

## 真空管道交通生命保障系统参数选择及其人体生理基础\*

张耀平

(西京学院真空管道交通研究所,陕西 西安 710123)

**摘 要**:真空管道交通车辆将在封闭且抽成一定真空的低压环境中运行,车辆客舱是气密性壳体,为保证乘客生命安全、乘坐舒适和身体健康,客舱内通过生命保障系统与相应设备提供人体生存所需的气压、氧气和温湿度环境,同时排除二氧化碳和杂质,提供清洁的空气,保留合理比例的情性气体。合理的气压、适量的氧气和适当的温湿度之参数选择取决于人体相应的生理机能指标,真空管道交通客舱特征与运行环境,以及人体呼吸所产生的二氧化碳、水蒸气量,是确定吸收剂数量、净化器类型与净化方法的基础。基于航空航天医学理论基础与实践经验,开展真空管道交通人体生理研究将是一项重要的医学工程项目。

**关 键 词**:真空管道交通;客舱;生命保障系统;人体生理;减压症;缺氧反应

中图分类号:U14;TB7

文献标识码:A

文章编号:1002-0322(2015)03-0026-06

doi:10.13385/j.cnki.vacuum.2015.03.07

### Parameter and physiology basis of life support system of vacuum tube transportation

ZHANG Yao-ping

(Institute of Vacuum Tube Transportation, Xijing University, Xi'an 710123, China)

**Abstract**: Vehicles of vacuum tube transportation will run in a closed pipe where is pumped into vacuum, low air pressure. Passenger cabin is an airtight case and is installed with life support system for ensuring the safety, riding comfort and health, while eliminating carbon dioxide and impurities, providing clean air and retaining a reasonable proportion of inert gas, the life support systems and corresponding devices, right pressure, oxygen, temperature and humidity environment will be supplied for humans to survive. The appropriate parameter choice of reasonable pressure, the oxygen content, the temperature and humidity depend on the human body's physiology. The characterization and running environment, as well as the carbon dioxide content and water vapor generated by passengers respiratory, are base to determine the amount of absorbers, purifier types and purification methods. Based on the theoretical basis and practical experience of aerospace medicine, it would be an important medical project to carry the human physiology research on vacuum tube transportation.

**Key words**: vacuum tube transportation; passenger cabin; life support system; human physiology; decompression sickness; hypoxia response

真空管道高速磁浮交通是一种正在研究开发中的新型交通模式,低能耗、低碳排放、低污染、相对安全、建设和运营成本较低,初期运行速度 600~1000km/h,中期达到超音速,远期达到高超音速,使人类实现地面的太空旅行<sup>[1-3]</sup>。由于采用磁悬浮,消除了机械摩擦,所以速度能够大于轮轨高铁列车;又由于管道内抽成一定真空,形成低气压环境,消除了空气阻力,所以速度能够

大于飞机。真空管道车辆在低气压/真空环境中运行,用于承担客运任务的客舱必须是密封舱,需要配置适当的生命保障系统,确保客舱内部的气压、氧分压、温度、干湿度、空气清洁度等参数指标值适合乘客在旅行期间的人体生理需要;舱内空气中二氧化碳、一氧化碳、一氧化氮、异味气氛和气体流速等不超标,保证乘客身体健康和乘坐舒适。同时,氧气、氮气和其他情性气体配比要

收稿日期:2014-12-20

作者简介:张耀平(1969-),男,甘肃省天水市人,博士,副教授。

\* 基金项目:陕西省教育厅科研计划基金资助项目(14JK2167)

合理,不至于因氧分压过高使乘客发生高氧症或氧中毒,不形成火灾隐患。为降低车辆制造成本和运行成本,客舱内部气压应该不超过或略低于一个大气压,但要控制在保证乘客身体健康和乘坐舒适的范围。

虽然航空、航天、深海潜水、潜艇、避难硐室等领域的生命保障系统研究与应用相对成熟,但真空管道交通运行环境及车辆特征与上述领域不完全相同,在借鉴现有技术与研究成果之时,有必要对真空管道交通生命保障系统进行专门研究。

