

人类生活在地球表面，呼吸着空气，一切活动都很自如，很少关心自己的生存条件。而潜水员潜入水中，必须经过从常压到高压，又从高压返回常压这一过程。在生存环境发生改变的情况下，潜水员的生存取决于能否克服和适应环境压力的变化，以及由于压力变化而引起的各单质气体分压对机体造成的影响。因此，潜水员为了水下作业的安全，必须了解和掌握与潜水有关的呼吸气体、高压环境和水下环境等物理知识，这对安全潜水是非常重要的。

第一节 气体物理知识

在潜水过程中，潜水员最关心的是呼吸问题。为了保障潜水员的水下呼吸，一定要供给与潜水员所处水深压力平衡的气体，否则，当气体压力超过或低于一定限度时，会导致潜水员机体产生病理性改变。因此，潜水前应根据下潜深度和潜水装具选择不同的呼吸气体，除采用压缩空气和纯氧气体外，还可采用不同含氧量与惰性气体配制而成的混合气体。水面舰艇主要使用的常规自携式轻潜水装具，通常采用压缩空气作为呼吸气源。

一、气体特性

气体没有固定的形状和体积，在受到压力作用后，体积会缩小，具有明显扩散性和可压缩性。空气的成分比较固定，大致为氮气占 78.084%，氧气占 20.946%，氩气占 0.934%，二氧化碳占 0.033%，其余气体占 0.003%。

(一) 氧气

氧气是无色无味的气体，在自然界中分布最广，沸点为 -183°C ，熔点为 -218.4°C 。常压下，氧气在 -183°C 时变为淡蓝色的液体，在 -218.4°C 时变成雪花状的淡蓝色固体。氧气不能自燃，但能助燃，其在高压条件下，更易助燃。纯氧和油类接触易发生爆炸。氧气是维持人的生命不可缺少的一种气体，通过呼吸被送入人体组织，随血液循环又被送到全身的各部位，参与机体的新陈代谢。但氧分压高于一定值时，会对机体产生毒害作用。

采用纯氧装具潜水时，应使用医用氧，其氧气体积分数不低于 99.5%，水分含量不高于 20 mg/m^3 ，氮气体积分数不高于 0.5%，不允许含有任何有害气体成分，且无杂质、无味、无油。

(二) 氮气

氮气是无色无味的气体，沸点为 -196°C ，在体内仅呈溶解状态。通常氮气的性质不很活

氮,在潜水医学中被称为“惰性气体”。当人体吸入高分压的氮气时,对中枢神经有麻醉作用。

在空气中约有 80% 的气体分子是氮气。人体在生理代谢过程中不利用氮气,因此在呼吸混合气中它起的作用很小,只是用作稀释氧浓度。当体内所溶解的氮浓度较高时,会影响中枢神经系统,潜水员们最熟悉的影响就是“氮麻醉”,在不同的情况下对氮麻醉的敏感程度是不一样的。有证据表明,通过反复多次承受高氮分压,人可以获得对氮麻醉的适应性和承受能力。不经常参加高氮分压训练的潜水员在水下 27 m 以浅呼吸压缩空气时可能会出现氮麻醉症状,而经常训练的潜水员在水下超过 61 m 也不会发生氮麻醉。在任何情况下,氮分压越高就越容易产生氮麻醉。

(三) 氦气

氦气是无色无味的气体,扩散速率快,有较大的导热性。氦的麻醉作用小,大气中含量极少。有些矿井的天然气中含有丰富的氦,目前国际上使用的氦基本上是从天然气中分离制备出来的。目前,60 m 以深潜水作业一般都使用人工配制的氦氧混合气体。

(四) 二氧化碳

机体代谢过程中会生成二氧化碳。当吸入气体中二氧化碳分压高于某一值时,将对人体产生毒害作用。

为了确保潜水员健康、安全 and 有效的工作,上述各种供潜水员呼吸用的气体必须符合潜水医学的纯度标准。

舰艇潜水技术中所用压缩空气的纯度标准应符合下列要求。

- (1) 氧含量: 20%~22% (体积分数)。
- (2) 一氧化碳含量: <0.001% (体积分数)。
- (3) 二氧化碳含量: <0.05% (体积分数)。
- (4) 油蒸气含量: 5 mg/m³。
- (5) 含水量: 尽可能干燥,控制在 20~50 mg/m³。
- (6) 清洁度: 无杂质,不允许有灰尘、土垢、金属微粒及其他有毒性的成分(如乙炔、二氧化硫、氧化氮及卤化物等)。
- (7) 无色无味。

二、静水压及高压压

潜水时的水下环境诸因素中,静水压(hydrostatic pressure)改变是导致潜水员发生生理变化或病理变化的主要因素,是潜水医学关注的很多关键问题的起因。

(一) 静水压的形成与计算

压强(pressure)是指垂直施加于物体单位面积上的力。静水压是由水的重力形成的。水垂直施加于水面以下物体单位面积上的重力称为静水压。

如果垂直作用于面积 S 上的重力为 F ,那么面积 S 上所受的压强 $p=F/S$ 。在物理学中,

重力 (F) 为物质的质量 (m) 乘以重力加速度 (g), 即 $F=mg$; 质量为该物质的密度 (D) 乘以体积 (V), 即 $m=DV$; 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 $V=hS$ 。故计算静水压的公式表达为

$$p = \frac{F}{S} = \frac{DhgS}{S} = Dgh$$

式中: p 为物体表面积上承受的压强, MPa; F 为水的重力, kg; S 为物体表面积, m^2 ; D 为物体密度, kg/m^3 ; h 为水面以下水柱高度, m; g 为重力加速度, m/s^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。

(二) 静水压的表示方法

在国际单位制中, 压强 (包括静水压) 的单位是帕斯卡 (pascal, Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg}/(\text{ms}^2)$ 。Pa 是个很小的压强单位, 常用其倍单位千帕 (kilo pascal, kPa)、兆帕 (mega pascal, MPa) 等表示压强 (kilo 表示 10^3 , mega 表示 10^6)。目前, 与 Pa 并用的有工程大气压 (technical atmosphere)、标准大气压 (standard atmosphere) 或米水柱 (mH_2O) 等压强单位。

(1) 以 1 标准大气压 (1 atm) 即 760 mmHg (0.76 mHg) 的质量换算。

将已知水银密度 (D) = 13 595.1 kg/m^3 , 汞柱高度 (h) = 0.76 m, 在纬度 45° 的重力加速度 (g) = 9.806 65 m/s^2 , 代入 $p = Dgh$ 得

$$p = (13\,595.1 \text{ kg}/m^3) \times (9.806\,65 \text{ m}/s^2) \times (0.76 \text{ m}) = 101\,325 \text{ Pa}$$

