

CHINITROX-6 实验中连续 12d 反复高氧暴露时的 允许氧剂量*

陈宝松 荆岩林 郑继昌

(海洋水下工程科学研究院,上海 200232)

人体暴露于 50kPa 以上氧分压的高氧环境中会引起累积性氧中毒,这也称为慢性氧中毒或肺型氧中毒。对于一次性高氧暴露, Wright 等^[1]建议氧剂量的适宜值为 615UPTD (使肺活量平均下降 2%),最多不宜大于 1425 UPTD (使肺活量平均下降 10%)。累积性氧中毒在人体脱离高氧环境后会有所恢复。但它是否影响次日的高氧暴露,连日反复高氧暴露时的适宜氧剂量应如何估算,对此目前尚无一

致的看法。

I. 实验方法

CHINITROX-6 实验是我国有关单位协作进行的 9 批 54 人次氮氧饱和-空气巡潜实验的一部分,受试对象为 6 名男性职业潜水员,年龄 21~32 岁,身高 $172.5 \pm 8.2\text{cm}$, 体重 $68.3 \pm 4.5\text{kg}$ 。饱和暴露的深度为 36.5m,饱和环境氧分压为 35kPa, CO_2 为 230Pa,温湿度舒适。进入饱和深度 1d 后开始连日反复高氧暴露 (表 1)。

表 1 CHINITROX-6 实验中的氧暴露概要

时间 (d)	项 目 概 要	当日剂量 (UPTD)	累积剂量 (UPTD)	作者建议的允 许日剂量 (UPTD)	作者建议的允 许累积剂量 (UPTD)	Repex 允许 累积剂量 (UPTD)
0	进入 36.5m 氮氧饱和和环境	0	0	615		—
1	空气 60m 360min 干式巡潜	616	616	615	615	850
2	空气 65m 330min 干式巡潜	614	1 230	515	1 130	1 400
3	空气 70m 240min 干式巡潜	485	1 715	450	1 580	1 860
4	空气 36.5m 90min 生理测试	86	1 801	400	1 980	2 100
5	空气 60m 240min 湿式巡潜	410	2 211	370	2 350	2 300
6	空气 65m 240min 湿式巡潜	446	2 657	350	2 700	2 520
7	空气 70m 240min 湿式巡潜	464	3 141	330	3 030	2 660
8	36.5m 饱和和停留,无高氧暴露	0	3 141	320	3 350	2 800
9	从 36.5~21m 空气减压	780	3 921	315	3 665	2 970
10	从 21~13.5m 空气减压	278	4 197	310	3 975	3 100
11	从 13.5~4.5m 间歇吸氧减压	824	5 021	305	4 280	3 300
12	从 4.5m~0m 间歇吸氧减压	310	5 331	300	4 580	3 600

氧暴露第 5~7d 的 240min 湿式巡潜分为两次进行,即每人在上午进行了 120min 的湿式巡潜,间隔 4h 后又进行了相同深度、时间的反复

巡潜。湿式巡潜时潜水员使用面罩式潜水呼吸

* 美国 Hamilton 研究所 RW Hamilton 博士与作者进行了十分有益的讨论,谨致谢意。

器,由水面供给空气,在水下模拟提升重物等作业,水温为 31℃。饱和暴露 9d 后按预定的减压方案^[2]实施空气和间断吸氧减压,减压总时间为 79h,其中吸氧总时间为 9h 33min。减压中的氧剂量为 2190UPTD。氧剂量 D 的 UPTD 值计算公式为 $D = (P/50.65 - 1)^{0.833} \cdot t$, 其中氧分压 P 的单位为 kPa, 暴露时间 t 的单位为 min。

检查项目有心、脑、肺功能、代谢等数十项。肺功能测定采用肺量计法,在舱外记录^[3],暴露过程中除连日观察外,在干舱巡潜开始后和结束前的 30min 内再各测一次。每日清晨测量基础生理指标,定时询问感觉,检查体征。进舱前和出舱后的全面体检中还包括脑部 X 片、眼底检查及多种血液生化检验。

测试结果表明,6 名潜水员都能胜任预定的巡潜作业,耐受规定的反复高氧暴露,但在高氧暴露的第 3, 7 和 11 天出现了若干轻微症状。

高氧暴露的第 3 天,在 70m 240min 干舱巡潜结束前 30min 进行的肺功能测试中,有 4 名潜水员的肺活量测定值分别比对照值下降 22.9%, 18.9%, 14.3% 和 6.0%, 两名无显著变化。6 名平均肺活量下降 11.4% ($P < 0.05$)^[4]。但经过一夜在饱和环境停留,次日肺活量测定已见恢复。其他各次测定值与对照值相比均未见显著差异。

在高氧暴露第 7 天进行的 70m 120min 反复湿式巡潜结束后,1 名潜水员出现胸闷,次日已缓解。

高氧暴露的第 9 天开始减压,第 11 天开始吸氧。当天在 10.5m 停留站间歇吸氧 2h, 9m 站吸氧 1h, 7.5m 站吸氧 1h。两名潜水员出现胸闷,但无胸痛和咳嗽。7.5m 站吸氧 2h 后即减压至 6m 站,这时 4 名潜水员双手指尖出现麻刺感,继续吸氧麻刺感加剧,暂停吸氧有所缓解。停止吸氧 3—4h 后,该症状明显缓解。经一夜舱内睡眠,在次日继续按表减压(包括 3m 以下吸氧)时,没有任何症状发生。

