

关于火星基地空气循环生活保障系统的研究

摘要

在火星上建基地一直以来都是人类的梦想，也是未来进一步探索火星的要求。火星表面的平均大气压为 560Pa，不到地球表面大气压的 0.6%，大气中二氧化碳的含量达到 95%，而氧气的含量仅为 0.13%，且时常出现沙尘天气。为了保障宇航员们能够在火星上长久健康地开展相关工作，需要在火星基地上建立一套合适的空气循环生活保障系统以维持基地内空气环境的稳定。为此，本文首先建立了火星基地的模型，确定了基地内常驻人员数量和设备数量，并计算出了空气净化再生系统的各项负荷。在此基础上，进行空气净化再生方案的设计，提出了一种能够实现物质循环再生的空气净化再生系统并对相关设备进行了选型计算。最后，对系统的运行情况进行了模拟，验证了该系统能够很好地满足基地内污染物浓度的控制要求。相较于目前应用于空间站及其它各类载人航天器的空气净化再生系统，本文设计的系统可以与水回收管理系统及热湿管理系统协调，实现物质的循环再生。此外，本系统还利用 Sabatier 反应器实现了对二氧化碳中氧元素的回收，有利于火星基地的长期独立运行。本设计作为对未来火星基地环境控制生活保障系统的概念设计，是对人类航天事业发展的展望，对未来火星基地的建设具有一定的参考价值。

关键词： 火星基地，环境控制生活保障系统，空气净化再生，概念设计

Study on indoor air circulation life support system of Mars base

ABSTRACT

Building a base on Mars has always been a dream of human and will be a requirement for exploration of Mars in the future. The average atmospheric pressure on the surface of Mars is 560 Pa, which is less than 0.6% of the atmospheric pressure on the Earth's surface. The carbon dioxide content in the atmosphere reaches 95%, while the oxygen content is only 0.13%. Sandstorms often occur. In order to ensure that astronauts can carry out related work on Mars in a long and healthy manner, it is necessary to establish a suitable air circulation life support system on the Mars base to maintain the stability of the air environment in the base. To achieve that, this article established a model of the Mars base, determined the number of permanent personnel and equipment in the base, and calculated the loads of the atmosphere revitalization system. On this basis, a recyclable atmosphere revitalization system is proposed, and the related equipment is calculated and selected. Finally, the operation of the system is simulated to verify that the system can meet the requirements of pollutant concentration control in Mars base. Compared with the air revitalization system currently used in manned spacecraft, the system designed in this paper can be coordinated with the water recovery management system and the heat and humidity management system to achieve the recycling of materials. In addition, this system also uses the Sabatier reactor to realize the recovery of oxygen in carbon dioxide, which is beneficial to the long-term independent operation of the Mars base. This design, as a conceptual design for the future Mars base air circulation life support system, is a prospect for the development of the human space industry and has certain reference value for the future construction of Mars base.

Key words: Mars base, Environment control life support system, Atmosphere revitalization, Conceptual design

目 录

装
订
线

1	引 言	1
1.1	本文的项目背景	1
1.2	火星基地的建设前景：大气净化再生系统的重要性	1
1.3	现有室内空气净化再生技术的综述	2
1.3.1	氧气供应技术	2
1.3.2	二氧化碳清除技术	4
1.3.3	微量污染物控制技术	5
1.3.4	大气检测技术	5
1.3.5	供气与舱压调节技术	5
1.4	设计概览：本文的技术路线	6
2	火星基地模型	7
2.1	火星环境	7
2.1.1	火星的星体特征	7
2.1.2	火星的大气环境及气候	8
2.2	火星基地的结构	8
2.3	关于火星基地的一些规定	10
2.4	本章小结	11
3	大气净化再生系统负荷计算	12
3.1	氧气供应负荷	12
3.1.1	人员呼吸耗氧量	12
3.1.2	室内气体泄漏造成的氧气消耗	12
3.2	氮气供应负荷	13
3.3	二氧化碳清除负荷	13
3.4	微量污染物的清除负荷	13
3.5	室内颗粒物清除负荷	15
3.6	本章小结	16
4	系统方案设计	17
4.1	系统总体方案设计	17
4.1.1	空气净化系统方案设计	17
4.1.2	供气与舱压调节系统方案设计	18
4.1.3	系统间的物质流动	19
4.2	子系统方案比选	20
4.2.1	供氧方案	20
4.2.2	CO ₂ 清除方案	21

4.2.3 微量污染物浓度的控制方案	22
4.2.4 颗粒物浓度控制方案	23
4.3 送回风方案	23
4.4 本章小结	24
5 设备的选型计算	25
5.1 供气与舱压调节系统设备选型计算	25
5.1.1 SPE 水电解制氧系统	25
5.1.2 高压氧气储罐	26
5.1.3 高压氮气储罐	26
5.1.4 氧气增压泵	27
5.2 空气净化系统设备选型计算	27
5.2.1 分子筛吸附床	27
5.2.2 活性炭床	30
5.2.3 催化氧化装置	30
5.2.4 阴离子树脂	30
5.2.5 静电过滤器	31
5.2.6 风机	32
5.3 管道选型及水力计算	33
5.5 本章小结	34
6 运行模拟	35
6.1 污染物释放规律	35
6.2 火星基地污染物浓度计算模型	36
6.2.1 假设	36
6.2.2 模型建立	37
6.2.3 初始条件	37
6.3 运行模拟结果	37
6.4 运行策略优化	39
6.5 本章小结	40
7 总结和展望	41
7.1 总结	41
7.2 展望	41
参考文献	43
谢 辞	45

装
订
线

1 引言

1.1 本文的项目背景

本文所做工作是火星基地环境控制生命保障系统概念设计的一部分。该课题为校级研究项目，项目的目标是探索在未来的火星基地建设中，暖通专业可以起到的作用。通过将暖通专业知识应用于航天工程当中，可以展现暖通专业不仅与人们的正常生活息息相关，在人类探索宇宙的前沿领域中也能够发挥重要的作用。由此，可以提升暖通专业的学科形象，吸引更多学子进入暖通专业学习。

项目的预期成果包括概念设计的文本成果，以及用于展示系统工作原理的实物模型。实物模型可以展览在学院大厅，直观地展现暖通专业与航天工程的结合。为此，本文在完成空气净化再生系统的设备选型后，对各设备进行了三维建模，并完成了系统的装配，为之后实物模型的搭建奠定了基础。

1.2 火星基地的建设前景：大气净化再生系统的重要性

随着科技的进步与发展，人类探索的脚步正向宇宙更深处迈进。从加加林第一次进入太空到阿姆斯特朗第一次登上月球，航天科技的发展让困于地球资源不断被消耗的人们产生了移民外星的希望。在太阳系中，目前认为最适合进行移民的星球就是火星。从上世纪 60 年代开始前苏联、美国就开始进行火星探测活动。1971 年，前苏联的火星 3 号的登陆器成功软着陆火星表面，成为第一个抵达火星表面的探测器。之后美国成功地向火星发射数个探测器，并实现在火星表面软着陆。“维京号”、“好奇号”（图 1.1）等着陆器在火星上工作数年，勘测得到了包括气候、地质资料在内的珍贵的关于火星的数据^[1-3]，并成功地将数据传回了地球。中国也在 2020 年正式宣布将开展首次火星探测任务“天问一号”。



图 1.1 好奇号火星车

未来要进一步地了解火星，探索星际移民的可能性，或许需要将宇航员送到火星上，实地开展一些勘测研究活动。为了能够让宇航员们长时间的在火星上工作生活，在火星上建立一个能够支持宇航员们开展相关活动的火星基地是非常有必要的。火星基地正常运行，离不开各种功能系统的协作支持。在这之中，大气净化再生系统是保障宇航员们生存的关键。

火星表面的平均温度低至 210K (-63℃)，而大气压力只有 550 帕，不到地球表面大气压的百

装
订
线

分之一^[2]。此外，火星大气中 95%都是二氧化碳，氧气含量仅为 0.13%^[3]，人类无法直接在火星大气环境中生存。因此，需要在火星基地内形成一个封闭的室内空气环境，通过大气净化再生系统维持室内大气环境的稳定以支持宇航员在火星上的活动。

大气净化再生技术作为环境控制生命保障技术（ECLSS）的一部分，在空间站、太空飞船等各类载人航天器上都有应用。大气净化再生系统需要解决的问题主要在于：

- (1) 补充因人员呼吸消耗调的氧气；
- (2) 清除人员代谢产生的 CO₂；
- (3) 控制室内各种微量污染物的浓度。

而对于应用在火星基地内的大气净化系统，又会面临到由于火星与地球距离远，物资补给不方便的问题。因此，火星基地中的大气净化再生系统需要更好的实现资源的循环再生，在有限资源的情况下实现长时间的运转，保障基地内人员的人身安全。而随着航天科技的进步，大气净化再生技术也有长足的进步。从贮存式系统到再生式系统，技术的不断发展使得设计研制一套适合火星基地的大气净化再生系统成为可能。

1.3 现有室内空气净化再生技术的综述

空气净化再生技术主要包括氧气的供应、CO₂的清除、微量污染物的控制。此外，还有一些配套的辅助技术，包括用于监测室内空气中各组分浓度的大气监测技术、维持室内稳定的气压与氧分压的供气与舱压调节技术以及 CO₂的还原技术。通过上述这些技术的结合，才能够实现室内空气环境的稳定，保障宇航员的正常生活与工作。

1.3.1 氧气供应技术

航天工程中，供气方案分为贮存式和再生式（图 1.2）。

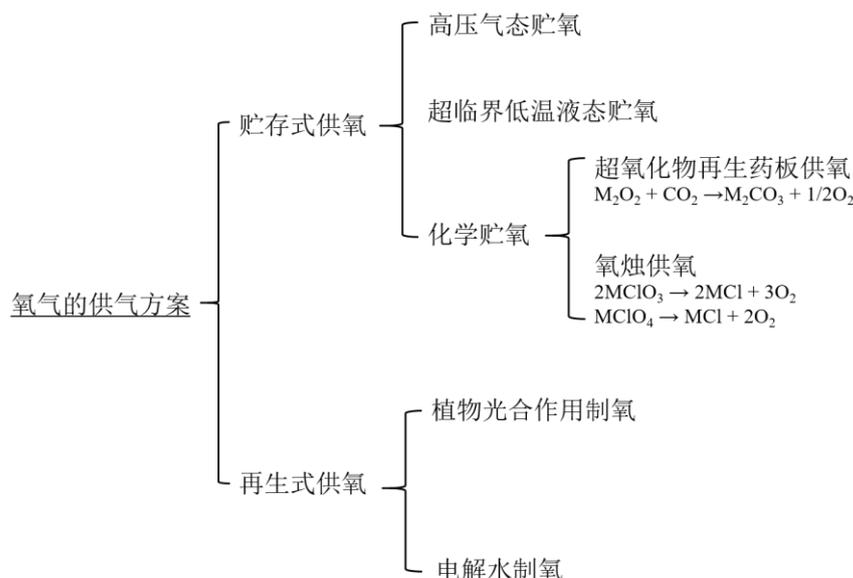


图 1.2 供气方案

在早期的载人航天飞船上，采用的大多是贮存式的供气方案。贮存式的供气方案主要有三种：

装订线

高压气态贮氧、超临界低温液态贮氧和化学贮氧^[4]。

高压气态贮氧系统的特点是简单可靠，快速供气性能好，在载人航天器上常用作应急供氧。但这贮氧方式的明显缺点在于贮存相同数量的氧气所占据的体积比较大，这对于容积有限的航天器而言是比较不利的。

超临界低温液态贮氧在航天器上所采用的供养方案之一，由于液态氧比相同质量的气态氧的体积小，因此贮箱的容积可以减小。此外，采用该技术可以使生保系统供氧与氢氧燃料电池供氧一体化。但是该系统的贮箱需要做好绝热保温，同时需要增加气化装置。这使得液态贮氧系统的结构变得更为复杂。

化学贮氧方式技术成熟，安全性好。在前苏联的东方号、上升号、联盟号飞船和礼炮号空间站上，都采用了碱性金属氧化物 KO_2 作为贮氧物质^[5]。 KO_2 通过与舱内空气中的 CO_2 发生化学反应释放出氧气。这种方法的一大优点在于供氧的同时可以清除室内产生的 CO_2 。另一种贮氧物质氧烛（主要由氯酸盐、金属粉、催化剂、和功能助剂组成）则在深海载人潜水器中有应用^[6]。

上述系统无法实现氧气的闭环再生，需要不断的从地球上发送物资进行补给。这限制了贮存式的系统只适用于短时间的载人航天飞行任务。为了宇航员们能够进行长期的航天任务，航天器需要采用实现氧气再生的供氧方案。

目前封闭的生物生命保障系统（BLSS）得到了许多人的关注。前苏联建立了利用单细胞海藻、植物和微生物的 BLSS 系统^[7]，系统的物质循环示意图见图 1.3。该系统利用生物的物理化学转化过程，满足人员对氧气需求的同时，可以清除室内部分的 CO_2 并供应食物。NASA 约翰逊航天中心发起了月球-火星生命保障试验计划（Lunar-Mars Life Support Test Project）^[8]，他们通过在密闭空间内搭建温室（图 1.4），实验得出了种植面积为 $5\sim 10\text{m}^2$ ， $10\sim 20\text{m}^2$ 和 $40\sim 50\text{m}^2$ 的植物可分别满足一人的水、氧气和食物的需求。BLSS 系统占地面积大，对紧急情况反应迟钝，且不利于控制。目前该类系统仍处在研究当中，系统的稳定性和可靠性还有待考证。

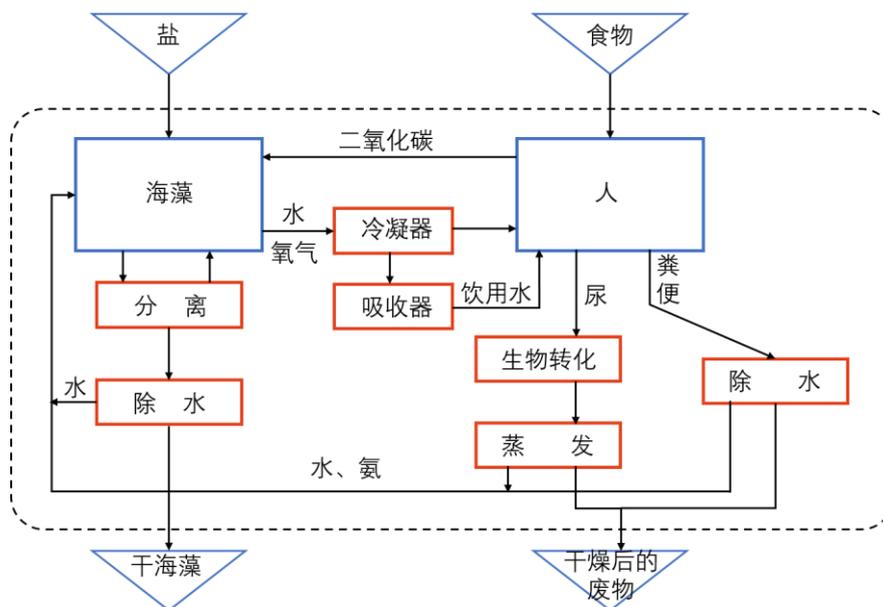


图 1.3 BLSS 系统物质循环示意图



图 1.4 温室的内部（左）和外部（右）^[9]

而目前在航天器上得到广泛应用再生式供氧方案是电解水制氧方案^[10-12]。水的电解其实就是一个氧化还原反应，其原理如图 1.5 是水在阳极放出电子，生成氧气和氢离子，水在阳极得到电子，生成氢气和氢氧根离子。通过长时间的研究，已经出现多套适合在应用于航天器的电解水制氧系统。通过与航天器内的水回收处理系统结合，可以很好地实现氧气的闭环再生。该技术在多个航天器上得到应用验证，成熟安全，稳定可控，可以对在太空中长期生活工作的宇航员们提供支持。这也是本设计中将会采用到的技术方案。

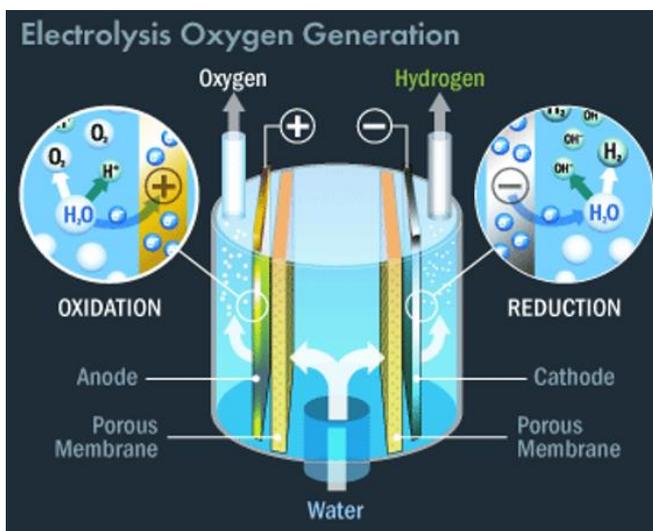


图 1.5 电解水制氧原理

1.3.2 二氧化碳清除技术

火星基地是封闭的环境，其中的人员能呼吸会产生二氧化碳。研究表明，密闭空间中大量的 CO_2 会扰乱人体正常的新陈代谢，使人感觉不是，产生头晕、恶心、呼吸急促等症状，甚至会危及生命^[13]。因此，清除密闭空间中的 CO_2 是维持人员身心健康的重要前提。航天器内二氧化碳浓度的控制可以分为不可再生式、物理化学再生式和受控生态再生式^[14]。