故 1 atm (760 mmHg) = 101.325 kPa = 0.101 325 MPa; 1 mmHg = 0.133 322 kPa。

(2) 以 10 mH_2O 的重量换算。

将已知淡水的密度 (D) = 1000 kg/m^3 , 水柱高度 (h) = 10 m, g = 9.806 65 m/s^2 , 代入 $p = Dgh$ 得

$$p = (1000 \text{ kg}/m^3) \times (10 \text{ m}) \times (9.806\,65 \text{ m}/s^2) = 98\,066.5 \text{ Pa}$$

如以海水的密度 1025 kg/m^3 计, 则

$$p = (1025 \text{ kg}/m^3) \times (10 \text{ m}) \times (9.806\,65 \text{ m}/s^2) = 100\,518.2 \text{ Pa}$$

故 10 mH_2O (淡水) = 98.066 5 kPa = 0.098 066 5 MPa; 10 mH_2O (海水) = 100.518 2 kPa = 0.100 518 2 MPa。

(3) 以 1 工程大气压 1 kgf/cm^2 (10 000 kgf/m^2) 换算。

在纬度 45° , 质量为 1 kg 的物质可获得 9.806 65 m/s^2 的重力加速度。因此

$$1 \text{ kgf}/cm^2 = (10\,000 \text{ kg}) \times (9.806\,65 \text{ m}/s^2) = 98\,066.5 \text{ Pa}$$

为便于实际应用, 可将上述换算结果约简为

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

三、绝对压和附加压

(一) 绝对压

单位面积上所承受的总压强称为绝对压 (absolute pressure)。在压强后面注以“abs”，即表示绝对压。以“大气压”为单位表示时，称为绝对大气压 (atmosphere absolute, ATA)。人在水下所受到的绝对压由两部分组成：水面以下的静水压和水面以上的大气压，用公式表示为

$$\text{绝对压} = \text{静水压} + \text{大气压}$$

例如，人潜入水下 10 m 深处，所受到的绝对压 = 100 kPa (静水压) + 100 kPa (大气压) = 200 kPa (abs)。必须指出，当考虑水下或加压舱内气体的生理作用时，都应按绝对压进行计算。

(二) 附加压

单位面积上所承受的、不计大气压在内的那一部分压强，称为附加压 (additional pressure)。附加压和绝对压之间的关系为

$$\text{附加压} = \text{绝对压} - \text{大气压}$$

一般的压力表，都以正常大气压 (常压) 为基线，指针的起始点“零位”即表示 1 atm。因此，用压力表测得的压强是附加压，附加压也称为表压 (gauge pressure)。为与绝对压相区别，有时可在附加压后注以“gauge”或“g”。但在一般情况下，在表压后不加任何说明，均指附加压，如要用表压表示绝对压时，必须用“abs”或用“绝对压”注明。但是，如果是指某一种气体的分压，不论是否注明，均指绝对压。人在加压舱内用压缩气体加压，表压每增加 100 kPa，就相当于增加 10 m 水深的静水压。因此，静水压实际上就是附加压。有时将在加压舱内加压称为模拟潜水 (simulated diving)。

综上所述，可以明确：①静水压可以用大气压表示，如水深 10 m 可以用 1 atm 表示；②所受附加压可以用水深表示，如在加压舱内加压到 200 kPa 附加压，可以用 20 m 海水表示。

四、静水压对潜水呼吸气体体积和压强的影响

由于静水压的存在，人在水下必须呼吸与所在水深处压强相等的压缩气体 (compressed gas)。如仍呼吸常压大气或压强不够的压缩气体，肺内压将低于外界环境压 (ambient pressure)，胸廓会受到挤压，产生呼吸困难。呼吸压缩气体，各气体组分的分压增加，会给潜水员带来一系列的影响。

人在水下所受的静水压随水深增加而升高，随水深减小而降低。但是在不同水深处，相同幅度的深度增减引起绝对压和气体体积增减的百分比不同。在较浅处，水深增减所引起的绝对压和气体体积改变的百分比大；而在较深处，同样幅度的水深增减所引起变化的百分比较小。

潜水员水下呼吸高压气体，无论是潜水服还是体内含气腔室的气体压强和体积，都随静水压的改变而变化。这样，给潜水员带来的问题是：当潜水员下潜至较浅处时，因为气体体

积被压缩的比例较大，若供气跟不上潜水员的下潜速度，潜水服气压低于外界水压，潜水员将受挤压或者浮力减少而跌落；同样，在潜水员上升至临近水面的阶段，潜水服内气体膨胀比例也较大，会因浮力增加而加快上升。更为重要的是：下潜时中耳内气体容易被压缩，如不及时加以平衡，易致挤压伤；而上升时，如果没有通过适当呼吸动作保证肺内气体有效排出，肺内气体过度膨胀，可导致肺内压猛增而引起肺气压伤。

五、气体定律

要表明一定量某一气体的物理状态，可用压强（ p ）、体积（ V ）、温度（ T ）三个物理量。若其中一个量发生变化，则其余的量也会发生相应的变化。人们在科学探索 and 实践中，不断发现和总结这些变化的客观规律，把它们称为气体定律。

（一）玻意耳-马略特定律

温度不变时，一定质量的气体体积同它的压强（绝对压）成反比，即玻意耳-马略特定律（Boyle-Mariotte's law）。玻意耳-马略特定律还可以表述为：当温度不变时，一定质量气体的压强和体积的乘积是一个恒量。用数学式表示可写成： $pV=K$ 或 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ，即

$$p_1 : p_2 = V_2 : V_1$$

或

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

式中： p_1 、 p_2 为气体在各种不同状态下的压强，MPa； V_1 、 V_2 为气体在各种不同状态下的体积，L。

例如，气体的体积为 8 L 时，压强为 1 atm；若体积缩小到原来体积的 1/2、1/4、1/8，则压强相应地增加到原来压强的 2 倍、4 倍、8 倍（表 6-1）。

表 6-1 气体压强与体积的关系

压强/atm	体积/L
1	8
2	4
4	2
8	1
⋮	⋮

气体的体积与压强之间的这种关系，可用“分子运动论”来解释。在一个容器内，气体分子的运动不断碰撞容器壁，碰撞力的总合表现为气体对容器壁的压力。单位面积上所受压力的大小就是气体的压强。气体体积缩小后，气体分子与容器壁碰撞的机会增多，故压强升高。反之，若体积增大，分子与容器壁碰撞的机会减少，则压强降低。