出舱后进行的各项检查均未见异常,仅平

均体重比对照值下降 0.6kg。

II. 讨论

一般认为,70m 以浅的空气潜水中,氧分压低于 172kPa, 高压氧主要是引起慢性氧中毒,而不是惊厥性的急性氧中毒。目前已能确定,正常的肺脏可以无限长时间耐受低于 50kPa 的氧暴露^[7],并已证实即使是受到高氧损伤的肺脏,在上述条件下也能恢复^[8],但未见有定量的描述。本实验对此提供了定量资料。

首先,实验结果表明经受了一定限度氧剂量的高氧暴露会对次日的反复高氧暴露产生累积性作用。本实验 12d 高氧暴露的累积氧剂量与暴露时间的关系见图 1, 从中可以看出氧中毒症状都是出现在累积氧剂量曲线上的较高的凸出部位。

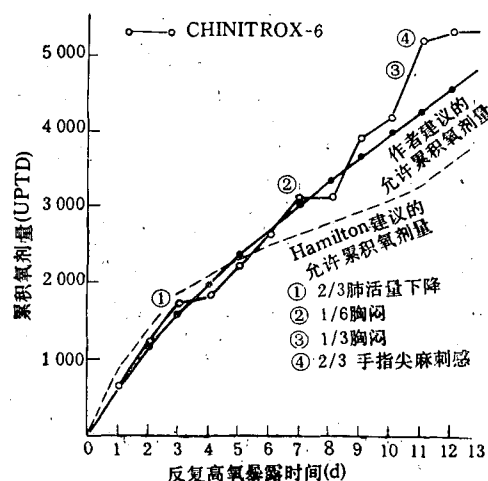


图1 CHINITROX-6 实验反复高氧暴露的累积氧剂量和建议的允许累积氧剂量

本实验的减压过程还可与 CHINITROX 系列中其他各次极为类似的饱和减压相比较^[2]。CHINITROX 6~9 的 4 批 25 人次的饱和减压,都是从 10.5m 或 10m 开始吸氧,吸氧总时间为 2h 57min,但只有 CHINITROX-6 实验中 6 名潜水员在吸氧时出现数例胸闷或手指尖麻木症状。与其他 19 人次相比,CHINITROX-

1) 陈宝松、荆岩林、郑继昌,1990。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。海洋科学(印刷中)。

6 的潜水员在饱和暴露期间空气巡潜较频繁, 巡潜时间较长, 累积氧剂量较高, 这也许与症状的出现有关。

从图 1 还可得出连日反复高氧暴露时的允许累积氧剂量的经验曲线。其数学解析式为:

$$D_t = D_{\infty} + (D_0 - D_{\infty})e^{-kt}$$

其中, D_t 为 7d 后允许的日剂量, D_{∞} 为连日反复高氧暴露 30d 时的允许日剂量 (UPTD), D_0 为首日高氧暴露的允许日剂量 (UPTD), k 为指数方程的常数。

连日反复高氧暴露的允许累积氧剂量

$$D = \sum_{i=0}^{\infty} [D_{\infty} + (D_0 - D_{\infty})e^{-ki}]$$

对于氧剂量的取值, 作者建议, 首日高氧暴露的剂量 D_0 宜取 615UPTD^[5]。如 D_0 取 850 UPTD^[6], 会使肺活量平均下降 4%^[8], 这会给随后的高氧暴露带来不利影响。根据实验数据分析, 参考 Hamilton 等^[6]的资料, D_{∞} 可取 300UPTD。这样, 连日反复高氧暴露的允许每日氧剂量经验公式可简化为

$$D_t = 300 + 315 \exp(-0.382t)$$

表 1 给出了作者建议的连续 12d 反复高氧暴露的允许日剂量和累积剂量值, 并与 Hamilton 等^[6]的建议值作了比较。

连日反复高氧暴露的每日允许剂量随暴露时间呈指数下降的规律可作这样的初步解释, 据有关资料, 高氧对肺脏的影响, 初期会使肺

泡表面的某些活性物质减少, 而导致肺膨胀不全^[7], 脱离高氧环境后, 这些物质即开始逐渐恢复^[9]。经验公式提示了机体经受一定限度氧剂量的连日反复高氧暴露的适应机制, 即一定限度的高氧暴露对机体产生的毒性作用与机体在间歇的非高氧期间的恢复在连日反复的过程中逐渐趋向“稳态平衡”。根据生物学中的剂量一效应原理, 这一平衡过程应该遵循指数曲线。对于该曲线中的各项参数, 由于目前实验例数较少, 有待今后更多资料的补充。

参考文献

- [1] 龚锦涵(主编), 1985. 潜水医学. 人民军医出版社, 第 307 页。
- [2] 陈宝松, 1983. 氮氧饱和潜水减压的研究. 海洋学报 5(1): 115~121。
- [3] 荆岩林、陈宝松、郑继昌, 1979. 20~36.5m 氮氧饱和及 50~70m 空气巡回潜水模拟实验的呼吸功能研究. 海洋学报 2(1): 323~336。
- [4] Wright R. B., 1976. Underwater Handbook, a Guide to Physiology and Performance for the Engineer. Eds. Shilling C. W. et al, New York, Plenum Press, 158.
- [5] Eckenhoff R. G. et al., 1987. Progression of and recovery from pulmonary oxygen toxicity in humans exposed to 5 at air. Aviat Space Environ Med 58(7): 658-667.
- [6] Hamilton R. W. et al, 1988. REPEX, Development of Repetitive Excursions, Surfacing Techniques, and Oxygen Procedures for Habitat Diving. Technical Report 88-1A, Rockville, MD, NOAA.
- [7] Clark J. W., Lambertsen C J., 1971. Pulmonary oxygen toxicity a review. Pharmacol Rev. 23(2): 37-133.