某型囊式抗荷服热性能分析

邱义芬 李艳杰 任兆生

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (空军航空医学研究所，北京 100036)

摘 要：为了研究某型抗荷服在不同环境条件下的热防护性能，在分析抗荷服传热传质特点的基础上对该服装的不同节段分别建立不同的服装传热模型，再将人体热调节模型和服装模型结合起来模拟不同环境条件下人体着装的动态仿真，得到人体各节段皮肤温度、人体平均温度、核心温度以及出汗量等，计算出飞行员综合热应激指数，并进行实验验证. 最后利用所建模型分析服装热阻及透湿指数对人体热负荷的影响.

关 键 词：抗荷服；热阻；透湿指数；人体平均皮肤温度；核心温度；综合热应激指数

中图分类号：V 445.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)09-1035-04

Thermal performance analysis of antigravity suit

Qiu Yifen Li Yanjie

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

Ren Zhaosheng

(Institute of Aviation Medicine, Air Force, Beijing 100036, China)

Abstract: To study the thermal performance of an antigravity suit, the thermal system simulation modal was build among human body, antigravity suit and environment. The suit was divided into 15 segments, each segment has different thermal resistance and gas permeability. The system heat and mass transfer process were analyzed according to suit characteristic. This modal can simulate human body skin temperature, core temperature and sweat. The combined index of heat stress(CIHS) was calculated with these parameter to evaluating human body hot load. Experiments were designated to validate the modal calculation results. The differences between experimental and calculating results is small. At last, influences of the suit thermal resistance and impermeability index to body hot load ware analyzed with the modal built above.

Key words: antigravity suit; thermal resistance; impermeability index; human weighted mean skin temperature; core temperature; combined index of heat stress

当今，在对抗第 2 代、第 3 代战斗机高过载的众多防护措施中，采用大面积囊覆盖的代偿抗荷服已获得显著效果. 本文研究的某型抗荷服就是具有抗荷作用的五囊半身式战斗机飞行员个体防护装备. 由于和传统的管式抗荷服相比，抗荷囊增大了人体覆盖面积，夏季飞行时，即使在飞机起飞前的座舱准备、一级战备值班和低空飞行阶段，飞行员配穿该套装备，也有可能产生很大的热负荷，造成飞行员严重的热应激. 因而对该套装备在座舱准备、一级战备值班和低空飞行阶段的热性能进行分析是十分必要的.

1 抗荷服传热传质分析

本文研究的抗荷服抗荷囊分布位置分别为：腹部、大腿前侧(左右各一个)、小腿前侧(左右各一个). 由于抗荷囊是用两面涂丁基胶的尼龙布制成，完全不透气，而人体其他部位的服装为透气性织物. 所以在建立服装模型时要根据透气性情况

收稿日期：2008-07-14

作者简介：邱义芬(1968—)，女，湖北丹江口人，副教授，qiuyifen@vip.soho.com.

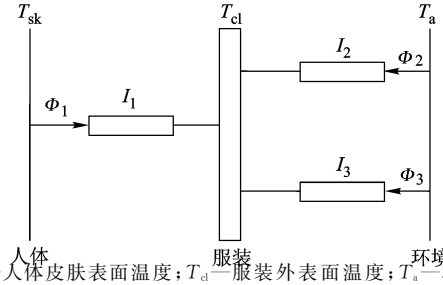
将该型服装分为有囊部位和无囊部位进行分析.

1.1 有囊部位的人体-服装-环境传热分析

在有囊部位的人体-服装-环境显热传递过程中,人体和服装外表面之间的传热过程非常复杂,为了计算简便准确,人体皮肤表面和服装外表面之间的换热用一个换热热阻表示,通过实验测试得到.

在人体-服装-环境潜热传递过程中,开始阶段人体只发生无感蒸发,随着时间的推移,人体温度不断升高,人体表面开始出现汗液,此时有感蒸发和无感蒸发同时进行.当人体发生无感蒸发时,由于抗荷囊不透气,从皮肤表面向服装外表面无水蒸气蒸发,因此无感蒸发不能降低人体皮肤表面温度,无感蒸发的水蒸气只是存留在人体皮肤表面和服装内部,影响其间的热阻.但是由于皮肤与服装间有限空间的水蒸气分压不断增大,抑制皮肤表面水蒸气的蒸发,所以人体皮肤表面和服装外表面之间的水蒸气量很少,对服装热阻的影响可忽略不计.当人体表面出现汗液时,认为人体皮肤表面汗液直接并完全渗透到抗荷服下的基础服装中,由于抗荷囊不透气,汗液不能从服装蒸发到环境中,服装中残留的汗液未发生潜热传递,只是影响服装热阻值[1].