真空管道交通生命保障系统各项参数的选择取决于人体医学生理基础及相应数值指标,本文对真空管道高速磁浮交通生命保障系统相关的主要参数,如舱内气体压强、氧分压、温度、湿度、空气清洁度,二氧化碳、一氧化碳、一氧化氮、异味气氛和气体流速控制,以及惰性气体配比等,结合人体医学生理基础和现有相关领域——航空航天生命保障系统的研究成果和实践经验,进行研究与分析。

## 1 低气压对人体的影响与真空管道交通气密客舱气压选择

### 1.1 低气压对人体生理机能的影响

低气压对人体有四方面影响,即减压症、肠胃胀气、体液沸腾和肺损伤<sup>[4-6]</sup>。

#### (1)减压症

减压症是指由于环境压力降低,使溶解在肌体中的氮气过饱和游离出来,形成气泡所导致的综合症状。诱发减压症的外部环境因素有,环境压力低于某个值,或者环境压力降低过快。

根据航空航天医学实践经验和研究分析,安全减压的一般原则是:压力降低不超过一半时不会发生减压症,即当客舱压力从 101.3 kPa 下降到 50.7 kPa 时,相当于从海平面至 5500 m 以下的高度时,尚不足以因氮气过饱和和形成气泡而发生减压症,可认为是安全的。但也有少数人由于个体曾经受过伤,或关节有炎症等使肌体局部血液循环功能变差,使得氮气排出受阻而导致在低于 5500 m 的高度上出现减压症。一般在 6000~7000 m 高度上少数人会出现减压症,大多数人在 8000 m 以上高度时才发生减压症。

另外,客舱内环境压力降低过快会使体内氮气来不及排出到体外,从而形成气泡,只要减压速度适当,可避免此类减压症。

减压症症状主要有:皮肤型,主要表现为皮肤瘙痒、冷热感和蚁走感等,此症状为最轻的类型;关节型,又称屈肢痛,主要表现为手肘、肩膀、臀部、手腕、膝盖、脚跟疼痛,此类型占全部症状的 60~70%;呼吸型,主要表现为胸骨下不适、压迫感、干燥感、灼热感,甚至咳嗽、刺痛等,此类型发生率较低;中枢神经型,主要表现为头痛、神经麻痹、视觉机能障碍、肌肉抽搐,甚至发生减压性休克,此类型很少发生,但最为严重。

#### (2)肠胃胀气

当人体所处的外界环境压力下降时,胃肠内气体体积随之扩大,使胃肠壁受牵拉刺激,并波及邻近部位,故产生反射性痉挛和胃痛、腹痛,以及影响呼吸微循环功能。

#### (3)体液沸腾

任何液体的蒸汽压力与作用其表面的外界环境压力相等时,就会发生沸腾。在 19000 m 的高度,即当气压为 6.46 kPa 时,水沸腾的温度为 37.4 °C,而人和恒温动物的体温均为 37 °C,因此,当高度超过 19000 m 或气压低于 6.46 kPa 时,人体会发生体液沸腾。

达到体液沸腾的低压时,必然缺氧,即可引起循环停止,人体死亡。动物试验表明,在 19000 m 的高度上,狗的有效意识时间为 9~12 s,若停留时间少于 1.5 min,下降到安全高度后机能可以恢复;若停留时间超过 2~3 min,可造成死亡。与人比较,可得知人的救援允许暴露时间为 1.5~2.5 min,减压前吸氧排氮可降低此类损伤。

#### (4)肺损伤

当肺内气压与环境压力相差很大,肺内支气管、微气管会受到损伤。肺损伤的基本条件是:减压时间过短,如一般快速减压或爆炸减压,时间在几十毫秒至 1 秒之间;减压幅度过大,如减压前后的压差越大,对肺的损伤越严重;肺脏和呼吸道的机能状态欠佳,如肺容积越大,呼吸道越窄,越容易发生肺损伤。

