

实际空调环境中大学生人体热反应及其 对空调关闭影响的研究*

简毅文[†],常小艳,李昱岑,高萌,田园泉

(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

摘要:针对实际间歇空调运行情况的体现,依托某实际空调房间,基于人体进入空调房间之前热经历以及空调环境变化的随机测试工况,通过人体主要部位皮肤温度等生理参数和室内环境参数的测试以及人体热感觉和空调关闭意向的问卷调查,研究分析空调环境中处于静坐状态人体的生理热反应及其与空调关闭行为的相互关系.结果表明,在四肢和颈部几乎暴露于环境的条件下,空调环境中人体脚底皮肤温度变化明显,并对人体热感觉产生重要影响,伴随脚底皮肤温度的降低,人体热感觉从热中性开始,之后以“阶梯降”的形式逐步降低.同时,尽管空调关闭时的人体热感觉存在差异,但从统计角度分析,决定空调关闭动作产生的关键因素仍是脚底皮肤温度.脚底皮肤温度又最终由人体的环境暴露状况(热环境经历和当前所处环境)所决定,空调环境温度越低,人体对空调环境的热不可接受度越高,空调关闭的动作越容易发生.与脚底相对照,颈部、胸部、手背、大腿和前臂的皮肤温度对人体热感觉和空调关闭行为不产生统计上的显著影响.

关键词:皮肤温度;实际空调环境;生理热反应;热感觉;空调关闭行为;环境暴露

中图分类号: TU111.19

文献标志码: A

Physiological Responses in Air Conditioning Environment and Its Effects on Air Conditioning Closing Behavior

JIAN Yiwen[†], CHANG Xiaoyan, LI Yucen, GAO Meng, TIAN Yuanquan

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As a complementary research on human thermal adaptation in air conditioning environment, this study aimed to explore human physiological thermal responses in real air conditioning environment and discuss their effects on air conditioning closing behaviors. For this, one office room, equipped with one split air conditioner, was selected to provide real air conditioning environment, and 12 students volunteered to be subjects. 20 field surveys about human thermal responses to air conditioning environment when subjects just leave a non-air-conditioned environment, to simulate the intermittent running of air conditioners in real conditions, were conducted in this office room. During each survey, skin temperatures of the main body parts were measured; and human thermal sensations were recorded. Additionally, the indoor temperature and relative humidity were measured. The results showed the significant variations of foot skin temperatures and their great effects on human thermal sensations when human limbs and neck were almost

* 收稿日期:2016-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278004), National Natural Science Foundation of China(51278004);北京市自然科学基金资助项目(8142004), Beijing Municipal Natural Science Foundation(8142004)

作者简介:简毅文(1967—),女,江西上高人,北京工业大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: jianyiwen@bjut.edu.cn

exposed in air conditioning environment. In response to this, human thermal sensations presented the “step-down” trends from the votes of “thermal neutrality” to the votes of “cool” or “cold”, demonstrating the great impacts of foot skin temperatures on human thermal sensation votes. Moreover, foot skin temperatures were also found to have statistical effects on human thermal acceptance level in air conditioning environment and their actions to turn off air conditioners, which eventually resulted from human exposure environments and their thermal history. The lower the indoor temperature in air conditioning environment, the more likely subjects to turn off air conditioner. By comparison, the correlations of human thermal sensation votes and their actions to turn off air conditioners with skin temperatures of the other body parts as neck, chest, hand, forearm and thigh, as well as heart rate and blood pressure have not reached statistical significance.

Key words: skin temperature; real air conditioning environment; physiological thermal responses; thermal sensation; air conditioning closing behavior; exposure environment

空调的目的在于满足人体对室内环境的热舒适需求,因此,人体对室内环境的生理热反应本质上决定着空调的开、关状况。在安装分体空调的居住建筑和带有三速开关风机盘管的办公建筑中,居住者对空调的开、关状况具有完全的控制权。人在室内或由室外进入到室内感到热时会开空调或加大空调风速,室内温度和湿度降低;空调环境下人感到凉时会关空调或降低空调风速,室内温度和湿度上升。这使得房间空调通常处于间歇运行的状态,以此实现了人体从“热不舒适”向“热舒适”的转变^[1],并在此过程中会出现由一种热环境向另一种热环境的过渡。因此,为全面认识和了解建筑空调行为,有必要研究分析空调环境中人体生理热反应的变化特性及其对空调关闭行为产生的影响。

