

# 典型月地返回再入加速度作用下躺姿人体生理效应

孙浩<sup>1</sup>, 祝郁<sup>2</sup>, 肖艳华<sup>2</sup>, 王健全<sup>2</sup>, 邓金辉<sup>2</sup>, 王惠娟<sup>2</sup>, 刘炳坤<sup>2</sup>, 肇海<sup>2</sup>, 任逸<sup>3</sup>,  
刘军莲<sup>2</sup>, 马红磊<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学研究生院, 北京

<sup>2</sup>中国航天员科研训练中心, 北京

<sup>3</sup>江苏大学机械学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2022年8月12日; 录用日期: 2022年9月14日; 发布日期: 2022年9月20日

## 摘要

探索典型月地返回再入时人体躺姿状态下加速度过载的生理效应和作用规律。选拔11名志愿者完成最大峰值3 g、5 g的过载试验, 其中5名志愿者另完成了最大峰值7 g的过载试验。利用载人离心机模拟两种典型过载: 嫦娥返回模式、阿波罗返回模式。试验过程中监测志愿者心率、血压、血氧饱和度等生理指标, 记录志愿者主观感受, 并设计综合评分标准进行综合评价。志愿者全部完成预设试验; 能够耐受峰值7 g的典型过载, 但出现了明显的不适症状。试验过程中志愿者综合评分显著降低( $P < 0.05$ )。随着过载增大, 压迫性呼吸困难成为主要影响因素, 个别志愿者出现低氧血症。与嫦娥返回过载环境相比, 阿波罗返回过载环境下不适感稍强烈。典型月地返回躺姿状态, 建议加强乘员胸部和呼吸功能的防护; 5 g以上过载对人体生理指标和主观感受产生较大影响, 因此飞船再入气动设计应尽量减少高过载作用时间。

## 关键词

返回再入, 持续性加速度, 超重, 生理效应, 躺姿, 加速度防护, 载人离心机

# Physiological Effects in Lying Position under Typical Lunar-Earth Reentry Acceleration

Hao Sun<sup>1</sup>, Yu Zhu<sup>2</sup>, Yanhua Xiao<sup>2</sup>, Jianquan Wang<sup>2</sup>, Jinhui Deng<sup>2</sup>, Huijuan Wang<sup>2</sup>,  
Bingkun Liu<sup>2</sup>, Hai Zhao<sup>2</sup>, Yi Ren<sup>3</sup>, Junlian Liu<sup>2</sup>, Honglei Ma<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Space Engineering University, Beijing

<sup>2</sup>China Astronaut Research and Training Center, Beijing

<sup>3</sup>Mechanics Institute, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

\*通讯作者。

文章引用: 孙浩, 祝郁, 肖艳华, 王健全, 邓金辉, 王惠娟, 刘炳坤, 肇海, 任逸, 刘军莲, 马红磊. 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. DOI: 10.12677/jast.2022.103005

## Abstract

To explore the physiological effects and rules of hypergravity on human body in lying position during the typical lunar-earth reentry, 11 volunteers were selected to complete the maximum peak overload test of 3 g and 5 g, and 5 of them completed the maximum peak overload test of 7 g. Two typical overload environments were simulated by manned centrifuge: Chang'e return mode and Apollo return mode. During the experiment, the physiological indexes such as heart rate, blood pressure and oxygen saturation were monitored, the subjective feelings of the volunteers were recorded, and a comprehensive scoring standard was designed for comprehensive evaluation. All the volunteers completed the preset test; they were able to tolerate the typical overload of 7 g, but showed obvious symptoms of discomfort. The comprehensive score of the volunteers decreased significantly during the experiment ( $P < 0.05$ ). With the increase of overload, compressive dyspnea became the main influencing factor, and some volunteers developed hypoxemia. Compared with Chang'e's reentry mode, the discomfort in Apollo reentry mode is a little stronger. It is suggested to strengthen the protection of the occupant's chest and respiratory function; the overload of more than 5 g has a great influence on the human physiological index and subjective feeling, so the aerodynamic design of the spacecraft reentry should reduce the high overload time as much as possible.

