

DOI:10.16781/j.CN31-2187/R.20220075

· 论 著 ·

大覆盖面积充液式抗荷措施对小型猪高过载暴露的生理防护效果

常巍[△], 彭智勇[△], 刘书林, 李川涛, 姚永杰^{*}

海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心航空医学研究室, 上海 200433

[摘要] **目的** 探讨大覆盖面积(腋窝以下全覆盖)充液式抗荷措施对高过载暴露下小型猪的生理防护效果, 验证该措施的有效性, 为大覆盖面积充液式抗荷服的研究提供基础实验数据。**方法** 将小型猪随机分为两组: 对照组(无抗荷措施, $n=10$)和防护组(采用大覆盖面积充液式抗荷措施, $n=9$)。利用载人离心机模拟+Gz暴露(基线1.4 G, 增长率1 G/s, 峰值8 G, 峰值持续时间60 s), 观察高过载暴露下小型猪的眼水平动脉血压(EABP)和+Gz耐力的变化。**结果** 防护组小型猪的+Gz耐力高于对照组, 差异有统计学意义[28.22(19.99, 251.22) G·s vs 7.58(3.65, 19.57) G·s, $P<0.01$]。防护组小型猪+Gz峰值暴露期间EABP与暴露前相比下降幅度小于对照组, 差异有统计学意义[(109.03±3.45)% vs (176.92±11.84)%, $P<0.01$]; 对照组小型猪EABP平均脉压差低于+Gz暴露前[(8.06±2.79) mmHg vs (36.96±9.80) mmHg, $P<0.01$; 1 mmHg=0.133 kPa], 防护组小型猪EABP平均脉压差与+Gz暴露前相比差异无统计学意义[(48.66±8.74) mmHg vs (45.75±8.82) mmHg, $P>0.05$]。**结论** 大覆盖面积充液式抗荷措施可明显减轻+Gz引起的EABP降低, 维持脉压差平稳, 提高小型猪的+Gz耐力。

[关键词] 加速度耐力; 大覆盖面积; 充液式抗荷; 加速度防护; 离心机; 血压

[中图分类号] R 852.81 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-1338(2022)04-0355-07

Physiological protective effect of extended-coverage liquid-filled anti-G measures on miniature swine during high +Gz exposure

CHANG Wei[△], PENG Zhi-yong[△], LIU Shu-lin, LI Chuan-tao, YAO Yong-jie^{*}

Department of Aviation Medicine, Naval Medical Center, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To explore the physiological protective effect of extended-coverage (full coverage below the armpit) liquid-filled anti-G measures on miniature swine during high +Gz exposure, and validate the effectiveness of the measures, so as to provide basic experimental data for the research on extended-coverage liquid-filled anti-G suit. **Methods** Miniature swine were randomly divided into 2 groups: control group (without any anti-G measures, $n=10$) and protection group (with extended-coverage liquid-filled anti-G measures, $n=9$). A human centrifuge was used to simulate +Gz exposure (baseline 1.4 G, onset rate 1 G/s, peak 8 G, duration 60 s). The changes in eye-level arterial blood pressure (EABP) and +Gz tolerance of miniature swine during high +Gz exposure were observed. **Results** The +Gz tolerance of miniature swine in the protection group was significantly higher than that in the control group (28.22 [19.99, 251.22] G·s vs 7.58 [3.65, 19.57] G·s, $P<0.01$). The decrease of EABP of miniature swine during peak +Gz exposure in the protection group was significantly lower than that in the control group [(109.03±3.45)% vs (176.92±11.84)%, $P<0.01$]. The mean pulse-pressure difference of EABP of miniature swine in the control group during peak +Gz exposure was lower than that before +Gz exposure [(8.06±2.79) mmHg vs (36.96±9.80) mmHg, $P<0.01$; 1 mmHg=0.133 kPa]. There was no significant difference between the mean pulse-pressure difference of EABP of miniature swine in the protection group during peak +Gz exposure and that before +Gz exposure [(48.66±8.74) mmHg vs (45.75±8.82) mmHg, $P>0.05$]. **Conclusion** The use of extended-coverage liquid-filled anti-G measures can significantly mitigate the reduction of EABP induced by +Gz, maintain smooth pulse-pressure difference, and improve +Gz tolerance of miniature swine.

[Key words] acceleration tolerance; extended-coverage; liquid-filled anti-G; acceleration protection; centrifuge; blood pressure

[Acad J Naval Med Univ, 2022, 43(4): 355-361]

[收稿日期] 2022-01-18 [接受日期] 2022-04-15

[基金项目] 海军军医大学(第二军医大学)舰载机飞行人才航空医学保障专项课题(2020-JY01), 载人航天领域第四批预先研究项目(020101)。Supported by Ship-Based Aviation Medical Support Project of Naval Medical University (Second Military Medical University) (2020-JY01) and the Fourth Batch of Manned Space Pre-Research Project (020101).

