

YANG Zhaoshu, LI Sen, ZHU Guangya, YANG Songlin, DING Pengbo, SUN Minzheng, CAO Shiyi. Design, Flow Field Simulation and Launching Cost Evaluation of a Space Laundry Platform (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 770–782. CSTR:32142.14.cjss.2024-0058. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0058

空间洗衣平台的设计、流场分析与 上行资源代价评估*

杨朝舒^{1,2} 李森¹ 朱光亚³ 杨松林¹
丁彭博¹ 孙民政¹ 曹适意¹

1(中国航天员科研训练中心 北京 100094)

2(人因工程全国重点实验室 北京 100094)

3(南京航空航天大学航空学院 南京 210016)

摘要 针对在轨中长期驻留阶段航天员衣物洗涤的迫切需求, 以及地面传统洗衣技术无法适用于微重力环境的问题, 设计了一种基于雾化臭氧原理的空间洗衣平台. 该平台利用超声雾化阵列将液态水雾化浸润衣物, 通过紫外照射产生臭氧用于除菌; 采用有限元方法对微重力环境下液滴与衣物的附着情况、洗衣平台的内流场进行了仿真分析, 重点分析了在微重力和地面重力条件下液滴在洗衣腔体内分布的均匀性区别. 在此基础上, 根据相对湿度、臭氧浓度等指标确定了预雾化时间、内循环风扇流量等参数; 随后, 采用等效系统质量的方法对雾化臭氧洗衣平台的上行资源代价进行了评估, 该洗衣技术在轨运行一年的资源代价仅为商选洗衣技术的 15.7%, 当在轨运行 5 年后, 相比于完全将衣物作为消耗品上行, 可节省 61.9% 的等效系统质量. 通过分析两种方法的收益平衡时间点可知, 对于任务周期超过 5 个月的空间站任务、周期超过 2.5 个月的深空探测任务, 发展在轨洗衣技术更具资源代价优势. 本文的工作有望为未来中国在轨洗衣技术的发展提供参考.

关键词 微重力, 在轨洗衣平台, 超声雾化, 臭氧, 等效系统质量

中图分类号 V444, V524

Design, Flow Field Simulation and Launching Cost Evaluation of a Space Laundry Platform

YANG Zhaoshu^{1,2} LI Sen¹ ZHU Guangya³ YANG Songlin¹
DING Pengbo¹ SUN Minzheng¹ CAO Shiyi¹

1(China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094)

2(National Key Laboratory of Human-factors Engineering, Beijing 100094)

3(School of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

* 人因工程全国重点实验室自主基金项目资助 (SYFD062102)

2024-04-15 收到原稿, 2024-09-05 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The urgent request for micro-gravity laundry technologies should be satisfied, especially for long-term on-orbit habitats for astronauts. However, the traditional, ground-based laundry techniques could not operate properly in microgravity environments. In this paper, a laundry platform based on atomization and ozone-sterilization technologies was proposed. The platform uses ultrasonic arrays to atomize liquid water and facilitate better immersion of clothing in microgravity environments; the ultraviolet lights were implemented to generate ozone for disinfection. Simulations based on finite element method were applied to study the changes in relative humidity and ozone concentration during the laundering process. Parameters studies were conducted and the pre-fogging time and ozone lamp configuration were determined. Subsequently, the resource cost of the proposed laundry platform was evaluated using the equivalent system mass method. It was found that the resource cost of running the platform for one year in orbit was only 15.7% of that of the commercial laundry technology. By using the on-orbit laundry platform and recycling the clothes, a total amount of 61.9% of the equivalent system mass could be saved compared to disposing all the clothes. Through the analysis of the benefit-balancing time of on-orbit laundry technology and the cost of transporting consumable clothes, it is shown that in future deep space exploration missions, developing on-orbit laundry technology is a more cost-effective option than transporting clothes as consumables, as long as the mission duration is longer than 2.5 months for space station missions, and 2.5 months for deep space exploration missions. The work of this paper could set a milestone for the development of the microgravity laundry platform for our country.

Key words Micro-gravity, On-orbit laundry platform, Ultrasonic-atomization, Ozone-sterilization, Equivalent system mass

0 引言

在空间站时代, 航天员的在轨时间将进一步延长, 发展空间洗衣技术已成为提高航天员在轨生活质量的重要课题之一。目前, 国内外飞行器尚未开发成熟的在轨洗衣平台, 衣物只能作为消耗品上行。根据美国国家航空航天局 (NASA) 的统计, 美国航天员每人每天的平均衣物消耗量为 0.206 kg, 中国航天员的平均衣物消耗量与此基本相当。以空间站 15 年的在轨寿命估算, 三人乘组共需消耗衣物质量将高达 3383.55 kg^[1]。同时, 在未来的月面长期驻留、登陆火星等深空探测任务中, 发展在轨洗衣技术对减少上行衣物质量也具有十分重要的意义^[2,3]。

以家用洗衣机为代表的地面洗衣技术通常利用水等液态介质对衣物进行浸泡、冲洗, 并通过溶解于水中的洗涤剂去除衣物上的污渍和细菌。然而, 这种洗衣技术难以直接应用于在轨微重力环境, 因为微重力环境下, 表面张力会使液体积聚成球形, 难以与衣物充分混合^[4,5]。此外, 地面洗衣机的洗涤废水中通常含有大量的泡沫, 在污水处理系统的水路循环系统中, 泡沫在微重力作用下会聚集在循环泵内部, 造成

“气缚”现象, 影响系统正常运行。最后, 地面洗衣机常用的各类化学洗涤剂难以降解^[6], 如果这些化学物质随水循环系统进入饮用水中, 会对航天员的生命健康造成威胁。

鉴于中长期载人航天任务对在轨洗衣技术的迫切需求以及地面洗衣机在微重力环境下的局限性, NASA 早在 20 世纪末就开展了空间洗衣技术的相关研究。1990 年美国 UMPQUA 公司为 NASA 研发了一款基于液态水的活塞型在轨洗衣平台^[7]。该装置采用柔性囊体的周期性膨胀—压缩来完成衣物洗涤, 随后通过微波加热的方式完成衣物的烘干。该方式可以减少液态洗涤工质含气量, 但需要较大的空间和耗水量^[8]。2012 年得克萨斯农工大学开发了一款在轨洗衣装置, 将衣物放入柔性可压缩袋体, 再注入洗涤液, 通过周期性的加注和抽空洗涤液完成衣物的洗涤和干燥^[9], 这种真空压缩袋型洗衣装置节水性更好, 但是每次只能洗涤单件衣物。2017 年, 美国 UMPQUA 公司公布了一款密封洗衣筒结构的微重力洗衣机^[8], 该装置需在真空环境下运行, 采用水蒸气作为洗涤介质, 并通过叶片旋转实现衣物与水蒸气混合, 并通过微波干燥衣物。该装置洗涤效果较好, 但系统复杂, 质

量、体积、功耗代价较大. 2023 年美国 Ultrasonic 公司提出了一种基于超声振动的微重力洗衣技术^[10]. 该技术通过超声振动去污, 耗水量少, 废水处理简单, 但无法实现衣物除菌.

2018 年中国科学院力学研究所和青岛海尔集团开发了一款离心式锥形两相洗衣技术方案并进行了仿真, 该方案基于旋转气液分离原理, 使衣物与液态洗涤工质充分混合的同时, 排除洗涤过程中的气体^[11]; 2019 年无锡小天鹅股份有限公司开发了一款微重力洗衣装置设计方案, 并进行了仿真, 该方案需将衣物密封至柔性洗涤袋中, 再注入液态洗涤工质, 并通过外力周期性挤压来冲洗密封袋内的衣物^[12]. 从现有文献来看, 中国对于微重力洗衣技术的研究仍处于方案设计和仿真验证阶段, 尚无实际样机试验. 在方案设计过程中, 也没有涉及对洗涤废水的处理方案.

