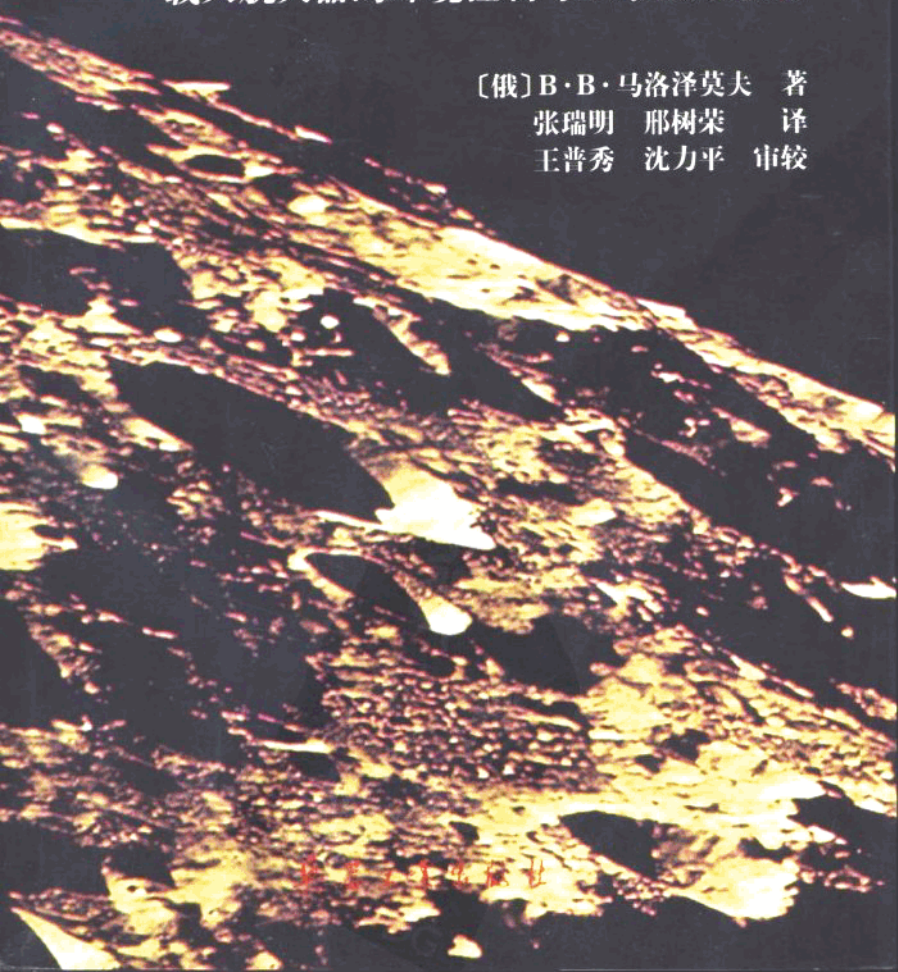


航天员生存的奥秘

——载人航天器的环境控制与生命保障系统

[俄] B·B·马洛泽莫夫 著
张瑞明 邢树荣 译
王普秀 沈力平 审校



北京人民邮电出版社

航天员生存的奥秘

——载人航天器的环境控制与生命保障系统

[俄]B·B·马洛泽莫夫 著

张瑞明 邢树荣 译

王普秀 沈力平 审校

64123

兵器工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

航天员生存的奥秘:载人航天器的环境控制与生命保障系统/[俄]马洛泽莫夫著;张瑞明,邢树荣译.-北京:兵器工业出版社,1999.12

ISBN 7-80132-654-7

I.航… II.①马… ②张… ③邢… III.①载人航天器-座舱环境控制系统②载人航天器-保障装置 IV.V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 73333 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:何保武

责任技编:燕丽

社址:100089 北京市海淀区车道沟10号

经销:各地新华书店

印刷:航天三院印刷厂

版次:1999年12月第1版第1次印刷

印数:1—1000

封面设计:底晓娟

责任校对:郭芳

责任印制:王京华

开本:850×1168 1/32

印张:6.375

字数:165.64千字

定价:13.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

内 容 简 介

俄罗斯和美国发展了一系列载人航天器,我国也在向这一目标迈进。由俄罗斯航天环境控制与生命保障系统科研和教学专家马洛泽莫夫编写、张瑞明和邢树荣翻译的《航天员生存的奥秘》,详细地介绍了载人航天器确保航天员安全、健康、高效工作和生活的要求,以及实现途径,阐述了航天器环境控制与生命保障系统的功能、组成、原理和工作模式。阅读本书可对航天员在航天器中的生存奥秘有一个全面的了解。本书适合于航天器以及相关领域环境控制与生命保障系统的科研设计人员、高校相关专业师生及航天爱好者阅读。

