低温加压条件下EVA手套的力量分析

刘何庆 丁 立 袁修干 李 晶

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院，北京 100191)

摘 要：为了研究航天员舱外活动时的手套压力和太空低温复合效应对操作力量的影响，选取最大握力和握力疲劳两个指标评价手动作业力量，其中握力疲劳采用做功能力评价.操作力量抓握试验所需的不同温度和压力是通过在低温模拟舱中利用液氮降温以及真空泵抽气实现.结果表明：戴手套对最大握力和握力疲劳的影响都非常显著；与常温常压戴手套相比，压力(29.6 kPa，39.2 kPa)单独作用对最大握力的影响显著，低温单独作用对最大握力的影响并不显著，而二者对握力疲劳的影响都非常显著；在加压和低温复合作用下，最大握力和握力疲劳会进一步受到显著影响.可见手套压力和太空低温复合效应严重降低了航天员手部力量的发挥，航天员舱外作业人-手套系统的研究需考虑复合因素的影响.

关 键 词：舱外活动；手套；低温；压力；力量

中图分类号：V 444.3^{+}91

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1311-04

EVA glove strength under low temperature and pressure

Liu Heqing Ding Li Yuan Xiugan Li Jing

(School of Biological Science and Medical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the effects of combined stress of glove pressure and low temperature on astronaut operation strength during extravehicular activity (EVA), the maximum grip strength and grip fatigue were selected as two indicators to evaluate the strength of manual performance. Fatigue was evaluated by the work done in grip test. The low-temperature and pressured experimental conditions in the grip test were simulated in the low-temperature simulation cabin using the liquid nitrogen and the vacuum pump. The results indicate that wearing glove has very significant effect on the maximum grip strength and grip fatigue. Pressure(29.6 kPa, 39.2 kPa) has significant influence on the maximum grip strength compared with wearing glove under normal temperature and pressure. Low temperature has no significant influence on the maximum grip strength. However, pressure and low temperature have particularly significant influence on grip fatigue. Under the combined stress of both pressure and low temperature, the maximum grip strength and grip fatigue will be further influenced significantly. The combined stress of pressure and low temperature in space seriously reduces the strength of the astronauts. The effects of combined stresses should be considered in researches of the man-glove system during extravehicular operations.

Key words: extravehicular activity; glove; low temperature; pressure; strength

航天员在舱外活动(EVA，Extravehicular Activity)时的作业是在大脑调节控制之下，通过上肢、手部关节与肌肉产生的力量和手各部分协调动作而实现的，操作能力取决于这二者整合之力[1].但在实际操作过程中，受到手套结构、手套压力、环境低温等多种因素的作用，并产生各类复合效应，严重干扰或降低操作效率[2].文献上已有大量相关报道，但仅限于单一因素(手套结构、手

收稿日期：2009-10-20

作者简介：刘何庆(1983－)，男，河北保定人，硕士生，liuheqing-2000@163.com.

套压力、温度和手柄等)对力量等影响的研究[3-5].基于航天员在舱外作业是在多种环境因素同时存在的条件下进行的,而目前又欠缺对较为重要的手套加压和低温双因素复合效应的研究,特开展本课题的研究.结合天上的实际情况,并采用能够反映该双因素复合效应的最佳反应指标(最大握力和疲劳),通过这2个指标的改变,阐明航天员戴加压手套在低温环境的力量和操作效率的改变.本文结果可为航天员舱外作业人-手套系统力量的研究、评价和方案的制定提供新的科学依据.

1 试验方案设计

1.1 试验人员

本试验的受试者选定为10名在校的大学生志愿者,男性,年龄为23～26岁,均为右利手.

1.2 试验内容

1)力量.根据手的用力方式,手动作业中出现的手部力量主要可分为:握力、捏力和拧力.根据手动作业的工效评价体系最佳指标[6],本文选取握力来进行试验.

2)疲劳.疲劳是肌肉活动过度,力量减弱在大脑产生的反应.疲劳与作业力量和时间直接相关,即与输出功有关.同样根据手动作业的工效评价体系最佳指标,本文选取握力疲劳进行试验.

1.3 试验组设计

本试验是基于压力和低温复合因素下对舱外航天手套的力量进行研究,试验组设计如表1所示.

