

低气压条件下人体与环境 对流和蒸发换热的实验研究^{*}

青岛理工大学 王 刚[☆] 辛岳芝 胡松涛 李绪泉

摘要 在理论研究的基础上,利用高原环境模拟舱,对低气压条件下人体皮肤的散热特性进行了实验测试。分析比较了低压与常压条件下人体与环境之间对流换热和蒸发换热的差异,并给出了定量描述。

关键词 低气压条件 对流换热 蒸发换热 测试

Experimental study on convection and evaporation heat transfer between human body and environment under low atmospheric pressure

By Wang Gang[★], Xin Yuezhi, Hu Songtao and Li Xuquan

Abstract Based on the theory analysis, tests the heat transfer of human skin under lower atmospheric pressure condition in plateau environment simulation cabin. Analyses the differences of convection and evaporation heat transfer between human and environment under normal and low atmospheric pressure conditions, and gives the quantitative description.

Keywords low atmospheric pressure condition, convection heat transfer, evaporation heat transfer, test

★ Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong Province, China

①

0 引言

据统计,全世界海拔 2 000 m 以上的陆地面积达 1 980 万 km²,大约相当于两个中国的面积。常居海拔 2 440 m 以上的高原人口有 3 800 万,每年大约有 3 600 万人去高原地区旅游、登山和从商。我国拥有世界上面积最大的高原地域,其中海拔在 1 000 m 以上(海拔高度 1 000 m 以上的地区即称为高原)的山地约占陆地总面积的 58%,海拔在 2 000 m 以上的高山和高原占陆地总面积的 33%,常居高原人口约 2 500 万人^[1]。

高原地区具有独特的气候特点:随着海拔的升高,大气压力下降,空气密度减小,含氧量减少,相对湿度变小,风速增大,昼夜温差加大,阳光辐射增强。这些特有的自然环境和气候条件对居室环境产生较大影响,使居室内人员与环境间的换热呈现出与常压环境下不同的特点。

因此,为了提高居室环境空气质量,保证人们身体健康,提高工作效率,研究高原低气压环境下人体散热特性的变化具有重要的理论及现实意义,也是进一步进行低气压环境人体热舒适研究的基础。

文献[2]指出,在海拔 3 000 m(相当于大气压力为 71 kPa,即 0.70 atm)以下属于无症状高原反应区,即在此范围内,低压、低氧会引起人体一些生理机能发生适应性的代偿反应,但不致发生病理性变化,青藏铁路客车也是在 3 000 m 高度以上开始供氧的。因此,本次实验选择的压力变化范围为 76~101 kPa(0.75~1.00 atm),即在无症状高原反应区内。鉴于此,本文重点研究该压力范围内人体与周围环境通过皮肤进行的对流和蒸发换热,而

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50778091)

①☆ 王刚,男,1975 年 3 月生,博士,副教授
266033 青岛理工大学环境与市政工程学院
(0532) 85071710
E-mail: h-lab@163.com
收稿日期:2008-09-18
修回日期:2008-10-31

与生理变化有关的换热,诸如呼吸散热、代谢产热量的变化等将在后续的研究工作中进行分析。

1 高原低气压环境人体散热的理论基础

高原低气压环境下,空气的各项物性参数的变化会引起人体散热特性的改变。在人体散热的 4 种主要方式(即传导、辐射、对流和蒸发水分的潜热)中,传导热占的比例很小,可以忽略。而辐射热

主要取决于人体与环境物体的相对位置、体表与环境物体间的温度差、有效辐射面积以及皮肤和衣服的反射系数和吸收系数等,与风速和压力无关。所以低气压环境对人体皮肤换热的影响主要体现在对流和蒸发散热量的变化上。