不可再生式二氧化碳清除技术在前文已有提及，即通过 KO_2 与室内的二氧化碳反应，同时达到供氧和清除二氧化碳的目的。受控生态再生式系统在前文也有提及，该方法利用植物的光合作用

用吸收人员呼吸产生的 CO₂。

目前，在中长期载人航天飞行中，采用的多为物理化学再生式二氧化碳清除技术。该技术包括分子筛吸附、固态胺吸附、电化学吸附、膜分离等方式。膜分离^[15]利用膜材料的选择透过性实现对二氧化碳的分离收集，该方式从原理和操作上都具有得天独厚的优势，但关于膜材料的选择及长期运行稳定性的研究都还处在初级阶段，有待进一步的研究使该技术达到可以应用的水平；电化学吸收^[16]的产物中二氧化碳的浓度最高，同时可以产生电能，但需要做好水汽分离；固态胺吸附^[17]由于其化学反应的本质，效率最高，但长期使用性能变化和对人体的影响都缺少检验；分子筛吸附^[14]的过程是物理吸附，通过在包括天空实验室、和平号等载人航天工程中的应用已经检验了这种二氧化碳清除方式的安全性及性能。

上述可物理化学再生手段捕集得到的二氧化碳的处理问题也是载人航天环境控制生命保障面临的以达挑战。在现有的航天器上，捕集得到的二氧化碳通常是直接排放到外太空中的真空中。在航天工程中，任何一点资源都是十分宝贵的，尤其二氧化碳中还有宝贵的氧元素，直接排放掉二氧化碳不利于形成氧气的闭合循环，需要不断向航天器中补充氧元素，这对于中长期的载人航天任务显然是不利的。Sabatier 反应^[18, 19]能够使二氧化碳和氢气在催化剂作用下生成水和甲烷，该反应的反应式如下。该反应装置作被考虑作为二氧化碳的还原装置添加进未来的航天器中。



1.3.3 微量污染物控制技术

在火星基地中，微量污染物主要由人体代谢活动散发，其中包括可挥发有机污染物（VOCs）、一氧化碳、氢气、氨、二氧化硫等。这些微量污染物会对人体的健康造成影响，在载人航天工程必须对相关物质的浓度进行控制^[20]，保障航天任务的顺利进行。

航天工程中通常采用活性炭来吸附 VOCs 以及一些有气味的气体。而对于 CO 以及 H₂ 等微量污染物，通常需要进行催化氧化，将其转化成 CO₂ 以及 H₂O，再通过后续的装置进行吸收。对于酸性气体，碱性溶液来吸收。

1.3.4 大气检测技术

大气监测对大气控制和供应及大气再生分系统的功能是很关键的。国际空间站的主要大气检测仪是基于质谱的主要成分分析仪（MCA）^[21]，它在分析 N₂、O₂、CO₂、CH₄、H₂ 和 H₂O 方面表现出稳定、可重复的性能。此外，系统中还包括其他大气成分监测组件，用来测量微量污染物、CO、离散粒子总量等。

1.3.5 供气与舱压调节技术

载人航天器中的大气压力机制也经历过一段时间的探索。早期为了系统的简洁、在美国及前苏联早期的载人航天器中采用的多是纯氧或富氧的低压大气环境^[4]。在这种大气压力机制下，非常容易发生火灾。在经过许多惨痛的经验教训后，航天工程师们总结得出采用与地球海平面相似的大气压力机制（总压 101kPa，氮气占比 79%，氧气占比 21%）更有利于航天器的安全运行以及宇航员的身心健康。

1.4 设计概览：本文的技术路线

空气净化再生技术对于载人航天工程而言十分重要。对火星基地这种需要长期运行的项目而言，搭建合适的大气净化系统有利于基地持续稳定地运行，有利于宇航员们在火星基地内长期健康地在火星开展相关的科研工作。

本文旨在为将来的火星基地设计一套能够长期运转、满足基地内宇航员生存需求的大气净化再生系统，尤其是要能够实现物质的闭环循环再生，尽量减少地球对火星的物资补给。为此，本文基于现有的空气净化技术，设计了一套能够实现资源循环利用的空气净化系统。同时，面对室内人员数量变化或室内气体泄漏等情况，都能够通过合适的控制策略，适应室内负荷的变化，使基地内大气环境维持在比较稳定的状态。

具体的，本设计按照以下路线（图 1.6）开展：



图 1.6 设计流程

(1) 建立火星基地的模型，确定室内设备及人员的情况，为后续负荷计算提供计算基础，同时在 SolidWorks 中搭建好火星基地的三维模型；

(2) 结合现有的资料与数据，计算大气净化再生系统需要处理的各气体组分的负荷；

(3) 对比分析各大气净化再生技术方案，提出一套适合火星基地的，能够长期运行大气净化再生方案；

(4) 对系统内各部分设备进行选型计算。

(5) 模拟分析室内气体环境变化，提出一套合适的运行策略。

装
订
线

2 火星基地模型

2.1 火星环境

作为地球的近邻，火星是人们最早认识的五颗行星之一，名字来源于其表面展现出来的铁锈色。每隔 780 天左右会出现一次“火星冲日”（图 2.1），即太阳、地球、火星的位置形成一条直线。一般来说，火星冲日时，地球到火星的距离比较近，这时从地球上观察到的火星是最亮的时候。同时，火星冲日期间发射火星探测器可以极大地减小运载航天器的推进能量消耗。因此，这也是航天工程中发射火星探测器的最佳时机。

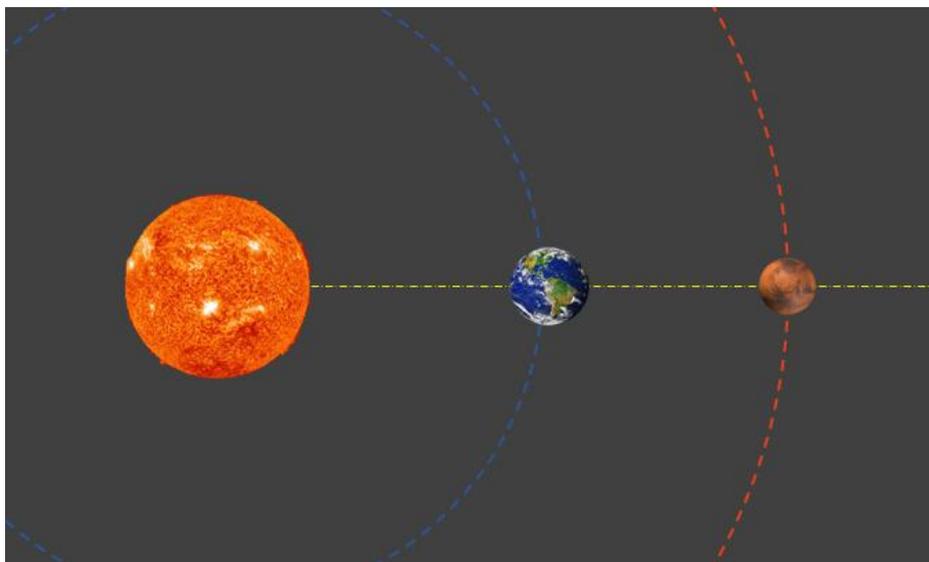


图 2.1 火星冲日

通过天文观察及火星探测器勘测得到的数据，可以对火星星体特征及其表面的环境气候有进一步了解，为火星基地的设计建设提供数据依据。对于本设计，火星相关环境条件也会影响到大气净化再生系统的方案选择。

2.1.1 火星的星体特征

火星是太阳系中第 4 个行星，有两颗卫星。火星的直径约为地球的一半，质量约为地球的九分之一，其表面的平均重力加速度不到 4m/s^2 ，平均密度只有 3.94g/cm^3 ，是已知类地行星中密度最小的行星。此外，火星上一个太阳日（自转周期）与地球上一天相差不多。但火星的公转周期远大于地球的公转周期，约为 687 天。火星具体的星体特征参数见表 2.1

表 2.1 火星的星体特征参数

特征	数值
赤道半径/极半径	3396.2 km/3376.2km
质量	6.4185×10^{23} kg
平均密度	3.94 g/cm^3
表面重力	3.693 m/s^2
自转周期	24 h 37 min
轨道周期	686.98 地球日

2.1.2 火星的大气环境及气候

火星的大气层相对较薄，平均地表气压只有 600 帕，约为地球表面气压的 0.6%，且气压波动大，随着季节的变化，火星气压变化可达 20%。火星大气成分（图 2.2）为 95%的 CO₂，3%的氮气、1.6%的氩气，很少的氧气以、水汽等。此外火星的大气中还充满着许多悬浮颗粒，这些颗粒吸收蓝光使得天空呈现黄褐色。由于火星比地球离太阳远，日射得热量较少，表面温度较低，实际观测到火星地表平均温度为 240K，随着季节变化，温度波动范围为 140~300K。

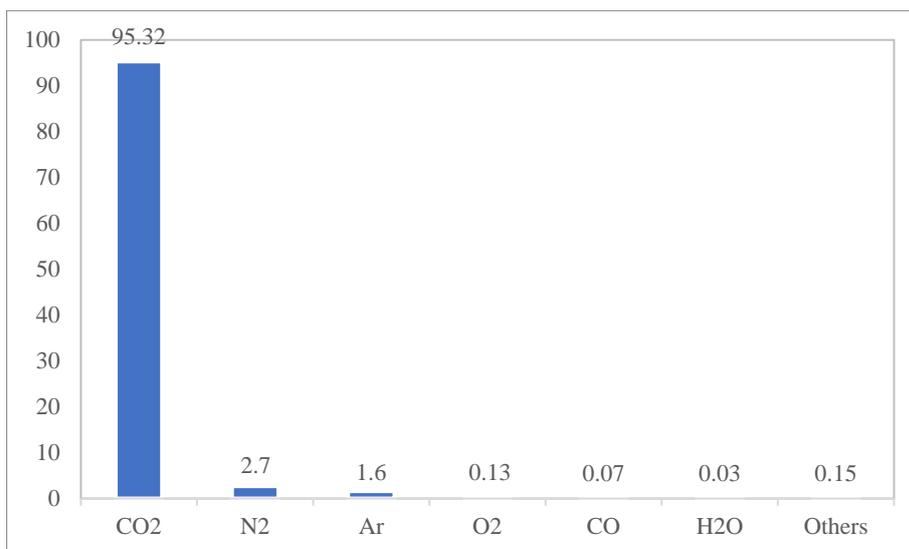


图 2.2 火星大气中各成分占比

火星风是火星上一种常见天气。火星风的强度和方向随着季节而剧烈变化着，甚至在一天内也会发生巨大变化。剧烈的火星风伴随着巨大的尘暴，这也是火星上一种常见的天气。尘暴持续的时间很长，大的尘暴甚至能够持续数月。这也对火星基地外部的建筑材料提出了要求，需要能够抵挡风沙的侵蚀。

2.2 火星基地的结构

基于 AI SpaceFactory 团队设计的可 3D 打印的火星栖息地 MARSHA^[22]，本文建立了火星基地的模型（图 2.3、图 2.4）。

基地主体为上窄下宽的椭圆柱状，基地高度为 14m，最大直径为 8m，整个基地的容积达到 539m³。火星基地采取圆柱形状，原因除了圆柱状外壳是高效的压力容器之外，还因为圆柱状外形能够提供最大的可使用面积与表面面积的比率，以及最大的可使用面积与体积和直径的比率。减小表面面积意味着在较小的压力下可以减少使用的材料，减少体积代表减少机械系统的能量负荷，减小直径直接减少了结构上的压力，特别是在基座上的压力。相比于圆顶形状的基地，圆柱状基地不会产生无法使用的顶部体积以及无法使用的建筑面积（图 2.5）。此外，圆柱状也是最容易进行 3D 打印的压力容器，其较小的占地面积，可以减小打印机所需的移动范围，从而有助于施工。

装
订
线

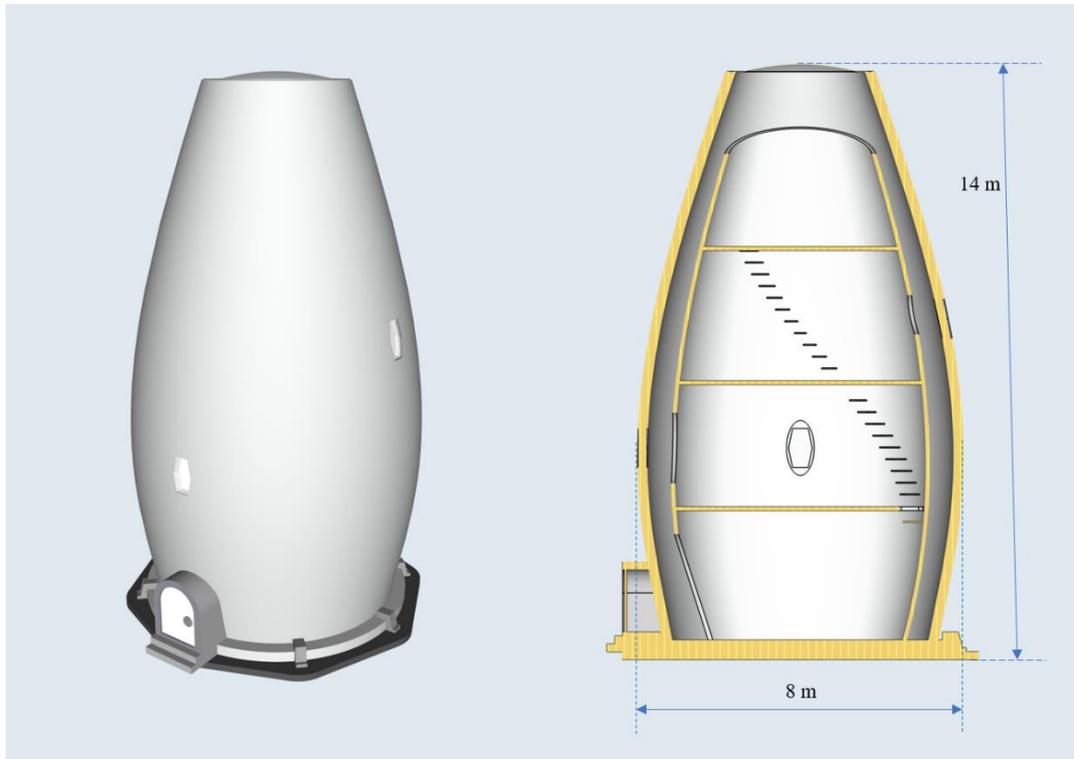


图 2.3 火星基地外形（左）和剖面图（右）

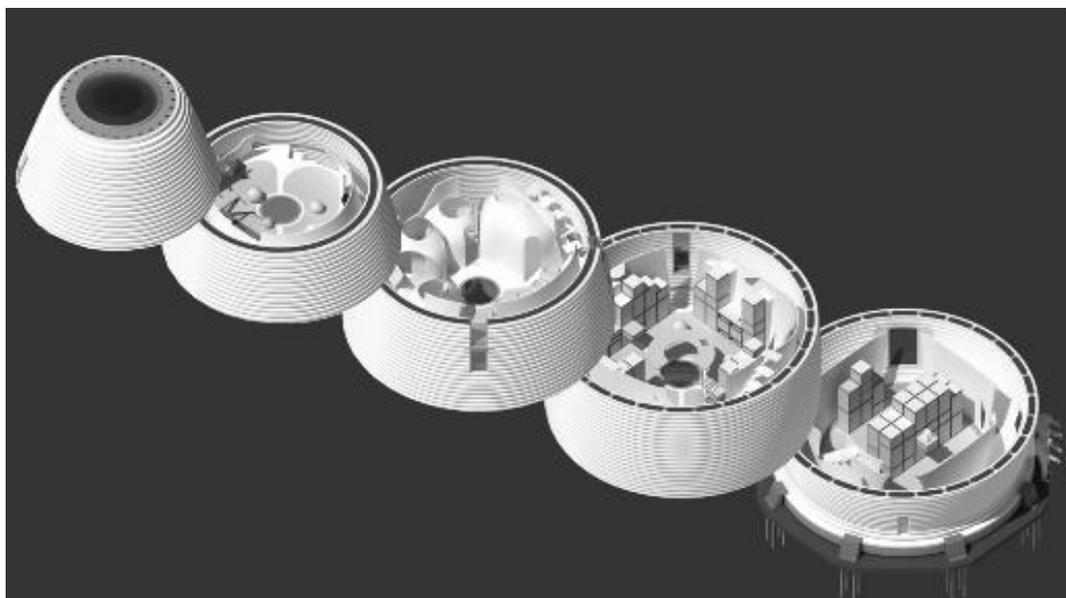


图 2.4 火星基地各楼层^[22]

