

文章编号:1004-7220(2010)04-0235-04

· 述 评 ·

航空生物力学

樊瑜波¹, 柳松杨^{2,1}

(1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 空军航空医学研究所, 北京 100142)

摘要: 飞行员在飞行中会面临各种复杂载荷, 这些复杂载荷会给飞行员肌骨、血液循环等系统产生复杂生理影响, 从而导致飞行员损伤。生物力学主要研究生物医学中的力学问题及力的生物学效应。航空生物力学是研究人体在航空动力环境中生理变化规律及其防护措施的学科, 其主要研究内容包括: 冲击载荷对人体的损伤及其防护; 持续性载荷对人体的生理影响及其防护或对抗; 振动与噪声对人体的生理影响及其防护等。

关键词: 生物力学; 航空生物力学; 载荷; 抗荷; 正加速度

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

Biomechanics in aviation

FAN Yu-bo¹, LIU Song-yang^{2,1} (1 Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China; 2 Institute of Aviation Medicine, Beijing 100142, China)

Abstract: Pilots are usually under various different mechanical loads during flights, which can affect their musculoskeletal and cardiovascular system and even bring them injuries. Biomechanics mainly studies the mechanics and mechanobiology in medicine and biology. Aviation biomechanics studies the physiological response to different complicated mechanical loads during flights and the countermeasures. The research fields of aviation biomechanics include: mechanical loads on human body injury and related countermeasures, durative loads, vibration and noise on the physiological effects of human body and related countermeasures, etc.

Key words: Biomechanics; Aviation biomechanics; Loads; Anti-loads; Positive acceleration

在现代战机高速飞行中, 飞行员会面临各种突发情况, 如加速度突然改变、翻滚、旋转、超重以及跳伞或出现意外等, 这些突变带给飞行员肌骨系统的复杂载荷是飞行员损伤的最危险因素。飞行员在飞行时经常受到正加速度(+G_z) 载荷影响, 特别是高性能战斗机, 具有持续高+G_z 暴露和快速增长率(6 G/s) 的特点, 飞机可以在数百米内迅速加速。目前高性能战斗机的飞行载荷峰值和增长率可分别达到9 G和3~6 G/s。飞行员肌骨系统的损伤不仅

直接威胁飞行员的生命安全、影响飞行员对飞机的正确驾驶和操纵, 而且还会进一步影响飞行员其他生理系统的功能^[1,5-15]。

尽管利用抗荷装备和特殊设计的抗荷动作已经可以实现对+12 G的防护, 然而一些调查表明, 长期暴露在高G状态等复杂载荷下时, 高性能战斗机飞行员的肌骨系统仍然会受到一定程度的损伤, 特别是颈、腰、肩、脊柱和脊柱肌肉与韧带等部位(实际上即便是在运动员中, 也发现了类似的疲劳性损

收稿日期:2010-08-01

通讯作者: 樊瑜波(1965-), 男, 教授, 博士研究生导师, 北京航空航天大学生物与医学工程学院院长, 国家杰出青年基金获得者。现任世界生物力学理事会理事, 中国力学学会理事、生物力学专业委员会副主任委员, 中国生物医学工程学会理事长, 教育部“生物力学与力生物学”重点实验室主任。Tel: (010) 82339428; E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

伤)^[5-6,8-16]。以颈部损伤为例,美国海军驾驶 F/A-18 的飞行员中,74% 有过颈区疼痛,37% 有过颈部损伤;日本空军自卫队驾驶 F-15 的飞行员中,有与飞行有关的颈部肌肉疼痛的飞行员达 98%;瑞典空军喷气式飞机飞行员在 1 年内有 37% 经历过颈部不适,而其他军队服役人员只有 12%^[22-25]。我国一些研究者的相关调查发现,因脊柱病变导致停飞的占到了第 2 位,其中因颈椎病变停飞排在第 5 位^[8-9],73.9% 的飞行员曾经历过颈部损伤^[10];有调查发现,飞行员颈椎病患者率较高,因颈椎病而停飞的人数居外科疾病停飞的第 3 位,占总停飞人数的 3.7% ~ 4.1%^[6]。高 G 载荷作用会引起飞行员头颈过度前曲、颈部位置不正确等,从而导致颈肌劳损、韧带撕裂、软骨退变、椎间盘突出、颈椎生理曲度等。这些问题在早期多表现为暂时性的,但随着飞行时间的增加,会愈来愈严重,最后成为颈椎病,导致飞行员停飞^[15,26,28-29,30]。导致这些损伤发生的因素很多,比如颈部的损伤因素包括头部负重、高 +Gz 载荷,以及颈部频繁的旋转、侧屈和后伸等,但归根到底,这些损伤是由于肌骨系统在复杂载荷下的改变所导致的。