低气压环境下的人体对流和蒸发散热的计算公式如下^[3-4]。

$$\text{自然对流散热量: } C_{p,n} = \frac{f_d \times 2.38(t_d - t_a)^{0.25} \left(\frac{p_p}{p_0}\right)^{0.5} (t_{sk} - t_a)}{f_d \times 2.38(t_d - t_a)^{0.25} \left(\frac{p_p}{p_0}\right)^{0.5} R_d + 1} \quad (1)$$

$$\text{强迫对流散热量: } C_{p,c} = \frac{f_d \times 12.1 v_a^{0.5} \left(\frac{p_p}{p_0}\right)^{0.466} (t_{sk} - t_a)}{f_d \times 12.1 v_a^{0.5} \left(\frac{p_p}{p_0}\right)^{0.466} R_d + 1} \quad (2)$$

$$\text{自然对流时蒸发散热量: } E_{sk,n} = \frac{w f_d \times 16.5 \times 2.38(t_d - t_a)^{0.25} \left(\frac{p_0}{p_p}\right)^{0.5} (p_{sk} - p_a)}{f_d \times 16.5 \times 2.38(t_d - t_a)^{0.25} \left(\frac{p_0}{p_p}\right)^{0.5} \times \frac{R_d}{16.5 i_d} \frac{p_p}{p_0} + 1} \quad (3)$$

$$\text{强制对流时蒸发散热量: } E_{sk,c} = \frac{w f_d \times 16.5 \times 12.1 v_a^{0.5} \left(\frac{p_0}{p_p}\right)^{0.534} (p_{sk} - p_a)}{f_d \times 16.5 \times 12.1 v_a^{0.5} \left(\frac{p_0}{p_p}\right)^{0.534} \times \frac{R_d}{16.5 i_d} \frac{p_p}{p_0} + 1} \quad (4)$$

式(1)~(4)中 p_0, p_p 分别为常压与低压下的环境压力,常压取 101 kPa; p_{sk}, p_a 分别为皮肤表面和环境空气水蒸气分压力, kPa; t_{sk}, t_d, t_a 分别为人体皮肤、衣服外表面及人体周围空气温度, °C; v_a 为空气流速, m/s; R_d 为衣服热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; w 为皮肤湿润度; f_d, i_d 分别为穿衣面积系数与服装水分渗透系数。

由式(1)~(4)知,低气压条件下影响人体对流和蒸发散热的主要环境因素有温度、压力、风速和水蒸气分压力。文献[5]指出,水蒸气分压力随压力的降低而减小,但压力不太低的情况下变化不明显。本实验中空气相对湿度的变化范围为 40%~70%,没有极高或极低的数值出现,加之模拟的最低压力只有 74.790 kPa,所以实验中主要控制温度、压力和风速 3 个变量。

2 实验系统及实验方法

2.1 实验系统简介

本实验是在 THFC40/0.055-1 高原环境模拟舱中进行的,它可以模拟高原特有的低气压环境,压力调节的范围为 51~101 kPa(0.5~1.0 atm)(最低可达 20 kPa),并设有远程测量和控制系统,关于该实验台的详细说明可见文献[6]。

温度测量所用的传感器为铜-康铜热电偶,探头精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,数据采集器为 HP34970A。热电偶使用前在恒温水浴中进行了标定,线性度良好,标定点与修正曲线的线性相关系数 R^2 均在 0.99 以上。利用计算机进行多点温度数据的自动采集,保证了测量的同时性。

结合便携式和多点风速仪进行风速测量。TSI Models 8386 型手持式多参数通风表:风速测量的精度为读数的 $\pm 3\%$ (最小 $\pm 0.015 \text{ m/s}$),温度测量的精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$; Model 1550 多通道气流分析仪:配有 0965-08 型热式速度探头,该探头具有方向不敏感性,时间常数 $T_{0.63} = 0.1 \text{ s}$ 。每个探头都在低速(环境)风洞中进行过标定,基本误差为 $\pm 3\%$ 。

2.2 实验工况设计

为考察空气压力的影响,设计了平行实验,共 12 组工况,各工况条件见表 1。

表 1 平行实验的实验设计工况

温度/°C	压力/kPa	风速/(m/s)
22	101/86/76	<0.10
22	101/86/76	0.17
22	101/86/76	0.23
26	101/86/76	<0.10

3 实验结果及分析

实验重点研究了不同压力、温度和风速条件下人体散热量的变化。根据式(1)~(4)及实验中所测得的各环境变量的数据可计算出低气压环境下的对流和蒸发散热量。为便于分析比较,表 2、

