

# 超过例外氧暴露时限的空气巡回潜水实验中若干生理功能的观察\*

陈宝松 荆岩林 郑继昌

(交通部石油部海洋水下工程科学研究院,上海,200232)

收稿日期 1989年9月21日

关键词 氧暴露时限,饱和潜水,生理功能,氮麻醉,肺型氧中毒

**提要** 17名潜水员安全地进行了55人次超过美国海军例外氧暴露时限1.5—3倍的空气巡回潜水实验。生理功能观察和肺活量测定结果表明,在水深70m以浅,潜水员均保持了相当好的智力和操作能力,在连续3d3倍氧暴露时限的巡潜后期,只有3人肺活量下降,且在次日测定时已见恢复,表明上述暴露是安全的。美国海军例外氧暴露时限中对于70m以浅空气暴露的相应规定显得保守。

## I. 实验对象和方法

### I.1. 受试者

17名男性职业潜水员,年龄为 $25.4 \pm 4.8$ 岁,身高 $173.5 \pm 5.4$ cm,体重 $77.2 \pm 4.4$ kg,潜水工龄2—16a。

### I.2. 饱和暴露

受试者分成3批进入36.5m氮氧饱和环境,每批人数分别为6,6和5人,分别饱和暴露9,26和6.5d。其舱室环境为:氧分压25—35kPa,CO<sub>2</sub>分压<500Pa,舱温25—27℃,相对湿度50—70%。实验I,II在海军医学研究所的饱和潜水实验模拟舱内进行,实验III利用半潜式钻井平台“南海二号”配属的Drass型潜水钟——甲板加压舱饱和潜水设备在中国南海莺歌海水深64m的某海区进行。

### I.3. 巡回潜水

模拟空气巡潜分干式和湿式两种。巡潜期间,受试者将35.5kg的重物搬至1m高处再放下,以5次/min的速度连续进行10—15min,反复巡潜时规定其体力负荷减半。湿舱巡潜时潜水员使用国产69-IV型管供式开放呼吸器并穿湿式潜水服,水温26—30℃。反复巡潜在第一

次巡潜4—5h后进行。实海巡潜每次由两名潜水员进行,其中一人连续出钟巡潜,使用美国KMB-10型开放式呼吸面罩,穿干式潜水服。海底为淤泥。水温为25.4—26.2℃,流速<0.5m/s。

### I.4. 生理测试

肺功能测定是利用水封式肺量计通过机械——电信号换能后在舱外记录<sup>[1]</sup>。视觉运动反应速率是测定受试者见到随机发出的亮灯信号后立即用手掀按钮这一过程的平均速率。滚珠投递测验是测定用金属镊子将轴承滚珠投入比其直径稍大的玻璃管中的速率。多位数字记忆广度测验是测定受试者听到报读的10位以内的随机数字后能准确记录的最高位数。一位数加法测验是测验5min内依次以最快速度划出符合命题要求的所有两位数字组合时的得分<sup>[2]</sup>。

\* 本文所提及的3批实验由交通部石油部海洋水下工程科学研究院、海军医学研究所、交通部上海、广州、烟台海上救助打捞局、第二军医大学海医系、中国科学院上海生理研究所、南通医学院、上海市杨浦区中心医院、上海海员医院、南海西部石油公司等单位协作完成。

美国Hamilton研究所总裁R. W. Hamilton博士对本文提出有指导意义的意见,谨致谢意。

生理测验在干舱模拟时进行,其中视觉运动反应速率和肺功能测定分别在巡潜的前期(巡潜开始后30min以内)和后期(巡潜结束前30min以内)各测定一次。

## II. 结果

### II.1. 巡回潜水

实验 I 和 II 空气模拟巡潜的实验人次数见表 1。干舱巡潜为 58 人次、湿舱 64 人次,共计 122 人次,其中反复巡潜 47 人次。实验 III 进行了 7 次 64m 潜水钟实海巡潜,巡潜时间分别为 82, 90, 105, 115, 155, 187 和 217min。