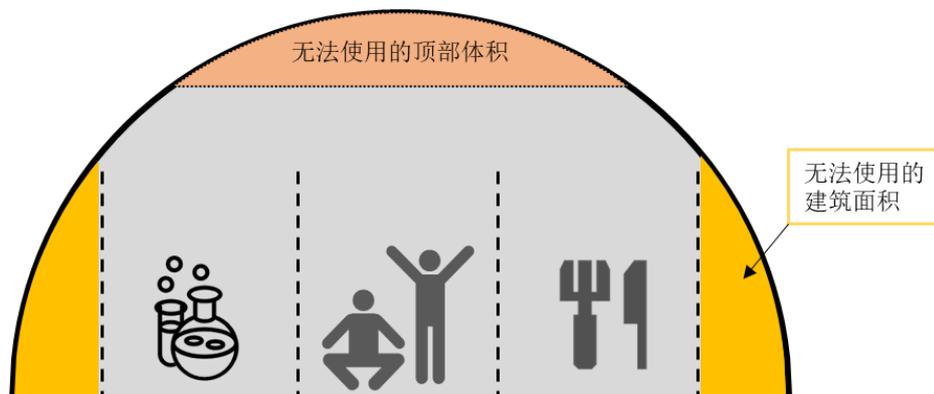


图 2.5 圆顶基地的劣势

本设计中，火星基地采取双层壳结构。基地外壳是用玄武岩纤维材料通过 3D 打印形成的封闭结构。椭圆柱状外壳作为高效的压力容器，可以将基地内的空气与室外大气分隔开来。因为火星表面的温度变化很大，采用玄武岩纤维材料这种具有良好延展性的材料，可以避免因为热胀冷缩造成基地外壳破裂进而导致的严重后果。此外，玄武岩纤维材料具有较好的强度与热绝缘性能，能够抵挡室外风沙侵蚀的同时还可以作为火星基地的保温。该材料可以通过火星上现有的材料合成，可以有效减少建设火星基地时运载飞船的载荷。在基地的外壳上，每一个朝向都至少开有一个窗户，同时在基地的顶部开有天窗，以保障室内自然光照照明。此外，通过调节天窗的开启程度，可以调节进入基地内的太阳辐射，通过一套合适的控制策略，可以有效地减少室内的冷热负荷。

基地的内壳为独立于外壳的结构，支撑起宇航员们的活动空间。基地内壳总共有四层，由蜿蜒布置在内壳上的阶梯连接。每一层空间都不是封闭的，空气可以在不同层的空间之间流通。大气净化再生系统的主要设备以及其他的环境控制的大型设备都布置在基地的一层。

此外，在基地的一层，还设置有进出火星基地的过渡舱。过渡舱的尺寸为 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 2\text{m}$ ，每次允许一名宇航员进出。出火基地时，穿着好宇航服的宇航员先进入到过渡舱，关闭过渡舱面向基地内部的门。然后开启减压阀将过渡舱内的空气排到室外的大气中去。待过渡舱内的压力降低到与室外大气相同时，开启过渡舱面向室外的门，宇航员便可走出基地。从基地外进入室内时，宇航员进入过渡舱并关闭面向室外的门，加压阀门开启，基地内的空气灌入过渡舱内，将过渡舱内的压力升高，指导与室内大气压相等时，便可开启面向室内的门，进入基地。

2.3 关于火星基地的一些规定

基地内人员的数量以及设备的数量配置都会影响到室内大气净化系统的负荷，进而影响相关设备的选型计算，因此需要对室内的人员及设备配置进行规定。

现规定火星基地内的常驻宇航员为 6 名，每名宇航员在基地内工作的时长为一个火星冲日出现的周期（780 天）。规定基地内环境控制生命保障相关设备共 10 台，科研实验相关仪器设备有 20 台，其他设备 10 台，设备平均同时使用率为 70%。

宇航员们在火星基地上按照任务的要求开展相关的科研研究活动，其中包括走出火星基地进行活动。本文中假定宇航员们平均每个月出入火星基地两次。

除此之外，宇航员们还会在基地内进行正常的生命活动，包括进食、排泄、睡觉等，为了保障身心健康，宇航员们也会在基地内进行锻炼以及开展一些娱乐活动。

2.4 本章小结

本章先介绍了火星的环境，包括火星的星体特征、大气环境以及气候等，了解到火星上环境与地球大不相同。在对火星基地设计以及对大气净化再生系统进行设计时，都需要考虑到环境的影响。

其次，本章基于火星栖息地 MARSHA，搭建起了火星基地的模型，模型效果如图 2.6。该基地坚固保暖防风沙，同时还能承受火星表面大幅度的温度变化。确定了火星基地的尺寸，为后续负荷计算及设备选型提供了基础。

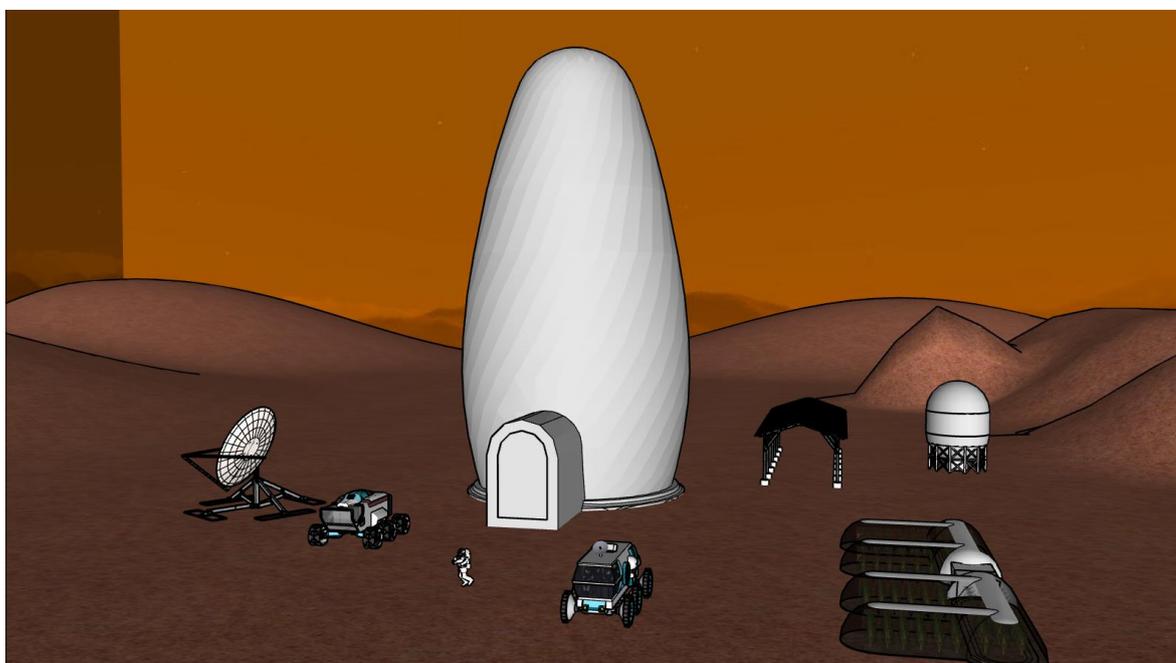


图 2.6 火星基地效果图

最后，本章对基地内的人员、仪器设备以及火星基地内会开展的相关活动进行了规定，为后续负荷计算提供了计算依据。

3 大气净化再生系统负荷计算

火星基地内大气再生系统的负荷包括氧气、氮气的供应负荷，二氧化碳的清除负荷，微量污染物的清除负荷，室内颗粒物的负荷等。

造成这些负荷的原因也是多方面的，其中最主要的负荷来源是人员的活动。人员呼吸会消耗氧气，排出二氧化碳，此外人体活动还会产生如 VOCs、一氧化碳、氢气、二氧化硫等微量污染物。同时，尽管宇航员穿着的衣物采用的都是可以减少颗粒物产生的材料，人员动作时还会产生一定量的颗粒物，需要进行过滤净化，避免基地内人员的正常生活。除去人员活动外，由于基地的密封问题以及人员进出火星基地而造成室内空气泄露同样也会增加氧气和氮气的供应负荷；室内的仪器设备的运行同样会增加室内微量污染物的负荷。

以下是大气净化再生系统各负荷的计算过程。

3.1 氧气供应负荷

氧气的供应负荷按式（3-1）计算：

$$M_{O_2} = M_{O_2-b} + M_{O_2-l} \quad (3-1)$$

式中： M_{O_2} ——氧气的供应负荷；

M_{O_2-b} ——人员呼吸造成的氧气消耗；

M_{O_2-l} ——室内气体泄漏造成的氧气消耗。

3.1.1 人员呼吸耗氧量

基地内常驻 6 名宇航员，根据俄罗斯专家给出的一组基本生理参数，见表 3.1，一个人一天呼吸用氧气为 0.86 kg。根据这个参数，基地内六名宇航员一天内消耗的氧气为

$$M_{O_2-b} = 6 \times 0.86 = 5.16 \text{ kg/day}$$

表 3.1 俄罗斯专家推荐宇航员一人一天生理参数^[4]

项目	数值	项目	数值
呼吸用氧	0.86 kg	排尿	1.60 kg
饮用水	2.50 kg	皮肤和呼吸蒸发水气	1.2 kg
食品	0.60 kg	排泄固体废物	0.2 kg
卫生用水	0.50 kg	排热功率	100~150 W
呼吸排出 CO ₂	0.97 kg		

3.1.2 室内气体泄漏造成的氧气消耗

基地内气体泄漏分为两部分。

一部分是由于基地外壳不能做到完全密封，而室外大气压力远低于室内压力，因此会出现室内空气泄漏。本设计中假设每天因为基地密封性问题造成的室内空气泄漏量相当于室内空间容积的 0.1%，即：

$$V_1 = 539m^3 \times 0.1\% = 0.539 m^3/day$$

另一部分气体泄漏是因为人员在进出基地时，过渡舱内的空气会被排放到室外环境中，造成

空气的损失。由于宇航员平均每个月外出工作两次，过渡舱的尺寸为 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 2\text{m}$ ，平均到每天由于进出基地造成的室内大气泄漏量为

$$V_2 = 1.5 \times 1.5 \times 2 \times 2 \div 30 = 0.3 \text{ m}^3/\text{day}$$

平均每日室内空气泄漏量为：

$$V = V_1 + V_2 = 0.539 + 0.3 = 0.839 \text{ m}^3/\text{day}$$

本设计中采用的是与地球赤道海平面相似的大气压力体制，即大气压力为 101kPa ，空气中 79% 为氮气，21% 为氧气。因此室内空气泄漏造成的氧气消耗可按式（3-2）计算。

$$M = \frac{\alpha V}{22.4} \times M_{\text{mol}} \quad (3-2)$$

式中： M ——泄漏空气中所含有某组分的质量， kg/day ；

V ——基地泄漏的空气， m^3/day ；

α ——该组分在空气中所占有的比例；

M_{mol} ——该组分气体的摩尔质量。

对于氧气， $\alpha = 21\%$ ， $M_{\text{O}_2\text{-mol}} = 32 \text{ kg}/\text{kmol}$ ，通过计算可以得到由于室内空气泄漏造成的氧气消耗量为

$$M_{\text{O}_2-1} = \frac{21\% \times 0.839}{22.4} \times 32 = 0.25 \text{ kg}/\text{day}$$

故基地内的供氧负荷为

$$M_{\text{O}_2} = M_{\text{O}_2-b} + M_{\text{O}_2-1} = 5.16 + 0.25 = 5.41 \text{ kg}/\text{day}$$

3.2 氮气供应负荷

向室内供应氮气的作用主要是用于维持室内的大气压。氮气不参与人的呼吸，也不会被仪器设备所消耗。造成室内氮气消耗完全是由于空气泄漏。因此，按照式（3-2）即可计算得到基地内氮气的供应负荷。

对于氮气， $\alpha = 79\%$ ， $M_{\text{N}_2\text{-mol}} = 28 \text{ kg}/\text{kmol}$ ，通过计算可以得到由于室内空气泄漏造成的氮气消耗量，即氮气的供应负荷为

$$M_{\text{N}_2} = \frac{79\% \times 0.839}{22.4} \times 28 = 0.83 \text{ kg}/\text{day}$$

3.3 二氧化碳清除负荷

基地内二氧化碳主要由人员呼吸释放。根据俄罗斯专家给出的推荐值，一名宇航员一天呼吸排放出的 CO_2 为 0.97kg 。据此，基地内 6 名常驻宇航员一天释放出的二氧化碳，即二氧化碳的清除负荷为

$$M_{\text{CO}_2} = 6 \times 0.97 = 5.82 \text{ kg}/\text{day}$$

3.4 微量污染物的清除负荷

火星基地内微量污染物主要由人体代谢活动产生。郭丽华等人^[2]通过实验研究了在密闭环境中人体代谢微量污染物的释放行为，测试得到了分别处于安静状态、轻度运动状态、中度运动状

态三种不同状态下人体代谢中各微量污染物的释放速度。本设计基于该实验得到的人体处于中度运动状态下各微量污染物释放速度计算火星基地内人员代谢活动产生的微量污染物。中度运动状态下人体呼吸排出的微量污染物与体表排出气中的微量污染物测试结果如表 3.2 所示。

表 3.2 中度运动状态下人体代谢微量污染物测试结果 (mg/ (人·day)) [23]

污染物名称	人体呼吸气测试结果	人体体表排出气测试结果	合计	
2,3-二羟基丙酸	0.23	0.03		
乙醇	0.26	0.02		
硝基吡啶	0.39	0.02		
VOCs	甲醇	0.06		
	1,3-戊二烯	3.06	0.10	120.61
	丙酮	10.70	0.28	
	乙醛	0	0.07	
	甲烷	95.08	9.04	
	一氧化碳	37.97	3.85	41.82
氢气	50.49	0.79	51.28	
硫化氢	0.28	0.01	0.29	
氨	5.60	0.21	5.81	

除去人体的代谢活动外，一些仪器设备同样会产生一些微量污染物，一台正常运行中的电脑释放 VOCs 的速率为 $180\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{unit})$ [24]。本设计参照这个结果，认为火星上的一台正常运行的仪器设备释放 VOCs 的速率与一台电脑相近。

(1) 可挥发有机污染物 (VOCs) 的释放量

可挥发有机污染物主要由人体的代谢活动及仪器设备释放，其释放量按照式 (3-3) 进行计算。

$$M_{\text{VOCs}} = nQ_{\text{VOCs-p}} + 24 \times m\beta Q_{\text{VOCs-e}} \quad (3-3)$$

式中： M_{VOCs} ——火星基地内 VOCs 的释放总量，mg/day；

n ——火星基地内人员数量；

$Q_{\text{VOCs-p}}$ ——人员释放 VOCs 的速率，mg/day；

m ——仪器设备的数量，台；

β ——设备的同时使用系数，取 0.7；

$Q_{\text{VOCs-e}}$ ——平均一台设备释放 VOCs 的速率，0.18mg/h。

带入相关数据计算可以得到室内可挥发有机污染物的释放总量为

$$M_{\text{VOCs}} = 6 \times 120.61 + 24 \times 40 \times 0.7 \times 0.18 = 844.62\text{mg/day}$$

(2) 一氧化碳的释放量

基地内的一氧化碳主要由人体代谢产生，依据表 3.2 的结果，可以计算出基地内的一天释放的一氧化碳为：

$$M_{\text{CO}} = 6 \times 41.82 = 250.92\text{mg/day}$$

（3）氨气的释放量

基地内的氨气主要由人体代谢释放，依据表 3.2 的结果，可以计算出基地内的一天释放的氨气为：

$$M_{\text{NH}_3} = 6 \times 5.81 = 34.86 \text{mg/day}$$

（4）氢气的释放量

基地内的氢气主要由人体代谢释放，依据表 3.2 的结果，可以计算出基地内的一天释放的氢气为：

$$M_{\text{H}_2} = 6 \times 51.28 = 307.68 \text{mg/day}$$

（4）硫化氢的释放量

基地内的硫化氢主要由人体代谢释放，依据表 3.2 的结果，可以计算出基地内的一天释放的硫化氢为：

$$M_{\text{H}_2\text{S}} = 6 \times 0.29 = 1.74 \text{mg/day}$$

3.5 室内颗粒物清除负荷

火星基地内的颗粒物来源主要有三个：建筑材料散发出的颗粒物、基地内人员活动散发出的颗粒物和基地内开展的各科研活动产生的颗粒物。

航天材料采用的大多是可以减少颗粒物产生的材料，因而本设计中火星基地内的建筑材料的发尘量比照洁净室建筑表面发尘量^[25]，取发尘量（ $\geq 0.5 \mu\text{m}$ ）为 $3 \times 10^3 \text{ pc}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 \text{ 地面})$ 。

