

# T/CDSA

## 中国潜水救捞行业协会团体标准

T/CDSA XXXX—202X

### 盾构氦氮氧饱和和高气压作业加减压技术规程

Technical code of practice of compression and decompression for shield tunneling hyperbaric operations with helium nitrogen oxygen mixture saturation

(报批稿)

(完成时间：2025年6月21日)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国潜水救捞行业协会 发布

# 目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 3

2 规范性引用文件 ..... 3

3 术语和定义 ..... 3

4 加压方法和要求 ..... 3

5 减压方法和要求 ..... 4

6 巡回作业的限制 ..... 4

7 作业气体的配置和要求 ..... 5

8 饱和作业最低气体储备 ..... 7

附录 A（规范性）建立氧分压的压力和加压至目标压力的混合气氮浓度的计算方法 ..... 9

附录 B（规范性）氮氮氧混合气饱和和高气压作业减压表 ..... 11

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由深圳市德威胜潜水工程有限公司提出。

本文件由中国潜水救捞行业协会归口。

本文件起草单位：深圳市德威胜潜水工程有限公司、四川宝盾隧高气压技术服务有限公司、安潜科技(深圳)有限公司、上海交通大学、中交一航局第一工程有限公司、广州潜水学校、上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司。

本文件主要起草人：宋春海、附晓军、李家颂、陈小强、徐国梁、石路、杨岗、袁晓国、赵国胜、许文兵、李洋洋、华文生、张玉祥、陈水开、张辉。

# 盾构氦氮氧饱和和高气压作业加减压技术规程

## 1 范围

本文件规定了以氦氮氧混合气为呼吸介质的盾构饱和和高气压作业的加压方法和要求、减压方法和要求、巡回作业的限制、作业气体配置和要求，以及饱和作业最低气体储备要求。

本文件适用于0.35 MPa~1.20 MPa盾构氦氮氧混合气饱和和高气压作业的加减压操作。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12521 空气潜水减压技术要求  
 GB/T 24550 200 m氮氧饱和和潜水作业要求  
 JT/T 742 200 m氮氧饱和和潜水气体配置要求  
 JT/T 744 200 m氮氧饱和和潜水减压病处置原则  
 JT/T 909 潜水员潜水后飞行要求  
 JT/T 1452 潜水打捞术语

## 3 术语和定义

GB/T 12521、GB/T 24550和JT/T 1452 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**饱和和高气压作业 saturation hyperbaric operation**

在高于大气压环境中作业，持续暴露达到或超过24 h，机体各组织被惰性气体饱和，再减压至常压的过程。

### 3.2

**氦氮氧混合气 helium nitrogen oxygen mixture**

使用氦气、氮气和氧气，按照一定比例配置的呼吸介质。

### 3.3

**作业呼吸气 breathing gas for operations**

盾构饱和和作业时，通过呼吸装具供作业人员呼吸的气体。

### 3.4

**高压转接舱 transfer under pressure (TUP)**

用于连接穿梭舱与饱和和居住舱，在高气压环境下转运作业人员的舱室。

### 3.5

**人员穿梭舱 personal shuttle chamber**

用于在高气压环境下将作业人员从饱和和居住舱转运至盾构人闸，或从盾构人闸转运至饱和和居住舱的高压运输舱室。

### 3.6

**连接通道 connection tunnel**

用于穿梭舱与盾构机人闸舱之间安全连接的变径管型装置。

## 4 加压方法和要求

4.1 饱和和居住环境的气体应为氦氮氧，其中氧分压设定在 40 kPa ± 2 kPa，氮分压设定在 ≤400 kPa。

4.2 加压方法为第一阶段先用含氧 16%~20%氮氧富氧混合气加压建立初始氧分压，再用含氧 2%的氮氧贫氧混合气加压至目标压力。第一阶段加压建立氧分压的方法和第二阶段加压至目标压力的混合气的氮浓度计算方法按附录 A。

4.3 加压至目标压力后，舱室氧分压值应控制在最大允许范围内，且能通过 12 h 的人体代谢恢复到  $40 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ 。

4.4 加压应采用匀速加压法，加压速率不大于  $0.01 \text{ MPa/min}$ 。

4.5 第一阶段加压的压力不应小于  $0.015 \text{ MPa}$ ，完成第一阶段加压后，应对舱室密封进行检查；如有泄漏，应将舱压减至常压，检查并修复泄漏后重新加压。

4.6 第二阶段采用 2%氧浓度的氮氧贫氧混合气，匀速加压至  $0.3 \text{ MPa}$ ，短暂停留对舱体及连接部件进行密封检查，确认舱体密封完好后，可继续加压至目标压力。