各巡潜深度下的巡潜时间与相应的例外氧暴露时限相比,为其 3 倍及以上者有 28 人次(均为干舱),为其 2 倍者有 8 人次(干舱 7 人次,出钟 1 人次),为其 1.5 倍者有 19 人次(干舱 5 人次,湿舱 12 人次,出钟 2 人次)。巡潜后所有潜水员均不减压,安全返回饱和和居住舱,没有出现任何肺型氧中毒及减压病症状和体征。

表 1 36.5m 氮氧饱和时空气模拟巡潜人次  
Tab. 1 Air excursions in the N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> saturation at the depth of 36.5m

人次	暴露时间 (h)						合计
	0.5	1	2	4	5.5	6	
干 舱	60		6*	6	6		18
	65				6		6
	70		3*		16		19
	75	6*	9				15
湿 舱	60		12(6*)				12
	65		12(6*)				12
	70	5*	5	12(6*)			22
	75	9*	9				18
合 计	20	24	36	22	6	6	122

注: \* 为反复巡潜的人次; 虚线右下部为超过美国海军例外氧暴露时限的巡潜人次。

### II.2. 神经和心理功能测试

测试结果(见图 1)表明,空气巡潜时视觉运动反应速率都有不同程度的降低;滚珠投递

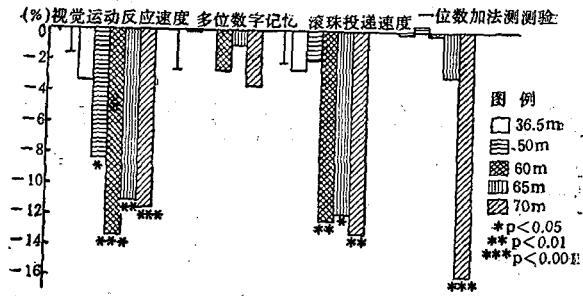


图 1 50—70m 空气巡潜时神经和心理功能的变化 (6 名潜水员平均值)

Fig. 1 Changes of neurophysiological and psychological function during air excursions at the depths of 50-70m

速率在 60m 以深显著减慢;一位数字加法测验成绩在 70m 以深显著降低;10 位以内数字记忆广度测验在 70m 以内没有显著影响。为了进行不同深度下的比较,选取了同一名潜水员在另一次实验中 50m 6h 巡潜时测得的资料。

视觉运动反应速率在空气巡潜的前期和后期的比较结果(见图 2)表明,50m 6h 暴露前期下降 8.4%,在暴露后期有明显改善( $P < 0.05$ );60m 6h 暴露后期与前期相比似有改善;65m 5.5h、70m 4h 暴露前后期相比没有显著差别。

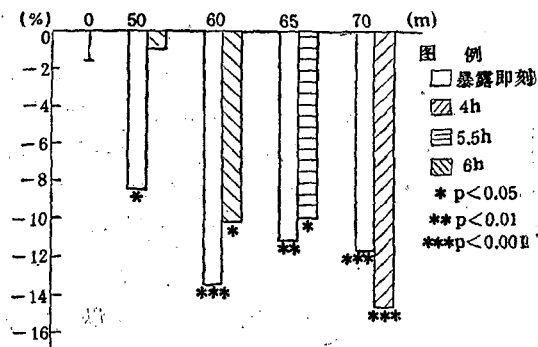


图 2 50—70m 空气巡潜的前后期,视觉运动反应速率比较 (6 名潜水员平均值)

Fig. 2 Changes of visual-motor reaction rate in the earlier and the later stages of air excursions at the depths of 50-70m

### II.3. 肺功能测试

6 名潜水员连续 3d 先后进行 60m 6h、65

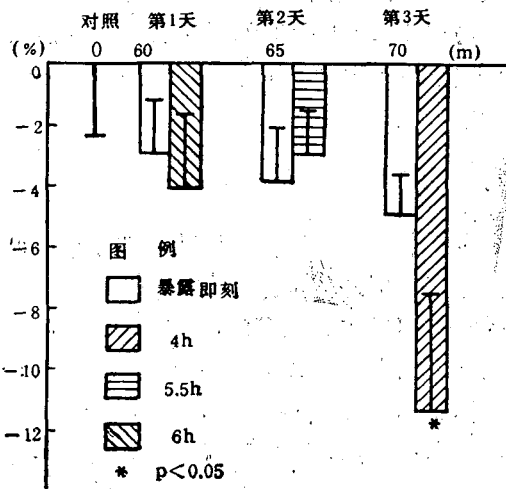


图3 连续3d 每天3倍于例外氧暴露时限的空气巡潜的前后期肺活量变化 (6名潜水员平均值)