潜水时，下潜愈深，水的静水压愈大，空气受到压缩，气压就相应增大（图 6-1）。

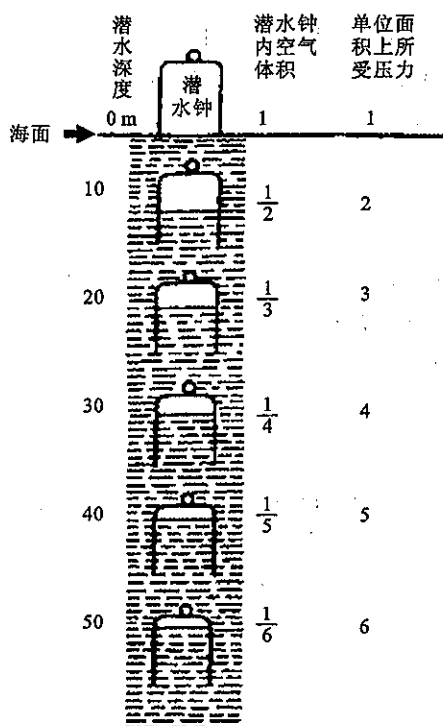


图 6-1 潜水深度与空气体积和压强的关系

〔例〕储气瓶容积量为 40 L，瓶内气体压强为 15 MPa，假定在温度不变时，将瓶内气体降低至常压，求排出气体体积为多少升？

解：根据 $p_1 V_1 = p_2 V_2$

$$p_1 = 15 + 0.1 = 15.1 \text{ MPa}$$

$$p_2 = 0.1 \text{ MPa}$$

$$V_1 = 40 \text{ L}$$

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{15.1 \times 40}{0.1} = 6040 \text{ L}$$

在常压下，储气瓶内最后仍会留有 40 L 常压气体，所以排出气体的体积为 $6040 - 40 = 6000 \text{ L}$ 。

答：排出气体体积为 6000 L。

潜水员在水下呼吸的气体压力必须与所处深度静水压力相等。因此，潜水员下潜时，随着环境压力的增大，呼吸的气体被压缩，必须不断补充供气，以均衡体内外的压力差。

潜水员出水上升时，环境压力随之降低，体内和装具内的气体随之膨胀，必须排出多余的气体，禁止屏气上升。

（二）查理定律

当体积不变时，一定质量的气体的温度每升高 1°C 时，其压强的增加值等于它在 0°C 时压强的 $1/273$ ，即查理定律（Charles' law），用公式表示为

$$p_t = p_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)$$

即

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

式中： p_t 为温度升至 $t^\circ\text{C}$ 时气体的压强，MPa； p_0 为在 0°C 气体的压强，MPa； T 为绝对温度，K， $T = t + 273$ ； t 为摄氏温度， $^\circ\text{C}$ ； p_1 、 p_2 为气体在各种不同状态下的压强，MPa； T_1 、 T_2 为气体在各种不同状态下的绝对温度，K。

当体积不变时，压强和绝对温度成正比。气体压强和温度的关系也可依照“分子运动论”的关系来解释，温度越高，分子运动的平均速度越大，气体分子对每单位面积容器壁的碰撞次数就增加。同时，每次的碰撞力增强，气体的压强增大。

〔例〕高压空气瓶在 7°C 时瓶内气体的压强是 15 MPa，该气瓶放置在烈日下暴晒温度升高，当温度升高到 40°C 时瓶内气体压强是多少？

解:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$p_1 = 15 + 0.1 = 15.1 \text{ MPa}$$

$$T_1 = 273 + 7 = 280 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 40 = 313 \text{ K}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = 15.1 \times \left(\frac{313}{280} \right) = 16.88 \text{ MPa}$$

答: 当温度升高到 40 °C 时瓶内气体压强为 16.88 MPa。

因此, 若将高压储气瓶存放在强烈的日光下或热源旁, 瓶内压强将会明显升高, 这是非常危险的。

(三) 盖-吕萨克定律

气体压强不变时, 温度每升高 1 °C, 一定质量气体的体积就增加其 0 °C 时体积的 1/273。

即盖-吕萨克定律 (Gay-Lussac's law)。用公式表示为

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)$$

即

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

式中: V_t 为温度升高到 t °C 时气体体积, L; V_0 为温度在 0 °C 时气体的体积, L; V_1 、 V_2 为气体在各种不同状态下的体积, L; T_1 、 T_2 为气体在各种不同状态下的绝对温度, K。

当压强不变时, 一定质量的气体体积与绝对温度成正比。盖-吕萨克定律可用气体的“分子运动论”解释: 当一定质量的气体受热而温度升高时, 若要使其压强保持不变, 只有让其体积增加。这时, 一方面因温度升高, 分子运动加速, 使气体分子对单位面积器壁的碰撞次数增多, 每次碰撞的作用也增强, 有使压强增大的倾向; 另一方面因体积增大, 使气体分子对单位面积器壁的碰撞次数减少, 有使压强减小的倾向。当这两种相反倾向完全抵消时, 可以使压强保持不变。

[例] 一定质量的气体在 2 °C 时的体积为 10 L, 假定压强保持不变, 它在 57 °C 时体积为多少升?

解: 已知

$$T_1 = 273 + 2 = 275 \text{ K}, T_2 = 273 + 57 = 330 \text{ K}, V_1 = 10 \text{ L}$$

代入公式:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{330 \times 10}{275} = 12 \text{ L}$$

答: 气体体积为 12 L。

(四) 道尔顿定律

由几种互相不起化学作用的气体组成混合气体时,当温度不变时,混合气体的总压等于各组成气体(也称单质气体)的分压之和,即道尔顿定律(Dalton's law),用公式表示为

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n$$

式中: p 为混合气体的总压; $p_1, p_2, p_3, \cdots, p_n$ 分别为各组成气体的分压。

知道了混合气体的总压和组成气体在混合气体中所占的百分比,就可推算出某一组成气体的分压值,其公式为

$$p_x = p \times C\%$$

式中: p_x 为某一组成气体的分压; p 为混合气体的总压; $C\%$ 为混合气体中某一组成气体的百分比。

[例]空气中,已知氧气占 20.946%,氮气占 78.084%,二氧化碳占 0.033%,总压为 100 kPa,求三种单质气体的分压为多少?

$$P_{O_2} = 100 \times \frac{20.946}{100} = 20.946 \text{ kPa}$$

$$P_{N_2} = 100 \times \frac{78.084}{100} = 78.084 \text{ kPa}$$

$$P_{CO_2} = 100 \times \frac{0.033}{100} = 0.033 \text{ kPa}$$

机体的正常代谢是通过呼吸进行的。空气进入肺内,吸入气体中氧气分压高于机体组织的氧气分压,氧气在肺泡与微血管间通过气体交换,氧气溶于血液,由血液循环送到组织供生理氧化,经代谢在体内形成二氧化碳输送到肺组织的肺泡而排出体外。