## Keywords

Reentry, Sustained Acceleration, Hypergravity, Physiological Effects, Lying Position, Acceleration Protection, Manned Centrifuge

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

载人登月任务应确保月地返回再入加速度安全。与近地轨道载人飞行返回相比, 载人月地返回再入具有长时、重复、高过载的特点, 导致损伤风险显著增加[1]。研究加速度作用的生理效应对确保航天员的生命安全和身体健康等方面具有重要作用[2]。根据国内外工程实践, 探月工程再入采用跳跃式半弹道返回, 并根据是否跳出大气层具有不同的过载特点。我国 CE-5T1 返回器在实施初次气动减速后, 返回器向上跃起跳出大气层, 随后返回器再次进入大气层, 实施第 2 次气动减速[3]。返回中, 两次再入过载峰值间经历了较长时间接近 0 g 的开普勒段。美国阿波罗飞船返回模式也是采用跳跃式, 但飞船返回舱在大气层内完成跳跃, 两次再入过载峰值间有持续的加速度作用[4] [5]。

阿波罗飞船再入时乘员采用躺姿[6], 航天员暴露于高水平的胸背向加速度(+G<sub>x</sub>) [7]。对+G<sub>x</sub>的生理学研究倾向于集中在呼吸系统[8] [9] [10]。+G<sub>x</sub>作用使得腹腔脏器挤压膈肌, 使吸气时膈肌下降受到阻碍; 胸廓重量增加, 加大了吸气肌的负担并压迫肺脏, 导致呼吸困难和胸痛。重力的静水压效应使肺内发生气血分离, 导致血氧饱和度下降, 出现缺氧的一系列生理变化。近年来, 有学者利用电阻抗断层扫描技术监测高 G 加速度下的动态肺行为, 研究+G<sub>x</sub>的肺部生理效应和作用原理[11] [12]。+G<sub>x</sub>对心血管系统

产生一定作用。研究证实,心脏在 5Gx 时向后移位[13],右心房压和平均主动脉压均有增加[14] [15]。+Gx 可以提高心率,但当加速度达到一定值而继续增大时,又会出现心率减慢,部分人群在高过载下容易出现心律失常和心脏活动抑制现象[16] [17]。

有学者通过数字假人和物理假人仿真对典型月地返回再入加速度作用进行了研究。刘炳坤等[1] [18] 利用 HUMOS 数字假人进行仿真研究,得到假人内脏器官的受力位移及变形情况。祝郁等[19] [20]利用 Hybird III 生物力学假人,通过载人离心机模拟半弹道式再入过载环境,开展了人体躺姿加速度动态响应研究,得到了躺姿状态下假人不同部位(头部、胸部和臀部)的响应规律。本试验利用载人离心机模拟两种典型返回再入加速度过载环境,通过志愿者试验获取躺姿人体生理指标及主观感受,对不同过载峰值下人体的生理效应进行研究,探索作用规律和原理。

## 2. 方法

### 2.1. 被试者

从社会招募健康志愿者 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。对 11 名志愿者分别进行峰值为 3 g、5 g 的超重试验,5 名男性志愿者还进行峰值 7 g 的超重试验。本试验在中国航天员科研训练中心完成,本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

依托中国航天员科研训练中心 98 型载人离心机提供跳跃式加速度过载环境。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。在吊舱内安装躺姿座椅(图见[19]),通过座椅底部联接锁止机构与吊舱地板滑轨安装固定。

利用 HYG08 型心电监护仪(日本光电),全过程连续监测心电、心率和血氧饱和度,在试验前和停止时刻测量收缩压和舒张压。

### 2.3. 过载环境设计

根据国内外载人探月任务实践经验,以 CE-5T1 返回器、Apollo 10 返回舱再入参数设计试验过载环境,分别代表高速再入返回“跳出”大气层、“不跳出”大气层的工况。为模拟再入返回加速度过载环境并探讨人体作用规律,按照这两种再入曲线,设计峰值加速度分别为 3 g、5 g、7 g 的测试曲线(见图 1),并保持双峰脉宽及总时间一致。

### 2.4. 试验方法

每名志愿者按照过载峰值由低到高的顺序进行试验,两次试验间隔不少于 4 h,确保志愿者生理状态得到恢复。试验前,确认志愿者状态符合试验要求,佩戴 HYG08 型心电监护仪。志愿者进入离心机吊舱,以自然舒展姿态平躺于座椅内(背角为 0°),头部贴近座椅头靠,腿部置于脚踏平板上。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,座椅还提供脚部束缚带进行固定。测量志愿者血压,并开始连续监测心率、心电和血氧饱和度等生理参数。关闭吊舱门,离心机按照设计的过载曲线运行。试验结束时,测量志愿者血压,志愿者在座椅内静息 3 min,完成生理监测。在试验过程中,志愿者出现视觉模糊,心率、心电异常或感觉严重不适,立即终止试验。

