



论 文

用于失重条件下下肢骨肌锻炼的仿生黏附鞋及在轨验证

姬科举^{1†}, 李志利^{2†}, 李英泽¹, 姬原鸣¹, 邹朋², 周瑞¹, 曲丽娜², 王春艳², 米涛², 袁敏², 王林杰², 李莹辉^{2*}, 戴振东^{1*}

1. 南京航空航天大学, 仿生材料与装备江苏省高校重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航天员科研训练中心, 航天医学全国重点实验室, 北京 100094

† 同等贡献

* E-mail: yinghuidd@vip.sina.com; zddai@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2024-01-19; 接受日期: 2024-06-28; 网络版发表日期: 2024-12-09

航天医学实验领域项目(编号: HYZHXM01009)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 52075249)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 62233008)和航天医学全国重点实验室项目(编号: SMFA22B02)资助

摘要 近地轨道空间站是人类走出地球, 进入太空的第一驻留点, 也是研究空间环境对人类行为及健康影响的平台. 研究表明失重环境对骨骼和肌肉功能维持具有显著负面影响, 重力下保持对骨骼和肌肉的力学刺激, 是维持其主要功能的手段, 但现有在轨锻炼装置不能给下肢屈肌施加足够的刺激. 受爬岩鳅、壁虎等动物在固体表面能产生吸附力的启发, 本文提出了一种失重环境下航天员下肢屈肌锻炼及防护方法, 发明了具有变刚度黏附单元的仿生黏附鞋, 并开展了地面和在轨性能验证. 仿生黏附鞋在微小的预压力下可稳定附着, 通过足底附着力刺激实现踏步中的下肢骨骼肌锻炼. 仿壁虎的低模量末端黏附层提高了对表面粗糙度的适应性, 仿爬岩鳅的附着结构以多机制协同的方式进一步提高了附着力和稳定性. 地基和天基在轨实验表明, 该仿生黏附鞋具有低预压、强黏附的接触力学特点, 能够实现对下肢骨肌的力刺激, 为航天员失重防护提供了一种仿生新技术.

关键词 仿生黏附, 摩擦, 黏附, 失重保护, 在轨运动, 下肢肌肉

1 引言

失重是航天飞行中最重要的环境因素, 此环境下, 航天员运动不需要克服重力, 导致肌肉负荷降低, 长期飞行会引发航天员机体失重性骨丢失、肌肉萎缩、心血管功能紊乱等问题^[1~7]. 失重对人体的影响以及如何防护一直是航天领域最重要的研究课题之一, 锻炼是

延缓或逆转骨骼和肌肉退化, 维持航天员在太空健康水平的主要措施^[8~12]. 国际空间站研发或引入了多种在轨锻炼方法^[13~15], 如飞轮、阻抗、跑台等装备, 获得了良好锻炼效果, 但尚不能实现全面的骨肌锻炼功效, 特别是提供针对屈肌的力刺激. 如果能够在航天员足底提供一个模拟重力的附着力, 使穿戴者附着在空间站表面, 抬腿过程克服附着力实现下肢屈肌系统

引用格式: 姬科举, 李志利, 李英泽, 等. 用于失重条件下下肢骨肌锻炼的仿生黏附鞋及在轨验证. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 2337–2346
Ji K J, Li Z L, Li Y Z, et al. Bionic adhesive shoes and in-orbit test for lower limb bone muscle exercise under weightless conditions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 2337–2346, doi: [10.1360/SST-2024-0024](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0024)

的力刺激和锻炼, 实现对特定肌群的针对性力刺激, 将有助于强化长期在轨飞行的失重防护措施, 提升骨肌系统锻炼的全面性。磁吸附或尼龙搭扣是常见固定防漂方式^[16], 但需要特定配合部件才能起作用, 结合电磁兼容方面的影响, 限制了其在在轨的有效应用。本文结合在轨失重和航天员生活环境因素, 以自然界生物附着功能器官为仿生原型, 设计了一种具有低预压、高摩擦、强黏附特性的仿生黏附鞋, 为航天员下肢骨骼肌系统锻炼提供新的装置和方法。

2 仿生启示与思路

自然界中许多动物能够在竖直面甚至负表面(墙、天花板等)上附着和运动, 其附着器官的结构和附着力的调控方式, 为解决宇航员固定和失重防护提供了设计灵感。爬岩鳅(*Beaufortia levertti*)生活在湍急的河水中, 其腹部附着结构呈现类吸盘形态, 腹部吸盘唇边绒毛组织呈现出低模量特性, 使爬岩鳅能够在低预压下稳定附着在河床粗糙的岩石表面, 依靠吸附力和摩擦力抵抗水流冲击, 其附着器官结构如图1(a)所示^[17,18], 具有飞檐走壁能力的壁虎同样展现出优异的全空间附着能力, 其多层级的脚趾皮瓣与刚毛结构, 具有变模量的材料特性, 展现出高摩擦、可控黏附的接触力学特性, 其黏附脚的结构如图1(b)所示。受上述

动物附着器官结构功能的启发, 结合宇航员在轨锻炼行动模式和作用力调节的需要, 本文发明了一种微重力下航天员踏步锻炼用的仿生黏附鞋。鞋底根据人体足部受力分布设置为两个黏附单元, 黏附单元仿爬岩鳅和壁虎的附着器官设计, 具有变模量的多层级结构(图1(c)~(e))。低模量的末端黏附层被验证能在较低的预压力下与目标表面贴合^[19,20], 结合黏附单元整体采用平底吸盘结构设计, 保障了仿生黏附单元实现稳定附着所需的低预压、高摩擦、强黏附, 为穿戴者提供下肢骨肌系统刺激所需的拉力; 多层级、变模量的仿生设计使黏附单元能够适应不同粗糙表面。在此基础上, 研制了仿生黏附鞋(图1(f))。