表1 试验组设计

类型	手套内外压差/kPa	舱内温度/℃	抓握杆温度/℃	备注
1		25	25	裸手
2	0	25	25	戴手套
3	22.1	25	25	戴手套
4	29.6	25	25	戴手套
5	39.2	25	25	戴手套
6	0	25	−50	戴手套
7	0	25	−90	戴手套
8	0	25	−110	戴手套
9	0	25	−130	戴手套
10	39.2	25	−50	戴手套
11	39.2	25	−110	戴手套
12	39.2	25	−130	戴手套
13	39.2	−50	−50	戴手套

1.4 试验设备

试验设备分为握力采集系统、温度采集系统、制冷系统以及加压系统4个部分.

握力采集系统包括握力器、感知动态握力仪和基于MCGS(Monitor and Control Generated System)软件平台开发的握力采集工程模块,其功能为采集、实时显示并记录握力值.测试精度为0.1 kg.

温度采集系统包括温度传感器(铂电阻PT-100),巡检仪(昌晖)和基于组态王软件平台开发的温度数据采集模块,其功能为采集、实时监测并记录各测温点的温度值.测试精度为0.1℃.

制冷系统包括杜瓦瓶、恒温罐和低温舱,其功能为实现抓握杆或低温舱的不同低温条件.抓握杆控制精度为3℃,试验舱控制精度为1℃.

加压系统包括真空泵和压阻真空计,其功能为通过真空泵抽取低温舱内空气来实现手套内外压差.系统的压力控制精度为1 kPa.

1.5 试验方法

1)握力.受试者以最大力抓握握力器3次,中间间隔1 min,取平均值作为受试者的最大握力F_{max}.接下来进行握力疲劳试验.

2)握力疲劳.采用无因次疲劳测试方法,受试者以5次/30 s频率握紧和放松握力器进行30 s的动态试验,每次握紧时采用最大握力抓握.然后始终用力握紧握力器,维持其最大握力F_{max}的20%持续10 s.重复试验,直至在动态抓握时,5次握力值有2次或者2次以上小于最大握力F_{max}的50%时,或当温度监测任意指尖温度小于8℃时,停止试验.

每组试验工况之间受试者要休息3 d,以使疲劳的肌肉得到恢复.

2 试验结果与分析

2.1 最大握力

对最大握力的处理是将每种情况下10名受试者的最大力F_{max}求均值加以比较.计算发现,与裸手相比戴手套后最大握力下降非常明显(显著性$p<0.01$),平均下降37%(见图1),这与文献[3]的35%以及文献[7]的39%的结论基本一致.以下是戴手套后不同试验组之间最大握力的比较.

2.1.1 压力对最大握力的影响

由图1可知与常温常压戴手套相比常温加压戴手套对最大握力有一定的影响,其中22.1 kPa的压力对最大握力下降影响不明显($p>0.05$);29.6 kPa和39.2 kPa对最大握力下降影响显著($p<0.05$),平均下降11.4%,与裸手相比平均下降43%,与文献[3]的47%基本一致.但几个压力

水平之间最大握力差异并不显著($p>0.05$).握力下降主要是由于手套受到压力作用时,会处于膨胀状态,握力弯曲时就会使手套褶皱处产生与作业方向相反的阻力,影响手动作业力量.但又由于最大握力的时间很短,因此,不同压力水平之间的差异并不显著,这与文献[4]的研究结果是一致的.

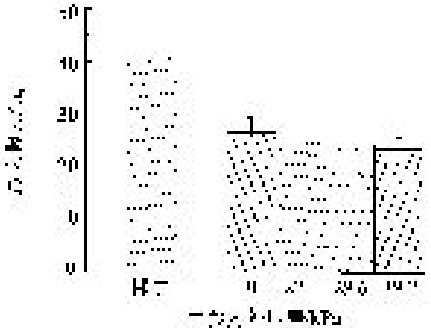


图 1　裸手及戴手套常温的最大握力比较

2.1.2　低温对最大握力的影响

由图 2 可知,与常温常压戴手套相比常压戴手套抓握低温物体会导致最大握力有所下降但减小幅度不大,低温对最大握力影响不显著($p>0.05$).这是由于最大握力是在短时间内抓握测得的,尽管抓握杆的温度很低,但温度的影响有限.因此−50℃,−90℃,−110℃,−130℃几个温度水平之间握力差异也不显著($p>0.05$),而目前国外还未见相关研究.

