元前4世纪~公元19世纪) ③头盔供气管潜水(公元19世纪~) ④自携式潜水(公元1930~) ⑤饱和潜水(公元1957~)

潜水，又称通风式潜水。

通风式潜水的最初起源为使用呼吸管，即人在（浅）水下，通过管子呼吸水面以上的空气。古罗马（公元前77年）有用苇管装备军队作呼吸管，藉以潜水而隐蔽渡河的记载。我国明代“没水采珠”时，用“锡造弯环空管”（用锡制造的呈弧形的管）“对掩没入口鼻，令舒透呼吸于中”（《天工开物·珠玉》，1637）。现代的呼吸管在某些潜水的初步训练时用。

16~18世纪，逐渐发展了皮革头盔（其实是扣在潜水者肩上、罩住潜水者头颈的“小潜水钟”）接管子至水面，以图藉此向潜水者供气。但无法平衡水压，故无效。直至发明了以风箱通过管子从水面向头盔内送气（Freminet, 1774），才开创了通风式潜水的纪元。19世纪30年代（Siebe, 1837），奠定了现代通风式装具的雏型：头盔-领盘-潜水衣连接为一体的潜水服，使潜水者处于潜水服内的微小环境中，体积大、压载重，后被称为重潜水装具。这种装具后又经改进和多样化，并配以潜水电话等（图0-3③）。现一般用于60米以浅的空气潜水。必要时，在技术条件等都具备时，可以略深些。

由头盔-供气管潜水装具，结合了Venturi原理和密闭循环（即闭合循环）式装具的原则发展而成的喷射-再生式潜水装具，在本世纪初叶试用，30年代末（1939）开始在大海应用，主要用于氮氧重潜水。氮氧重潜水一般不超过150米，常用的深度为120米以浅。

头盔-供气管潜水装具的稳性好，从水面供气可源源不断，水面对潜水者作监护较方便。但可动性受到相当限制。现在，在相对定点的潜水作业中仍常使用。

4. 自携式潜水 潜水者自携呼吸气体至水下，通过一定的装置（潜水呼吸器）吸入。这种方式的潜水，创始于18世纪80年代（Claire, 1785）用气囊盛呼吸气体携至水下供呼吸用。以后铁制的储气瓶（James, 1825），供气调节器原理的提出（Rouquayrol, 1860）和以后自携式水下呼吸器（Fleuss, 1879）制成问世，显示了头盔-供气管潜水所不具备的一些优越性。到20世纪30年代，自携式潜水又被用脚踏和它配套（de Carlieu），使潜水者不仅可在水底行走，且可在水中自由游泳。40年代中期，供需阀研究和改进成功，并命名为“水肺”加以推广（Cousteau, 1943, 1946）。这种阀可根据潜水者吸气的需要和深度的改变而自动调节供气量（故亦称供气调节器）。

自携式潜水的优点在于装具轻（也称轻潜水），使用便捷，可动性较好（图0-3④）。主要的不利因素是：①供气时间较短。但是不要求有很大的可动范围时，可改用水面接管供气至水下呼吸器；或从下潜的舱内的气瓶接管子供气至呼吸器（脐带式潜水）。②水面监护较难。但可采取结伴潜水：两名潜水员系结成对子，一起行动，互相照顾；也可以采取“超声电话”与水面通信。

供气调节器的原则，适用于各种深度和各种呼吸气体。所以，目前各种轻潜水装具利用它。但由于呼吸气体成份的不同，具体的装具形式有所不同：用空气者为开放式（呼气入水，60米以浅）；用氧气（浅于10米）或人工配制的混合气（相应的大深度）者为闭合循环式，或半闭合循环式。

5. 抗压潜水 使用可抗住水压的坚硬装具（备）而进行潜水的一种方式。人在潜水时，不受静水压的作用，装具内保持正常气压，呼吸常压空气。故又称“常压潜水”或“一个大气压潜水”，有人称之为“间接潜水”。与此相对的，使用软质潜水装具潜水，

人在水下受到静水压的作用，称为不抗压潜水。不抗压潜水必须呼吸压缩气体，所以是高气压潜水，有人称之为“直接潜水”。

抗压的潜水装具为铠甲式潜水服，19世纪30年代开始制成雏型 (Taylor, 1838)。到20世纪初叶才有现代规模的铠甲式潜水服 (Neufeldt, 1913; Kuhnke, 1920)：“衣袖”和“裤管”都有杵臼结构和滚珠轴承的“关节”，潜水者在服内，可做一定的动作；藉“衣袖”末端的操纵器（机械手），可完成一定的作业（图0-4）。缺点是可动性很差，须依靠起重设备吊放和移动。配以动力，在水下活动范围可扩大，可用于大深度短时间的简单作业。

