

文章编号:1004-7220(2014)02-0131-04

基于坐应力分析的弹射座椅座垫舒适性研究

李先学¹, 丁立¹, 王兴伟², 王丽³, 姜昌华³, 周前祥¹, 魏仕华⁴

(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 100036; 3. 中国航天员中心 人因工程国防科技重点实验室, 北京 100193;
4. 泰州职业技术学院 机电技术学院, 泰州 225300)

摘要: **目的** 研究弹射座椅座垫舒适性与坐应力之间的关系。**方法** 通过测量不同厚度座椅座垫坐应力分布, 探讨接触面积、最大坐应力、平均坐应力几个坐应力客观指标, 并结合座垫舒适性主观量表, 研究座垫舒适性与坐应力各指标间的关系。**结果** 接触面积、最大坐应力、平均坐应力与座垫舒适性有显著相关性, 而且当座垫厚度超过 4 cm 后, 舒适性不再明显提高。**结论** 接触面积、最大坐应力和平均坐应力能够很好地反映座垫舒适性, 可以采用这些指标对座垫舒适性进行评价, 并建议采用弹射座椅的座垫厚度在 4 cm 左右为宜。

关键词: 弹射座椅; 座垫; 坐应力; 舒适性; 接触面积

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Comfort analysis on ejection seat cushion based on sitting pressure

LI Xian-xue¹, DING Li¹, WANG Xing-wei², WANG Li³, JIANG Chang-hua³, ZHOU Qian-xiang¹, WEI Shi-hua⁴ (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 of Air Force, Chinese Peoples Liberation Army, Beijing 100036, China; 3. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100193, China; 4. Mechanical and Electrical College, Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China)

Abstract: **Objective** To study the relationship between comfort and sitting pressure of ejection seat cushion. **Methods** By measuring sitting pressure distributions on seat cushions with different thickness, indices of sitting pressure such as the contact area, maximum sitting pressure and mean sitting pressure were discussed along with the subjective comfort scores to find the relationship between seat cushion comfort and indices of sitting pressure. **Results** The contact area, maximum sitting pressure and mean sitting pressure were significantly correlated with the subjective comfort scores. In addition, the comfort score did not increase when thickness of the seat cushion exceeded 4 cm. **Conclusions** The comfort of seat cushion could be well reflected and evaluated by the contact area, maximum sitting pressure and mean sitting pressure of seat cushion, and thickness of 4 cm is recommended for designing the seat cushion with material used in this paper.

Key words: Ejection seat; Seat cushion; Sitting pressure; Comfort; Contact area

战斗机飞行员经常执行长期飞行任务会导致深静脉血栓形成, 进而引起压疮以及反应迟缓、操作能力降低等, 严重影响飞行员的健康, 并降低飞行操作

工效^[1]。弹射座椅在设计时会优先考虑安全问题, 故针对弹射座椅的舒适性改进很有限, 而座垫是其中最主要的可以进行改进和优化、并能提高弹射座

收稿日期: 2013-02-27; 修回日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175021)。

通信作者: 丁立, 副教授, 硕士研究生导师, E-mail: ding1971316@buaa.edu.cn。

椅舒适性的部分。樊瑜波等^[2]论述了飞行过程中尤其是弹射任务时,人体受到的生物力学响应。对弹射座椅舒适性的研究主要分为静态舒适性^[3]和动态舒适性^[4]。黄加阳等^[3]基于 Poser 软件和 3Dmax 建立了弹射座椅-飞行员-座舱操作机构的三维模型,讨论影响弹射座椅舒适性的因素并提出优化设计方法。王春洁等^[4]研究弹射座椅的动态舒适性能,分析座椅动态特性参数变化对人体振动响应的影响。另外,程明^[5]对民用飞机驾驶员座椅进行比较系统的阐述,其中也涉及到座椅舒适性的问题。以上都是针对飞机座椅整体性能方面的研究,并没有专门针对弹射座椅座垫的舒适性进行研究。

座椅面上均匀的压力分布可减少皮肤溃烂及压痛的发生几率,人-椅界面上局部高压会导致人体软组织变形,从而阻碍血液循环及营养供给,使人体出现不舒适感或疲劳感^[6]。因此,根据生理反应,最舒适坐姿时的坐应力分布是体重均匀分布在较大的支撑面上,但不要平均分布;而且体压分布过程应从小到大平滑过渡,避免突然变化。座椅面上的坐奇压应该是坐骨结节部位压力最大,并从坐骨结节向外压力逐渐减小,直到与座椅面前缘接触的大腿下,压力为最小。徐明等^[7]提出表征体压分布的8个指标,通过这些指标来反映座椅的物理性能,为座椅的舒适性评价提供客观的指标。由于座垫的坐应力在很大程度上影响了座椅舒适性能,通过改善坐应力的分布可以明显提高座椅的舒适性能,故研究人-座椅界面坐应力对于提高座椅的舒适性具有很重要的意义。