4.7 到达目标压力后应设置平衡周期，压力小于  $1 \text{ MPa}$ ，停留 2 h，压力大于  $1 \text{ MPa}$ ，停留 4 h。

4.8 加压后的舱室环境参数：

舱室压力	设定作业压力 $\pm 5 \text{ kPa}$
氧分压	$40 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$
氮分压	$< 380 \text{ kPa}$
二氧化碳分压	$< 0.6 \text{ kPa}$

## 5 减压方法和要求

5.1 减压方法为呼吸舱室氮氧混合气、控制舱室环境氧分压的等速减压法。

5.2 最终减压前，为使机体氮分压与居住环境氮分压达到平衡，应设置氮平衡周期，作业人员在居住压力下停留 12 h 后方可实施最终减压。

5.3 开始最终减压前，应先提升舱室氧分压至  $50 \text{ kPa}$ ，并在整个减压期间保持舱室氧分压在  $50 \text{ kPa} \pm 3 \text{ kPa}$ ，氮分压应控制在  $180 \sim 400 \text{ kPa}$ ，二氧化碳分压控制在不大于  $0.6 \text{ kPa}$ 。

5.4 按附录 B 表 B.1，减压速率按饱和压力分为四个不同的速率，第一压力段为  $1.2 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ，第二压力段为  $0.6 \sim 0.3 \text{ MPa}$ ，第三压力段为  $0.3 \sim 0.15 \text{ MPa}$ ，第四压力段为  $0.15 \sim 0 \text{ MPa}$ ；每个压力段采用不同的减压速率。

5.5 减压方案应按附录 B 表 1，依据实际饱和压力选择相应的减压速率。

5.6 减压期间，作业人员应保持个人卫生，适当活动，遵守作息制度，每天 22:00~次日 06:00 为非减压就寝时间；感觉不适时应立即报告；生命支持人员应定期观察并记录舱室各项环境参数，每小时检测一次舱室压力、氧浓度、二氧化碳浓度和温湿度等。

5.7 减压期间若作业人员出现减压病症状或疑似症状，应停止减压，按 JT/T 744 的相关要求呼吸相应氧浓度的治疗混合气体，待症状消失后按原减压方案继续；若减压结束后出现减压病症状或疑似症状，应按 JT/T744 的相应治疗方案处理。

5.8 作业人员减压出舱后，应在现场观察 24 h。

5.9 作业人员减压出舱后，若需搭乘飞行器或去高海拔地区，应按照 JT/T 909 的规定执行。

5.10 作业人员减压出舱后，48 h 内不应进行常规高压作业。

5.11 作业人员减压出舱后，进行下一次饱和和高气压作业的间隔时间应不小于上次饱和和高气压暴露时间的 50%或 10 天。

## 6 巡回作业的限制

- 6.1 不易向低于饱和压力巡回作业。
- 6.2 若遇特殊工况必须进行大于饱和压力的作业，最大向下巡回作业压力不应超过 0.05 MPa。

## 7 作业气体的配置和要求

### 7.1 基本要求

7.1.1 混合气配置应符合 JT/T 742 的相关要求。

### 7.2 舱室加压用气

7.2.1 采用 16%~20%氧浓度的富氧氮氧混合气，用于饱和居住舱、TUP 和人员穿梭舱的第一阶段加压。

7.2.2 采用 2%氧浓度、氮分压 180~400 kPa 的贫氧氮氧混合气，用于饱和居住舱、TUP 和人员穿梭舱的第二阶段加压。

7.2.3 舱室加压用气量的计算方法如式 (1)：

$$Q_1 = (V_1 + V_2 + V_3) \times P \times 110\% \times K \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- $Q_1$  —— 舱室加压用气量 ( $m^3$ )  
 $V_1$  —— 饱和居住舱容积 ( $m^3$ )  
 $V_2$  —— 人员穿梭舱容积 ( $m^3$ )  
 $V_3$  —— TUP容积 ( $m^3$ )  
 $P$  —— 相当于居住压力的相对压强 (atm)  
 $K$  —— 计算常数，通常  $K=2$

### 7.3 舱室操作气

7.3.1 舱室操作用气用于饱和居住舱、TUP 在饱和停留阶段和最终减压阶段、人员穿梭舱在转运途中压力维持、舱室和人闸内环境通风和压力维持、舱室应急加压、盾构人闸的加压等。