3 仿生黏附鞋的制备及其性能测试实验

3.1 变模量仿生黏附单元的制备

采用硅橡胶硫化成型工艺制备仿爬岩鳅平底黏附单元(硅橡胶邵氏硬度为51 HA, 弹性模量为1.73 MPa, 拉伸强度为10 MPa, 撕裂强度为28 MPa), 并定义为单模量黏附单元。将洁净的玻璃基板做氧等离子体处理, 然后用1H-1H-2H-2H-全氟癸基三氯硅烷(FDTS)对玻璃基板做防黏处理。按质量比1:1均匀混合Ecoflex 00-30 (Smooth-On Inc.)的A和B组分形成预聚体, 用涂布装置均匀涂布在玻璃基板上, 将单模量黏附单元浸渍

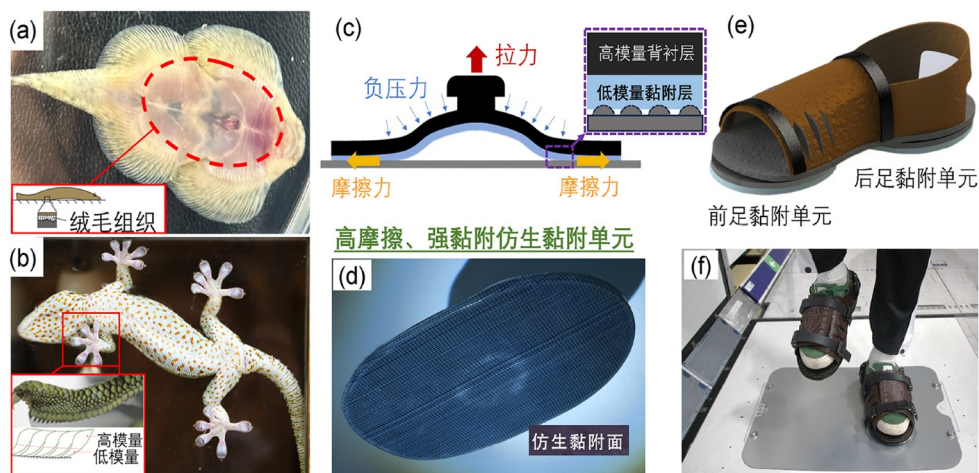


图1 (网络版彩图) (a) 爬岩鳅及吸盘-绒毛变模量附着器官结构; (b) 壁虎脚爪-刚毛呈变模量结构; (c) 仿生黏附单元设计原理图; (d) 仿生黏附面; (e) 仿生黏附鞋; (f) 太空舱内使用的仿生黏附鞋

Figure 1 (Color online) (a) *Beaufortia* and suction cup-fluff variable-modulus adhesive structure; (b) Gecko toe and variable-modulus attachment; (c) schematic diagram of the design of bionic adhesive unit; (d) bionic adhesion surface; (e) bionic adhesive shoes with front and hind foot units; (f) bionic adhesive shoes used in the space capsule.

于预聚体中,用0.3 mm的垫片控制浸渍厚度,然后烘箱加热到100℃,1 h固化成型,成型后末端黏附面材料模量为156 kPa,邵氏硬度为20 HA,定义该复合结构为变模量仿生黏附单元。

3.2 仿生黏附鞋设计制备

仿生鞋帮面用聚氨酯皮革制成,皮革内侧缝纫尼龙编织层以提高鞋帮面强度。鞋帮面和鞋底采用激光裁切得到,用缝纫工艺将鞋帮与鞋底集成为一体。为提高黏附单元与鞋底之间的结合强度,黏附单元通过内嵌不锈钢卡环缝纫到鞋底上。在鞋帮面前足和足跟区域设置可调节的锁扣,以便适应不同足部尺寸和紧度要求。

3.3 黏附鞋的性能及寿命实验

粗糙表面上的法向黏附力用万能拉伸试验机测定,测试表面为粗糙度600~7000目的砂纸,并用激光共聚焦显微镜(Olympus, 日本)测定粗糙度数值 Ra 范围为2~12 μm 。砂纸用背胶贴在铝合金平板上,以法向预压力(2~10 N)将仿生黏附单元与砂纸表面接触,然后以设定速度实现法向脱附,每组试验重复3次。

黏附单元的切向摩擦性能用摩擦试验机(UMT TriboLab™, BRUKER, 美国)测定。从黏附单元的唇边区域裁切1 cm×1 cm的面积作为上试样,不同目数的砂纸为下试样,设定法向力为60 mN,切向移动速度为0.1 mm/s,记录切向移动过程中的摩擦力,实验重复3次。

用橡胶屈挠龟裂试验机测试仿生黏附鞋的疲劳寿命。试验机控制仿生黏附鞋与哑光铝合金板黏附与脱附,一次黏附与脱附记为一个周期,完成100000次的黏附-脱附疲劳测试,评估仿生黏附鞋的形貌与力学性能变化。

3.4 地面模拟失重实验

用自主研发的恒力悬吊系统模拟微重力环境,测试受试者在踏步锻炼过程中的接触反力和肌电、心率信号。实验系统由恒力悬吊机构(自研)、测力平台(NBIT, 中国南京)、肌电传感器(DELSYS, 美国)和心率采集仪(Polar, 芬兰)组成。受试者用恒力悬吊机构以垂直地面姿势悬吊,体重由恒力机构平衡。受试者穿戴仿生黏附鞋,按先后和同时两种方式开展踏步运动实验,其中先后方式是指后足黏附单元先脱附,然后前足黏附单元脱附;同时方式是指调节脚的受力角度,