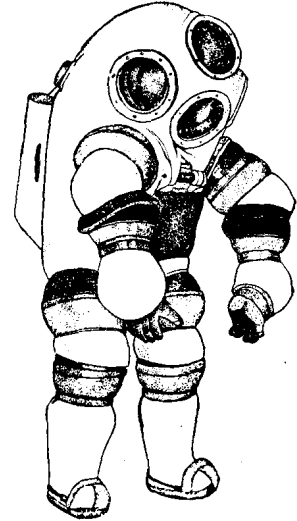


图0-4 铠甲式潜水装具例图

抗压潜水的大型装备为可潜器（亦称潜水器或深潜器，简称潜器），20世纪初期后逐渐发展起来。开始时，基本原理就是可关住底门、内为常压、壁有观察窗、壳体耐外压的潜水钟（舱），人在其中被吊送到水下，借一定的照明设备，观察水下情况，故又称潜水观察箱。除有圆柱形外，还有圆球形（潜水球）或其它形状（如卵圆形等）。有的也装有机械手，对箱外作某些简单操作。无自航能力，称系索式可潜器。

有自航能力的可潜器为流线型小艇，一般至少容纳二人。可在水下作大范围的观察和调查。有些还设有调压舱，必要时，人员可经此舱调压后由水中进入可潜器或由可潜器内出外到水中，称为“调压进出式可潜器”。(lock-in-lock-out submersible; LILOS)

抗压潜水，人员不受水压，服内或器内压不随深度改变而改变。故体力消耗远比不抗压潜水少。有自航力的可潜器，尤其调压进出式可潜器，除可大范围地对水下观察外，又可利用操纵器对舷外进行某些操作，必要时在不同深度和不同水域，人员又可调压出入，优越性更为明显。故将成为潜水方式中一个有前途的重要部分（图0-5）。

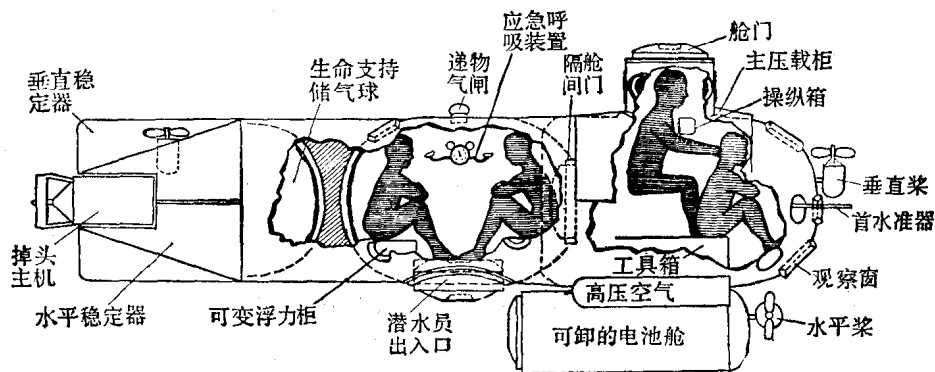


图0-5 调压进出式可潜器示意图

至于潜水艇，它也是抗压的。早在公元4世纪80年代（晋代），我国就有人设想在海洋中潜航、又可回到海面的“螺形”的“沦波舟”（王嘉：《拾遗记》）。到16世纪时，英国人正式倡议；19世纪末，现代规模的、“雪茄烟形”的潜水艇制成 (Holland, La-

ke)。潜水艇与潜水装备早已“分道扬镳”，用途大不一样。潜水艇内的医学问题也另成独立学科即潜艇医学。只是潜艇沉没而丧失上浮能力后，艇员脱险过程中的有关医学问题，才属于潜水医学范围。潜艇医学与潜水医学组成“水下医学”。

