

模拟月地再入超重环境下新型压力裤防护效果研究

孙浩¹, 祝郁², 肖艳华², 王健全², 邓金辉², 王惠娟², 王林杰², 任逸³, 贾蕊溪^{2*}, 马红磊^{2*}

¹航天工程大学研究生院, 北京

²中国航天员科研训练中心, 北京

³江苏大学机械学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月29日; 发布日期: 2022年12月6日

摘要

针对半弹道跳跃式再入加速度过载问题, 探讨一种梯度加压裤的加速度防护效果, 为加压裤的改进和应用提供依据。选拔11名志愿者, 分别以卧姿和躺姿状态, 进行峰值5G的超重试验; 其中5名志愿者以躺姿状态进行峰值7G的超重试验。利用载人离心机模拟飞船在月地再入过程中的加速度曲线。每种工况下, 每名志愿者分别着加压裤和不着加压裤, 进行两次对照试验。试验过程中监测志愿者心率、血压、血氧饱和度等生理指标, 并记录志愿者主观感受进行评分。相对无加压裤状态, 着加压裤使人体试验前血压呈升高趋势。卧姿峰值5G工况, 与无加压裤相比, 着加压裤使第二峰时心率变化值明显降低($P = 0.019$), 主观感受评分明显提高($P = 0.039$)。躺姿峰值5G工况, 着加压裤无明显防护效果。躺姿峰值7G工况, 60%志愿者表示着加压裤不适症状减轻, 着加压裤延迟和减缓了血氧饱和度下降。梯度加压裤在卧姿工况下具有明显的加速度防护效果, 在躺姿高过载工况下也具有一定的加速度防护效果。

关键词

梯度压力裤, 抗荷服, 返回再入, 加速度防护, 生理效应

Study on the Protective Effect of New Pressure Trousers under Simulated Lunar-Earth Reentry Overweight Environment

Hao Sun¹, Yu Zhu², Yanhua Xiao², Jianquan Wang², Jinhui Deng², Huijuan Wang²,

*通讯作者。

文章引用: 孙浩, 祝郁, 肖艳华, 王健全, 邓金辉, 王惠娟, 王林杰, 任逸, 贾蕊溪, 马红磊. 模拟月地再入超重环境下新型压力裤防护效果研究[J]. 国际航空航天科学, 2022, 10(4): 83-91. DOI: 10.12677/jast.2022.104009

Linjie Wang², Yi Ren³, Ruixi Jia^{2*}, Honglei Ma^{2*}

¹Graduate School, Space Engineering University, Beijing

²China Astronaut Research and Training Center, Beijing

³Mechanics Institute, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 29th, 2022; published: Dec. 6th, 2022

Abstract

In order to solve the problem of acceleration overload of semi-ballistic jump reentry, the acceleration protection effect of gradient pressure trousers was discussed, which provides a basis for the improvement and application of the pressure trousers. 11 volunteers were selected to carry out peak 5G overweight tests in supine and lying positions, respectively. Among them, 5 volunteers carried out the peak 7G overweight tests in the lying position. The manned centrifuge was used to simulate the acceleration curve of the spacecraft during the lunar-earth reentry. Under each working condition, the volunteers wore pressurized trousers and non-pressurized trousers, respectively, and two experiments were conducted as control. During the experiment, the physiological indexes such as heart rate, blood pressure and blood oxygen saturation were monitored, and the subjective feelings of the volunteers were recorded and scored. Compared with no pressurized trousers, wearing pressurized trousers increased the blood pressure of the human body before the test. Under the peak 5G condition of supine position, compared with non-pressurized trousers, the change of heart rate at the second peak was significantly decreased ($P = 0.019$), and the subjective perception score was significantly increased ($P = 0.039$). Under the peak 5G condition of lying position, there was no obvious protective effect of wearing pressurized trousers. Under the peak 7G condition of lying position, 60% of the volunteers indicated that the symptoms of pressurized trousers were alleviated, and wearing pressurized trousers delayed and slowed down the decrease of blood oxygen saturation. The gradient pressure trousers have an obvious acceleration protection effect in supine position, and also have a certain acceleration protection effect in lying position in high overload conditions.