### 1.2 人体对气压的承受范围以及真空管道交通客舱气压选择

当空气压力减小到很低时,人体内某些封闭腔和半封闭腔,如耳朵、肠胃,会产生疼痛感觉。压力的下降还会导致体液的沸点降低,气压低于 6.46 kPa 时,人的一切体液(血液、组织等)都会发生气化或产生气泡,浑身出现浮肿<sup>[3]</sup>。

民用航空经验表明,理想的飞机客舱压力制度是:从海平面到 2400 m 这一高度段内,舱内不增压。然后从 2400 m 一直飞行到高度上限,始终

保持 2400 m 高度上的对应压力,即舱内压力控制在 81.46~101.3 kPa 范围内。

结合上述分析,真空管道交通客舱内气压应采用高余压制度,具体范围选择如下:

(1) 理想气压范围,101.3~70.1 kPa,相当于海平面到 3000 m 高空,若管道内真空度 10 kPa,则余压为 91.3~60.1 kPa。

(2) 安全气压范围,70.1~50.7 kPa,相当于 3000 m 到 5500 m 高空,即舱内气压不低于 50.7 kPa 时,可认为对乘客是安全的。

(3) 允许气压范围,50.7~35.65 kPa,相当于 5500 m 到 8000 m 高空,在客舱失压或设备故障时,一定时间内允许气压下降到 35.65 kPa。

(4) 危险气压范围,35.65~6.46 kPa,相当于 8000 m 到 19000 m 高空,这时必须对客舱内加压,并采取紧急救援措施。

(5) 舱内低压阈值,6.46 kPa,相当于 19000 m 高空气压,低于此气压,无防护的乘客在客舱内则无生存可能。

## 2 人体缺氧反应与真空管道交通客舱氧气供给

### 2.1 人体与氧气

当人体不能吸入足够的氧气供细胞和组织使用时,就会发生缺氧反应。生理研究表明,人处在海拔 3000 m 以上空间环境,即气压低于 70.1 kPa,大气压力降低引起氧分压下降,导致吸入空气中的氧含量减少,造成缺氧综合征。

缺氧反应与外界环境低氧的程度有关,一般可划分为 5 个缺氧反应区域:

(1) 无反应区(相当于海拔 0~1500 m),即 101~84 kPa,这时人体无任何缺氧反应,当环境气压为 84kPa 时,人体气管气氧分压为 16.4 kPa。

(2) 工效保证区(相当于海拔 <3000 m),即 84~70.11 kPa,这时人的适应能力明显下降,但无缺氧症状,大脑思维与工作效率不受影响。

(3) 工效允许区(相当于海拔 <4000 m),即 70.11~61.65 kPa,这时生理反应虽然无明显改变,但呼吸循环系统的负担增加,代偿功能增强,部分人有轻度缺氧反应,各种症状的发生率增加。

(4) 缺氧耐限区(相当于海拔 <5000 m),即 61.65~54.04 kPa,这时人的各种症状加剧,工效明显降低,缺氧反应明显,为人体难以耐受的生理界限值,少数人发生呼吸循环代偿障碍,但不危及生命安全。

(5) 缺氧极限区(相当于海拔 7000~7500 m),即 41.1~38 kPa,这时会达到缺氧的生理极限,人出现意识障碍,甚至意识丧失。

人暴露于缺氧环境后能保持有意识活动的时间称为有效意识时间,即能采取自救措施的时间,在 41.1 kPa 低压环境时为 7~27 min,在 38kPa 低压环境时为 2~10 min,在 7.56 kPa 低压环境时为 12~15 s,近真空环境只有不足 10 s 时间。

人暴露于严重缺氧环境中时,为避免丧失意识,加压供氧允许延误的时间,称为安全暴露时间。减压后人的意识时间取决于肺-脑循环和脑部缺氧可维持正常功能的时间,即脑组织备用时间。这个时间只有 5~6 s。根据动物试验估测,在 0.25~0.5 kPa 低压环境中,缺氧动物总救生时间为 150 s;推算到人,必须在 90 s 内复压并得到救治,人才能有生还可能。

