

# 潜水生理学 和潜水医学

[英] P.B. 贝内特  
D.H. 埃利奥特

QIAN SHUI  
SHENG LI XUE  
HE QIAN SHUI  
YI XUE

海洋出版社



# 潜水生理学和潜水医学

[英] P.B. 贝内特 编  
D.H. 埃利奥特

彭润松 杨德恭 龚国川 陈 阳 吴绪清 姚竞春  
许锦棠 郭春丽 龚锦涵 范文豹 杨奎德  
龚国川 杨德恭 姚竞春 高 风 胡正元 王德恒  
曾宪英 彭润松 章恒笃

译  
校

海洋出版社

1991年·北京

## 内 容 提 要

本书简要介绍了潜水技术发展的历史, 各种潜水装具和人类开展各类潜水活动, 详细阐述了潜水过程中机体的呼吸功能和运动, 以及静水压本身、氧的毒性作用、惰性气体的麻醉和高压神经综合征对潜水员的影响, 并侧重论述了与潜水过程有关的各种职业性疾病, 如减压病、减压性骨坏死、耳和副鼻窦损伤等的发病机理、预防措施和治疗方法。对于温度问题、减压理论及其应用、等压气体交换和逆向扩散时的过饱和、减压时的超声监测以及各种水下事故的原因分析和处理等, 也均有较详尽的阐述。

本书主要适用于潜水(高压)医学专业的科研、教学、临床技术人员, 潜水装具研究设计人员, 也可供海洋工程、潜水救捞及医院高压氧科的专业技术人员参考。

## The Physiology and Medicine of Diving

Bennett and Elliott

1982, 3rd Edition, Bailliere Tindall London

### 潜水生理学 and 潜水医学

彭润松 杨德恭 龚国川 陈 阳 吴绪清 姚竞春 译  
许锦棠 郭春丽 龚锦涵 范文豹 杨奎德  
龚国川 杨德恭 姚竞春 高 风 胡正元 王德恒 校  
曾宪英 彭润松 章恒笃

责任编辑: 吴宜倜

\*

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 北京京辉印刷厂印刷

开本: 787×1092, 1/16 印张: 36.875 字数: 700千字

1991年8月第一版 1991年8月第一次印刷

印数: 1—1500

\*

ISBN 7-5027-0422-1/R·1 定价: 30.00元

# 译者的话

本书是一本潜水医学和潜水生理学专著，由美国、英国和加拿大等国二十多位长期从事潜水（高气压）医学和生理学研究的专家学者撰写。

本书从医学和生理学角度，概述了人类在潜水和高压作业领域所积累的丰富知识和宝贵经验；比较全面而系统地介绍、分析和评论了近年来许多研究机构和科研人员在潜水技术理论、潜水医学、潜水生理学和潜水装具等方面取得的进展和成果；同时，对目前虽还没有充分认识或完全解决、但却有重要意义的一些问题，也进行了大胆、认真的探索和研讨。国外有关学者对此书评价很高，认为称得上是一部第一流的专著。

第三版在前两版基础上，作了较大的修改，既删减合并了部分内容，又增添了许多近年来取得的新成果、新知识，使各章所论述的问题更为集中、精练，内容更为丰富、充实。本版全书共分二十三章，各章既自成一体，又互相联系，前后呼应。论述的主要问题有：潜水的简要历史，高压空气环境，各类潜水实践和使用的潜水装具，水下呼吸器的设计原理，潜水过程中机体的呼吸功能和运动，静水压、氧的毒性作用、惰性气体的麻醉作用及温度等因素对潜水员的影响，减压的理论和实践，减压方法的发展过程，减压病的发病机理、临床表现和治疗处理，等压气体交换和逆向扩散时的过饱和，减压性骨坏死，潜水过程中副鼻窦和耳的损伤，减压时的超声监测，各种水下事故的原因分析和处理等。本书有较多的图表并提供了大量参数，每章之后还列有参考文献，使读者可从中获取更多的情报信息。

为了使我国潜水（高气压）医学专业领域的科研人员和各类工作人员及时了解国外同行们的工作成果和研究动态，借鉴他们的先进经验，我们特组织力量翻译了本书，但愿这本译著对我国的潜水技术和潜水医学事业的发展能有所促进和帮助。

本书专业性很强，内容新颖，翻译难度亦较大，除在全书的译校工作中，译校人员互相磋商、反复研讨斟酌外，还设立了由龚锦涵、姚克春、龚国川、杨德恭、彭润松等组成的定稿小组，专门研究、解决和审定了各章提出的一些疑难问题。

龚锦涵教授除参加本书部分章节的翻译和定稿工作外，还对全书的有关外文和专业问题进行了技术指导，并给予了大力支持和帮助。唐永兴同志参加了有关章节的审校工作，海军医学研究所情报资料室的领导和有关同志亦给予了各方面的支持和帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

由于我们的专业及外文水平有限，因此，虽经反复研究修改，错误和不当之处仍在所难免，敬请读者批评指正。

现将有关事项说明如下：

(1) 原书使用的计量单位相当混乱，根据国务院有关规定，译者均已将其换算成法定计量单位。为便于读者阅读，大部分采用将原单位和我国法定计量单位并列对照的形式表示。

(2) 压力单位除保留原单位外，并在括号内加注换算后的法定压力单位帕斯卡 (Pa)。

为了与其他符号区别起见，法定容积单位升，一律以L表示。为了便于制版，对部分图表中的单位未予换算，因为大多数数据的换算值可从正文或图注中查到，如读者自行换算，可参照以下原则进行： $1\text{ata} = 101.33\text{kPa}$ 。凡用ats的参数，换算时，均应先加上一个大气压，使其变为ata值，然后再乘以101.33，即为kPa值。因而换算得出的用Pa（或kPa、MPa）表示的压力单位均为绝对压。另外，在一些章节中，氧的压力有时用ats表示，实际上应为ata，故换算后的压力为绝对压。