使前后黏附单元接近同时脱附。测试过程中用节拍器控制步速为30步/min。

采集的肌电信号用MATLAB做四阶巴特沃斯滤波滤除10~400 Hz之外的噪声信号^[21],计算肌电信号的均方根肌电值(RMS)。使用SPSS 13.0软件分析肌电信号的特征,用Shapiro-Wilk法检验测试数据是否服从正态分布,对于服从正态分布的数据采用配对样本T检验对比肌电数据间的两两差异;不服从正态分布则使用Wilcoxon符号秩检验数据间的两两差异,当 $P<0.05$ 时认为数据间存在显著性差异,当 $P<0.01$ 时认为数据间显著性差异十分明显。

3.5 航天员穿着仿生黏附鞋的地面和在地实验

航天员穿戴仿生黏附鞋做地面和在地实验,实验过程用肌电传感器(DELSYS, 美国)记录选定肌群肌电信号。地面实验中,航天员穿着仿生黏附鞋分别以先后方式与同步方式各踏步测试21 min,并采集了无黏附踏步时肌电信号为对照组;在轨实验中,航天员穿着仿生黏附鞋踏步测试12 min,并以2 min空蹬动作为参照,实验过程中采集下肢肌群的肌电信号。

4 仿生黏附鞋界面力学特性及地面模拟实验研究

4.1 仿生黏附单元的黏附力学性能

图2展示了仿生黏附单元的法向附着力和切向摩擦力的实验结果。图2(a)显示仿生黏附单元的法向附着力值在脱附中出现双峰现象,即脱附过程附着力第一次到达峰值(约250 N),之后迅速衰减,接着达到第二个峰值(约275 N),然后完全脱附。附着力的首次衰减伴随仿生黏附单元边缘局部出现褶皱,褶皱出现在椭圆形的仿生黏附单元短轴末端,原因是高分子弹性体在黏附力、负压吸附、切向摩擦力与法向拉力的联合作用下,椭圆形单元结构的长短轴各向异性造成了近端弹性体的面内牵拉变形,唇边与接触基底之间的表面接触状态被破坏,影响到黏附面积和负压腔体稳定性,造成附着力迅速衰减;随着进一步受力近端弹性体的面内牵拉变形减弱,恢复了黏附单元唇边的接触,呈现出附着力提升,直至在拉力作用下黏附和负压腔被打破,完成仿生黏附单元的脱附行为。

图2(b)为仿生黏附单元附着力与预压力的关系。

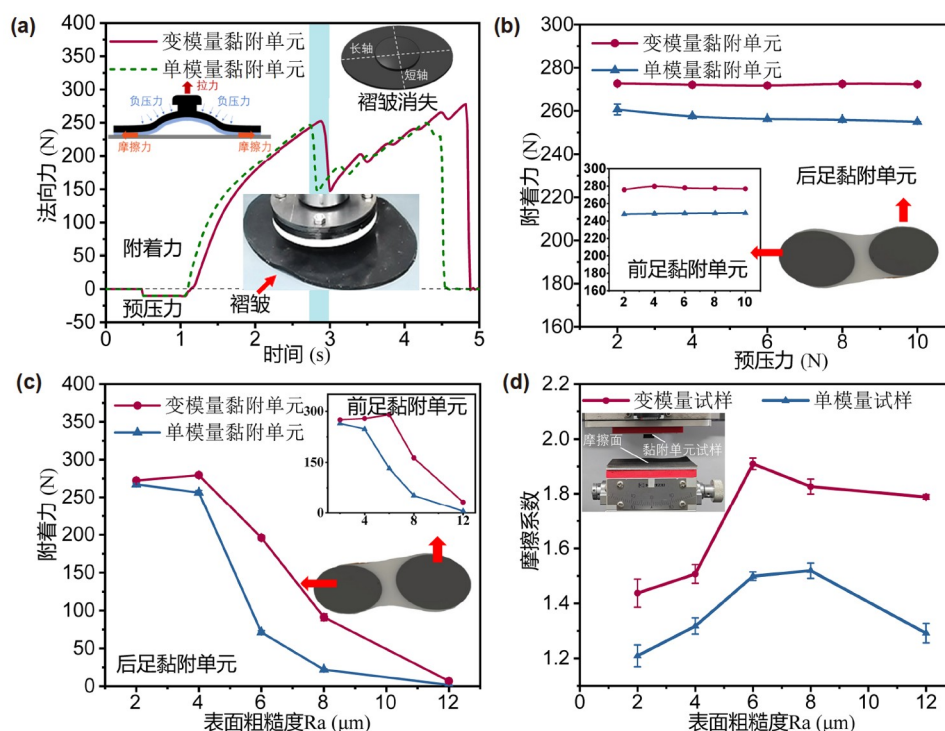


图 2 (网络版彩图) (a) 变模量和单模量仿生黏附单元法向附着力测试图, 其中竖条阴影部分对应黏附单元唇边出现褶皱时间, 插图展示了褶皱出现的位置及接触力学分析; (b) 后足和前足仿生黏附单元的法向附着力随预压力的变化情况; (c) 后足和前足仿生黏附单元在不同粗糙度表面的法向附着力特性; (d) 仿生黏附单元样品在不同粗糙度表面的摩擦系数变化情况

Figure 2 (Color online) (a) Normal adhesion test of variable modulus and single modulus bionic adhesion unit, where the blue vertical bar corresponds to the time of folding on the lip of the adhesion unit, and the illustrations show the location of folding and contact mechanics analysis; (b) normal adhesion of the bionic adhesion unit in the front foot and hind foot changed with preloading; (c) normal adhesion characteristics of bionic adhesion units in the front foot and hind foot on surfaces with different roughness; (d) friction coefficients of bionic adhesion unit samples varied on surfaces with different roughness.