6. 饱和潜水 暴露于某种深度（高气压）下一定的长时间后，溶解于机体组织内的惰性气体达到完全饱和的程度，即使再在该深度延长暴露时间，饱和度也不再增加，减压时间与初饱和时所需者相同。这种方式的潜水，称为饱和潜水。有关饱和潜水的实验，始于1957年（Bond等；Cousteau等）。用水下居住舱在海中进行实际饱和潜水，则在1962年（Link；Cousteau）开始。水下居住舱内的气压与舱所在的深度处的压强相等。潜水员在舱内居住，可穿着潜水装具外出到水中作业——巡回潜水（简称巡潜）。如果巡潜的深度与居住深度一样（等深度巡潜或水平巡潜），在体力可胜任的条件下，作业时间不受限制；也可随时回到居住舱内。又可从居住（饱和）的深度向不同深度巡潜（垂直巡潜）：向下巡潜，可在相应的深度-时程范围内无特殊限制地返回居住舱；也可在严格限制条件下，向上巡潜巡回潜水所用装具多为自携式，但气源为从潜水舱内通过软管供应，称为“脐带式潜水”。饱和巡回潜水经过若干时日，按相应的方案减压，到常压。为了方便和灵活，居住舱安置在潜水工作母船的甲板上（甲板居住舱），舱内压与饱和潜水深度相当。借人员运载舱与居住舱接口和调压，将潜水员从居住舱送到水下饱和或巡回潜水深度去“上班”，“下班”后再接回甲板居住舱（图0-3⑤）。

饱和潜水一般用于深度大或/和费时久的水下任务。与短暂潜水比，其优越性在于：①水下工作时间对减压时间的比值大于常规潜水，即效率比常规潜水高。②在高压下长期停留后作一次减压；故减压的次数少。③可在相当大的深度-时程范围内作向下巡回潜水而无需作特别的减压步骤即回到居住深度。但饱和潜水需庞大的设备及相应的技术条件，例如水面工作母船或补给（支援）浮标，水下（或甲板）居住舱及生命支持系统、人员运载舱及起重装置、深水轻潜装具和配套设备以及较高的潜水技术等等。

7. 液体呼吸和人工鳃两种潜水实验研究 本世纪60年代初，开始了液体呼吸潜水的动物实验（Kylstra, 1962），用氧合了的等张溶液灌注完整动物的肺，使之直接利用溶解氧，同时排出CO<sub>2</sub>。意图避免潜水时由气体的可压缩性等所引起的种种麻烦。稍后，又有潜水时利用海水中溶解氧的设想（Robb, 1965）：用适当的半透膜作成“人工鳃”，使海水中的溶解氧以简单扩散的方式透到潜水者身体周围的气相空间内，以供吸用；同时，藉同样的方式处理呼出的CO<sub>2</sub>。这两种研究，迄今尚都在动物实验阶段，与实际应用有不小距离。

### 三、潜水生理学和潜水医学的发展简史

潜水医学是以人体在潜水时的感觉的记录而起始的。我国在战国时期就有这方面的记载。例如《列子·黄帝》和《庄子·达生》内都提到有“至人”（按即极为了不起的人）可以“潜行不窒”。这在当时固然是一种幻想和反映一种希望，但说明已经明确：“潜行”的最大问题是“窒”。

明朝时（见《天工开物》，1637），南海沿岸（今广东海康、广西合浦等地）采珠贝的“没人”，在水下“气逼（憋）”时，摇撼系在腰间通水面的“长绳”，水面上的人员急把他“提引”出水；又“没人出水，煮热氲急覆之，缓则寒栗死。”这就明确地指出了

潜水中的呼吸和寒冷两大问题，并记载了当时的解决方法和措施。

日本等地也从古就有屏气（裸体）潜水采拾珠贝的专门职业。很早以前认识到了海水低温损害男性从业者的睾丸，甚至形成“冷冻去势”。所以裸潜采珠都由女性担任，沿袭至今。

在欧洲，与潜水生理学与潜水医学有关的记载，起始较晚，但观察比较客观。例如 Boyle (1659~1660) 观察机体周围气压降低（用真空泵抽气）时引起动物（蛇）器官（眼）内气泡形成。以后潜水事业随工业发展而发展，潜水生理学和潜水医学又随着潜水发展的需要而发展。在西欧各国，19世纪30~40年代，正是工业革命已经或接近完成的阶段，潜水和高压作业迅速发展，需要潜水（高压）作业的工程项目愈来愈多，潜水者的队伍不断扩大，潜水作业的次数愈来愈频繁。潜水生理学和潜水医学亦逐渐形成。