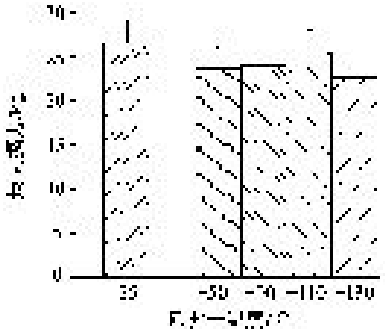


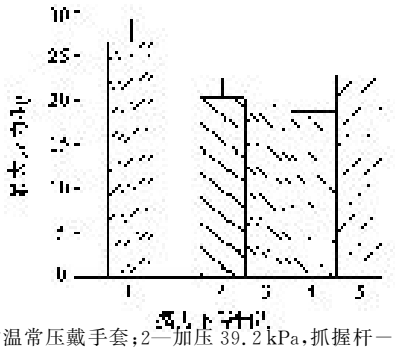
图 2　戴手套常压抓握低温物体最大握力比较

2.1.3　压力和低温复合因素对最大握力的影响

在戴手套加压和低温复合因素的作用下(见图 3),与常温常压戴手套相比加压低温戴手套时最大握力下降较大,平均下降 20.4%,影响水平非常显著($p<0.01$),但几个加压低温复合因素之间最大握力差异并不显著($p>0.05$).在低温环境抓握低温物体时,最大握力下降也很明显,这种试验环境最接近出舱作业的实际情况,但目前还未见相关报道.

2.2　握力疲劳

2.2.1　握力疲劳数据处理方法比较



1—常温常压戴手套;2—加压 39.2 kPa,抓握杆−50℃;3—加压 39.2 kPa,抓握杆−110℃;4—加压 39.2 kPa,抓握杆−130℃;5—加压 39.2 kPa,试验舱−50℃,抓握杆−50℃.

图 3　复合因素下的最大握力比较

鉴于目前对舱外航天服手套握力疲劳的认定仍没有一个有效的评价标准,本文在已有研究基础上对疲劳的处理方法进行了进一步的探索与改进[6],采用抓握过程中所做的功对疲劳进行数据处理研究.

试验中握力采集系统的实时采集频率为 5 次/s,与握力变化相比,可认为握力器在采集时间内受到的力恒定,因此应变片发生的应变 s 也恒定.

$$s_n = F_n / e \tag{1}$$

式中,e 为握力器中应变片的应变率,N/m;s_n 为在第 n 个 0.2 s 内应变片的应变量,m;F_n 为握力采集系统采集到的第 n 个握力值,N.那么握力在每个采集时间内做的功为

$$W_n = F_n \times s_n = (F_n)^2 / e \tag{2}$$

式中,W_n 为在第 n 个 0.2 s 内所做的功,N·m.

从而

$$W = \sum_1^n W_n = \frac{1}{e} \sum_1^n (F_n)^2 \tag{3}$$

由式(3)可知,做功量与握力器中应变片的 e 以及握力采集系统采集到的握力值有关.为消除应变片的 e 的影响,本文以常温常压戴手套为参照对各试验组数据进行了归一化处理,这样做功相对值只与握力值有关.

图 4 所示是对疲劳处理方法的一个对比,可以看到采用握力曲线与横坐标围成的面积即冲量来评价疲劳与主观的感受差异较大,而采用做功来评价疲劳与主观的感受一致性较好,力的物理概念也更合理.主观疲劳感受值的计算方法参见文献[6].

通过计算做功发现,戴手套对疲劳的影响非常显著($p<0.01$),与裸手相比平均下降 37%,略低于文献[3]的 46%.这是由于戴手套使握力值显著下降,进而导致做功能力下降.以下是戴手套后不同试验组之间握力疲劳的比较.

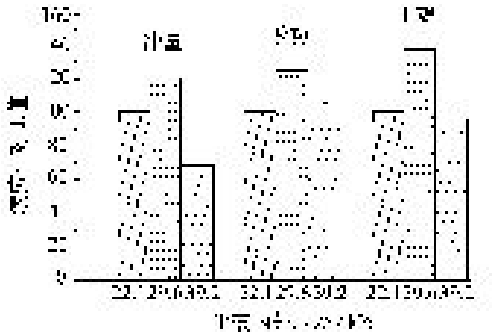


图4 处理方法的比较

2.2.2 压力对握力疲劳的影响

由图5可知与常温常压戴手套相比常温加压戴手套对疲劳的影响非常显著($p<0.01$),平均下降31.8%,与裸手相比平均下降57%,与文献[3]的59%一致.但22.1 kPa,29.6 kPa和39.2 kPa几个压力水平之间的差异并不显著($p>0.05$).这主要是因为手套存在的压力引起的反作用力持续对握力的影响,减少了手部疲劳的耐受时间,从而导致做功能力下降,但不同压力之间导致的反作用力差异不大.