7.3.2 舱室操作气应满足在各使用深度时的氧分压 20~100 kPa、氮分压 160~320 kPa 的氮氧混合气。

7.3.3 在饱和居住阶段，饱和居住舱、TUP、人员穿梭舱在转运及盾构人闸加压过程中可采用作业呼吸气或 2%氧浓度的第二阶段加压气，在最终减压各深度阶段，应采用氧分压适宜的作业呼吸气、治疗气体或 2%氧浓度的第二阶段加压气体。

7.3.4 舱室操作气体的配置量除满足 JT/T 742 的要求外，还应加上人闸通道加压和盾构人闸加压及通风的用气量，计算方法如式 (2)：

$$Q_2 = (V_4 + V_5) \times P \times f \times M \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $Q_2$  —— 人闸及通道耗气量 ( $m^3$ )  
 $V_4$  —— 连接通道容积 ( $m^3$ )  
 $V_5$  —— 盾构人闸容积 ( $m^3$ )  
 $P$  —— 相当于居住压力的相对压强 (atm)  
 $f$  —— 每天对接次数  
 $M$  —— 饱和总天数

### 7.4 作业人员呼吸气体

7.4.1 饱和作业气体用于人员作业呼吸，也可用于盾构人闸、人员穿梭舱和连接通道的加压，以及人闸内环境清洗等。

7.4.2 该气体的氧分压应控制在 60 kPa，不低于 50 kPa，不超过 80 kPa；氮分压宜控制在 160~320 kPa，不应超过 400 kPa。作业人员呼吸气体的配置量应根据该次饱和作业深度及预估实际作业时间计算，计算方法如式如（3）：

$$Q_3 = q \times \frac{d+d_0}{d_0} \times t \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$Q_3$  —— 该次饱和作业所需的作业呼吸气量 ( $m^3$ )

$q$  —— 作业人员理论呼吸耗气量，单位为每分钟升 (L/min)，按 40 L/min 计

$d$  —— 作业压力 (MPa)

$d_0$  —— 大气压强相当的作业压力， $d_0 = 0.1$  MPa

$t$  —— 饱和作业总时间，单位为分钟 (min)

## 7.5 舱室应急呼吸气体

7.5.1 舱室应急呼吸气体用于舱室环境参数偏离设定数值过多，舱内人员必须通过内置式呼吸器呼吸应急气体的情况。

7.5.2 各阶段的舱室应急呼吸气体的氧分压应控制在 20~250 kPa，以 40~100 kPa 为宜；氮分压应控制在 160~400 kPa。

7.5.3 在饱和停留阶段可使用作业人员呼吸气体；在饱和加压和减压阶段，可使用适宜氮氧分压的氦氮氧呼吸气体或治疗气体。

7.5.4 应急呼吸气体的配置量应符合表 1 的要求。

表1 应急呼吸气体的配置量

饱和压力 (MPa)	基本储备量
1.2~1.0	75 $m^3$ /人
1.0~0.5	50 $m^3$ /人
0.5~0	30 $m^3$ /人

## 7.6 治疗气体

7.6.1 治疗气体用于饱和减压过程中或减压后发生减压病或疑似减压病的治疗。

7.6.2 各阶段的治疗气体的氧分压应控制在 160~260 kPa；氮分压宜控制在 120~320 kPa。

7.6.3 治疗气体的配置量应符合表 2 的要求。

表2 治疗气体配置量

饱和压力 (MPa)	气体种类	基本储备量
1.2~0.9	80/20 He-O <sub>2</sub>	30 $m^3$ /人
0.9~0.6	50/27/23 He-N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	30 $m^3$ /人
0.6~0.4	35/30/35 He-N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	20 $m^3$ /人
0.4~0.18	50/50 N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	15 $m^3$ /人
0.18~0	100% O <sub>2</sub>	10 $m^3$ /人

## 7.7 氧气

7.7.1 氧气除用于减压病的治疗外，还要用于饱和居住舱人员代谢耗氧补充、最终减压前的舱室氧分压调升、人员穿梭舱和盾构人闸内环境氧分压维持等。

7.7.2 在整个饱和作业中，氧气的储备量应不低于 100  $m^3$ /人。

## 7.8 人员穿梭舱的气体

7.8.1 为了控制人员穿梭舱压力、氧分压和二氧化碳浓度，应在穿梭舱转运的过程中配置相应外载气

体。

7.8.2 应配置用于穿梭舱舱室压力补充和人员应急呼吸的气体，最低配备量应满足3名转运人员在饱和压力下120 min的呼吸用气量，计算方法如式(4)：

$$Q_4 = q \times \frac{d+d_0}{d_0} \times t \times 3 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- Q<sub>4</sub> —— 该次穿梭舱转运所需的呼吸气量 (m<sup>3</sup>)
- q —— 作业人员理论呼吸耗气量，设为每分钟40升 (L/min)，
- d —— 饱和压力 (MPa)
- d<sub>0</sub> —— 大气压强相当的作业压力，d<sub>0</sub> = 0.1 MPa
- t —— 转运总时间，单位为分钟 (min)，t=120 min