鉴于针对弹射座椅座垫舒适性的研究很少,本文在参考汽车座椅坐应力分布的研究基础上^[8-12],基于不同厚度座垫的坐应力不同,对弹射座椅座垫的舒适性进行研究。弹射座椅座垫一般采用聚醚聚氨酯泡沫材料,通过研究不同厚度聚醚聚氨酯海绵座垫的坐应力分布情况,分别从座垫压强分布云图、座垫最大坐应力、臀部与座垫接触面积、座垫平均坐应力4个方面并结合主观舒适性评价对座垫的舒适性进行分析,为弹射座椅座垫的设计提供参考和理论依据。

1 对象与方法

1.1 受试者

根据飞行员平均人体参数,招募身高和体重相

近的10名受试者(5男5女)进行坐应力分布测试,平均年龄 (24.5 ± 3.3) 岁,身高 (168.6 ± 6.4) cm,体重 (59.3 ± 4.2) kg。所有受试者身体健康,试验前被告知试验内容并进行充分休息。

1.2 测量设备

采用 Novel Pliance-x(德国)无线动态软垫式压力测量系统,用于测量坐姿时人-座垫间坐应力。采样频率为40 Hz,分辨率为1个传感器/cm²。

1.3 试验设计

1.3.1 坐姿要求 坐姿对坐应力分布具有很大的影响,为消除或尽量减小这种影响,试验中采用标准坐姿:上身直立,双脚自然放在地面上,两膝与肩同宽,双手放在膝盖部位。

1.3.2 椅面造型 采用的座椅椅面与真实弹射座椅椅面造型基本一致,为硬面椅面,臀部及大腿部位位置较低,两侧及后部位置较高。

1.3.3 试验座垫 采用与弹射座椅座垫常用填充材料相同的聚醚聚氨酯海绵材料,每层海绵座垫厚度为2 cm,共设计0、2、4、6和8 cm 5种不同的座垫进行试验。由于海绵座垫是放置于硬面椅面上,当受试者坐在座垫上时其型面与硬面椅面一致。

测试时将 Pliance 应力座垫放置于海绵座垫与臀部之间,这样可更准确地测得臀部与座垫界面间的坐应力分布情况。受试者穿统一的紧身衣裤,按标准坐姿坐在座垫上。

1.3.4 试验流程 试验前告知受试者试验的目的、试验内容和注意的事项。设备调试完毕,受试者准备好后,以标准坐姿坐在座垫上,待应力分布稳定之后,开始记录应力分布数据,记录时间为20 s。测量的座垫厚度依次为0、2、4、6、8 cm,两个座垫坐应力测试之间受试者有5~10 min 休息。每个座垫测量完毕后受试者对该座垫整体舒适性进行打分,分值为1、2、3、4、5,依次表示不舒适到很舒适。

2 结果与分析

分别从主观总体舒适性、座垫坐应力分布云图、座垫总坐应力、臀部与座垫接触面积、座垫平均坐应力等方面对数据进行分析,从主观舒适性与体压分布指标的关系来研究座垫的舒适性。

2.1 主观舒适性

试验中对受试者坐不同厚度座垫的舒适性进行

调查,得出舒适性与座垫厚度的关系(见图1)。人的舒适性感受随着座垫厚度的增加而提高,但当座垫达到一定厚度(6 cm)时,总体舒适性不再显著提高。

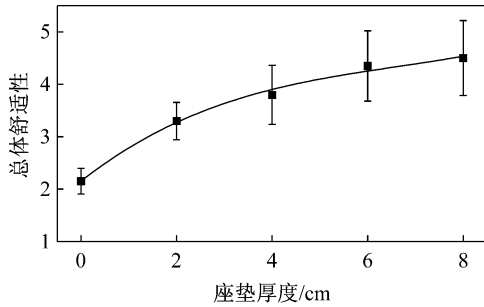


图1 不同厚度座垫总体舒适性

Fig.1 Overall sitting comfort scores for seat cushions with different thickness

2.2 坐应力分布

2.2.1 座垫坐应力分布 图2所示为不同厚度座垫下通过 Pliance 压力测量系统获得的坐应力分布云图。图中每个小方块表示一个传感器,上面的数字表示应力值。在人体坐骨结节部位出现应力峰值,由坐骨结节向四周逐渐降低,符合文献[8]中提出的满足舒适性的应力分布情况。