本设计中，基地内人员活动发尘量比照洁净室内身着洁净工作服的操作人员步行时的发尘量（ $\geq 0.5 \mu\text{m}$ ）^[25]，取定为 $1.01 \times 10^6 \text{ pc}/(\text{人} \cdot \text{min})$ 。

此外，基地内开展的科研活动产生的颗粒物与开展的具体活动有关。考虑到火星基地中开展的科研活动一般不会出现产尘量过大的活动，因此，本设计中取定火星基地内科研活动的总发尘量（ $\geq 0.5 \mu\text{m}$ ）为 $3 \times 10^6 \text{ pc}/\text{min}$ 。

火星基地内的发尘总量按照式（3-4）计算。

$$N_{\text{dust}} = AN_{\text{part-b}} + nN_{\text{part-p}} + N_{\text{part-e}} \quad (3-4)$$

式中： N_{dust} ——基地内的总发尘量， pc/min ；

A ——火星基地地板面积，本设计中为 154 m^2 ；

$N_{\text{part-b}}$ ——单位地板面积建筑材料的发尘量， $3 \times 10^3 \text{ pc}/(\text{min} \cdot \text{m}^2 \text{ 地面})$ ；

n ——火星基地内人员数量；

$N_{\text{part-p}}$ ——人员活动发尘量， $1.01 \times 10^6 \text{ pc}/(\text{人} \cdot \text{min})$ ；

$N_{\text{part-e}}$ ——科研活动发尘量， $3 \times 10^6 \text{ pc}/\text{min}$ 。

带入数据计算可以得到室内的总发尘量为

$$N_{\text{dust}} = 9.522 \times 10^6 \text{ pc}/\text{min}$$

假定这些颗粒物的密度为 $2800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，颗粒为圆球状，平均直径为 $1 \mu\text{m}$ ，可由式（3-5）将发尘数量转化为发尘质量。

$$M_{\text{dust}} = 24 \times 60 \times \frac{4}{3} \pi d^3 \rho N_{\text{dust}} \quad (3-5)$$

式中： M_{dust} ——基地内的发尘总量，mg/day；

d ——颗粒物平均直径，m；

ρ ——颗粒物的密度，kg/m³。

带入数据计算得到室内的发尘量为

$$M_{\text{dust}} = 160.82 \text{mg/day}$$

3.6 本章小结

本章对火星基地大气净化再生系统进行了负荷计算，计算的负荷包括氧气的消耗量、氮气的消耗量、二氧化碳的排放量、微量污染物的排放量、室内发尘量。各负荷汇总在表 3.3 之中。

同时，参照前苏联载人航天器所采用的大气环境参数的经典数据，对室内的最大允许污染物浓度做出标准规定，同样汇总在表 3.3 之中。

表 3.3 大气净化系统负荷汇总及微量污染物最大允许浓度表

物质种类	负荷	负荷来源	最大允许浓度 ^[4, 26]
O ₂	5.41 kg/day	人员呼吸、气体泄漏	-
N ₂	0.83 kg/day	气体泄漏	-
CO ₂	5.82 kg/day	人员呼吸	0.3%
VOCs	844.62 mg/day	人员代谢、仪器设备	0.6 mg/m ³
CO	250.92 mg/day	人员代谢	4 mg/m ³
NH ₃	34.86 mg/day	人员代谢	5 mg/m ³
H ₂	307.68 mg/day	人员代谢	5 mg/m ³
H ₂ S	1.74 mg/day	人员代谢	0.8 mg/m ³
颗粒物	160.82 mg/day	建材、人员、活动	0.15 mg/m ³

装
订
线

4 系统方案设计

进行合适的系统方案设计，是大气净化再生系统能够满足宇航员们在基地中生存需求的前提。合适的系统方案可以增强系统的稳定性与可靠性，还可以实现物质的闭环再生，提高系统长久运行的能力，减少基地对物资补给的依赖。

在火星基地内，大气净化再生系统需要配合其他系统一起实现环境控制与生命保障功能。且要实现基地内物质的循环再生，光靠大气净化再生系统是无法完成的，必须和诸如热湿管理系统、水回收净化系统等进行协调运作才能实现。此外，由于基地内设备众多，而基地内空间有限，合适的系统尺寸在火星基地中就显地尤为重要。因此，在进行系统方案设计时，需要综合考量基地内的负荷要求、与其它系统的协调配合以及系统占据空间体积等综合因素。

在经过火星基地模型建立以及大气净化再生系统的负荷计算后，本文按照以下技术路线对大气净化再生系统进行方案设计：

- (1) 先进行总体方案设计，确定各功能子系统之间的关系，明确其中的物质流动，尽量实现物质的闭环再生；
- (2) 子系统的方案比选，对比分析各现有子系统方案的优势与不足，确定适用于火星基地的子系统方案；
- (3) 将系统布置到火星基地内，确定系统的送回风方案。

4.1 系统总体方案设计

火星基地的大气净化再生系统可以分为污染物净化和供气与舱压调节两个次级系统，现针对两个次级系统提出以下方案。

4.1.1 空气净化系统方案设计

室内主体空气净化系统（图 4.1）由过滤器、风机、CO₂清除装置、VOCs 吸附装置、催化氧化装置、酸性气体吸附装置以及一个换热器组成。

该系统通过将室内的回风送入系统中进行处理，依次清除回风中的颗粒物、二氧化碳、可挥发有机污染物、氢气和一氧化碳以及酸性气体。其中值得注意的是这些污染物清除装置中有些会需要进行加热辅助清除污染物，且加热的功率不小，在加热的过程中空气的温度会有比较大的升高。因此，一般在经过净化系统处理之后，空气会通过一个翅片管换热器，将温度降低至室温再被送入到室内空间中去，避免对热湿处理系统的负荷造成影响。

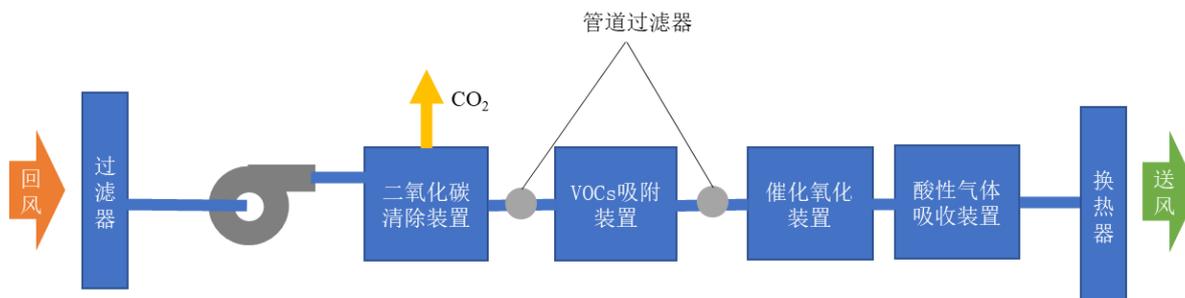


图 4.1 空气净化方案示意图

此外，由于火星时常出现尘暴的天气，大气中含有大量的悬浮物，为了避免宇航员在进出基地时将室外的颗粒物带入到室内的环境中，影响室内污染物净化系统，需要在宇航员从室外进入过渡舱时，对过渡舱内的空气进行净化处理。在本设计中，过渡舱设计成风淋室（图 4.2），用高效过滤器过滤空气中的颗粒物。

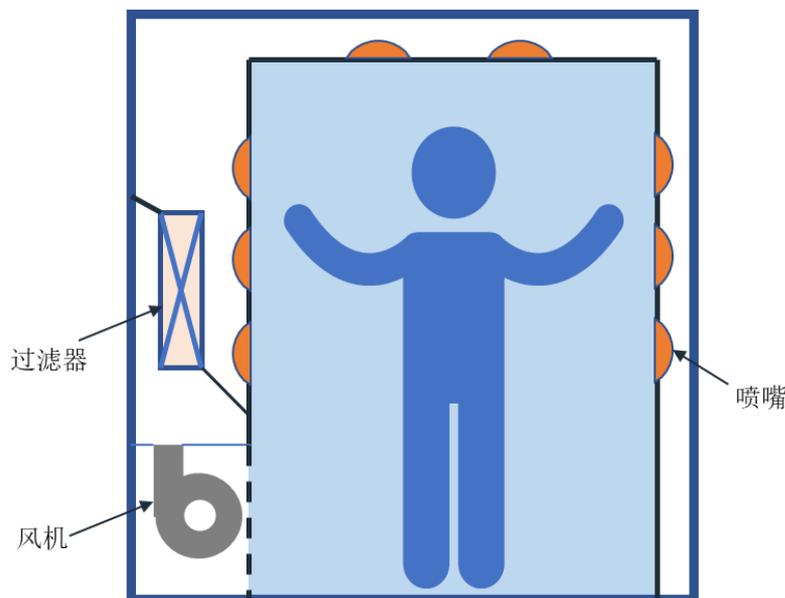


图 4.2 过渡舱风淋室结构

4.1.2 供气与舱压调节系统方案设计

供气与舱压调节系统（图 4.3）由制氧装置、加压泵、高压氧气储罐、氮气产生装置、高压氮气储罐、混合器、控制阀门以及室内的总压传感器以及氧分压传感器组成。

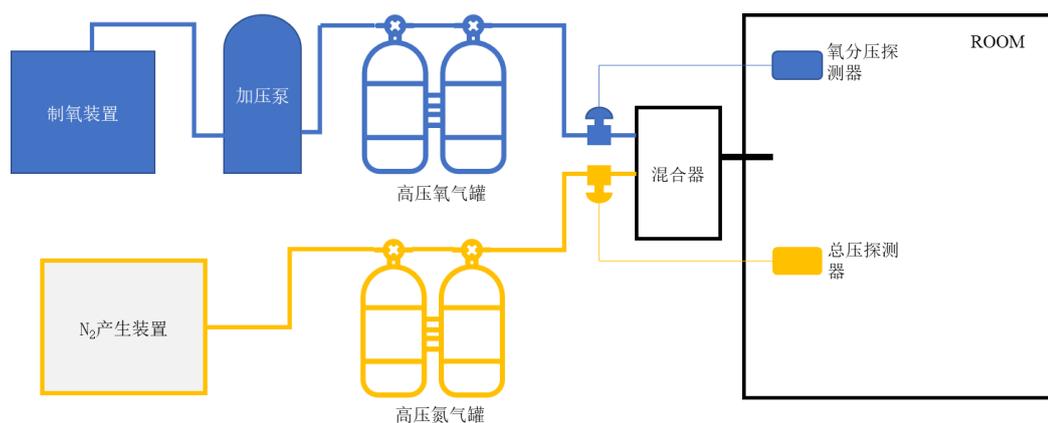


图 4.3 供气与调压系统示意图

为了能够实现物质的循环再生，本设计中采用的制氧方案是电解水制氧。加压泵将制氧装置产生的低压氧气压入高压氧气罐中储存。

由于氮气本身不会参与人员的代谢，其负荷全部由基地内空气泄漏引起，因此需要氮气对基

地内的氮气进行补充。如果通过从地球补给氮气，火星上一年（687天）需要补给的氮量为：

$$0.83\text{kg/day} \times 687\text{day} = 570.21\text{kg}$$

这会占据货运飞船很大一部分载荷，因此更加理想的方法是在火星上直接制取氮气。在地球上，工业大量制取氮气一般有三种方法：深冷空分制氮、变压吸附制氮、膜分离制氮。三种方法都是以空气为原材料。但是火星上大气稀薄，气压仅为地球上的 0.6%，其中氮气的占比不足 3%，因此这些方法并不适用于火星制氮。除此之外，可能的制氮方法是通过火星上的矿物提炼出氮气，但这方面的技术还在研究当中。由于这方面的内容超过了本文的研究范围，因此本文不过多追究氮气的制取方法，仅说明在火星上有制取氮的设备，制取的氮气被储存在高压氮气储罐当中。

氧气与氮气的供应速率靠两个调节阀门进行控制。两个阀门分别接受室内的氧分压传感器以及总压传感器的信号控制。火星基地内采取与地球海平面相似的大气压力机制，即基地内大气总压 101kPa，其中氮气占比 79%，氧气占比 21%。当室内的氧分压和总压低于设定好的值时，阀门控制器接到信号会增大阀门开度，增加氧气及氮气的供应，使室内大气压和氧分压恢复到设定值。相反的，如果氧分压和大气压过高时，会减少阀门的开度来维持室内大气压力机制的稳定。

当制氧装置或 N₂ 产生装置出现故障时，高压氧气罐及高压氮气罐内的气体足够供应基地内一段时间，让宇航员们可以有时间对故障的设备进行修理或者更换。

4.1.3 系统间的物质流动

系统间的物质流动如图 4.4 所示。

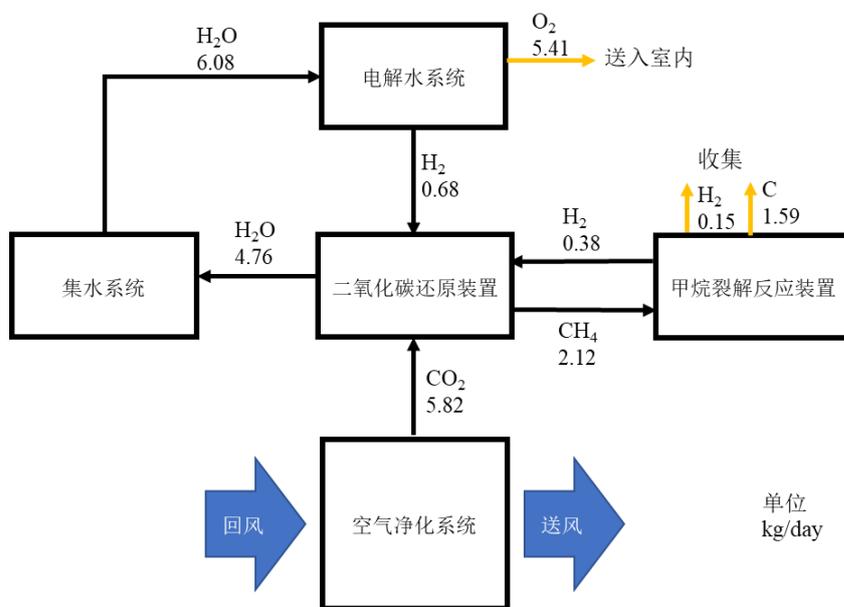


图 4.4 系统间的物质流动

空气净化系统中的 CO₂ 清除装置将回风当中的 CO₂ 吸附然后送进二氧化碳还原装置。二氧化碳还原装置利用电解水制取的 H₂ 将 CO₂ 还原成 CH₄ 并生成水，生成的水进入到集水系统中。但是电解水生成的 H₂ 无法完全还原室内产生的 CO₂，因此，还需要增加一个甲烷高温裂解反应

装置，将 CH₄ 裂解成 C 和 H₂，H₂ 再次进入到二氧化碳还原装置中参与反应。经过计算，整个系统将会有 0.15kg/day 的 H₂ 剩余。将该部分氢气收集，可以有两方面的作用：一方面可以用作燃料；另一方面，可以还原从火星大气中捕集的二氧化碳，生成水来补给基地内的用水。

4.2 子系统方案比选

基于大气净化再生系统的总体设计，结合现有的技术方案，对系统中个子系统的可能方案进行比较，最后选择最适合应用于火星基地的方案。

4.2.1 供氧方案

前文述及的氧气供应方案包括高压气态贮氧、超临界低温液态贮氧、化学贮氧等贮存式供氧方案以及电解水制氧、受控生态式供氧等再生式供氧方案。贮存式供氧方案系统结构简单，技术成熟，在早期的载人航天工程任务中得到了检验。但贮存式供氧方式严重依赖资源补给，更适合短期航天任务。对于需要长期运行的火星空间站，再生式供氧方案是更加合适的选择。对于再生式供氧方案中的电解水制氧和受控生态供氧两种方案，本文分别从原理、各自的优劣势、应用情况等方面进行对比，对比结果见表 4.1。

表 4.1 供氧方案对比

供氧方案	原理	优势	劣势	应用情况
电解水制氧	$\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{通电}} \text{H}_2 \uparrow + \text{O}_2 \uparrow$	系统稳定可靠，电解过程可控	消耗大量能量	在和平号空间站等航天器上已有应用
受控生态供氧	植物光合作用	供应氧气的同时还能供应食物以及清除二氧化碳	占地面积大、过程不便控制，易受环境影响	包括 NASA 在内的多国航天机构正在研究当中