臭氧在常温常压下会快速分解成氧气和具有强氧化性的自由基态氧, 可有效分解和破坏细菌内部结构, 起到杀菌作用^[13,14]. 与其他除菌技术相比, 臭氧除菌高效、快速、彻底、无二次污染^[1,15]. 本文基于航天员在轨驻留期间的洗衣需求, 针对现有地面洗衣技术在微重力环境下应用的局限性, 设计了一套基于雾化臭氧原理的在轨洗衣平台, 利用超声雾化和臭氧杀菌实现对衣物的浸润和杀菌.

相比现有的国内外技术设计, 雾化臭氧洗衣技术具有以下优势: 洗涤过程无需液态介质, 避免了微重力环境下液体聚积成团的问题; 采用臭氧替代化学洗

涤剂完成衣物的杀菌, 并在洗涤结束后通过高温通风和出口过滤器将臭氧分解, 避免了洗涤废水中残留的泡沫和洗涤剂对后续水处理造成的负担. 此外, 利用洗涤过程中水雾的浸润作用还可以提高衣物的平整度, 避免了旋转、压缩等方案中衣物的卷曲和褶皱问题. 针对所提出的雾化臭氧洗衣方案, 本文采用有限元方法对洗衣过程中的通风流场、臭氧分布等物理过程进行了仿真分析. 最后, 基于等效系统质量方法, 对设计方案进行了资源代价分析, 为后续的优化设计提供参考.

1 空间洗衣平台的结构与原理

研究提出的基于雾化臭氧技术的在轨洗衣装置基本结构和三维模型如图 1 所示. 装置的主要构成部分包括: 超声雾化阵列 (Ultrasonic Atomizer Array), 由一系列超声雾化振子及其供水系统 (Water Supply) 组成; 臭氧发生模块 (Ozone Generation Modules), 由若干组紫外线臭氧发生器组成; 通风系统 (Ventilation Modulus), 包括入口风扇 (Inlet Fan)、内循环风扇 (Cycling Fan) 以及出口过滤装置 (Outlet Filter); 测控系统, 主要包括控制器、臭氧浓度和温湿度传感器.

装置的主要工作过程如图 2 所示. 在航天员完成衣物装填和参数设定后, 装置首先进入预雾化过程, 内循环风机和超声雾化阵列同时开启. 当洗衣腔体内

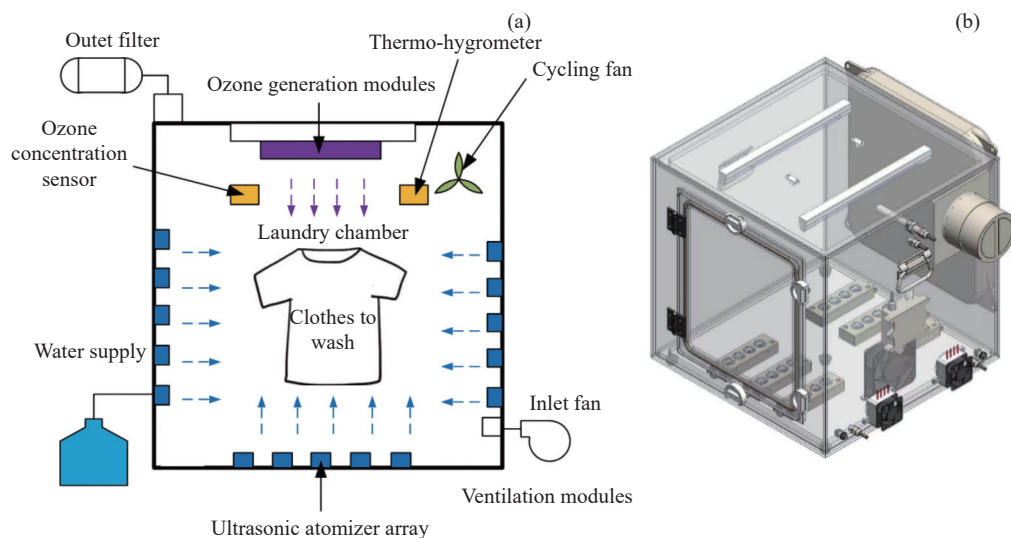


图 1 在轨洗衣装置基本结构 (a) 和三维模型 (b)

Fig. 1 Structural scheme (a) and 3D model (b) of the proposed on-orbit laundry platform

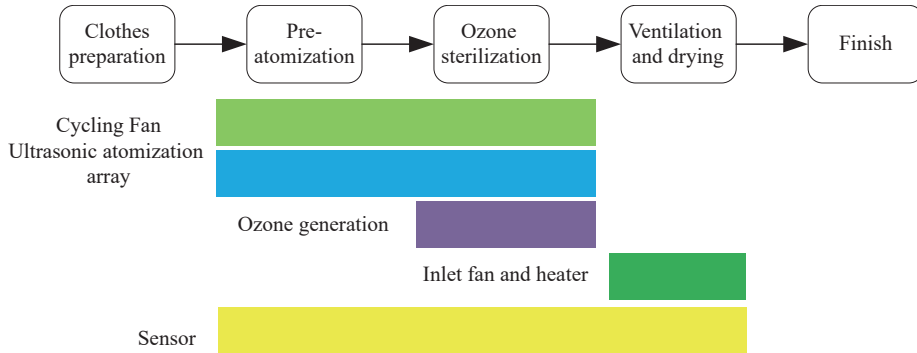


图 2 雾化臭氧洗衣平台的基本工作过程及各模块的工作阶段

Fig. 2 Workflow and duty circles for different modules of atomization and ozone laundry platform

部湿度达到设定阈值后, 臭氧杀菌模块启动, 直至达到设定的臭氧杀菌时间要求. 完成臭氧杀菌后, 装置进入通风和干燥阶段. 平台通过进气风扇及其加热丝向洗衣腔体内输送热空气, 以烘干腔体内的衣物和空气, 并促进臭氧的分解. 烘干后的气体通过排气口排出, 排气口处设有出口过滤模块, 用于吸附排出气体中的臭氧和雾化液滴, 以防舱内空气污染.

2 洗衣过程的仿真分析

2.1 液滴与衣物的附着过程仿真

在微重力条件下, 液滴无法利用自身重力来克服表面张力的束缚, 只能依托液滴与衣物表面之间的毛细作用来克服表面张力, 改变其自身形状, 实现与衣物的充分结合. 为此, 在 COMSOL 软件中对微重力条件下液滴在衣物上的附着情况进行了仿真分析.

在仿真过程中, 构建液滴在衣物表面接触的几何模型, 如图 3 所示. 为减轻计算负担, 仿真采用二维轴对称模型进行分析. 将液滴域 (Droplet Domain) 等效为圆形截面, 液滴直径为 $10\ \mu\text{m}$; 周围空气域 (Air Domain) 等效为矩形截面; 衣物的纺织面为润湿壁面边界 (Wet Wall Boundary); 周围空气域采用开放边界 (Open Boundaries).