Keywords

Gradient Pressure Trousers, Anti-G Suit, Reentry, Acceleration Protection, Physiological Effect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞船发射和返回阶段,会产生持续性的加速度过载,对航天员的生命安全和身体健康产生影响。载人航天实践和研究结果表明,持续高+Gx作用对航天员呼吸功能和循环功能产生一系列影响,可使航天员出现病理性损伤[1] [2] [3] [4];持续高+Gz作用会引起头向供血不足产生灰视、黑视甚至意识丧失[5] [6] [7]。因此,需要采取抗荷措施降低持续性加速度的不利影响,提高持续性加速度过载的耐受值。目前,国内外持续性加速度防护措施主要包括:提高航天员自身的抗荷耐力、选取合理的体位和座椅、加压呼吸、改变呼吸气体成分、采用抗荷动作以及穿着抗荷服[8] [9]。

长期以来,抗荷服在航空航天领域对持续性加速度防护起到重要作用[10]。抗荷服的基本原理是向人体下肢和腹部加压,减少超重对人体心血管系统的不良作用,以实现其抗荷效果。阻止和减少加速度对血管系统的最初作用以及延迟其作用的效应是抗荷服的主要功能。在加速度开始作用时,抗荷服可以使下肢周围血管的阻力立即增高,并且阻止膈肌下降;在加速度开始作用后,抗荷服也可降低下肢周围血管内血液的积蓄量,使过载作用下人体血液分布正常[11]。目前世界各国采用的抗荷服式主要可分为管式和囊式两种。英美主要采用囊式抗荷服,苏联及东欧国家多采用管式抗荷服。管式抗荷服的保护作用比囊式抗荷服更加有效,但使用较不方便。俄罗斯在空间站长期飞行后使用一种拉带张紧式抗荷服,以防止航天员在再入段G值增加引起的晕厥[7]。近年来我国对着不同特点抗荷服的生理效应和抗荷效果进行了研究,抗荷服对人体持续性加速度生理防护效果取决于其结构形式、覆盖面积、压力等,不同类型的抗荷服具有不同的防护效果[12][13]。

本文对一种新型压力可调的梯度压力裤[14][15]在不同工况下的防护效果进行了研究。本文通过监测分析志愿者在持续性加速度过载下着压力裤和无压力裤时的生理指标,比较志愿者有无压力裤防护的主观感受,以验证压力裤的防护效果,阐明压力裤防护作用的生理机制,为梯度压力裤的改进和应用提供理论依据。

2. 方法

2.1. 志愿者

从社会招募选拔健康志愿者 11 名(5 男 6 女),年龄为 20~45 岁,身高 160~180 cm,体重 55~80 kg。试验前志愿者均进行体检筛选。试验结束后,再对志愿者的身体状况进行医学检查和确认。本试验在中国航天员科研训练中心完成,试验经过医学伦理委员会审核批准。所有志愿者都充分了解试验内容并签署了知情同意书。

2.2. 试验设备

梯度压力裤(图 1)为连体结构,长度从腰至脚踝上部,服装压力可通过粘扣调节,针对腰部臀部、大腿、小腿分别施压,压力在 10~50 mmHg 可调,穿戴方便、舒适性高,满足不同的航天员或同一航天员身体处于不同状态下的需求[15]。

中国航天员科研训练中心 98 型载人离心机模拟飞船从月球轨道返回过程中的加速度曲线,双峰型。该机半径为 8 m,臂架端连接一个可摆动的吊舱,用于航天员、飞行员超重训练及航空航天+Gx、+Gz 作用环境下人体生理响应规律研究。

利用 HYG08 型心电监护仪(日本光电),全过程连续监测心电(electrocardiography, ECG)、心率(heart rate, HR)和血氧饱和度(oxygen saturation, SpO₂),在试验前和停止时刻测量收缩压(systolic blood pressure, SBP)和舒张压(diastolic blood pressure, DBP)。