1841年，Triger 报告了人在气压升高时有耳痛等感觉；当气压稳定后耳痛停止，而说话有鼻音，呼吸变慢；较长时间地在高压下工作而减至常压后，有发生肩、膝等部严重疼痛者，他用酒精擦摩疼痛部作为治疗。

1842年 Liddell 报道了潜水装具内气压低于外界水压时，潜水员受压致伤的情形。

1854年 Pol 和 Wattelle 确认从高压环境中减压可导致病痛，并且用通俗的成语比仿为“在离开时付代价”，减压病的概念于是初步形成。他们并使罹病者重新回到压力条件下，以治疗这类病症。

1857年 Hoppe-Seyer 观察到减压后血管内有气泡。

1869年 de Mericout 报告了潜水者从水底上升到水面后有发生口鼻等流血甚至发生瘫痪或死亡者。他把所有这些情况都归因于上升过快。

1871年，Bucquoy 提出：减压之所以引起疾病，可能由于溶解在组织内的气体形成气泡。

1872年，Friedberg 认为减压时血液内也会形成气泡。他还对气压增高时所引起的耳痛作了正确的解释，认为耳痛是由于气压的变化，气压不变时，即使在高压下，耳并不痛。

1878年，Bert 总结了大量的实验研究资料，出版了《气压——实验生理学研究》一书，对气压增高、停留于高压环境、从高压降到通常的大气压等情况下，由气压本身和各种高分压气体成份等引起的生理反应、病理变化，作了描写。同时又对所观察到的一些现象提出了有实验根据的科学解释。例如：减压病是由于减压太快，溶于体内的氮形成气泡；呼吸纯氧可促进氮的排出（为以后的吸氧减压的理论和实践开辟了先河）；高压氧对机体有毒性作用（当时他所看到的是惊厥型氧中毒）等等。为潜水（高压）医学作为一门系统的科学，奠定了基础。

1890年，Moir 第一次制成医用加压舱后，在有关现场用于治疗减压病，非但确定了治疗减压病的特效方法沿用至今，而且有力地证明了减压病病因的气泡学说。现在，潜水事业发达的国家，凡有可能发生减压病的潜水（高压）作业现场，都备有加压舱（或至少联系有关单位的加压舱备便），并有法定的（或借鉴的、经验的）加压治疗表；对患减压病的潜水者，必须进行加压治疗，即使已延误，仍应力争机会进行这一疗法。这些均已成为常规的制度。加压治疗方案，仍在继续被研究和发展之中。

1899年，Smith 指出了肺型氧中毒，为进一步研究氧中毒和合理利用高压氧起了

启发性的作用。

1900年 von Schrötter 提出:下潜和上升都要缓慢地等速度进行以预防减压病等。此即“等速减压法”。

1907~1909年, Haldane 等在潜水减压时预防发生减压病的问题上,作了大量的调查研究和动物实验及人体上的验证之后,揭示了关于氮在体内饱和、过饱和及脱饱和等运动的规律,制定了防止减压病的减压方法——“阶段减压法”;并制订了阶段减压潜水减压方案表。Haldane 的潜水减压原理,迄今仍在被应用和不同角度地被发展着。

1924~1925年, Sayers 等鉴于长期以来观察到呼吸高压空气者出现类似酒醉的现象,把氦气代替氮而与氧混合作为呼吸气体,试用于沉箱作业工人。

1931~1934年, Adams 和 Pollak 观察了病例和进行了动物实验,明确了肺气压伤的原因是由于肺内压悬殊地高于外界,以致肺脏破裂,气体进入肺静脉后经左心而达体循环动脉系统;又可能有气体进入邻近肺的空间如胸膜腔、颈部皮下、纵隔、腹腔等。

1935年, Behnke 等确定了氮麻醉这一事实之后,1937~1938年 End 等正式用氮氧混合气于潜水以避免氮麻醉,延深了潜水的深度。现代的大深度潜水,都需使用氮。

1961年, Zaltsman 把氮氧潜水时一向被当作是寒冷引起的颤抖等体征,认为是高分压氮引起的“麻醉”的先兆,以致就有“氮颤抖”和“氮麻醉”等概念。以后,经 Brauer等(1966)和 Miller 等(1967)确定,这是“高压神经综合征”(HPNS)的一种表现。有些研究者还把早已观察到(Case等, 1941)以后命名为“加压性关节痛”的症状和体征,也归在 HPNS 之内(Chousteau, 1971),但一般仍分开。