(3) 原书中明显错误之处，已由译者改正，不再一一注明。

译者

1985年12月



# 前 言

近年来，高压生理学和高压医学领域以及商业潜水和海军潜水的持续发展，产生了修改本书的需要。例如，本书在1969年第一次出版时，人们认为“氮屏障”在305m。而在今天，在海中进行这种深度的潜水差不多已经司空见惯，而舱内模拟潜水已使人达到这一深度的两倍以上。

在这次的最新版本中，各章均重新进行了修改并增加了一些新的论题。除保留了大家熟悉的老作者外，还有许多新作者加入了本书的写作行列。但是，我们必须感谢那些为本书的前两版作出了贡献的作者。本版不一定再出现他们的名字，但他们的语言仍予以保留。

本版在工作潜水和研究方面，强调影响潜水员工作能力的装具设计的重要性。影响呼吸器设计的工程学和生理学原理，被看作是有可能限制安全潜水作业的因素，因而综合在同一章内。前两版涉及减压理论和实践的那几章已被压缩，因为这几章尽管对潜水员的安全和健康仍很重要，但减压表的设计看来不再支配潜水研究的重点。应人们的普遍需要，本版对研究的实用性给予了更多的关注，尤其是把减压和潜水事故临床方面的问题作为重点。

十几年来，常压潜水系统和遥控潜水器有了很大的发展，这两种技术都可使人免受持续高压暴露的影响。若对其设计予以适当改进，这些潜水器将能承担许多在目前由潜水员完成的水下作业。但是，仍有许多重要的工作需要人的直接参与。人仍是各类水下工具中的“万能工具”。所以，在水下建筑和维修用的无人系统达到非常可靠的程度之前，仍需要潜水员在所能达到的最大深度安全有效地工作。

关于人对压力的反应，仍有无数的问题有待解决。环境高压的物理效应是不可改变的，这些物理效应对人的影响随深度增大而加重。许多生理机理仍有待认识。曾使人在60多个大气压下停留将近两周的开拓性研究在人类生理学领域是史无前例的。人的深度极限可能正在接近于达到，但现有的证据表明，这一极限的位置仍然太深，以致于无法精确确定。有关压力暴露的即时效应和长期效应的发病机理和治疗，也还有一些没有解决的问题。对氧中毒问题的阐述可给人类带来一些好处，譬如高压氧在內外科疾病的治疗方面得到了广泛的应用，减压技术也得到了重要改进。在作业深度，需要开展更多的研究，以延长在50m以浅的海水深度安全作业的时间，并提供更为安全的减压方法。

未来十年水下生理学研究的最重要领域，可能是它与工程学的联系。例如，目前限制有效的大深度潜水作业的一个因素，是缺少这样一种呼吸器，这种呼吸器既能向潜水员供应适宜温度的足够气体，又不会加重他的呼吸功，还能使他和水面监督员清晰地通话。

和温度、失重一样，压力也是一种可用来探索其他基础生理机理的重要工具，已经证明它对于充分理解普通麻醉是非常重要的。潜水医学领域开展的研究，同样也可能阐明一般的临床医学问题，对肺气压伤造成的气栓的研究，即有可能应用于局部缺血或钝器损伤后神经功能的恢复，就是这方面的一个例子。

尽管公制的使用更加广泛，但美国和许多国际潜水公司仍坚持用大气压表示压力，用英

尺表示深度。所以，对于压力，我们决定采用绝对压 (ata) 和巴 (bar) 两个单位。如果提到的大气压不是绝对压，则使用缩写 ats。由于1个大气压 (1ats) 相当于 1.013bar ( $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ )，故本书仅在个别情况下进行这两种单位间的换算。关于海水深度，全书给出了米 (m) 和英尺 (ft) 之间的大部分换算值。在《水下生物医学研究》杂志和《美海军潜水手册》的附录A中，可找到有关这些单位和其他单位的换算表。呼吸方面的缩写和符号仍采用 Fedn Proc. Fedn Am. Socs exp. Biol.; 9, 602—605 (1950) 推荐的缩写和符号。

D. H. 埃利奥特

P. B. 贝内特

1982年6月

# 目 录

第一章	人类进入海洋的简史	(1)
第二章	高压空气环境	(14)
第三章	自携式水下呼吸器潜水实践和潜水装具	(29)
第四章	商业潜水实践及装具	(45)
第五章	水下呼吸器设计原理	(54)
第六章	呼吸与运动	(98)
第七章	静水压的生理学	(163)
第八章	液体呼吸与人工鳃	(197)
第九章	氧中毒	(208)
第十章	惰性气体麻醉	(249)
第十一章	人的高压神经综合征	(273)
第十二章	温度问题	(307)
第十三章	减压方法演变的历史	(331)
第十四章	减压理论及其应用	(367)
第十五章	等压气体交换和逆向扩散时的过饱和	(400)
第十六章	减压的超声监测	(421)
第十七章	减压性疾病的发病机理	(452)
第十八章	减压性疾病的表现	(478)
第十九章	减压性疾病的治疗	(491)
第二十章	气压性骨坏死：无菌性骨坏死	(508)
第二十一章	潜水中的耳和副鼻窦问题	(527)
第二十二章	水下事故的原因	(556)
第二十三章	潜水事故的处理	(570)



# 第一章 人类进入海洋的简史

A. J. Bachrach

现代潜水员，装备了专门研制的装具，或乘坐用新兴技术研制的运载器，继承了数世纪以来人类所进行的探索和发明，使水下作业终于成为可能。本章旨在简略回顾这一历史片断和当今潜水技术的前景，但是，不准备作深入的或全面的回顾。

Larson (1959)、Dugan (1965) 和 Davis (1962) 所撰写的有关潜水的历史是有重大价值的。这些著作介绍了1957年以前潜水各阶段的发展情况。1957年康涅狄格州新伦敦的一个美海军研究人员小组在实验中应用了饱和潜水。这是一种可使潜水员在海中进行更大深度、更长时间作业的潜水方法，就在这一年，Jacques-Yves Cousteau 和 Edwin A. Link 提出了饱和潜水理论。