持续性载荷是指作用时间超过 1 s,甚至持续数分钟的长时间载荷,通常出现在飞机机动飞行过程。其生理效应主要为血液随惯性力的重新分布导致头部缺血或充血过度,造成飞行员视觉机能障碍和意识丧失。在第一次世界大战中,飞行员反应在俯冲拉起过程中存在视力丧失。19 世纪 20 年代中期,法国建造了一台离心机开始研究该问题。第二次世界大战中,美国空军的航空生物力学研究者发明了可充气抗荷服。1944 年五囊式抗荷服已成为美军战斗机飞行员必备的个体防护装备。由于持续性载荷带来的人体机能障碍是影响飞机性能发挥与导致飞行事故的主要原因之一,世界各国均对此问题的研究非常重视,也是航空生物力学工作人员关注的焦点。我国于本世纪初引进了一台世界上最先进的载人离心机,目前主要研究高 G 载荷暴露时人体的生理应激反应、推拉效应对人体的影响及其防护、高性能战斗机飞行员持续性载荷耐力的选拔与训练。

冲击载荷对飞行员有较大的影响^[34,17]。冲击载荷通常出现在飞行员弹射救生或飞行器坠毁过程,可能导致人体损伤的载荷因素包括以下几个方

面:弹射过载;穿盖弹射时舱盖玻璃与人体的碰撞;高速气流吹袭所加载在人体上的风载荷;气动减速过载;人椅系统旋转;开伞动载;着陆冲击等。航空动力环境中的冲击载荷可以导致人体骨折、软组织撕裂、脏器出血等。飞行事故调查表明,弹射过载引起的脊柱损伤多是发生在胸腰段,其中发生率最大的部位是第 12 胸椎和第 1 腰椎。通过对 79 例弹射引起的脊柱骨折研究表明,几乎所有的骨折都是椎体前缘压缩性骨折,这与脊柱前屈使重力集中与脊柱前部有关。弹射时的体位、弹射时飞机状态、弹射过载性质、座垫的动态响应都是重要的影响损伤发生因素。冲击试验发现,在 +Gx 过载作用下,头部除受到 +Gz 作用外,x 轴方向还存在过载,且 x 轴响应加速度比 z 轴加速度大 63%。这就意味着头部容易向前倾斜,引起颈部的扭伤。此外,在过载作用下,由于内脏各自的特性不同,对力的传导规律也不相同,因此可能导致内脏与骨骼、内脏与内脏之间相互牵拉、挤压与碰撞等,致使内脏受到损伤。

为了拯救飞机处于不可挽回情况下飞行员的生命,德国在 20 世纪 40 年代初期首先成功研制了弹射座椅。1943 年 1 月 13 日试飞员斯切克试飞亨克尔公司的 He280 VI 型飞机时,因飞机失控而成功弹射离机,成为第一个用弹射座椅应急离机获救的飞行员。弹射座椅已成为最关键的机载设备之一,自问世以来,成功挽救了成千上万名飞行员的生命。安全带、抗坠毁座椅、机身抗坠毁设计在飞机坠毁时也较好地保障了乘员的安全。在弹射座椅及其他安全防护装备的发展过程中,航空生物力学做出了巨大贡献,DRI (Dynamic response index)、HIC (Head Impact Criteria) 分别成为经典的人体脊柱压缩性骨折及颅骨骨折判断标准。20 世纪 50 年代,Stapp 进行的一系列人体试验为人体对冲击载荷的耐限研究及其防护装备的研制奠定了基础。弹射救生的最终目的是在飞机处于不可挽回状态下拯救飞行员的生命。弹射座椅发明至今已有 60 多年的历史,全世界大约有 15 000 名飞行员因弹射跳伞而获救。弹射跳伞过程中人体依次受到弹射冲击损伤、气动力损伤、开伞冲击损伤和着陆冲击损伤。弹射过载对人体的主要危害是脊柱,其次是头颈部、四肢和内脏。据统计,飞行速度超过 800 km/h 以上的弹射救生中,损伤概率将剧烈增加;在 1 000 km/h 的速度下