Figure 1. Gradient pressure trousers
图 1. 梯度压力裤

2.3. 试验方法

根据 Apollo 10 返回舱从月球轨道再入加速度变化规律[4]，设计峰值加速度为 5G 和 7G 的两组过载环境曲线(图 2)。过载环境由载人离心机模拟。

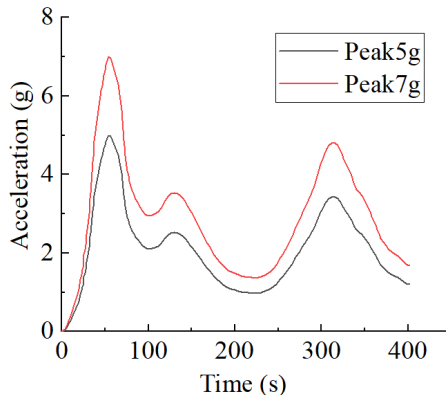


Figure 2. Acceleration overload curve
图 2. 加速度过载曲线

共进行 6 组试验，每次试验后对志愿者进行医学检查，每名志愿者两次测试间隔时间不小于 4 小时，试验设置见表 1。首先，对 11 名志愿者进行过载峰值 5G 的试验。为了验证梯度压力裤的适用姿态，分别在卧姿和躺姿状态下，以志愿者是否着梯度压力裤为变量，进行对照试验。试验前，志愿者着梯度压力裤时，严格调节压力裤各部位压力：小腿部位 45 ± 10 mmHg，大腿部位 30 ± 10 mmHg，腹部臀部 20 ± 10 mmHg。确认志愿者状态符合试验要求后，佩戴 HYG08 型心电监护仪。离心机吊舱按照预设姿态安装相应座椅：卧姿座椅背角为 20° ，腿部蜷曲于座椅内；躺姿座椅背角为 0° ，腿部抬高平直，两种姿态详见文献[16]。志愿者进入吊舱内乘座椅，利用座椅上的多点式安全带和束腿对志愿者上身、腿部进行有效约束。准备完毕后，离心机按照设计的过载曲线运行。完成峰值 5G 试验后，对 5 名男性志愿者在峰值 7G 过载躺姿状态下进行梯度压力裤的防护效果测试，试验流程同上。试验终止条件：志愿者主诉视觉模糊或消失；心率大于 180 次/min，或小于 60 次/min；心电图异常，载人离心机旋转过程中出现频发早搏，或多源性早搏，或其他严重心律失常；志愿者感觉严重不适主动要求中止试验。

Table 1. Test setup
表 1. 试验设置

序号	志愿者数	过载峰值	姿态	是否着压力裤
1	11	5G	卧姿	否
2	11	5G	卧姿	是
3	11	5G	躺姿	否
4	11	5G	躺姿	是
5	5	7G	躺姿	否
6	5	7G	躺姿	是

2.4. 主观感受评分

对每名志愿者的主观感受进行打分。无明显不适，5 分；胸部稍有压迫感，呼吸稍困难，4 分；胸部

压迫感明显, 呼吸困难, 3分; 呼吸困难明显, 轻度胸痛, 轻度眩晕、头痛, 2分; 胸痛剧烈, 恶心、呕吐, 虚脱, 晕厥等, 1分。

2.5. 统计学处理

采用 SPSS19 统计分析软件对试验数据进行统计分析处理, 数值采用 $\bar{x} \pm s$ 表示。生理参数的差异性分析采用配对 t 检验。志愿者主观感受评分采用 Wilcoxon 符号秩检验。P < 0.05 认为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 压力裤对血压的影响

各工况下试验前与试验后的血压(表 2)没有显著性变化(P > 0.05)。试验前, 志愿者着压力裤时的收缩压和舒张压均有高于未着压力裤时的趋势, 但未达到显著性差异(P > 0.05)。是否着梯度压力裤对过载结束时志愿者血压的影响不明显(P > 0.05)。