一如既往，今天人类为获取食物、寻觅瑰宝、执行军事行动、开展娱乐和进行探索而进入海洋。在 Beebe (1934) 所著的《下海半英里》一书中对觅宝有详细介绍。在书中，他报道了早在公元前4500年在比斯玛雅（美索不达米亚）进行的一次考古发掘中，发现了镶嵌珍珠母的珍宝（它们一定是先由潜水员采集，后由工匠制作而成的）。Beebe 还叙述说，早在公元前3200年，珍珠贝壳在底比斯就被大量用作雕刻装饰物。公元前2250年中国皇帝禹就收到了由部落进贡的牡蛎珍珠贡品。

这些人工制品是人类进行自由潜

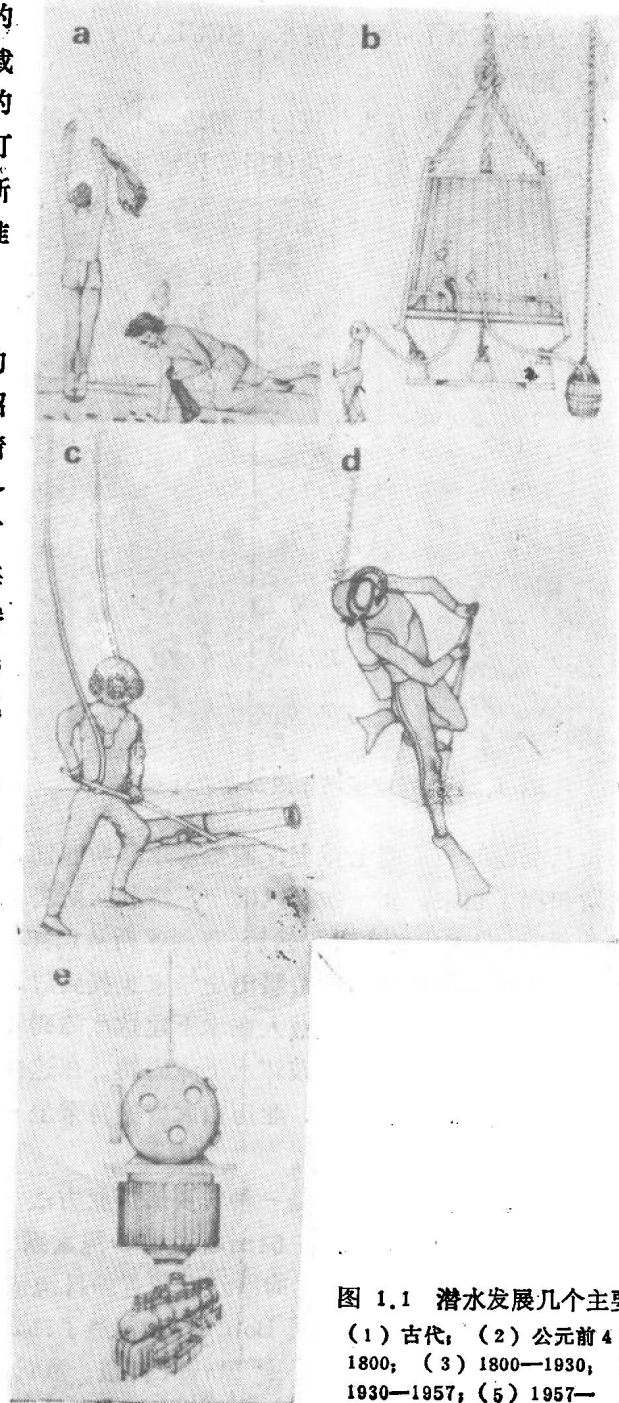


图 1.1 潜水发展几个主要时期  
(1) 古代; (2) 公元前4世纪—1800; (3) 1800—1930; (4) 1930—1957; (5) 1957—

水或屏气潜水，在海中进行作业时所用的早期技术的最早的例证。图 1.1 描述了潜水发展的几个重要时期。潜水从无文字记载的时期到大约公元前 4 世纪期间进行的自由潜水开始，那时，亚里士多德曾提到过一种潜水装置 (Larson, 1959)，后继续发展到 19 世纪初叶。潜水发展的几个阶段为：

- (1) 自由潜水或屏气潜水；
- (2) 潜水钟潜水；
- (3) 水面供气式潜水或者头盔式潜水，即所谓硬头盔式潜水；
- (4) 自携式水下呼吸器潜水 (SCUBA) ；
- (5) 饱和潜水。

与后几个发展阶段齐头并进的研究是为不断改进常压潜水服而进行的断断续续的研究。就是这一研究，已使人类在成功使用常压潜水系统方面，如吉姆潜水服 (图 1.2)，达到了一个重要的阶段。本书也将介绍这方面的发展情况。

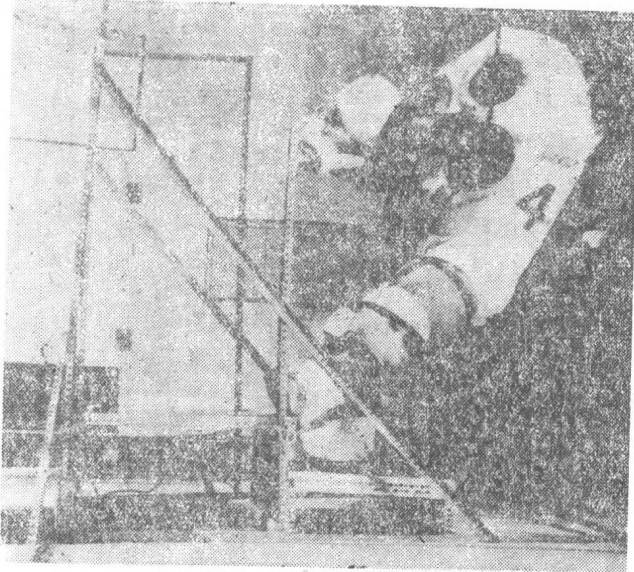


图 1.2 吉姆常压潜水服正在进行鉴定

## 自由潜水

在希腊神话中，有许许多多关于水下世界的传说。赫斐斯塔司 (罗马的火和锻冶之神) 因长得丑，被人从奥林匹斯山掷入海中。他在水下洞穴中建造了一个锻工场 (根据 Dugan 1965)，他很可能是水下工程师之神。根据某些传说，阿芙罗狄蒂 (爱与美的女神) 是由海洋中的泡沫变成的。宙斯迫使她嫁给了赫斐斯塔司。