对于本文中的火星基地，需求的是占地空间不大，且能够稳定运行的制氧系统，因此电解水制氧是更好的选择。对于电解水制氧要消耗的能量，可以通过基地外建设的大面积太阳能光伏板来提供。

具体地，本设计采用的是固体聚合物电解质水电解系统（Solid Polymer Electrolyte，以下称 SPE 系统）。该系统使用一种固态聚合物作为电解池中的电解质，该固体电解质是一种过氟磺酸聚合物固体塑料片，它具有聚四氟乙烯的许多特点。当它被水浸饱和时，是一种优良的离子导体。它在电解池中作为电解所需的唯一的电解质。电解时系统中没有游离的酸或碱液，水唯一的自由液体，相比于传统的电解水系统，SPE 系统可以减小系统的腐蚀。图 4.5 是固体聚合物电解质电解池的原理图。固体电解质的两边是阴极和阳极。电解过程中，电解所需的水直接供给到阳极，在阳极电解放出氧气。氢离子在水化的固体聚合物之间穿过，通过电解质运动到阴极，在阴极与电子结合放出氢。由于电解所用的水和电极接触，必须对水进行预处理。

本文设计中采用多电解池组合方案，每个电解池可以独立启停。电解池产生的氢气或氧气通过管道连接到系统的出气主管道上，在支管上装有阀门，出气主管与加压泵连接。采取多电解池组合方案的原因在于：

- (1) 更好地适应负荷变化，通过电解池的启停控制，匹配室内的负荷要求；
- (2) 提升系统稳定性，某一电解池出现故障不影响其他电解池的运行；
- (3) 可扩展性好，如需增大系统的制氧量，只需增大接入系统中的电解池数量即可。

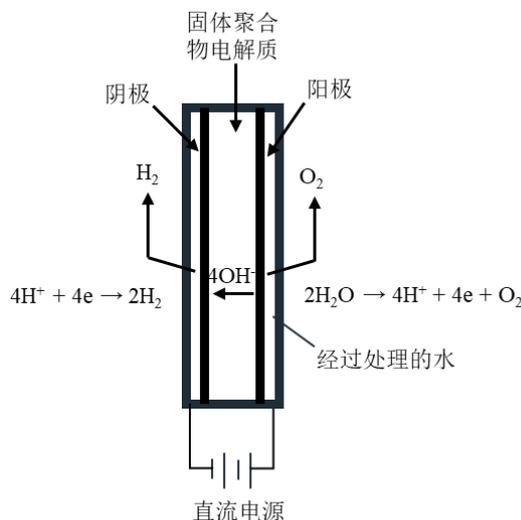


图 4.5 SPE 电解池原理图

4.2.2 CO₂ 清除方案

可再生式的二氧化碳清除方案包括受控生态式方案以及物理化学再生式方案。

受控生态式方案前文已有讨论，由于其占地面积大，不易控制，且相关技术仍处在研究阶段，故在本设计中不采用受控生态式方案清除二氧化碳。

物理化学再生式方案包括分子筛吸附、固态胺吸附、电化学吸收以及膜分离等多种方式。现对各种二氧化碳清除方式进行比较分析，结果见表 4.2。

表 4.2 CO₂ 清除技术对比

CO ₂ 清除技术	原理	解吸方式	优势	劣势
分子筛吸附	物理吸附	加热减压	在航天任务中已有应用，性能与安全性经过了检验	分子筛材料易破碎，污染下游设备
固态胺吸附	化学吸附	高温水蒸气吹扫	效率高	长期使用的性能变化以及对人体的影响缺少检验
电化学吸收	电化学反应	在阳极侧收集	收集得到的 CO ₂ 浓度最高，同时可以产生电能	系统较为复杂，需要进行水汽分离
膜分离	膜材料的选择透过性	在膜一侧收集	原理简单，操作方便	有赖于膜材料的研究与选择

综合考虑，分子筛吸附清除 CO₂ 的方案能够很好的满足火星基地内清除二氧化碳的需求，不会增加基地内的物资消耗，系统结构相较于电化方案更为简单，同时该方案经过实际应用验证了其性能与稳定性。因此，本设计采用分子筛吸附清除 CO₂ 的方案。为了解决分子筛颗粒污染下游设备的问题，分子筛床的空气出口增加过滤器。二氧化碳的解吸采用微波加热的方式，解吸后的二氧化碳通过真空泵送进二氧化碳还原装置。

为了实现二氧化碳的回收再利用，尤其是其中氧元素的回收，本设计增加二氧化碳的还原装置。目前还原 CO₂ 的技术主要是基于 Sabatier 反应实现的，反应方程式见式 (4-1)。该反应能够利用电解水产生的氢气将二氧化碳还原成甲烷并生成水。甲烷可以用作燃料，而水则进入到集水系统补充基地内的用水。该反应过程中会释放出热量，能够自发进行，但需要一定的启动温度。



但上述反应只能回收氧元素，而且消耗了氢元素。为了将氢元素也进行回收，一种方案是将生成的甲烷进行高温裂解，生成碳和氢气。氢气回收后可以再次进入到 Sabatier 反应器总参与二氧化碳的还原，甚至用于还原室外大气中捕集的 CO₂，以补充室内的水。甲烷裂解反应过程为高温反应，温度甚至能达到 500℃。为了避免对基地内环境造成影响，可以将反应炉放在基地外，通过管道运输甲烷和氢气。而积累在反应炉中的碳则通过人员进行定期收集。

4.2.3 微量污染物浓度的控制方案

火星基地内需要进行控制的微量污染物主要包括 VOCs，氨气、一氧化碳、氢气、二氧化硫等。其中绝大部分污染物由人体的代谢活动产生。现针对各污染物提出以下的污染物浓度控制方案。

(1) 活性炭吸附床

活性炭能够对空气中的 VOCs 进行有效吸附，此外，一些有气味的气体如氨气也能被活性炭吸收。活性炭吸附污染物是物理吸附，安全可靠，系统设计简单。此外，在现有的空间站上也应用活性炭来进行污染物的控制。活性炭的再生可以利用火星大气压只有基地内气压的 0.6% 的特点，将吸附有污染物的活性炭置于与火星大气压力相同的低压环境中，利用低压使被吸附的污染物脱附，排放到室外的而大气中去。

(2) 催化氧化装置

催化氧化装置分为低温催化氧化装置和高温催化氧化装置。

低温催化氧化装置用于将空气中的 CO 氧化变成 CO₂，在被后续的吸附装置吸附，完成对室内 CO 浓度的控制。低温催化氧化的关键在于催化剂的选择。使用共沉淀法制备的 Au 催化剂，在 -76℃ 时对 CO 氧化反应就有活性，0℃ 时 CO 的转化率就已接近 100%。

高温催化氧化主要是对 H₂ 进行催化氧化，生成水进入到空气中，最终由热湿管理系统去除。该反应采用的是氧化铝小球外附 0.5% 的钨作为催化剂，反应过程中需要用电加热器进行加热。

(3) 吸附装置

吸附装置主要是用于吸附空气中的酸性气体，包括 CO 氧化形成的 CO₂。由于这部分气体的含量很少，为了简化装置，本设计中采用阴离子树脂对相关的酸性气体进行吸收。

4.2.4 颗粒物浓度控制方案

目前应用在空调系统中对送风中颗粒物进行过滤的方式主要有纤维过滤和静电过滤，两种过滤方式各有优缺点，不同过滤方式的对比如表 4.3 所示。

表 4.3 不同过滤方式对比

过滤方式	效率	阻力	容尘（清洗）	尺寸（厚度）	其它
纤维过滤（玻纤） 纤维不带静电	效率高，且效率随使用时间提高	大	不可清洗 日常更换	较大	无副作用
纤维过滤（化纤） 纤维带静电	初始效率高，但随使用时间逐渐降低	较大	清洗次数有限	较大	无副作用
静电过滤器	可高可低	小	可清洗	较小	二次污染 脱尘

纤维过滤虽然效率高，但它不可避免地需要对过滤介质进行更换，这对于资源紧张的火星基地是不合适的。因此在本设计中采用的是静电过滤器。由于火星基地内颗粒物的最大允许浓度要求为 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ ，即基地内的洁净度要求不高，使用静电过滤器完全可以满足室内颗粒物净化的要求。

4.3 送回风方案

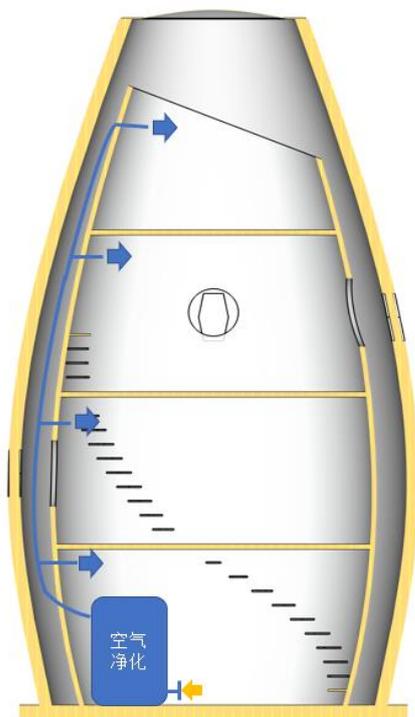


图 4.6 送回风布置示意图

基地内的大气净化再生系统与送回风管路布置如图 4.6 所示。大气净化再生系统布置在基地的一层，系统直接从一层空间引入回风，将空气进行净化再生后，由贴附在内壳外侧布置的送风管道送进各层空间。由于各层空间之间并不是封闭的，所以即便系统的回风口只设置在一层，而

装订线

不是在每个楼层都设置回风口，基地内的空气也能够循环流通起来。

供气与舱压调节系统也使用同一套送风管路将供应的气体送入各层空间，这样可以减少管路的布置。具体的实现方法是将供气与舱压调节系统中混合器的出气管连接在大气净化系统出口送风管道上。由于供气系统的供气量比净化系统需要处理的风量小很多，使用同一套送风管路不会对净化系统造成明显影响。

4.4 本章小结

首先，本章对火星基地内的大气净化再生系统进行了总体的方案设计，其中空气净化系统与供气调压系统两个次级系统相对独立，本文针对两个次级系统进行了总体设计。确定好总体的方案后，明确了系统间的物质流动关系。本文设计的方案在总体上最大程度地实现了物质的充分循环再生利用，可以更加长久持续的运作。

其次，通过对比航天工程中应用过以及正处于研究中的技术方案，确定大气净化再生系统中各子系统的技术方案（表 4.4）。

表 4.4 大气净化再生系统子系统技术方案

子系统	技术方案
制氧系统	SPE 电解水制氧
二氧化碳捕集	分子筛吸附
二氧化碳还原	Sabatier 反应器、甲烷高温裂解
VOCs、氨气	活性炭吸附
CO、H ₂	催化氧化
酸性气体	阴离子树脂
颗粒物浓度控制	静电过滤器

最后，确定了在一层回风、往四层空间分别送风的送回风方案。

装
订
线

5 设备的选型计算

本章将会对设计中的主要设备进行选型计算。

本设计中涉及到如 SPE 水电解系统等需要专业相关人员进行设计，但这些系统可以找到现成的产品设备，因此本设计会基于现有的设备进行一些修改，给出设备的相关参数。此外，本设计涉及到的设备还包括如二氧化碳还原装置、甲烷裂解装置、催化氧化装置等没有现成产品，需要相关专业人员进行定制设计的设备，本文不做过多深入，仅对其气体处理量、接口大小、外形尺寸作简单的规定。

以下是空气净化再生系统相关设备的设计计算。

5.1 供气与舱压调节系统设备选型计算

5.1.1 SPE 水电解制氧系统

基于美国通用电气公司为 NASA 的再生式生命保障计划研制的一个 SPE 水电解制氧系统，本设计给出应用在火星中的 SPE 水电解系统相关参数，如下表 5.1 所示。

表 5.1 SPE 水电解系统主要参数

项目	参数
电解池数量	12
每个电解池的有效面积 (cm ²)	213
最大电流密度 (mA/cm ²)	279
工作温度 (K)	356
单个电解池制氧量 (kg/day)	0~0.5
总制氧量 (kg/day)	0~6.0
电源	AC: 115V±5%, 60Hz±1% AC: 28V±4%

该 SPE 水电解制氧系统可以自动工作，也可以人为操控控制工作。电解室中有 12 个独立的电解池（图 5.1），每个电解池的有效面积为 0.0213m²，系统最大制氧量达到 6.0kg/day。基地内的氧气供应负荷为 5.41kg/day。因此该系统可以为本设计中的火星基地供应足够的氧气。

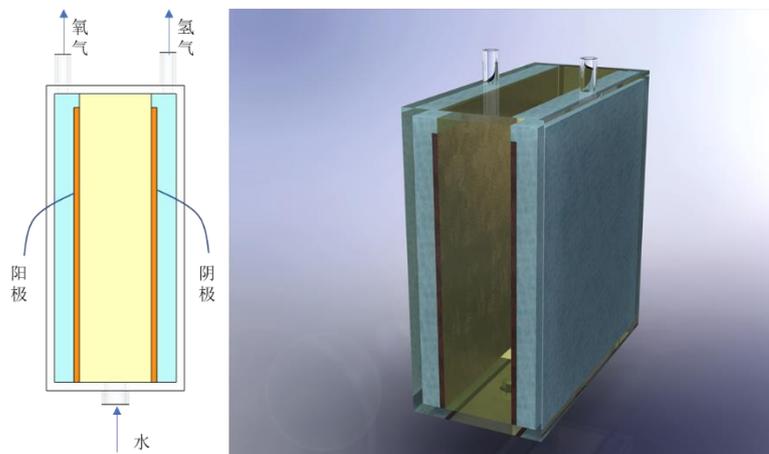


图 5.1 单个电解池结构示意图（左）及模型渲染图（右）

5.1.2 高压氧气储罐

高压氧气储罐的作用主要有两点：稳定供气压力和储存氧气。氧气罐内的氧气能够在供氧装置出现故障时维持室内的氧气供应一段时间，给宇航员充分的时间对设备进行维修。此外，氧气罐还能连接应急供氧系统，为宇航员们的宇航服紧急供氧。

本设计工作中采用两个工作压力为 3MPa 的高压氧气罐，两个氧气罐都连接在供气管路与充气管路上，由两个换向阀控制氧气罐的充气与供气。当其中一个氧气罐供应室内氧气时，另一个氧气罐就连接到制氧装置上充气。当供气氧气罐中的气压低于某个设定值时，则转动换向阀，向原本的供气氧气罐中充气而用充满气体的氧气罐供气。

单个氧气的容量需要能够满足基地内一天的氧气供给需求，即氧气罐的容量为 5.41kg。通过 (5-1) 计算出高压氧气罐的体积容量。

$$V = 1000 \times \frac{M}{M_{\text{mol}}} \times 22.4 \times \frac{P_0}{P_w} \quad (5-1)$$

- 式中：
- V ——某气体储罐容积，L；
 - M ——储罐的质量容量，kg；
 - M_{mol} ——该种气体的摩尔质量，kg/kmol；
 - P_w ——储罐的工作压力，kPa；
 - P_0 ——基地内大气压力，kPa。

计算得到一个氧气罐的容积为 128L。

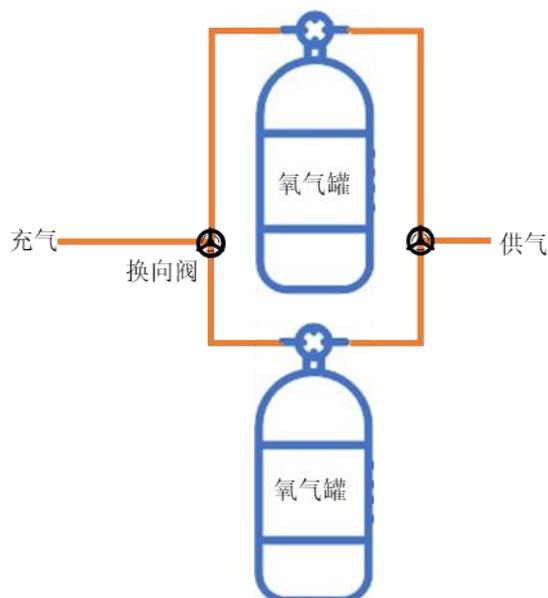


图 5.2 高压氧气罐连接示意图

5.1.3 高压氮气储罐

室内氮气的供应同样采用两个 3MPa 的高压氮气罐来实现连续供应。高压氮气罐的容量计算方法与氧气罐相同。氮气罐的储量要能够满足室内一天的供给量，即容量为 0.83kg。同样通过式

(5-1) 可以计算得到氮气罐的容积为 22L。

5.1.4 氧气增压泵

SPE 水电解系统产生的氧气需要通过氧气增压泵压入到高压氧气罐中，因此需要对氧气加压泵进行选型。根据 SPE 电解水系统产生的氧气为常压 (0.1MPa)，高压氧气罐的工作压力为 3MPa 这两个已知条件，以及每日氧气的供应量为 5.41kg/day，转换成体积后为 2.63 L/min，可以选择出氧气加压泵的型号参数。