表 3 分别列出了同一温度、不同风速和不同温度、同一风速时人体对流和蒸发散热量随压力的变化情况。图 1~6 是人体对流散热量和蒸发散热量随各因素变化情况的直观描述。

表 2 设定温度 22℃、不同风速时人体对流和蒸发散热量随压力的变化

风速/ (m/s)	大气压力/ kPa	对流			蒸发		
		对流散热量/ (W/m ²)	与常压下的差值/ (W/m ²)	与常压下相比变化 的比率/%	蒸发散热量/ (W/m ²)	与常压下的差值/ (W/m ²)	与常压下相比变化 的比率/%
<0.10	101	36.182 6			22.054 2		
	86	34.891 7	-1.291 0	-3.57	25.537 9	3.483 7	15.80
	76	32.984 0	-3.198 7	-8.84	28.585 1	6.530 9	29.61
0.17	101	44.636 5			24.343 3		
	86	43.470 0	-1.166 5	-2.61	28.703 3	4.360 0	17.91
	76	41.257 5	-3.378 9	-7.57	32.257 9	7.914 6	32.51
0.23	101	46.565 1			26.326 0		
	86	44.736 5	-1.828 6	-3.93	30.534 5	4.208 5	15.99
	76	43.550 2	-3.014 9	-6.47	34.603 6	8.277 6	31.44

表 3 风速<0.10 m/s、不同温度时人体对流和蒸发散热量随压力的变化

大气压力/kPa	温度/℃	对流			蒸发		
		散热量/(W/m ²)	差值/(W/m ²)	变化比率/%	散热量/(W/m ²)	差值/(W/m ²)	变化比率/%
101	22	36.182 6			22.054 2		
	26	20.048 5	-16.134 2	-44.59	17.458 9	-4.595 4	-20.84
86	22	34.891 7			25.537 9		
	26	19.008 8	-15.882 9	-45.52	20.239 5	-5.298 5	-20.75
76	22	32.984 0			28.585 1		
	26	17.192 5	-15.491 5	-47.88	22.007 1	-6.578 1	-23.01

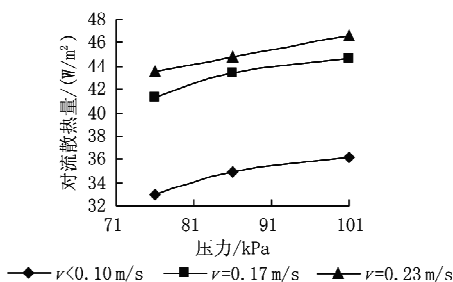


图 1 不同风速下对流散热量随压力的变化

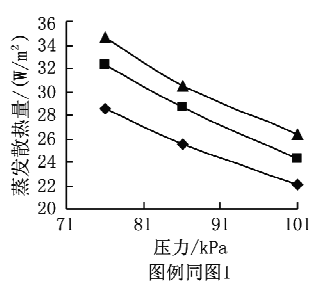


图 2 不同风速下蒸发散热量随压力的变化

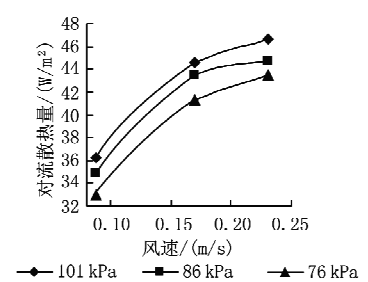


图 3 不同压力下对流散热量随风速的变化

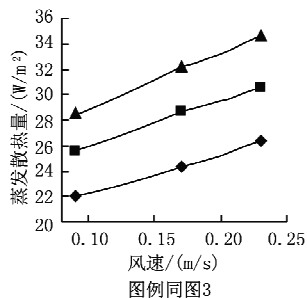


图 4 不同压力下蒸发散热量随风速的变化

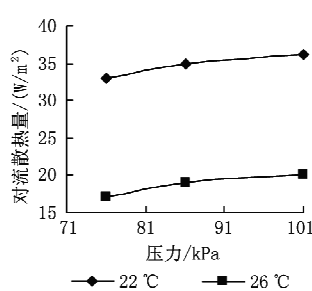


图 5 不同温度下对流散热量随压力的变化

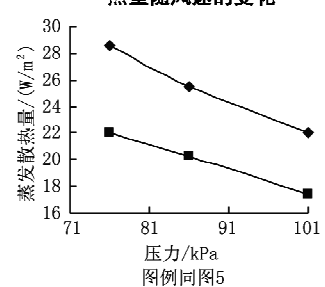


图 6 不同温度下蒸发散热量随压力的变化

由表 2,3 及图 1~6 可以得到以下结论:

