

湿热环境下空气流动对人体热舒适的影响(1):不可控气流^{*}

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 翟永超[☆] 张宇峰 孟庆林
美国加州大学伯克利分校建筑环境中心 张 慧 帕苏特·威尔默 阿隆斯·爱德华

摘要 实验研究了温度 26, 28, 30 °C, 相对湿度 60%, 80% 工况下, 16 名中国受试者对吊扇不可控(即固定)气流的热反应。结果表明:吊扇气流可显著提高热湿环境下的人体舒适度, 受试者可接受的温湿度上限可达 30 °C, 80%, 偏好风速随温湿度上升而上升, 最大至 1.6 m/s, 超出了 ASHRAE 55 标准给出的不可控气流适用范围。

关键词 湿热环境 不可控气流 吊扇 热舒适 感知空气品质

Air movement and thermal comfort in hot-humid environments (1): Without occupant control

By Zhai Yongchao[★], Zhang Yufeng, Meng Qinglin,
Zhang Hui, Pasut Wilmer and Arens Edward

Abstract Experiments on the thermal responses of 16 subjects from China exposed to the environment with fixed air movement from ceiling fans at three levels of temperature (26, 28, 30 °C) and two levels of relative humidity(RH) (60% and 80%) by questionnaire. Results show that the air movement from fixed ceiling fan can markedly improve occupant comfort in hot-humid environment, and the thermal comfort can be maintained up to 30 °C and 80%, and the preferred air speed increases while air temperature and humid improves. The maximum preferred air speed is 1.6 m/s, much higher than the upper limit by ASHRAE Standard 55.

Keywords hot-humid environment, air movement without occupant control, ceiling fan, thermal comfort, perceived air quality

★ State Key Laboratory of Subtropical Building, South China University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

湿热地区主要分布在热带和亚热带气候区,其特征为夏季高温多雨,建筑降温需求高,空调能耗大。该地区人口众多,且增长迅速。可以预见,随着经济的发展和人口的增长,建筑能耗将越来越高^[1]。

空气流动(如自然通风和风扇调风)是湿热地区常用的夏季低能耗降温手段之一。当前国际热舒适标准强调在建筑中提供均匀的中性温湿度环境,并把空气流速限制在较低的范围之内,以减少不舒适的“吹风感”^[2]。这种调控方式限制了空气流动在湿热地区建筑设计中的应用,同时造成了大量的能源消耗。与标准规定的低风速形成鲜明对比的是,全

球范围内的大量现场调研表明,人们普遍希望更多的空气流动,而不是更少^[3-5]。这促使热舒适评价标准 ASHRAE 55^[6]修订了其关于空气流动的规定,去除了偏热环境中“吹风感”的部分,并提高了利用空气流动的风速上限及相应的舒适温湿度范围。用户对风速无控制时,风速上限为 0.8 m/s,有控制时为 1.2 m/s。标准的新规定让设计者在建筑设计过程中有更大的风速选择范围,鼓励了在建筑中使用低能耗的自然通风或混合通风设计。

①☆ 翟永超,男,1984 年 10 月生,博士,博士后
510641 广州华南理工大学亚热带建筑技术国家重点实验室
建筑节能研究中心
(020) 87110164
E-mail: songchaozhai@gmail.com
收稿日期:2013-10-28

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50978102),新世纪优秀人才支持计划和 California Air Resources Board 资助

然而ASHRAE标准的修订主要适用于中等湿度情况,在湿热环境下,人们舒适的温湿度和偏好的风速范围是否相同,是本研究的主要目标。

1 研究方法

1.1 受试者

受试者为在美国加州大学伯克利分校学习和工作的中国学生和教师,共16名(男女各8名)。参加实验期间要求身体健康、睡眠充足、个人卫生情况良好,在实验前不饮用咖啡或浓茶。受试者相关数据见表1。

表1 受试者基本信息

性别	人数	年龄/岁	身高/m	体重/kg
女	8	29.5±4.6 ¹⁾	1.63±0.05	54.4±6.6
男	8	27.8±4.9	1.76±0.07	71.2±6.8
全部	16	28.7±4.6	1.70±0.08	62.8±10.8