赫罗多塔斯讲了有关赛利亚斯的故事。为从沉没的波斯船上觅宝，他受塞尔塞斯雇佣，进行潜水。任务完成后，塞尔塞斯将赛利亚斯扣押了起来。在一次暴风雨中，赛利亚斯潜入了亚培塔的海中，割断了塞尔塞斯的大帆船的锚链，造成一场灾难。然后，赛利亚斯从 14.5km 以外的亚尔太米修海上钻了出来。

另一位名叫苏塞狄蒂斯的希腊历史学家也提到过，在雅典人进攻锡拉丘兹城中曾使用潜水员锯断水下障碍物。锡拉丘兹人在水下建这些障碍物是用于阻挡和破坏希腊船只的。在包围泰尔中，也同样使用潜水员破坏水下障碍物。在这次战斗中，亚历山大大帝命令潜水员进行水下爆破。据说，另有一次，亚历山大曾亲自乘坐一种称为 Colimpha 的原始潜水钟下海 (Beebe 1934; Davis 1962)。

在潜水中，自由潜水依然是一种主要的作业方法 (见图 1.1a)。1913 年，一名采集海绵的希腊潜水员 Georghios，在 61m 深处将一绳索系于意大利主力舰里贾纳·马加里达丢失的锚上 (Dugan 1965)。日本的潜水女戴着护目镜或面罩屏气潜水至 44m 深处去采集珍珠。1969 年，一名美海军潜水员 Bob Croft 创造了 75m 的屏气潜水记录。后来，这一记录于 1976 年被一名法国潜水员 Jacques Mayol 打破。Mayol 创造的当前世界最深的屏气潜水记

录为102m。Mayol（他不提倡运动潜水员进行这种逞英雄的大深度屏气潜水）抓住了加重缆绳的棒，屏气时间长达3 min 39s。

自由潜水的优点是灵活，其显著的缺点是供潜水员使用的气量显然有限。潜水员的气量只是下潜前在水面吸入的气量。

## 潜水钟

亚历山大乘坐 Colimpha 号原始潜水钟下海（约在公元前330年），是人类采用潜水设备进入海洋，并由此得到防护和呼吸气的最早报道之一。有关这一传奇潜水的报道记载在13世纪法文手抄本《亚历山大的真实故事》上（La Vrai Hisfoire d' Alexande）。亚里士多德在他的《Problemata》一书中曾谈到过使用中的潜水设备：“……他们想出了一种供潜水员呼吸的途径，其方法是将一容器送给水下潜水员。自然，容器内装的不是水，而是空气，可以一直支持潜入水下的潜水员……”（Aristotle 1927；Davis 1962）。

从亚里士多德时期（公元前384—322年）到中世纪，潜水几乎没有得到多少发展。1240年，Roger Bacon 提到过“人可以借以在海床或河床上行走，但不会发生危险的设备”。可是，直到1535年，Guglielmo de Lorena 才研制出了第一个“潜水钟”。一名潜水员将这种潜水装备置于肩上，而设备的大部分重量由吊索承受，在罗马附近的雷米湖内工作了约1小时（Davis 1962）。

1691年，著名的英国天文学家 Edmund Halley 制造出了现代潜水钟的早期产品，并取得了专利权。当时，Halley 是皇家学会会长。他在递交给学会的一份报告中介绍了他的潜水钟（1716年）。这只潜水钟用木头制成，外表包有铅皮，容积约1.7m<sup>3</sup>，顶部装有玻璃，可使光线进入钟内；该潜水钟也有一个通风的阀和一个可提供补充气体的桶。为补充气体而设置气桶，这本身是饶有趣味的，因为正如 Davis（1962）所说，Halley 肯定知道 Denis Papin 发表的一个报道。Denis Papin 是一位法国物理学家，是皇家学会的会员。1689年，他提出了也许是第一个从水面向处于高压下的钟内提供空气的计划。Papin 的建议是利用压力泵或风箱使钟内保持恒定的压力。当 Davis（1962）对 Halley 用桶补充气体的方法进行推测时，他相信 Halley 可能担心 Papin 会指控他剽窃这一设想。虽然 Papin 事实上没有根据这一模型制造潜水钟，但是他的想法是有根据的。在 Smeaton 于1738年成功地采用压力泵之前，Halley 的方法应用了一个多世纪。1799年，Smeaton 使用这一压力泵使他的“潜水箱”潜入水下（Penzias 和 Goodman 1973）。

Halley 的潜水钟的一个有趣的特征是使用脐带结构。他于1716年在给皇家学会的报告中这样写道：“我发现，潜水员离开（潜水）装置一段距离，用小的软管不停地向他供气，同时，当潜水员应返回钟内时，这些管子又可起引导潜水员重新回到潜水装置的作用。这一想法并不是不现实的。”

有报告记载的第一只潜水钟，很可能属于一位荷兰发明家 Cornelis Van Drebbel。这位荷兰人于1620年研制出了所谓第一艘成功的潜艇（用桨划动），在泰晤士河水下约4.6m深处航行。据传说，詹姆斯一世国王也曾乘坐过这艘潜艇（至少这是詹姆斯国王的说法）（Bachrach 和 Vorosmarti 1981）。将这一潜水器看成是一只潜水钟，而不是一艘真正的潜艇，这一说法也许出自 Faber 的评论。在 Penzias 和 Goodman 的著作中（1973）曾提到，在划