迄今,国内外学者在大量人体热舒适现场研究的基础上^[2-3],为分析探讨人体热舒适的变化特性,开始着眼于人体生理热反应的实测研究。对此,依托于人工气候室,研究者对热湿环境多种突变工况^[4-7]、渐变工况^[8]以及稳定工况^[9]下的人体生理热反应进行了实验观察,分析认识人体皮肤温度、心率、热反应稳定时间、人体热感觉等的变化特性;研究分析人体热舒适与人体暴露环境、平均皮肤温度及其变化率之间的相互关系;统计分析了人体局部皮肤温度、皮肤温度变化率与人体热感觉之间的相关性,并由此确定出对人体热感觉影响关键的身体部位;建立人体热感觉与平均皮肤温度或皮肤温度变化率的数学关系^[4-9]。此外,考虑到实际环境的不可控、非稳定以及人体热经历的随机性,有学者以超市、车站等过渡空间为研究对象,开展突变环境下人体生理热反应的现场实测研究,分析人

体平均皮肤温度、热感觉随时间的变化,并建立两者之间的数学关联^[10-12],从而对人体生理热反应的真实状况有了更全面的认识。

上述研究对空调环境下人体生理热反应研究的发展和应用起到了很好的推动作用,然而,现有研究的内容还较少聚焦于人体基于生理热反应所采取的调节行为动作上。事实上,从建筑空调行为的角度,人体生理状况决定着其对室内环境的主观热评价,进而决定着空调关闭和开启的动作产生^[13]。在此方面,韩国 Song 等开展了空调教室环境以及室内人体皮肤温度的现场测试^[14],分析比较空调开启和关闭时刻受试者 8 个部位皮肤温度的差异状况,分析阐述四肢部位(前臂、手背、小腿和足部)的皮肤温度对空调关闭行为的重要影响。但此项研究没有考虑人体对空调室内环境的主观热评价,相应未能在人体生理状况、热感觉与空调行为三者之间建立起相互关联。

因此,从人体生理热反应与空调行为的关系上需要进一步丰富和完善现有研究。对此,本文采用现场实测和问卷调查的方法,针对实际空调环境,研究分析人体在其中的生理热反应及其与为适应环境所产生空调关闭行为之间的相互关系。作为对实际间歇的体现,依托某实际空调房间,基于人体进入空调房间之前热经历以及空调环境变化的随机测试工况,通过人体主要部位皮肤温度等生理参数和室内环境参数的测试以及人体热感觉和空调关闭意向的问卷调查,研究分析空调环境中人体处于静坐状态时的生理热反应及其与空调关闭行为的相互关系。本文工作对间歇空调情况下人体热适应研究的深入开展具有参考价值,并为空调关闭行为

机制的研究提供可靠的数据支持.

1 研究对象和研究方法

1.1 研究对象

本实验共招募 11 名身体状况良好的北京某高校大学生为受试者,其中男生 8 名,女生 3 名.男性和女性受试者年龄、身高、体重以及北京居住时间的基本信息如表 1 所示.测试期间,受试者均着短袖衣、短裤(短裙)和穿塑料拖鞋,服装热阻约为 0.39 clo.

表 1 受试者基本信息
Tab.1 Participants' demographic information

项目	参数	平均值	标准方差	最大值	最小值
男	年龄/a	23.3	1.4	26	22
	身高/cm	174.6	3.5	178	168
	体重/kg	66.5	3.9	75	63
	北京居住时间/a	2.4	1.8	5.0	1.0
项目	参数	平均值	标准方差	最大值	最小值
女	年龄/a	24	0	24	24
	身高/cm	160.7	1.2	162	160
	体重/kg	48.0	2.6	51	45
	北京居住时间/a	2.0	1.7	4.0	1.0

1.2 研究方法

本研究采用现场测试和问卷调查的方法,现场测试照片如图 1 所示,涉及实验过程、测试环境、测试参数、问卷调查及测试仪器等的具体信息如下.



图 1 现场测试照
Fig.1 Photo of field survey

1.2.1 实验过程

现场测试于 2015 年夏季在北京某高校办公楼二层南向的某办公房间开展,房间外窗带百叶遮阳,空调末端为带三速开关的风机盘管,冷源为风冷型涡旋式冷水机组.测试准备期内控制空调运行时间及风量大小来初步调整测试期的室温和湿度,使其尽量与办公建筑的低温环境相一致,之后开始测试.

在每一个完整的测试过程中,受试者先由其本人办公室或宿舍来到测试房间的走廊空间,填写个体基本信息,佩戴皮肤温度传感器和换上拖鞋;再进入到空调测试房间处于静坐状态,进行单独测试,期间,受试者在书桌边可以看书、写字、上网等,测试人员每隔 5 min 对受试者热感觉进行问卷调查.当受试者对空调环境表示刚好不可接受而产生关闭空调动作时,测试结束,受试者离开测试房间.

受试者进入测试房间前,在室外和走廊空间停留 10 min 左右,这与实际生活中人体从室外进入空调房间或关闭空调后又重新开启空调所产生的热经历基本一致.因此,本文的研究测试体现出夏季空调实际的间歇运行过程.

本研究对每位受试者分别在 2015 年暑期的不同天内进行了 1~3 次的完整测试,最后共得到 20 组有效样本数据.