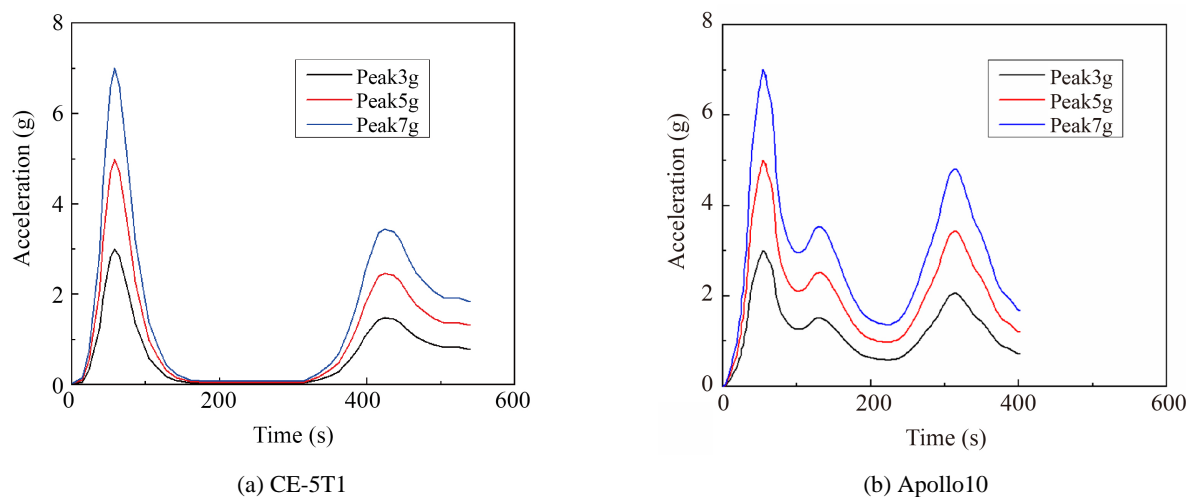


Figure 1. Reentry overload curve

图 1. 再入过载曲线

## 2.5. 综合评价

为综合对比不同工况对人体的影响,对受试者的心血管、呼吸和主客观反应进行综合评分。采用加权方式进行综合评分:主客观反应的权值为 0.2,呼吸反应的权值为 0.3,心血管反应的权值为 0.5,具体评分标准见表 1。

Table 1. Comprehensive scoring standard of overweight test

表 1. 超重试验综合评分标准

评价项目	评分标准					
	5	4	3	2	1	
主客观反应	主观感受	无明显不适	胸部稍有压迫感;呼吸稍困难	胸部压迫感明显;呼吸困难	轻度胸痛;呼吸困难明显	胸痛剧烈;恶心、呕吐;虚脱;晕厥等
	客观体征	未见异常	未见异常	未见明显异常	表情痛苦;出汗	大汗;超重作用后背皮肤出现瘀斑
心血管反应	最大心率 (次/min)	≤100	100~120	120~140	140~160	>160
呼吸反应	血氧饱和度(%)	≥95	90~95	80~90	75~80	<75

## 2.6. 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。同一工况下不同时刻的心率、血压和血氧饱和度采用单因素重复测量方差分析。同时刻生理参数相对于试验前的变化量采用配对 t 检验。志愿者综合评分采用 Wilcoxon 符号秩检验。P < 0.05 认为差异有统计学意义。

## 3. 结果

志愿者全部完成预设的超重试验。试验中受试者的各项生理指标未出现明显异常,出现的各类不适症状试验后均恢复正常。

### 3.1. 心率

志愿者心率均随着加速度增加而升高，在超重过载第一峰时心率达到最大，过载停止后心率逐渐恢复到试验前状态(见图 2)。

峰值为 3 g 的过载未对心率产生显著影响。峰值 5 g 的 CE-5T1 型过载未对心率产生显著影响；Apollo10 型过载下的心率，第一峰明显高于停止 3 min ( $P = 0.031$ )，停止明显高于停止 3 min ( $P = 0.030$ )。峰值 7 g 的 CE-5T1 型过载，第一峰明显高于停止( $P = 0.012$ )、停止 3 min ( $P = 0.019$ )；Apollo10 型过载，第一峰明显高于停止 3 min ( $P = 0.036$ )，第二峰明显高于停止( $P = 0.037$ )、停止 3 min ( $P = 0.027$ )，停止明显高于停止 3 min ( $P = 0.007$ )。