结果表明在表面粗糙度 $R_a=2\ \mu\text{m}$ 的基底上, 预压力从 2 N 增加到 10 N, 黏附单元的附着力没有显著变化 ($<2.3\%$), 说明仿生黏附单元呈现出在低预压下即可实现与目标表面的有效接触, 展现出低预压下的稳定附着特性, 能够满足在诸如微重力环境低预压力接触场景下的稳定附着需求。

接触面的粗糙度是影响仿生黏附单元界面力学特性的关键参数。空间站中光滑表面会造成眩光, 影响航天员作业, 因此仿生黏附单元必须适应非眩光的粗糙度。图2(c)为单模量和变模量黏附单元的附着力与粗糙度的关系。由图可见, 随着粗糙度从 $2\ \mu\text{m}$ 增加到 $12\ \mu\text{m}$, 仿生黏附单元的附着力呈现降低趋势, 在粗糙度 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 之间变模量仿生黏附单元的附着力显著高于单模量黏附单元的值, 其原因是低模量的表面黏附层对粗糙表面具有较好的充型适应性, 延缓或抑制负

压腔的局部破坏。但粗糙度达到 $12\ \mu\text{m}$ 后, 仿生黏附单元附着几乎失效, 过于粗糙的表面对于范德华力和负压吸附机制功能的发挥具有一定的限制性。

仿生黏附单元的高摩擦对稳定附着同样重要, 决定仿生黏附单元在接触和附着过程对切向扰动载荷的承载能力。图2(d)为变模量仿生黏附单元和单模量试样在不同粗糙度表面的摩擦系数关系曲线。实验显示黏附单元对砂纸表面的摩擦系数均随粗糙度增大而先增后降。变模量仿生黏附单元与粗糙面间的摩擦系数较单模量单元的对应值高 $14\%\sim 38\%$, 展现出变模量层高摩擦的特性, 这归因于仿生黏附单元在界面切向作用时所展现出的机械锁合与范德华力黏附相互协同效果^[22]。其中, 机械锁合是弹性体在预压力下变形适应砂纸表面粗糙结构所产生的切向阻力; 范德华力在切向上产生的黏附力可由式(1)给出^[23]。

$$F_c \sim \sqrt{G_c} \cdot \sqrt{A/C}, \quad (1)$$

其中, G_c 为界面分离的临界应变能, 对特定材质的接触界面属于常量, A 是弹性体与基底间实际接触面积, C 为弹性体样品沿摩擦力方向的柔顺度, 可见提高界面间的接触面积 A 和减小弹性体柔顺度 C 有利于增加切向黏附力. 变模量仿生黏附单元较好地解决了高黏附力所需的界面属性, 高模量的黏附单元背衬层降低了弹性体样品切向柔顺度, 而低模量接触层增加了对粗糙度的顺应性, 提高了黏附单元与砂纸表面的实际接触面积, 因此变模量仿生黏附单元呈现出较高的切向黏附力.

仿生黏附单元的疲劳寿命测试显示, 经过 100000 次法向的黏附-脱附循环测试后, 法向附着力并未显著衰减, 仿生黏附单元表面形貌除了表面微裂纹, 主体结构仍保持完好, 从而保障了仿生黏附鞋的工程应用寿命需求.

4.2 地面模拟微重力下黏附鞋力刺激效果

受试者在模拟微重力测力系统上做踏步锻炼, 同步采集锻炼过程中的肌电、心率信号, 以及足底接触反力, 结合步态分析, 综合评估模拟微重力环境下穿戴仿生黏附鞋的效果(图3(a)). 踏步方式上, 本文采用两种锻炼模式: 一种是后脚跟和前脚掌的先后脱附方式(先后方式), 另一种是后脚跟和前脚掌接近一起脱附的同时脱附方式(同时方式). 按先后方式脱附时, 足跟黏附单元先脱附, 然后前足黏附单元再脱附, 两个黏附单元的脱附有时间差, 附着力为 $(273 \pm 21) \text{ N}$ ($n=30$); 而按同时方式脱附时, 附着力为 $(332 \pm 15) \text{ N}$ ($n=30$). 可见同时方式的均值附着力比先后方式的高 21.6%, 而力程作用时间先后方式(1.57 s, $n=30$) 长于同时方式(1.3 s, $n=30$). 在冲量方面, 先后方式和同时方式脱附的附着力冲量分别为 219.23 和 151.17 N s, 可见先后方式附着力的冲量显著高于同时方式.

为确定仿生黏附鞋足底力刺激大小设置的合理性, 使用测力装置测试了受试者的最大足底拉力, 测试过程中受试者足部尽全力向上提拉束缚带, 测力平台记录拉力大小(图3(b)插图). 为达到锻炼目的, 当负荷强度为最大力的 40%~60% 时, 并且结合适当的锻炼方法能起到发展力量耐力的作用^[24], 测力平台测试了受试者的足底最大拉力, 其值为 $(615 \pm 59) \text{ N}$, 因此为达到

锻炼效果, 起到发展力量和耐力的作用, 足底力刺激大小可设置在 246~369 N, 可见本实验两种踏步锻炼方式所产生的附着力均在肌群有效刺激力的范围内.

为了获得仿生黏附锻炼过程中附着力与肌群力刺激响应之间的关系, 使用 OpenSim 4.4 建立了穿戴仿生黏附鞋的人体肌肉骨骼模型(图3(c)), 分析了受试者在踏步过程中足底受力情况. 具体而言, 当足底通过先后方式脱附时, 运动足先后受到后脚跟和前脚掌处的仿生黏附单元吸附力 F_1 和 F_2 , 支撑脚将受到来自于仿生黏附单元吸附的反作用力 F_0 . 由于前后仿生黏附单元在作用时域具有一定的重叠, 因此 F_0 略小于两个仿生黏附单元吸附力之和; 当采用同时方式脱附时, 运动足的两个仿生黏附单元几乎同时提供吸附力, 使得支撑脚受到的额外支撑力 F_0 接近于两个仿生黏附单元吸附力之和; 而当运动足完全脱附时, 在失重环境中, 支撑足将受到来自足底的吸附力, 平衡运动足惯性带来的漂浮失稳.