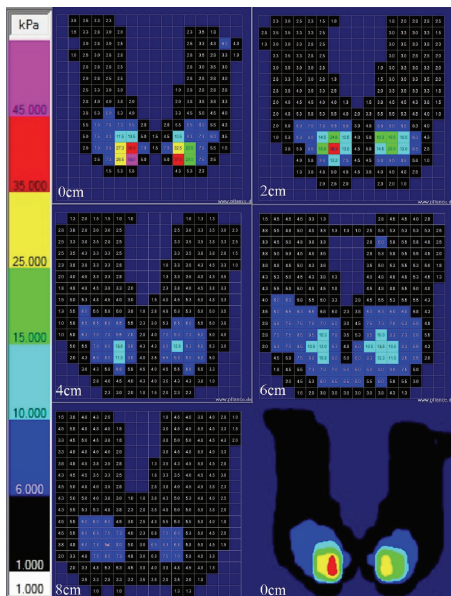


图2 不同厚度座垫坐应力分布

Fig.2 Sitting pressure distributions on seat cushions with different thickness

2.2.2 臀部与座垫接触面积 由图3可知,随着座垫厚度逐渐增加,人体臀部与座垫的接触面积逐渐增加。座垫厚度从0 cm增大到4 cm时,接触面积增加较快,之后接触面积趋于稳定,增加很小。这是因为座垫厚度增加后,臀部陷入座垫中部分增加,导致与座垫的接触面积增加,加到一定厚度后趋于稳定。

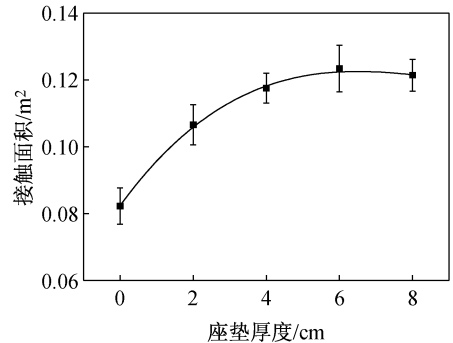


图3 不同厚度座垫接触面积

Fig.3 Contact area of human-seat interface for seat cushions with different thickness

2.2.3 座垫最大坐应力 最大坐应力为座垫上的应力最大值。从座垫物理特性角度看,最大坐应力体现了座垫的刚度,较硬的座垫最大坐应力较大。由于刚度是座垫最重要的物理参数之一,故最大坐应力可以用于表征座垫的舒适性。随着座垫厚度的增加,最大坐应力逐渐减小,到4 cm以后最大应力趋于平稳(见图4)。

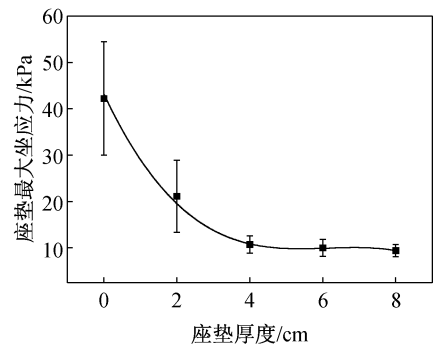


图4 不同厚度座垫最大坐应力

Fig.4 Maximum sitting pressure for seat cushions with different thickness

2.2.4 座垫平均坐应力 座垫总坐应力与臀部和座垫的接触面积有关系,为更好地评价不同厚度座垫的舒适性差别,采用座垫平均坐应力这个指标来

进行评价。座垫平均坐应力为座垫总应力与臀部和座垫的接触面积的比值。座垫平均坐应力随着座垫厚度增加逐渐减小,0~4 cm 时座垫平均坐应力下降较快,4 cm 以后座垫平均坐应力不再显著下降,趋于稳定,约为 4.5 kPa(见图 5)。

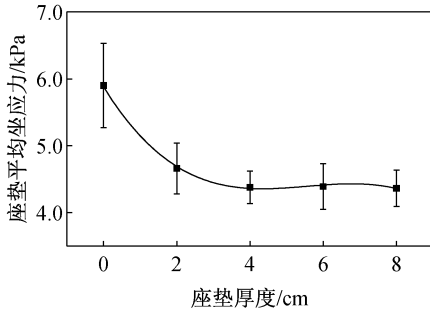


图5 不同厚度座垫平均坐应力

Fig. 5 Average sitting pressure for seat cushions with different thickness

2.3 主观舒适性与坐应力指标间相关性

座垫舒适性感受与总坐应力、接触面积呈正相关,与最大坐应力、平均坐应力呈负相关。其中接触面积、最大坐应力与总体舒适性高度显著相关($P < 0.01$),总坐应力、平均坐应力与舒适性也显著相关($P < 0.05$,见表 1)。因此,能够很好反映座垫舒适性的坐应力指标为接触面积、最大坐应力以及平均坐应力。