1962年,对于惰性气体饱和-过饱和-脱饱和理论的进一步发展及有关技术的运用,经过实验(Bond, Cousteau, 1957)而达到使潜水者能在水下(高压下)长期居住和作业,即饱和潜水的开创,使潜水和潜水生理学、潜水医学开辟了一个新的时代。

1975年, Lambertsen 等确定了“等压气体逆向扩散综合征,”明确了机体与环境间、血液与组织间扩散速率不同的惰性气体逆向扩散足以致病的现象;对其机理作了初步的研究和结论。

为了解决在水下环境中所遇到的各种问题,潜水科学应用了许多其它学科有关的理论和技术,形成为一门综合性的学科。作为潜水科学组成部分的潜水生理学和潜水医学,其进展也与有关学科,尤其是正常生理学与一般医学的发展密切联系。例如:关于微循环的生理和病理的深入研究、关于凝血机制特别是播散性血管内凝血的研究,对某些严重减压病的深入认识及其治疗的恰当措施和获得积极效果,有决定性的意义。又如根据超声波回声的原理研制成气泡探测仪,对于减压病的气泡形成理论的再探讨及减压病的诊断和预防等,都有很大裨益。又如数学理论和电子计算机技术的应用,为机体内惰性气体运动规律作数学模拟、按具体情况快速计算出潜水者特异的减压方案和根据预定程序自动地实施治疗或减压方案等,都直接或间接地促进潜水生理学和潜水医学向更高的水平发展。类似例子不胜枚举。简言之,潜水生理学和潜水医学作为独立的学科,有其自身特异的发展,但同时又是在作为整体的科学的发展中发展的。而且,在“受益”于其它学科的同时,也必在一定程度上“助益”科学整体的前进。本书主要介绍生理学理论以及一般医学理论和技术在潜水实践中的应用。

(倪国坛)

# 第一章 潜水装具的基本生理学原理

就最初的起源而言，潜水装具开始于倒置地罩扣潜水者头颈部使能在水下维持短时呼吸的桶。从这种利用“扣桶”的潜水中，可以发现潜水装具设计中必须解决的一些根本问题，例如：①桶内气体的体积随深度的增加而缩小。②不久，潜水者的呼吸动作显著增加，这是CO<sub>2</sub>积聚所引起的。③如果还可能勉强维持下去，必将引起低氧症，因为有限的氧趋于耗竭。④始终需要对桶施加恰当的压重方能下潜，但一定的压重仅能对气体的某一相应体积是合适的。若压重过小，下潜困难或不可能；若在水中失去压重，会突然漂浮出水；若压重大则导致迅速直沉水底，即使不引起气压性损伤，若深度够大，也将发生氮麻醉。⑤潜水者的视野非常有限。⑥无法御寒保暖。

综上所述，对潜水装具设计的基本要求是能够：①解决人在水下所需呼吸气体的供应和更新。②对水的浮力的适当克服和利用。③御寒保暖。④尽量不妨碍或有利于发挥人体固有的感觉和运动等各种机能。其中以解决呼吸气体的供应和更新问题为首要。故本章着重围绕解决呼吸气体问题而进行讨论装具设计和生理学原理。

## 一、对不同类型潜水装具的基本要求

### (一) 呼吸气体自由流动的装具

以上述利用倒扣桶的原始方法为例说明：从水面通一根空气管到桶内，并用风箱把水面的空气打入桶内，多余的空气由桶口边缘处溢出，则呼吸气的供应和更新便可基本解决。这样的原则（如图1-1）在现今的潜水钟、通风式头盔（以至沉箱、水底以下隧道）等，仍被沿用。

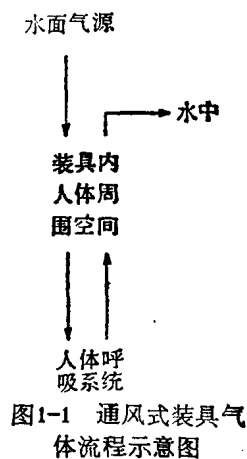
对这类装具，若单纯地当作呼吸装置来看，所考虑的唯一关键是气流的速率（单位时间内供应的空气量，亦称通风率），即空气必须按照设定的速率注入其中。通常，首要考虑的是以保证除去CO<sub>2</sub>所需的气体量决定气流速率。因为在足以除去CO<sub>2</sub>的通风条件下，供氧必定足够。