为了验证足底受力模型的合理性, 图3(d)~(f)展示了受试者在重力或微重力环境中踏步锻炼时的足底法向力变化情况, 其中正值部分为足底所受支撑力, 负值部分为足底所受附着力. 图3(d)展示了重力环境下(非悬吊状态)穿戴仿生黏附鞋锻炼时的足底法向力变化情况, 可以看出仿生黏附鞋在抬脚脱附过程中, 形成了对脱附足部吸附力, 而在交替的支撑足除了自重之外, 附加了对应的吸附支撑反力. 图3(e)和(f)展示了微重力环境中穿戴与不穿戴仿生黏附鞋时足底力的变化情况. 可以看出, 在一个步态周期内, 仿生黏附鞋可以为下肢骨肌提供两次力刺激, 分别为来自足底界面的压力和拉力, 并且采用同时方式脱附的峰值附着力约为先后方式脱附的 1.5 倍, 为天基失重锻炼防护运动处方的设计提供了接触力学基础.

锻炼过程中, 相关肌群的肌电变化情况是表征锻炼效果的重要指标. 试验记录了受试者穿戴仿生黏附鞋踏步过程中 7 组肌群的肌电变化(位置见图4(a)). 针对建立的穿黏附鞋的人体肌肉骨骼模型, 以踏步过程中的地面反作用力与运动行为姿态的视频数据为输入参数, 分析得到目标肌群激活程度(图4(b)和(c)). 为排除测试环境、肌电传感器固定位置及受试者力量个体差异的影响, 首先进行受试者最大静力等长收缩测试(MVC), 然后将肌电信号做标准化处理, 再计算踏步过程的均方根肌电值.

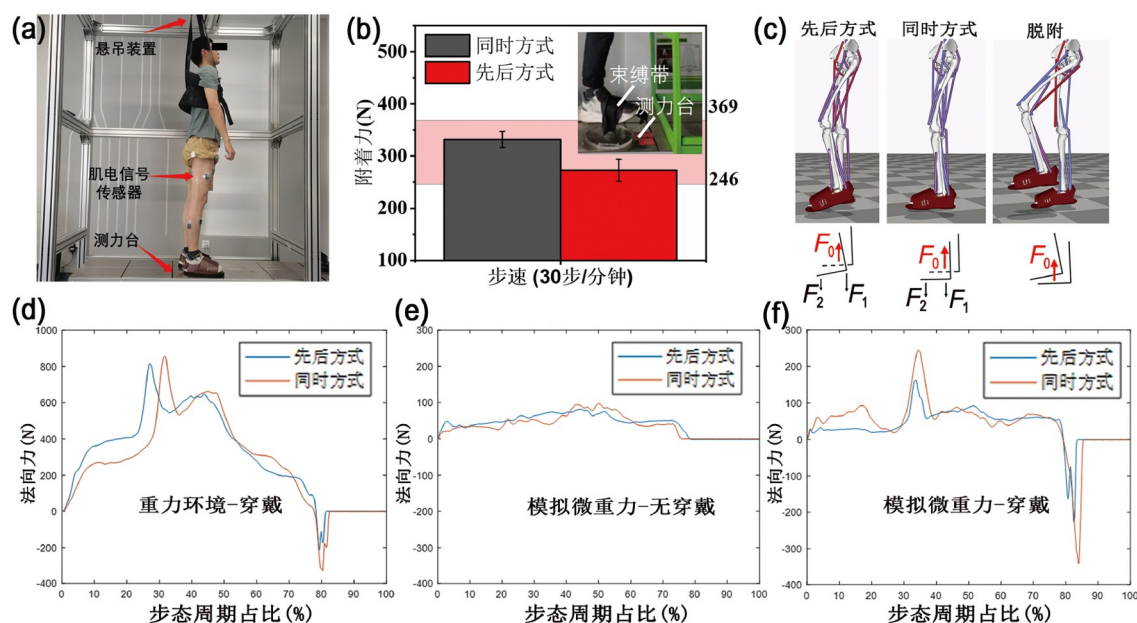


图3 (a) 模拟微重力测力系统及受试者踏步锻炼图; (b) 同步方式和先后方式踏步下的足底黏附力, 其中步速为30步/min, 插图受试者下肢肌群最大提拉力测试示意图; (c) 肌肉骨骼模型及足底受力示意图; (d) 非悬吊的重力环境中, 在一个步态周期内受试者穿戴仿生黏附鞋采用不同踏步方式足底法向力的情况; (e), (f) 在模拟微重力环境中, 受试者穿和不穿仿生黏附鞋采用不同踏步方式足底法向力的情况

Figure 3 (a) Simulated microgravity force measuring system and step exercises; (b) adhesion force under synchronous and sequential steps, with the step speed of 30 steps/min, and the schematic illustrated the subject's maximum lift tension test of the lower limb muscle group; (c) musculoskeletal model and stress diagram; (d) different stepping methods of the subject wearing bionic adhesive shoes in a gait cycle, in a non-suspended gravity environment; (e), (f) normal force on the different stepping methods with and without bionic adhesive shoes, in a simulated microgravity environment.

