

· 海军医学 ·

20~36.5 米氮氧饱和潜水、空气巡回潜水 50~70 米模拟实验研究的减压问题

海医系潜水生理教研室

我室于1977年8月至1978年8月参加了交通部 and 上海市科委组织领导的我国首次氮氧饱和潜水模拟实验研究,我们观察和总结了20~36.5米氮氧饱和潜水、空气巡回潜水50~70米的减压问题。

饱和潜水的减压问题,是饱和潜水医务工作的一个重要环节。本次实验研究所涉及的减压问题,广义地说,主要有以下三个方面:1.潜水员饱和暴露结束后的减压;2.工作人员临时进舱,即非饱和暴露后的减压;3.饱和-巡回潜水的减压的深度-时程极限。

氮氧饱和潜水、空气巡回潜水模拟实验研究在国内尚属首次,对这类实验研究所涉及的减压问题,没有经验。认真总结本次实验研究的经验,对于今后进一步开展饱和潜水实验研究,乃至现场使用,无疑具有重要的价值。

方案的制订或选择及实施的过程和结果

一、潜水员饱和暴露结束后的减压

(一)制订减压方案的原则和参数:

1.采用饱和潜水阶段减压方法实施减压。

2.采用 Workman 提出的“允许上升到某深度的最大组织惰性气体张力”,即M值的理论,作为估算氮的最大允许张力的基础。

3.最慢理论组织半饱和时间取1,200分钟。

4.出水M值取14.5米, ΔM 值取1.5米海水绝对压/1.5米海水表压。

5.各减压停留站深度间距1.5米。上升速度一般采用0.3米/分钟,以减少单位时间内压力变化的幅度。

6.在减压过程中,用压缩空气作为呼吸气体。

7.充分利用等压原理吸氧排氮。从10.5米起间歇呼吸纯氧,促进氮的脱饱和。为防止高分压氧的毒性作用的累积,增加耐受力,每次连续吸氧时间不超过1小时。

8.在1.5米停留站停留结束后,再使舱压上升到9米处,令潜水员在此压力下吸氧半小时。目的是使在减压过程中可能形成或膨胀的气泡得到压缩,并促使其溶解。

9.带有空气巡回潜水的氮氧饱和暴露的减压,应在最后一次巡潜结束后间隔时间不少于24小时再开始减压。

(二)本次实验采用的减压方案:本次实验先后共六次饱和暴露。深度分别为20米、30.5米和36.5米三档,采用的减压方案见表1(参考美国NOAA有关表)。

(三)结果:本项实验研究包括三个饱和深度、六次实验,共36人次的减压,无一例出现减压病症状和体征。每次实验的减压总时间及吸氧总时间见表2。

表 1 20~36.5米氮氧饱和潜水模拟实验减压方案

| 饱和暴露深度 (米) | 第一停留站 | | | 后续停留站 | | |
|---------------|-----------|------|--------|-----------|------|--------|
| | 深度 (米) | 呼吸气体 | 停留时间 | 深度 (米) | 呼吸气体 | 停留时间 |
| 36.5 | 30.0 | 空气 | 3小时 | 28.5 | 空气 | 3小时 |
| | | | | 27.0 | 空气 | 3小时 |
| | | | | 25.5 | 空气 | 3小时 |
| | | | | 24.0 | 空气 | 3小时 |
| 30.5 | 24.0 | 空气 | 3小时 | 22.5 | 空气 | 4小时 |
| | | | | 21.0 | 空气 | 4小时 |
| | | | | 19.5 | 空气 | 4小时30分 |
| | | | | 18.0 | 空气 | 4小时30分 |
| | | | | 16.5 | 空气 | 5小时 |
| | | | | 15.0 | 空气 | 5小时 |
| | | | | 13.5 | 空气 | 5小时 |
| | | | | 12.0 | 空气 | 5小时 |
| 20.0 | 13.5 | 空气 | 3小时30分 | 10.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 10.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 10.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 10.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 9.0 | 空气 | 2小时 |
| | | | | 9.0 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 7.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 7.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 7.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 7.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 6.0 | 空气 | 3小时 |
| | | | | 6.0 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 4.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 4.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 4.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 4.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 3.0 | 空气 | 4小时 |
| | | | | 3.0 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 1.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 1.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 1.5 | 空气 | 30分 |
| | | | | 1.5 | 氧 | 1小时 |
| | | | | 9.0 | 氧 | 30分 |
| | | | | 0 | | |