用第一峰时心率相对试验前的变化值(见图 3)表示超重因素造成心率增加值。人体在峰值 3 g、5 g、7 g 的典型过载中心率分别增加约  $3 \text{ min}^{-1}$ 、 $5 \text{ min}^{-1}$ 、 $15 \text{ min}^{-1}$ 。相同过载峰值，两种过载模式下心率变化没有显著性差异( $P > 0.05$ )。

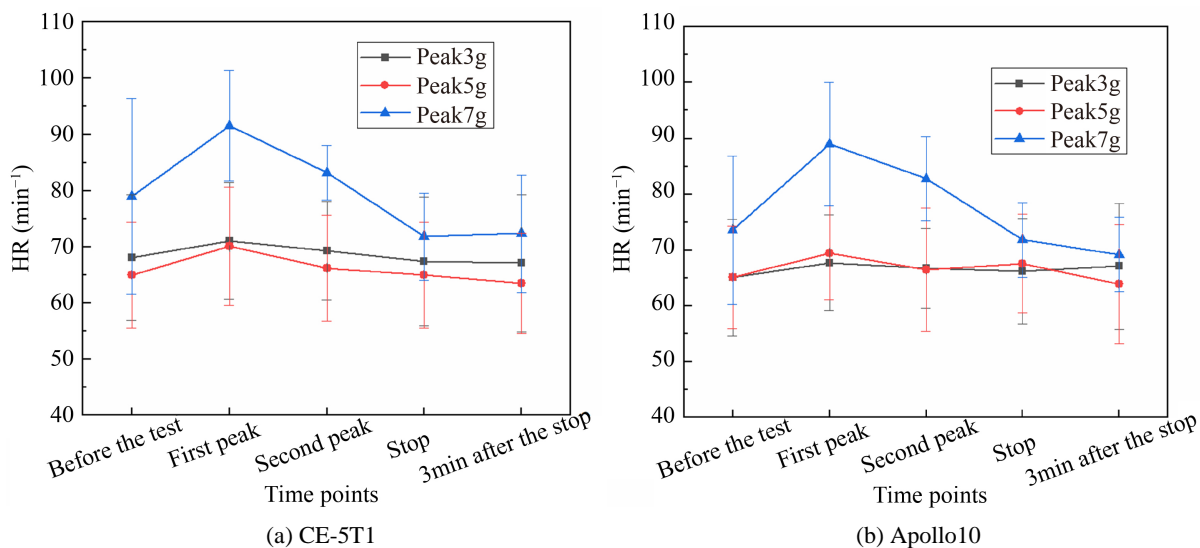


Figure 2. Heart rate at different time points  
图 2. 不同时间点的心率

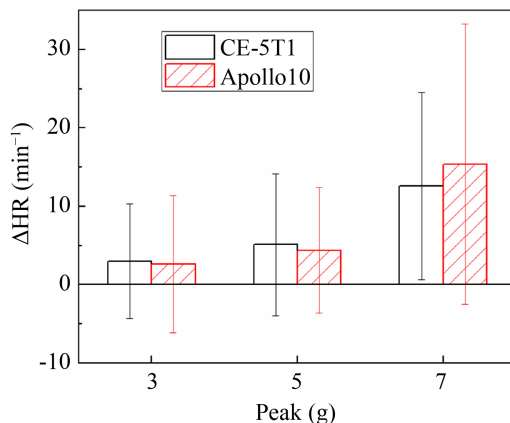


Figure 3. The change of heart rate at the first peak relative to that before the test  
图 3. 第一峰时心率相对试验前的变化值

### 3.2. 血压

分别在试验前和过载停止后, 测量受试者的血压(见表 2)。相同工况下, 试验前、后的受试者收缩压和舒张压没有明显变化( $P > 0.05$ ); 峰值相同的两种工况试验后收缩压和舒张压相对试验前的变化值也没有显著性差异( $P > 0.05$ )。峰值 7 g 试验前, 志愿者心理因素造成基础收缩压和舒张压出现升高现象。