1.2.2 测试环境

各测试工况下室内空气的平均温度、平均湿度及其波动幅度如表 2 所示,测试期的室内风速均不超过 0.15 m/s,平均辐射温度近似认为等于室内空气温度.本研究测试的室内温度、湿度基本保持在 22~28 °C 和 40%~60% 的范围内,室温和相对湿度的波动幅度分别不超过 1.0 °C 和 6%,这与人体对夏季室内空调环境的热舒适需求基本一致^[13].

表 2 测试工况环境参数

Tab.2 Indoor environmental conditions for all the 20 tests

测试编号	平均空气温度/(°C)	空气温度波幅/(°C)	平均相对湿度/%	空气湿度波幅/%	测试编号	平均空气温度/(°C)	空气温度波幅/(°C)	平均相对湿度/%	空气湿度波幅/%
1	23.8	±0.2	51.9	±3.3	11	23.7	±0.1	48.6	±0.2
2	24.4	±0.8	51.0	±2.1	12	22.3	±0.4	58.5	±6.1
3	22.3	±0.2	55.0	±1.2	13	23.5	±1.0	51.5	±4.0
4	23.0	±0.8	50.0	±1.3	14	25.9	±0.4	51.1	±1.2
5	22.0	±0.2	51.0	±2.4	15	25.8	±1.2	44.5	±5.8
6	25.3	±0.2	38.0	±0.6	16	22.6	±0.5	56.0	±1.8
7	27.0	±0.3	43.7	±0.7	17	23.7	±0.3	52.9	±1.1
8	26.0	±0.1	51.5	±3.1	18	24.0	±0.2	56.0	±4.0
9	23.4	±0.5	52.0	±1.9	19	22.0	±0.1	58.0	±2.9
10	25.0	±1.0	47.8	±1.2	20	22.6	±0.2	51.6	±0.5

1.2.3 环境及生理测试参数

采用温湿度记录仪每隔 1 min 连续跟踪和记录室内温度和湿度;采用万向风速仪在气流稳定的情况下记录风速.考虑受试者看书、写字和上网的书桌高度为 70 cm,故将环境参数测点布置于受试者附近、并且距地面 75 cm 的高度处.环境测试数据没有受到室内灯光、计算机等热、湿源的影响.

大量研究表明人体皮肤温度与热舒适紧密联系^[15-16].由此,本研究采用皮肤温度测试仪“iButton”,皮肤温度测试仪的读数间隔为 1 min.皮肤温度测点的选择决定了对人体生理热反应描述的合理状况.相关研究表明,测点越多越能反映皮肤温度的分布状况^[17],但测点增加会相应加大测量的复杂性和减少受试者的配合度.文献^[18]的研究表明左颈、左胸、左手背、左前臂、左脚底和右大腿 6 个部位的皮肤温度能较好地反映人体体温分布状况.基于此,本研究选择左颈、左胸、左手背、左前臂、左脚底和右大腿 6 个部位作为人体皮肤温度的测点.测试仪器的详细信息如表 3 所示.

表 3 测试仪器信息

Tab.3 Basic information about test instruments

测试参数	精度	测试仪器
空气温度	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	Testo 175-H2
相对湿度	$\pm 5\%$	Testo 175-H2
风速	$\pm 0.05\text{ m/s}$	Testo-435-2
皮肤温度	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	DS1922L

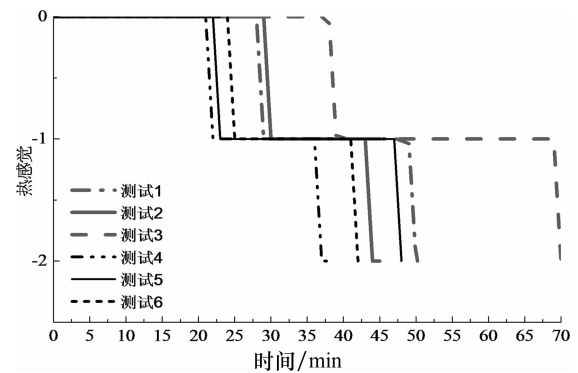
1.2.4 问卷调查

问卷调查的内容除人体身高、体重、年龄以及在北京居住时间以外,还包括人体对室内环境的热感觉投票及热可接受度.热感觉投票采用 ASHRAE 推荐的七级分度标尺,即:冷(-3),凉(-2),稍凉(-1),中性(0),稍暖(+1),暖(+2),热(+3);热可接受度投票采用两级分度断裂标尺,即:明显不可接受(-1),刚好不可接受(-0),刚好可接受(0),明显可接受(+1).