采用瞬态分析方法模拟球形液滴在无重力作用下, 从接触到附着在衣物表面的过程. 仿真模型的本构方程为采用不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程^[16]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}_{\text{st}} + \rho \mathbf{g}. \quad (1)$$

流域内的连续性方程为

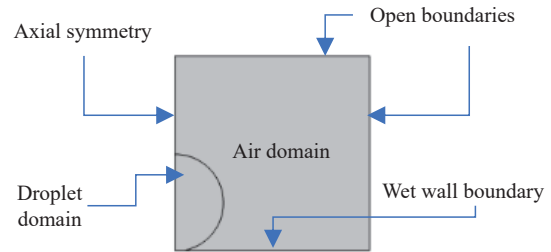


图 3 液滴附着于衣物表面过程的两相流建模

Fig. 3 Simulation model of the droplet attaching onto the clothes surface

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

采用水平集方法追踪液滴和空气交界面的变化, 其约束方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left[-\phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} + \varepsilon \nabla \phi \right]. \quad (3)$$

式 (1)~(3) 中, ρ 为两相流等效密度, $\mathbf{u}$ 为流速张量, μ 为两相流等效动力学黏度, p 为压力, $\mathbf{F}_{\text{st}}$ 为表面张力张量; $\mathbf{g}$ 为重力加速度张量, 在微重力环境下可近似为 0; ϕ 为水平集函数, γ 和 ε 分别为数值迭代过程中的再初始速度和交界面厚度. 在水平集方法中, 两相流等效密度和等效黏度可表示为

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \phi, \quad (4)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \phi. \quad (5)$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 分别为空气和水的密度, μ_1 和 μ_2 分别为空气和水的动力学黏度. 仿真过程中的具体取值列于表 1.

在仿真中, 采用层流和水平集模块分析了纺织物表面接触角 (θ) 不同对液滴在衣物表面附着情况的影响. 其中接触角为 18° , 90° , 162° 时, 液滴和衣物表面

接触后的变形情况如图 4 所示. 通过仿真分析可知, 只要液滴与衣物表面完成初步接触, 液滴会在毛细作用下充分附着于衣物表面, 附着过程与衣物表面的接触角关系不大. 即无论衣物表面采用亲水或憎水材料, 雾化液滴均可与衣物表面充分浸润, 验证了雾化洗衣平台原理的可行性.

2.2 洗衣腔体内流场和湿度仿真

在轨洗衣平台的工作过程中涉及通风流场、紫外线照射、臭氧的发生与分解等多种物理和光化学过程, 这为装置设计以及内部各功能单元的配置和分布提供了有效参考. 采用有限元方法对洗衣过程中各物

理场的分布进行仿真分析, 所构建的仿真模型如图 5 所示.

在仿真模型中, 洗衣腔体采用矩形空间等效, 并根据雾化阵列、紫外臭氧灯、内循环风扇的安装位置, 设置相应的几何边界. 气流入口为速度边界, 出口为压力参考边界, 模型采用四面体网格进行剖分.

采用 $k-\epsilon$ 湍流模型对微重力环境下洗衣平台工作时舱内流场分布进行了仿真, 内循环风扇压力设置为 200 Pa, 流量为 $Q_{\text{rec}} \approx 0.047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 装置中设置两个入口风扇, 设置为入口流量边界条件, 单个流量为 $0.024 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 仿真结果如图 6 所示.

通过图 6 流场分析可知, 在内循环风扇的作用下, 洗衣腔体内的气流可实现较为充分的循环: 气流从风扇的顺风面沿风扇轴向穿过洗衣腔体底部, 随后沿舱体左侧壁—顶面—右侧壁的方向返回风扇逆风面完成循环. 因此, 考虑舱体内流场分布的情况, 洗衣腔体内衣物的悬挂方向应垂直于风扇轴向, 并保持足够的间隙, 从而为内循环气流提供充足的流道. 此外, 在洗衣过程中, 折叠后的衣物四角受约束而限制了其随气流的摆动. 因此, 在仿真过程中可忽略衣物与气流之间的相互作用.

依据通风流场仿真结果, 对洗衣平台内循环风扇

表 1 液滴与衣物附着过程仿真参数

Table 1 Simulation parameters for droplet-adhesion process on fabric

Parameter	Values
Density of droplet, $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1000
Dynamic viscosity of droplet, $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.01×10^{-3}
Radius of droplet, $r/\mu\text{m}$	5
Level set function, ϕ	0, 1
Reinitialization velocity, $\gamma/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1
Interface thickness, $\epsilon/\mu\text{m}$	1.4

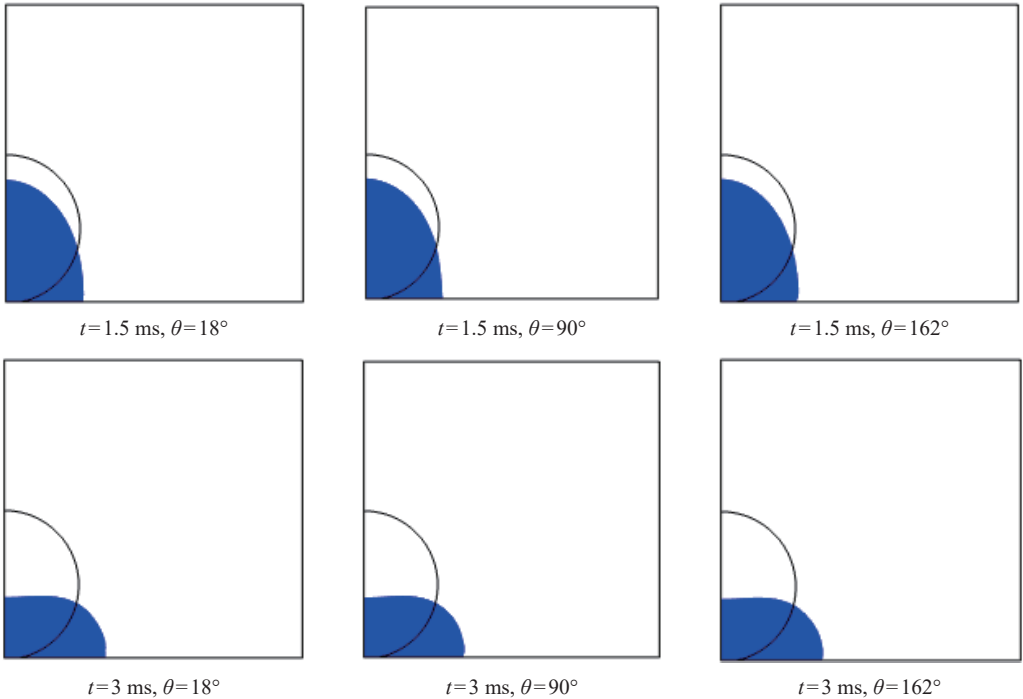


图 4 不同接触角下液滴与衣物表面的附着情况

Fig. 4 Attributing of droplet onto clothes surfaces with different contacting angle

开启后的湿度进行仿真. 在 15, 60, 180 s 时的相对湿度云图, 以及湿度随时间变化的曲线, 分别如图 7 和图 8 所示.

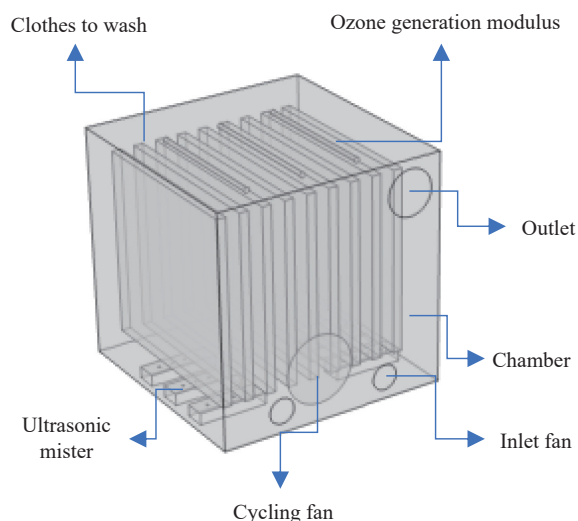


图 5 雾化臭氧洗衣平台的仿真模型构建

Fig. 5 Simulation model of the laundry platform

从仿真分析可知, 开启雾化模块后, 装置内的湿度逐渐上升, 3 min 后, 腔体内的相对湿度达到 100%, 因此, 洗衣设定的预雾化过程应设置为 3 min 以上.