序

环境控制与生命保障分系统(简称环控生保系统)是载人航天器最具载人航天特色的一个重要系统,是航天员生存奥秘之所在。其功能是创造飞行器座舱内部适合于人生存的基本环境,提供必需的生活支持设施,以确保航天员在整个飞行过程中安全生活和工作。俄罗斯和美国在长期的载人航天活动中发展了飞船、航天飞机、空间试验室和空间站等几个系列的载人航天器,在环控生保技术方面积累了十分丰富的经验,但国内关于这方面系统性的译著并不多见。俄罗斯莫斯科航空学院B·B·马洛泽莫夫(B·B·Малоземов)教授是一位长期从事航天环控生保系统科研和教学的专家,并在其多年的教学活动中编写了一套有关环控生保系统的完整讲义。在征得B·B·马洛泽莫夫教授的同意并取得授权后,我们将此俄文著作翻译成中文,介绍给国内读者。

本书系统地分析了载人航天条件下维持乘员生命活动,确保乘员安全、健康、高效工作和生活所必需的各种保障要求及其实现的技术途径,详细地阐述了航天器环控生保系统的功能、组成、原理和工作模式,并介绍了若

千载人航天器实际装备的环控生保系统装置,从中可以获得对于航天环控生保系统及俄罗斯这一技术领域较为系统和全面的了解。本书适用于从事载人航天器总体和环控生保系统研究的专业人员,也可以供高等院校航天相关专业的师生教学参考,对于从事其它领域的环控生保技术研究的人员也有一定的参考价值。

本书翻译整理过程中得到了刘新民、李军、郑传先、张文正、黄伟芬的指导、帮助和支持,刘述运同志对全书作了校对,在此一并表示感谢。

译 者
1999年8月

目 录

第 1 篇 航天器乘员居住环境再生系统

第 1 章 人和周围环境的物质交换	(1)
1.1 人消耗和排泄的特点	(1)
1.2 经过肺、肠道和皮肤的气体排泄.....	(4)
1.3 液体状和粘稠状废物	(5)
1.4 与人体物质交换无关的生活废物	(6)
1.5 气体环境成分和压力的选择原则	(7)
1.6 气体环境的火灾危险.....	(10)
1.7 乘员的营养平衡保障.....	(11)
第 2 章 环境再生系统的组成及一般特性	(13)
2.1 再生系统的分类.....	(14)
2.2 系统的组成.....	(14)
2.3 不同闭合率的环境再生系统的构成.....	(16)
2.4 环境再生系统类型选择的原则.....	(17)
第 3 章 气体保障系统	(21)
3.1 通风系统.....	(21)
3.1.1 通风量的确定.....	(22)
3.1.2 考虑浓度场的不均匀性时确定通风量.....	(24)
3.1.3 飞船舱段之间组分的转移.....	(25)

3.1.4	舱内气体介质的更换·····	(29)
3.2	储存式气体成分保障系统·····	(31)
3.2.1	储存气态氧的气体成分保障·····	(31)
3.2.2	化合氧气体成分储存保障系统·····	(35)
3.3	用电解水法制氧的大气成分保障系统·····	(38)
第4章	水和食品保障系统 ·····	(43)
4.1	储备式的水和食品保障系统·····	(43)
4.2	从大气冷凝水中再生水·····	(45)
4.3	低温蒸馏法再生水·····	(47)
第5章	乘员的卫生保健 ·····	(52)
第6章	航天员个体生命保障系统 ·····	(57)
6.1	航天服的构造·····	(57)
6.1.1	航天服的外罩·····	(57)
6.1.2	活动性的保证·····	(61)
6.1.3	航天服的头盔·····	(65)
6.2	航天服的通风·····	(66)
6.3	水冷服·····	(70)
6.4	舱内航天服·····	(71)
6.5	舱外航天服·····	(72)
6.5.1	软式航天服·····	(72)
6.5.2	混合式航天服·····	(74)