Table 2. Blood pressure before and after the test (mmHg)

表 2. 试验前后的血压(mmHg)

工况	是否着压力裤	收缩压		舒张压	
		试验前	试验后	试验前	试验后
卧姿峰值 5G (n = 11)	否	111 ± 11	111 ± 7	63 ± 6	64 ± 6
	是	115 ± 11	115 ± 10	67 ± 7	67 ± 6
躺姿峰值 5G (n = 11)	否	116 ± 7	118 ± 7	70 ± 7	72 ± 9
	是	120 ± 12	117 ± 12	74 ± 5	72 ± 5
躺姿峰值 7G (n = 5)	否	124 ± 6	121 ± 7	76 ± 7	74 ± 9
	是	126 ± 8	124 ± 8	78 ± 6	77 ± 8

3.2. 压力裤对心率的影响

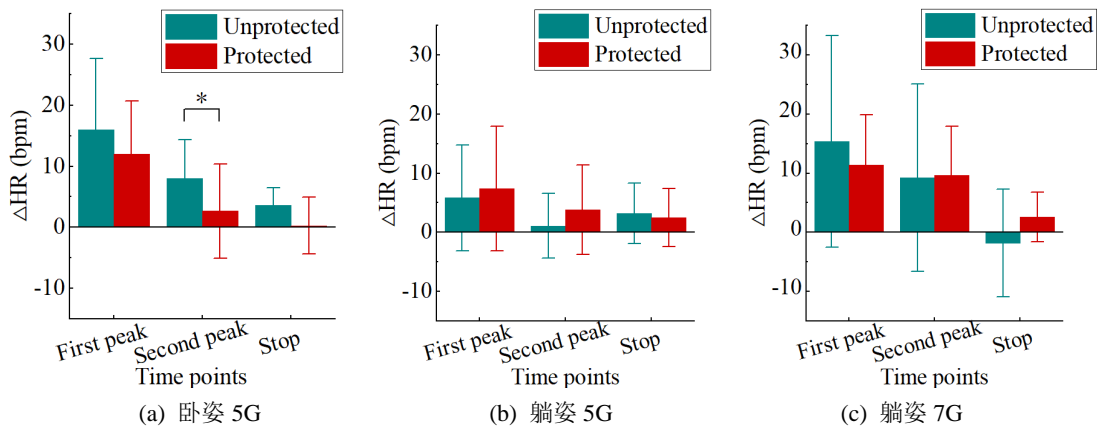
为了验证压力裤对基础心率的影响, 对志愿者试验前的心率(表 3)进行差异性分析。卧姿状态, 着压力裤后基础心率有上升的趋势, 但未达到显著性差异(P = 0.071)。躺姿状态, 着梯度压力裤未对基础心率产生显著影响(P > 0.05)。

Table 3. Heart rate before the test (bpm)

表 3. 试验前的心率(bpm)

是否着压力裤	工况		
	卧姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 7G (n = 5)
否	67 ± 10	65 ± 9	74 ± 13
是	73 ± 11	66 ± 8	74 ± 6

三种工况下无压力裤和有压力裤防护的心率相对试验前的变化见图 3。卧姿 5G 工况, 相对于无压力裤防护, 着压力裤时心率变化量减小, 在过载第二峰时具有显著性差异(P = 0.019)。躺姿工况下, 着压力裤未对心率变化产生明显影响(P > 0.05)。



*P < 0.05.