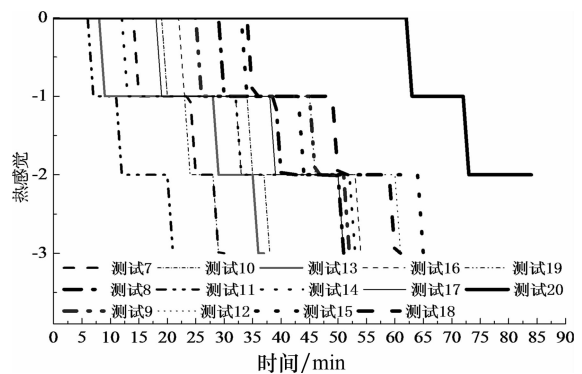
2 人体热感觉变化与空调关闭

对于 20 组测试,首先研究分析受试者热感觉投票随时间的变化,如图 2 所示.可看出从外界进入到空调环境后,受试者对室内环境的热感觉投票呈现“阶梯降”的变化趋势,也即从热中性开始,在保持一段时间后,逐步降到稍凉(-1)、凉(-2)或冷(-3).图 2(a)和(b)同时反映出了一个重要现象,就是测试结束也即受试者产生关闭空调动作时刻的人

体热感觉投票出现了两类不同的情况,分别定为 I 类和 II 类. I 类测试结束时刻的人体热感觉投票为 -2,包含表 2 中编号 1~6 的 6 组测试; II 类结束时刻的人体热感觉投票为 -3,包含表 2 中编号 7~20 的 14 组测试.两类情况相比较, I 类测试中受试者



(a) I类样本数据



(b) II类样本数据

图 2 受试者热感觉投票随时间的变化

Fig.2 Variations of human thermal sensation votes (a) samples in I type (b) samples in II type

产生空调关闭动作时刻的热感觉投票值要低于 II 类的情况.对此,本研究将测试结束也即空调关闭动作产生时刻的热感觉投票定义为空调环境可接受热感觉下限.此外,对于这两类测试,受试者在其热感觉投票达到各自下限(-2 或 -3)不到 2 min 的时间内就会产生空调关闭的动作.于是,以下对 I 类和 II 类测试中涉及受试者热感觉投票分别为 -2, -3 的生理热反应不作具体分析.

此外,不同于一些国内外学者^[5,19-20]的研究结论,本研究中受试者在从温度相对较高的走廊过渡到温度相对较低的空调环境时未出现冷感超越现象.分析文献^[5,19-20]的试验工况,发现受试者通常被要求在温度分别为 35 $^{\circ}\text{C}$, 34 $^{\circ}\text{C}$ 和 32 $^{\circ}\text{C}$ 的高温气候室停留超过 30 min 以适应热气候室的环境,之后再进入到温度分别为 25 $^{\circ}\text{C}$, 22 $^{\circ}\text{C}$ 和 24 $^{\circ}\text{C}$ 的低温气候室,冷热气候室温差达 8~12 $^{\circ}\text{C}$.本研究

中,虽然室外和走廊的温度相对较高,但受试者在室外和走廊停留的时间只有 10 min 左右,还尚未完全适应走廊的热环境.另一方面,本研究中走廊处于建筑的背阴面且自然通风良好,受试者热感未受到太阳辐射的影响.以上两个原因导致本研究的受试者在进入到空调环境后未出现冷超越的现象.

3 人体皮肤温度变化与热感觉

所谓“热感觉”是指人体通过位于自己皮肤表面下的神经末梢的温度,而做出的对周围环境是“冷”还是“热”的主观描述^[21],因此热感觉最终由人体皮肤温度的状况所决定.对此,选择某一组数据为样本,分析进入空调环境后人体各部位皮肤温度的变化,如图 3 所示.结果反映出局部皮肤温度的变化状况,受试者左脚底皮肤温度随时间持续降低波动较大;左前臂皮肤温度在测试前期随时间变化较大,之后基本保持平稳;相比较,右大腿、左胸、左颈和左手背处的皮肤温度波动不大.

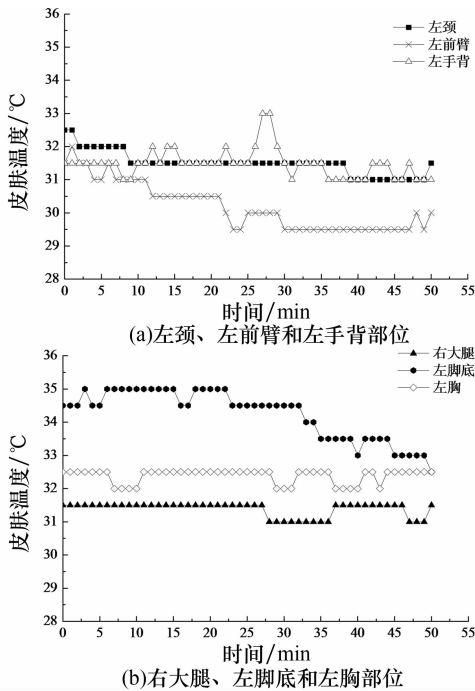


图 3 受试者局部皮肤温度随时间的变化
Fig.3 Variations of local skin temperatures for one occupant

考虑各组测试中受试者热经历的随机性和空调环境的不可控性,再鉴于人体热感觉投票随时间的变化,本文从统计学角度研究分析空调环境中受试者皮肤温度与其热感觉投票之间的相互关系.分别对于前述空调环境可接受热感觉下限不同的两类测试,使用 T 统计量分别计算 6 个部位皮肤温度

总体均值的 95% 置信区间,进而采用统计学检验方法考察受试者 6 个部位皮肤温度在相邻热感觉投票间的统计差异性(显著性水平 $\alpha = 0.05$)^[22],具体如图 4 所示.

