

冷辐射不均匀环境中人体热响应的心理学实验

王昭俊, 何亚男, 侯娟, 绳晓会, 范洪波

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为了研究严寒地区外窗和外墙冷辐射对人体热舒适的影响, 本文对身着冬季服装的大学生受试者进行了有冷辐射的稍凉工况、中性工况和无冷辐射的均匀工况的人体热响应心理学实验研究. 在测试环境参数和生理学参数的同时, 对受试者局部和整体热感觉以及热舒适进行问卷调查. 结果表明: 在有冷辐射的稍凉工况和中性工况中, 头部和背部的热感觉无显著性差异, 手部、小腿、手臂的热感觉和整体热感觉均有显著性差异; 有冷辐射的中性工况的整体热感觉低于无冷辐射的均匀工况的, 尽管前者室内平均温度高. 当人体距外墙和外窗较近时, 外墙和外窗冷辐射导致头脚温差增大, 会加剧人体腿部的冷感觉, 进而影响整体热感觉和热舒适. 在冷辐射不均匀环境中, 整体热感觉接近于人体较冷部位的热感觉, 整体热舒适接近于人体最不舒适部位, 即遵循“抱怨”模式. 在均匀环境和冷辐射不均匀环境中, 整体热感觉与整体热舒适皆线性相关. 应提高人体下部如腿部的空气温度, 以提高腿部的热感觉, 从而提高整体热感觉和热舒适.

关键词: 心理响应; 热感觉; 热舒适; 冷辐射不均匀环境; 实验研究

中图分类号: TU833.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)06-0059-06

Psychological study on thermal responses in asymmetrical cold radiation environment

WANG Zhaojun, HE Yanan, HOU Juan, SHENG Xiaohui, FAN Hongbo

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: The thermal response psychology experiments were conducted for college students wearing winter clothes in three experimental conditions, overall slightly cool, overall neutral asymmetrical cold radiation and overall neutral uniform. The environmental and physiological parameters were recorded. Meanwhile, the subjects were asked to fill in the questionnaires on five local and overall thermal sensation and thermal comfort. The results show that, in the slightly cool and neutral asymmetrical cold radiation conditions, the head and back thermal sensation have no significant difference; while the hand, arm, lower leg and overall thermal sensation are different. In the neutral non-uniform condition, overall thermal sensation votes were lower than those in the uniform condition, although the mean indoor temperature of the former condition was higher. The temperature difference between head and foot increased for the subjects near the exterior window and wall because of cold radiation, which led to the people felt cold at their legs and the overall thermal sensation and comfort decreased. In the slightly cool and neutral conditions with cold radiation, overall thermal sensation followed the thermal sensation for cooler parts, and overall thermal comfort followed the most uncomfortable parts, following the “complaint” modes. In the uniform condition and asymmetrical cold radiation environments, overall thermal sensation votes and thermal comfort votes have good linear correlation. The air temperature for the lower body such as lower legs should be increased, which led to leg local thermal sensation improved, and overall thermal sensation and thermal comfort would be improved.

Key words: psychological response; thermal sensation; thermal comfort; asymmetrical cold radiation environment; chamber study

收稿日期: 2012-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金(51278142); 黑龙江省自然科学基金(E201039); 教育部留学回国人员科研启动基金.

作者简介: 王昭俊(1965—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王昭俊, wangzhaojun@hit.edu.cn.

严寒地区冬季漫长且室外气温低, 外窗和外墙表面温度低. 现场调查结果显示: 靠窗组受试者的局部冷感觉明显高于对照组受试者^[1]. 由于冷

辐射环境的不均匀性,人体各部位的热感觉和热舒适不同^[2];而整体热感觉和热舒适受局部热感觉和热舒适影响。

20世纪60年代,美国的 Schlegel 等^[3]对冷和热的顶棚、侧墙对人体热舒适的影响进行了一系列研究,考察了当受试者整体热感觉为中性时手、脚、头等部位的热感觉对人体整体热舒适的影响。