[作者简介] 常巍, 硕士生. E-mail: changwei0118@163.com; 彭智勇, 硕士, 助理研究员. E-mail: pengzhiyongtoo@163.com

[△]共同第一作者(Co-first authors).

^{*}通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81883151, E-mail: 648319648@qq.com

在战术飞行活动中,飞行员往往承受着多轴向复合加速度的作用,其中 z 轴足-头向正加速度(+G z)对人体的生理影响最大。随着新型战斗机机动性能的不断提高,飞行产生的+G z 值更高、增长率更快、持续时间更长,已远远超出飞行员的生理耐受极限^[1]。高+G z 作用使胸腹腔脏器沿惯性力方向(足-头向)移位变形,纵向大血管血液柱重量增加、流体静压差增大,血液重新分布并向下肢转移,头(眼)水平动脉血压降低,从而导致飞行员出现视觉障碍,甚至发生正加速度引起的意识丧失(G-induced loss of consciousness, G-LOC)^[2],严重影响操作工效,威胁飞行安全,甚至导致机毁人亡的灾难性后果,造成重大人员和经济损失^[3-6]。因此必须采取抗荷防护措施提高飞行员对+G z 的耐受能力,保证生命安全,减少生理损伤。眼水平动脉血压(eye-level arterial blood pressure, EABP)降低是限制+G z 耐力最主要因素,穿着抗荷服是减缓EABP降低、提高+G z 耐力最有效的措施之一^[7]。目前配备部队使用的抗荷服均为充气式原理:由抗荷调压器根据实时加速度向囊(管)内充气,抗荷服衣面拉紧,向腹部及下肢局部体表施压以限制血液向下转移,从而发挥抗荷效应。由于设备结构复杂,充气式抗荷服存在充气建压时间和速度滞后于G增长率、覆盖面积有限、加压分布不均及易引起肢体疼痛等问题^[7-8]。针对充气式抗荷服的不足,国内外研究人员进行了充液式抗荷服的研究^[9-10]。利用液体的静水压力对抗+G z 作用导致的血管变形和血液淤积。充液式抗荷服为管路式充液设计,+G z 作用时管路内的液体沿着惯性力方向向下流动,管路膨胀同时拉紧衣面,对体表施压,实现抗荷效应。充液式抗荷服在反应速度、加压梯度及热负荷等方面优于充气式抗荷服,但其作用范围仍局限在腹部及以下部位^[11-12],抗荷性能有待验证。生理研究表明,抗荷服覆盖面积越大,抗荷防护效果越好^[13]。如果能够提高抗荷覆盖水平,扩大覆盖范围,或许能够实现更高的抗荷性能。

有研究通过对人体和动物进行分级浸水(water immersion, WI)实验发现,液体覆盖可促进机体血液和淋巴循环、增强心血管循环系统功能^[14]。随着液面覆盖水平的升高,机体左心室压力(left ventricular pressure, LVP)、右心室压力(right ventricular pressure, RVP)、平均主动

脉压(mean arterial pressure, MAP)、肺动脉压(pulmonary artery pressure, PAP)、中心静脉压(central venous pressure, CVP)、心排血量等心脏血流动力学指标明显增高,总外周阻力(total peripheral resistance, TPR)显著降低;当液面覆盖水平达颈部时,以上指标达到峰值^[15-17]。如果有一种抗荷服能够使机体大部分体表受到液体覆盖,或许能够更有效地对抗高过载导致的EABP降低,提高机体对+G z 的耐受能力。

本研究拟通过离心机动物实验,利用大覆盖面积充液式抗荷装置,观察液体覆盖至腋窝水平时小型猪EABP和+G z 耐力的变化,验证大覆盖面积(腋窝水平以下全覆盖)充液式抗荷措施的防护效果,为下一步人体大覆盖面积充液式抗荷服的研究提供基础实验数据。

1 材料和方法

1.1 实验动物 雄性巴马小型猪19头,体重9.0~13.0 kg,月龄3~4个月,购自四川横竖生物科技股份有限公司[动物生产许可证号:SCXK(川)2019-029]。将19头小型猪随机分为两组:对照组(无抗荷措施, $n=10$)和防护组(采用大覆盖面积充液式抗荷措施, $n=9$)。本研究方案和实验过程符合动物福利和伦理原则。