表 2 20~36.5米氮氧饱和潜水模拟实验研究六次实验的减压总时间和吸氧总时间

| 实验序号 | 饱和深度 (米) | 饱和暴露时间 | 减压总时间 | | 吸氧总时间 | |
|------|-------------|----------|---------|---------|---------|--------|
| | | | 减压方案规定 | 实际使用 | 减压方案规定 | 实际使用 |
| 1 | 20.0 | 240小时25分 | 38小时 | 43小时31分 | 11小时30分 | 6小时26分 |
| 2 | 30.5 | 168小时28分 | 64小时30分 | 70小时45分 | 11小时30分 | 7小时30分 |
| 3 | 30.5 | 192小时14分 | 64小时30分 | 72小时38分 | 11小时30分 | 7小时 |
| 4 | 30.5 | 216小时 | 64小时30分 | 70小时50分 | 11小时30分 | 7小时 |
| 5 | 30.5 | 144小时 | 64小时30分 | 67小时13分 | 11小时30分 | 6小时40分 |
| 6 | 36.5 | 211小时 | 76小时30分 | 79小时03分 | 11小时30分 | 9小时33分 |

在第六次实验中（饱和深度36.5米），7名潜水员中有4名，当减压到6米停留站时，出现手指尖麻刺感。继续吸纯氧时，麻刺感加重。停止吸氧后3小时内症状明显缓解。另有两名潜水员在减压至7.5米和6米停留站时，出现胸闷，但无咳嗽、胸痛，可能与长时间吸入高分压氧有关。

二、工作人员临时进舱，即非饱和暴露后的减压

（一）选择减压方案的原则：

1. 按呼吸气体的氮分压，把氮氧暴露深度换算成相应的空气暴露深度。例如氮氧暴露30.5米（氮氧混合气中氮气占95%，氧气占5%），按其氮分压换算成相应的空气暴露深度。 $95\% \times 4.05 + 80\% = 4.8$ （绝对大气压）。相当于空气暴露深度38米。

2. 根据由上所得的相应空气暴露深度，以及该次进舱在压力下停留时间，从海军颁发的《60米水下阶段减压潜水减压表》选择相应减压方案（基本方案）。必要时可酌情采用下一格为实际减压方案（延长方案）。有吸氧条件时，在12米停留站以浅给予吸氧；停留时间折半。

（二）结果：六次实验共13人次减压（20米2人次；30.5米9人次；36.5米2人次），无一例出现减压病症状和体征。

三、不减压巡回潜水的深度-时程极限

本次实验研究设计了一系列不同深度的干、水舱模拟巡回潜水（以下简称巡潜）。每个深度又分别作了单一巡潜和反复巡潜模拟实验。每项模拟巡潜，均控制在不减压范围内。

（一）不减压巡潜的深度-时程极限的计算参数：

1. 理论组织半饱和时间：5~480分钟。
2. 饱和暴露呼吸气体：氮氧混合气（氧分压为0.21大气压）。
3. 巡潜呼吸气体：压缩空气。

（二）不同饱和深度下不减压巡潜深度-时程极限见表3。

表3 不同饱和深度下不减压巡回潜水的深度-时程规定

| 饱和深度 (米) | 巡回潜水深度(米)和时程(分钟) | | | |
|-------------|------------------|-----|-----|-----|
| | 50 | 60 | 65 | 70 |
| 30.5 | 360 | 135 | 72 | 42 |
| 36.5 | 360 | 360 | 330 | 235 |

（三）反复巡潜：反复巡潜两次巡潜之间的间隔时间不得少于4小时，一般控制在4~6小时。考虑到第一次巡潜到达极限时程，第二次巡潜的极限时程为第一次巡潜规定时程的一半。