**Table 2.** Blood pressure before and after the tests

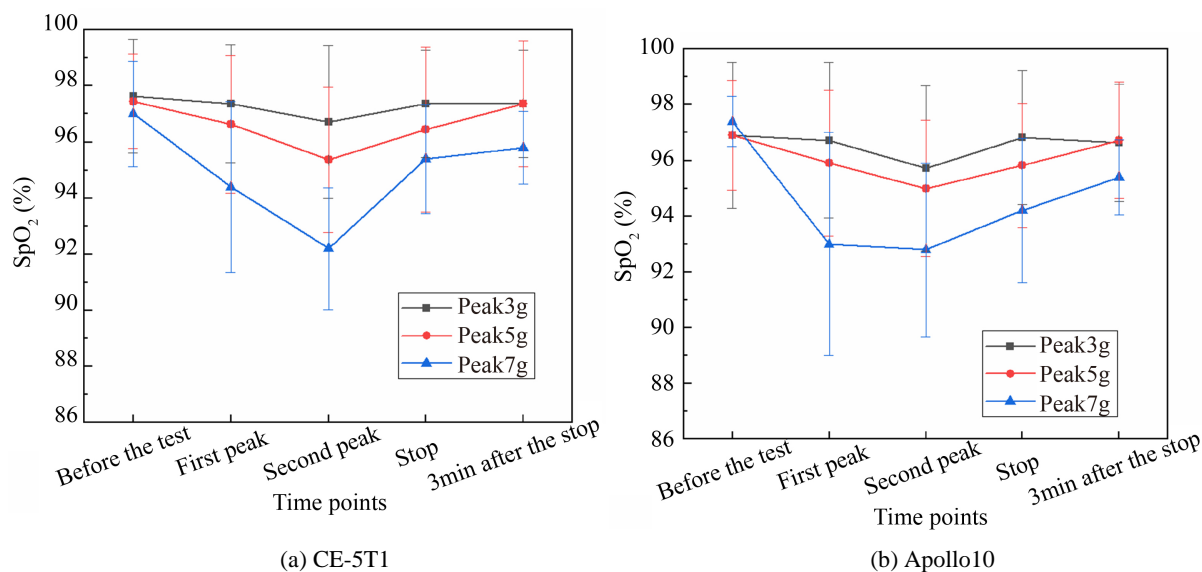
**表 2.** 试验前后血压

峰值(g)	过载类型	试验前		试验后	
		收缩压	舒张压	收缩压	舒张压
3	CE-5T1	116 ± 6	69 ± 6	112 ± 10	68 ± 9
	Apollo10	114 ± 9	69 ± 6	111 ± 7	69 ± 5
5	CE-5T1	119 ± 9	71 ± 8	116 ± 10	72 ± 8
	Apollo10	116 ± 7	70 ± 7	118 ± 7	72 ± 9
7	CE-5T1	126 ± 10	79 ± 5	124 ± 10	76 ± 13
	Apollo10	124 ± 6	76 ± 7	121 ± 7	74 ± 9

单位: mmHg。

### 3.3. 血氧饱和度

两种工况下, 血氧饱和度随过载的增大而逐渐降低, 其变化具有时间滞后的特点, 约在第二峰降到最低(见图 4)。峰值 3 g、5 g 的过载停止后, 志愿者血氧饱和度逐渐恢复, 峰值 7 g 过载停止 3 min 时血氧饱和度仍明显低于试验前的状态。



**Figure 4.** SpO<sub>2</sub> at different time points

**图 4.** 不同时间点的血氧饱和度

峰值 3 g 的 CE-5T1 型过载未对血氧饱和度产生明显影响; Apollo10 型过载下的血氧饱和度, 第二峰



明显低于试验前(P = 0.014)、第一峰(P = 0.013)、停止(P = 0.010)、停止 3 min (P = 0.024)。峰值 5 g 的 CE-5T1 型过载, 第二峰明显低于试验前(P = 0.002)、停止(P = 0.001)、停止 3 min (P = 0.000), 停止明显低于停止 3 min (P = 0.024); Apollo10 型过载, 第二峰明显低于试验前(P = 0.001)、停止 3 min (P = 0.005), 停止明显低于试验前(P = 0.010)。峰值 7 g 的 CE-5T1 型过载, 第二峰明显低于试验前(P = 0.001)、停止 3 min (P = 0.009), 停止 3 min 明显低于试验前(P = 0.033); Apollo10 型过载, 第二峰明显低于试验前(P = 0.011)、停止 3 min (P = 0.033), 停止明显低于试验前(P = 0.025), 停止 3 min 明显低于试验前(P = 0.003)。

用第二峰时血氧饱和度相对试验前的变化值(见图 5)表示超重因素造成血氧饱和度的降低值。人体在峰值 3 g、5 g、7 g 的典型过载中血氧饱和度分别下降约 1%、2%、5%。相同过载峰值, 两种再入模式间不同时间点的血氧饱和度相对试验前的变化值没有显著性差异(P > 0.05)。