人体-服装-环境的传热传质过程见图1.



T_{sk}—人体皮肤表面温度;T_{cl}—服装外表面温度;T_a—环境温度;I_1—人体皮肤表面与服装外表面之间的热阻;I_2—服装外表面与环境之间的对流热阻;I_3—服装外表面与环境之间的辐射热阻;Φ_1—人体皮肤表面与服装外表面之间的热流;Φ_2—服装外表面与环境之间的对流热流;Φ_3—服装外表面与外界环境的辐射热流.

图1 有囊部位的人体-服装-环境模型

在图1所示传热过程中,各热流满足下列关系:

$$\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3=0 \tag{1}$$

$$\Phi_1=\frac{T_{sk}-T_{cl}}{I_1} \tag{2}$$

$$\Phi_2=\frac{T_a-T_{cl}}{I_2} \tag{3}$$

$$\Phi_3=\frac{T_a-T_{cl}}{I_3} \tag{4}$$

在式(1)中,由于服装热容很小,认为服装无储存热量,此外,实际上式(4)中的环境温度应为环境辐射温度,但是由于环境中无辐射热源,环境辐射温度等于环境温度.

联立式(1)～式(4),得到人体皮肤表面热流:

$$\Phi_{sk}=\Phi_1 \tag{5}$$

1.2 无囊部位的人体-服装-环境传热分析

人体-服装-环境显热传递过程与抗荷服有囊部位的显热传递过程相同.在人体-服装-环境潜热传递过程中,人体发生无感蒸发时,人体皮肤表面散发的水蒸气由于皮肤表面和服装外表面之间的水蒸气分压差,不断蒸发到环境中,增大了人体皮肤表面热流,从而降低了人体皮肤表面温度.此外残留在人体皮肤表面与服装外表面之间的水蒸气影响其间的热阻,但是由于人体皮肤表面与服装外表面之间的水蒸气处于不断的向环境扩散过程中,其间的水蒸气量很少,水蒸气对热阻影响很小,忽略不计.当人体皮肤表面出现汗液时,认为人体皮肤表面汗液直接并完全渗透到服装中,服装中的汗液由于服装外表面和环境之间的水蒸气分压差,有一部分由服装蒸发到环境中,影响服装外表面的温度,同时服装中残留的汗液影响服装热阻值[1].

人体-服装-环境间的传热传质过程分析见文献[2－4].

1.3 人体-服装-环境热系统计算

着装人体分为15个节段[5],头部节段装备为头盔,认为不透气,应用有囊部位模型处理.足部节段装备为军靴,不完全透气,这里近似做透气性处理.上臂、前臂、手部节段装备为夏季飞行基础服装,应用无囊部位模型处理.大腿、小腿装备为基础服装和抗荷服,由于腿部前后装备不同,前部为基础服装和抗荷囊,抗荷囊不透气,应用有囊部位模型处理,后部为基础服装和抗荷服无囊部分,应用无囊部位模型处理.最后利用各部分所占的面积比例加权计算腿部的热流、温度和出汗量.躯干部位装备比较复杂,分为背部、胸部、腹部3个部位分别处理,背部和胸部为夏季飞行基础服装,应用无囊部位模型处理.而腹部覆盖有大面积抗荷囊,应用有囊部位模型处理.利用3部分面积比例加权得到整个躯干部位的热流、温度和出汗量.颈部为裸露部位,计算方法见文献[3].

由上可建立人体-服装-环境热系统分析模型[4],计算不同环境条件下人体温度、出汗量等热生理参数,从而分析人体的热应激状态.

2 抗荷服热负荷试验

2.1　实验方法

实验中,受试者着装如下:保护盔、短袖汗衫、夏季布工作衣裤、某型抗荷服、短丝袜、飞行靴、线手套.6 名受试者穿着上述装备静坐于高温舱中,高温舱温度分别为 35℃ 和 40℃,试验时间为 90 min,测量指标为出汗量和蒸发率[6].同时用计算机控制的实时记录处理系统检测心率、核心温度和 8 点皮肤温度(胸、腹、背、腰、上臂、前臂、大腿、小腿).