2.3 不同重力条件下的流场和液滴分布均匀性

为分析地面重力和微重力环境下不同尺寸的雾化液滴在内循环流场中的分布均匀性, 采用粒子追踪模块对腔体内的液滴分布进行了仿真. 液滴粒径设置为 5~500 μm 均布. 计算开始时, 假定液滴在流场中均匀分布, 通过内循环流场的速度结果计算粒子的曳力, 并叠加重力影响. 仿真时间为 2 s 时, 得到的液滴空间分布结果如图 9 和图 10 所示. 此外, 为进一步分析雾化液滴在重力和气流曳力共同作用下的表现, 图 9 和图 10 还给出了不同粒径液滴在仿真时间为 2 s 时位于不同高度位置的分布数量直方图.

通过图 9(a) 可知, 在通风流量较小的情况下 ($Q_{\text{rec}}=0.005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时), 地面重力环境下大部分液滴会在 2 s 内沉积于装置底部, 不利于衣物与液滴的混合. 液滴直径越大, 沉积作用越明显. 通过图 9 的对

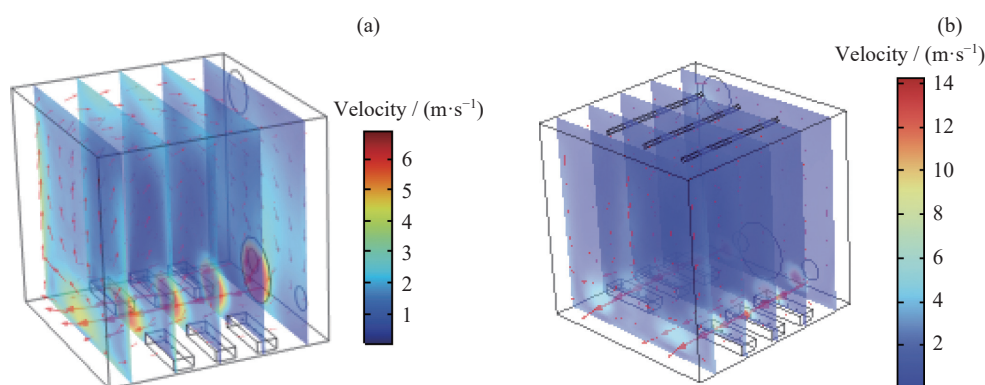


图 6 洗衣平台仿真结果. (a) 洗衣过程内循环流场仿真, (b) 通风过程进/排气流场

Fig. 6 Flow simulation results. (a) Cycling flow in laundry procedure, (b) in/outlet flow in ventilation procedure

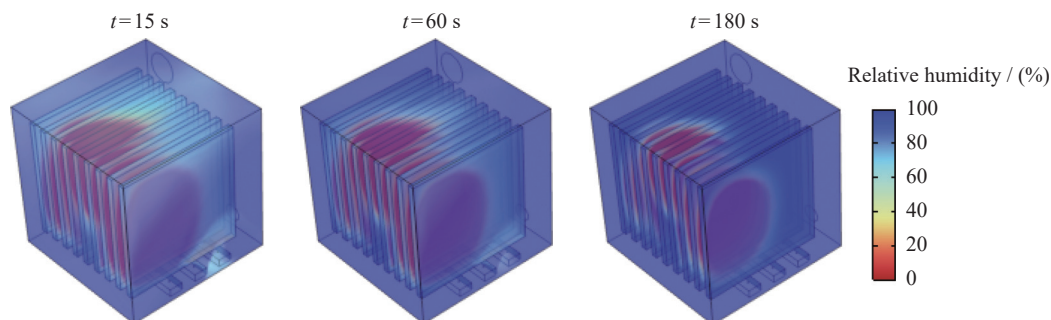


图 7 预雾化过程中部分时间点的相对湿度云图

Fig. 7 Relative humidity contour at different moment in pre-atomization procedure

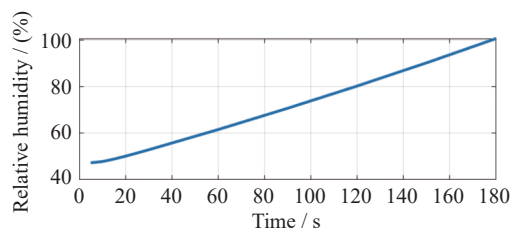


图8 预雾化过程中湿度随时间的变化

Fig. 8 Time dependent relative humidity in pre-atomization procedure

比可知,液滴在重力下的沉积作用随通风流场的增强而减弱.

通过图10的对比可知,微重力环境下,液滴不会产生明显的沉积现象,但当内流场风速较大时,会增大液滴附着于上下腔壁的概率,也不利于液滴与衣物的混合.