如果要求通风率足以防止CO<sub>2</sub>浓度高过某一水平，空气的通风率取决于潜水者产生CO<sub>2</sub>的速度以及人体对呼吸气体中CO<sub>2</sub>分压的耐受上限。若要求装置内的CO<sub>2</sub>浓度为零，显然是不现实的，因为：

$$\text{CO}_2 \text{ 浓度} = \frac{\text{每分钟产生的CO}_2 \text{ 量}}{\text{每分钟通风气量}} \times 100\%$$

$$\text{即通风率} = \frac{\text{每分钟产生的CO}_2 \text{ 量}}{\text{CO}_2 \text{ 浓度}}$$

在机体不断产生CO<sub>2</sub>的条件下，要求装具内CO<sub>2</sub>的浓度为零，即要求通风率为无穷大，且供通风的气体绝对不含CO<sub>2</sub>。所以，一般都根据实际测试，定出容许CO<sub>2</sub>分压的上限，对通常的水面供气潜水装具，定上限为0.03个绝对大气压。若CO<sub>2</sub>产生的速率为



0.0849米<sup>3</sup>/小时（中等劳动），则需有28.3米<sup>3</sup>/小时的通风率（按标准状况下的体积计，并假定装具内的气体随时都充分混合）。这对容积较小的头盔-潜水衣和容积较大的潜水钟（乃至水下隧道）都适用。当然，在潜水钟（或隧道）须按具体人数计算CO<sub>2</sub>产生量，而且需要经过较久的时间才能达到稳定。

在浅潜水时易达到这样的通风率。但在深潜水时，因为必须维持潜水员所在深度处压力下的通风体积，就比较困难。例如在60米深度（7ATA）处为了有相当于水面的通风量（水面当量），需要7倍于水面的气体流速。使用人力压气泵固然是费事、费力；利用电动或燃料驱动的空气压缩机，也耗费颇多。尤其是含价格昂贵的惰性气体时，这样的耗费是不胜负担的。

如果装一个CO<sub>2</sub>吸收罐在头盔内或气体流程的回路内，应用Venturi原理，借喷射装置造成气体从头盔经吸收罐后又回到头盔的分路循环，使CO<sub>2</sub>基本上都被吸收掉，喷射的动力就是供应的新鲜气体，它不直接用作头盔通风（图1-2），故供应需要的气量可减少10~20%。在这样的情况下，供气量将受制于是否有足够的氧。这些，都与“半密闭回路式呼吸器”（见后）的原则相同。

## （二）开放式流程的水下呼吸装置（图1-3）

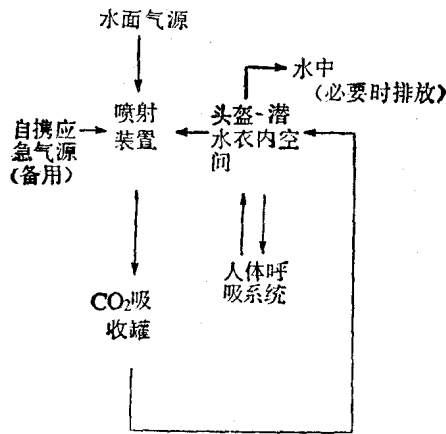


图1-2 喷射-循环-通风式装具  
气体流程示意图

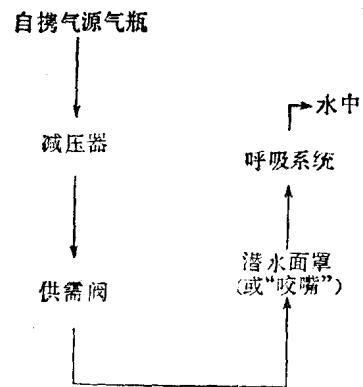


图1-3 开放式潜水呼吸器气体  
流程示意图

1. 自携式水下呼吸器的工作原理 自携式水下呼吸器（SCUBA）或称“水肺”，是现今使用最普遍的水下呼吸器。它包括一个或多个气瓶，借管、阀连接，由供需阀（有时专指供需阀为水肺）调节供气。阀由吸气和呼气的力量驱动。