Fig. 3 Changes of forced vital capacity tested day by day over three days in the earlier and the later stages of air excursions (three times the US Navy exceptional oxygen limits)

表2 3倍于美国海军例外氧暴露时限的空气巡潜时的肺功能观察

Tab. 2 Observations of pulmonary function during air excursions which were 3 times the US Navy exceptional oxygen limits

氧暴露日期	对 照	第 1 天		第 2 天		第 3 天	
巡潜深度、时间	0 m	60m	6h	55m	5.5h	70m	4h
测试时间	对 照	前期	后期	前期	后期	前期	后期
FVC (L)	4.63±0.21	4.51	4.46	4.47	4.51	4.42	4.12*
TVC1 (%)	82.0±2.6	53.0	55.0	55.3	55.8	55.6	58.4
PIFR (L/s)	5.84±0.24	2.17	2.44	2.16	1.83	2.40	2.42
PEFR (L/s)	6.21±0.23	3.46	3.54	3.36	3.27	3.10	3.10

注: FVC——肺活量, TVC1——1s 时间肺活量(%), PIFR——最大吸气流速, PEFR——最大呼气流速。

\* 为  $P < 0.05$ , 数据为 6 名潜水员测试结果的平均值。

者做精细操作时神经肌肉系统进行协调动作的能力。实验观察结果表明, 50m 以上巡潜时人体的感觉——反应传导通路都有一定的延迟, 60—70m 时精细操作能力有所降低, 但所有潜水员都完成了预定的测试任务, 总之, 该项操作能力是相当好的。

多位数字记忆和一位数加法测验是检查受试者的短暂记忆广度和进行简单算术运算的能

m 5.5h 和 70m 4h 的干舱巡潜, 其巡潜时间均为例外氧暴露时限的 3 倍, 由肺功能测定结果 (见表 2) 和肺活量变化的百分比 (见图 3) 可见, 60 和 65m 组与对照值相比没有显著变化, 70m 4h 巡潜后期其肺活量平均下降 11.4% ( $P > 0.05$ ), 其中有 3 名分别下降 14.3, 18.9, 22.9%。所测定的时间肺活量、最大吸气和呼气流速, 除了由于呼吸气体密度增加的效应与对照值相比呈减少趋势<sup>[1]</sup>外, 该暴露的后期与前期测定值相比并无显著变化。

### III. 讨论

用生理学定量测试手段对空气潜水时氮麻醉和氧中毒的表现症状进行定量评价, 已有不少研究<sup>[2]</sup>, 但对于 3 倍于美国海军例外氧暴露时限的测试却鲜有报道, 本实验采用 4 种测试手段对此进行评价。视觉运动反应速率可对中枢神经系统所直接控制的感觉——反应的传导通路进行定量描述; 滚珠投递测验可反映受试

力, 实验表明, 除 70m 时加法测验成绩有一定降低外, 与对照值相比没有显著差别。以上结果与同样深度空气常规潜水的类似测验结果<sup>[3]</sup>相比, 有较大的改善。超过例外氧暴露时限后期与前期相比, 视觉运动反应速率 50m 6h 暴露时有所改善, 65m 5.5h 和 10m 4h 暴露时变化不大。在 36 人次 75m 空气巡潜初期观察到 2 名经验不足的潜水员有过度兴奋而不能配合

完成预定的操作任务的现象,但在暴露后期有好转,可以认为潜水员在70m以浅作超过例外氧暴露的空气巡潜时,均保持了相当好的智力和操作能力。

在70m以浅空气潜水中,潜水员所暴露的高分压环境并未达到中枢神经系统氧中毒的氧分压水平,其主要表现为慢性氧中毒或肺型氧中毒。高压氧对肺的毒性作用是积累的,但中间和经过常氧停留又能较快恢复。Wright等提出以肺活量减少的百分数为主要指征而得出累积肺型氧中毒剂量(CPTD)的概念<sup>[3]</sup>,并以 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的氧分压暴露1min作为肺型氧中毒剂量单位(UPTD)。但该计算尚未考虑在间歇常压或交替低氧暴露期间肺功能方面的恢复。