（四）环境条件：按实验设计要求，应将巡潜时环境温度控制在一定范围内（舱温20C~25C；水温20C左右）。但由于受到设备条件和季节等种种限制，舱温和水温均不能严格控制。历次实验实际舱温的幅度是22C~36.5C（不包括升压和减压时）；水温的幅度是24C~36C。湿度、噪声和二氧化碳浓度等控制也不尽理想，根据有限的抽测记录，巡潜舱内二氧化碳浓度有时高达相当于常压下2~4%。

（五）劳动强度：巡潜期间，潜水员需完成一定强度的劳动。潜水员取立位，戴空气潜水呼吸器，弯腰双手提34.5公斤重锡锭至1米高处，然后放下。按5次/分钟的频度连续劳动10~15分钟，休息15分钟后再劳动一次。劳动强度为172公斤米/分钟，属轻至中度劳动。

（六）升压速度和减压速度：升压速度不大于10米/分钟；减压速度小于9米/分钟。

（七）巡潜时间的计算：巡潜时间是指离开饱和深度时开始到返回饱和深度时为止的那一段时间。

（八）结果：本次实验共进行181人次模拟巡潜（每次反复巡潜计作2人次）。另有6次从饱和深度到24.5米的向上巡潜，系潜水员在饱和深度处暴露仅5小时18分钟后进行，由于尚未达到完全饱和，故未列入统计。

181人次巡潜中，达到规定极限时程的有101人次；未达到规定极限时程的有80人次，

均无一例发生减压病。

讨 论

一、饱和暴露减压方案的安全可靠性

本次实验研究中提出的饱和暴露减压方案,使用于三个深度、六次实验,共36人次(20米一次,6人次;30.5米四次,23人次;36.5米一次,7人次),无一例发生减压病。可以认为,在本次实验条件下,这些减压方案基本上是安全可靠的。

本次实验所制订的饱和暴露减压方案,与国外某些同类实验相比,减压总时间和吸氧总时间似均偏长。如Lambertsen(1970)报告100英尺14天氮氧饱和暴露,减压总时间49小时20分钟,吸氧总时间2小时50分。Николаев(1975)报告,苏联《黑海》计划中,一次氮氧饱和潜水现场实验31米21天,减压2昼夜。但是另一次31米24天的水下实验,因1名潜水员在减压时出现减压病,使减压时间延长到5昼夜。就理论组织半饱和时间而言,Lambertsen采用500分钟半饱和时间,本次实验则采用1,200分钟,就干舱模拟实验来说,似有较大余地。

综上所述,本次实验研究所提出的饱和暴露减压方案,可以建议提供日后现场实验或作业时使用。至于今后的加压舱内模拟实验的减压,尚可考虑适当缩短减压时间。

二、吸氧减压问题

应用等压原理,在减压至一定深度后间歇吸入纯氧,以加速体内溶解氮的脱饱和过程。国内外已经普遍采用并行之有效,在饱和潜水减压中也受到重视。

在氮氧饱和潜水采用空气减压时,如果饱和深度较大(如本次研究的第六次实验,饱和深度36.5米),潜水员在减压时,势必将在压力较高的压缩空气中停留较长时间,如果接着又吸入纯氧,就有发生肺型氧中毒的可能,应予以注意。在上述第六次实验中,当减压至6米停留站时,七名潜水员中有四名主诉双手手指麻刺感,继续吸氧可使麻刺感加剧。停止吸氧后3~4小时内症状明显缓解。这虽非肺型氧中