图4(d)和(e)展示了受试者在微重力模拟测力系统中采用不同方式踏步锻炼时肌群的均方根肌电值情况, 可见穿着黏附鞋踏步锻炼时, 所监测的下肢主要肌群的肌电信号均高于不穿黏附鞋踏步锻炼的肌电值。具体而言, 采用先后方式脱附锻炼时, 穿戴仿生黏附鞋时肌电显著变化的肌群数量多于同时方式脱附对应的结果。结合骨骼肌模型分析可见, 在先后方式脱附时, 后足抬起过程踝关节跖屈使足跟部位黏附单元首先脱附, 在足跟部附着力的刺激下, 跖屈肌群的刺激效果明显, 比目鱼肌、腓肠肌外侧头以及腓肠肌内侧头肌肉激活度增加显著; 同时在抬腿过程中随着膝关节和髌关节屈曲, 前足部位黏附单元脱附, 至此黏附单元与接触表面完全分离; 股直肌和股外侧肌为髌关节屈肌, 股二头肌为膝关节屈肌^[25], 在踏步抬脚过程中髌关节和膝关节屈曲, 受到足底附着力的作用使股直肌、股外侧肌和股二头肌的激活程度显著增加; 胫骨前肌起于胫骨而止于跖骨, 前足跖骨部位在附着力的作用下

胫骨前肌激活程度同样显著。当同时方式脱附时, 在仿生黏附单元和接触表面分离过程中, 踝关节背屈, 膝关节、髌关节屈曲。胫骨前肌作为背屈肌^[26], 黏附单元同时脱附对其的刺激最为显著, 同时股外侧肌和股直肌在髌关节屈曲过程中肌肉的激活程度也有显著增加。

锻炼过程中的心率变化情况同样是评估锻炼处合理性的重要指标。针对受试者在模拟失重环境下穿戴仿生黏附鞋开展锻炼运动, 同步测试了其踏步7 min过程中的心率变化(图4(f))。结果显示, 静息条件下受试者心率值为76.5 (+9.5, -21.5) bpm (beat per minute), 最大心率百分比为40.7 (+5.8, -11.8) %HRmax; 穿仿生黏附鞋踏步锻炼时, 受试者心率为121.7 (+19.4, -8.2) bpm, 最大心率百分比为64.7 (+9.6, -3.7) %HRmax。因此, 当受试者穿仿生黏附鞋踏步锻炼时, 锻炼强度基本介于健康运动区(60~80 %HRmax), 起到保持心血管、呼吸能力和肌肉能力的作用^[27]。

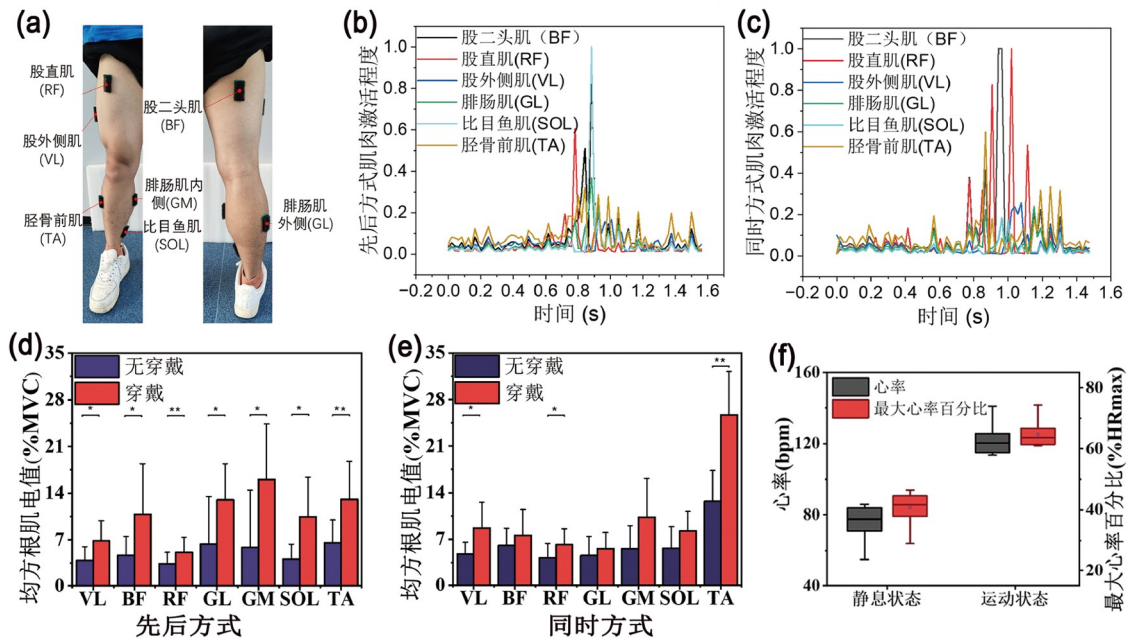


图 4 (a) 受试者在模拟微重力系统上踏步实验肌电信号采样位置图; (b) 采用先后方式脱附锻炼时下肢特定肌群的激活度; (c) 采用同时方式脱附锻炼时下肢特定肌群的激活度; (d) 采用先后方式脱附运动均方根肌电值的统计值; (e) 采用同时方式脱附运动均方根肌电值的统计值; (f) 7 min 踏步锻炼过程中受试者的心率(左坐标)和最大心率百分比(右坐标)

Figure 4 (a) EMG sampling position of the subject stepping on the simulated microgravity system; (b) activation degree of specific muscle groups in the lower extremities during sequential desorption exercise; (c) activation degree of specific muscle groups in the lower extremities during simultaneous desorption exercise; (d) statistical values of RMS for desorption movements in a sequential manner; (e) statistical values of RMS for simultaneous desorption movements; (f) heart rate (left coordinate) and maximum heart rate percentage (right coordinate) during a 7-min step exercise.