弹射时,无防护的损伤概率超过 50%;在 1 100 km/h 的速度下损伤概率超过 90%,造成的损坏有:四肢甩打、座椅结构破坏、部件振动或分离、头盔或氧气面罩丢失、飞行服破损、皮肤组织损伤和颈部损伤等。目前据统计,弹射重伤率约 15%~25%^[14,17]。为此,需要全面探讨飞行员在类似条件下肌骨系统的响应,进而研究相应的防护措施,对防护系统进行全面的优化设计,研究适用于高性能飞机的防护救生装备。

生物力学主要研究生物医学中的力学问题及力的生物学效应。航空生物力学是研究人体在航空动力环境中生理机能变化规律及其防护措施的学科,他既属于生物力学的范畴,也属于航空医学的范畴,是航空医学与生物力学的交叉。其主要研究内容包括:冲击载荷、各种惯性/非惯性载荷对人体的损伤及其防护;持续性载荷对人体的生理(包括肌骨、血液循环、呼吸、神经、感知等人体各系统)影响及其防护或对抗;振动与噪声对人体的生理影响及其防护等^[21,27,31]。

航空生物力学研究人员的主要任务是研究提出人体对各种航空环境载荷的力学响应规律和耐限,为防护救生装备的研制及生理鉴定提供依据与手段。现代生物力学发展建立的诸如生物力学建模与仿真技术(肌骨系统的三维有限元建模与仿真、血液-心肺系统的血流动力学及呼吸力学建模与仿真技术)、新的生物力学动物试验、仿真体模和离体测试技术、细胞力学及力生物学技术都为航空生物力学的研究提供了新的研究手段。随着航空技术的进步,人的抗载荷能力已越来越成为航空器研制与性能充分发挥的瓶颈;特别是更快、更灵活新型飞机的出现,超音速弹射救生、大过载高增长率的机动飞行防护等问题向航空生物力学研究人员提出了新的挑战,同时也为航空生物力学的发展提供新的发展机遇。

致谢:感谢国家自然科学基金(10925208),国家重点实验室开放基金,中央高校基本科研业务费专项基金资助。

参考文献:

[1] 杨企文,俞梦孙,金季春,等. 脊骨材料在冲击负荷下的力学

强度[J]. 北京生物医学工程,1983,1(2):15-18.