丹麦的 Olesen^[4]和 Fanger^[5]对地板引起的不对称辐射温度进行了实验研究。日本的 Sakoi 等^[6]研究了前后、左右、上下不对称辐射环境中人体热舒适、皮肤温度等。McNall 等^[7]在实验研究中发现,在不对称辐射环境中,整体热感觉中性的受试者反映整体热舒适的比例显著低于无不对称辐射环境的比例。文献[8]指出:不同的全身热状态和局部热感觉的组合对全身热反应有不同的影响。文献[9]认为受试者的整体热感觉和热舒适受局部最不舒适部位的影响,即遵循“抱怨”模式。上述研究中受试者都穿夏季服装,服装热阻较小,与我国冬季人们的着装习惯差别较大。

本研究将通过对采暖初期有外窗和外墙冷辐射的偏冷环境和采暖中期有外窗和外墙冷辐射的热中性环境以及均匀环境中受试者心理热响应的实验研究,分析在不同热环境中人体不同部位间的热感觉的差异性;在由外窗和外墙冷辐射引起的不均匀辐射环境中人体热感觉与均匀热环境中人体热感觉的差异性;冷辐射环境中人体局部热感觉和热舒适对整体热感觉和热舒适的影响以及整体热感觉和热舒适之间的相关性。

1 实验方法

实验在哈尔滨工业大学市政环境工程学院的人工气候室中完成。该人工气候室包括两个相邻房间,称为A室和B室。相邻房间的墙和窗可视为外墙和外窗。实验室B的温度可控制在 $-20 \sim -5^{\circ}\text{C}$,实验室A的温度可控制在 $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

本实验共设计了3个实验工况,即有冷辐射的稍凉工况与中性工况,和作对比研究的无冷辐射的均匀工况。3个工况下实验室A的平均空气温度分别为 19.22 和 20°C 。冷辐射工况下外窗的表面温度分别为 11°C 和 15.4°C 。

冷辐射不均匀环境实验于2011年至2012年的冬季进行,均匀环境实验于2012年春季进行。

参考文献[2-12],本实验随机选择男女大学生受试者各10名,其中18名受试者参加了稍凉工况实验,中性工况和均匀工况分别有20名和12名受试者参加。受试者在哈尔滨居住的时间都

已经超过2年,已基本适应了严寒地区的气候。每次实验两名受试者(1男1女)参加,受试者距外窗 1.0 m 。

实验期间受试者按照实验要求着冬季服装,服装热阻为 1.02 clo ,保持静坐,可使用电脑、阅读或交谈,但不允许交流实验相关内容。

人体心理热响应主观调查表包括:额头、后背、手臂、手和小腿的局部热感觉和热舒适;整体热感觉、热舒适等。其中局部热感觉和整体热感觉采用ASHRAE七点连续标度,局部热舒适和整体热舒适采用文献[9]的间断标度,以明确区分舒适和不舒适,见图1。

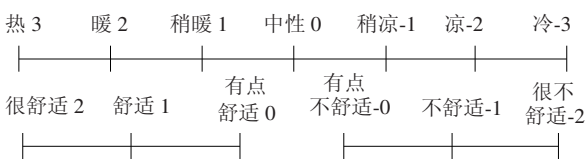


图1 热感觉和热舒适标度

在实验室的房间中心点选取测点1,在距地面分别为 0.1 、 0.6 和 1.1 m 三个高度上测试空气温度,在 0.6 m 处测试黑球辐射温度、相对湿度和风速。在受试者附近选取测点2,在距地面分别为 0.1 m 和 1.1 m 两个高度上测试空气温度。

实验历时 1.5 h ,其中前 30 min 为适应期,后 60 min 为实验期。实验期间受试者每隔 10 min 填写一次主观调查表。

在测试环境参数的同时,还测试了受试者的皮肤温度、心率、血压等生理学参数。受篇幅所限,本文仅介绍人体热响应的心理学的研究结果。

2 环境参数测试结果与分析

通过方差分析,实验期后 30 min 各点的空气温度是稳定的。统计实验后期 30 min 的空气温度、围护结构表面温度、平均辐射温度、相对湿度、风速等参数,见表1。表中: $t_{0.1\text{ m}}$ 为 0.1 m 处的空气温度, $t_{0.6\text{ m}}$ 为 0.6 m 处的空气温度, $t_{1.1\text{ m}}$ 为 1.1 m 处的空气温度, t_1 为测点1处的平均空气温度, t_2 为测点2处的平均空气温度。