Figure 3. Δ HR at different time points compared with before the test
图 3. 不同时间点相对试验前的心率变化

3.3. 压力裤对血氧饱和度的影响

试验前志愿者 SpO₂ 见表 4。着梯度压力裤未对地面重力下人体的血氧饱和度产生影响(P > 0.05)。

Table 4. SpO₂ before the test (%)
表 4. 试验前的血氧饱和度(%)

是否着压力裤	工况		
	卧姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 7G (n = 5)
否	96.8 ± 2.9	96.6 ± 1.8	97.4 ± 0.9
是	97.5 ± 1.6	97.3 ± 2.0	96.8 ± 1.1

三种工况下无压力裤和有压力裤防护的血氧饱和度相对试验前的变化见图 4。峰值 5G 过载下，着压力裤未对血氧饱和度变化产生明显影响(P > 0.05)。躺姿 7G 工况下，着压力裤防护使得血氧下降值减少，在第一峰时着压力裤使血氧饱和度少下降了约 4%，并在试验过程中延缓了血氧饱和度的下降；无防护和着梯度压力裤防护时的血氧饱和度变化值未表现出显著性差异(P = 0.072)。

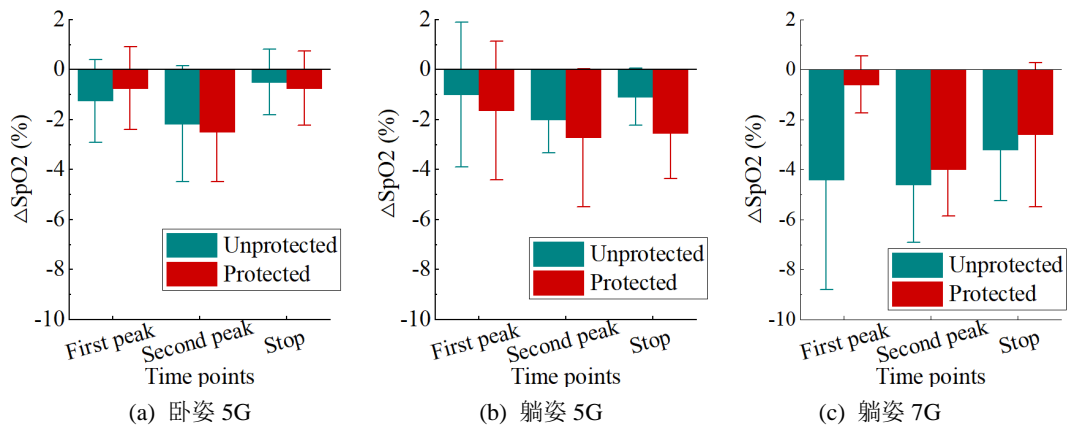


Figure 4. Δ SpO₂ at different time points compared with before the test
图 4. 不同时间点相对试验前的血氧饱和度变化

3.4. 主观感受及其评分

卧姿峰值 5G 工况, 相对无压力裤状态, 9 人(82%)表示着压力裤不适症状减轻, 2 人(18%)表示无差别。不适症状减轻主要体现在呼吸上: 无压力裤状态志愿者呼吸稍困难, 着压力裤状态呼吸困难消失。另着压力裤状态压迫感稍有减轻。躺姿峰值 5G 工况, 相对无压力裤状态, 4 人(36%)表示着压力裤不适症状减轻, 7 人(64%)表示无差别。防护主观效果不明显, 体现在轻度呼吸困难消失和压迫感稍减轻各两例。躺姿峰值 7G 工况, 相对无压力裤状态, 3 人(60%)表示着压力裤不适症状减轻, 2 人(40%)表示无差别。无压力裤出现两例明显呼吸困难和一例眩晕、头痛, 在着压力裤状态下均未出现。

与无压力裤防护相比, 着压力裤时志愿者主观感受评分均呈升高趋势(见表 5), 且在卧姿峰值 5G 工况下具有显著性差异($P < 0.05$)。

Table 5. Subjective perception score of volunteers

表 5. 志愿者主观感受评分

是否着压力裤	工况		
	卧姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 5G (n = 11)	躺姿峰值 7G (n = 5)
否	3.2 ± 1.0	3.4 ± 0.8	2.4 ± 0.5
是	3.9 ± 0.8*	3.6 ± 0.8	2.8 ± 0.4