1.2 仪器设备 (1)载人离心机(我国自主研发),有效半径、最大过载和最大增长率等性能与第四代载人离心机性能相当^[18],吊舱可三轴向旋转,可模拟各种轴向加速度过载,运行程序可自行设计。(2)航空航天专用多参数生理信号采集系统(本课题组自主研发),为微型多导采集系统,可实时采集血压、心电、呼吸和加速度等信号,设备可在离心机高速运转时使用,系统采用Wi-Fi、有线以太网网络和蓝牙进行数据的通信和采集。本研究使用该系统进行小型猪EABP和加速度信号的采集。将系统采集到的血压信号与临床使用的监护仪进行数据标定,误差控制在1 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)以内可满足实验要求。(3)一次性压力传感器(以色列Biomatrix公司)。(4)大覆盖面积充液式抗荷装置(本课题组自主研发,见图1A~1C)。该装置由1个不锈钢桶、1块“L”型实验动物承载板(可固定于离心机吊舱内)、1个潜水橡胶领封和卡箍(用于密封腋窝与钢桶上

口边缘,以防液体在离心时外溢)、2块“C”型盖板(固定于小型猪腋窝处)等组成。钢桶底部与“L”型实验动物承载板焊接密封,上部开口。2块“C”型盖板可通过螺栓连接固定。

1.3 方法

1.3.1 EABP 测量 实验前,小型猪禁食禁水 6 h,肌内注射盐酸替来他明盐酸唑拉西泮(舒泰[®] 50)行全身麻醉,注射剂量为 20 mg/kg。麻醉后,将小型猪仰卧固定于“L”型实验动物承载板上,剔除胸口至颈部的毛发,于胸骨上窝至甲状软骨间的颈部正中位置沿气管纵向作 4~5 cm 的切口,钝性分离皮下筋膜组织,暴露一侧颈总动脉约 3~4 cm,结扎颈总动脉远心端并于近心端留置双重结扎线,用无损伤血管夹夹闭近心端暂时阻断血流。将动脉导管肝素化,用眼科剪在颈总动脉上剪一“V”形小口,向近心端方向插入导管 2~3 cm,用预留的结扎线结扎固定好已插入导管的动

脉。连接动脉导管、压力传感器和航空航天专用多参数生理信号采集系统。操作完成,逐层缝合。将传感器上的换能器放置并固定于小型猪眼水平位置。观察动脉血压信号。固定生理信号采集设备。

1.3.2 大覆盖面积充液式抗荷防护 完成 EABP 测量后,将对照组小型猪连同动物承载板一起送进离心机吊舱内开始 +G_z 暴露。将防护组小型猪放入大覆盖面积充液式抗荷装置的钢桶内,使其腋窝下缘与桶口平齐,头颈部和两前肢置于桶外。根据小型猪个体大小向桶内注入适量温水(温度约 35~37 °C,以维持小型猪体温),水位达到小型猪腋窝下 2 cm。用潜水橡胶领封进行封闭,将领封下口罩住钢桶上口外缘,外部再用卡箍扎紧加以固定,领封上口套于小型猪腋下,以防止实验中液体溢出。两块“C”型盖板盖于小型猪腋窝下缘和桶口之间,用螺栓固定,以此为小型猪提供支撑并防止下坠。见图 1C、1D。