5 航天员穿着仿生黏附鞋的在轨验证和应用

2023年1月到10月,我国神舟十五号与十六号航天员乘组在中国空间站分别开展了仿生黏附鞋用于失重防护的在轨测试(图5(a)).航天员穿着黏附鞋,通过足底附着力实现了踏步中的下肢骨骼肌力刺激,在轨微重力验证的实验结果如图5(b),结果显示穿着仿生黏附鞋踏步锻炼时下肢的主要肌群激活度均有提升,其中激活度净增幅由高到低的排序为:比目鱼肌(15.05倍)、腓肠肌内侧头(9.56倍)、腓肠肌外侧头(3.93倍)、股外侧肌(1.63倍)、股直肌(85%)、胫骨前肌(68%)、股二头肌(19%).仿生黏附鞋的附着力在抬腿动作中发挥了力刺激作用,可见屈肌的激活度净增幅高;而伸肌仅在预压过程发力,受附着力影响较小,故激活度增幅低.在轨肌电数据经过显著性差异分析,有无黏附下的数据表现出显著差异,证明仿生黏附技术能够在微重力下航天员下肢骨肌(特别是屈肌)锻炼中发挥作用.

未来研究将在现有仿生黏附技术基础上,将脱附

力控制技术融入仿生黏附鞋的设计中,使之与地球环境下的屈肌受力具有更好的一致性.同时进一步提高黏附鞋对界面粗糙度和材料的适应性,使航天员能够在空间站多数固体表面实现附着、固定与可控脱附,为航天员行走、锻炼和位置固定提供支撑,在保障航天员骨肌系统健康基础上,提升航天员舱内作业能力和效率.

6 结论

受爬岩鳅附着器官和壁虎黏附刚毛结构启发,研制了用于失重环境表面附着的仿生黏附鞋,鞋底的黏附单元具有变模量层级结构,基于负压与范德华力协同附着机制,黏附单元在粗糙表面具有低预压、强黏附、高摩擦的力学特征.为失重环境下人体下肢屈肌肌群的锻炼与失重防护提供了可行性.模拟微重力实验发现,穿戴仿生黏附鞋踏步运动能实现对下肢肌群的力刺激,其中股外侧肌、股二头肌、股直肌、腓肠

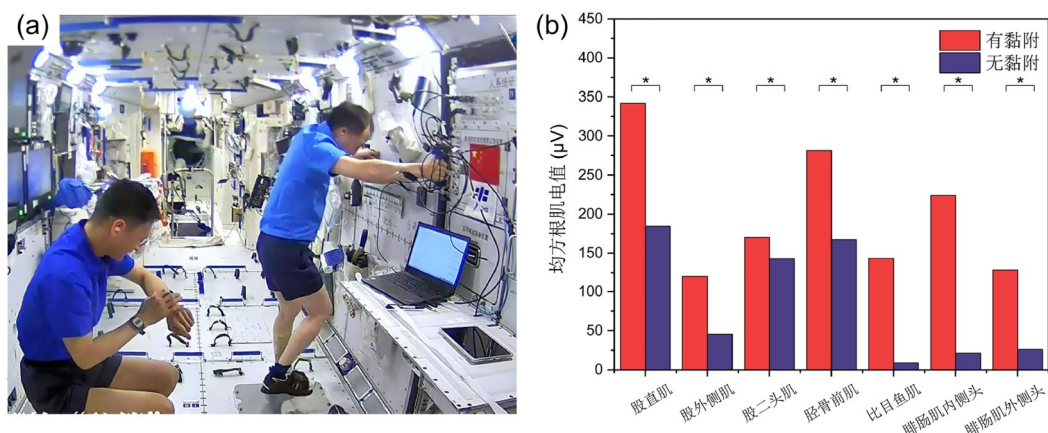


图 5 (网络版彩图) (a) 航天员穿着黏附鞋在轨踏步锻炼照片; (b) 微重力、有无黏附情况下各肌群得激活度

Figure 5 (Color online) (a) Skywalker walking in-orbit test with bionic adhesive shoes; (b) activation degrees of muscle groups with and without adhesion, in microgravity conditions.

肌外侧头、腓肠肌内侧头、比目鱼肌、胫骨前肌的均方根肌电值均有提升, 激活度增加. 先后方式脱附锻炼能够显著刺激的肌群数量多于同时方式脱附; 骨骼肌肉模型的分析进一步验证了该结论. 空间站神舟十五

号与神舟十六号航天员乘组用仿生黏附鞋完成了在轨验证, 展示出穿戴仿生黏附鞋能够实现对下肢骨骼肌特别是屈肌的有效力刺激. 仿生黏附鞋为航天员在轨长期服役提供了一种失重防护新技术.

参考文献

- Grimm D, Grosse J, Wehland M, et al. The impact of microgravity on bone in humans. *Bone*, 2016, 87: 44–56
- Chen X, Yang J, Lv H, et al. The potential benefits of melatonin in the prevention and treatment of bone loss in response to microgravity. *Acta Astronaut*, 2023, 202: 48–57
- Hurst C, Scott J P R, Weston K L, et al. High-intensity interval training: A potential exercise countermeasure during human spaceflight. *Front Physiol*, 2019, 10: 581
- Juhl IV O J, Buettmann E G, Friedman M A, et al. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system. *npj Microgr*, 2021, 7: 28
- Yang B, Hu T Y. Study and analysis of microgravity environment onboard manned space station (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2014, 20: 178–183 [杨彪, 胡添元. 空间站微重力环境研究与分析. 载人航天, 2014, 20: 178–183]
- Wang L J, Li Z L, Liu B K. Strategy considerations for countermeasures to weightlessness physiological effects on long-term space flight (in Chinese). *Space Med Med Eng*, 2012, 25: 7 [王林杰, 李志利, 刘炳坤. 长期航天飞行失重生理效应防护策略分析. 航天医学与医学工程, 2012, 25: 7]
- Bevelacqua J J, Mortazavi S M J. Commentary: Human pathophysiological adaptations to the space environment. *Front Physiol*, 2017, 8: 1116
- Garrett-Bakelman F E, Darshi M, Green S J, et al. The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science*, 2019, 364: eaau8650
- Tanaka K, Nishimura N, Kawai Y. Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures. *J Physiol Sci*, 2017, 67: 271–281
- Konda N N, Karri R S, Winnard A, et al. A comparison of exercise interventions from bed rest studies for the prevention of musculoskeletal loss. *npj Microgr*, 2019, 5: 12
- Li Y H, Qu L N. Development of space medicine in the space station era (in Chinese). In: *Space Life Professional Committee of China Space Science Society*, 2014 [李莹辉, 曲丽娜. 空间站时代航天医学发展构想. 见: 中国空间科学学会空间生命专业委员会学术研讨会, 2014]
- Li Z L, Jiang S Z. Development of physical exercise countermeasures for physiological decrements associated with long duration weightlessness (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2011, 17: 5 [李志利, 姜世忠. 长期失重生理效应体育锻炼防护措施研究进展. 载人航天, 2011, 17: 5]
- Sibonga J, Matsumoto T, Jones J, et al. Resistive exercise in astronauts on prolonged spaceflights provides partial protection against spaceflight-