参考现有的空气加压泵的产品，本设计中将会采用的增压泵参数如下表 5.2 所示。

表 5.2 氧气增压泵参数

增压比	最小气体入口压力 P_A (MPa)	最大气体入口压力 P_A (MPa)	最大允许出口压力 P_B (MPa)	最大流量 L/min@ $P_L=0.1$ MPa
30	0.1	3	3	5

5.2 空气净化系统设备选型计算

5.2.1 分子筛吸附床

(1) 设计指标

本文设计的实用型分子筛二氧化碳清除装置以火星基地为应用对象，设计指标包括：

- a 可支持 6 名宇航员同时在火星基地内工作；
- b 控制火星基地室内 CO_2 浓度在 0.3%。

(2) 脱附工艺的选择

选择微波加热作为分子筛变真空变温工艺的加热手段。

(3) 工艺过程

每个床层的工艺过程包括以下 4 步：吸附、回收、脱附、吹冷。

- a. 吸附：空气被风机送入处于吸附工段的吸附床进行吸附，除去二氧化碳后由空气出口排出；
- b. 回收：吸附床吸饱和后进入回收工段，微波发生器开始产生微波对分子筛进行加热，同时进、出口真空阀关闭，余气回收阀开启， CO_2 出口阀关闭，真空泵将床层内余气抽出送至其他吸附床进行吸附，以免同脱附的二氧化碳一起排出；

c. 脱附：分子筛温度升至 $50^\circ C$ 以上后进入脱附工段，余气回收阀关闭， CO_2 出口阀开启，真空泵将吸附的 CO_2 脱附并排出；

d. 吹冷：脱附完成后进入吹冷工段，空气出口阀关闭，吹冷阀打开，其他床层吸附完毕的洁净空气进入本床层进行吹冷；

床层温度降至 $50^\circ C$ 以下后再次进入吸附工段，吹冷阀关闭，空气出口阀打开，开始新一轮工作。其工艺流程见图 5.3。

(4) 工艺设计

本设计中，分子筛材料在空速 $2000h^{-1}$ ，气温 $24^\circ C$ ，相对湿度 60%，进口浓度 0.3% 条件下吸附性能如表 5.3。

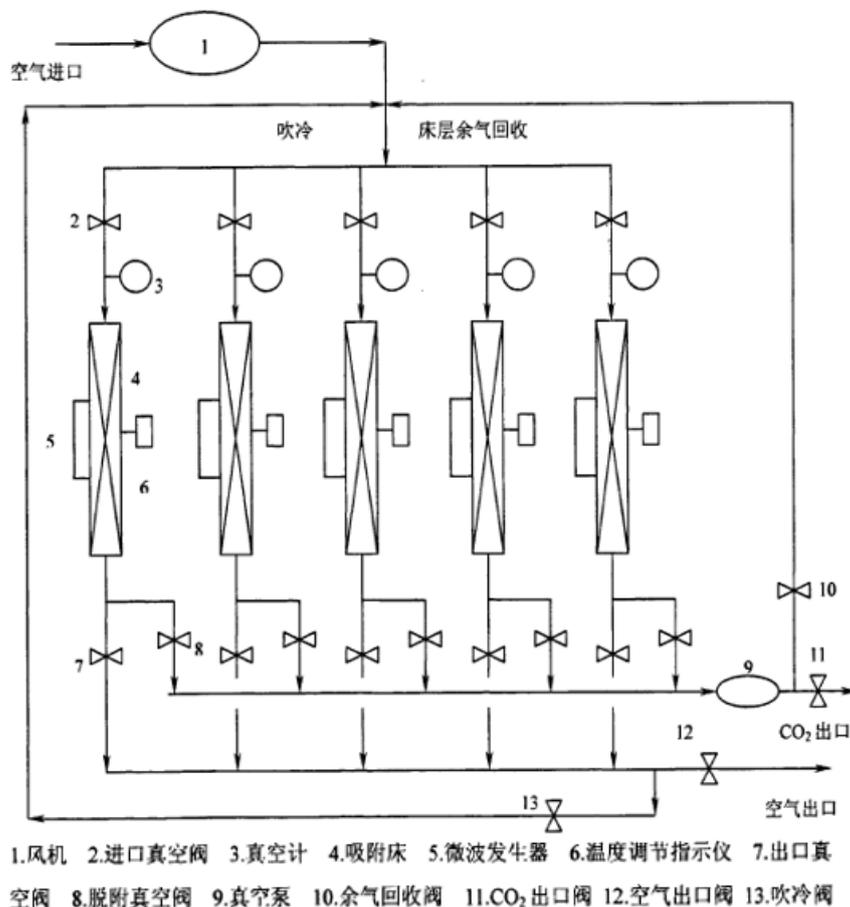


图 5.3 分子筛二氧化碳清除装置工艺流程图^[5]

表 5.3 分子筛材料吸附性能

有效吸附时间	脱附温度	脱附时间	吹冷时间	吸收效率
18min	130℃	18min	8~9min	≥80%

火星基地内二氧化碳的产生量为

$$V_{CO_2} = 5.82 \text{ kg/day} \div 44\text{kg/kmol} \times 22.4\text{m}^3/\text{kmol} \div 24\text{h} = 0.12\text{m}^3/\text{h}$$

考虑工作强度较大时 CO₂ 释放量增加，分子筛二氧化碳清除装置的处理量应达到 0.15 m³/h。因此装置风量为：

$$Q_1 = 0.15 / (0.3\% \times 80\%) = 62.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

在空速 2000 h⁻¹ 情况下，处于吸附状态的床层吸附剂体积应为：

$$V = 62.5 / 2000 = 0.031 \text{ m}^3$$

由于分子筛吸附剂脱附时间为 18min，与有效吸附时间相当，吹冷时间为 8~9min 左右，故吸附 / 脱附床 / 吹冷床采用 2 : 2 : 1 的比例配置。此时单个床层容积应为：

$$V_{床} = 0.031 / 2 = 0.0155\text{m}^3$$

各床层工作时段分配如表 5.4。

表 5.4 分子筛二氧化碳清除装置床层运行时间分配表

0	1#床	2#床	3#床	4#床	5#床
1~9min	吸附	吸附	脱附	脱附	吹冷
10~18min	吸附	脱附	脱附	吹冷	吸附
19~27min	脱附	脱附	吹冷	吸附	吸附
28~36min	脱附	吹冷	吸附	吸附	脱附
37~45min	吹冷	吸附	吸附	脱附	脱附
46~54min	吸附	吸附	脱附	脱附	吹冷

床层高径比设置为 2: 1, 可计算出床层

$$\frac{1}{4} \pi D^2 \times 2D = 0.0155m^3$$

解之得: $D=0.21m$ 。

因此床层尺寸为:

直径 $D=210mm$

高度 $H=420mm$

在此基础上, 考虑其他设备如所占体积, 分子筛二氧化碳吸附装置外形尺寸约为:

$$500mm \times 700mm \times 500mm$$

(3) 装置的技术参数

经过上述设计计算后, 可以得到火星基地分子筛二氧化碳清除装置的技术参数如表 5.5。

表 5.5 分子筛二氧化碳清除装置技术参数

CO ₂ 处理量	风量	控制基地内的 CO ₂ 浓度	装置体积
0.15m ³ /h	62.5m ³ /h	≤0.3%	5000mm×700mm×500mm

(4) 装置的三维模型及渲染后的效果如图 5.4。

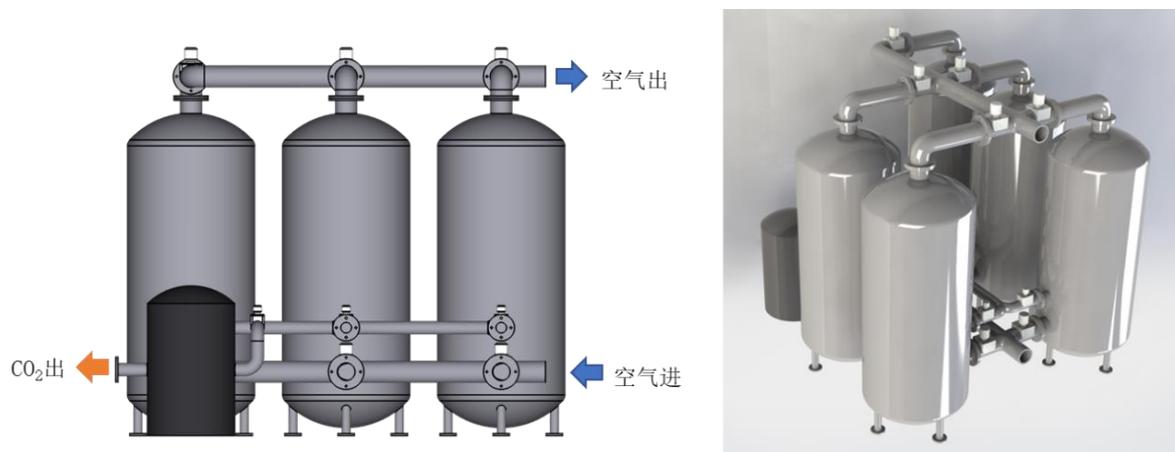


图 5.4 五床分子筛示意图 (左) 及渲染图 (右)

5.2.2 活性炭床

本设计中采用活性炭纤维材料对室内的 VOCs 以及包括氨气在内的有气味的气体进行吸收。由于氨气等有气味的气体散发量远小于基地内 VOCs 的散发量，且氨气允许最大浓度也高于 VOCs 最大允许浓度。因此在活性炭床的选型计算中，主要考量活性炭对 VOCs 的吸收。

活性炭纤维材料对 VOCs 吸收效率能够达到 90%以上，同时，活性炭对 VOCs 的最大吸附容量可以达到自身重量的 30%以上。本设计中，活性炭床的设计最大吸附容量按一个火星年（687 天）基地内产生的 VOCs 的量计算。基地内的 VOCs 的发生量为 844.62 mg/day，一个火星年产生的 VOCs 的总量为

$$844.62\text{mg/day} \times 687\text{day} = 580\text{g}$$

活性炭对 VOCs 的自身重量的 30%计算，则需要的活性炭的总量为

$$580\text{g} \div 30\% = 1933\text{g}$$

室内允许的最大 VOCs 浓度为 0.6mg/m^3 ，为了能够清除室内产生的 VOCs，需要进行处理的空气量至少为

$$Q_2 = \frac{844.62\text{mg/day}}{24\text{h/day} \times 90\% \times 0.6\text{mg/m}^3} = 65.2\text{m}^3/\text{h}$$

5.2.3 催化氧化装置

催化氧化装置主要对基地环境中的一氧化碳和氢气进行氧化处理。装置需要处理的一氧化碳和氢气的量分别为 250.92mg/day 和 307.68mg/day ，一氧化碳与氢气的最大允许浓度均为 5mg/m^3 。假定催化氧化装置对于一氧化碳与氢气的转化效率为 90%，可以计算出需要处理的空气量为：

$$Q_3 = \frac{307.68\text{mg/day}}{24\text{h/day} \times 90\% \times 5\text{mg/m}^3} = 2.8\text{m}^3/\text{h}$$

5.2.4 阴离子树脂

阴离子树脂需要处理的包括室内产生的 H_2S 以及 CO 催化氧化得到的 CO_2 ，由于 CO_2 还可以由净化系统中的分子筛进行吸附，故阴离子树脂的主要目的是去除空气中的 H_2S 。由前文负荷计算得到，基地内 H_2S 的发生量为 1.74mg/day ，而基地内 H_2S 的最大允许浓度为 0.8mg/m^3 。假定阴离子交换树脂对 H_2S 的吸收率达到 90%，由此可以计算出需要进行处理的最小风量为

$$Q_4 = \frac{1.74\text{mg/day}}{24\text{h/day} \times 90\% \times 0.8\text{mg/m}^3} = 0.1\text{m}^3/\text{h}$$

将活性炭床、催化氧化装置、阴离子树脂罐装配在一起，得到微量污染物净化系统，系统装配好后的效果如图 5.5 所示。

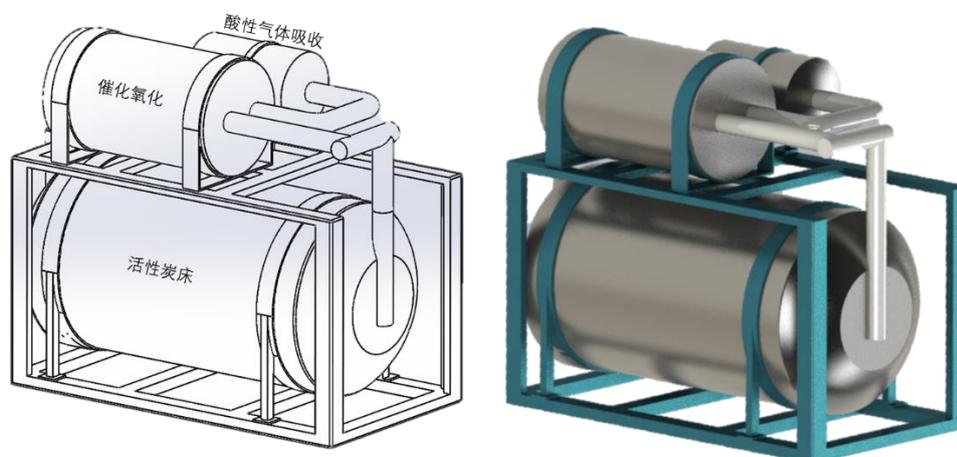


图 5.5 微量污染物净化系统线图（左）与渲染图（右）

5.2.5 静电过滤器

(1) 室内空气净化系统的静电过滤器

静电除尘器的效率为 80%，需要过滤的颗粒物为 160.82 mg/day，因此需要进行处理的风量为：

$$Q_5 = \frac{160.82 \text{mg/day}}{24 \text{h/day} \times 80\% \times 0.15 \text{mg/m}^3} = 55.8 \text{m}^3/\text{h}$$

静电除尘器尺寸选择与风量有关。由于空气净化系统中各个设备是采用串联方式连接的，系统的风量取前述设备处理风量的最大值，即

$$Q = \max[Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5] = 65.2 \text{m}^3/\text{h}$$

静电除尘器的迎面风速取为 1m/s，则静电除尘器的面积需要达到

$$S = \frac{65.2 \text{m}^3/\text{h}}{3600 \text{s/h} \times 1 \text{m/s}} = 0.018 \text{m}^2$$

最终选择采用尺寸为 200×100×100mm 的静电除尘器。

(2) 过渡舱中的静电过滤器

在火星基地的过渡舱中同样也采用静电过滤器作为颗粒物过滤装置。

过渡舱内的颗粒物浓度要求在短时间内降低到与基地内部最大允许浓度相同的浓度，则需要过渡舱内进行大风量的过滤。本设计中，过渡舱的每分钟过滤的风量相当于过渡舱的容积，即 4.5m³/min。过滤器迎面风速取 1m/s，则过滤器迎风面积应为 0.075m²。因此，静电过滤器的尺寸可以取为 250×300×100mm。

建立好静电过滤器的三维模型，经过渲染后得到的静电除尘器效果图如图 5.6 所示。



图 5.6 静电除尘器渲染效果图

5.2.6 风机

火星基地上的风机都需要定制，此处只给出风机的额定风量与压头的要求。

（1）空气净化再生系统的风机

风量：前文已经提到，空气净化再生系统的风量为 $65.2\text{m}^3/\text{h}$ ，本设计中选择风量为 $70\text{m}^3/\text{h}$ 的风机。

压头：系统中压头的主要损失存在于净化机组内部，由于风量小，管路的压头损失相较于净化机组内部的压头损失很小。假定机组内部的压头损失为 500Pa ，为了能够留有余量，本设计中选择额定出风压力为 600Pa 的变频风机。

（2）过渡舱风机

风量：过渡舱的空气循环过滤次数按 60 次取，即风机的额定风量为 $270\text{m}^3/\text{h}$ 。

压头：过渡舱过滤风道较短，压头损失较小，此处选择的风机额定出风压力为 50Pa 。

在 Solidworks 中建立好风机的模型，得到风机的渲染效果如图 5.7 所示。

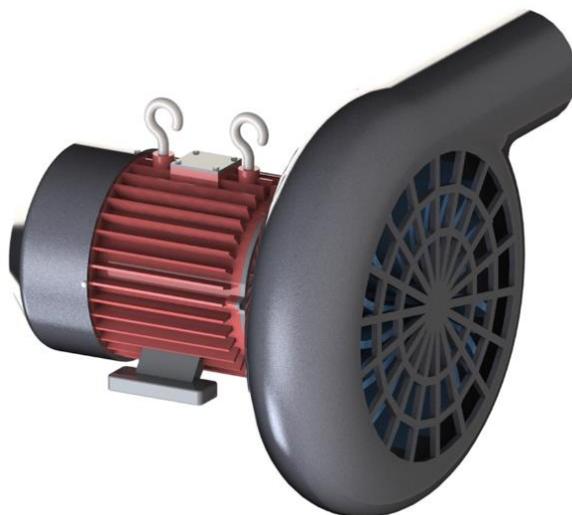


图 5.7 风机渲染效果图

装
订
线

5.3 管道选型及水力计算

基地内风管的布置如图 5.8 所示。本设计中采用圆形的普通钢板风管，四层的送风量相同，均为 $16.3\text{m}^3/\text{h}$ 。采用假定流速法对送风管道进行选型和水力计算，结果见表 5.6。