桨手坐的那部分船舵没有船底，这样，划桨手可始终看到水……

虽然一般来说，潜水钟时期在 19 世纪初叶就告结束，但是，现代的“开式”钟或“湿式”钟（见图 1.3）显然是老技术的继承和发展。

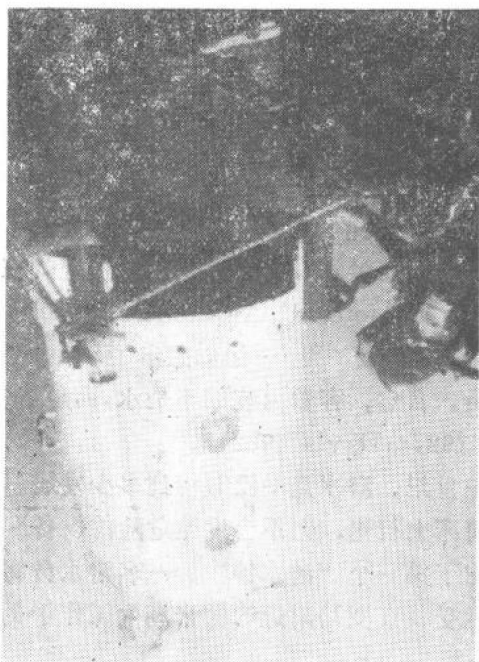


图 1.3 现代“开式”或“湿式”潜水钟

正向前迈进了一步。有些历史学家将该系统看成第一个名副其实的头盔-软管潜水设备。由于使用了该潜水系统，Freminet 成功地于 1774 年潜入 15m 深处，并在该深度停留了 1 h (Larson 1959; Davis 1962)。

1918 年，Augustus Siebe 发明的一种“开式”潜水服，使潜水服的研制取得了第一次重大突破。Siebe 的潜水服包括一件齐腰部的上衣和金属头盔。由一个压力泵从水面供给头盔的高压空气可从潜水员的腰部自由排出。1837 年，Siebe 将他的“开式”潜水服改装成“闭式”潜水服，保留了原有的头盔和压力泵，但潜水员处于完全气密的潜水服内，空气经阀门排出。这就是现代硬头盔潜水装具的原始产品（有人认为，William H. Jones 在 1825 年第一个设计出了自携式潜水服。他的潜水服可用围在潜水员腰部的金属带自携高压空气。历史学家报告说，这一装具本来应该是可行的，但似乎从未试验过）。1839 年，当英国开始打捞“皇家乔治”号战舰时，Siebe 的潜水装具便得到了应用。“乔治”号是一艘有 108 门炮的皇家战舰，1782 年在检修期间倾覆，沉没在 20m 深的水下，给航行造成了威胁 (Davis 1962)。

将硬头盔与混合气，特别是氮氧配套使用，可使潜水潜得更深。这项技术出现在 20 世纪。1939 年，打捞美潜艇“Squalus”号是人类在公海上将氮氧用作一种呼吸混合气的一次重大尝试。它对潜水技术发展的意义将在本章的后部介绍。

随着硬头盔潜水不断取得进展，潜水员获得了更多的空气，同时防护和机动性也得到了改善。但是，直到自携式水下呼吸器的出现，潜水员才获得了屏气潜水员的自由，而且，他携带的气量可使他比自由潜水员在水下停留更长的时间。

## 重 潜 水

虽然潜水钟为潜水员提供空气和防护，但是空气的供给和潜水员的机动性却受到严重限制。因此，潜水需要有一种能使潜水员有充足的气源，且能较自由活动的手段。

在 17、18 世纪，为了向潜水员提供空气，人们研制出了无数装置（一般用皮革制成）。其中大多数实际上无法应用，这是由于由水面向潜水员供气的那段长长的管路不能与环境水压平衡，因而未能发挥作用。

当法国科学家 Freminet 设计出了一种用风箱从水面通过一段软管向水中的潜水员不断加压供气的系统时，水面供气潜水系统才算真

## 自携式水下呼吸器

高压空气装具首创于1808年前后。Friedrich Von Driberg设计了一种佩带在潜水员背上的置于一个盒内的风箱装置,可向潜水员供应来自水面的高压空气。Von Driberg 的名叫“海神”的装置虽然实际上并不可行,但它使人们认识到高压空气可作为一种水下技术加以应用。早在1716年, Hally就在他的关于潜水钟的文章中提到了这一水下技术的应用(Larson 1959)。1830年前后,一位名叫Charles Condert 的美国人使用带有便携式贮气瓶的高压空气潜水服,成功地潜入6 m深处。但是,1832年,他因其装具失灵而溺毙。Condert 将高压空气作为一种方法成功地应用于潜水,这在潜水发展的关键时刻是一大贡献。

1865年,二位名叫Rouquayrol和Denayrouse的法国人发明了一种潜水服。他们虽然把这种潜水服称为“自携式”,但实际上是一种硬头盔式水面供气系统。该装置配有一个贮气瓶,安装在潜水员的背上,在每一呼吸周期可按需供气(Larson 1959, Davis 1962)。自动按需供气阀的研制成功是呼吸器的一大进步。现在,需要时,潜水员可吸足气,而不必象原先那样靠软管从水面提供连续的,但有时不可靠的气流。使潜水历史学家特别感兴趣的,是儒勒·凡尔纳著名小说《海底两万里》(1875)中曾提到了这一呼吸器。这本小说著于1869年,即罗-德氏装具(指Rouquayrol和Denayrouse发明的装具)研制成功后4年。它用尼摩船长和阿罗纳斯教授之间的下列对话形式介绍了这一装具及其应用:

“教授先生,你和我都知道,只要携带足量的呼吸气,人是能在水下生活的。在水下工作中,作业人员穿着水密服,头戴金属头盔,靠压力泵和调节器由水面供气。”