由表1可知:测点2稍凉工况中 $t_{1.1\text{ m}}$ 与 $t_{0.1\text{ m}}$ 处温差,即头部和脚部温差为 5.1°C ;中性工况中头脚温差为 5.5°C ,都超过了ASHRAE要求的上限温度 3°C ^[13]。而均匀工况中的头脚温差仅为 0.9°C 。说明外墙和外窗冷辐射导致其附近的冷空气流下沉,增加了其附近的人体头部和脚部温差。

表 1 3 个实验工况的环境参数

实验工况	1 测点				2 测点			外窗表面	外墙表面	内墙表面	平均辐射	相对	风速 $v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	$t_{0.1 \text{ m}}/^\circ\text{C}$	$t_{0.6 \text{ m}}/^\circ\text{C}$	$t_{1.1 \text{ m}}/^\circ\text{C}$	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_{0.1 \text{ m}}/^\circ\text{C}$	$t_{1.1 \text{ m}}/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	温度 $t_{\text{win}}/^\circ\text{C}$	温度 $t_{\text{ow}}/^\circ\text{C}$	温度 $t_{\text{iw}}/^\circ\text{C}$	温度 $t_r/^\circ\text{C}$	湿度 $\phi/\%$	
稍凉工况	16.8 ± 0.6	19.1 ± 0.4	20.5 ± 0.3	18.8 ± 0.3	16.2 ± 0.4	21.3 ± 0.4	18.8 ± 0.3	11.0 ± 0.3	18.1 ± 0.3	20.6 ± 0.4	17.9 ± 0.2	21.7	0.10
中性工况	20.4 ± 0.4	21.5 ± 0.3	25.4 ± 0.3	22.4 ± 0.3	19.9 ± 0.3	25.4 ± 0.3	22.7 ± 0.3	15.4 ± 0.2	23.5 ± 0.2	24.5 ± 0.5	21.7 ± 0.1	22.4	0.12
均匀工况	19.0 ± 0.1	21.0 ± 0.2	21.2 ± 0.1	20.4 ± 0.1	20.2 ± 0.1	21.1 ± 0.1	20.7 ± 0.1	20.3 ± 0.2	20.8 ± 0.1	20.6 ± 0.1	20.0 ± 0.1	57.3	0.12

均匀工况的空气相对湿度大于稍凉工况与中性工况的,其原因是实验季节不同,春季相对湿度大于冬季的相对湿度。

空气流速在 3 个实验工况下变化不大,且均在热舒适范围内。

3 人体热响应规律的心理学实验结果与分析

人体对热环境的心理响应包括热感觉、热舒适、潮湿感、风速感等。由于相对湿度和空气流速都在热舒适范围内,对本文的研究结果影响不大,故下面仅分析热感觉和热舒适。

3.1 热感觉

由于空气温度在实验后期 30 min 处于较稳定的状态,因此对热感觉和热舒适投票取后 3 次投票的平均值进行对比分析。不同工况的局部热感觉和整体热感觉的平均投票见图 2。在稍凉工况中,除了头部的热感觉在“中性”以上,其余部位的热感觉投票均小于 0。整体热感觉接近于“稍凉”。在中性工况和均匀工况中,除头部以外,其他部位的热感觉以及全身的热感觉均接近于“中性”,头部的热感觉投票稍大于其他部位投票值。