由于体外氧气分压高于体内,经过气体的交换和血液循环,可以不断地将氧气输入组织进行生理氧化。体内二氧化碳分压高于体外,可以不断地将二氧化碳排出体外保证机体的新陈代谢(图 6-2)。

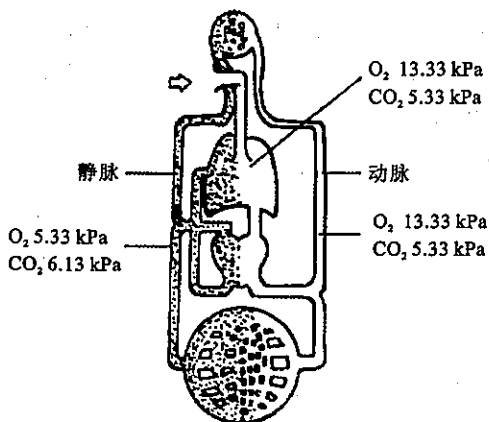


图 6-2 新陈代谢示意图

人的机体对气体分压的变化具有一定的耐受能力。吸入气体中各单质气体的分压大于或小于某一阈值,会对人机体造成病变。

(1) 吸入气中氧气分压低于 16 kPa (相当于常压吸入气中含氧 16%) 时,可引起缺氧症。

(2) 吸入气中氧气分压大于 303.9 kPa (相当于 20 m 水深吸纯氧) 时,停留一定时间后,会引起急性氧中毒。

(3) 吸入气中氮气压达 480 kPa (相当

于 50 m 水深吸用空气) 时可引起氮麻醉。

(4) 吸入气中二氧化碳分压大于 3.039 kPa (相当于常压下吸入气中二氧化碳占 3%) 时可引起二氧化碳中毒。

混合气体中某一组成气体对人体生理机能的影响, 不是取决于总压, 也不是取决于它的体积分数, 而取决于该气体的分压值。在压缩空气中, 各组成气体的体积分数并没有改变, 但是它们各自的分压却随着总压的升高而增加。

例如, 在水深 40 m 处 (绝对压 500 kPa), 压缩空气中的氧分压为 $500 \times 20.946\% \approx 104.7$ kPa, 较长时间处于这样的环境中, 机体的生理功能就会发生变化。又如在常压 (100 kPa) 下吸入 1.5% 的 CO_2 , 其分压值为 $100 \times 1.5\% = 1.5$ kPa, 这时人完全可以忍受; 但如果压力升至 400 kPa 时, 仍吸入含有 1.5% 的 CO_2 气体, 则 CO_2 分压为 $400 \times 1.5\% = 6$ kPa, 将会发生 CO_2 中毒。

第二节 水下环境对机体的影响

水下环境是水面以下作用于人体的各种客观条件的总称。潜水员潜入水面以下, 会受到水下高压、寒冷、黑暗、浮力、阻力、水流等各种因素的影响, 机体的生理机能将产生相应的变化, 当超过一定限度时, 会导致机体产生病理性改变。

一、高压

因为静水压的存在, 海水每增加 10 m 压强增加约 103 kPa, 所以水下是一个高压环境。在水下, 潜水员的胸廓受水挤压, 不可能像在大气环境中一样自由地呼吸, 除非呼吸气体的压力与外界环境压力相等, 否则连正常的吸气动作也不可能完成, 更谈不上像鱼一样可通过鳃直接从水中获取氧并排出二氧化碳了。潜水员在水下只要认真注意压力的调整, 压力本身的机械作用并不会对潜水员的生存造成困难。在高压条件下所发生的问题, 主要是由压力相关的一系列因素造成的。例如: 压力升高, 呼吸气体中各种成分的分压也按比例升高, 当氮气、氧气、二氧化碳分压达到一定程度时, 可引起氮麻醉、氧中毒及二氧化碳中毒; 压力的剧烈变化, 可对机体产生如肺气压伤、中耳气压伤、挤压伤、减压病等病理影响。正是这些原因, 给人类进入水下或回到水面常压环境带来许多不安全的后果。

(一) 压力本身对机体的机械作用

压力本身作用于机体会产生两种结果: ①压力在体内、体外或身体不同部位之间不形成压差, 即机体均匀受压; ②压力在体内、体外或身体不同部位形成压差, 即机体不均匀受压。机体均匀受压无显著反应, 但若不均匀受压则会受到损伤。

1. 均匀受压

潜水员在高压环境下, 压力在体内外或身体不同部位之间不形成压差, 这种情况称为机体均匀受压。常压下, 每平方厘米面积上所承受的大气压为 0.1 MPa, 潜水员的体表面平均为 $1.6 \sim 1.7 \text{ m}^2$, 甚至更多, 其体表面积上所承受的压力总和为 $16 \sim 17 \text{ t}$ 。当潜水员潜至 90 m 水深时, 机体表面每平方厘米面积上将承受 1 MPa 的压力, 这样, 体表的压力总和达到 $160 \sim$

170 t。有人臆测：在这种压力下，人立刻会被压扁，即使不死，也会引起严重的机械能障碍，如皮肤贫血、出血、呼吸困难等。然而，科学研究和潜水实践表明，潜水员采取各种新的潜水方法，如使用氦氧潜水装具，只要操作正确，主观上对这种巨大的压力并无感觉。

机体在水下面对如此巨大的压力并不发生损伤，也无受压感觉，其原因主要有两方面：一是因为水的不可压缩性，二是因为压力的均匀作用。在人体组成成分中，水占体重的约70%，其余物质多溶于水，而水实际上是不可压缩的。所以，潜水员在潜水（加压）时，只要升高的压力从各方向均匀作用于机体，机体组织是能够经受住的。同时，来自各个方向的压力都相等而且互相抵消，所以不会引起组织的移位和变形。

2. 不均匀受压

潜水员在潜水过程中发生的不均匀受压是指机体本身的含气腔室内压与外界不平衡，或潜水装具与人体之间的含气空间内压力与外界不平衡。由于水不可压缩，外界压力变化时，机体不含气的部分无体积的变化，压力总是与外界平衡；而由于气体可压缩，含气部分如果不能或不及时随外界压力的升降而相应地增减，则潜水员机体含气腔室内的压力将与外界不平衡，表现为含气部位与其他部位之间的压差，即不均匀受压。

机体本身的含气腔室（以下简称腔室）包括肺、中耳鼓室、鼻窦（特殊情况下所造成的一些非固有的腔室，例如有气体存在的胃肠腔、与外界不畅通的龋齿腔、被堵塞的外耳道等）。因穿戴潜水装具而形成的含气空间（以下简称空间）包括自携式潜水装具的各种面罩或潜水帽所覆盖的空间、呼吸袋内空间等。有些装具形成的空间与机体的腔室相通而连成一体。当腔室或空间内压与邻近的组织不平衡达到一定程度时，就可能引起组织移位、变形损伤，这些都属于气压伤。习惯上，又把腔室或空间内压过低所引起的病理变化叫作挤压伤。