“‘那是潜水装具’,我说”。

“一点不错,但是,在这些情况下,人无法自由行动,他与通过橡胶管向他输气的压力泵连接在一起。如果我们必须这样与‘缸鱼’号相连的话,我们就不能获得成功。”

“‘那么,靠什么手段获得自由呢?’我问”。

“手段是使用你两个同胞发明的罗-德氏装具。为了适合我自己的需要,我已经将它进一步完善。它可以让你处于新的生理条件下,而不致使任何器官发病。该装具包括由厚钢板制成的贮气瓶,内装有50ata(5.07MPa)的高压空气。就象士兵的背包一样,这个贮气瓶用背带固定在潜水员背上。装置的上部是一盒子,可用风箱将空气贮在内。因此,如果不是在正常的张力下,空气就不会泄出。在我们使用的罗-德氏装具上,从盒子上引出二根橡胶管子,连至帐篷状的面罩上,其中一根输入新鲜空气,另一根排出污浊空气,舌头可根据呼吸的需要交替阻塞这两根管子。但是,由于在海底遇到高压,我只得象潜水员一样头戴铜球,二根管子(一根为吸气管,另一根为呼气管)通往该铜球。”

“妙极了,尼摩船长。但是,你携带的空气一定很快就耗尽。而且当其氧含量只有15%时,就不再适宜呼吸了。”

“说得对!但是,我可以告诉你,阿罗纳斯先生,‘缸鱼’号的压力泵使我能贮存压力相当高的高压空气。于是,靠这些条件,装具的贮气瓶可提供9—10h的呼吸空气。”

本片断的精彩之处,与其说凡尔纳常常具有远见卓识,不如说他对当代科学和工程具有敏锐的洞察力。凡尔纳一定很高兴地看到J. E. Williamson于1915年根据他的小说所拍摄的影片。在这部影片中,潜水员的自携式潜水装具中使用了一种更新的净化空气气源的“氧化

锂”（于1897年由 Georges Jaubert 发现）（Larson 1959），这样，就实现了尼摩船长的希望，即潜水员能在“缸鱼”号周围的海洋中长时间地自由活动。

20世纪初期出现了第一个成功的自携式水下呼吸器，但归功于何人，仍有某些争论。在这之前，自携式水下呼吸器已采用各种不同手段使用高压空气，使潜水员呼吸通常由水面供给的空气，然后将气排入水中。将气排入水中就需要提供大量的气量，即使短期潜水也是如此。

气体再生，可使潜水员在水中停留更长的时间。这种尝试可追溯到1680年前后。那时，一名意大利物理学家 Giovanni Borelli 根据空气再生原理设计了一个带有头盔和气管的自携式潜水装置。他的理论认为，呼出气可通过一根经海水冷却的管子得到净化（按设想，不纯物质将吸附在管壁周围的凝聚物上）。Borelli 也给潜水员配上了爪形脚蹼，因为他认为使用这种装置的潜水员应是一名“游泳潜水者”，而不是一名“垂直行走的潜水员”。Freminet 在1774年制成头盔-软管-风箱供气系统之前，根据与 Borelli 装置相同的原理研制成功了一种装具。他在贮气室中还增加了一个小的风箱，促使空气循环。虽然他们的空气净化系统完全无效，但是净化潜水员的呼吸气，进而延长潜水员水下时间，并增加水下的灵活性这一概念必将成为现实（Larson 1959）。

1879年，一名在商船上工作的英国海员 Henry Fleuss 研制出了一种使用 450psig (3.10 MPa) 高压氧的自携式水下呼吸器。该呼吸器配备了一个装有氢氧化钾的气室，用于净化呼出气。当潜水员戴着他的呼吸器，进入位于英国塞弗河下注满水的隧道中关闭因故障关不上的门和进行维修时，他的“闭式回路氧气再生自携式水下呼吸器”取得了戏剧性的成功。配带头盔-软管装具的潜水员是无法在这种曲曲弯弯、凹凸不平的环境中完成该项作业的（Larson 1959; Davis 1962）。

20世纪20年代，法国海军军官 Yves Le Prieur 上校设法将传统的头盔-软管式潜水和无呼吸器的水下潜泳的最佳性能体现在同一装具上，因为每种方法都有其局限性。头盔-软管式潜水限制了潜水员的横向运动，但可使潜水员在水下停留较长的时间。不使用重型装具的裸潜使潜水员能够在水下灵活地活动，但限制了潜水员在水下的停留时间。

1926年，Le Prieur 和另一名法国人取得了“佛-李氏(Fernes-Le Prieur装具)自携式潜水呼吸器”的专利权。该呼吸器包括一个高压空气钢瓶，固定在潜水员背上，由一空气软管与咬嘴相连，压力表突出于左肩上方，潜水员佩带一鼻夹和小型紧贴的护目镜（Larson 1959）。护目镜可保护眼睛，改善水下的视敏度，但是，由于它们不能平衡压力，因此，可能使潜水限于浅深度。第一个样机上的气瓶提供了稍低于 2000psi (13.79MPa) 的空气 (3L)，供水下呼吸不到 15min，而第二个样机（装有 6.5L 空气）可在浅深度潜水较长时间，在 7 m 可潜 30min，但在 12m 仅潜 10min。

脚蹼出现于1930年，这是自1680年 Borelli 爪形脚蹼问世以来，第一次出现脚蹼。这些脚蹼是由一位名叫 de Carlieu 的法国中校设计的。当它与 Le Prieur 的气瓶-护目镜-鼻夹装具配套使用时，更说明了潜水员应是一名游泳者。这是潜水员的一个新概念。潜水员带着自携式水下呼吸器具有机动性，可自由作横向运动，而不是仅仅靠潜水钟或硬头盔装具入水。

1933年，Le Prieur 改进了他的装具，在约 6 m 深处可潜水半小时，在 12m 深处约潜水 10min。他用装有一个面窗的全面罩取代了他原有装具上的护目镜，从而使潜水员较有效地平衡压力。但是，Le Prieur 装具存在着一个主要问题：由气瓶供给的恒定气流浪费了有限