- [2] 腾育英,由广兴,庄祥昌,等. 人体上肢抗高速气流吹袭耐力的研究[J]. 航天医学与医学工程,1988,1(1):29-36.
- [3] 腾育英,由广兴,张树和,等. 气流吹袭时手臂的受力分析[J]. 航空学报,1992,13(8):401-406.
- [4] 汪芳子,宣渝峡,王志. 人体弹射加速度的耐力研究[J]. 航天医学与医学工程,1991,4(4):289-294.
- [5] 赵平,柳小林. 歼击机飞行员颈椎 X 线表现调查[J]. 中华航空航天医学杂志,1999,10(4):220-221.
- [6] 戴光远,刘姝颖. 1990-1999 年海军飞行人员体检鉴定结果分析[J]. 航空军医,2001,29(6):250-251.
- [7] 沈羨云. 航天重力生理学与医学[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [8] 李梦景,张青,白兰. 飞行员因病停飞 199 例原因分析[J]. 航空军医,1995,23(3):154-156.
- [9] 吴惠,马志毅,汤千一. 137 例飞行员医学停飞疾病分类[J]. 中华航空航天医学杂志,1997,8(1):63.
- [10] 柳松杨,丛红,王鹤,等. 52 名歼(强)击机飞行员的颈部损伤分析[J]. 航空军医,1999,27(5):201-203.
- [11] 成海平,柳松杨,俞梦孙. 颈肌强度训练对预防加速度致飞行员颈部损伤的作用[J]. 中国临床康复,2005,9(12):204-206.
- [12] 刘红巾,徐先荣,张津丽,等. 480 例歼击机飞行员体检资料分析[J]. 空军总医院学报,2004,20(3):145-148.
- [13] 初旭,耿喜臣,张五星,等. 492 人次人体离心机检查飞行员情况的分析[J]. 航天医学与医学工程,2000,13(6):451-455.
- [14] 尹显立,荆兴泉,杨双石. 高 G 载荷下飞行员颈椎病 54 例分析[J]. 临床军医杂志,2005,33(4):457-458.
- [15] 荆兴泉,杨双石. 高 G 载荷与飞行员颈椎病的关系研究[J]. 人民军医,2006,49(9):512-513.
- [16] 于青琳,于文学. 腰腿痛飞行员骨密度变化与骨代谢生化指标的相关分析[J]. Chinese Journal of Osteoporosis, 2000, 16(1):48-50.
- [17] 谢雄,刘印,田迎军. 战时飞行员弹射跳伞损伤特点及救生[J]. 实用医药杂志,2006,23(7):871-872.
- [18] Hamalainen O, Vnharanta H, Hupli M, et al. Spinal shrinkage due to + Gz forces [J]. Aviat Space Environ Med, 1996, 67(7):659-611.
- [19] Schall DG. Non-ejection cervical spine Injuries due to + Gz in high performance aircraft [J]. Aviat Space Environ Med, 1989, 60(5):445-456.
- [20] Alricson M, Hrms Ringdahl K, Schuldt K, et al. Mobility, muscle strength, endurance the cervical spine in Swedish Air Force pilots [J]. Aviat Space Environ Med, 2001, 72(4):336-342.
- [21] Marcus GP. Computer modeling and simulation of human movement [J]. Annu Rev Biomed Eng, 2001, 3:245-273.
- [22] Knudson R, McMillan D, Doucette D, et al. A comparative

- study of G-induced injury in pilots of the F/A-18, A-7 and A-4[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1988, 59(8):758-760.
- [23] Kikukawa A, Tachibana S, Yagura S. G-related musculo-skeletal spine symptoms in Japan Air Self Defense Force F-15 pilots[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1994, 65(3):269-272.
- [24] Alricsson M, Harms-Ringdahl K, Schuldt K, *et al.* Mobility, muscular strength and endurance in the cervical spine in Swedish Air Force pilots[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2001, 72(4): 336-342.
- [25] Naumann FL, Grant MC, Satvinda SD. Changes in cervical spine bone mineral density in response to flight training[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2004, 75(3):255-259.
- [26] Hamalainen O, Vanharanta H, Kuusela T. Degeneration of cervical intervertebral disks in fighter pilots frequently exposed to high + Gz forces[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1993, 64(8): 692-696.
- [27] G. A. Hoek van Dijke, C. J. Snijders, E. R. Roosch, *et al.* Analysis of biomechanical and ergonomic aspects of the cervical spine in F-16 flight situations[J]. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(9): 1017-1025.
- [28] Naumann FL, Satvinda SD, Satvinda SD. Changes in cervical spine bone mineral density in response to flight training[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2004, 75(3):255-259.
- [29] Thuresson M, Linder J, Linder J. Neck muscle activity in helicopter pilots: Effect of position and helmet-mounted equipment[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2003, 74(5):527-532.
- [30] Green NDC. Acute soft tissue neck injury from unexpected acceleration[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2003, 74(10): 1085-1090.
- [31] Gordon Höhne. Computer aided development of biomechanical pilot models[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2000, 4(1): 57-69.

《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由上海交通大学主办,教育部主管,是国内唯一一本公开发行,积极反映医学生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括医学生物力学领域中有关固体力学、流体力学、流变学、运动生物力学等方面的研究论文。本刊为美国工程索引(Ei Compendex)收录期刊(收录时间从2010年1月起)、“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”。

本刊为双月刊,16开本,80页,国内统一刊号CN 31-1624/R,国际标准刊号ISSN 1004-7220;定价每期9.80元,全年58.8元,由邮局向全国征订发行,邮发代号4-633。读者可在附近邮局订阅或拨打“1185”热线电话通过邮政“1185”客户服务中心电话订阅。欢迎广大读者、作者订阅本刊,踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号 200011;

电话:(021)23271133; 传真:(021)63137020; 电子信箱:shengwulixue@gmail.com

网站:http://www.mechanobiology.cn