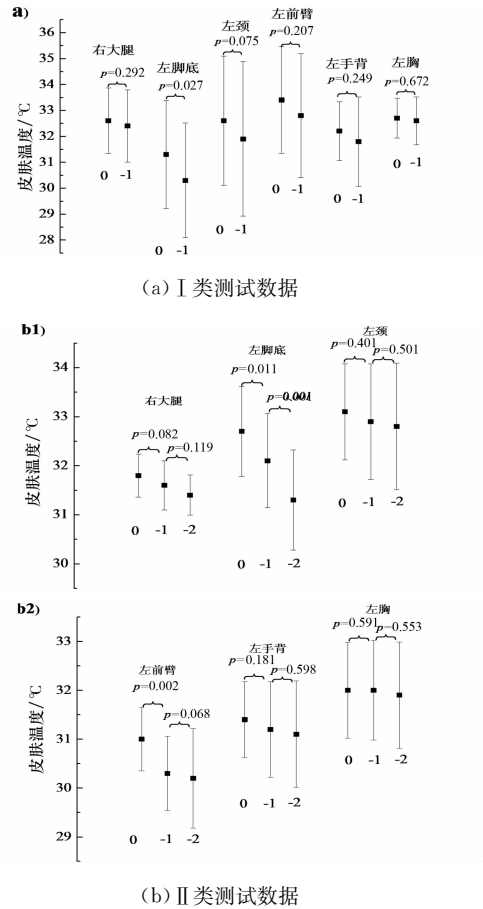


图 4 受试者局部皮肤温度在相邻热感觉间的统计差异性

Fig.4 Statistical differences of skin temperatures between TSVs

可以看出,对空调环境可接受热感觉下限较低的 I 类测试,热感觉投票为 -1 时脚底平均皮肤温度(30.3 °C, 95%CI: ±2.08)显著低于($P = 0.027 < 0.05$)热感觉投票为 0 时的脚底皮肤温度(31.3 °C, 95%CI: ±2.21);而对于大腿、颈部、前臂、手背和胸部的 5 个部位,在热感觉投票为 0 和 -1 时的皮肤温度却不存在统计上的显著差异.对于空调环境可接受热感觉下限相对较高的 II 类情况,统计结果同样反映出不同热感觉投票(0, -1, -2)下脚底皮肤温度的显著差异,热感觉投票为 -1 时的脚底皮肤温度(32.1 °C, 95%CI: ±0.96)显著低于($P = 0.011 < 0.05$)热感觉投票为 0 时的脚底皮肤温度(32.7 °C, 95%CI: ±0.92),但却显著高于($P = 0.001 < 0.05$)热感觉投票为 -2 时的脚底皮肤温度(31.3 °C, 95%CI: ±1.02).同样,对于右大腿、左颈、左手背和

左胸4个部位,其皮肤温度在不同热感觉投票下仍不存在统计上的显著差异.与I类情况略有不同的是,II类情况下前臂在热感觉投票为-1时的皮肤温度($30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 0.76$)显著低于($P=0.002<0.05$)热感觉投票为0时的皮肤温度($31.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 0.65$),但在热感觉投票为-1和-2情况下的皮肤温度差异并不十分显著,该统计结果与图3测试工况中左前臂皮肤温度的变化特性相一致.

由以上分析可知,在受试者进入空调环境至对当前空调环境刚好不可接受而产生关闭空调动作的时间内,脚底皮肤温度变化明显,并对空调环境中人体热感觉的变化产生重要影响,而颈部、胸部、手背、大腿和前臂处皮肤温度在空调环境中则不存在统计意义上的明显变化.

分析对比本文的测试研究和国内外的相关研究,可发现各项研究结果之间有所不同.文献[8]的研究表明在环境温度由 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐降低到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中,手腕皮肤温度是整体热感觉的一个主要预测指标;文献[23]的研究则发现在暖、中性以及凉的环境中,手指皮肤温度都呈现显著性变化.进一步分析对比各项研究的测试工况,发现不同研究中受试者的着装存在显著差异,文献[8]中20名受试者身着长袖、长裤、袜子和皮鞋,文献[23]的研究则要求17名受试者身着统一的长袖连衣裤和袜子,这两类服装在热阻上与欧美国家的办公正装基本一致.而本研究受试者的着装为短衣、短裤(短裙)和塑料拖鞋,与中国人居家和休闲办公环境的服装基本相符,这使得除胸部外,其他各个皮肤测点几乎完全暴露于环境中,相应产生出与文献[8,23]不同的研究结果.在受试者着装基本相同的条件下,文献[14]和[18]的研究也指出空调环境中人体足背和脚底皮肤温度的显著变化,并且文献[18]还基于“寒从脚起”的基本生理现象对研究结果加以分析解释.