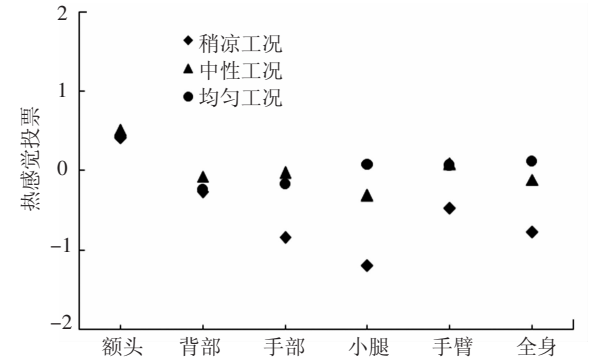


图 2 局部热感觉和整体热感觉投票

文献[9]对稳态均匀热中性环境的实验研究也表明,虽然整体热感觉为中性,但不同部位的热感觉是变化的。头部稍暖,背部、腿部和脚部稍凉。与本文研究结论一致。

与稍凉工况相比,中性工况中各部位的热感觉投票均有所升高,但升高的幅度各不相同。头部的热感觉变化最小,手部和小腿的热感觉变化最大。 t 检验结果表明:在显著性水平 $\alpha = 0.05(t_{0.05}(17) =$

$2.109\ 8)$ 的条件下,头部($t = 0.777\ 1$)和背部($t = 0.693\ 6$)的热感觉投票均无显著性差异;手部($t = 3.405\ 8$)、小腿($t = 3.208\ 3$)、手臂($t = 2.347\ 6$)和全身($t = 2.761\ 3$)的热感觉投票均具有显著性差异,手部和腿部差异性最明显。说明在冷辐射不均匀环境中,头部和背部热感觉对温度的变化不敏感,而手部和小腿是较敏感的部位。由于文献[9]的实验中受试者着衣量较少,故背部对温度变化较敏感;而本实验中受试者着冬季服装,服装热阻较大,故背部对温度变化不敏感。

与均匀工况相比,中性工况的小腿热感觉投票低于均匀工况的, t 检验结果表明:在显著性水平 $\alpha = 0.05(t_{0.05}(11) = 2.178\ 8)$ 的条件下,小腿的热感觉投票具有显著性差异($t = 2.189\ 8$)。中性工况下受试者小腿附近的空气温度比均匀工况的低 $0.3\ ^\circ\text{C}$ 。

中性工况的整体热感觉低于均匀工况的,但中性工况的人体附近平均温度(测点 2)和室内平均温度(测点 1)比均匀工况对应的温度分别高出 $2.0\ ^\circ\text{C}$ 和 $4.2\ ^\circ\text{C}$ 。为何室温高人体热感觉投票却偏低? 作者认为这主要是由于两种不同环境的温度梯度不同造成的。中性工况中头脚温差为 $5.5\ ^\circ\text{C}$,而均匀工况中的头脚温差仅为 $0.9\ ^\circ\text{C}$ 。说明当人体距外墙和外窗较近时(本文为 $1.0\ \text{m}$),外墙和外窗冷辐射导致人体头脚温差增大会加剧人体腿部的冷感觉,进而影响人体整体热感觉。

文献[7]也发现,在不对称辐射环境中,虽然受试者整体热感觉为中性,但整体热舒适的比例低于均匀环境的比例。说明不对称辐射会降低人体的热舒适性。因此,在严寒地区进行暖通空调系统设计时,应考虑冷辐射对人体热感觉的影响。

3.2 热舒适

不同工况下的局部热舒适和整体热舒适在实验期间最后 3 次的平均投票见图 3。由图 3 可见,在稍凉工况中,除头部的热舒适投票大于 0 以外,其他部位的热舒适投票均小于 0;整体热舒适投票也小于 0,介于“有点舒适”和“有点不舒适”之间。中性工况和均匀工况中,局部和整体热舒适均介于“有点舒适”和“舒适”之间。