1) 标准偏差。

实验期间受试者着典型夏季服装:短袖衬衣或T恤,轻质长裤,内衣裤及袜子。实验室预备拖鞋供使用。实验中采用透气的网椅,增加的热阻可以忽略不计。总服装热阻约为0.5 clo。

1.2 实验布置

实验在美国加州大学伯克利分校建筑环境中心的人工气候室内进行,该气候室建于建筑技术实验室的一个房间内,尺寸为5.5 m×5.5 m×2.5 m。气候室采用架空地板送风和顶部回风的方式,新风量为85~104 L/s,能保证气候室内各环境参数的均匀稳定。经测定,背景环境中的气流平均速度约为0.05 m/s,不会对实验中的送风气流产生影响。人工气候室的内窗与外窗之间的空间也由空调系统控制,以保持气候室内窗的表面温度等于室内干球温度。气候室温度控制精度为±0.5℃,相对湿度控制精度为±3%,平均辐射温度等于室内干球温度。

实验中气候室内的布置与常见的开放办公环境类似,地板铺设地毯,天花采用石膏板,墙内侧均粉刷为建筑中常用的灰白色,以降低实验环境对受试者心理的可能影响。

在人工气候室中安装了两个吊扇(见图1),以保证每次可以同时两个受试者进行实验。受试者坐在风扇中心一侧,为吊扇风场较均匀的位置。两个受试者的位置与吊扇的位置对应。在受试者所在位置及左右两侧10 cm处各进行了3个高度(0.1,0.6,1.1 m)的风速测量,对应坐

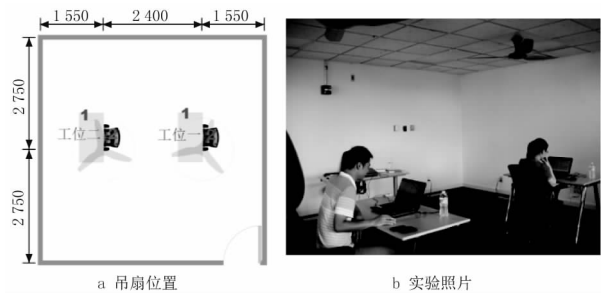


图1 气候室布置

姿人体的脚踝、腹部和头部。由于偏热环境中脸部吹风对人体的整体热感觉和热舒适影响最大(参见文献[7]),所以本文采用1.1 m处测量值为工况风速值。

实验工况的选取基于大量湿热地区自然通风建筑现场研究^[8]得到的温湿度数据,选取26,28,30℃三个温度水平及60%和80%两个相对湿度水平为研究工况,涵盖了中性到热的较大范围。实验所有工况下的温湿度和风速组合,以及相应的新有效温度(ET^*)如表2所示。

表2 实验工况及对应热指标

工况	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m/s)	$ET^*/℃$
1	26	60	0.05,0.30,0.70,0.85	26.3
2	26	80	0.05,0.30,0.70,0.85	27.0
3	28	60	0.05,0.70,0.85,1.20	28.5
4	28	80	0.05,0.85,1.20,1.60	29.7
5	30	60	0.05,0.85,1.20,1.60	30.7
6	30	80	0.05,1.20,1.60,1.80	32.6

实验中连续测试了室内空气温度和湿度以监测气候室的运行情况。测试仪器及精度见表3,所有的测试仪器在实验前后均进行了校准。同时采用无线式功率计实时进行风扇的功率监测,以检验实验中实际设定风扇挡位与计划挡位是否相同。

表3 测试仪器基本信息

	仪 器	量 程	精 度
空气温度	HOBO 温湿度记录仪	-30~50℃	±0.35℃
相对湿度	HOBO 温湿度记录仪	0~100%	±2.5%
风速	SENSOR 无线式热球风速仪	0~5 m/s	读数的±1.5%

1.3 问卷调查

问卷调查包括热可接受度、热感觉(TS)、热舒适(TC)、感知空气品质(PAQ)、气流可接受度、气流偏好及湿度可接受度。

热可接受度投票为断裂标尺,从“非常不可接受(-4)”至“刚刚不可接受(-0.01)”为不可接受范围,可接受范围从“刚刚可接受(0.01)”至“非常可接受(4)”。热感觉投票为连续的ASHRAE九