第 2 篇 热工况保障系统

第 7 章 航天器座舱和气密舱的热工况保障	(77)
7.1 热工况保障系统的功能	(77)
7.2 热工况保障的方法	(80)
7.3 热工况保障系统的分类	(81)
7.4 对热工况保障系统和热工参数的要求	(84)
7.4.1 一般要求	(84)
7.4.2 专门要求	(84)
7.4.3 对气密舱居住环境的热技术要求	(85)
7.4.4 对仪器舱和专用舱的热技术要求	(86)
第 8 章 内部热源	(88)
8.1 乘员的热工况	(88)
8.2 乘员热工况的数学模型	(90)
8.3 设备发热	(94)
第 9 章 外部热源	(98)
9.1 外部热源的特点和主要计算任务	(98)
9.2 航天器外部热交换的数学模型	(102)
9.3 航天器外部热交换的自动计算	(107)
第 10 章 防热型的热防护子系统	(113)
10.1 采用温度调节覆面层的热防护子系统	(113)
10.2 采用多屏真空绝热的热防护子系统	(118)
10.3 采用均质绝热的热防护子系统	(121)

第 11 章	利用对流冷却的散热型热防护子系统	(130)
第 12 章	温度调节子系统	(141)
12.1	辐射热交换器表面积的评价	(141)
12.2	对流式温度调节子系统	(146)
12.3	具有制冷剂物态变化的开放式温度调节 子系统	(154)
12.4	具有制冷剂物态变化的闭合式子系统	(160)
第 13 章	通风保障子系统	(167)
13.1	送气通风流	(167)
13.2	供气和排气的方法	(175)
13.3	气密座舱通风的配置	(180)

第1篇 航天器乘员居住环境再生系统

第1章 人和周围环境的物质交换

人在地球上的生命活动,实质是人体与周围环境进行物质、能量、信息交换的过程。由于我们所处的地球大气生物圈的保障,这些过程是自发的顺利进行的。而当航天员乘坐载人航天器(宇宙飞船、航天飞机、空间站等)在远离地球的外层空间飞行时(外层空间一般指距地球表面 100km 以上的空间),其生命活动过程是靠什么技术手段来保障的呢?这就涉及到载人航天器诸多系统中的一个重要系统——生活保障系统。

生活保障系统是保障人同周围环境的物质、能量和信息交换,使人免受飞行中或周围环境中产生的不利因素影响的综合技术设施。航天员居住环境再生系统是用来恢复环境的成分和性质,并保障乘员同环境的物质交换。

1.1 人消耗和排泄的特点

人在生命活动过程中,一昼夜要消耗氧气 0.9kg,消耗饮用水和食品中含有的水 2.5kg,以及主要成分为蛋白质、脂肪和碳水化合物(干物质)0.6kg。人与周围环境的物质交换和能量交换的生命保障系统的组成见图 1-1。

人体内进行的生化反应使营养成分氧化,放出能量,用以维持

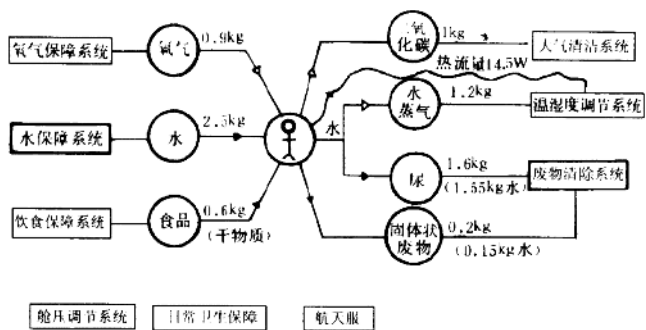
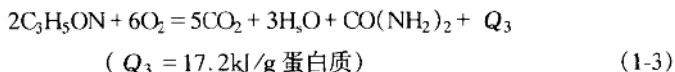
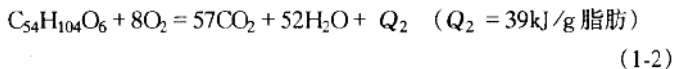
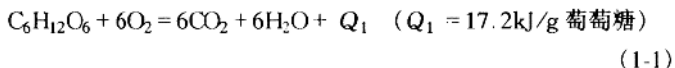


图 1-1 人与周围环境的物质交换和能量交换的生命保障系统的组成

生命活动和人体做机械功(12.5MJ/每昼夜)。例如:葡萄糖、脂肪(甘油三油酸脂)和蛋白质(氨基酸)的氧化反应是以下的总和反应:



CO₂ 和水是人体内反应的主要产物。蛋白质(氨基酸)的氧化生成了有机脲[CO(NH₂)₂]。水还被用来洗手、洗脸和洗澡(淋浴)等日常卫生。这种卫生用水一昼夜的最小需求量是 4.3L。比如,在一周内每人约消耗 20L 的洗脸和洗手用水,约 10L 的淋浴用水。