* $P = 0.039$, 与无压力裤防护相比。

4. 讨论

航天实践表明, 在重返大气层和着陆期间, 穿着抗荷服的航天员比没有穿抗荷服的航天员有更高的动脉压[17]。作为一种超重防护措施, 梯度压力裤通过对下肢和腹部体表施加机械压力, 有利于下半身静脉血液的回流和增加动脉系统的外周阻力, 维持动脉压。但不同工况下, 梯度压力裤具有不同的防护效果。

峰值 5G 过载下, 受试者在卧姿状态时, 梯度压力裤有效减轻了志愿者不适感受, 减少了过载峰值时刻心率变化值。卧姿状态存在头盆向(+Gz)超重, 压力裤能够限制+Gz 导致的腹部及下肢小静脉血管扩张, 防止血液在腹腔及下肢淤积过多。梯度压力裤能够有效维持动脉压, 保证大脑及心肺的血液量。此外数字模型仿真研究表明: 超重环境中, 人体在卧姿状态下内脏器官存在较大的位移和变形[4]。通过压力裤防护, 限制了膈肌的位移及变形, 进而限制了心脏、大血管的位移变形, 减少了+Gz 对心血管的机械性影响。通过限制膈肌, 压力裤防护还减少了肺的变形和位移, 志愿者未出现无防护时轻度呼吸困难的主观感受。

峰值 5G 过载下, 对于躺姿状态, 压力裤的防护效果不明显。躺姿状态无+Gz 作用, 不存在头部到心脏的静水压力变化和明显的血液下肢转移[5]。无防护时, +Gx 对人体生理影响较小, 压力裤防护遂无明显效果。此外, 压力裤防护效果与压力设置相关。试验中压力裤的小腿和大腿部分调节的压力(小腿 45 ± 10 mmHg, 大腿 30 ± 10 mmHg)较大, 卧姿状态对抗+Gz 有效果。腹部压力调节相对较小(20 ± 10 mmHg), 影响+Gx 防护效果。在针对超重防护的试验研究中, 吴萍等[12]在调研美俄航天抗荷服的基础上, 研制了我国航天抗荷服的原理样机, 在穿着压力为 30~40 mmHg 情况下(腹部压力也在此范围内), 志愿者头晕和视觉模糊的发生率显著减少, 离心机+Gx 耐受时间增加, 心率改变量呈降低趋势, 脉搏波高度变化率呈降低趋势。在飞行器着陆期间, 美国航天员均穿着可调节压力航和服, 对腹部、臀部和小腿加压约 52 mmHg, 有效增加了航天员的超重耐力, 对抗立位耐力降低的发生[7]。然而, 抗荷服加压过高会出现

肢体发麻、压痛和穿着耐受时间明显减少的现象,不同类型的抗荷服具有不同的作用特点。因此,建议进一步试验探索满足梯度压力裤抗荷效果和舒适性的最优压力制度。

躺姿状态,峰值 7G 工况下,梯度压力裤有一定防护效果。相较于峰值 5G 工况,峰值 7G 工况对人体生理指标和主观感受产生较大影响,使人体出现明显呼吸困难和低血氧症[18]。除了有效维持血压,压力裤的压迫感还可以增强交感神经活动,增强呼吸功能[19]。试验显示,梯度压力裤延迟和减缓了峰值时刻血氧饱和度的降低,并防止志愿者出现明显的呼吸困难和眩晕、头痛等严重不适症,保障超重环境中人体的安全和健康。

5. 结论

本文为了验证一种压力可调的梯度压力裤的加速度防护效果,进行了三种工况下的超重试验。每种工况根据是否着压力裤进行两组试验作对照。根据试验结果,得出如下结论:

1) 试验前,梯度压力裤对基础心率和基础血氧饱和度无明显影响,着压力裤使人体基础血压呈升高趋势,能够有效维持动脉压。

2) 卧姿工况下,梯度压力裤有效减少再入过载时的心率变化,主观评分显著提高,具有较好的加速度防护效果。

3) 躺姿工况下,梯度压力裤在较低(峰值 5G)过载的防护效果不明显,志愿指主观评分稍有提高;在高(峰值 7G)过载环境中能够延迟和减缓血氧饱和度的降低,防止呼吸明显困难和眩晕、头痛等严重不适的发生,具有一定的加速度防护效果。