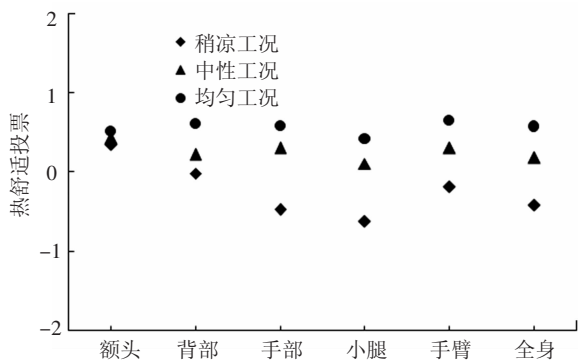


图3 局部热舒适和整体热舒适投票

与稍凉工况相比,中性工况的局部热舒适投票和整体热舒适投票都有所增大.通过成对 t 检验,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下,头部和背部的热舒适投票无显著性差异;而手部、小腿、手臂和全身的热舒适投票均有显著性差异.手部和小腿的差异性最大,与热感觉显著性差异检验的结果相似.

与中性工况相比,均匀工况中的局部热舒适投票和整体热舒适投票均高于中性工况.但中性工况中人员头部附近(测点2于1.1 m处)的空气温度高于均匀工况的,人员脚部附近0.1 m处的空气温度稍低于均匀工况的.说明外窗和外墙引起的冷辐射环境导致的较大的头脚温差会降低外窗和外墙附近人体的局部热舒适和整体热舒适.

4 讨论

4.1 局部热响应对整体热响应的影响

局部热响应包括局部热感觉与热舒适,整体热响应包括整体热感觉与热舒适.

文献[14]认为整体热舒适反应并不是身体所有部位局部热舒适反应的累加,而是遵循“抱怨”模式,即最不舒适的身体部位对整体热舒适的感知起决定性作用.如在均匀中性环境和稍凉环境中,腿部温度最低,脚部温度次之^[9],但脚部热感觉最低,腿部次之.因腿部的服装热阻值大于脚部的服装热阻值.作者认为是空气垂直温差导致脚部空气温度最低,且脚部血液循环差,故脚部热感觉最低.整体热感觉与腿部热感觉接近,整体热舒适与最不舒适部位的热舒适接近.

由图2可知,稍凉工况中,整体热感觉接近于手部的热感觉,而小腿是全身最冷的部位.中性工况中,整体热感觉均接近于手部和小腿的热感觉的平均值,而小腿是全身最冷的部位.均匀工况中,整体热感觉接近于小腿的热感觉,而背部是全身最冷的部位.可见,整体热感觉受各部位局部热

感觉的综合影响,但受较冷部位的影响权重较大,但不取决于最冷部位.

由于本实验中受试者着冬季服装,热阻较大(1.02 clo),受试者穿旅游鞋,因此脚部温度无法测定,不能进行比较分析.但总的结论与文献[9]的研究结果一致.

由图3可知,稍凉工况、中性工况和均匀工况中,整体热舒适均接近于人体最不舒适部位腿部和手部的热舒适.由此可见,本文研究中,整体热感觉和热舒适也遵循“抱怨”模式,即较冷部位影响整体热感觉的权重较大,最不舒适部位对整体热舒适的影响最显著.说明在冷辐射不均匀环境中,通过局部加热提高人体较冷部位的空气温度可改善局部热感觉,从而提高整体热感觉和热舒适.

4.2 热感觉与热舒适的关系

文献[15]的研究表明:均匀环境中整体热感觉与整体热舒适具有较强的线性相关关系,而非均匀环境中,整体热感觉与整体热舒适出现了分离的现象.下面讨论不同环境中热感觉与热舒适的关系.

4.2.1 均匀热环境

均匀环境中,受试者在试验期最后30 min的热舒适(y)与热感觉(x)投票的关系见图4.

其回归方程为

$$y = 0.744x + 0.113, R^2 = 0.911. \quad (1)$$

在均匀环境中,整体热感觉与整体热舒适存在较强的线性相关关系($R^2 = 0.911$).当热感觉为中性时,热舒适的投票为0.113,接近于“有点舒适”.这与文献[15]对均匀环境中人体热感觉与热舒适关系的研究结果一致.