毒,却是氧的毒性作用的另一种表现形式。Clark等(1971)也曾报告类似症状。按Wright(1972)提出的累积氧剂量(Cumulative Oxygen Dose)的计算方法,本次减压中潜水员出现症状前,肺中毒剂量单位(Unit pulmonary toxic dose, UPTD)的累积达1,500单位以上,超过了Wright提出的暴露极限。另外两名潜水员当减压至7.5米停留站时,几乎同时出现胸闷,但无胸痛和咳嗽。这是否高分压氧对肺的毒性作用的早期反应,似尚无足够证据,难以断言。如在当时对这六名潜水员作肺活量测定,可能对分析有所帮助。上述六名潜水员在症状消失后的减压过程中,仍间歇吸入纯氧,无症状发生。这时,吸氧间歇期舱内氧分压已降至0.37大气压以下,并逐步降低至接近正常大气中的氧分压。可以认为,由于交替呼吸压缩空气(氧分压较低),减少了氧对机体起毒性作用的可能性。

减压过程中吸氧与用餐和睡眠在时间安排方面的矛盾,是一个实际问题。我们的解决办法是:1.当因上述矛盾需要将吸氧改为吸空气时,停留时间相应延长一倍。2.在开始减压前,潜水医务人员通盘考虑整个减压过程的安排,尽量避免吸氧与用餐和睡眠的矛盾。今后的现场实验,似可沿用这些原则。

三、不减压巡潜的深度-时程极限

本实验共作不减压巡潜181人次,无一例发生减压病。可以认为,在本次模拟实验的条件下,实验设计所规定的深度-时程极限,基本上是安全的。

经过理论计算,当巡潜结束时,体内各类理论组织的氮张力都不超过Workman(1965)提出的最大允许张力(M值),并且尚留有一定余地。但是36.5米氮氧饱和不减压巡潜65米、70米两档,理论计算得到的组织氮张力(80分钟~240分钟组织)比较接近按Workman提出的M值和 ΔM 值作理论推算得到的允许上升到36.5米的最大允许张力 $[M = M_0 + (\Delta M / \Delta p) p]$ 。因此,在日后现场使用时,尤其应当谨慎。

Larsen和Mazzone(1967)报告,从饱和和深

度35英尺出发,作100~156英尺巡潜(呼吸气体均为压缩空气)。巡潜结束时各类理论组织的氮张力的计算指出,最短时程的巡潜是由20分钟组织控制返回饱和深度的上升,而最长时程的巡潜则由80分钟组织控制,其余均由40分钟组织控制。在本次实验中,似乎都是半饱和时间大于80分钟的组织为领先组织。这一点提示我们,如果超过规定的减压深度-时程极限,所需的减压时间将是比较长的。

四、反复巡潜

本次实验共作67人次反复巡潜,其中37人次达到规定极限时程。理论计算表明,当第二次巡潜结束时,体内理论组织氮张力显然低于相应的M值。在实验中也未曾发生一例减压病。由此可见,按上述原则掌握反复巡潜允许时间,基本上是安全的。

但是,潜水作业现场其潜水深度、时间和间隔时间可能是多变的,上述原则不能完全适应这种情况,因此,日后应当进一步计算和验证在不同潜水深度和间隔时间的条件下实施反复巡潜的一系列具体规定和方案,供现场医务保证人员掌握使用。

结 语

本文报告了20~36.5米氮氧饱和潜水、空气巡回潜水 50~70 米模拟实验研究的减压问

题。

氮氧饱和暴露深度分别为20、30.5和36.5米,暴露时间144小时~240小时。混合气中氧分压为0.25~0.31ATA。文中提出了计算饱和暴露后减压方法的原则和参数,以及具体减压方案。六次实验共36人次的减压,无一例出现减压病。

本文报告和讨论了氮氧饱和暴露后空气-吸氧减压时,部分潜水员出现慢性氧中毒的症状(指端麻刺感)。

本文对于氮氧饱和暴露后空气-吸氧减压过程中安全合理吸氧、工作人员临时进舱的减压等作了总结和讨论。对今后现场实验有参考价值。

空气模拟巡潜,深度50~70米,分干舱和水舱模拟两种,又分别作了单一巡潜和反复巡潜模拟实验。均控制在减压巡潜的范围内,共181人次巡潜,无一例出现减压病症状和体征。

(本研究协作单位:海军医学研究所,上海救捞局,上海生理研究所,广州、烟台救捞局,上海海员医院,上海市杨浦区中心医院等。)

(张文康整理)

参考文献(略)