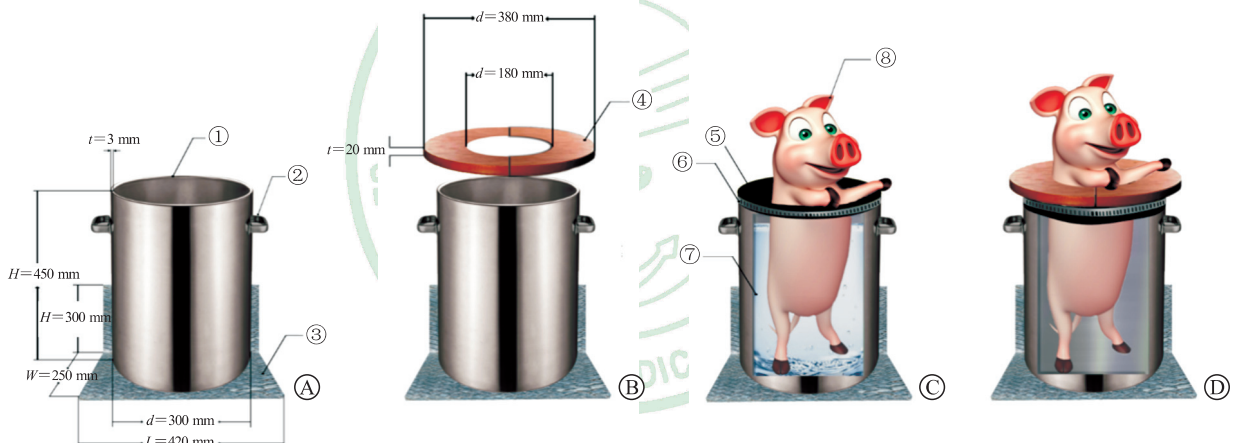


图 1 大覆盖面积充液式抗荷装置使用示意图

Fig 1 Schematic diagram of extended-coverage liquid-filled anti-G device

A: Appearance and size of satinless-steel bucket and L-shaped load-bearing plate; B: Appearance and size of C-shaped cover plate; C: Putting miniature swine into stainless-steel bucket, adding warm water, and then sealing with stainless steel tie; D: Covering with C-shaped cover plate. ① Stainless-steel bucket; ② Handles; ③ L-shaped load-bearing plate; ④ C-shaped cover plate; ⑤ Diving rubber collar seal; ⑥ Stainless steel tie; ⑦ Warm water; ⑧ Miniature swine. *L*: Length; *W*: Width; *H*: Height; *t*: Thickness; *d*: Diameter.

1.3.3 离心机 +G_z 暴露方案 将固定有小型猪和生理信号采集设备的动物承载板或大覆盖面积充液式抗荷装置送入离心机吊舱,固定于吊舱的座椅支架上,保证离心时小型猪处于头盆位,头朝向旋转轴心,受到足-头向 +G_z 作用。待小型猪平静 15 min 后对其进行单纯 +G_z 暴露处理。采用梯形过载曲线,运行基线 1.4 G,待离心机运行平稳后上升,增长率 1 G/s,峰值 8 G,峰值持续时间 60 s,而后再以 1 G/s 的下降率降至基线水平并停机。由于离心机控制系统存在误差,实际运行时载荷

存在 ±0.5 G 的误差。对照组与防护组采用相同的 +G_z 暴露方案。

1.4 观察指标 判断机体达 G 耐力终点的客观指标包括 EABP、颞动脉压和耳脉搏等^[7],本研究以 EABP 降为 0 mmHg 作为小型猪达耐力终点的判断标准。以耐受时间为横坐标、耐受 G 值为纵坐标用 Origin 软件绘制曲线,计算耐受曲线下面积,用以表示小型猪 +G_z 耐力,单位为 G·s^[19]。通过航空航天专用多参数生理信号采集系统采集 EABP, EABP 平均值 = 舒张压 + 1/3 脉压差,脉压差 = 收

缩压-舒张压, 脉压差差值由配对样本 *t* 检验计算, 血压降低幅度 (%) = (降低前血压-降低后血压) / 降低前血压 × 100%。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 23.0 软件对数据进行统计分析。小型猪+Gz 耐力以中位数(下四分位数, 上四分位数)表示, 组间比较采用非参数秩和检验; EABP 相关数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组内不同+Gz 暴露阶段比较采用配对样本 *t* 检验, 组间比较采用独立样本 *t* 检验。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 两组小型猪+Gz 耐力比较 在没有任何抗荷措施干预的情况下, 对照组 10 只小型猪均于+Gz 上升期间达耐力终点, 耐力终点 G 值为 (4.92±0.72) G。防护组中, 有 5 只小型猪在+Gz 上升期间达耐力终点[耐力终点 G 值为 (7.09±0.98) G], 1 只在进入峰值平台时达耐力终点, 2 只在峰值平台期间达耐力终点(其中 1 只于峰值运行 2 s 时达耐力终点, 1 只于峰值运行 52 s 时达耐力终点), 而有 1 只在过载全程始终未达耐力终点。经统计, 防护组小型猪的+Gz 耐

力高于对照组, 差异有统计学意义 [28.22 (19.99, 251.22) G · s vs 7.58 (3.65, 19.57) G · s, $P < 0.01$]。

2.2 两组小型猪 EABP 变化情况比较 总体上, 两组小型猪 EABP 均随着载荷的升高而降低。对照组中, +Gz 暴露前(平静状态下)小型猪的 EABP 为 (100.19±7.17) mmHg; 基线运行期间, 小型猪 EABP 有所降低, 此时下降幅度较小, 总体维持在较为稳定的水平, 为 (65.35±8.73) mmHg; 基线运行结束后, 随着 G 值的升高小型猪 EABP 呈进行性大幅下降, 达峰值后 EABP 稍有回升, 但回升幅度有限; 随着暴露时间的延长, EABP 呈持续性降低的趋势, 于峰值平台末期降至最低 [(-72.22±31.38) mmHg]; 离心机减速回到基线运行, EABP 随之回升并略高于暴露前水平; 停机后, EABP 出现超常升高现象。防护组中, 小型猪 EABP 在基线运行期间无明显降低, 基本与平静状态在同一水平; 随着 G 值升高, EABP 降低; 达峰值后, EABP 降至最低 [(-9.71±11.54) mmHg]; 而后逐渐回升, 于离心机减速期间回升至暴露前水平; 基线运行至停机后, EABP 出现了明显的超常升高现象(图 2)。