机体不均匀受压时，即使压差不大，只要达到 $1/16 \text{ atm}$ （约 47 mmHg ， $1 \text{ atm}=101\,325 \text{ Pa}$ ），就可使受压组织充血、水肿、变形，甚至造成损伤。机体不均匀受压有腔室或空间内气压过低和过高两种情况。

（1）腔室（空间）内气压过低。

潜水员在下潜过程中，外界压力升高，高压气体如果不能及时到达相应腔室（空间），腔室（空间）内压便低于外界，腔室壁的柔软部分将向腔室内移位，分布于该处的血管则被动地扩张，以至充血、组织水肿、变形。压差大时，腔室壁柔软部、血管壁均可能向腔室内破裂，造成损伤。例如，由不同原因引起的咽鼓管口不开、鼻窦通向鼻腔的管孔被堵塞、呼吸道通气不畅或供气不足等。

潜水员在使用自携式潜水装具潜水时，如果下潜速度太快而未及时通过鼻腔向面罩内适当呼气，则面罩内压低于外界，面部感觉如同“拔火罐”一样，会产生面部肿胀、眼睛充血、鼻腔出血及其他较严重的损伤。

（2）腔室（空间）内气压过高。

潜水员在上升出水过程中，外界气压不断降低，在高压下已与外界平衡的气体将扩张，若因不同原因使腔室或空间不能与外界相通，以至不能排出相应体积的气体，腔室或空间内压将高于外界，造成含气腔室壁损伤，肺、鼓室、鼻窦等腔室的柔软部分被推向外面而膨突、缺血；如果腔室内气体的扩张超过了腔室壁软组织弹性限度，组织即被撕裂，分布于该处的组织血管被扯断。潜水员在上升过程中，若上升速度太快、供气过多或排气不畅，会使肺脏

系统中气压过高，导致肺脏被撕裂，引起肺气压伤，这是非常危险的。

（二）高气压对机体各系统的影响

潜水员在潜水过程中，必须呼吸与外界压强相等的压缩空气或人工配制的混合气体，使机体处于高气压环境中。高压气会引起机体一系列复杂的功能改变。一般来说，无论是常规潜水还是饱和潜水，这些变化均表现为一时的、可逆的。但若在高气压下暴露过久、气压过高，是否会导致长期的、不可逆的改变，到目前为止，研究的还不多。熟悉已知的高气压对机体各系统的影响，对学好潜水理论和指导潜水实践具有重要意义。

1. 对血液循环系统的影响

潜水员在高气压下，其血液会发生一系列的改变。主要表现为红细胞、血红蛋白、血小板减少，这种变化取决于气压的高低和高压下暴露时间的长短。气压越高，暴露时间越长，外周血液的这种变化就越明显。引起白细胞增加及血清酶改变的机理尚不十分清楚，但上述这些变化均表现为暂时性的，离开高压环境后 1~3 天可恢复正常。

2. 对心血管系统的影响

高气压对潜水员心血管功能也会造成一定的影响。一是表现为心律减慢。多数学者认为是高气压下血氧张力升高，降低了对血管化学感受器的刺激，使其兴奋性降低，这与缺氧的刺激恰恰相反。二是表现为血压的变化。潜水的实践和有关研究材料表明，血压的变化在大多数情况下表现为收缩压下降而舒张压升高。三是表现为心脏容积和心排血量的改变。经研究发现，潜水员的心脏在舒张期扩张程度比一般人大，而收缩期排空能力较差，随着潜水工龄增加，心脏容量也增大。

3. 对呼吸系统的影响

潜水员在高气压环境中，呼吸气体的分压升高，气体密度增加，从而引起呼吸功能的一系列改变。主要表现为呼吸频率减慢，呼吸运动幅度和呼吸阻力增大，肺通气量功能变化、肺泡气体成分变化，屏气时间延长及血液内呼吸功能改变等。

4. 对消化系统的影响

潜水员暴露在高气压下，常有口渴的感觉，这是唾液腺分泌受到抑制的缘故。在离开高气压后的最初 1 h 内尤为显著，而且气压感越高，抑制现象越明显。动物试验表明，这种抑制性影响是由高气压作用于分泌过程的神经反射引起的，而不是直接作用于消化腺的结果。在胃液分泌减少的同时，胆汁分泌量也减少。这些事实表明，潜水员在潜水前的短时间内不宜饱餐，且应进易消化的食品。

潜水员在高气压下往往出现便秘，这可能是肠道中气体受到压缩而引起肠蠕动增加的缘故。因此，潜水员在潜水前应先排出大便。此外，建议潜水员潜水前不吃易产气的食物。

5. 对泌尿系统的影响

潜水员在高压条件下，尿量增加，电解质排泄量增加，其机理目前尚未完全清楚，在潜水员回到常压后即可恢复正常。迄今为止，潜水员在潜水过程中，尚未发现肾功能有任何改变。

6. 对神经系统的影响

作为空气主要成分的氮气、氧气、二氧化碳三种气体，在高压下，当各自的分压达到一定的程度时，对人体都有相应的毒性作用。而中枢神经系统，特别是大脑皮层，所受的影响尤为严重。例如：氮气分压达到 3.2~8 atm 时，对人体产生麻醉作用；氧气分压在 0.6~2 atm，经过一定时间，对肺脏有损害，而当氧气分压超过 2 atm 时，就有可能发生惊厥性氧中毒；二氧化碳分压达到和超过 3 kPa 时，就可能引起呼吸、循环系统的一系列的症状和体征。这些气体中的任何一种，分压高到足以使中枢神经系统中毒，或使人体处于病理状态时，必须作为潜水疾病进行救治。所以，高压对中枢神经系统的影响，与其说是压力本身的作用，还不如说是各种气体高分压所引起的变化。

另外，潜水员在深水处使用氮氧装具潜水时，机体因高分压氮氧混合气的作用而出现神经系统功能障碍，主要表现为运动障碍（如震颤和肌肉抽搐）、视觉障碍、眩晕、恶心、嗜睡及脑电图变化等为特征的一系列症状和体征，称为高压神经综合征（high pressure nervous syndrome, HPNS）。

7. 对语音的影响

在高压下，潜水员的语音会发生很大的变化，说话带鼻音。当呼吸氮氧混合气潜水时，鼻音更加严重，而且变为显著的童音（氮语音），发唇音困难。在 3 atm 时，吹口哨就感到不大方便，如果压力继续增加，就完全不可能了。从 7~8 atm 开始，说话变得不容易被人听清楚。语音的变化是气体密度的增大，以及机体对高压环境不适应的缘故。