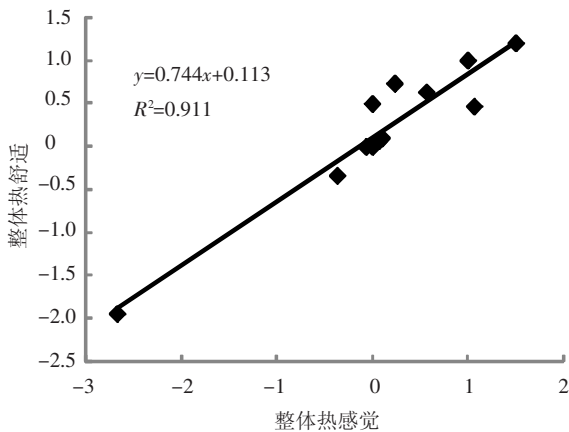


图4 均匀热环境中热舒适与热感觉的关系

文献[16]基于稳态均匀微气候室的实验研究结果,提出了预测人体热舒适的评价指标PMV-PPD.认为热感觉等同于热舒适,即认为

“中性”的热感觉就是热舒适. 人体的热负荷越大, 人体偏离热中性感觉越远, 就越感到热不舒适. 故可认为上述结论适用于稳态均匀的热环境.

文献[9]对稳态均匀热环境的实验研究结果也表明, 当受试者整体热感觉为中性时, 其整体热舒适投票值为“舒适”, 但无人投票为“很舒适”. 在热和冷的均匀热环境中, 人体都感到不舒适.

综上可认为稳态均匀的热环境中, 整体热感觉和整体热舒适具有较强的线性相关关系.

4.2.2 冷辐射不均匀热环境

在冷辐射环境(稍凉工况和中性工况)中, 热舒适与热感觉的关系见图5. 其回归方程为

$$y = 0.575x + 0.202, R^2 = 0.619. \quad (2)$$

在冷辐射环境中, 整体热感觉与热舒适存在较好的线性相关关系($R^2 = 0.619$).

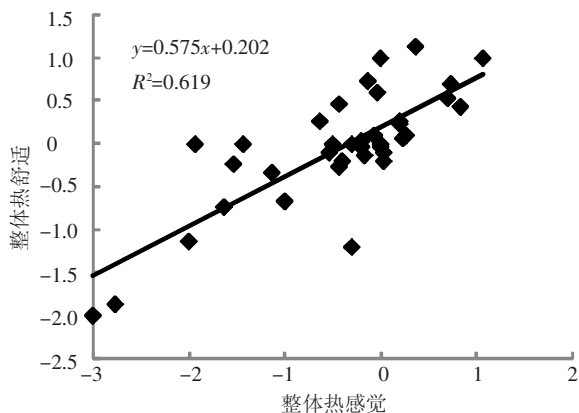


图5 冷辐射非均匀热环境中热舒适与热感觉的关系

文献[15]在研究偏热环境下送冷风时发现: 在稳态不均匀热环境中, 整体热感觉与整体热舒适不再有较好的相关关系, 出现了明显的分离. 局部送风热环境中由于风速的湍流作用更接近动态热环境.

文献[17]研究表明: 在瞬变环境中, 热感觉与热舒适是分离的. 认为当人体处于稳态均匀的热中性环境时, 并不感到最舒适. 瞬态热环境中存在热应力的突变, 人体会感到更舒适.

许多研究者认为, 热舒适只有在动态环境下存在^[18], 如当热应力突然除去时, 人会获得愉快的感觉. 与均匀稳态的中性环境相比, 人们在瞬态的不均匀环境中会获得更大的快感^[9]. 即变化的环境会使人感到更舒适, 如在自然通风偏暖的环境中, 一阵吹来的凉风会使人感到更加舒适.

本文研究结果表明: 在冷辐射不均匀环境中, 当整体热感觉提高时, 整体热舒适也提高了. 因为不均匀辐射热环境与局部送风或瞬态的热环境相

比更接近稳态的热环境.

5 结 论

1) 在具有冷辐射的稍凉工况和中性工况中, 距外窗1.0 m处人体头脚温差分别为5.1℃和5.5℃; 都超过了ASHRAE要求的上限温度3℃. 而均匀工况的头脚温差仅为0.9℃. 说明外墙和外窗冷辐射导致其附近的冷空气流下沉, 增加了其附近的人体头部和脚部温差.