高氧是指乘员舱中的氧分压或氧浓度远远超过海平面大气水平的情况,高氧生理反应称为高氧症,严重者称为氧中毒。最常见的轻反应有暴露部位粘膜刺激症状,可引起口干、喉痛、鼻出血、眼角膜充血、红细胞减少、咳嗽和组织病变等。

### 2.2 真空管道交通客舱氧气供给

氧气的消耗量与乘客新陈代谢的快慢有关,一般取 0.022~0.066 kg/(人·h),平均取 0.038 kg/(人·h)<sup>[7]</sup>。若按人体产生 116.3 W 的热量计算,供氧量必须保证 0.03 kg/(人·h)，“水星”号飞船即采用此标准。密封舱的供氧源有压缩气氧、液态氧、高氧化合物贮氧及再生氧,采用哪种氧源取决于旅行时间长短、乘客数量以及漏气量等因素。

真空管道交通气密客舱供氧量可参照现有航天密封舱的相关标准。如客舱载客 6 人,全程运行时间 3 h,氧气瓶携带氧气量应不小于 0.54 kg;如载客 20 人,全程运行时间 5 h,则氧气携带量应大于 3 kg。除了基本氧气消耗量,还应考虑密封舱的漏气损失,适当增加氧气储备余量。

当按氧气体积流量设计真空管道车辆客舱内氧气供应量时,可参照顾靖华等人在“某型救生钟生命支持系统性能人体试验”中得出的结论,即每人 25 L/h 提供氧气<sup>[8]</sup>。

为了安全,除备有正常供氧气瓶外,还应配备应急供氧设备。可采用现代客机常用的旅客化学氧气系统为真空管道乘客提供应急供氧,这种

化学氧气系统由氧气发生器、氧气面罩和软管、氧气分配装置及电器控制线路组成。氧气发生器是一种固态化学产氧装置,氯酸钠( $\text{NaClO}_3$ )芯体在雷管起爆后发生化学反应产生氧气。氧气面罩上装有吸气和呼气活门,并附有贮气袋、软管和拉火索。当客舱失压时,氧气面罩弹射开关打开,门锁机构打开氧气组件门,氧气面罩脱落,乘客向面部用力拉动面罩,施加在拉火索上的外力拔出氧气发生器点火销,使雷管起爆,化学氧芯起燃后几秒内产生氧气,经氧气发生器内的过滤罩过滤后,氧气流到氧气出口,经过软管,纯氧进入储气袋再到面罩。

### 3 舱内温湿度环境控制及其生理基础

真空管道交通车辆客舱的气候环境必须是受控的,其各参数的选择必须在人体的舒适范围内。有限空间气候环境参数除压力外,主要指舱内空气温度、湿度、舱壁温度和风速,以及它们的综合指标,如有效温度、三球温度等。

#### 3.1 舱内温度与人体生理基础

真空管道车辆客舱的热源主要来自乘客的代谢产热、舱内设备工作产热、舱外磁悬浮运行系统产热和气动热。四种热源的产热率是不断变化的,航天医学工程研究表明,人在睡眠时的产热率大约  $80 \text{ W/人}$ ,运动时可达到  $300 \text{ W/人}$ 。因此真空管道车辆内部环境控制系统应具有排热、排水汽和适当通风的功能考虑,使乘客处于舒适状态。据以设计车辆生命保障系统的乘客个体产热量参数可按  $80\sim 300 \text{ W/人}$  取值。

参照飞机客舱的温度设计标准,为保证旅客的舒适,真空管道车辆客舱内空气温度应该控制在  $15\sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内,对于大多数乘客,最适宜的温度范围是  $20\sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,舱内任意两点的温度差不超过  $3\sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,舱内壁表面与空气之间的温度差应该  $\leq 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2 舱内湿度与人体生理基础