通过以上分析,重力和微重力条件下的液滴分布差异主要是液滴在气流中的受力情况不同所导致.在

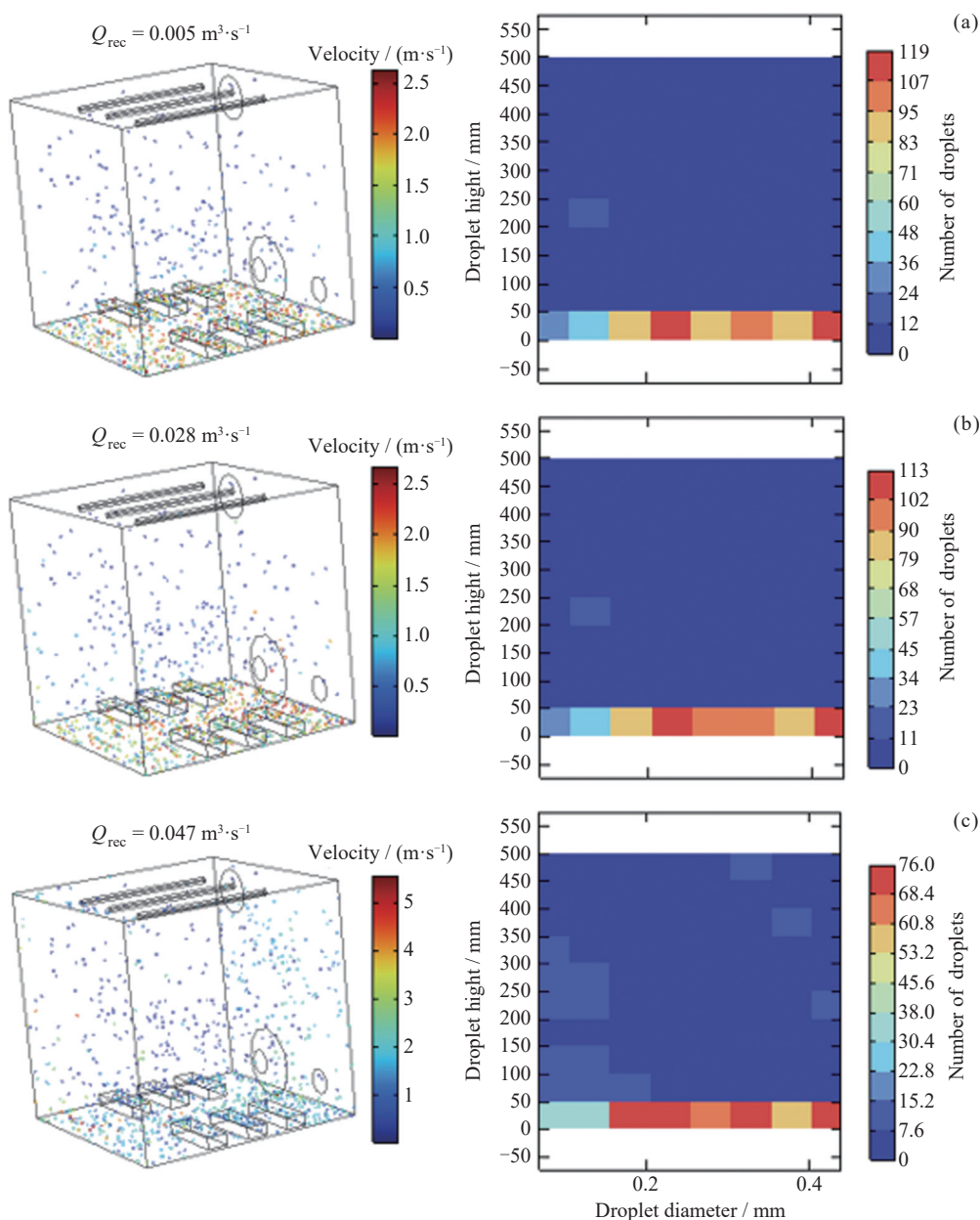


图9 重力条件下雾化液滴在内循环流场中的位置及不同高度下各粒径液滴的分布数量统计直方图(仿真时间为2 s)

Fig. 9 Droplets distribution inside the laundry chamber and histogram of the droplet amounts with different diameters and in different height at microgravity (simulation time: 2 s)

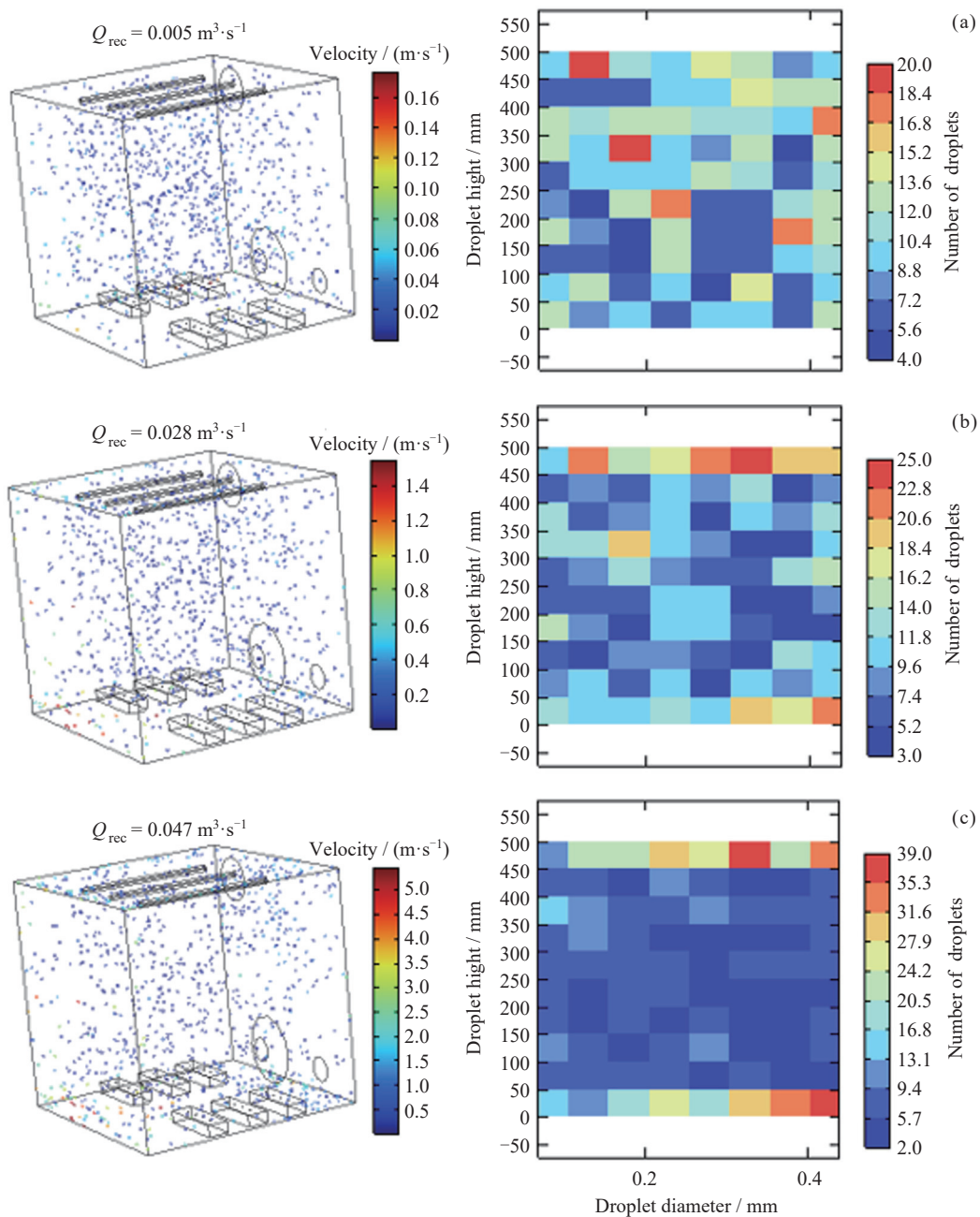


图 10 微重力条件下雾化液滴在内循环流场中的位置及不同高度下各粒径液滴的分布数量统计直方图 (仿真时间为 2 s)

Fig. 10 Droplets distribution inside the laundry chamber and histogram of the droplet amounts with different diameters and in different height at ground gravity (simulation time: 2 s)

低流速的情况下, 重力环境下的液滴更容易沉积于洗衣腔底部, 液滴的直径越大, 沉积越明显. 产生这种差异的根本原因在于液滴在气流中所受曳力小于其所受重力, 导致其从气流中脱落并聚集于腔体底部.

已知液滴在气流中的受力正比于液滴半径和气

流速度, 液滴承受的曳力越大, 越容易克服重力影响. 在微重力环境中, 由于重力作用减弱, 液滴更容易悬浮于气流中, 而不会像在正常重力环境中那样迅速沉积. 因此, 为兼顾地面测试和在轨使用的双重工况下液滴分布的均匀性, 洗衣平台的内循环风扇流量应设

置在 $0.024 \sim 0.047 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.4 臭氧浓度仿真

在室温空气环境下, 臭氧的分解速率受到空气湿度、温度、臭氧浓度和空气流量的影响, 由于洗衣腔体内空气湿度较大, 臭氧的分解速率较高, 如臭氧产生速率低于分解速率, 则难以在洗衣腔体中维持较高的臭氧浓度. 综合考虑臭氧的生成和衰减速率, 洗衣腔体内臭氧浓度 (C_{O_3}) 可进行如下估计:

$$C_{O_3}(t) = \int_0^t \left(\frac{k_{O_3} \bar{p}_{UV}}{\rho_{O_3}} e^{-\frac{\ln 2}{t_{HLT}} t} \right) \times 10^6 dt. \quad (6)$$

其中, $\bar{p}_{UV}$ 表示腔体内光功率体积密度平均值 (单位 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$), t 为紫外臭氧灯的照射时间; k_{O_3} 为紫外线的臭氧转化率, 依据相关研究, 波长为 185 nm 的紫外线照射条件下, 臭氧转化率 $k_{O_3} = 7.2 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[17]; $\rho_{O_3} = 2.144 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为气态臭氧密度; t_{HLT} 为臭氧半衰期, 在常温环境下臭氧半衰期为 15~20 min, 考虑到湿度较高情况下臭氧分解速率加快, 为提高设计裕度, 仿真中假定臭氧半衰期为 5 min.