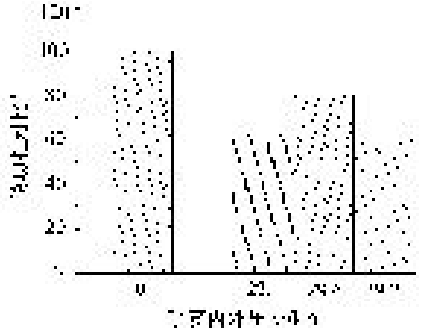


图5 戴手套常温的做功比较

2.2.3 低温对握力疲劳的影响

由图6可知与常温常压戴手套相比常压戴手套抓握低温物体对疲劳的影响非常显著($p<0.01$),平均下降46.8%,但-50 ℃,-90 ℃,-110 ℃,-130℃几个温度水平之间的差异并不显著($p>0.05$),与主观的感受一致性较好.这是由于抓握的低温物体温度很低,导致手部因为冷而引起抓握循环次数明显减少,从而导致做功的显著下降.

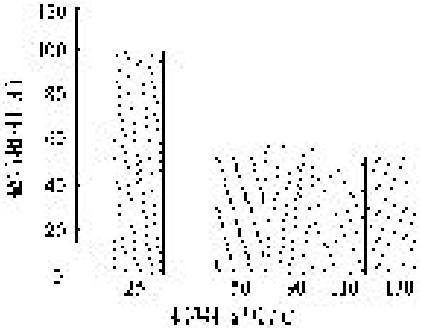
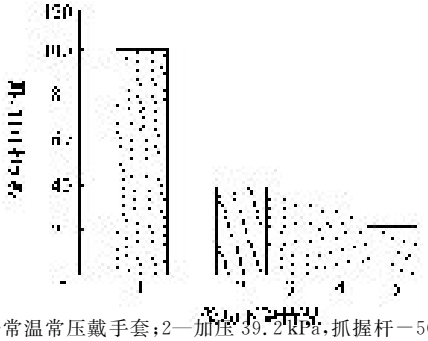


图6 戴手套常压抓握低温物体的做功比较

2.2.4 压力和低温复合因素对握力疲劳的影响

由图7可知在加压低温复合因素的作用下,手部的做功能力下降很大,平均下降65.7%($p<0.01$).但几个加压低温复合因素之间做功能力下降较为缓慢,并不显著($p>0.05$).而对于更恶劣的环境和抓握物体都是低温的情况,做功下降非常明显($p<0.01$),仅仅环境温度是-50 ℃,做功能力就下降了79%.对于更低的温度,受试者都因手套冷而无法有效完成疲劳测试.这是因为环境也是低温时,整个手套处于低温环境中,使整个手都很冷,温度耐受时间骤减,循环抓握次数显著减少,从而导致做功的显著下降.



1—常温常压戴手套;2—加压39.2 kPa,抓握杆-50 ℃;3—加压39.2 kPa,抓握杆-110 ℃;4—加压39.2 kPa,抓握杆-130 ℃;5—加压39.2 kPa,试验舱-50 ℃,抓握杆-50 ℃.

图7 复合因素下的做功比较

可以看到对比压力和低温作为单因素对握力疲劳的影响,在加压低温复合因素的作用下握力疲劳会非常显著地进一步降低,但复合因素的影响又不是简单的单因素叠加.

3 结 论

通过对复合因素(低温、压力)条件下舱外航天手套的最大握力和握力疲劳的系统研究,可得到以下结论:

1) 同单因素作用相比,在压力和低温复合因素作用下,最大握力下降非常明显.

2) 戴手套、压力和低温作为单因素对握力疲劳的影响都非常显著,在压力和低温的复合因素作用下,疲劳会非常显著地进一步降低,并呈现随温度降低而降低的趋势.

本文较真实地模拟了航天员舱外作业情况,并运用人-手套系统操作的理念开展了对复合因素的研究,类似研究未见相关报道,有实用价值.