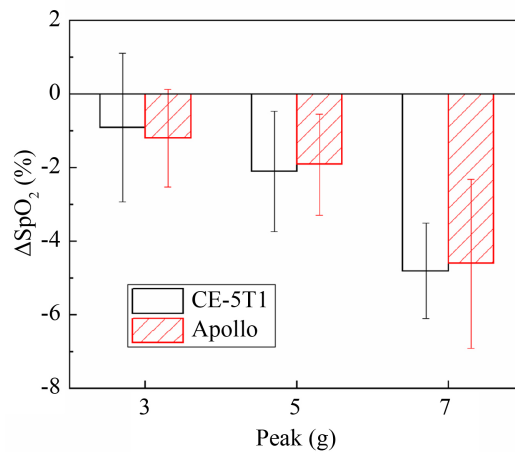


Figure 5. The change of SpO<sub>2</sub> at the second peak relative to that before the test

图 5. 第二峰时血氧饱和度相对试验前的变化值

### 3.4. 主观感受

志愿者不适感受随过载峰值的增加而更加强烈(见表 3)。峰值 3 g 过载 7 人无明显不适, 仅 4 名女性志愿者稍有压迫感, 2 名女性志愿者出现呼吸稍困难的症状。峰值 5 g 过载 2 名女性志愿者开始出现轻度胸痛。峰值 7 g 过载中(n = 5), 所有志愿者都出现了明显的压迫感和不同程度的呼吸困难, 2 名志愿者出现了眩晕、头痛症状。对比两类过载曲线, 峰值 5 g, 2 名志愿者表示类 Apollo10 过载下反应稍强烈; 峰值 7 g, 3 名志愿者表示类 Apollo10 过载下不适感稍强烈。

Table 3. Feeling of discomfort and the corresponding number of subjects

表 3. 不适感受及相应人数

症状	3 g (n = 11)		5 g (n = 11)		7 g (n = 5)	
	CE-5T1	Apollo10	CE-5T1	Apollo10	CE-5T1	Apollo10
无明显不适	7	7	0	0	0	0
稍有压迫感	4	4	6	6	0	0
压迫感明显	0	0	5	5	5	5
呼吸稍困难	2	2	6	6	3	1

Continued

呼吸困难	0	0	3	3	1	2
呼吸困难明显	0	0	0	0	1	2
轻度胸痛	0	0	2	2	0	1
流泪、咽分泌物增多	1	1	1	2	2	3
眩晕、头痛	0	0	0	0	2	1

### 3.5. 综合评价

志愿者综合评分见表4。与试验前相比,超重过载下志愿者综合评分显著降低( $P < 0.05$ ),且峰值越大,评分越低。峰值5 g过载下综合评分降低比3 g过载更显著。7 g过载样本量较少,在统计上造成综合评分降低的显著性较低。对比峰值相同的CE-5T1和Apollo10型过载,综合评分没有显著性差异( $P > 0.05$ )。

**Table 4.** Subjects' comprehensive score

**表 4.** 志愿者综合评分

峰值(g)	综合评分		
	试验前	CE-5T1	Apollo10
3 (n = 11)	5	4.87 ± 0.13*	4.80 ± 0.23*
5 (n = 11)	5	4.46 ± 0.21**	4.39 ± 0.22**
7 (n = 5)	5	3.94 ± 0.14*	3.83 ± 0.44*

注: \* $p < 0.05$  vs 试验前, \*\* $p < 0.01$  vs 试验前。

## 4. 讨论

躺姿状态下人体重要部位的动态响应与再入模式下的过载曲线变化趋势基本一致,且+G<sub>x</sub>为主要过载响应[19]。月地返回跳跃式再入大气层时,过载曲线具有第一峰值高、波形陡峭的显著特征,对人体生理耐受能力和再入安全性影响较大。志愿者心率随过载的增大而升高,约在第一峰时达到最大。躺姿状态心率增大受两方面影响:机体交感-肾上腺系统的整体兴奋增高造成心率加快[21],血氧饱和度下降引起心率反射性升高,其中前者为主要因素。据报道,+G<sub>x</sub>加速度峰值分别为3 g、5 g时,心率比对照值分别加快24 min<sup>-1</sup>和72 min<sup>-1</sup>[21],明显高于本试验心率变化值。以往试验座椅有一定背角,因此存在+G<sub>z</sub>作用造成心率加快明显。从心率考虑,躺姿座椅表现出较好的加速度防护效果。不同过载类型和峰值环境的志愿者心率均在正常代偿范围内,对心脏负荷影响较小。