- induced bone loss. *Bone*, 2019, 128: 112037
- 14 Korth D W. Exercise countermeasure hardware evolution on ISS: The first decade. *Aerosp Med Hum Performance*, 2015, 86: 7–13
- 15 Wang L J, Qu L N, Li Y X, et al. Progresses and prospects of weightlessness physiology in China (in Chinese). *Space Med Med Eng*, 2018, 31: 9 [王林杰, 曲丽娜, 李英贤, 等. 我国失重生理学研究进展与展望. *航天医学与医学工程*, 2018, 31: 9]
- 16 Qi P Y. An anti-flotation walker in weightlessness condition (in Chinese). China Patent. CN201520723630.1, 2024-07-23 [元平言. 失重状态下的防漂浮步行机. 中国专利. CN201520723630.1, 2024-07-23]
- 17 Sandoval J A, Jadhav S, Quan H, et al. Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc. *Bioinspir Biomim*, 2019, 14: 066016
- 18 Wainwright D K, Kleinteich T, Kleinteich A, et al. Stick tight: suction adhesion on irregular surfaces in the northern clingfish. *Biol Lett*, 2013, 9: 20130234
- 19 Piccardo M, Chateauminois A, Fretigny C, et al. Contact compliance effects in the frictional response of bioinspired fibrillar adhesives. *J R Soc Interface*, 2013, 10: 20130182
- 20 Kizilkan E, Gorb S N. Combined effect of the microstructure and underlying surface curvature on the performance of biomimetic adhesives. *Adv Mater*, 2018, 30: 1704696
- 21 Burnfield M. Gait analysis: Normal and pathological function. *J Sports Sci Med*, 2010, 9: 353
- 22 Persson B N J, Albohr O, Tartaglino U, et al. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. *J Phys-Condens Matter*, 2005, 17: R1–R62
- 23 King D R, Bartlett M D, Gilman C A, et al. Creating gecko-like adhesives for “real world” surfaces. *Adv Mater*, 2014, 26: 4345–4351
- 24 Guo B S, Liu L M. Science of quality sports training (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012 [郭邦士, 刘黎明. 运动素质训练学. 成都: 西南交通大学出版社, 2012]
- 25 Di Nardo F, Ghetti G, Fioretti S. Assessment of the activation modalities of gastrocnemius lateralis and tibialis anterior during gait: A statistical analysis. *J Electromyogr Kinesiol*, 2013, 23: 1428–1433
- 26 Ivanenko Y P, Poppele R E, Lacquaniti F. Five basic muscle activation patterns account for muscle activity during human locomotion. *J Physiol*, 2010, 556: 267–282
- 27 Xue G Y, Gan M, Li R Y, et al. Comparison of second and third sets of Exercise Intensity of National Aerobics Public Exercise Standards (in Chinese). *J Shandong Phys Edu Ins*, 2011, 27: 68–71 [薛桂月, 甘敏, 李荣源, 等. 《全国健美操大众锻炼标准》第二套和第三套运动强度对比研究. *山东体育学院学报*, 2011, 27: 68–71]

Bionic adhesive shoes and in-orbit test for lower limb bone muscle exercise under weightless conditions

JI KeJu¹, LI ZhiLi², LI YingZe¹, JI YuanMing¹, ZOU Peng², ZHOU Rui¹, QU LiNa², WANG ChunYan², MI Tao², YUAN Min², WANG LinJie², LI YingHui² & DAI ZhenDong¹

¹ Jiangsu Key Laboratory of Bionic Materials and Equipment, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

² National Key Laboratory of Space Medicine, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

The low-earth-orbit space station serves as humanity's foray into the universe exploration and a research platform to study the effects of the space environment on human behavior and health. It is well-documented that weightlessness significantly impairs bone and muscle function and maintenance, with mechanical stimulation under gravity being crucial for maintaining these functions. However, existing in-orbit equipment fails to deliver sufficient stimulation to lower limb flexors. Inspired by animals' adhesion on solid surfaces, especially the structural attachment of the gecko and *Beaufortia*, we proposed a new method to facilitate the exercise and protection of astronauts' lower limb muscles in a weightless environment. Bionic adhesive shoes with variable stiffness and adhesion units were developed, and ground-based and in-orbit performance tests were performed. The bionic adhesive shoes are designed to securely attach under minimal pre-pressure, enabling the exercise of lower limb muscles during stepping. The design leverages the low modulus of gecko bristles to improve their surface roughness adaptability while also incorporating the adhesive structure observed in *Beaufortia* to improve adhesion and stability. Ground-based and space-based in-orbit experiments showed that these bionic adhesive shoes exhibit low preload requirements and strong adhesion capabilities, thereby facilitating effective force stimulation of lower limb muscles. This innovative bionic technology represents a significant advancement in the maintenance of astronauts in conditions of weightlessness.

bionic attachment, friction, adhesion, weightless protection, in-orbit exercise, lower limb muscles

doi: [10.1360/SST-2024-0024](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0024)