级标尺,各级分别为“−4(非常冷)”、“−3(冷)”、“−2(凉)”、“−1(稍凉)”、“0(中性)”、“1(稍暖)”、“2(暖)”、“3(热)”及“4(非常热)”。

热舒适投票采用与热可接受度投票一样的断裂标尺,投票范围为“−4(非常不舒适)至−0.01(有点不舒适)”和“0.01(有点舒适)至4(非常舒适)”。风速偏好投票的3个选项分别为“1(大一些)”、“0(保持不变)”和“−1(小一些)”。PAQ、气流和湿度接受度投票均为断裂标尺(−4至−0.01,0.01至4)。

1.4 实验步骤

每次实验有两个受试者参加,持续2 h 15 min,包括风扇关闭工况和风扇3个不同风速的工况,各风速工况的暴露时间均为0.5 h。进入气候室前,受试者在休息室内静坐15 min达到稳定,休息室的气温没有控制,但基本稳定在22℃。

4个风速工况的顺序按正交表的方法进行了排列,以消除暴露顺序对实验结果的影响。各风速工况的间隔中有1 min休息时间,以减少受试者久坐的疲劳。实验期间受试者可以调整他们的座椅,但除了在休息时段,不允许受试者来回走动。受试者可以进行阅读、写作、上网或交谈,但不允许交流与实验有关的内容。

2 结果分析

选取每30 min实验阶段的最后一组投票为稳态投票,因每个温湿度工况下的风速有所不同,进行显著性分析时没有考虑温湿度的影响,只考虑每个温湿度工况下不同风速水平的影响,组内对比采用重复观测的方差分析。可接受水平 p 值均取0.05。

2.1 热感觉(TS)

TS是衡量热环境的重要指标,风扇吹风下,能否满足人体整体热感觉的要求,使热感觉达到或者接近热中性,是重要的考察指标。对各工况下受试者的全身热感觉投票值求平均,结果如图2所示。

由图2可知,风扇关闭时,TS随 ET^* 升高而显著升高,在工况4时,TS已高于1(稍暖);在工况5和工况6时,TS则接近2(暖)。风扇开启时,各工况下的TS均值在±1(稍凉至稍暖)之间,在工况1到4时,均为热中性状态(−0.5~0.5);工况5和6时,也接近热中性状态。

将各温湿度下的风速对TS的影响分别作统计,分析表明,工况1时,无风扇和风速0.3 m/s时

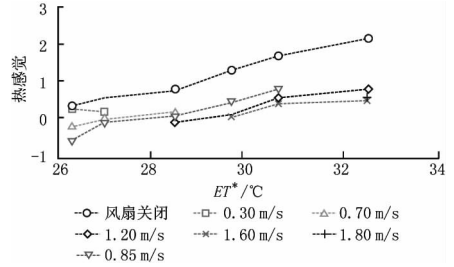


图2 平均热感觉投票与 ET^*

无显著差异($p>0.10$),风速0.70 m/s和0.85 m/s之间也没有显著性差异($p>0.10$),但风速0.70 m/s和0.85 m/s下TS显著低于无风扇和风速0.3 m/s($p<0.05$)时,意味着该工况下大风速产生了显著的凉感。工况2下,有风扇和无风扇没有显著性差异($p>0.10$),不同的风速之间也没有显著差异($p>0.10$);其余工况中仅有风扇工况和无风扇工况间差异显著($p<0.05$),不同风速对TS的影响差异不显著($p>0.10$)。

2.2 热舒适(TC)