2) 具有冷辐射的稍凉工况与中性工况相比, 人体的头部和背部的热感觉无显著性差异; 手部、小腿、手臂的热感觉和整体热感觉具有显著性差异.

3) 具有冷辐射的中性工况的整体热感觉低于无冷辐射的均匀工况的, 尽管中性工况的室内温度高, 但中性工况中头脚温差为5.5℃, 而均匀工况中的头脚温差仅为0.9℃. 说明当人体距外墙和外窗较近时(本文为1.0 m), 外墙和外窗冷辐射导致人体头脚温差增大, 会加剧人体腿部的冷感觉, 进而影响人体整体热感觉, 也会降低人体的局部热舒适和整体热舒适.

4) 在具有冷辐射的稍凉工况和中性工况中, 整体热感觉接近于人体较冷部位(手部和小腿)的热感觉, 整体热舒适接近于人体最不舒适部位(手部和小腿), 即遵循“抱怨”模式.

5) 在均匀环境和冷辐射不均匀环境中, 整体热感觉与整体热舒适有较好的线性相关关系. 应提高人体下部如腿部的空气温度, 提高腿部的热感觉, 从而提高人体整体热感觉和热舒适.

参考文献

- [1] 王昭俊, 李爱雪, 何亚男, 等. 哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 48-52.
- [2] WANG Zhaojun, HE Yanan, HOU Juan, et al. The effect of cold radiation on human thermal sensation and thermal comfort in Harbin winter [C]//Proceedings of the Second International Conference on Building Energy and Environment (COBEE). Boulder: University of Colorado at Boulder, 2012: 398-405.
- [3] SCHLEGEL J C, MCNALL P E. The effect of asymmetric radiation on the thermal and comfort sensations of sedentary subjects [J]. ASHRAE Transaction, 1968, 74(2): 144-153.
- [4] OLESEN B W. Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet [J]. ASHRAE Transaction, 1977, 83(2): 41-57.

- [5] FANGER P O, BANHIDI L, OLESEN B W, *et al.* Comfort limits for heated ceiling [J]. ASHRAE Transaction, 1980, 86(2): 141–156.
- [6] SAKOI T, TSUZUKI K, KATO S, *et al.* Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields [J]. Building and Environment, 2007, 42(12): 3984–3999.
- [7] MCNALL P E, BIDDISON R E. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields [J]. ASHRAE Transaction, 1970, 76(1): 123–136.
- [8] 张宇峰, 赵荣义. 局部热暴露对人体全身热反应的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35(2): 25–30.
- [9] ZHANG H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2003.
- [10] SCHELLEN L, LOOMANS M G L C, De WIT M H, *et al.* The influence of local effects on thermal sensation under non-uniform environmental conditions—Gender differences in thermophysiology, thermal comfort and productivity during convective and radiant cooling [J]. Physiology & Behavior, 2012, 107: 252–261.
- [11] TOCHIHARA Y, KUMAMOTO T, LEE J Y, *et al.* Age-related differences in cutaneous warm sensation thresholds of human males in thermoneutral and cool environments [J]. Journal of Thermal Biology, 2011, 36: 105–111.
- [12] YASUOKA A, KUBO H, TSUZUKI K, *et al.* Interindividual differences in thermal comfort and the responses to skin cooling in young women [J]. Journal of Thermal Biology, 2012, 37: 65–71.
- [13] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55–2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [S]. Atlanta: GA, 2010.
- [14] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort, Part I: uniform environmental conditions [J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31: 53–59.
- [15] 张宇峰, 孙淑凤, 赵荣义. 均匀与不均匀室内热环境的评价指标 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(12): 1949–1952.
- [16] FANGER P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [17] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort, Part II: Non-uniform environmental conditions [J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31: 60–66.
- [18] 赵荣义. 关于“热舒适”的讨论 [J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 25–26.

(编辑 赵丽莹)