较理想的客舱内相对湿度范围是  $30\sim 70\%$ ,根据舒适度要求,最好控制在  $50\%$  左右。飞机在高空飞行时,外界大气十分干燥,会使人感到不舒适,眼、鼻、喉可能因干燥而感到不适,但客舱内乘客较多,乘客呼出的水蒸气会使客舱内保持一定的相对湿度,因此不需要加湿。同样,真空管道车辆内部乘客密集,呼出的水蒸气能使车辆内部湿度增加,不会产生干燥问题,因此也不需要

加湿。

飞机低空飞行或地面滑行时,由于大气湿度大,舱内会出现湿度过大的情况,为解决这个问题,现代飞机空调系统中都加装了水分离器除湿装置。真空管道交通车辆车内乘客排汗和呼吸会使舱内空气湿度增加,因此需要考虑采用具有水分离功能的空调系统。每人每小时所呼出的水蒸气量为  $0.08\sim 0.136 \text{ kg/(人}\cdot\text{h)}$ ,舱内湿度太大,会影响乘客舒适感。

#### 3.3 真空管道交通客舱温湿度控制

飞机客舱加湿除了采用电加热外,还会利用发动机废气热或者汽油燃烧对客舱空气加湿。真空管道交通车辆由直线电机驱动,不需要任何燃油,因此没有可以利用的发动机废气热,也不能通过燃烧油料加湿,只能依靠携带的蓄电池进行电加热。

真空管道线路铺设在地表或浅埋在地下,环境温度不会太高或太低。由于管道是密封结构,管道内抽成真空,保温问题容易解决。且车辆自身会散热,运行时会产生气动热,暴露在太阳光下的管道线路会吸收辐射热。因此,真空管道交通客舱的加湿要求较低,技术相对简单,而制冷要求高,比较复杂。

根据座舱和设备冷却的需要,飞机空调主要采用空气循环制冷和蒸发循环制冷。空气循环制冷系统利用高压气源供来的空气,通过冷却涡轮,在涡轮中膨胀做功,使空气本身的温度和压力大大降低。这种制冷方法在飞机上得到广泛应用,但显然不适合真空管道交通客舱制冷,因为真空管道交通车辆没有可以利用的高压气源。蒸发循环制冷是利用液态制冷剂的汽化过程吸收空气中的热量,在空气供入座舱之前大幅度地降低空气的温度。这种方法可用于真空管道交通客舱空调制冷,此外,热电制冷、涡流管制冷和半导体制冷等,都可作为真空管道交通客舱制冷的技术。

除湿的方法较多,如化学除湿法、蒸发循环制冷除湿法、空气循环系统低压除水、空气循环系统高压除水等,都可用于真空管道交通客舱除湿。最简单的方法是使气流流过散热器,由于气流温度降低,其中所含水汽就会冷凝成水滴,被散热器出口处的海绵吸收。海绵吸收的水汽可通过机械方法周期性挤压排出。湿气还可通过化学除湿剂或通过硅酸凝胶分子筛吸收。这些除湿方法在清除空气中水分的同时,还能清除其他杂质,起到清洁空气的作用。

舱内气流速度会影响乘客舒适感,参照客机的设计标准,真空管道车辆内部的空气流速应为 0.2~0.5 m/s,以避免人体裸露部分有冷的感觉。

#### 4 舱内空气清洁度参数的生理基础

真空管道交通车辆内部空气清洁度与人体新陈代谢和呼吸排出的气体,如二氧化碳、水蒸气、异味等有关。供应给客舱的空气应该是不含异味的清洁气体,为满足这个要求,一般飞机上在座舱供气管路进入座舱前加装空气过滤器。现代飞机大多用发动机压气机作为座舱增压供气源,气体来自大气,供出的气体是清洁的,可满足座舱的要求。对于真空管道交通,没有充足的清洁气源置换舱内的不新鲜空气,因此要通过空气净化装置来吸收不新鲜空气,供出清洁无异味的空气。

座舱空气中的有害杂质对人体安全及舒适有直接影响,因此,参照飞机生命保障系统设计标准,可对真空管道交通车辆内部有害杂质的浓度提出如下要求:

- 燃料(汽油和煤油)的蒸气浓度 $\leq 0.3$  mg/L
- 燃料和润滑油分解出的杂质浓度 $\leq 0.0002$  mg/L
- 一氧化碳浓度 $\leq 0.02$  mg/L
- 一氧化氮浓度 $\leq 0.005$  mg/L
- 二氧化碳浓度 $\leq 36$  mg/L,即相当于其分压为 2.0 kPa(15 mmHg)之安全值,也即其体积分数最好小于 0.1%。

二氧化碳是人体代谢产物,成人在平静状态时每小时大约呼出二氧化碳 15 L,运动时呼出量更大,通常情况下 17 L/h,设计时取 24 L/h。若真空管道车辆舱内净化装置停止工作或失灵,舱内二氧化碳分压会不断上升,对乘客身体健康造成威胁,因此制定舱内二氧化碳允许标准并采取必要措施防止二氧化碳分压超标,是真空管道交通车辆生命保障系统设计必须重视的问题。

美国阿波罗乘员舱规定二氧化碳分压的最佳水平是 $\leq 0.5$  kPa,最大容许 1.01 kPa,应急容许 2.0 kPa。美国 NASA-STD-3000 规定,空间站正常运行时,乘员舱内二氧化碳分压 $\leq 0.4$  kPa,90 天降格运行的标准是 1.01 kPa,28 天应急标准为 1.2 kPa。俄罗斯国家标准规定,飞行时间 1 个月,二氧化碳分压 $\leq 1.33$  kPa,30~180 昼夜 $\leq 1.04$  kPa,180 天以上 $\leq 0.79$  kPa。比照以上参数,真空管道交通车辆客舱内二氧化碳分压标准建议取值 $\leq$

0.5 kPa,最大容许 1 kPa。

在安静或轻度劳动状态下,人体吸收二氧化碳的体积分数即使达到 1%,也可耐受较长时间。为了使二氧化碳的体积分数保持在 1%以下,最简单有效的方法是用碱石灰。每人每天需要 3 kg 的碱石灰,即可吸收 1 kg 的二氧化碳。若用氢氧化锂(LiOH)则用量较少,LiOH 吸收比大<sup>[6]</sup>,在计算需要量时一般取效率为 75%。“阿波罗”号飞船中使用 LiOH 吸收 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 吸收筒里的 LiOH 每 12 h 更换一次,每人每天消耗 LiOH 1.2 kg。

利用 Ag<sub>2</sub>O 分子筛再生装置可将 CO<sub>2</sub> 中的氧分离出来,以备循环使用。其他绿色植物,特别是小球藻等绿藻类植物,也能吸收 CO<sub>2</sub> 并放出氧气。

肠胃、人体汗腺及皮脂腺的分泌物通常会产有害气和异味,采用活性炭作为吸收剂是最简单的方法。

上述经验与方法,都可为真空管道交通客舱内空气清洁提供借鉴。

#### 5 结论

根据以上分析,就真空管道交通生命保障系统参数选择以及人体医学生理基础相关问题,可得出初步结论和建议如下:

(1)当气压低于 35.65 kPa 时,相当于 8000 m 高空以上的气压,人体会发生减压症;当气压低于 6.46 kPa 时,相当于 19000 m 高空气压,人体会发生肠胃胀气、体液沸腾和肺损伤,严重危及生命。真空管道车辆客舱内部的理想气压为 101.3~70.1 kPa,允许的最低气压为 35.65 kPa。

(2)当气压低于 70.1 kPa,大气压力降低引起氧分压下降,导致人体吸入空气中的氧含量减少,造成缺氧综合征。因此当真空管道客舱中气压低于 70.1 kPa 时,应该补充氧气,提高氧分压水平。真空管道交通客舱将是一个封闭环境,需要安装专门的供氧设备和通风供气系统。可采用的供氧源有压缩气氧、液态氧、高氧化合物贮氧及再生氧,供氧量按 0.038 kg/(人·h)计算,另外应该配备应急使用的固态化学产氧装置和供乘客个体使用的氧气面罩。