7.8.3 穿梭舱应携带氧气，最低配备量按转运路程时间和转运人数计算，应满足不低于1 m<sup>3</sup>/h/人。

7.8.4 作业人员从盾构人闸进入盾构作业面、或从作业面回撤至人闸休息或在紧急状况下应急撤离时，应配备背负式穿梭气瓶。背负式穿梭气瓶灌装的呼吸气体应满足在作业压力的氧分压为50~80 kPa (适宜氧分压60 kPa)、氮分压为120~320 kPa，其余为氮气的氮氮氧混合气体。背负式穿梭气瓶的气体除应满足作业人员从人闸 (往返) 穿梭到盾构作业舱，且还应满足在应急状况下紧急撤离回到穿梭舱所需的呼吸气量，其最低配置量为每5 m路程满足在工作压力1 min的呼吸用气，计算方法如式(5)：

$$Q_5 = q \times \frac{d+d_0}{d_0} \times \frac{L}{5} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- Q<sub>5</sub> —— 背负式穿梭气瓶最低储气量 (m<sup>3</sup>)
- q —— 按40 L/min计 (L/min)
- L —— 路途距离 (m)

## 8 饱和作业最低气体储备

### 8.1 最低储备量要求

8.1.1 任何一种气体数量低于最低储备量时，应停止饱和作业，并开始最终减压。

8.1.2 当多种气体种类均适用于某种用途气体时，气体量可合并统计。

8.1.3 气体最低储备量应为有效供给量。

### 8.2 舱室应急加压气最低储备量

舱室应急加压气最低储备量的要求应满足将居住舱、TUP、穿梭舱从0 MPa加压至作业压力，计算方法如式(6)：

$$Q_6 = (V_1 + V_2 + V_3) \times \frac{d}{d_0} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- Q<sub>6</sub> —— 舱室应急加压气最低储备量，单位为立方米 (m<sup>3</sup>)

### 8.3 舱室应急呼吸气最低储备量

各种应急呼吸气最低储备量应满足在各自最大使用深度所有饱和作业人员呼吸120 min的需要，作业人员通气量按20 L/min计，计算方法如式(7)：

$$Q_7 = q \times \frac{D_1+d_0}{d_0} \times t_3 \times Y \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- Q<sub>7</sub> —— 舱室应急加压气最低储备量，单位为立方米 (m<sup>3</sup>)
- D<sub>1</sub> —— 该应急呼吸气的最大使用深度，单位为米 (m)

$t_3$  —— 饱和作业人员呼吸舱内应急气体时间，单位为分钟（min）， $t_3 = 120 \text{ min}$ ，

#### 8.4 穿梭舱载人运输过程中舱室操作气最低储备量

8.4.1 穿梭舱在实施载人转运过程中必须配置必要的应急舱室加压气体（不包括 5.8.2 规定的要求）。

8.4.2 最低应急加压气体量储备应满足将穿梭舱从 0m 加压到居住深度，计算方法如式（8）：

$$Q_8 = V_2 \times \frac{d}{d_0} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$Q_8$  —— 舱室应急加压气最低储备量，单位为立方米（ $\text{m}^3$ ）

## 附录 A (规范性)

### 建立氧分压的压力和加压至目标压力的混合气氮浓度的计算方法

#### A.1 最大允许氧分压值

根据最大作业压力及饱和居住人数，采用 2% 氧浓度的氮氮氧混合气为第二阶段加压气体加压后最大允许超出的氧分压值 ( $\Delta PPO_2$ )。

计算方法如式 (1)：

$$\Delta PPO_2 = \frac{0.03 \times 12 \times \text{饱和人数} \times 100}{\text{饱和舱室容积}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$\Delta PPO_2$  —— 最大允许超过的氧分压值，人体通过 12 h 代谢可降低的氧量，单位 (kPa)

0.03 —— 每人每时代谢消耗的氧量，单位 ( $m^3$ )

饱和人数 —— 饱和居住人员数

100 —— 压力巴 (Bar) 换算成 kPa

饱和舱室容积 —— 单位 ( $m^3$ )