供需阀随时都适合于水深变更和吸气量变化的需要。吸气终止和呼气期间，供气即自行停止。供需阀外形如碗状圆“罐”，其盖为橡皮隔膜，底部大圆孔接通面罩或“咬嘴”。如果对该罐内抽吸（使用者吸气时），由于内压降低，橡皮膜被吸向内，这将操纵一个（或一系列）杠杆，使杠杆打开阀；如果潜水深度增加，由于外压升高作用于隔膜，压迫隔膜向内，同样通过杠杆打开阀。阀开后，空气从气瓶流到“罐”内，即自动供气，直到隔膜内外两面压力相等时，隔膜恢复原位，阀借弹簧的弹力而关闭，供气停止（图1-4）。必要时可用手按压隔膜补充供气。呼出气则由阀的安排，呼入水中，除所略



增的死腔外，基本不与吸入气相混。所以，消耗的气量比通风式装具节省很多，例如在常压下只需 20 升/分。

2. 关于供气阀供气性能的讨论 在考虑供需阀工作性能方面的问题时，须注意：①要得到一定的空气流量，应对供需阀施加的抽吸力是多少？②气流如何随深度而变化？③气流如何随气瓶内压力不同而变化？

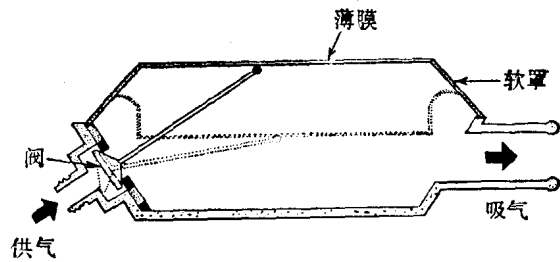


图1-4 供需阀工作原理示意图  
(虚线表示吸气时位置)

按理想，对供需阀进行最小的抽吸力，就可使之送出等于需求的最高峰气流量。但事实上这是不能达到的。实际所遇到的情况是：要得到预定的流量，必须施加相应的抽吸力量；而且，气体流量是气源压力、潜水深度和吸气阻力的函数。

气源压力和潜水深度与供需阀气体流量的关系，有两种不同的情况：①供需阀直接连着气瓶，即供需阀在气源压力下工作。在气源气瓶的瓶阀(截止阀)打开时，气压由高压不经逐步减低而一步减至潜水深度处的压力。供需阀的气流依赖于气源气瓶内压，在瓶压高时，供需阀中输出的气流量大大超过通常的需要量。此时所要求的抽吸力很小。仅在相对地较低的瓶压时，要较大的抽吸力，甚至会发生气流量不足。这种“一步连接制”供需阀的特点是，简单而成本较低；随着深度增加，气源与外界之间的压差减小，气流量降低(有经验者下潜时可以根据流量判断深度)，其在深处的大致最大流量，可以用最大水面流量除以作业深度绝对压而求出。这提示，经由这样的连接制输出的气体，其质量是大致恒定的。②气源与供需阀之间有一减压阀(一级减压器)使气源气压(高压)降至只高于作业深度4~10 ATA左右(中压)后，再供给供需阀(二级减压器)，即供需阀经常在中压下工作。这种“两步连接制”的供需阀所要求的抽吸力并不受深度改变的影响；在有效气源气压的范围内，也不受气源气压改变的影响。其气体流量随深度加深而增大，供气余压不变，即气体流量保持适合于相应深度。

吸气阻力与供需阀的位置有关。例如供需阀的位置高于人体“肺中心”部位若干水柱，则因肺部所受水压大于供需阀所受水压，吸气时必须先克服这个压差，然后再继续吸，才能造成对供需阀的抽吸力。吸气阻力又与潜水者在水下的体位有关。例如安装在背上的供需阀，当潜水者直立时，因靠近肺中心部位，吸气阻力不大；但在潜水者面向下游泳时，供需阀高于肺中心，吸气的阻力将相应增加(呼气时则相应较易)。若在供需阀中增加喷射装置，可使吸气阻力减小，这是因为喷射气流在供需阀内引起压降，帮助产生抽吸力。

至于气源，自携气瓶的储气量很有限。但也能通过管子自水面供气(管供式)，借以保障气源压力的基本不变和事实上的无限制持久供应。这样的系统曾被称为“水烟筒(hookah)式”、即“管供式”或“水面供需(surface demand)式”。因为这种方式既方便又节省压缩空气，故在许多情况下，可以利用这种方式代替通风式潜水(“标准潜水”)系统。

### (三)半闭式呼吸器

半闭式呼吸器的主要性能是，在CO<sub>2</sub>被充分吸收而除去的条件下，根据潜水员的需