在正常大气环境下，人的发音和共鸣器官（声带、喉、口、鼻等）已适应了这种正常气压的气体密度。而潜水员在下潜过程中，气体压力增大，密度增加，使发音时气流阻力增加，鼻腔共鸣的作用增强，因此，潜水员的发音发生变化，带有鼻音。

潜水员使用氮氧潜水装具进行深潜水时，语音改变明显，与水面进行电话联系时，水面人员常听不懂。近来研制的适用于氮氧深潜水的潜水电话，大大改善了潜水员发音的音质，使语言能较易听清。

8. 对代谢的影响

在高压环境中，即使在安静状态下，人体代谢率也会升高。潜水员在实际潜水过程中，无论是在休息状态还是劳动作业时，耗氧量均有所增加。尤其是呼吸氮氧混合气体潜水时，耗氧量比呼吸压缩空气时更大。这种代谢过程的加速，是在氮气影响下机体对热量损失的反应。

潜水员执行潜水作业任务后，体重一般都会下降。长期在高压下工作的潜水员和在压缩空气中工作的工人，也会有体重减轻的现象。造成这种情况的原因是多方面的，诸如水下环境较复杂（水下低温的影响、水的阻力对机体的影响等）、精神过度紧张、不正确的作业姿势、通风不良等因素都可能引起体重减轻，但高压本身的因素也不可忽视。

二、水温

水的温度主要来源于太阳的辐射热。太阳的辐射热只能到达一定的深度，所以不同的深度海水的温度也不同。水的比热比空气大，水温升高或降低速度比空气缓慢。水的热传导性比空气差，因此，水的温度受水深、地域、日照时间、季节、气候、海流等因素的影响，会有很大差异。

一般距水面 10 m 左右为表层，表层以下 10 m 为中间层，中间层以下为底层。表层水温较高、较稳定，故称为等温层；向下是中间层，温度比表层低，往往深度增加很少而温降很大，故称为跃变层；中间层以下直到海底为底层，这层温度渐降，故称为渐变层。底层水温较稳定，200 m 大陆架深处，终年保持在 3~8℃。渤海海域在 50 m 以下深度常年水温为 8℃左右，黄海、东海海域在 200 m 深度的水温为 7~8℃，南海海域在 200 m 深度水温为 12~15℃。

水温与潜水关系极为密切，主要是寒冷对潜水员的影响。人的平均正常体温为 37℃，在我国水域潜水时，水温一般都低于体温。水的导热系数比空气大 20 多倍，潜水员身体的热量以传导、对流和辐射的方式散失。因此，潜水员潜水时所遇到的水温问题，实际上是水下低温、寒冷的问题。机体丧失大量体热，将无法在水下停留较长时间，也无法有效地进行作业，还易于促发减压病。随着深潜技术的发展，潜水员在水下遇到的低温、寒冷问题就更为突出，应引起普遍重视。

如水温过低或在水下停留时间过长，机体产生的热量既要供给水下作业时所消耗的能量，还要补偿机体在水中散失的大量热量，以维持正常的体温。人体裸露在冰冷的水中极限耐寒时间 5℃时为 1 h，10℃时为 3 h，25℃时为 24 h，超过这一时限，将发生体温过低而死亡。体内温度降低 0.5~0.8℃，就会导致心理能力降低 10%~20%，记忆力损失 40%。潜水员进行潜水时，一定要视水温确定采用的潜水方式、潜水装具及着潜水服（图 6-3）。通常是 15℃以下着干式潜水服，15~22℃着湿式或干式潜水服，22~30℃可裸潜。

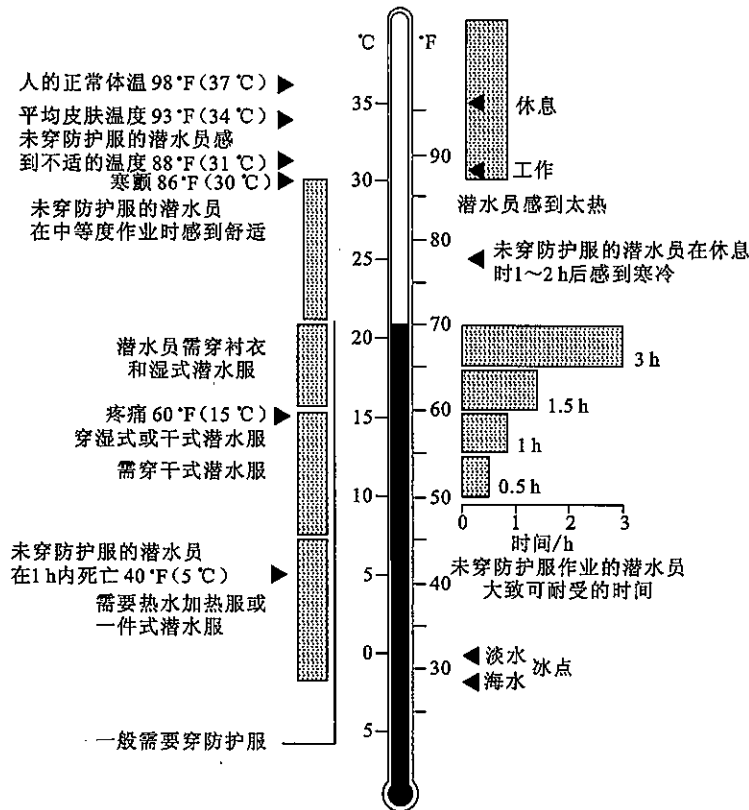


图 6-3 视水温着潜水服

发生体温降低的潜水员出水后,其体温降低的情况仍要持续2~4 h,然后经过高于正常体温0.5~1.5℃的波动才能复原。对体温过低的复原处理,通常采用热水浴、喝热饮料和进行适当的活动等。在体温未复原之前,不能进行反复潜水。在寒冷和高温的水中潜水还应在水下停留时间加以限制,日常对潜水员的饮食营养、休息、热水浴等应加强保障,以确保潜水员水下作业的安全。

三、阻力

人在水中运动时,要受到水的阻碍,这种阻碍运动的力就是水的阻力。产生阻力的原因是身体与水的微粒相碰撞、水内部的摩擦,以及水的流动。潜水员在水中的活动速度远比在空气中慢,而且效能也会降低。

水的阻力大小跟水与物体的相对运动速度、物体的形状及物体与水接触的正面面积大小有关。通常将流速超过1.0 m/s以上的水流称为急流。当流速达1.5~2.0 m/s,潜水员直立时,水流冲击可达80~140 kg,如此大的冲击使潜水员在水中难以稳定。潜水员可通过减小迎水面积来减小水流冲击力,如在水下匍匐爬行行进。