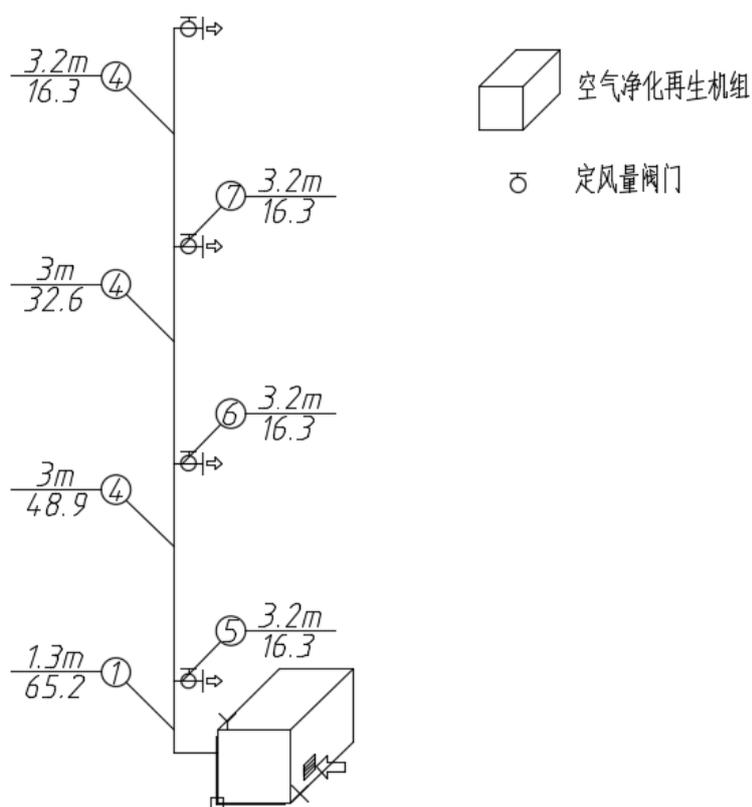


图 5.8 风管布置示意图

表 5.6 水力计算结果

编号	管长 (m)	流量 (m^3/h)	直径 (mm)	流速 (m/s)	沿程阻力损失 (Pa)	局部阻力损失 (Pa)	总阻力损失 (Pa)
1	1.3	65.2	90	2.8	2.2	5.2	7.4
2	3	48.9	80	2.7	5.5	4.6	10.1
3	3	32.6	80	1.8	2.6	2.1	4.7
4	3	16.3	80	0.9	0.8	3.1	3.8
5	0.2	16.3	80	0.9	0.1	2.8	2.9
6	0.2	16.3	80	0.9	0.1	2.8	2.9
7	0.2	16.3	80	0.9	0.1	2.8	2.9

送风管路中的最不利管路为 1-2-3-4，管路的总阻力损失为 26Pa 。离空气净化机组最近的管路为 1-5，其管路总阻力为 10.3Pa 。可以看到管路的阻力都很小，变风量阀门造成的阻力损失在管路阻力损失占到主导地位，通过调节变风量阀门进行调节使得各送风口的送风量均匀。

5.5 本章小结

本章对空气净化再生系统中的主要设备进行了选型计算。结合室内的负荷以及相关设备的性能特性，确定了设备尺寸、处理的负荷等参数。

运用三维建模软件对空气净化再生系统中的各设备进行了建模，完成了系统的装配，渲染后得到的系统效果图见图 5.9。

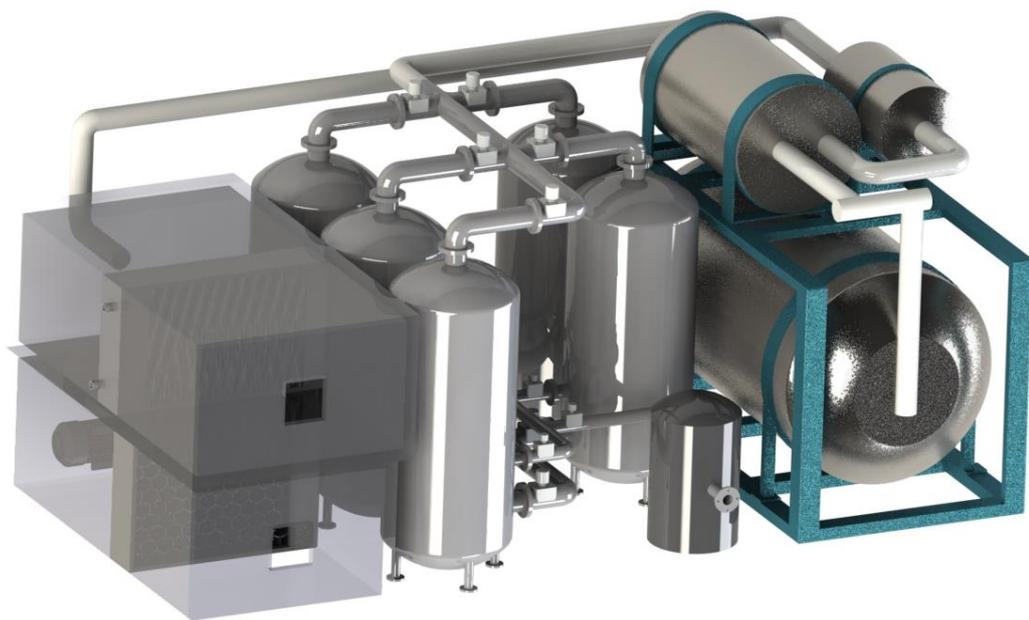


图 5.9 空气净化再生系统渲染效果图

装

订

线

6 运行模拟

本章将根据火星基地内人体释放污染物的速率变化规律，模拟基地内各污染物浓度的变化，验证本设计能够将基地内污染物浓度控制在最大允许浓度之下，确保基地内人员的长期健康生活，为他们的生命活动提供支持保障。

6.1 污染物释放规律

火星基地内污染物主要由人体代谢活动产生，此外，仪器设备也会释放出少量的 VOCs。

人体微量污染物的释放规律与人的活动强度有关。根据有关的实验结果，在不同运动状态下，人体代谢释放各微量污染物的速率如表 6.1 所示。

表 6.1 不同活动状态下人体释放微量污染物速率 (mg/ (人·day))

微量污染物	安静状态	轻度活动状态	中度活动状态
VOCs	48.91	71.02	120.61
一氧化碳	19.75	24.26	41.82
氢气	20.49	24.87	51.28
氨气	1.91	2.99	5.81
硫化氢	0.18	0.15	0.29

此外，平均每个宇航员代谢产生二氧化碳的速率为 0.97kg/day。此处做出假设：当人体处于轻度活动状态时，其释放的二氧化碳速率与平均值相等；当人体处于安静状态时，其二氧化碳的释放速率为平均速率的 80%；当人体处于中度活动状态时，其二氧化碳释放速率为平均释放速率的 120%。折算成百分比浓度后，人员的二氧化碳释放规律如表 6.2。

表 6.2 人体二氧化碳释放规律 (ppm/ (人·day))

安静状态	轻度活动状态	中度活动状态
30.5	38.2	45.8

基地内人员的作息规律如表 6.3 所示

表 6.3 宇航员作息规律

时间	活动
6:00~7:00	早餐（轻度活动）
7:00~12:00	工作（中度活动）
12:00~13:00	午餐休息（轻度活动）
13:00~17:00	工作（中度活动）
17:00~18:00	晚餐休息（轻度活动）
18:00~22:00	锻炼、娱乐（中度活动）
22:00~次日 6:00	睡觉（安静状态）

人员不同活动状态下，代谢产生的各种污染物（CO₂、VOCs 等）的速率也不相同。根据人员的作息规律以及不同活动状态下各污染物的释放速率，可以得到基地内因人体代谢活动产生各种污染物的速率的变化规律，结果如表 6.4 所示

表 6.4 火星基地内人体代谢产生各污染物的释放规律

时间	VOCs (mg/h)	CO (mg/h)	H ₂ (mg/h)	NH ₃ (mg/h)	H ₂ S (mg/h)	CO ₂ (ppm/h)
6:00~7:00	17.75	6.05	6.21	0.75	0.038	229
7:00~12:00	30.15	10.46	12.82	1.45	0.072	275
12:00~13:00	17.75	6.06	6.21	0.75	0.038	229
13:00~17:00	30.15	10.46	12.82	1.45	0.072	275
17:00~18:00	17.75	6.06	6.21	0.75	0.038	229
18:00~22:00	30.15	10.46	12.82	1.45	0.072	275
22:00~次日 6:00	12.23	4.93	5.12	0.48	0.045	183

人的活动也会影响到颗粒物的产生量。在中度活动状态下，一个人的发尘量按 1.01×10^6 pc/min 计算；轻度活动状态下，一个人的发尘量按 5×10^5 pc/min 计算；安静状态下一个人的发尘量按 1×10^5 pc/min 计算。科研活动发尘量方面，白天（6:00~22:00）科研活动正常进行，发尘量为 3×10^6 pc/min；夜间（22:00~次日 6:00）科研活动减少，只有少部分可以自动进行的活动还在开展，此时发尘量取为 1×10^6 pc/min。建筑材料的发尘量与一天内的时间变化无关，可视为定值，

为 4.62×10^5 pc/min。将以上数据带入到式（3-4）及式（3-5） $M_{\text{dust}} = 24 \times 60 \times \frac{4}{3} \pi d^3 \rho N_{\text{dust}}$

（3-5）中计算可以得到室内发尘量的变化规律，结果如表 6.5 所示。

表 6.5 基地内发尘量变化规律

时间	发尘量 (mg/h)
6:00~7:00	4.55
7:00~12:00	6.70
12:00~13:00	4.55
13:00~17:00	6.70
17:00~18:00	4.55
18:00~22:00	6.70
22:00~次日 6:00	1.45

在仪器设备方面，白天和夜间设备的使用数量也有所不同。此处假设白天（6:00~22:00）仪器设备的同时使用系数为 0.7，夜间（22:00~次日 6:00）设备的同时使用系数为 0.5。因此，仪器设备白天和夜间释放 VOCs 的速率也不相同。设备白天和夜间释放 VOCs 的速率可见表 6.6。

表 6.6 仪器设备 VOCs 释放规律

白天	夜间
5.04mg/h	3.6mg/h

6.2 火星基地污染物浓度计算模型

6.2.1 假设

为了对基地内的污染物浓度的模拟计算，作出以下假设：

(1) 由于基地的空间较小，基地内各层空间之间的空气是互通的，送回风的布置方式也促进了不同层空间之间的空气流通，因此，在模拟计算时认为基地内空气中污染物的分布是均匀的。

(2) 本次模拟中考量的是十天时间内因基地内各污染物散发的速率变化导致的空气中污染物浓度的变化，在十天的时间内，各净化设备的性能是相对稳定的。因此将各设备的净化效率视作定值，不随时间以及进风污染物浓度的变化而变化。

(3) 本设计中净化机组出口到最远的送风口的距离为 10.5m，管道内的平均风速到达 1m/s 以上，所以空气流经送风管道的的时间小于 10s；在净化机组内部，由于管路较短，空气流经其中的时间也不会很久。而在模拟计算时，一个时间步长为 1min，因此忽略空气从回风口进入净化机组到从送风口被送出的时间，即空气的净化是瞬间完成的。

(4) 空气净化机组的全天运行，并且一直保持风量不发生变化，即机组的处理风量是定值。

6.2.2 模型建立

根据上面的假设，利用物质平衡，即火星基地内空气中污染物的增量等于基地内污染物的散发量减去被空气净化系统除去的污染物的量。由此，可以得到火星基地内的浓度变化的关系式，如式 (6-1) 所示。

$$V \frac{dC}{dt} = M(t) - \eta QC \quad (6-1)$$

式中： V ——火星基地体积；

$\frac{dC}{dt}$ ——基地内空气中某污染物浓度对时间的微分；

$M(t)$ ——基地内某污染物的释放速率；

η ——净化机组对某污染物的净化效率；

Q ——净化机组的风量；

C ——室内某污染物的浓度。

该式是一个一阶线性非齐次微分方程，该方程的通解为：

$$C = ae^{-\frac{\eta Q}{V}t} + e^{-\frac{\eta Q}{V}t} \cdot \int \frac{M(t)}{V} e^{\frac{\eta Q}{V}t} dt \quad (6-2)$$

式中 a 为常数，需要带入初始条件确定其数值。当 $t=0$ 时， $C_0 = a$ ，即 a 代表初始时刻室内污染物的浓度。

6.2.3 初始条件

此处直接假定初始时刻各污染物浓度均处于火星基地内的最大允许浓度。

6.3 运行模拟结果

运用 Matlab 编写程序，画出各污染物浓度时间的变化曲线。

从模拟得到的结果（图 6.1、图 6.2）可以看到室内各污染物浓度都能够很好地控制在最大允许污染物浓度之下。而且，可以明显观察到的是火星基地内各种污染物的浓度在宇航员们去睡

觉时达到最大值，随着宇航员们睡着后活动的减少，各种污染物的释放速率下降，室内的污染物浓度也随之下降，等到宇航员们起床开始工作后，室内的污染物浓度也随着人员的活动而增加。