致 谢 贾司光老师对本课题的研究给予了很大的帮助,在此表示衷心的感谢.

(下转第1342页)

无应力状态温度对陶瓷层内部应力的产生都有显著影响,尤其以氧化层厚度最为显著.

2) 随着氧化层厚度逐渐增加,陶瓷层内部的应力会先快速降低,后逐渐缓慢升高.

3) 无应力状态温度越高,陶瓷层内部应力在室温状态下越高,高温状态下越低.

4) 氧化层幅值的增加会增大陶瓷层内的应力,而氧化层幅值的变化对高温状态下的陶瓷层内部应力影响不显著.

5) 氧化层不同波长的变化对室温状态下陶瓷层内应力影响不显著,而在高温状态下随氧化层波长的增加陶瓷层内的应力随之减小.

参考文献 (References)

[1] Mao W G, Zhou Y C, Yang L, et al. Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(12): 1118-1127

[2] 马维,潘文霞,吴承康. 热障涂层材料性能和失效机理研究进展[J]. 力学进展,2003,33(4):548-559
Ma Wei, Pan Wenxia, Wu Chengkang. Progress in research on the material properties and failure mechanisms of thermal barrier coatings [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 548-559(in Chinese)

[3] Liu Aiguo, Wei Yanhong. Finite element analysis of anti-spallation thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 165(2): 154-162

[4] Busso E P, Wright L, Evans H E, et al. A Physis-based life prediction methodology for thermal barrier coating systems [J]. Acta Material, 2007, 55(5): 1491-1503

[5] Chang G C, Phucharoen W, Miller R A. Finite element thermal stress solutions for thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1987, 32(1/2/3/4): 307-325

[6] 耿瑞. 热障涂层强度分析及寿命预测研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院,2001
Geng Rui. Thermal barrier coatings strength analysis and life prediction[D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001(in Chinese)

[7] 陈火红,尹伟奇,薛小香. MSC. Marc 二次开发指南[M]. 北京:科学出版社,2004:356-382
Chen Huohong, Yin Weiqi, Xue Xiaoxiang. Redevelop technology guide of MSC. Marc [M]. Beijing: Science Press, 2004: 356-382(in Chinese)

[8] Zhou Chungen, Wang Na, Xu Huibin. Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings[J]. Materials Science and Engineering, 2007(452/453): 569-574

[9] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:433
Han Yugeng. Application mathematical statistic [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 433(in Chinese)

[9] Rabiei A, Evans A G. Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Acta Mater, 2000, 48(15): 3963-3976

(编 辑:李 晶)

(上接第 1314 页)

参考文献 (References)

[1] 贾司光. 舱外航天服研制的学科基础[M]. 北京:航天医学工程研究所,2003:29-35
Jia Siguang. Discipline-based for the development of the extravehicular activity space suit [M]. Beijing: Institute of Space Medico-Engineering, 2003: 29-35(in Chinese)

[2] 丁立,杨锋,杨春信,等. 舱外航天服手套的工效问题[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(4):416-420
Ding Li, Yang Feng, Yang Chunxin, et al. Ergonomics implications of extravehicular activity spacesuit glove[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4): 416-420(in Chinese)

[3] O'Hara J M, Briganti M, Cleland J, et al. Extravehicular activities limitations study volume Ⅱ establishment of physiological and performance criteria for EVA gloves-final report [R]. NAS-9-17702, 1988

[4] Ram R B, Lisa A B, Dishayne G, et al. Tactility as a function of grasp force: effects of glove, orientation, pressure, load, and handle[R]. NASA-TP-3474, 1994

[5] Melissa H W, David L A. The effects of extravehicular activity gloves on human hand performance Maryland: SAE[R]. SAE-2001-01-2164, 2001

[6] 陈守平,丁立,杨锋,等. 基于舱外航天服手套基础性工效评价的人体力学指标优选研究[J]. 航天医学与医学工程,2006,19(2):106-110
Chen Shouping, Ding Li, Yang Feng, et al. Study on index optimization of human-mechannics based on basic ergonomic evaluation of spacesuit gloves[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2006, 19(2): 106-110(in Chinese)

[7] Pelton M. The effects of extravehicular activity gloves on human hand performance [D]. College Park: Department of Aerospace Engineering, University of Maryland, College Park, 2000

(编 辑:张 嵘)