裸潜和着潜水服潜水所受阻力大不相同,后者所受的阻力远大于前者。为了克服水的阻力,潜水员要消耗更多的能量。

四、浮力

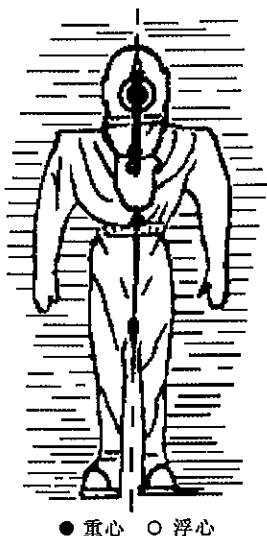


图 6-4 直立体位的稳度

浸入水里的物体,都要承受一个垂直向上的力,这种力称为浮力。物体还有一定的重量,形成一种下沉的力,称为重力(图6-4)。

物体在水中所受浮力的大小,不取决于物体的总重,而是取决于浸入液体中的物体所排开的液体的重量(阿基米德原理)。所以,物体在水中的沉浮,取决于该物体所排开水的重量和它本身重量之差:凡是比重小的物体,在水中所排开的水重大于该物体本身的重量,即正浮力大于负浮力,物体上浮;相反,物体下沉。

人在水下的浮力接近于零。吸气时胸廓扩张即可产生正浮力,深呼气时胸廓缩小即可产生负浮力。当穿着潜水服和佩戴呼吸器时,体积的增加大于重量的增加,正浮力大于负浮力。必须佩戴适当重量的压重物,使负浮力大于正浮力,潜水员才能潜入水下进行活动。有经验的潜水员可以通过调整供气量来调整自己在水

下的正负浮力。

潜水员水下作业时,将自己的负浮力调整到5~7 kg较为适宜。

五、稳度

潜水员能够自如地保持身体处于平衡稳定的程度,称为潜水员的稳度。潜水员的稳度主

要取决于重心和浮心的位置关系。潜水员在水中的稳度主要取决于重心和浮心在人体轴上的位置关系。潜水员身体重力作用的中心称为重心，重心是使潜水员垂直下沉的重力作用点。潜水员身体所排出水的体积中心，即其所受浮力作用的中心称为浮心，浮心是使潜水员垂直上浮的浮力作用点（图 6-4）。

潜水员在水下保持稳定的条件如下。

- （1）重力大于浮力。
- （2）重心低于浮心。
- （3）重心与浮心在同一铅垂线上（即人体的对称轴上）。

应当指出，潜水员的稳度固然取决于重心与浮心的位置关系，但不能忽视潜水员的主观能动性。当平衡受到破坏时，潜水员可通过主动调节，使身体维持平衡状态。潜水员在平衡不好的情况下进行作业，要额外消耗较多体力，会迅速地引起疲劳，甚至可能导致事故发生。

六、视觉

光不容易在水中传播，水是光的“不良导体”。当光线由空气向水中传播时，在空气与水的交界面上，可发生光的反射及折射。经过折射进入水中的光，在传播过程中，会被不同程度地吸收，又会因水中混有泥沙微粒等而发生散射。这些都对潜水员的水下视觉造成显著影响，直接影响潜水员观察水下物体的距离、尺寸、形状和颜色。

（一）视力减弱

不戴潜水面镜进入水下时，潜水员的角膜与水直接接触，由于水对光的折射率（1.333）与角膜的折射率（1.376）相差不多，光线从水入眼，屈光度比由空气入眼减少约 40 m^{-1} （正常眼在空气中的屈光度约 59 m^{-1} ），就会变成“远视”。此时，来自水下物体的光，经眼折射后在视网膜上形成的将是模糊不清的像，视力显著降低，为空气中视力的 $1/200\sim 1/100$ 。

戴潜水头盔或潜水面镜进入水下时，会在水与角膜之间形成空气层，光线虽然仍由空气入眼，但眼的屈光度得以保持，然而由光在水中散射和水中照度低等所致的视力降低现象依然存在。

（二）视野缩小

角膜接触水时，视野约为空气中的 $3/4$ 。这是由于光线从水中射入眼内，屈光度减小，原来视野边缘上的光不能被折射到视网膜的边缘。

在水下使用潜水装具时，虽然避免了角膜与水的直接接触，但头盔或面罩仍会影响视野范围。潜水员要通过转动头颈和眼球来加大视野。

（三）空间视觉改变

人眼感知物体大小、形状、位置、距离等的视觉，称为空间视觉。人在水下空间视觉改变的特点是放大、位移和失真。这是光线从一个介质射入另一介质时，在两个介质分界处除一部分反射外，另一部分光线则改变方向射入第二介质产生折射，以及人习惯于感觉直射光线所致。水下物体看上去显得大些，约为真实物体体积的 $4/3$ ，即所谓的“看 4 实 3”；距离

显得近些，约为真实距离的 3/4，即“看 3 实 4”。

水中折射效应在潜水员的视野边缘比中心强，结果会产生视觉扭曲，使水下物体看起来发生变形，导致失真。有时潜水员在水下不能准确抓取物体，就是因为这种视觉扭曲效应干扰了手和眼的协调性。

(四) 水下色觉改变

光谱中各种色光射入水中后，都将随着水深的增加而先后被吸收。长波先被吸收，短波后被吸收。一般红色光、橙色光、黄色光分别在水下 1 m、5 m、10 m 处被吸收；20 m 处仅绿色光、蓝色光能被保留下来，导致水下色觉的改变，也是水下视力下降和能见度下降的原因。例如：在水下 10 m 处，从伤口流出来的血，看起来不是红色而是蓝绿色；在水底看来是阴暗的鹅卵石，取到水面上看可能是鲜红色的。

除水的深度外，水的含盐度、混浊度、水下悬浮微粒的大小和污染程度都会不同程度地影响水的滤色特征。水中的悬浮颗粒易吸收波长短的光。在清澈的海水中，蓝色和绿色最明显可见；在较混浊的近岸海水中，绿色和黄色最明显可见；在浑浊的江水和港湾水中，黄色、橙色和红色最明显可见。

(五) 水下能见度降低

水对光的反射和吸收会消耗大量光能，当光线射向水中时，在水面发生反射。入射角越大，反射光量越多。如正午阳光直射，入射角为零，反射光量很少，大部分光线透入水中，水下能见度要比上午和下午大气中同样照度时好。光在水中传播时，水对光的吸收要比空气大千倍以上。光能因水分子和悬浮于水中的颗粒阻碍产热而消耗，因此水越深或越浑浊，吸收光能越多，能见度就越低。光线每向下行进 1 m，在清澈水中被吸收 10% 以上，在浑浊的水中可达 80%，甚至更多。在这样的水中，即使在夏季晴朗的中午，4 m 深处的照度仅 0.3~0.6 lx。