因此,人体着装决定了人体不同部位皮肤温度在空调环境中的变化状况及对人体热感觉的影响状况,本研究关于人体脚底皮肤温度对热感觉影响敏感性的结论建立在人体四肢部位基本暴露于外界环境的基础上.

4 人体皮肤温度变化与空调关闭

人体对室内环境的主观热评价影响空调开启和关闭动作的发生,而人体热感觉最终由人体的生理状况所决定.前述的研究分析已指出脚底皮肤温

度决定着人体对室内空调环境的主观热评价,而其他部位的皮肤温度则在空调环境中不存在统计上的明显变化.由此,针对本研究中空调环境可接受热感觉下限不同的I类和II类测试,研究分析(TSV: $0\sim 0$, $-1\sim -1$, $-1\sim -2$)这3组热感觉投票配对的人体脚底皮肤温度在以上两类测试中的统计差异性^[22],具体结果如图5所示.

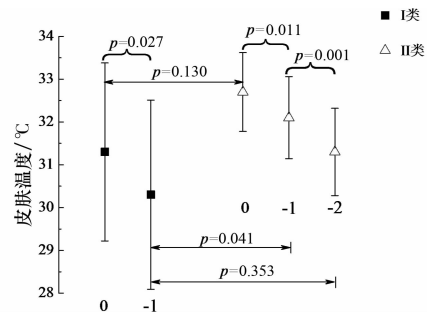


图5 受试者脚底皮肤温度在不同空调环境可接受下限之间的统计差异性

Fig.5 Statistical differences of foot skin temperatures between different thermal acceptance levels

由图5可看出,脚底皮肤温度在空调环境可接受热感觉下限不同的I类和II类测试中的差异状况.主要表现为:1)对应于测试初期热感觉投票均为0的情况,I类测试中受试者的脚底皮肤温度($31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 2.08$)要低于II类的结果($32.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 0.92$),但两者差异的显著性不够明显($P=0.130>\alpha=0.05$);2)随着受试者在空调环境停留时间的增加,当热感觉投票均为-1时,I类测试中受试者的脚底皮肤温度($30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 2.21$)显著低于($P=0.041<0.05$)II类测试的结果($32.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 0.96$);3)II类测试中受试者在空调环境停留时间继续增加而当热感觉投票为-2后,受试者脚底皮肤温度($31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 1.02$)继续降低,与I类情况中受试者热感觉为-1时的脚底皮肤温度($30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $95\%\text{CI}:\pm 2.21$)已没有显著性差异($P=0.353>\alpha=0.05$).

本研究的统计结果反映出脚底皮肤温度对空调环境热不可接受度影响的决定性.尽管I类和II类测试中受试者对空调环境可接受热感觉的下限存在差异,但当这两类测试中受试者的脚底皮肤温度基本一致时,受试者会对空调关闭产生相同的需求.也即,空调关闭行为的产生本质上取决于人体脚底皮肤温度的大小,而不应由皮肤温度影响作用下的中间变量——人体热感觉来决定.

5 脚底皮肤温度与环境状况

分析对比空调环境可接受热感觉下限不同两类测试中的室内环境状况,可发现 I 类测试中的室内空气平均温度(23.5 °C)要低于 II 类测试中的对应温度(24.1 °C).从人体维持体温恒定而向外界散热的角度,该低温环境将加大皮肤的降温速率,相应使得人体皮肤温度能较快地达到与产生空调关闭动作相对应的状态,最后导致 I 类测试中人体对该空调环境热可接受度和在空调环境停留时间的降低.又有统计检验的结果表明,在 5% 的显著性水平下, I 类与 II 类测试中受试者热感觉投票为 0 和 -1 的持续时间均没有显著性差异($P=0.444 > \alpha=0.05$, $P=0.091 > \alpha=0.05$),再根据 I 类与 II 类测试初始和结束时刻受试者脚底皮肤温度基本一致的状况,可判定受试者在 I 类测试中脚底皮肤温度的降低速率大于 II 类的测试.该统计结果验证了上述有关低温环境中皮肤降温速率大的设想.

因此,尽管受试者进入测试房间之前的热经历存在差异,统计分析的结果仍反映出受试者当前所处空调环境状况对脚底皮肤温度的重要影响.