通过射线光学模块对紫外灯光照射强度进行仿真, 所采用紫外线臭氧灯的真空波长为 185 nm, 单个紫外线臭氧灯的功率为 10 W, 在不同数量的紫外线灯下, 得到的光强分布如图 11 所示.

通过仿真分析可知, 当腔体内紫外线臭氧灯数量分别为 1 个、2 个、3 个时, 腔体内部的平均光功率密度 ($\bar{p}_{UV}$) 分别为 $70.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, $140.19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $210.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 这与臭氧灯的数量和总功率基本呈线性关系.

基于有限元仿真结果和式 (6), 对不同臭氧灯数量下腔体内臭氧浓度的累积过程进行了仿真, 其结果如图 12 所示.

由于洗衣装置要求在开机 3 min 内使腔体内臭

氧浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 臭氧灯数量需设置为 2 个以上. 考虑到洗衣过程中臭氧在高湿度空气环境中分解加剧, 需要迅速补偿, 因此臭氧灯数量设置为 3 个.

3 上行资源代价评估

3.1 基于等效系统质量的资源评估方法

对于在轨洗衣技术的评估, 不能仅从洗涤性能的单一维度考虑, 还要综合分析整个装置的上行和在轨资源消耗. 等效系统质量 (Equivalent System Mass, ESM) 代价分析方法是 NASA 提出的一种综合性资源代价分析方法, 该方法将质量、体积、功耗、散热以及人员操作等多种维度的资源代价全部转化为所需的上行质量, 系统的等效系统质量计算公式为^[18]

$$m_{ES} = M + (V + V_{eq}) + (P + P_{eq}) + (C + C_{eq}) + (T_{total} \times D \times C_{Teq}). \quad (7)$$

其中, M 为系统总质量, V 为系统总体积, V_{eq} 为系统体积的等效系统质量系数, P 为系统运行功率, P_{eq} 为系统功率的等效系统质量系数, C 为系统的冷却功耗, C_{eq} 为系统冷却功耗的等效系统质量系数, T_{total} 为一年内人员操作与维修系统的总时间, D 为任务持续年数, C_{Teq} 为操作与维护系统时间的等效系统质量系数. 上述体积、功耗、操作等资源代价的等效系统质量系数可参照 NASA 生命保障系统基线参数, 具体取值见表 2^[19].

3.2 平台的上行资源评估

本文所提出的雾化臭氧洗衣平台的主要设计参数见表 3.

此外, 采用臭氧杀菌方式多次洗涤衣物会对纺织

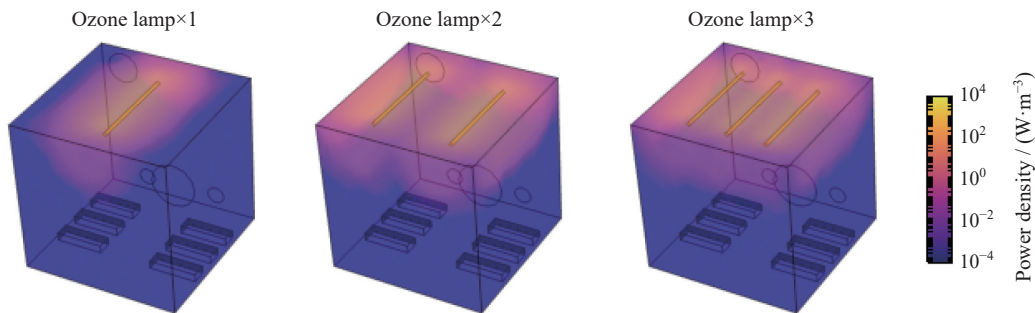


图 11 不同臭氧灯数量下腔体内光功率密度分布

Fig. 11 Optical power density inside the chamber with different number of ozone lamps

品的性能造成一定损伤. 在评估洗涤平台的等效系统质量时, 仍需考虑一定的衣物损耗. 根据 NASA 的相关研究, 经过杀菌消毒的衣物在轨道上的实际使用寿命, 是未进行任何洗涤衣物的 5 倍.

假定单个乘组的任务周期为 0.5 年, 将采用雾化臭氧洗衣方案和全部衣物按消耗品上行两种方案的等效系统质量随时间的累积情况进行对比, 结果如图 13 所示. 从分析中可知, 在 0.5 年的任务周期内, 采用

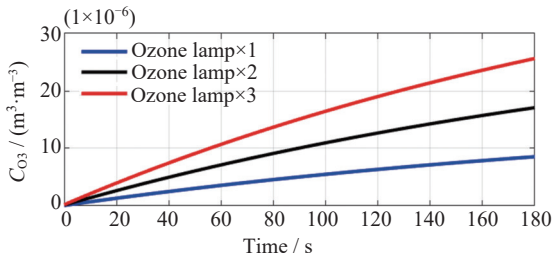


图 12 不同臭氧灯数量下腔体内臭氧浓度随时间变化
Fig. 12 Ozone accumulation inside the chamber with different number of lamps

表 2 不同类型资源代价的等效系统质量系数
Table 2 ESM from different types of resources

Equivalent system mass factors	Space station	Moon landing and deep space exploration
Volume, $V_{eq} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	67	67
Power consumption, $P_{eq} / (\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1})$	476	136
Cool off, $C_{eq} / (\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1})$	324	65
Personnel operation, $C_{Teq} / (\text{kg} \cdot \text{CM} \cdot \text{h}^{-1})$	0.8	0.6
Percentage of wastewater treatment losses/(%)	3.67	3.67
Equivalent mass of wastewater treatment/($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	12.9	12.9

表 3 雾化臭氧洗衣平台基本参数
Table 3 Atomization and ozone laundry platform parameters

Parameters	Value
Weight of laundry platform/kg	12
Volume of the laundry platform/L	125
Power consumption for washing/washing time/($\text{W} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.3333
Power consumption for drying/drying time/($\text{W} \cdot \text{min}^{-1}$)	8
Crew supporting time per week/h	0.5
Water consumption per wash/L	0.4
Washing quality per wash/kg	0.8

雾化臭氧洗衣平台和将衣物按照消耗品上行两种方案的资源消耗相当. 但随着任务周期的延长, 上行洗衣平台的资源代价优势逐步体现. 当任务持续时间达到 5 年时, 发展洗衣技术的资源代价为衣物全部作为消耗品上行的 38.1%, 即发展在轨洗衣技术可节省 61.9% 的上行衣物资源.

假定在轨持续使用时间为 1 年, 将本文提出的雾化臭氧洗衣方案与 NASA 考察的部分在轨洗衣技术方案的资源代价进行对比, 其结果如图 14 所示^[20]. 本文提出的雾化臭氧洗衣技术 (图 14 方案 7, ESM=154.9 kg) 相比于 NASA 考察的在轨洗衣方案更具资源代价优势, 其等效系统质量仅为现有的地面商选洗衣技术 (图 14 方案 2, ESM=982.0 kg) 的 15.8%.