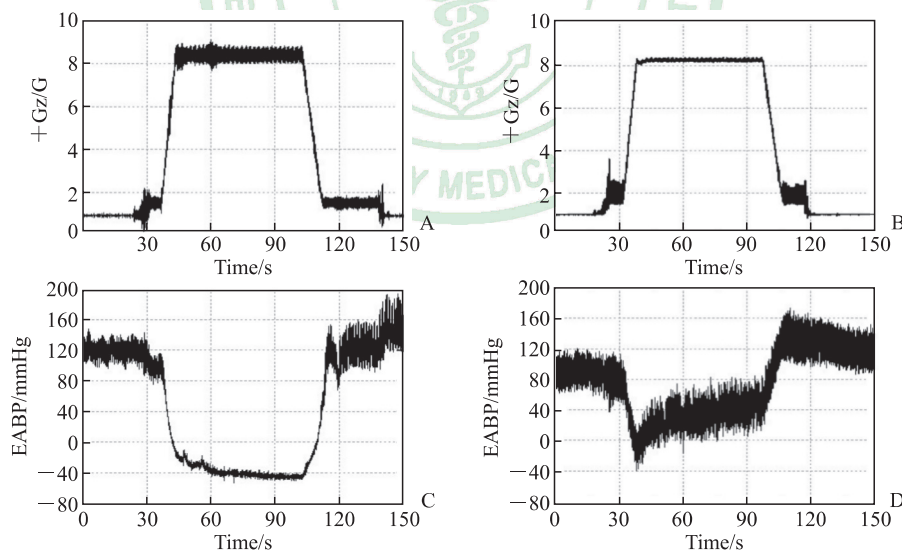


图 2 +Gz 暴露期间两组小型猪(典型个体) EABP 变化情况比较

Fig 2 Comparison of the changes of EABP during +Gz exposure between 2 groups of miniature swine (typical individual) A, C: +Gz (A) and EABP (C) changes in control group; B, D: +Gz (B) and EABP (D) changes in protection group. The miniature swine in control group were treated without any anti-G measures, and those in protection group were treated with the extended-coverage liquid-filled anti-G measures. 1 mmHg=0.133 kPa. EABP: Eye-level arterial blood pressure.

比较两组 EABP 下降幅度发现, 对照组(最低血压与平静状态下血压比较)下降幅度达 (176.92±11.84)%, 防护组(最低血压与平静状态下血压比较)下降幅度为 (109.03±3.45)%,

防护组的血压下降幅度小于对照组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$)。

2.3 两组小型猪 EABP 脉压差变化比较 通过对小型猪 EABP 波形的观察, 可见+Gz 暴露前(平静

状态下) 血压波幅较大, 表明此时收缩压与舒张压存在一定的差值, 即脉压差。对照组中, +Gz 峰值暴露期间的 EABP 波幅较暴露前明显减小 (图 3), 暴露前 EABP 平均脉压差为 (36.96 ± 9.80) mmHg, 峰值暴露期间为 (8.06 ± 2.79) mmHg, 比暴露前降低 ($P < 0.01$), 降低幅度达 $(77.50 \pm 6.98)\%$,

差值为 (28.89 ± 8.61) mmHg。而在防护组, 峰值暴露期间的 EABP 波幅与暴露前相近 (图 4), +Gz 暴露前 EABP 平均脉压差为 (45.75 ± 8.82) mmHg, 峰值暴露期间为 (48.66 ± 8.74) mmHg, 两者差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