#### A.2 第二阶段加压用混合气的氮浓度

第二阶段加压用 2% 氧浓度的氮氮氧混合气中的最大允许氮浓度值 ( $CN_2$ )。

计算方法如式 (2)：

$$CN_2 = \frac{\text{最大允许氮分压值} - \text{已有氮分压值}}{\text{最大作业压力值(绝对压 ata)}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$CN_2$  —— 最大允许氮浓度

最大允许氮分压值 —— 400 kPa

已有氮分压值 —— 79 kPa (常压下已存在饱和舱室中的氮分压值)

最大作业压力值 (绝对压) —— 单位 (MPa)

#### A.3 第一阶段加压建立初始氧分压的压力

按式 (1) 计算得出的  $\Delta PPO_2$  氧分压为基数，用含氧 16~20% 的氮氧混合气为第一阶段加压气体，计算出第一阶段加压压力。

计算方法如式 (3)：

$$P_1 = \frac{PPO_2 - 21 - 10(D_2 F_1)}{10(F_2 - F_1)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$P_1$  —— 第一阶段加压压力 (MPa)

$PPO_2$  —— 完成第一阶段加压后的氧分压 (kPa)

$D_2$  —— 饱和居住压力 (MPa)

$F_1$  —— 第二阶段加压混合气的氧浓度 (%)

$F_2$  —— 第一阶段加压混合气的氧浓度 (%)

#### 举例：

以氮氮氧饱和和高气压作业 1.20 MPa，氧分压 40 kPa，氮分压  $\leq 400$  kPa 为条件，饱和居住人员 6 人，饱和舱室总容积 (包括穿梭舱、TUP) 29 ( $m^3$ )，计算出建立初始氧分压的压力和加压至目标压力的混合气氮浓度。

1. 按式 (1) 计算出最大允许氧分压值 ( $\Delta PPO_2$ )：

$$\Delta PPO_2 = \frac{0.03 \times 12 \times \text{饱和人数} \times 100}{\text{饱和舱室容积}} = \frac{0.03 \times 12 \times 6 \times 100}{29} = 7.4 \text{ kPa}$$

通过计算,得出在第一阶段加压的基础上,第二阶段用2%氧浓度的氮氮氧混合气加压至目标压力后,舱室最大允许氧分压值( $PPO_2$ )为设定氧分压40 kPa加最大允许超出的氧分压值( $\Delta PPO_2$ )7.4 kPa,即40 kPa + 7.4 kPa = 47.4 kPa。

2. 以计算得出的 $\Delta PPO_2$ 氧分压为基数,用含氧16%的氮氧混合气为第一阶段加压气体,计算出第一阶段加压压力。

$$P1 = \frac{PPO_2 - 21 - 10(D2F1)}{10(F2 - F1)} = \frac{47.4 - 21 - 10(120 \times 2\%)}{10(16\% - 2\%)} = 1.7 \approx 2 \text{ (m)}$$

3. 以12MPa饱和压力,氮分压 $\leq 400$  kPa为条件,按式(2),计算出采用第二阶段加压的2%贫氧氮氮氧混合气中最大允许的氮浓度( $CN2$ )。

$$CN2 = \frac{\text{最大允许氮分压值} - \text{已有氮分压值}}{\text{最大作业压力值(绝对压ata)}} \times 100\% = \frac{400 - 79}{13} \times 100\% = 25\%$$

通过计算,第一阶段加压压力为0.02 MPa。即先用含氧16%的富氧氮氧混合气加压至0.02 MPa,然后再用含氧2%、氮25%和氮73%的贫氧氮氮氧混合气逐渐加压至1.2 MPa目标压力。

加压至1.2 MPa后,舱室气体参数指标为:氧分压47.4 kPa(12 h降至40 kPa  $\pm$  2 kPa);氮分压1200 kPa  $\times$  25% + 79 = 379 kPa。

## 附录 B

(规范性)

## 氮氮氧混合气饱和和高气压作业减压表

表B.1规定了氮氮氧混合气饱和和高气压作业各作业压力下的减压方案。

表 B.1 氮氮氧混合气饱和和高气压作业减压表

饱和压力 (MPa)	减压速率			
	减压速率 (min/10kPa 或 min/m)	每小时减压速率 (kPa)	24h 最大减压速率 (kPa)	舱内氧分压 (kPa)
1.2~0.6	45	13	270	50±3
0.59~0.3	55	11	200	50±3
0.29~0.15	70	8.5	160	50±3
0.14~0	90	6.5	120	

注1：每24 h不应超过表内最大减压速率。

注2：饱和压力小于0.15 MPa后，控制舱室氧浓度在20%~23%。