本实验观察到6名潜水员在连续3d进行60m 6h、65m 5.5h和70m 4h空气暴露的后期,其中3名潜水员的肺活量有所下降,他们主诉当进行肺功能测试时感到费力以致努力程度不够,返回饱和环境后感到好转,并在随后的几天内圆满完成了超过例外氧暴露时限的湿舱巡潜实验。另一批潜水员进行的10人次70m 4h空气巡潜没有发生肺活量降低的情况。以上结果提示了在大深度空气巡潜中肺型氧中毒是一个必须密切注意、加以预防的重要问题。

本实验中3倍于美国海军例外氧暴露时限空气巡潜的生理测试结果提示,美国海军潜水手册中所规定的例外氧暴露时限对于70m以浅的空气暴露仍显得保守。Miller等<sup>[4]</sup>在实海32m氮氧饱和中进行61,69和76m垂直空气巡潜的超氧耐受限暴露实验,没有观察到氮麻醉和肺型氧中毒的现象。Butler等<sup>[5]</sup>通过使用

闭式回路潜水呼吸器进行纯氧潜水实验,认为在氧分压 $1.6212 \times 10^5 \text{ Pa}$ (对应于空气潜水66m)的安全暴露时间可定为240min。这与本实验的结论相吻合。

#### IV. 结语

本文通过17名潜水员55人次暴露时间超过美国海军例外氧暴露时限3—5倍的60—70m空气巡潜实验观察到,在70m以浅潜水员均保持了相当好的智力和一定的操作能力;6人连续3d3倍氧暴露第3天70m 4h巡潜后期,3名潜水员肺活量虽有降低,但次日能迅速恢复,表明本实验所进行的超过美国海军例外氧暴露时限的空气巡潜是安全的。这提示对于70m以浅的空气潜水,美国海军潜水手册所规定的例外氧暴露时限显得保守。该结果对氮氧饱和潜水技术的应用有实际意义。

#### 参考文献

- [1] 陈宝松、吴树慧、尹文武,1981。20—36.5m氮氧饱和及50—70m空气巡回潜水模拟实验的神经和心理功能研究。《心理学报》13(3): 317—326。
- [2] Chen Baosong, 1985. Decompression from nitrogen-oxygen saturation diving. *Acta Oceanologica Sinica* 4(1): 135-142.
- [3] Shilling C. W., M. F. Werts and N. F. Schandlemeier, 1976. *The Underwater Handbook: A Guide to Physiology and Performance for the Engineer*. New York: Plenum Press. 386-460.
- [4] Miller J. W., A. J. Bachrach and J. M. Walsh, 1976. Assessment of vertical excursions and open-sea psychological performance at depths to 250 fsw. *Undersea Biomed. Res.* 3(4): 339-349.
- [5] Butler F. K. Jr and Thalman E. D., 1986. Central nervous system oxygen toxicity in closed circuit scuba dives II. *Undersea Biomed. Res.* 13(2): 193-223.

## **SOME OBSERVATIONS OF PHYSIOLOGICAL FUNCTION DURING AIR EXCURSIONS**

Chen Baosong Jing Yanlin and Zheng Jichang

*(Institute of Underwater Technology, Shanghai, 200232)*

**Received:** Sept. 21, 1989

**Key Words:** Oxygen limit, Saturation diving, Physiological function, Nitrogen narcosis, Pulmonary oxygen toxicity

### **Abstract**

Three experiments were carried out on 17 professional divers involving a total of 122 individual air excursions at depths of 60-70m, while they were saturated in a 36.5m N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> environment. The excursion times of the 55 exposures were 1.5-3 times the exceptional oxygen limits laid down by the US Navy. The results of the physiological observations showed that in the excursions shallower than the depth of 70 msw all the divers kept good intelligence and working ability. The results of FVC tested day by day over three days for the exposure three times the US Navy limits showed that, only in the later stage of the exposure of 70m for 4h the FVC in 3 divers decreased, but it recovered when they returned to the habitat for one night. These result indicates that the air excursions mentioned above are safe, and suggests that the exceptional oxygen limits of the US Navy are conservative for the air exposures shallower than the depth of 70m.