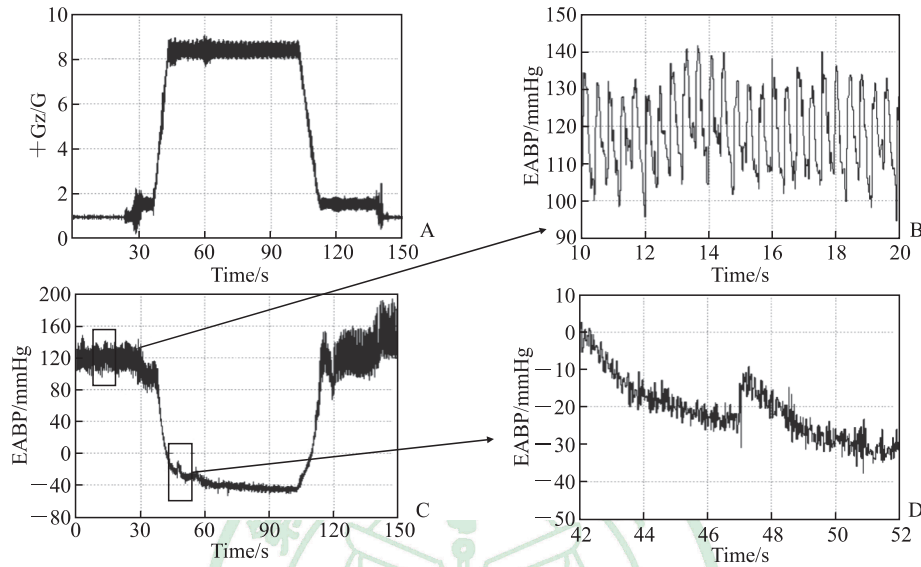


图 3 对照组小型猪 (典型个体) EABP 波幅变化

Fig 3 Changes of EABP wave amplitude of miniature swine in control group (typical individual)

A: +Gz curve; B: EABP wave amplitude at rest; C: Changes of EABP during +Gz exposure; D: EABP wave amplitude during peak +Gz exposure. The miniature swine in control group were treated without any anti-G measures. 1 mmHg=0.133 kPa. EABP: Eye-level arterial blood pressure.

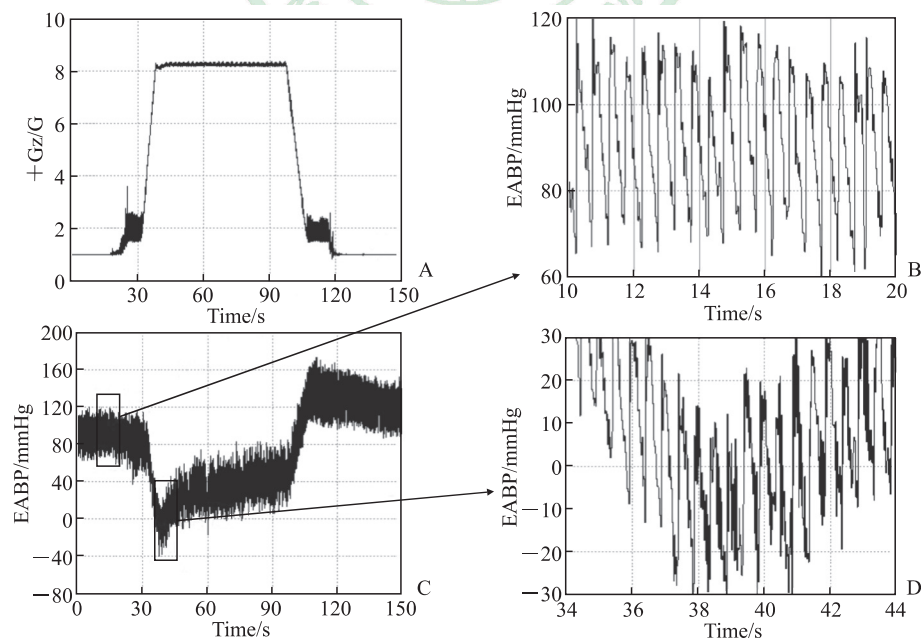


图 4 防护组小型猪 (典型个体) EABP 波幅变化

Fig 4 Changes of EABP wave amplitude of miniature swine in protection group (typical individual)

A: +Gz curve; B: EABP wave amplitude at rest; C: Changes of EABP during +Gz exposure; D: EABP wave amplitude during peak +Gz exposure. The miniature swine in protection group were treated with the extended-coverage liquid-filled anti-G measures. 1 mmHg=0.133 kPa. EABP: Eye-level arterial blood pressure.

3 讨论

在本研究中,对照组小型猪的EABP在 (4.92 ± 0.72) G时降至0 mmHg,意味着此时流向大脑的血流量接近于零,这与早期Burns等^[20]的研究结果相近。血压的变化幅度主要受血液柱高度、+Gz值和+Gz作用时间的影响。在无任何抗荷措施的防护下,+Gz作用使血液柱流体静压差增大,下肢静脉扩张,上半身血液向下半身转移和淤积,静脉回心血量减少,毛细血管跨壁压增大,组织液生成增多,导致有效循环血量减少;此外,心脏可能存在移位变形,使得心脏泵血能力减弱,心排血量减少,脉压差减小。随G值升高血压持续下降,达到峰值平台后血压略有回升,推测是由于血压持续降低致使交感神经活动增加,儿茶酚胺和其他体液因子参与调节导致;但随着+Gz作用时间延长,交感神经活动减少或丧失,导致血压进行性降低^[21-22]。G值下降后,交感神经活动再次占主导地位,血压回升并超常升高。而在使用大覆盖面积充液式抗荷装置的小型猪中,有5只在 (7.09 ± 0.98) G达耐力终点,1只在进入峰值平台时达耐力终点,2只在峰值平台期间达耐力终点,1只在过载全程始终未达耐力终点。以耐受曲线下面积表示+Gz耐力,经统计比较发现,两组小型猪+Gz耐力存在明显差异。由此可见,大覆盖面积充液式抗荷措施可明显提高小型猪对+Gz的耐受能力。需要指出的是,由于防护组中有2只小型猪对+Gz的耐受累计时间较长,导致计算得出的耐受曲线下面积(+Gz耐力)标准差过分偏大,故而本研究使用中位数(下四分位数,上四分位数)表示+Gz耐力,组间比较采用非参数秩和检验。