2.2　实验验证

将实验结果与本文相应的计算结果进行对比.图 2 为 35℃人体平均皮肤温度随时间变化情况,人体平均皮肤温度的理论值与实验值的最大偏差为 0.9℃;图 3 为 40℃人体平均皮肤温度随时间变化情况,人体平均皮肤温度的理论值与实验值的最大偏差为 0.48℃;图 4 为 35℃核心温度随时间变化情况,核心温度的理论值和实验值的最大偏差为 0.13℃;图 5 为 40℃核心温度随时间变化情况,核心温度的理论值和实验值的最大偏差为 0.21℃.2 种环境温度条件下人体平均皮肤温度及核心温度的理论值与实验值吻合很好,温度变化趋势也基本相同,90 min 时实验值和理论值非常接近.

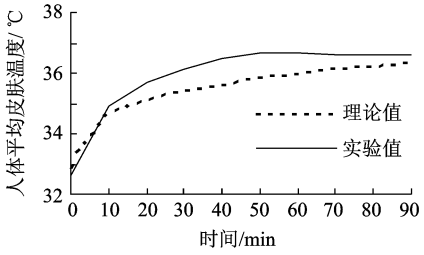


图 2　35℃人体平均皮肤温度理论值和实验值比较

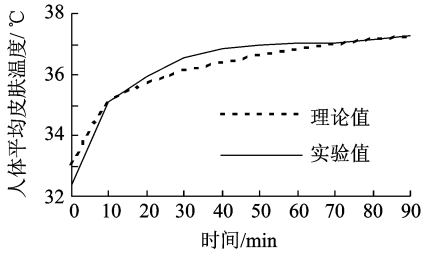


图 3　40℃人体平均皮肤温度理论值和实验值比较

2 种环境温度下综合热应激指数[7]的对比结果如表 1 所示.由表 1 可看出,2 种环境条件下的综合热应激指数的理论值与实验值基本接近.

由实验验证可知,人体平均皮肤温度和核心温度的理论值和实验值存在一定偏差,但二者差别不大,量值非常接近.综合热应激指数对比偏差小于 20%,符合工程需求.可以认为模型计算结果有较高的精度,分析方法合理可靠,满足使用要求.

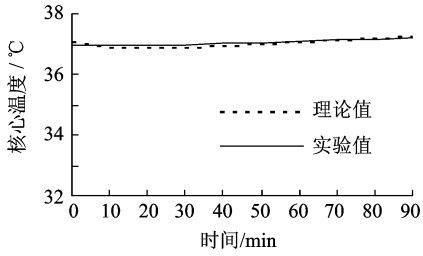


图 4　35℃核心温度理论值与实验值比较

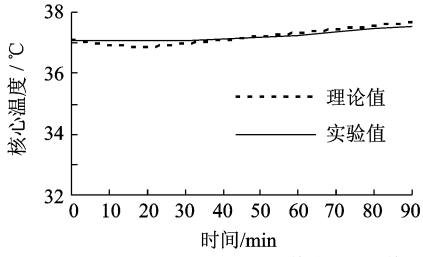


图 5　40℃核心温度理论值与实验值比较

表 1　2 种环境温度下综合热应激指数计算及实验结果对比

90 min 对比结果	35℃环境温度		40℃环境温度	
	计算结果	实验结果	计算结果	实验结果
平均体温增量/℃	1.32	1.54	1.86	1.97
积热量/(kJ·kg^{-1})	4.61	5.37	6.49	6.88
出汗量(g·min^{-1})	1.61	3.51	5.9	6.1
心率增值(次·min^{-1})		16		29
综合热应激指数	6.09	7.42	8.94	9.75

3　热性能分析

该型服装热性能包括服装热阻、透湿指数以及抗荷囊覆盖面积等参数.这里根据前文所建人体-服装-环境热系统分析方法,主要分析服装热阻、透湿指数对人体热负荷(人体平均皮肤温度和核心温度)的影响.

图 6 和图 7 为不同环境温度下服装热阻对人体平均皮肤温度和核心温度的影响.此时服装透湿指数和囊覆盖面积保持不变.可见,35℃时,人体皮肤温度和核心温度均随热阻的增大而增大,40℃时,人体平均皮肤温度和核心温度均随热阻的增大而减小.这是因为 35℃时,人体温度高于环境温度,人体向环境散热,服装热阻越大,散热量越小,人体内部热量形成热积,使人体平均皮肤温度和核心温度升高.40℃时,环境温度高于人体温度,环境向人体传热,热阻越大,传热量越小,人体获得的热量减小,所以人体平均皮肤温度和核心温度上升速度较慢.