很显然,人所消耗的物质成分和形成的排泄物的质量是相等

的。在生命活动过程中,化学元素和化学物质要进行相间的重新分配。 CO_2 和水蒸气属于气相。对于气相而言,呼吸商 a_R 是个重要的指标。呼吸商 a_R 是指排出的二氧化碳气体的体积和消耗的氧气体积之比,即

$$a_R = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{O}_2}} \quad (1-4)$$

a_R 的数值为0.80~0.85,取决于人的口粮配比。

在(1-1~1-3)式的反应过程中生成了所谓的代谢水,它与所消耗的水一起从机体内排出,因此,排泄出的水的总量要比消耗的水多0.3kg,而排泄出的粘稠状废物的总量比消耗的食物少0.4kg。

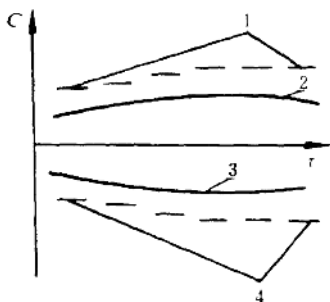


图1-2 人体与周围环境气体交换函数的特点

- 1—呼吸时的氧气消耗 2—经过皮肤的氧气消耗 3—经过皮肤的气体排泄
4—呼吸时的气体排泄

应该强调指出,人体环境的物质交换基本上是不连续的,在数学上描述成分段连续的有界函数,见图1-2和1-3。

呼吸时的气体交换,因为在呼气和吸气之间有2~4s的时间间隙,所以相对于座舱的容积,可以用连续的有限函数来近似。但采用氧气面具的呼吸是个例外,在呼吸气体交换系统中不得不考虑到消耗和排泄函数的分段特性,并安装“肺式呼吸器”来保证间断的供氧和排出呼出的气体。

气体、水蒸气经过皮肤的消耗和排泄是连续进行的,其数量是呼吸气体交换量的1%~23%,大小取决于体力负荷。

人的新陈代谢产物中,有400余种化合物。

生命活动保障系统本身,也是一个废物源。这些废物包括食物残渣、包装材料、擦拭材料、内衣、睡袋衬套以及用废的吸附剂、催化剂和过滤器等。

1.2 经过肺、肠道和皮肤的气体排泄

呼出的气体中主要是二氧化碳和水蒸气。其它微量气体每昼夜的排出量是:一氧化碳0.42mg、丙酮27mg、醋酸21mg、乙醇150mg、甲醛10mg、甲醇3mg、硫化氢10mg、氮氧化物13mg、甲烷30mg,以及其它一系列的自生的微量杂质。除此之外,皮肤和衬衣表面的微生物也释放气体。

肠道气体主要是由于大肠内微生物活动而引起蛋白质腐烂和碳氢化合物发酵而产生的。每昼夜肠胃产生7~10L肠道气体,其大部分渗入血管,然后从肺排出,而剩余的约1~0.5L气体直接排放进座舱大气里。排出气体主要成分的体积百分比是:氮40%~90%,氢、甲烷0%~30%,二氧化碳1.2%~15%,氧气0%~15%,硫化氢0.0017%。

皮肤通过出汗的形式(汗气)向外排泄。每昼夜平均出汗

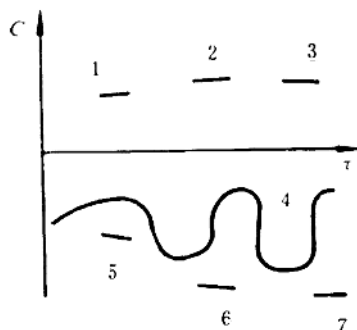


图1-3 水交换的特点

1,2,3—准备食物、洗餐具和日常卫生的耗水量 4,5,6,7—汗液、尿、生活用水和日常卫生等形成的废水量

0.6L。排汗量取决于体力负荷,如短时间重强度的工作(能耗 580~760W),每分钟排汗量达 60~70mL,可用下列经验公式来评价乘员的发汗量:

$$G_n = 6.0 + 2V_n \quad (1-5)$$

式中 G_n ——排汗流失的水分, g/h;

V_n ——肺的换气量, L/min。

经过皮肤排出约 270 种化合物,包括脲、磷酸盐、氮、氯化钠。平均每昼夜从人身上落在内衣和座舱大气中的干燥皮肤(表皮)为 0.6g。

皮脂腺分泌的皮脂落到内衣上或在日常卫生活动中被洗掉。皮脂分泌的速度是每昼夜大约 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

1.3 液体状和粘稠状废物

正常情况下人每昼夜的排尿量为 1.2~1.5L,其量的大小取决于周围气体环境的温度、湿度和人的体力负荷。尿中已发现有 180 种化合物。化合物、混合物的浓度很大,其质量百分比达 5%。