表1 座垫舒适性主客观指标相关性(* $P < 0.05$,** $P < 0.01$)

Tab.1 Relationships between subjective comfort and objective indices of the seat cushion

相关性	总坐应力 /kPa	接触面积 /cm ²	最大坐应力 /kPa	平均坐应力 /kPa
总体舒适性	0.936*	0.980**	-0.965**	-0.930*

3 讨论

座垫舒适性与座垫接触面积、最大坐应力、平均坐应力等具有很好的相关性,故可以用坐应力来评价座垫的舒适性。

座垫厚度增加时,臀部下陷增大,座垫与臀部及大腿的接触面积增加。而接触面积增加后,座垫对人体的包裹度和支撑度增加,故感觉舒适度增加。但由于材料限制,厚度超过 4 cm 后,接触面积便趋

于稳定,不再增加,座垫舒适性便不再有很大提高。

最大坐应力和平均坐应力随着座垫厚度增加而减小,这是因为随着厚度的增加,座垫对人的支撑和包裹度发生变化,坐应力分布分散开,应力集中现象得到减轻,故最大坐应力减小;同时由于总坐应力基本不变,接触面积增加,故平均坐应力减小。最大坐应力和平均坐应力减小,使得臀部、大腿软组织受到的压迫减轻,有利于血液循环,保证人处于较舒适的状态。但当座垫厚度超过 4 cm 后,最大坐应力和平均坐应力便不再变化,不再增加座垫舒适性。

座垫厚度增加有利于座垫舒适性的增加,但并不是座垫越厚舒适性就越好。对于本文试验用到的聚醚聚氨酯海绵座垫,当座垫厚度达到 4 cm 时,坐应力分布的指标就不再变化;而且如果长时间坐在过厚的座垫上,反而会使人产生不舒适感,影响人的健康,故建议采用本文中的材料设计座垫时,厚度控制在 4 cm 左右为宜。

4 结论

本研究分析了不同厚度聚醚聚氨酯海绵座垫的主观舒适性与坐应力指标(接触面积、最大坐应力、平均坐应力)之间的关系,这些客观指标均与主观舒适性有显著的相关性。最大坐应力和平均坐应力的减小有助于减小臀部和大腿组织神经、血管的压迫,利于血液循环,减少大腿麻木感,提高座垫舒适性;同时,座垫厚度到达一定值后,坐应力指标达到稳定,不再变化,舒适感也不再显著增加;且座垫过厚过软,长时间处于坐姿时会产生不舒适性,甚至会产生疲劳。在开展弹射座椅座垫舒适性设计和评价中,可以采用坐应力指标进行评价。

参考文献:

- [1] 柳松杨,丛红,王鹤,等. 军机飞行员的颈部损伤研究[J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 262-265.
Liu SY, Cong H, Wang H, et al. Study on neck injuries in military pilots [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 262-265.
- [2] 樊瑜波,柳松杨. 航空生物力学[J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 235-238.
Fan YB, Liu SY. Biomechanics in aviation [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 235-238.