除此之外,EABP下降幅度的减小和平均脉压差的维持也证实了大覆盖面积充液式抗荷措施的防护效果。本研究使用的大覆盖面积充液式抗荷装置是根据月龄3~4个月小型猪体型设计制作的,当桶内液体覆盖至小型猪腋窝水平时,液体可将小型猪全部下半身和大部分胸腔包裹起来。在+Gz暴露下,小型猪身体周围的桶内液体与血管内的血液柱同时受到惯性力作用而向下挤压积聚;但由于桶为刚性材质,抗压强度高、耐冲击、在当前+Gz下不变形,液体不能向外膨胀,只能向内对小型猪腋窝以下体表施压,从而对抗了血管内血液柱的向

外挤压变形。与现有抗荷服覆盖腹部和下肢局部面积不同,本研究扩大覆盖范围至腋窝水平,使整个胸腔、腹部和下肢都能够受到外部液体的挤压作用,减少了血压向下身转移,并可维持胸腔(包括胸腔)内外的跨壁压力,在一定程度上限制膈肌和心脏的移位变形,增加血管内压力;桶内液体因重力梯度作用形成与机体血液柱流体静压差同步递增的对抗压力梯度(小腿流体静压>大腿流体静压>腹部流体静压>胸部流体静压),因而可减缓血液向下肢淤积,促进静脉血液回流,增加心室容量和心排血量,提高心水平以上动脉血压,维持脉压差,实现抗荷效应,提高机体对+Gz的耐受能力。

传统的充气式抗荷装备由抗荷服、抗荷调压器和气滤等部分组成,作用原理是:当过载超过约2 G时,抗荷调压器根据实时载荷向抗荷服增压充气,抗荷服衣面拉紧并向腹部及下肢局部体表施压,限制血液向下转移。由于设备结构复杂,充气式抗荷服存在充气建压时间和速度滞后于G增长率、覆盖面积有限、加压分布不均以及易引起肢体疼痛等问题^[7-8]。而充液式抗荷装置的优势在于建压动态性、跟随性良好,外加的液体柱可与机体血液柱同时自上而下增压聚集,无需复杂的压力调节装置^[23]。Libelle自调控式抗荷服(self-contained anti-G ensemble, SAGE)是一种充液式抗荷服,该抗荷服内部分布可充液的管道,+Gz作用时液体可瞬时对肢体表产生反压力,以对抗+Gz作用导致的血液转移,而充气式抗荷服则需要约2 s才能完成充气建压。德、法等国对这种新型抗荷服进行了试用测试,有报道称该抗荷服可使飞行员在高过载暴露期间仍保持良好的工作状态^[24],但也有结果表明该抗荷服不足以实现高过载下的生理防护^[9]。近年来,国内也有单位进行了充液式抗荷服的研制,与国外相似,该充液式抗荷服为囊式管路充液原理,液体局限在管路,通过管路膨胀拉紧衣面对体表施压,作用范围仍集中在腹部及以下部位,液体在反应速度、加压梯度及负荷等方面比充气式抗荷服更优,但抗荷性能有待验证^[12]。

区别于管路式充液设计,本研究采用的大覆盖面积充液式抗荷措施为腋窝水平以下液体全覆盖,可加强对胸腔重要脏器的保护,经离心机动物实验验证,该措施可减轻EABP在高过载作用下的降

低,维持头(眼)水平脉压差,提高小型猪对+Gz的耐受能力。需要注意的是,考虑到本研究中施加的液体(水)密度与血液体液密度不同,若要实现液体与血液体液同步同值的变化,还需要在灌注液体的选择方面进行更深入的研究。

综上所述,本研究结果表明大覆盖面积充液式抗荷措施可显著减轻高过载导致的EABP降低,维持头(眼)水平动脉脉压差,提高小型猪对+Gz的耐受能力,防护效果较为显著。本研究的不足之处在于,离心机的特殊实验环境及大覆盖面积充液式抗荷装置的使用限制了许多生理监测设备的使用,没有监测到耳脉搏、脑氧代谢指标和心电等生理信号,获得的生理数据较为有限。下一步可考虑利用较为先进的植入式生理信号无线遥测技术,同时采集多参数信号,这样既可减小对实验动物的创伤,有利于进行清醒状态下的实验,又可结合生物电信号进行多指标、多参数综合评价,更为全面地评估大覆盖面积充液式抗荷措施的有效性,以期为今后大覆盖面积充液式抗荷服的深入研究提供更多的基础实验数据支持。