光线在水中遇到水分子和微粒物质后会出现非常明显的散射，降低物体和背景之间的对比度，进一步降低水中的能见度，类似于空气中存在大雾时的情况。有时，散射能使光分散到本来是阴影或无照明区域，在一定程度上增加能见度。

水下能见度等级和风级划分见表 6-2 和表 6-3。

表 6-2 水中能见度等级

能见度/ 级	可见物距离/ m	可见情况
0	—	视程完全没有（没有物象、面窗前不能辨认）
1	0.1	视程很不好（螺钉等物象移到面窗前辨认困难）
2	0.5	视程不好（能辨认一般缆索）
3	1.5	视程短（站立的潜水员可辨认脚下土质及小物体）
4	2.5	中等视程（能看见大型结构件的轮廓）
5	4.0	好的视程（能清晰地看见大型结构件的轮廓，并能辨认小艇的轮廓）
6	6.0	很好的视程（能在船甲板上辨认机器机件）
7	10.0	最好的视程（最透明的水、能辨认一些光谱）

表 6-3 薄氏风级表

风级	风速/(m/s)	名称	海面征象
0	0~0.2	无风	海面平如镜
1	0.3~1.5	软风	海面有波纹,但还没有白色波顶
2	1.6~3.3	轻风	波浪纹虽小,但已明显,波顶透明像玻璃,但不碎
3	3.4~5.4	微风	波较大,波顶开始分裂,泡沫有光,间或有白色碎浪
4	5.5~7.9	和风	轻浪,波长较大,往前卷的白色碎浪较多,有间断的呼啸声
5	8.0~10.7	劲风	中浪,波长相当大,白色碎浪很多,呼啸声不断,间或有浪花溅起
6	10.8~13.8	强风	开始成大浪,波顶白色泡沫飞布海面,呼啸声大,可能有少数浪花溅飞
7	13.9~17.1	疾风	海面像由波浪堆积而成,碎浪的白色泡沫开始呈纤维状,随风吹散,飞过波顶
8	17.2~20.7	大风	中高浪,波长更大,随风吹起的纤维状更为明显,呼啸声更大
9	20.8~24.4	烈风	高浪,泡沫纤维更为浓密,海浪卷翻,泡沫可能影响能见度
10	24.4~24.5	狂风	大高浪,波浪成长形突出,纤维状泡沫更为浓厚,并成片状。海浪颠簸汹涌,浪花飞起带白色,能见度受影响
11	28.4~32.6	暴风	高浪,中小型的船在海上时可能被遮蔽,波顶边缘被风吹成浪沫,能见度受影响
12	大于 32.6	飓风	空气中充满泡沫和浪花,海面因浪花飞起成白色状态,能见度急剧降低

七、听觉

声波是通过气体、液体或固体传播的一种周期性运动或压力变化。由于水的密度比空气大近 800 倍,在水中产生声波需要更多能量,但一旦产生,声波在水中传播的速度和距离会更快、更远。声波在水中传播的速度约 1 500 m/s,是在空气中(332 m/s)的 4 倍多。声波在水中传播时衰减比在空气中少,而水对声波振动的阻尼作用比空气更大。

此外,水中存在不同温度的水层。水温越低,水的密度越大。当水层间存在密度差时,声波在两水层界面处的传播能力迅速下降。这就意味着,在同一水层可以听到 100 m 以外的声音,而在不同的水层,尽管离同一声源仅有数米远也不一定能听到。在浅水层或密闭空间,声波在空气-水和物体-水界面的反射会导致声波传播异常,产生回声、死角和声音节点等。

在水下,嘈杂的声音较空气中少,水越深则越静,对声音的干扰越小。声音在水中传播的这些主要特点,以及人在水下接收声音的传导途径的改变,使在水下的听力和听觉辨别力发生一系列的变化。

(一) 听觉传音过程改变

人在水下,头部直接与水接触,仅外耳道残留少量空气,声音主要是靠骨传导;如果戴头盔,则存在气传导。在空气中声音的骨传导低于气传导,但在水中声音的骨传导比在空气中有利。因为水与头骨距离较近,所以声音从水中传到头骨时,音量消耗少。另外,水下的声音也可以通过肢体、躯干等传到头骨,再传到内耳。

（二）听力减退

尽管声波在水中传播有些有利因素，但抵消不了不利因素造成的影响。在水下无论骨传导或空气传导，都会产生听力减退。

潜水员头部浸水或不直接浸水时，声波在水、金属-空气等不同介质的界面上，大部分能被反射，声音强度衰减较大，使听力减退。但金属敲击声和螺旋桨转动声能听到，因而可通过在水面敲击的方式与水下潜水员进行联系。

（三）听觉辨别能力降低

在水下声源判定距离变近。潜水员在水下判断自己与声源的距离只有实际距离的 $1/4$ ，这是因为声音在水中传播的速度是在空气中的 4 倍，而人习惯于在空气中判断声源的距离。

在水下声源定向能力降低。人在水中，若声音完全依靠骨传导，对音源方向的辨别能力将大幅降低甚至会完全丧失。潜水员在水下寻找音源常会走弯路，甚至朝相反方向移动。主要原因是传音途径由气传导改为骨传导，以及水中传音速度快，声音到达双耳的强度差和时间差发生紊乱，潜水员难以辨别。在空气中，人接收声音主要靠气传导，当声源发出声音到达双耳时，存在强度和次序的不同，借以判断音源方向。但在水中，人由头颅骨甚至整个身体接收声音，加上声波的快速传播，准确辨别音源方向确实很困难。但经过训练后，辨音能力会有一定的改善。当潜水员需要依靠声音判断物体或危险目标方位时，这种不利影响甚至会造成严重后果。

在水下音色会发生改变。潜水员在水下对音色的辨别能力也有改变：敲击金属气瓶会发出短促、清脆声，没有在空气中特有的持续“余音”；水下爆炸声好似用木棒击碎陶土罐时所发出的声音。这些改变可能与水对低频率的声音吸收大及水对发音物体振动的阻尼作用有关。

八、其他

此外，潜水员在水下工作还会受风、浪、流、涌和海底性质的影响。在海里潜水时，还有像鲨鱼一类的凶猛生物，有可能伤害潜水员，并会对潜水员的心理产生明显的影响。水下环境中的许多因素可能使潜水员产生一系列的生理反应，如果潜水员不掌握其客观规律，还可能引起各种病理变化。所以，潜水员有必要了解水下环境的特点。

思考题

1. 潜水过程中，影响潜水员呼吸的气体成分有哪些？具体的影响特点是什么？
2. 如何利用气体定律解释高压环境对潜水员身体的影响？
3. 高压作业环境对潜水员机体有哪些影响？
4. 高压作业环境对水下听觉和水下视觉的影响规律是什么？