进一步的基于个体样本,研究说明环境状况对脚底皮肤温度的影响.分析 20 组的测试数据,发现同一受试者在 2 组或 3 组测试中存在空调环境可接受热感觉下限不一致的现象.以某受试者 A 为例,图 6 表示出该受试者在两组测试(A1, A2)初始时刻和结束时刻的脚底皮肤温度、测试过程中人体热感觉及室内空气温度和湿度的变化.

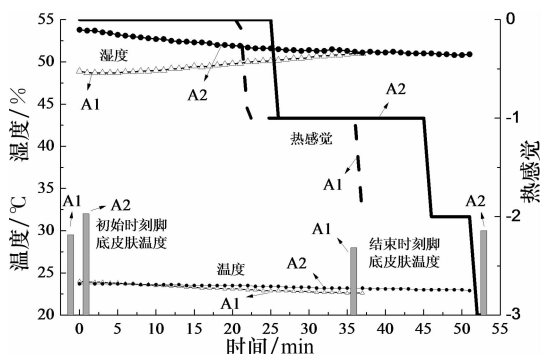


图6 不同测试中初始和结束时刻人体脚底温度、空调环境可接受热感觉下限及空气温湿度对比
Fig.6 Foot skin temperature, thermal acceptance level and indoor temperature and humidity for two measurements

分析发现 A1 组测试过程的温湿度环境(23 °C, 50%)与 A2 组测试过程的温湿度环境(23.4 °C,

52%)基本一致,但受试者在 A1, A2 两组测试中的空调环境可接受热感觉下限分别为 -2 和 -3,测试持续的时间分别为 38 min 和 54 min.两组测试中受试者初始时刻的脚底皮肤温度分别为 29.5 °C 和 32 °C,相差超过 2 °C;结束时刻的脚底皮肤温度分别为 28 °C 和 30 °C,相差 2 °C.测试结果表明,由于测试初始时刻脚底皮肤温度的差异,相同测试环境作用下 A1 组测试中受试者的脚底皮肤温度总要低于 A2 组的结果,相应使得脚底皮肤温度能较快地达到与产生空调关闭动作相对应的状态,从而显示出对空调环境较低的热可接受度.这反映出测试初始时刻脚底皮肤温度的影响,又测试初始时刻受试者皮肤温度的差异体现了测试之前受试者热环境经历的不同^[24].因此,人体热环境经历也是影响脚底皮肤温度的重要因素.

综上所述,由于人体与外界的热量交换,人体热环境经历和当前所处测试环境、也即人体的环境暴露状况是最终影响人体脚底皮肤温度的重要因素.这样,相同个体在不同的环境暴露状况下(人体热环境经历和测试空调环境),会对空调环境表现出不同的热可接受度.人体对低温空调环境的热可接受度相对要低,关闭空调的动作也就越容易发生.

6 结论

本文以若干在校大学生为研究对象,开展实际空调环境中人体热反应及其影响空调关闭的研究.并且,不同于人工气候室精确控制的情况,本研究建立在人体进入空调环境之前热经历随机以及空调环境变化的工况下,作为夏季空调间歇运行实际情况的体现,由此研究分析空调环境中处于静坐人体的生理热反应及其与空调关闭行为相互关系的共同特性.针对本文的实验工况和研究对象,具体结论如下:

1) 从非空调环境进入到空调环境后,人体对室内环境的主观评价在保持一段时间后会呈现“冷感”的加深,也即热感觉投票从热中性开始,之后以“阶梯降”的变化趋势,逐步降到稍凉(-1)、凉(-2)或冷(-3).

2) 在除胸部外的其他皮肤测点几乎暴露于环境的条件下,空调环境中人体脚底皮肤温度变化明显,并且该生理参数对人体在空调环境中的热感觉变化产生重要影响,而颈部、胸部、手背、大腿和前臂处皮肤温度在夏季空调环境中则不存在统计意

义上的明显变化。

3)在空调关闭动作产生的时刻,人体对空调环境的热感觉投票并非完全一致,但从统计角度分析,人体脚底皮肤温度基本降到某个相同的状态。因此,导致空调关闭动作产生的关键因素仍是脚底皮肤温度。

4)从人体维持体温恒定而向外界散热的角度,人体热环境经历和测试环境、也即人体的环境暴露状况是最终影响人体脚底皮肤温度的重要因素。这样,相同个体在不同的环境暴露状况下,会对空调环境表现出不同的热可接受度。人体对低温空调环境的热可接受度相对要低,关闭空调的动作也就越容易发生。

5)本研究从定性角度揭示了空调环境中人体生理热反应特性及其与空调关闭行为之间的相互关系。但存在样本数量不足和皮肤温度自记仪精度低的问题,使得测试数据在反映人体生理状况时存在偏差。尽管如此,作为尝试性的工作,本文研究在人体暴露环境、生理状况、人体主观热评价以及空调行为4个点之间建立起一条有机的逻辑关系链,并为空调关闭行为机制的研究提供一种新的分析思路。