图3为受试者在各工况下的TC投票均值。风扇关闭时,TC随 ET^* 的上升而降低,工况1到4下,TC投票均值在舒适一侧,工况5和工况6则在不舒适一侧。

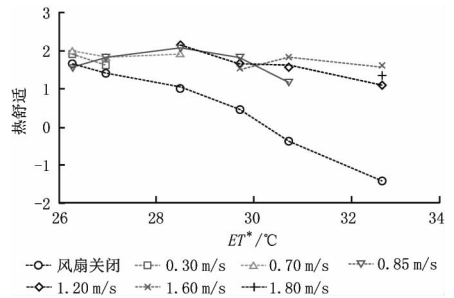
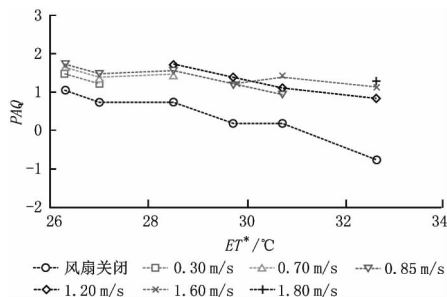


图3 平均热舒适投票与 ET^*

风扇开启时,所有的TC投票均值均大于+1,意味着在有风扇的情况下均处在舒适状态。工况1和工况2时各风速下TC投票没有显著性差异;其余工况下TC的显著差异只在有风扇和无风扇的工况下,不同风速下热舒适水平虽然有一定区别,但差异不显著($p>0.10$)。

2.3 感知空气品质(PAQ)

PAQ与 ET^* 的关系如图4所示。与热舒适投票类似,无风扇工况下PAQ随 ET^* 的升高而显著降低。可以看出,每个温度下高湿工况的PAQ均显著低于低湿工况,工况2和工况3在一个水平

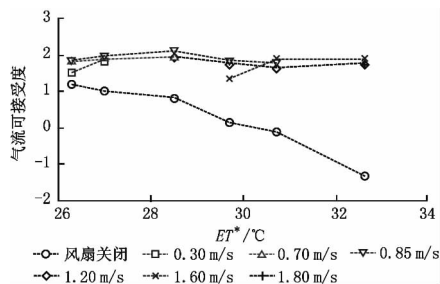
图4 平均PAQ投票与 ET^*

上,工况4和工况5在一个水平上,说明了高温下湿度的显著作用。

有风扇工况下,PAQ随 ET^* 的升高也有降低的趋势,但较为平缓,且投票均值都在1以上。只有在有风扇和无风扇的工况下发现了显著性差异,各个风扇风速下没有显著性差异存在。可以看出,温湿度越高,空气流动的改善效果越明显。

2.4 气流可接受度和偏好风速

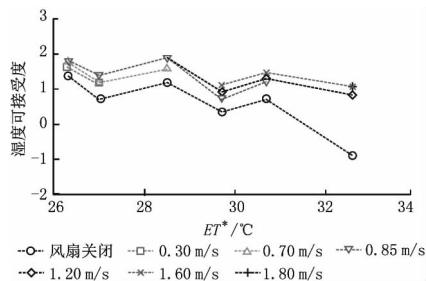
无风扇工况下,受试者的气流可接受度投票随 ET^* 增加而显著降低(见图5)。有风扇时,所有风速工况下的气流接受度均较高,投票均值接近2。显著性分析表明,工况1下有无风扇时气流可接受度投票无显著性差异($p>0.10$),其余温湿度工况有风扇时气流可接受度显著高于无风扇工况($p<0.05$),但各风速对气流接受度的影响不显著($p>0.10$)。

图5 平均气流可接受度投票与 ET^*

工况1和工况2风速0.7 m/s时受试者希望风速“保持不变”的比例最高,分别为88%和75%。工况3和工况4时这个风速为0.85 m/s,对应的比例分别为81%和75%。工况5下,风速为1.2 m/s时,希望保持不变的比例为81%。工况6风速为1.6 m/s时,69%的受试者希望保持不变。

2.5 湿度可接受度

各工况下湿度可接受度均值与 ET^* 之间的关系见图6。由图可见,温湿度对湿度接受度均有显著影响,但湿度较温度的影响更大。所有的温湿度

图6 平均湿度可接受度投票与 ET^*

和风速工况下,只有工况6无风扇时的湿度可接受度均值在不可接受一侧,其余工况下接受度均在可接受一侧。在工况1下,风扇开启和风扇关闭对湿度可接受度无显著影响,其余工况下,显著差异只在风扇开启和风扇关闭之间,风速大小对湿度接受度的影响不显著。