3.3 收益平衡时间分析和后续优化设计方向

为进一步分析任务长度对于洗衣方案设计的影响, 定义发展在轨洗衣技术的收益平衡时间 (T_b) 为: 发展在轨洗衣技术的等效系统质量 (m_{ES1}) 与全部衣物采用消耗品上行模式的等效系统质量 (m_{ES2}) 相当的在轨时间点, 单位为周. T_b 可通过求解如下表达式获得:

$$m_{ES1}(T_1) - m_{ES2}(T_1) = 0. \quad (8)$$

通过计算式 (8), 分析洗衣平台的主要设计参数对收益平衡时间的影响, 确定优化设计方向. 根据表 2 中的空间站和深空探测任务的等效系统质量系数分别计算 T_b , 并依次对表 3 中的洗衣平台设计参数进行扫描分析, 除单次洗衣质量参数外, 扫描范围控制在原参数的 1/10 到原参数之间; 单次洗衣质量参数的扫描范围为原参数到原参数的 10 倍之间, 得到的分析结果如图 15 和图 16 所示.

从图 15 中可知, 在空间站任务中, 基于现有的洗衣平台设计参数, 上行雾化臭氧洗衣平台与衣物全消耗品上行的收益平衡时间约为 20 周, 即 5 个月. 这意

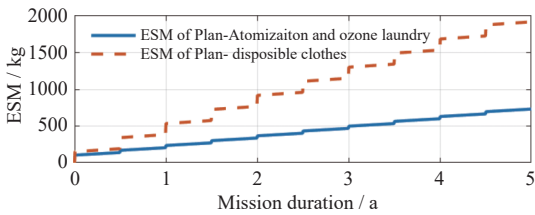


图 13 等效系统质量随任务周期变化趋势

Fig. 13 ESM increasing with the length of mission duration

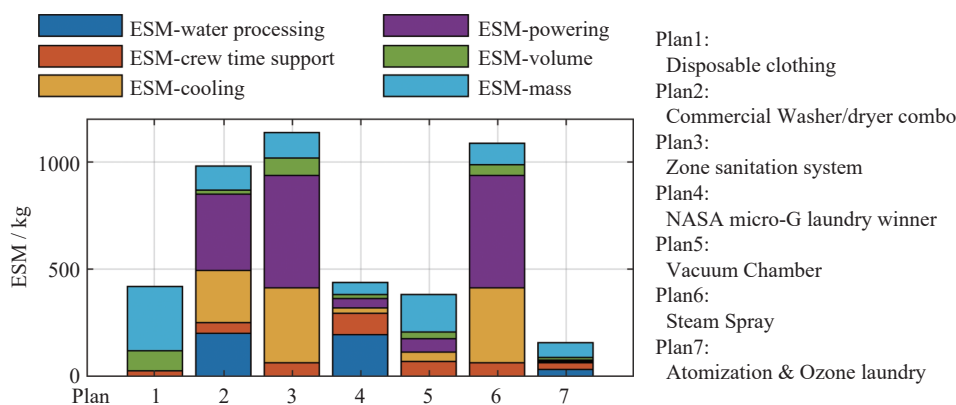


图 14 雾化臭氧洗衣方案与 NASA 在评估的微重力洗衣方案对比

Fig. 14 Comparison of atomization and ozone laundry platform with other microgravity laundry plans

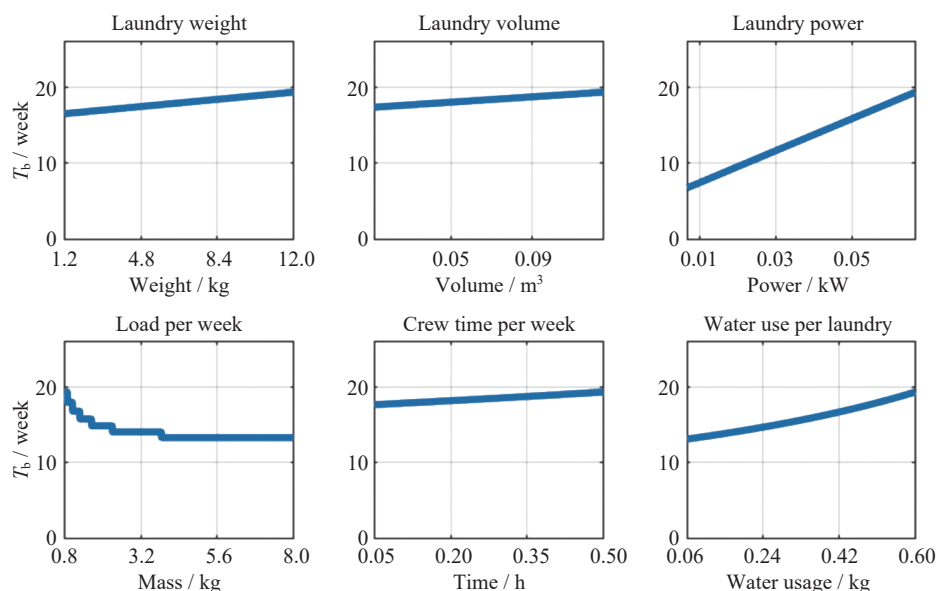


图 15 空间站任务中雾化洗衣平台各项技术指标优化对于收益平衡时间的影响

Fig. 15 Influence of parametrical optimization for T_b in space station missions

意味着, 对于单次任务周期超过 5 个月的载人航天任务, 发展雾化臭氧在轨洗衣技术更具资源优势. 通过图 16 可知, 对于未来的深空探测任务, 收益平衡时间约为 10 周, 即 2.5 个月, 优势更为明显.

相比洗衣平台的质量、体积等一次性代价, 提高单次洗衣平台的容量、降低单次洗衣的耗水量等持续性资源代价, 更有利于提高洗衣平台的长远资源收益, 这也是后续洗衣平台优化设计的主要方向.

此外, 在本节中详细分析了洗衣平台各部件的使用寿命和消耗情况. 整机设计的使用寿命为 5 年, 其中亚克力洗衣腔体作为结构件, 使用寿命为 5 年; 温湿度计和臭氧浓度传感元件在正常使用条件下的使

用寿命均超过 5 年; 内循环及入口风扇的设计使用寿命约为 30000 h; 依据相关标准^[21], 紫外线臭氧灯的设计使用寿命约为 5000 h. 按照每周使用 7 次、单次时长为 1 h 的频率计算, 5 年内各部件的累计运行时间为 1825 h, 均满足使用寿命要求, 裕度充足, 无须考虑部件消耗而导致的更换问题.

4 结论

通过对在轨洗衣技术发展的梳理、基于雾化臭氧原理的空间洗衣平台设计、有限元分析以及不同洗衣方案的资源代价分析, 得出以下主要结论.