[参考文献]

- [1] 刘保钢,赵显亮,张莉莉,苏芳,张晓丽.第四代战斗机超机动性带来的航空医学问题[J].中华航空航天医学杂志,2017,28:218-222,封4.
- [2] ERCAN E, GUNDUZ S H. The effects of acceleration forces on cognitive functions[J]. *Microgravity Sci Technol*, 2020, 32: 681-686.
- [3] LYONS T J, KRAFT N O, COPLEY G B, DAVENPORT C, GRAYSON K, BINDER H. Analysis of mission and aircraft factors in G-induced loss of consciousness in the USAF: 1982-2002[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2004, 75: 479-482.
- [4] GREEN N D C, FORD S A. G-induced loss of consciousness: retrospective survey results from 2 259 military aircrew[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2006, 77: 619-623.
- [5] KELLY D, EFTHYMIU M. An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017[J]. *J Safety Res*, 2019, 69: 155-165.
- [6] METZLER M M. G-LOC due to the push-pull effect in a fatal F-16 mishap[J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2020, 91: 51-55.
- [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,2013:63-69.
- [8] 张立辉,薛利豪.现役抗荷服人机工效问题调查分析[J].空军医学杂志,2014,30:1-4.
- [9] HOEPFNER M, SCHULTZ M, SCHULTZ J. Libelle self-contained anti-G ensemble: overcoming negative transfer[J]. *J Aviat/Aerosp Educ Res*, 2004, 13: 21-34.
- [10] 陈尧,李先学,丁立.囊式充液抗荷服过载响应特性仿真研究[J].北京生物医学工程,2019,38:111-118.
- [11] EIKEN O, KÖLEGÅRD R, LINDBORG B, ALDMAN M, KARLMAR K E, LINDER J, et al. A new hydrostatic anti-G suit vs. a pneumatic anti-G system: preliminary comparison[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2002, 73: 703-708.
- [12] 刘敏,张巍,宫献文,石大勇,周文珺,吴萍,等.囊式充液抗荷服设计与研制[J].航天医学与医学工程,2021,34:194-200.
- [13] 耿喜臣,詹长录.对不同扩大囊覆盖面积抗荷服的+Gz防护作用的评价[J].航天医学与医学工程,1996,9:317-323.
- [14] CORBIER C, CHOUCOU F, ROCHE F, BARTHÉLÉMY J C, PICHOT V. Causal analyses to study autonomic regulation during acute head-out water immersion, head-down tilt and supine position[J]. *Exp Physiol*, 2020, 105: 1216-1222.
- [15] BEGIN R, EPSTEIN M, SACKNER M A, LEVINSON R, DOUGHERTY R, DUNCAN D. Effects of water immersion to the neck on pulmonary circulation and tissue volume in man[J]. *J Appl Physiol*, 1976, 40: 293-299.
- [16] FARHI L E, LINNARSSON D. Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35 degrees C[J]. *Respir Physiol*, 1977, 30: 35-50.
- [17] ARIELI R, BOUTELLIER U, FARHI L E. Effect of water immersion on cardiopulmonary physiology at high gravity (+Gz)[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1986, 61: 1686-1692.
- [18] 王颢,曹新生.航空航天生理心理训练及疗养学[M].西安:第四军医大学出版社,2013:66-67.
- [19] CHAE E U. Tolerance of small animals to acceleration[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1975, 46: 703-708.
- [20] BURNS J W, PARNELL M J, BURTON R R. Hemodynamics of miniature swine during +Gz stress with and without anti-G support[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1986, 60: 1628-1637.
- [21] NISHIDA Y, BISHOP V S. Vasopressin-induced suppression of renal sympathetic outflow depends on the number of baroreceptor inputs in rabbits[J]. *Am J Physiol*, 1992, 263: R1187-R1194.
- [22] MORITA H, NISHIDA Y, MOTOCHIGAWA H, UEMURA N, HOSOMI H, VATNER S F. Opiate receptor-mediated decrease in renal nerve activity during hypotensive hemorrhage in conscious rabbits[J]. *Circ Res*, 1988, 63: 165-172.
- [23] 赵超.高敏捷飞行下的飞行员过载防护技术[J].飞机设计,2016,36:63-67.
- [24] NORDWALL B D. Novel anti-G suit protects with liquid[J]. *Aviat Week Space Tec*, 2001, 155: 60-61.