2.6 可接受百分比

各工况下的热环境不满意百分比见图7a。无风扇时,工况1不满意百分比低于10%,工况2和工况3接近20%的界限,工况3和工况4为44%,

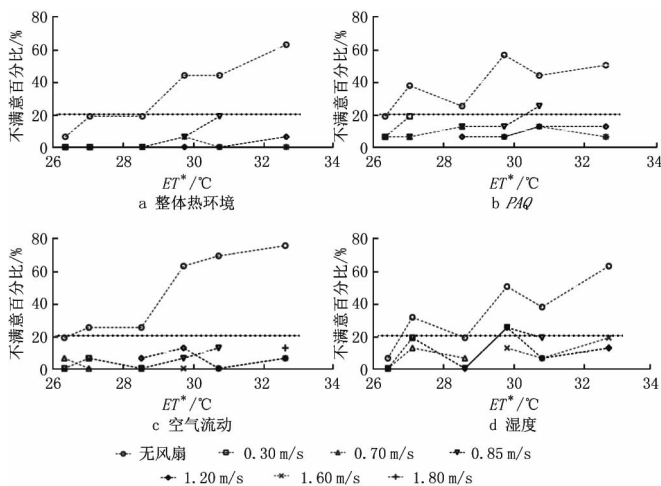


图7 各工况下的热环境、PAQ、空气流动和湿度不满意百分比

工况6时不满意率高达61%。以上表明当无风扇时,高湿工况的热环境20%可接受上限是26℃和80%,低湿工况的上限是28℃和60%;风扇开启时,所有的温湿度和风速工况下的热环境不满意百分比均在20%之内,特别是在温湿度工况1,2和3下,100%受试者认为热环境可接受。除了工况5风速0.85 m/s时不满意百分比为20%外,其余所有工况下不满意百分比均在10%以下。实验中选用的风速均可保证低于20%的不满意百分比。

PAQ、空气流动和湿度不满意百分比见图7b,c和d。无风扇时,除了温湿度工况1时不满意百分比

稍稍接近 20%,其余工况下 PAQ 和空气流动不满意百分比均高于 20%;低湿工况(60%)湿度不满意百分比在 26℃和 28℃时低于 20%,30℃时接近 40%,高湿工况(80%)时所有的湿度不满意百分比均高于 30%。综上,无风扇工况下,只有 26℃和 60%的温湿度能保证各指标不满意百分比在 20%以内。

风扇开启时,工况 5 下 0.85 m/s 的风速不能使 PAQ 不满意百分比低于 20%,其余所有的温湿度和风速工况下不满意百分比均低于 20%。空气流动不满意百分比则在所有的工况下均低于 20%。湿度不满意百分比在风扇开启后仍受湿度的显著影响,低湿工况下除工况 5 风速 0.85 m/s 外(不满意百分比 20%),所有的不满意百分比均低于 10%;而高湿工况(工况 4)下 0.85 m/s 和 1.2 m/s 的风速不能使湿度不满意百分比降至 20%以下,其余各工况不满意百分比多在 10%~20%之间。

综上,在湿热环境下,无空气流动时受试者的不满意百分比随温湿度的升高而快速升高至 20%以上。而通过合理地选择风速可使受试者对各指标的不满意百分比降至 20%以下。

2.7 与 ASHRAE 55 标准比较

常规稳态空调环境下,ASHRAE 55 标准依据 PMV 值 ± 0.5 分别规定了冬季和夏季的舒适的室内温湿度范围。其中夏季计算取风速低于 0.2 m/s,服装热阻 0.5 clo,活动量 1.0~1.3 met,这与本实验中无风扇的参数相符合。将本实验结果与 ASHRAE 无高速气流时的舒适度范围作比较,如图 8 所示。由图可见,在湿热环境下,风扇关闭时,80%的热可接受上限分别为低湿时的 28℃和 60%,及高湿时的 26℃和 80%,这些温湿度值均超出了 ASHRAE 规定的范围,说明在偏暖环境下,ASHRAE 规定的范围相对保守。