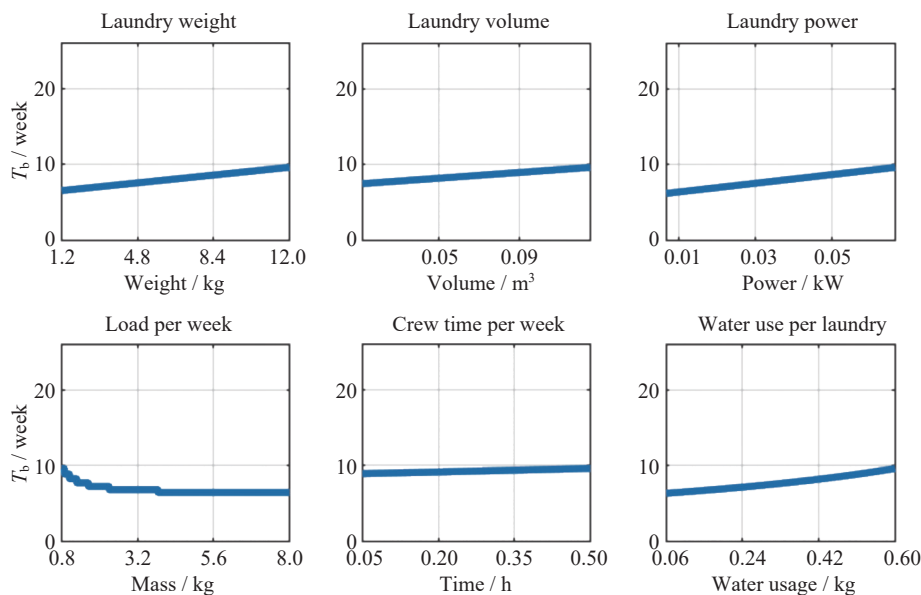


图 16 深空探测任务中雾化洗衣平台各项技术指标优化对于收益平衡时间的影响

Fig. 16 Influence of parametrical optimization for T_b in deep space explorations

(1) 通过仿真分析, 洗衣平台腔体内的电力可在不同重力环境下将液滴均匀分布至洗衣腔体内, 且雾化液滴在微重力环境下可与衣物表面实现较好的结合, 该方案避免了液体在微重力条件下难以与衣物充分混合的问题。

(2) 采用臭氧杀菌方案能够有效避免在轨洗衣废水的处理难题, 在洗衣平台中配置三个臭氧灯, 可满足清洁需求。

(3) 通过等效系统质量分析, 所提出的在轨雾化臭氧洗衣技术相比于地面洗衣机和其他在轨洗衣方案更具上行资源代价优势。

(4) 对于空间站任务, 只要任务周期超过 5 个月, 对于深空探测任务, 只要周期超过 2.5 个月, 发展在轨洗衣技术相比于将衣物全部作为消耗品上行具有更大的资源代价优势。

参考文献

- [1] DEMMLER M, WHITEHEAD N, PORITZ D, *et al.* CTSD-ADV-1466 Advanced exploration systems (AES) logistics reduction project: crew clothing care process development[S]. Houston: Crew and Thermal Systems Division, 2017
- [2] ARENDS A R, ROBINSON S K. Spaceflight exercise and textile laundering machine for improved human health[C]//Proceedings of the 52nd International Conference on Environmental Systems. Calgary: 2023 Interna-

tional Conference on Environmental Systems, 2023

- [3] PISCHULTI P K, DUKE T L, SMITH A L, *et al.* Surveying and assessing 'smart' technologies to identify potential applications for deep space human exploration missions[J]. *Acta Astronaut.*, 2024, **222**: 534-549
- [4] ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, *et al.* Retrospect and perspective on microgravity science in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 34-45 (赵建福, 王双峰, 刘强, 等. 中国微重力科学研究回顾与展望 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 34-45)
- [5] BAGHEL V, RANJAN M. Numerical estimation of droplet motion on linear wettability gradient surface in microgravity environment[J]. *Materials Today Communications*, 2022, **32**: 103916
- [6] ZHOU Kanghan, LI Junrong, LIU Chengliang, *et al.* Wastewater treatment and management in space station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2002, **22**(2): 169-176 (周抗寒, 李俊荣, 刘成良, 等. 空间站废水的处理及管理 [J]. *空间科学学报*, 2002, **22**(2): 169-176)
- [7] COLOMBO G, PUTNAM D, LUNSFORD T, *et al.* Single phase space laundry development[C]//Proceedings of the International Conference On Environmental Systems. Colorado Springs: NASA, 1993: 932092
- [8] MICHALEK W F, WAMBOLT S R, WHEELER A R, *et al.* Advanced Microgravity Compatible Integrated Laundry System (AMCILS) development[C]//Proceedings of the 47th International Conference on Environmental Systems. South Carolina: 47th International Conference on Environmental Systems, 2017
- [9] BAILEY V O, CANTU N, GARCIA G, *et al.* Laundry in space: Gravity Independent Laundry System (GILS)[C]//

- Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville: AIAA, 2012
- [10] ELLIS J, BIGELOW J, SHELANDER C, *et al.* Ultrasonic clothes washer/dryer combination for moon, Mars, and ISS applications[C]//Proceedings of the 52nd International Conference on Environmental Systems. Calgary: International Conference on Environmental Systems, 2023: 1-10
- [11] SU Yinyin, WU Di, DUAN Li, *et al.* Numerical simulation of flow field in centrifugal cone-shaped two-phase washing machine under microgravity[J]. *Manned Spaceflight*, 2018, **24**(1): 117-126 (苏引引, 吴笛, 段俐, 等. 微重力下离心式锥形两相洗衣机流场的数值模拟研究[J]. *载人航天*, 2018, **24**(1): 117-126)
- [12] TANG Kaili, ZHANG Hua, DENG Dexi, *et al.* Design and research of a washing device used in microgravity[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, **25**(3): 403-410 (汤凯利, 张华, 邓德喜, 等. 一种微重力下洗衣装置的设计与研究[J]. *载人航天*, 2019, **25**(3): 403-410)
- [13] HUANG S N, LIU H W, WEI K M, *et al.* Impact of ozonation on disinfection byproducts formation from phenylalanine during chlorination[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, **144**: 199-211
- [14] FEJES V, SIMON G, MAKSZIN L, *et al.* Evaluation of the effect of ozone disinfection on forensic identification of blood, saliva, and semen stains[J]. *Science & Justice*, 2024, **64**(2): 151-158
- [15] EWERT M K, ORNDOFF E, SIVIK M R, *et al.* Clothes cleaning research for space exploration[C]//Proceedings of the 51st International Conference on Environmental Systems. St. Paul: International Conference on Environmental Systems, 2022: 1-12
- [16] HAN W B, CHEN X Y. Effect of geometry configuration on the merged droplet formation in a double T-junction[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2019, **31**(6): 855-864
- [17] ZOSCHKE K, BÖRNICK H, WORCH E. Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment-a review[J]. *Water Research*, 2014, **52**: 131-145
- [18] BERKOVICH Y A, BURYAK A A, OCHKOV O A, *et al.* Minimization of the equivalent system mass of a vitamin greenhouse with LED lighting for various scenarios of space missions[J]. *Acta Astronautica*, 2022, **198**: 403-409
- [19] ANDERSON M S, EWERT M K, KEENER J F. NASA/TP-2015-218570/REV1 Life support baseline values and assumptions document[S]. Houston: National Aeronautics and Space Administration, 2022
- [20] EWERT M K, JENG F F. Will astronauts wash clothes on the way to Mars?[C]//Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue: International Conference on Environmental Systems, 2015
- [21] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T 19258.1-2022 Ultraviolet radiation sources for germicidal purpose—part 1: low pressure mercury vapor discharge lamp[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023 (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 19258.1-2022 杀菌用紫外辐射源 第1部分: 低压汞蒸气放电灯[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023)

作者简介



杨朝舒 男, 1989年3月出生于吉林省长春市, 现为中国航天员科研训练中心助理研究员, 研究方向为飞行器环境控制与生命保障工程。
E-mail: yangzhaoshu@sina.cn



李森 (通信作者) 男, 1984年10月出生于河北省南宫市, 现为中国航天员科研训练中心副研究员, 主要研究方向为航天环境控制与生命保障总体技术、航天器热管理与通风技术等。
E-mail: lisenmail@sohu.com