研究显示[15],+G<sub>x</sub>作用引起右心房压力升高,反射性地使心脏迷走神经张力增高,与交感神经兴奋相互制约作用会引起心脏自主神经调节出现障碍,导致心律失常。躺姿背角为90°,且腿部抬高导致心血量更大,更容易出现心律失常。有航天员在承受+G<sub>x</sub>作用时出现了较严重的心律失调,与其年龄偏大(>45岁)相关[21]。本试验中,志愿者年龄均不超过45岁,呈窦性心律,未出现心率抑制和明显的心律失常现象。试验前后,测得收缩压和舒张压均没有明显变化,没有对血压调节能力造成影响。

数字仿真结果显示,躺姿下肺脏的压缩变形较明显[1],另有仿真假人试验显示,胸部的加速度响应较大[19],预示可能发生压迫性呼吸困难和肺的气血分离造成血氧饱和度降低。血氧饱和度(SpO<sub>2</sub>)在94%以下为供氧不足,临床中将SpO<sub>2</sub> < 90%作为低氧血症的阈值[22][23]。最新研究显示,高+G<sub>x</sub>过载下,



通气区由背侧移至腹侧, 上呼吸道塌陷, 造成低血氧症[11] [12]。在+4G<sub>x</sub>时, 由于个体差异造成不同受试者之间的通气分布变化差异很大。然而, 在+6G<sub>x</sub>时, 所有参与者都受到类似的影响[11]。本试验结果表明, SpO<sub>2</sub>的变化具有滞后性, 约在过载第二峰时降到最低。峰值 7 g 的典型过载造成更多志愿者的低血氧症, 验证了高峰期过载的影响十分显著。在试验停止 3 min 时, 志愿者 SpO<sub>2</sub> 仍低于试验前(P < 0.05), 但已恢复至 94% 以上, 不会对人体健康造成持续影响。

随着过载峰值的增大, 志愿者主观感受变化呈现出一定规律: 压迫感增大, 呼吸困难成为限制志愿者耐受的主要因素。以严重的呼吸困难和明显胸痛作为耐限标准, 峰值 7 g 过载已接近部分志愿者生理耐限。峰值 7 g 过载下, 由于血氧饱和度降低, 脑供氧不足; 另外 7 g 过载具有更大的角加速度刺激前庭器官, 造成志愿者出现眩晕、头痛的症状。尽管有研究表明性别对+G<sub>x</sub> 作用病理生理效应的影响并不突出[21], 但本研究显示典型过载环境下女性的不适主观感受更加强烈, 主要表现为胸部压迫感、呼吸困难以及轻度胸痛。

对比两类过载环境, 志愿者表示阿波罗过载下不适感稍强烈, 主要由两种过载的不同特点引起。从作用时间来讲, 类 CE-5T1 过载持续加速度作用时间整体较长, 加速度曲线双峰间隔较大; 类 Apollo10 过载相对持续较短、峰值间隔小。此外, Apollo10 返回舱因未完全跳出大气层, 加速度在 3 g 以上的持续作用时间更长。较高的持续过载必然给志愿者带来不适体验。类 CE-5T1 过载曲线两峰值间的长时间低过载让志愿者得到了一定的休息和恢复, 因此不适感略微降低。但两类过载环境下的生理指标以及综合评分未有显著性差异。

## 5. 结论

本试验模拟的 Apollo10 和 CE-5T1 返回器再入过程, 代表了两种典型的半弹道跳跃式超重过载环境。志愿者呈躺姿状态, 经历了峰值为+3G<sub>x</sub>、+5G<sub>x</sub> 和+7G<sub>x</sub> 过载作用。与 Apollo10 过载环境相比, CE-5T1 过载志愿者不适感略微降低。随着过载峰值的增高, 志愿者综合评分显著降低。试验停止后, 志愿者心率和血压均恢复至试验前状态, 心血管功能未发生改变, 供氧不足症状消失。随着过载峰值增大, 不适感受明显加剧。峰值 7 g 的过载环境中, 志愿者压迫感明显并出现低血氧症, 呼吸困难成为主要影响因素, 建议加强乘员胸部和肺功能的防护。较长时间的 5 g 以上过载使人产生强烈不适, 建议飞船再入气动设计时减少 5 g 以上过载作用时间。