的气源。因此，需要使用可由潜水员控制的按需供气阀，例如，由 Rouquayrol 和 Denayrouse 研制出来的那种早期按需供气阀。

1943 年，Jacques-Yves Cousteau 和 Emile Gagnan 的水肺表演成功。它应用了一个按需供气吸气阀，由 2 只或 3 只压力大于 2500psi (17.24MPa) 的气瓶（每只气瓶装 5L）供气。由于解决了原来自携式水下呼吸器装具供气恒定而浪费气源的问题，因此延长了水下时间。现代开式回路自携式水下呼吸器装具就是在库-格氏 (Cousteau Gagnan) 阀的基础上研制出来的。

既然按需供气阀解决了潜水员控制气流量的问题，下一个重点则是研制使空气确能再生，并避免将呼出气排入水中而造成浪费的呼吸器。使空气（或任何其他呼吸混合气，如氮氧）再用于呼吸，将大大减少耗气量，同时能显著延长水下时间。为此，需要有一过滤器清除呼出气中的二氧化碳，以净化进行再循环的空气。

前面曾提到过这种“吸收剂”，即氧化锂。该吸收剂是 1897 年由一位名叫 Georges Jaubert 的法国人发明的，但是实际证明，当氧化锂与水接触时很危险。现在，其他化学剂，如钙钡吸收剂和氢氧化锂，用作过滤材料都十分成功。

今天，研制出一种有效的循环呼吸器的目标即将实现。有两种呼吸装置（闭式回路和半闭式回路装置）正在进一步完善，以供在海上使用。开式回路呼吸装置通常装有高压空气作为呼吸混合气。该装置有一按需供气阀，当潜水员吸气时，由它供气；当潜水员呼气时，空气即排入水中。为了节约呼吸混合气，延长水下停留时间，现已研制出了闭式回路和半闭式回路循环呼吸器。闭式回路呼吸器可使用纯氧（原来仅使用纯氧，但是必须限制深度，以防氧中毒）或混合气，正如在最近几个型号中，使用氧和一种稀释气体，如氮或氦。半闭式再循环潜水系统是在闭式回路氧气呼吸器（如 Emerson 型装具）的基础上发展起来的。早在 1940 年，C.J. Lambertsen 就已研制出了半闭式恒流量氧气循环呼吸系统。他相信对该系统加以改进，即可使用氮氧呼吸气。

吸纯氧的危险主要是氧中毒，故作业深度限制在约 11m 或者在静息状态下 18m。现在已研制出了新型半闭式回路自携式水下呼吸器，并已成功地用于“海下实验室Ⅱ”号和“海下实验室Ⅲ”号的实验中。对此，后文将继续讨论。

至此，我们已看到，潜水员由时间特别有限的屏气潜水员发展到自携气源、下至海底作业的自携式潜水员（时间依然受限）。为了提高潜水员的水底作业效率，下一步研究是需要一种可使潜水员在水下居住和进行较长时间作业的手段，而不是从水面至海底仅停留短暂的时间。

而且，随着军事和商业对潜水的要求与日俱增，需要能进行更大深度的潜水，因为至此潜水员不仅水下停留时间有限，而且深度也受到限制。

## 深 潜 水

在向大深度、长时间潜水进军的过程中，出现了两个研究与发展领域。为使每一努力获得更大的成功，这两个不同领域的研究与探索，时而接触，时而汇合。因此，推挽式呼吸系统（将在以后讨论）的研制人员，如果没有呼吸生理学家提供的关于呼吸机理的研究成果，他们是无法有效地研制他们的呼吸系统的。反之，生理学家也得到了更多的有关高压下呼吸



功能的知识。所以，工程师们和科学家们的单纯研究和共同协作才使深潜水取得进展。当然，评价这些贡献，还有另一方法，我们既可将深潜水的发展过程看成是在生理研究支持下工程研究取得的主要成就，也可看成是在工程技术的支持下对潜水员生理适应的要求。第一种情况，即从工程角度，重点放在常压潜水服（如吉姆潜水服）这类研究工作上。这些潜水系统几乎不需生理适应，但是需要了解有关有效通气交换方面的生理学资料。第二种情况，即从生理角度看，工程技术方面的支援对于装具的发展是必不可少的，但是，主要要求潜水员在生理上适应变化了的环境。潜水界在技术和生物医学方面所取得的成就使潜水发展的第五阶段——饱和潜水成为现实。

## 饱和潜水

**生理基础** 由于潜水员减压所需的时间往往比水底停留时间还长，因此，潜水员作业时间与减压时间之比常常不理想。潜水员在较大深度停留较长时间所付出的高昂代价使研究人员和作业人员考虑一种称为饱和潜水的设想。正如 Kindwall (1976) 指出，“第一次尝试性饱和潜水”是由 Edgar End 和 Max Nohl 两位研究人员于1938年完成的。他们在30m深度，呼吸空气停留了27h，然后花了5h进行减压，几乎未发生任何问题。不久，Behnke (1942) 也许第一个提出了将饱和潜水应用于商业潜水的建议。他发现，高压作业潜水员频繁减压，“不仅有潜在危险，而且很不经济”。他进而认为：“因此，让作业人员继续在高压现场进行作业似乎是可取的。”

经常暴露于减压所出现的危险，以及减压时间与作业时间相比时间过长——常规潜水的这些缺点从打捞美国潜艇“Squalus”号（前文已提到过）已清楚地显露出来了。美国的这艘潜艇于1939年5月沉没在北大西洋74m深处。美国“法尔孔”号舰船上的潜水员将一个救生钟连到潜艇的升降口上，救生钟往返4次，将33名艇员救至水面。在这次救生活动中（5月—9月），潜水员进行了600多次潜水，但是，由于减压需要时间，因此，每次潜水他们只能在水底作业约10min。如果1939年有了饱和潜水，很可能可以将水下作业站或居住舱放至打捞地点，于是，需要数月作业的工作可以由居住在水底进行作业的潜水员在数周内完成（Bachrach 1968）。