参考文献

- [1] 赵荣义.关于“热舒适”的讨论[J].暖通空调,2000,30(3):25-26.
ZHAO Rongyi. Discussion on thermal comfort [J].HV&AC, 2000,30(3):25-26.(In Chinese).
- [2] 陈金华,赵福滔,李文强,等.重庆市中低海拔村镇旅游区住宅热湿环境实测与热舒适研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(7):128-134.
CHEN Jinhua,ZHAO Futao,LI Wenqiang, et al.Field study of thermal and humidity environment and thermal comfort study of residences in middle and low altitude rural tourism area of Chongqing [J].Journal of Hunan University:Natural Sciences, 2015,42(7):128-134.(In Chinese)
- [3] 韩杰,张国强,周晋.夏热冬冷地区村镇住宅热环境与热舒适研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(6):13-17.
HAN Jie,ZHANG Guoqiang,ZHOU Jin.Research on the rural residential thermal environment and thermal comfort in hot summer and cold winter climate zone [J].Journal of Hunan University:Natural Sciences,2009,36(6):13-17.(In Chinese)
- [4] DE DEAR R,RING J W,FANGER P O.Thermal sensations resulting from sudden ambient temperature changes [J].Indoor Air, 1993,3(3):181-192.
- [5] NAGANO K,TAKAKI A,HIRAKAWA M, et al.Effects of ambient temperature steps on thermal comfort requirement [J].International Journal of Biometeorology, 2005, 50(1):33-39.
- [6] 张军.湿热地区瞬变热环境下人体热反应实验与预测[D].广州:华南理工大学建筑学院,2011:18-26.
ZHANG Jun.Human responses to transients thermal environments in hot-humid area of China [D].Guangzhou:School of Architecture,South China University of Technology,2011:18-26.(In Chinese)
- [7] ZHANG Y F,ZHANG J,CHEN H M, et al.Effects of step changes of temperature and humidity on human responses of people in hot-humid area of China [J].Building and Environment,2014,80(10):174-183.
- [8] CHOI J H,LOFTNESS V.Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations [J].Building and Environment,2012,58(12):258-269.
- [9] YAO Y,LIAN Z W,LIU W W, et al.Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures [J].Physiology & Behavior, 2008, 93(1/2):310-321.
- [10] CHUN C,TAMURA A.Thermal environment and human responses in underground shopping malls vs department stores in Japan [J].Building and Environment, 1998, 33(2/3):151-158.
- [11] CHUN C,TAMURA A.Thermal comfort in urban transitional spaces [J].Building and Environment,2005,40(5):633-639.
- [12] 杨志红,韩杰,张国强.不同过渡空间转换过程中热感觉变化特性研究[J].建筑科学,2015,31(2):15-22.
YANG Zhihong,HAN Jie,ZHANG Guoqiang.Field study on thermal sensation variation characteristics in the process of different transition space conversion [J].Building Science,2015,31(2):15-22.(In Chinese)
- [13] ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy [S].Atlanta:American Society of Heating,Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,2004:4-6.
- [14] SONG G S,LIM J H,AHN T K.Air conditioner operation behavior based on students' skin temperature in a classroom [J].Applied Ergonomics,2012,43(1):211-216.
- [15] BULCAO C F,FRANK S M,RAJA S N, et al. Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans [J].Journal of Thermal Biology,2000,25(1/2):147-150.
- [16] WANG D,ZHANG H,ARENS E, et al. Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort [J].Building and Environment,2007,42(12):3933-3943.
- [17] CHOI J K,MIKI K,SAGAWA S.Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography [J].International Journal of Biometeorology,1997,41(2):68-75.
- [18] 刘蔚巍.人体热舒适客观评价指标研究[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2007:64-65.
LIU Weiwei.Objective evaluation indices of human thermal comfort [D].Shanghai:School of Mechanical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,2007:64-65.(In Chinese)
- [19] CHEN C P,WANG R L,CHANG S Y, et al.Effects of temperature steps on human skin physiology and thermal sensation response [J].Building and Environment,2011,46(11):2387-2397.
- [20] ZHAO R Y.Investigation of transient thermal environments [J].Building and Environment,2007,42(12):3926-3932.
- [21] 朱颖心.建筑环境学[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2011:103-107.
ZHU Yingxin.Built environment[M].3rd ed.Beijing:China Architecture & Building Press,2011:103-107.(In Chinese)
- [22] 贾俊平.统计学概论[M].北京:中国人民大学出版社,2011:188-190.
JIA Junping.Introduction to statistics [M].Beijing:China Renmin University Press,2011:188-190.(In Chinese)
- [23] WANG D,ZHANG H,ARENS E, et al. Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort [J].Building and Environment,2007,42(12):3933-3943.
- [24] MOSHOOD O F.Initial study on the impact of thermal history on building occupants' thermal assessments in actual air-conditioned office buildings [J].Building and Environment,2014,80(10):36-47.