## 基金项目

中国载人航天领域预先研究项目(020101)。

## 参考文献

- [1] 刘炳坤, 马红磊, 李富柱, 王健全, 肖艳华, 祝郁, 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.
- [2] 刘炳坤, 马红磊, 编著. 加速度生理学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.
- [3] 王帅帅. 探月飞船跳跃式再入参数在线估计与先进制导方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [4] Claude, A. (1972) Apollo Experience Report Mission Planning for Apollo Entry. NASA TN 6725.
- [5] James, O.R. (1969) Apollo Entry Summary Document Mission F. NASA Manned Space Center N70-34184.
- [6] Drexel, R.E. and Hunter, H.N. (1973) Apollo Experience Report: Command Module Crew-Couch/Restraint and Load-Attenuation Systems. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.
- [7] Pollock, R.D., Hodkinson, P.D. and Smith, T.G. (2021) Oh G: The X, Y and Z of Human Physiological Responses to Acceleration. *Experimental Physiology*, **106**, 2367-2384. <https://doi.org/10.1113/EP089712>

- [8] Wood, E.H. and Clark, A. (1963) Influence of Acceleration on Pulmonary Physiology. *Federation Proceedings*, **22**, 1024-1034.
- [9] Wood, E.H. (1967) Some Effects of Gravitational and Inertial Forces on the Cardiopulmonary System. *Aerospace Medicine*, **38**, 225-233.
- [10] 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>
- [11] Menden, T., Alcaín, G.B., Stevenson, A.T., Pollock, R.D., Tank, H., Hodkinson, P., et al. (2021) Dynamic Lung Behavior under High G Acceleration Monitored with Electrical Impedance Tomography. *Physiological Measurement*, **42**, Article ID: 094001. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ac1c63>
- [12] Pollock, R.D., Jolley, C.J., Abid, N., Couper, J.H., Estrada-Petrocelli, L., Hodkinson, P.D., et al. (2021) Pulmonary Effects of Sustained Periods of High-G Acceleration Relevant to Suborbital Spaceflight. *Aerospace Medicine and Human Performance*, **92**, 633-641. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5790.2021>
- [13] Sandler, H. (1966) Cineradiographic Observations of Human Subjects during Transverse Accelerations of +5Gx and +10Gx. *Aerospace Medicine*, **37**, 445-448.
- [14] Lindberg, E.F., Marshall, H.W., Sutterer, W.F., McGuire, T.F. and Rood, E. (1962) Studies of Cardiac Output and Circulatory Pressures in Human Beings during Forward Acceleration. *Aerospace Medicine*, **33**, 81-91.
- [15] 薛月英, 刘光远, 谢宝生, 程学尧, 王彦昌. 不同方向超重作用下(犬)心血管系统反应规律的探讨[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 104-108.
- [16] Green, N.D.C. (2016) Long Duration Acceleration. *Ernsting's Aviation and Space Medicine*, **5**, 131-156.
- [17] 吴斌, 薛月英, 吴萍, 谷志明, 刘兴华, 由广兴. 高+Gx 作用下人体的心肺反应[C]//中国生理学会第八届全国青年生理学工作者学术会议论文摘要. 南昌: 中国生理学会, 2009: 22.
- [18] 孙浩, 马红磊, 刘炳坤, 王健全, 肖艳华, 祝郁, 等. 典型返回再入体位对 HUMOS 假人动态响应影响研究[J]. 国际航空航天科学, 2020(8): 86-92. <https://doi.org/10.12677/JAST.2020.84011>
- [19] 祝郁, 肖艳华, 王健全, 刘炳坤, 费锦学, 国耀宇, 等. 躺姿半弹道式再入假人动态响应研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4): 108-113. <https://doi.org/10.12677/JAST.2020.84014>
- [20] 肖艳华, 刘炳坤, 王健全, 邓金辉, 祝郁, 刘志刚, 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.
- [21] 孙喜庆, 姜世忠(主编). 航空航天生物动力学[M]. 西安: 第四军医大学出版社, 2013.
- [22] 王浩, 张锦, 刘洪涛. 严重低氧血症患者 SpO<sub>2</sub> 正常一例[J]. 临床麻醉学杂志, 2019, 35(4): 412-413.
- [23] 孙隼. 浅谈血气分析仪电极法检测 SaO<sub>2</sub> 上的方法学限制[J]. 医学美容美容, 2015(4): 639-640.