**饱和技术的发展** 1957年，一个由潜水军医 George Bond 和 Robert Workman 领导的美国海军研究人员小组，在新伦敦的潜艇研究实验室开始了饱和潜水实验。在此同时，Coustean 和 Link 也开展了这一研究（见本书第1版的第21、22章）。这些研究人员认为，在压力下停留一定时间后（实际上为24h），潜水员吸收了其机体组织所能吸收的所有惰性气体。这些气体在机体中经压缩后呈溶解状态，于是，他被充分饱和了。该潜水员也需减压，但是，海军研究人员认为，一旦他处于饱和状态，他便可在高压下继续停留，并可一次减压，而不必象其他潜水技术那样需多次减压，因此，他可最大限度地减少减压对身体带来的危险。

在高压舱内进行的基础动物实验，为这些海军研究人员和其他研究人员提供了探讨饱和潜水问题的基础。从50年代中期到1962年，这些原则和技术先是采用动物，后采用志愿受试者仔细地进行了研究和试验。这些志愿受试者在高压舱内停留很长时间，为生理测试完成各种特定的任务，也参加了模拟公海潜水。

第一次公海饱和潜水是由 Link 小组完成的，潜水员是 Robert Stenuit。Stenuit 在一座

0.9×3 m 的舱内，在 61m 深度停留了 24h。饱和潜水方法在商业上首次应用是在史密斯山水坝进行的潜水作业。在这次潜水中，Westinghouse 潜水小组使用了 Cachalot 潜水系统。潜水员居住在高压舱内，然后用人员转运舱在高压下将潜水员转运至作业地点，一天作业完成后便返回高压舱内。据记录，在 12 周中，水底停留时间为 800 人-时。Cachalot 潜水系统（图 1.4）说明了，这是一种应用最广泛的饱和潜水技术。潜水员在高压下居住在水面支援船的甲板加压舱内并达到饱和压力。然后，乘人员转运舱或潜水钟在高压下转运至作业地点（图 1.5）。

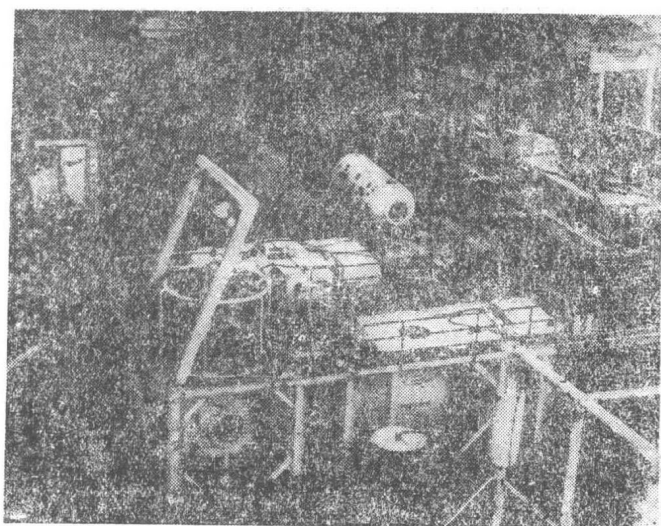


图 1.4 Santa Fe 公司的 Cachalot 潜水系统

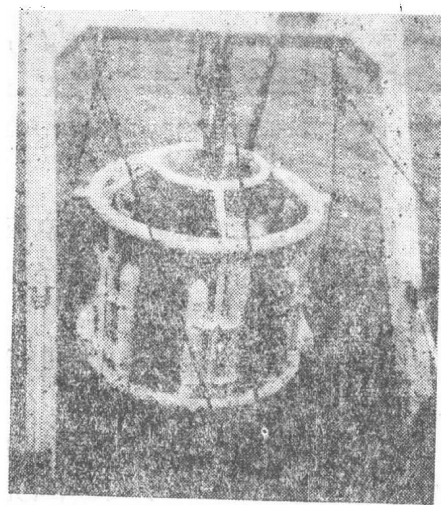


图 1.5 人员转运舱

该系统明显不同于美国潜水计划中的“海下实验室 I”号、“海下实验室 II”号以及“Tektite I”号和“II”号的水下居住舱概念，也不同于联邦德国的 Helgoland 和苏联的 Chernomor 计划中的水下居住舱概念。在这些居住舱中进行饱和潜水的基本概念是：潜水员在水面加压至水底深度，转入水下居住舱，之后令潜水员居住在海底，直至作业计划完成，此后，他们便在高压下返回水面减压舱。有别于这一饱和潜水概念的是夏威夷 Makai Range 的 Aegir 系统。潜水员在码头的居住舱内加压，然后，给该系统的压载水柜注水，使居住舱沉于海底，并停留至作业完成为止。之后，将压载水柜的水排除，使居住舱浮至水面，潜水员在舱内经一段时间的减压。因此，Aegir 潜水系统具备了居住舱、甲板减压舱和人员转运舱三位一体的特点。

各个居住舱所使用的呼吸混合气不尽相同，海下实验室和 Aegir 系统采用氮氧混合气，而 Helgoland、Tektite 和 Chernomor（图 1.6）在较浅深度的暴露中采用氮氧混合气。

在北海的现代饱和潜水支援平台，如半潜式支援平台“约翰大叔”和另一个正由 Seaforth 建造的潜水系统（图 1.7），大大扩大了潜水能力。该潜水系统可使 28 人同时处于饱和状态，潜水员可利用 2 只潜水钟和一个潜水员出入式潜水器，到不同深度进行巡潜。

实验室研究 与许多技术一样，潜水研究既需进行现场研究，也需进行实验室研究，而公海现场作业出现的问题也许可在实验室条件下得到较好的解决。高压舱提供了开展模拟潜水的可能条件。对有关参数，如深度和气体混合气可进行精确控制，并可对有关参数（包括