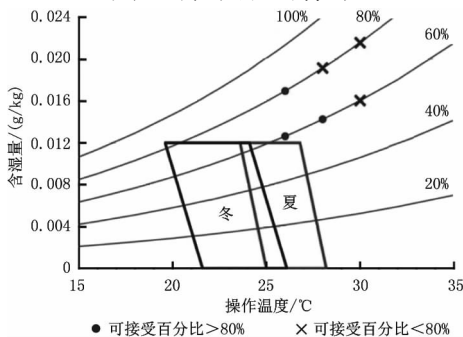


图 8 无风扇时受试者可接受温湿度范围与 ASHRAE 舒适度范围比较

ASHRAE 55 标准同样规定了对气流无控制时,采用高速气流进行温度补偿的推荐范围。利用 ASHRAE 的计算方法,分别计算相对湿度 60%和 80%下 ASHRAE 推荐的温湿度和风速范围,并将本文得到的受试者偏好风速及对应的温湿度值与之作比较,结果如图 9 所示。

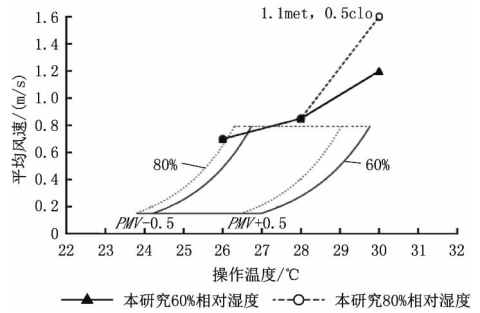


图 9 受试者偏好风速与 ASHRAE 推荐的风速和温湿度范围

由图可知,本文得到的不可控气流适用温湿度上限高于 ASHRAE 标准限值。在 26℃和 28℃时,两个湿度水平下受试者的偏好风速均稍高于 ASHRAE 规定的风速上限。而温度为 30℃、相对湿度为 60%时的偏好风速为 1.2 m/s,相对湿度 80%时为 1.6 m/s,均远高于标准规定的 0.8 m/s 的限值。在这些偏好风速下,受试者在各温湿度工况下的热可接受百分比和气流可接受度百分比均高于 80%。

综上,ASHRAE 给出的不可控气流温湿度和风速范围偏窄,不能很好指导湿热环境下气流的设计与使用。对于湿热环境,应将温湿度上限扩展至 30℃和 80%,风速上限提高至 1.6 m/s。

3 结论

3.1 无空气流动时,随温湿度的升高,受试者热感觉均值升高,舒适度降低,对 PAQ、湿度和气流的接受度降低;80%的可接受温湿度上限为低湿时的 28℃,60%和高湿时的 26℃,80%;在偏暖环境下,ASHRAE 规定的可接受温湿度范围过于保守。

3.2 气流不可控时,随温湿度的升高,受试者的热感觉均值稳定在“中性”到“微暖”的范围,热舒适度、PAQ、湿度接受度和气流接受度投票均值均保持在舒适(可接受)的范围;受试者 80%的可接受温湿度上限可达 30℃,80%,相应风速上限为 1.6 m/s;ASHRAE 55 标准给出的不可控气流适用范围偏保守,不能很好指导湿热地区的气流设计与应用。

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] Luis P, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(3): 394-398
- [2] ISO. ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria[S]. Geneva: ISO, 2005
- [3] Toftum J. Air movement—good or bad?[J]. Indoor Air, 2004, 14(S7): 40-5
- [4] Zhang H, Arens E, Abbaszadeh C, et al. Air movement preferences observed in office buildings

[J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(5): 349-360

- [5] Arens E, Turner S, Zhang H, et al. Moving air for comfort[J]. ASHRAE Journal, 2009, 51(5): 18-29
- [6] ASHRAE. ANSI/ASHRAE/IES Standard 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: American Society of Heating, Ventilation, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2010
- [7] 张宇峰. 局部热暴露对人体热反应的影响[D]. 北京:清华大学, 2006
- [8] Zhang Yufeng, Wang Jinyong, Chen Huimei, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China [J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2562-2570