(3)人体代谢、舱内设备、舱外磁悬浮运行系统和气动摩擦均会产生热,其中人在睡眠时的产热率大约 80 W/人,运动时可达 300 W/人。为保证旅客乘坐舒适,真空管道车辆客舱内空气温度应该控制在 15~26 °C 范围内,对于大多数乘客,最适宜的温度范围是 20~22 °C,舱内任意两点的

温度差不超过 3~5 °C,舱内壁表面与空气之间的温度差应该 $\leq 3$  °C。乘客排汗和呼气会使客舱内空气湿度增加,每人每小时所呼出的水蒸气量为 0.08~0.136 kg/(人·h),舱内湿度太大,会影响乘客舒适感,因此需要考虑采用具有水分离功能的空调系统。

(4)通常情况下,成人每小时大约呼出二氧化碳 17L,真空管道交通环境控制设计时取 24L/h。人体吸收二氧化碳的体积分数在小于 1%,可耐受较长时间。真空管道交通车辆客舱内二氧化碳分压标准建议取值 $\leq 0.5$  kPa,最大容许 1 kPa。可采用氢氧化锂(LiOH)吸收 CO<sub>2</sub>,根据 LiOH 吸收 CO<sub>2</sub>的水平,初步设计时可按 0.05 kg/(人·h) LiOH 需要量进行计算。客舱内产生的有害气体和异味,亦可采用含有活性炭的空气净化装置或凝聚等方法进行吸收和净化。

真空管道交通将是未来重要的地面交通方式,其客舱是封闭或半封闭气密舱,必须有适当的生命保障系统来保证乘客生命安全和身体健康,生命保障系统各项参数的选择取决于人体生理医学基础。结合人体生理医学的基础理论,以及航天医学经验,开展真空管道交通医学研究,是一项重要的理论与实践课题。

## 参考文献

- [1] 张耀平.京沪高速轨道交通:让 ETT 平息轮轨与磁悬浮之争[J].中国软科学,2003(3):152-155.
- [2] Zhang Y P, Li Y Y. Role and position of ETT in the future comprehensive transportation system [C]. The American Society of Civil Engineers, ASCE 2007: 2796-2803.
- [3] Oster D, Kumada M, Zhang Y P. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo [J]. Journal of Modern Transportation, 2011,19(1):42-50.
- [4] 朱春玲.飞行器环境控制与安全救生[M].北京航空航天大学出版社,2006:12-17.
- [5] 昂海松,童明波,余雄庆.航空航天概论[M].科学出版社,2008:181.
- [6] 沈学夫,付岚,邓一后.飞船环境控制与生命保障系统[J].航天医学与医学工程,2003,16:543-549.
- [7] Secord T C, Bonura M S. Life support systems data from sixty-two days of testing in a manned space laboratory simulator[J]. J. Spacecraft, 1966,3(10):1527-1533.
- [8] 顾靖华,金凤来,陈海庭等.某型救生钟生命支持系统性能人体试验[J].海军医学杂志,2007,28(3):198-210.

# 《真空<sup>®</sup>》

(1964年创刊 双月刊 核心期刊)

《真空》杂志创刊于 1964 年,由沈阳真空技术研究所主办,沈阳真空杂志社编辑出版,国内外公开发行人,刊载理论与实践并重的真空技术及应用方面的论文,内容涉及真空获得、真空测量、真空应用各个领域及其相关的科研论文、动态综述、新产品新技术等。《真空》杂志是国家级刊物,被选为中国科技核心期刊、中文核心期刊,中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊及美国化学文摘(CA)收录期刊等。50 多年来在我国真空界享有盛名,颇受广大读者欢迎,为我国真空企业界首选技术刊物。

地 址 :辽宁省沈阳市沈河区万柳塘路 2 号  
电 话 :024-24121929 24110136 24134406  
邮 箱 :zkzk1964@126.com

邮 编 :110042  
传 真 :024-24121929 24110136  
网 址 :www.vacjour.com 真空杂志.com

欢迎投稿,欢迎订阅,欢迎惠登广告!