装
订
线

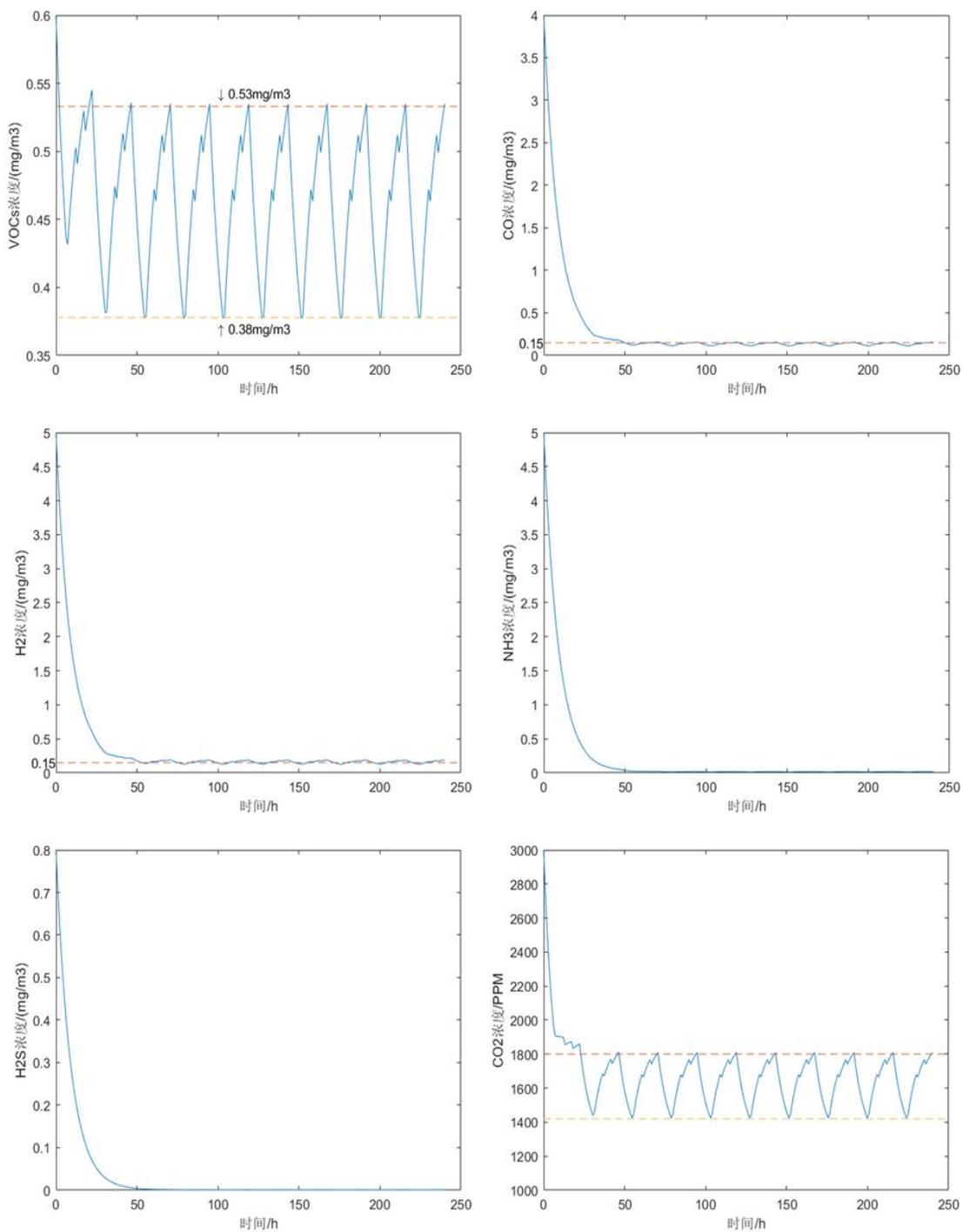


图 6.1 室内各污染物浓度变化规律

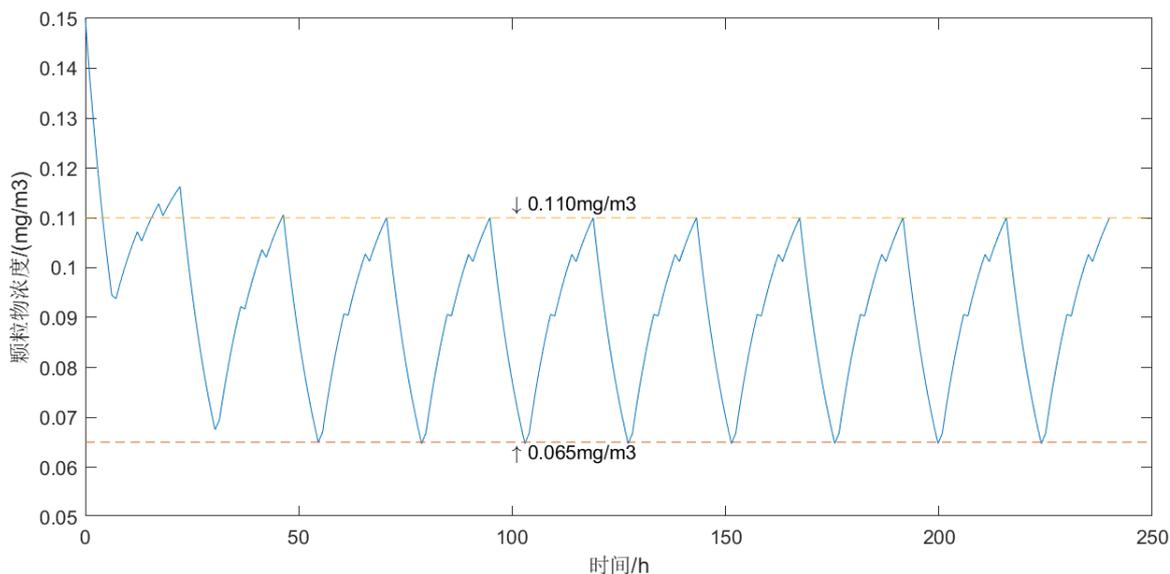


图 6.2 火星基地内颗粒物浓度变化

在火星基地内的各种污染物中，CO、H₂、NH₃、H₂S 等污染物在稳定时的浓度远低于最大允许污染物浓度，CO、H₂ 的浓度在稳定时为 0.15mg/m³ 左右，而 NH₃ 和 H₂S 的浓度则接近为 0。这说明本设计中的空气净化系统完全能够处理火星基地内的相关污染物，而且还有相当大的裕量。

而 VOCs、CO₂ 以及颗粒物的浓度随着时间的变化有较大幅度的波动，但模拟的结果也表明了即便是污染物浓度波动的峰值也仍然低于室内污染物最大允许值。说明系统能够很好地处理相关的污染物。其中唯一有不足的是 CO₂ 的浓度维持在一个较高的水平，含二氧化碳的浓度为 1400~1800ppm 的空气会让人感觉浑浊，并让人昏昏欲睡。

6.4 运行策略优化

但值得注意的是，目前的运行策略是空气净化机组全天运行，风量也一直保持为 65.2m³/h。在夜间，人体代谢活动减弱，相关的污染物释放速率也会降到一个比较低的数值。此时如果降低空气净化机组的处理风量，在满足基地内污染物浓度控制的要求的同时，还可以有效降低空气净化机组中风机以及相关污染物净化设备的能耗。为此，提出将空气净化机组的风量在夜间减半，以减少空气净化机组能耗，并同时进行了污染物浓度的模拟，验证室内的污染物浓度不会超出要求的范围。模拟结果如图 6.3。

从模拟结果可以看出，将空气净化机组夜间处理风量减半后，稳定后空气中污染物的浓度会有所上升，但都没有超过最大允许污染物浓度。因此，调节夜间空气净化机组的风量以节约能源消耗的方法是可行的。

装

订

线

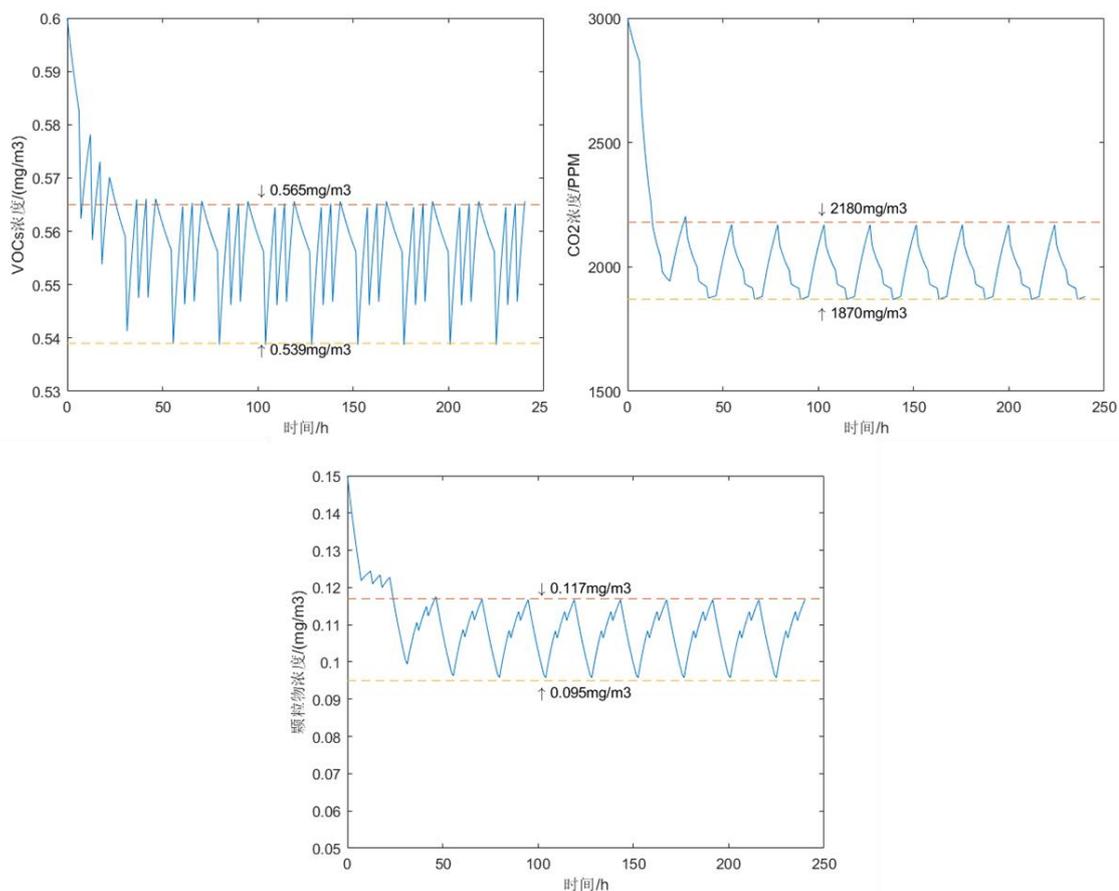


图 6.3 优化后的模拟结果

6.5 本章小结

本章的目的在于模拟大气净化再生系统在火星基地中的运行情况，寻求较好的运行控制策略。为了达成这样的目的，本章作了以下工作：

- (1) 通过宇航员的作息规律以及设备的开启情况，计算得出了基地内污染物的释放规律；
- (2) 基于一些假设，通过物质平衡关系建立起了室内污染物浓度变化的模型；
- (3) 模拟了基地内的污染物浓度变化；
- (4) 提出了一种更节能的控制策略，通过模拟验证了该运行策略下基地内污染物的浓度仍能控制在要求的最大允许浓度之下。

7 总结和展望

7.1 总结

本文针对火星基地所处极端恶劣环境条件下空气净化再生的需求，提出了一套适用于火星环境的空气净化再生系统的概念设计方案。特别的，本文考虑到火星上资源贫乏、物资补给不便的情况，结合最新的航天科技，设计了一套能够实现资源循环再生的空气净化再生系统。相较于目前已经应用于各类载人航天器上的空气净化再生系统，本设计可以长时间可再生地运作，而不需要从地球上进行大量的补给，更适合于如火星基地等长期的载人航天任务。本设计的主要内容可以归结如下：

(1) 搭建火星基地模型，同时确定了基地内人员、设备的数量，并对人员的活动、设备的使用情况作了相应的规定，确定了后续负荷计算的基础。

(2) 在前人实验测得的数据基础上，计算得到了基地内空气净化再生系统的相关负荷，包括氧气、氮气的供应负荷，二氧化碳、微量污染物、颗粒物的清除负荷。此外，根据相关的文献资料，确定了火星基地内各污染物的最大允许浓度。

(3) 提出了空气净化再生系统的总体设计，对各子系统的实现的技术方案进行了对比分析。其中，供氧采取电解水制氧方案，二氧化碳的清除采取五床分子筛吸附方案，VOCs 的清除采取活性炭吸附方案。这些采用的都是可再生式的技术方案，能够有效的延长系统的运行时间。此外，本设计与目前空间站上使用的空气净化再生系统的一大不同在于本设计采用了 Sabatier 反应器，利用电解水制取的氢气，对分子筛捕集到的二氧化碳中的氧元素进行了回收，更大程度上实现了物质的再生。

(4) 根据负荷对设备进行了选型计算，确定了空气净化再生系统中主要设备的相关参数。

(5) 对系统的运行情况（污染物浓度的控制）进行了模拟，验证了本设计能够将火星基地的污染物浓度控制在所要求的最大污染物浓度之内。提出了优化的运行策略，根据模拟结果再次验证优化后的策略同样能够实现对基地内污染物的控制。

(6) 完成了系统中相关设备的三维模型搭建，为实物模型的制作奠定好了基础。

7.2 展望

本文为未来火星基地的建设提供了一套可再生的空气净化再生系统的概念设计方案，但由于该系统涉及范围广泛，因而在细节上仍存在很多问题有待研究和解决：

(1) 空气净化再生系统的负荷计算需要细化。本文在计算负荷时，将各部分负荷简化为不随时间变化的定值。事实上系统的负荷与人员额活动、设备的运行等情况有关，有待进行相关的实验测试，从而确定负荷的逐时变化，有利于提出最佳的运行控制策略。

(2) 部分设备有待相关专业的人士进行设计。空气净化再生系统中包含的一些仪器设备并没有现成的产品，如 Sabatier 反应器、SPE 水电解系统等。本文只说明了系统中所要求相关设备的关键参数，具体的设备设计需要有相关专业的人员来完成。

(3) 系统的性能变化有待研究。本文中做出简单假定，认为系统的性能不会随时间发生变

化，但实际上随着设备的使用时间增加，设备会有所损耗，系统的性能会发生变化。掌握系统的性能变化之后，可以对系统的运行情况进行更精确的模拟。

（4）需要对基地内污染物分布情况进行研究。可以通过 CFD 模拟火星基地内污染物的分布情况，进而优化送回风管路的布置，进而避免污染物在局部积聚，影响基地内人员的生命健康。

（5）相关实物模型的制作。实物模型有助于展示本文中的系统设计思路，但因为不可抗力因素被搁置，希望未来有机会能完成实物模型的制作。

装

订

线

参考文献

- [1] BANERDT WB, SMREKAR SE, BANFIELD D, *et al.* Initial results from the InSight mission on Mars[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(3): 183.
- [2] HESS SL, HENRY RM, LEOVY CB, *et al.* Early Meteorological Results from Viking 2 Lander[J]. Science, 1976, 194(4271): 1352-1353.
- [3] OWEN T, BIERMANN K. Composition of the atmosphere at the surface of Mars: Detection of argon-36 and preliminary analysis (Reprinted from Science, vol 193, pp 801-803, 1976)[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2003, 38(1): 9-10.
- [4] 夏益霖, 刘钟. 前苏联载人航天器的环境控制和生命保障系统[J]. 航天出国考察技术报告, 1993, 2: 30-41.
- [5] 陈玲, 王晓川, 余堃, 等. 化学氧发生装置制备技术研究进展[C]//全国危险物质与安全应急技术研讨会, 中国重庆, 2011. 8.
- [6] 范敏, 卜建杰, 郑邯勇. 氧蚀的研究现状与发展[J]. 舰船科学技术, 2006, (02): 16-20.
- [7] 许忠. 前苏联的封闭生物生命保障系统[J]. 中国航天, 1994, (06): 30+34.
- [8] Interactive Simulation-Based Testing of Product Gas Transfer Integrated Monitoring and Control Software for the Lunar Mars Life Support Phase III Test[J]. SAE International Journal of Engines, 1998, 107: 945-953.
- [9] GUO SS, MAO RX, ZHANG LL, *et al.* Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique[J]. REACH - Reviews in Human Space Exploration, 2017, 6.
- [10] 曾庆堂, 郑传先. 空间站水电解制氧技术[J]. 航天医学与医学工程, 1990, (03): 222-226.
- [11] 李军, 张香圃, 蒋亚雄, 等. SPE 电解水制氧(氢)技术的研究[J]. 舰船科学技术, 2003, (S1): 21-23+37.
- [12] 张信荣, 任建勋, 梁新刚. 载人航天器 SPE 水电解制氧系统的轻量化研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, (08): 1106-1109.
- [13] 张英杰. 狭小空间内温度和二氧化碳对人体舒适性影响实验研究[D]: 重庆大学, 2018.
- [14] 杜大庆. 空间站中分子筛清除二氧化碳技术研究[D]: 天津大学, 2010.
- [15] 王学松. 二氧化碳膜分离技术及其开发现状[J]. 化学世界, 1992, (01): 1-7.
- [16] 宋爽, 周定, 张全生. 电化学 CO₂ 去除方法的可行性研究[J]. 高技术通讯, 1997, (10): 48-51.
- [17] 赵燕山. 固态胺清除二氧化碳技术研究[J]. 舰船科学技术, 2001, (03): 23-28.
- [18] 宋鹏飞, 侯建国, 王秀林, 等. 二氧化碳甲烷化在载人航天器再生式环控生保系统中的应用[J]. 空间科学学报, 2017, 37(06): 717-723.
- [19] 周抗寒, 吴宝治, 任春波. 空间站 Sabatier CO₂ 还原系统的比较分析[J]. 航天医学与医学工程, 2011, 24(05): 384-390.
- [20] 王浚, 庞丽萍, 刘永绩. 空间站微量污染控制技术研究[J]. 载人航天, 2005, (02): 14-17.
- [21] CARRASQUILLO R. ISS ECLSS Technology Evolution for Exploration[C]//, 2005. American Institute of Aeronautics and Astronautics:
- [22] AI SPACEFACTORY A. MARSHA [M]. (2018-1-1)[2020-6-7]. <https://www.aispacefactory.com/marsha>.
- [23] 郭莉华, 徐国鑫, 何新星. 密闭环境中人体代谢微量污染物的释放行为研究[J]. 载人航天, 2013, 19(01): 71-76.
- [24] DESTAILLATS H, MADDALENA RL, SINGER BC, *et al.* Indoor pollutants emitted by office equipment: A review of reported data and information needs[J]. Atmospheric Environment, 2007, 42(7).

-
- [25] 陈霖新. 洁净厂房的设计与施工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [26] COUNCIL N. Spacecraft Maximum Allowable Concentrations for Selected Airborne Contaminants: Volume 4[J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1996, 95.

装

订

线

谢 辞

首先，感谢许鹏老师、吴利瑞老师的悉心教导。今年出现新冠疫情这个突发状况，许老师又身处美国无法面对面进行交流，但老师还是克服时差，通过线上的形式对我们的毕业设计工作进行批评指导。老师们的专业指导，为我解决了在毕业设计过程中遇到的诸多疑惑。

其次，感谢和我合作同一个项目的李国文同学。我们两人相互合作，互相监督，才能够按时完成毕业设计的相关任务。同时，在毕业设计的过程中遇到问题，我们可以相互探讨，合作解决。我在整个毕设过程中得到了他不少的帮助，在此表示感谢。

再有，感谢我的室友。他们在我撰写论文时对我论文的排版、格式修改提供了不少帮助，对相关内容也提了不少有价值的意见。

最后，感谢我的父母家人，感谢他们一直以来对我的支持。

装

订

线