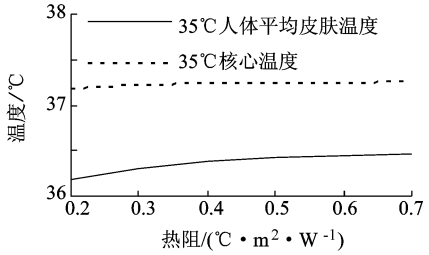


图6 35℃时热阻对人体热负荷的影响

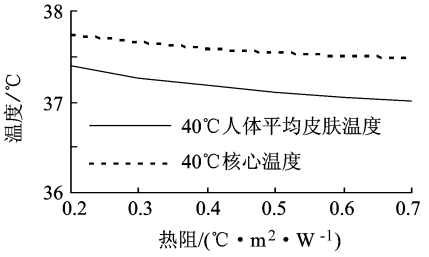


图7 40℃时热阻对人体热负荷的影响

图8和图9为不同环境温度下透湿指数对人体平均皮肤温度和核心温度的影响.此时服装热阻和囊覆盖面积保持不变.可见,2种环境温度下曲线都很平缓,而且环境温度为40℃时的曲线比35℃时更平缓.这是因为40℃时人体与环境之间温差很大,此时人体与环境之间的换热中显热占主要作用,而透湿指数的变化主要影响潜热部分,所以透湿指数影响较小.而35℃时人体与环境之间温差较小,此时人体与环境之间的换热中潜热占主要作用,所以透湿指数影响较大.

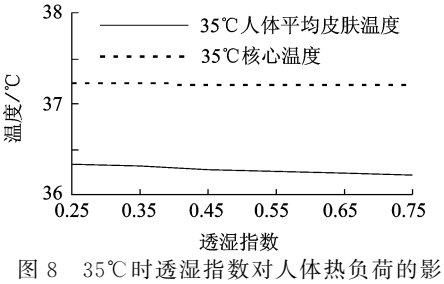


图8 35℃时透湿指数对人体热负荷的影响

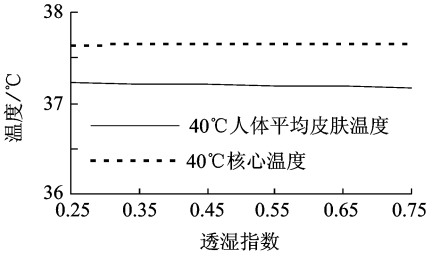


图9 40℃时透湿指数对人体热负荷的影响

4 结 论

本文在分析不同部位服装特点基础上对服装进行分部位研究,结合人体热调节模型得到人体的动态温度分布,并进行实验验证.由模型计算结果和实验结果可知,某型抗荷服在高温条件下对飞行员造成很大的热应激.因此在配穿该套装备时要充分考虑到这个问题.同时,通过模型分析可知,服装热阻对热性能的影响很大,且不同环境下,热阻对人体热应激的影响趋势不同.此外,和热阻相比,透湿指数对人体热负荷的影响较小.

参考文献(References)

[1] Lotens W A, Havenith G. Effects of moisture absorption in clothing on the human heat balance[J]. Ergonomics, 1995, 38(6):1092-1113

[2] Lotens W A, Havenith G. Effects of condensation in clothing on heat transfer[J]. Ergonomics, 1995,38(1):51-56

[3] 邱义芬,袁修干,梅志光,等.舱外航天液冷服传热分析[J].航天医学与医学工程,2001, 14(5):364-367
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of liquid cooling garment used for extravehicular activity[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5): 364-367(in Chinese)

[4] 邱义芬.舱外液冷通风服-人体热调节系统的数值模拟与实验研究[D].北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院,1999
Qiu Yifen. Experimental research and numerical simulation of liquid and ventilation cooling garment and human thermoregulation system for extravehicular activity[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)

[5] 袁修干.人体热调节系统数学模拟[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004
Yuan Xiugan. Mathematical simulation of human thermal regulation system[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004(in Chinese)

[6] 任兆生,薛利豪,石立勇,等.战斗机地面停放座舱热环境下的热应激测试[C]//中国航空学会人体工程航医救生专业分会第七届学术交流年会论文集.北京:中国航空学会人体工程航医救生专业分会,2006:219-221
Ren Zhaosheng, Xue Lihao, Shi Liyong, et al. Cabin themal environment heat stress testing when fighter on ground [C]//Proceeding of Seventh Conference on Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering. Beijing: Technical Committee of Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering-CSAA, 2006:219-221(in Chinese)

[7] 邱义芬,付杨,李艳杰,等.战斗机地面停放时飞行员综合热应激预测模型[J].北京航空航天大学学报, 2008,34(7): 830-832
Qiu Yifen, Fu Yang, Li Yanjie, et al. Estimation model of comprehensive index of heat stress on fighter pilots on ground[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 830-832(in Chinese)

(责任编辑:赵海容)