健康人的尿中不含有机械杂质。尿中溶解有大约 200 种有机化合物和无机化合物。有机化合物的数量每昼夜波动的范围是 22~46g,其中脲是每昼夜 20~35g;无机物每昼夜的排泄量是 12~25g,其中氯化物为每昼夜 10~15g。

人体排出的尿是无菌的,但它是微生物的“营养液”。微生物把脲分解为碳酸铵。碳酸铵在尿中的脲酶作用下分解成无机物:



新鲜的尿通常是弱酸性的($\text{pH} = 4.5$),由于发酵而产生的碳酸铵使尿碱化, pH 值变到 8.4,并形成钙和镁的磷酸盐沉淀,如 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_2$, MgNH_4PO_4 。此外,尿酸及其它化合物也可能形成沉淀。

每周大约消耗 30L 的水用来洗脸、洗手和淋浴,洗涤剂是其

中的主要杂质。“和平号”轨道站上 КАТАМИН АБ(译注:一种洗涤剂)的含量是 (300 ± 50) mg/L, 皮脂是 $10 \sim 30$ mg/L, 此外还包括有氯化物、脉、表皮鳞片、头发及其它固体污染物。其可氧化度为 $1400 \sim 2000$ mgO₂/L。

从质量方面讲粪便是主要的粘稠状排泄物。其质量取决于饮食形式:对于复合饮食,粪便平均干质量为每昼夜 60g;对于蔬菜饮食每昼夜 75g;对于肉类饮食每昼夜 30g。

粪便中大约有 200 种元素和化合物,水占 75%。粪便中含有大量的从肠道中来的微生物,其质量可占干残渣的 8%,不过 95% 是死的。如不采取专门灭菌措施,微生物会强烈的改变排泄物的成分、产生大量的气体化合物,如氨、一氧化碳及挥发性的有机酸等。

脸部毛发的生长速度决定于刮脸方式。用刀片刮脸时,生长速度每昼夜 300mg;用电动剃须刀刮脸时,每昼夜可达 100mg。头部和身体其它部分的毛发,其生长速度每昼夜可达 30mg。毛发中有 25 种成分,每 100g 干物质中硅、蛋白质和糖达 80g,钙和锌 20mg,镁和钴 10mg,水 4g。

每昼夜手指甲生长速度 0.1mm,脚指甲 0.02mm。

指甲一年生长约 2g,指甲含有约 20 种元素和化合物,每 100g 指甲中氢的含量为 50g,氮为 16g,水为 0.8g。

1.4 与人体物质交换无关的生活废物

与人体物质交换无关的生活废物包括食物残渣、包装材料、擦拭材料、床单、内衣。此外,环境再生系统也产生废物。

每人每昼夜产生 1.4g 食物残渣和微尘,它们散落在舱内大气中。

在软饮料管和食品盒中的残余食物占口粮的 2%~3%,这些残余食物随同包装一起扔掉。金属包装残余食物占包装食品的

10%~15%。

轨道站规定每过10天换一次内衣。

环境再生系统的废物包括用废的吸附剂、过滤器、催化剂及其它材料。它们的数量和形式取决于所采用系统的形式和单个组件具体的结构形式。

采用生物链的系统,废物形式取决于生物链的形式。有低等生物参与的自养生物链系统,将有小型藻类的过多增长;高等植物有茎叶或根茎等不可食的部分。

异养生物链系统产生的废物同人产生的废物类似,其数量和成分将取决于所选择的生物种类。

1.5 气体环境成分和压力的选择原则

飞行器的类型、用途及人在其中停留的时间,决定了密封舱生活环境的气体成分。选择气体成分时,舱内大气总压是个决定性的数值。

与地球表面相同的气体环境,即总压101.3kPa(760mmHg),氧体积含量21%,氧分压21kPa(160mmHg),氮体积含量73%,氮分压78kPa(590mmHg),这样的气体环境被认为是最符合人体生理卫生要求的。氩、氢和其它成分在大气空气中的体积含量大约是1%,在生理和技术方面是中性的,不需把它们加入气体环境中。

生理允许的气体环境,其总压为79~250kPa(600~1900mmHg),相应的氧分压为16.5~52.6kPa(125~400mmHg)。对人而言,气体成分和压力的安全变化范围如图1-4。

周围环境和密封舱之间的压差决定了飞行器结构的承力大小。很显然,提高压差会引起结构质量的增加,还有损于航天服柔性密封外罩的活动性。

气体环境的成分和压力选择,实际上就是在生理卫生要求和