- arthritis. Kuettner KE, Schleyerbach R, Peyron JG, et al, ed. New York: Raven Press, 1992: 183-199.
- [5] Hogan A. A direct comparison of long-term hyaluronic acid and corticosteroid intra-articular injections for moderate arthritis in patients aged twenty-five to fifty years old [D]. USA: Cornell University, 2011.
- [6] 那键, 刘艺, 马克勇, 等. 老年性骨关节炎的分子生物学机制及治疗展望[J]. 中国老年学杂志, 2010, 30(20): 3035-3036.
- [7] 董启榕, 郑祖根, 王以进. 关节软骨的生物力学特性研究[J]. 苏州医学院学报, 1999, 19(3): 244-246.
- [8] Bastawros AF, Bart-Smith H, Evans AG. Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam [J]. J Mech Phys Solids, 2000, 48(2): 301-322.
- [9] Bey MJ, Soslowsky L. Two-dimensional intratendinous strains of the human rotator cuff: Technique and preliminary results [J]. Trans Annu Meet Orthop Res Soc, 2000, 25: 405.
- [10] 孟维春, 董启榕. 关节软骨压缩特性的实验研究[J]. 医用生
- 物力学, 2003, 18(1): 28-33.
- Meng WC, Dong CR. The experiment study on the compression properties of articular cartilage [J]. J Med Biomech, 2003, 18(1): 28-33.
- [11] 吴凡恺, 张均一, 梁路光, 等. 关节软骨粘弹性的实验研究[J]. 中国医学物理学杂志, 1995, 12(3): 144-146.
- [12] Sakai N, Hagihara H, Furusawa T, et al. Analysis of biphasic lubrication of articular cartilage loaded by cylindrical indenter [J]. Tribol Int, 2012, 46(1): 225-236.
- [13] Kiviranta P, Rieppo J, Korhonen RK, et al. Collagen network primarily controls poisson's ratio of bovine articular cartilage in compression [J]. Orthop Res, 2006, 24(4): 690-699.
- [14] Chegini S, Ferguson SJ. Time and depth dependent poisson's ratio of cartilage explained by an inhomogeneous orthotropic fiber embedded biphasic model [J]. J Biomech, 2010, 43(9): 1660-1666.
- [15] Cooper C. Occupational activity and the risk of osteoarthritis [J]. J Rheumatol Suppl, 1995, 43: 10-12.

(上接第 134 页)

- [3] 黄家阳, 邱义芬, 颜吟雪, 等. 弹射座椅的静态舒适性仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(10): 1168-1171.
- [4] 王春洁, 曾福明. 弹射座椅动态舒适性与人椅动力学特性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 375-378.
- [5] 程明. 浅谈民用飞机驾驶员座椅的设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2009, 2: 41-44.
- [6] 周有礼, 江升修, 罗世忠. 人体坐姿与坐椅界面间之生物力学分析[J]. 医用生物力学, 1999, 14(2): 65-73.
- Zhou YL, Jiang SX, Luo SZ. Biomechanical analysis of body posture and seating interface [J]. J Med Biomech, 1999, 14(2): 65-73.
- [7] 徐明, 夏群生. 体压分布的指标[J]. 中国机械工程, 1997, 8(1): 55-58.
- [8] 张鄂, 洪军, 梁建, 等. 汽车人机接触界面体压分布的实验与评价研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 538-542.
- [9] 黄榕熙, 胡国清, 陈雄, 等. 人体压力分布测量技术的研究现状与发展综述[J]. 生命科学仪器, 2006, 4(6): 10-15.
- [10] de Looze MP, Kuijt-Evers LF, van Dieen J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures [J]. Ergonomics, 2003, 46(10): 985-997.
- [11] Kyung G, Nussbaum MA. Driver sitting comfort and discomfort (part II): Relationships with and prediction from interface pressure [J]. Int J Ind Ergonom, 2008, 38(5-6): 526-538.
- [12] Moes NC. Variation in sitting pressure distribution and location of the points of maximum pressure with rotation of the pelvis, gender and body characteristics [J]. Ergonomics, 2007, 50(4): 536-561.

(上接第 140 页)

- [10] Xiong FL, Chong CK. Parametric numerical investigation on haemodynamics in distal coronary anastomoses [J]. Med Eng Phys, 2008, 30(3): 311-320.
- [11] 乔爱科, 刘有军. 具有不同移植管-宿主动脉直径比的冠状动脉搭桥术的血流动力学仿真比较[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(4): 453-459.
- [12] Vimmr J, Jonašova A, Bublik O. Effects of three geometrical parameters on pulsatile blood flow in complete idealised coronary bypasses [J]. Comput Fluids, 2012, 69: 147-171.
- [13] Lee D, Su JM, Liang HY. A numerical simulation of steady flow fields in a bypass tube [J]. J Biomech, 2001, 34(11): 1407-1416.
- [14] Cole JS, Watterson JK, O'Reilly MJG. Numerical investigation of the haemodynamics at a patched arterial bypass anastomosis [J]. Med Eng Phys, 2002, 24(6): 393-401.
- [15] Perktold K, Resch M, Florian H. Pulsatile non-Newtonian flow characteristics in a three-dimensional human carotid bifurcation model [J]. J Biomech Eng, 1991, 113(4): 464-475.
- [16] 程彬彬, 李玉青, 严志强, 等. 切应力诱导的内皮祖细胞在与血管平滑肌联合培养的内皮细胞表面黏附及其机制[J]. 医用生物力学, 2009, 24(S): 13.