基金项目

中国载人航天领域预先研究项目(020101)。

参考文献

- [1] Prisk, G.K. (2019) Pulmonary Challenges of Prolonged Journeys to Space: Taking Your Lungs to the Moon. *Medical Journal of Australia*, **211**, 271-276. <https://doi.org/10.5694/mja2.50312>
- [2] Wood, E.H. (1992) Potential Hazards of High Anti-Gz Suit Protection. *Aviation Space and Environmental Medicine*, **63**, 1024-1026.
- [3] 费军, 吴斌, 张朝利, 等. 多层螺旋 CT 在+Gx 作用致猴多器官损伤研究中的应用[J]. 航天医学与医学工程, 2005(5): 334-338.
- [4] 刘炳坤, 马红磊, 李富柱, 等. 典型月轨返回再入过载作用下乘员动力学响应的仿真分析[J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34(2): 95-101.
- [5] Erdinç, E. (2021) Effects of Aerospace Environments on the Cardiovascular System. *Anatolian Journal of Cardiology*, **25**, 3-6. <https://doi.org/10.5152/AnatolJCardiol.2021.S103>
- [6] Albery, W.B. (2004) Acceleration in Other Axes Affects +Gz Tolerance: Dynamic Centrifuge Simulation of Agile Flight. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, **75**, 1-6.
- [7] 孙喜庆, 姜世忠. 航空航天生物动力学[M]. 西安: 第四军医大学出版社, 2013: 32-110.
- [8] 张立辉, 金朝, 徐艳, 耿喜臣. 持续性加速度生理与防护研究进展[J]. 中华航空航天医学杂志, 2014(4): 299-307.
- [9] Platts, S.H., Tuxhorn, J.A., Ribeiro, L.C., et al. (2009) Compression Garments as Countermeasures to Orthostatic Intolerance. *Aviation Space and Environmental Medicine*, **80**, 437-442. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2473.2009>
- [10] 刘亚楠, 贾镇远. 抗荷服的发展综述[J]. 甘肃科技, 2015, 31(18): 15-16.
- [11] 刘光远, 沈羨云, 陈涤明. 重力生理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [12] 吴萍, 吴斌, 陈晓萍, 等. 中长期飞行对人体超重耐力影响及防护技术研究[J]. 载人航天, 2015(2): 171-178, 204.
- [13] 高原, 石菲, 王永春, 等. 不同覆盖面积抗荷服在+1Gz 时充气对人体心血管功能的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(1): 12-15.

-
- [14] 贾蕊溪, 席林斌, 陈树刚, 等. 航天员用梯度加压裤[P]. 中国, CN307427136S. 2022-07-01.
- [15] 鲁建国, 沈博强, 赖玉梁, 等. 一种压力可调的梯度压力裤[P]. 中国, CN208160064U. 2018-11-30.
- [16] 肖艳华, 刘炳坤, 王健全, 等. 登月返回再入人体卧姿和躺姿超重动态响应实验研究[J]. 载人航天, 2021, 27(1): 22-26.
- [17] Perez, S.A., Charles, J.B., Fortner, G.W., *et al.* (2003) Cardiovascular Effects of Anti-G Suit and Cooling Garment during Space Shuttle Re-Entry and Landing. *Aviation Space and Environmental Medicine*, **74**, 753-757.
- [18] 孙浩, 祝郁, 肖艳华, 等. 典型月地返回再入加速度作用下躺姿人体生理效应[J]. 国际航空航天科学, 2022, 10(3): 44-53.
- [19] 郑晴, 王宏付, 柯莹. 运动压力裤的功能研究进展[J]. 服装学报, 2018, 3(6): 482-486.