1) 温度和风速一定的条件下,低压环境下的对流散热量小于常压环境下的数值,而蒸发散热量则正好相反。这与已有的研究结果一致^[2-3,7]。

2) 温度和风速一定的条件下,低压环境中,蒸发散热的增加量大于对流散热的减少量,也就是说

蒸发散热量与对流散热量变化的比率不同。如压力 86 kPa,风速 $v < 0.10$ m/s 时,蒸发散热量和对流散热量与常压下相比变化的比率分别为 -3.57% 和 15.80%;压力 76 kPa,风速 $v = 0.23$ m/s 时,蒸发散热量和对流散热量与常压下相比变化的比率分别达到 -6.47% 和 31.44%。

3) 温度和风速一定的条件下,压力越低,对流散热量和蒸发散热量与常压下的差值越大。如风速 $v=0.17\text{ m/s}$ 、压力为 86 kPa 时,对流散热量和蒸发散热量与常压下的差值分别为 -1.1665 W/m^2 和 4.3600 W/m^2 ,变化的百分比率分别为 -2.61% 和 17.91% ;而风速不变,当环境压力变化至 76 kPa 时,对流散热量和蒸发散热量与常压下的差值分别达到 -3.3789 W/m^2 和 7.9146 W/m^2 ,变化的百分比率也分别达到 -7.57% 和 32.51% 。

4) 从图 1 和图 2 可以直观看出,温度和压力一定的条件下,常压和低压工况下的对流散热量和蒸发散热量都随风速的增大而增大。对比风速 $v<0.10\text{ m/s}$ 和 $v=0.23\text{ m/s}$ 的结果,常压工况下,对流散热量由 36.1826 W/m^2 增加到 46.5651 W/m^2 ,蒸发散热量由 22.0542 W/m^2 增加到 26.3260 W/m^2 ,分别增加了 28.69% 和 19.37% 。低压工况下,压力为 86 kPa 时,对流和蒸发散热量分别增加 28.22% 和 19.57% ;压力为 76 kPa 时,对流和蒸发散热量分别增加 32.03% 和 21.05% 。

5) 温度和压力一定的条件下,随风速的增大,对流和蒸发散热量增加的速率减小。如图 3,4 所示,随风速的增加,在 $0.17\sim 0.23\text{ m/s}$ 内对流和蒸发散热量的变化比在区间 $v<0.17\text{ m/s}$ 内蒸发散热量的变化要小得多。在上述两区间内,常压环境下对流散热量增加的比率分别为 4.32% 和 23.36% ,而蒸发散热量的增加比率分别为 8.14% 和 10.38% ;压力为 86 kPa 时,对流散热量增加的比率分别为 2.91% 和 24.59% ,而蒸发散热量的增加比率分别为 6.38% 和 12.39% ;压力为 76 kPa 时,对流散热量增加的比率分别为 5.57% 和 25.08% ,而蒸发散热量的增加比率分别为 7.27% 和 12.85% 。

6) 由图 5,6 可知,在本实验设定工况中,风速 $v<0.10\text{ m/s}$,压力一定的条件下,对流散热量和蒸发散热量随温度的升高而降低,这主要是因为当空气温度升高时人体表面与周围环境间的温差变小,人体向外界的散热量也随之减少。此外,随着压力的降低对流散热量和蒸发散热量减少的比率基本上是逐渐升高,而且对流散热量的变化比较明显。从以上数据可知,温度由 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,常压工况下对流散热量和蒸发散热量分别减少 44.59% 和 20.84% 。低压工况下,压力为 86 kPa

时对流散热量和蒸发散热量分别减少 45.52% 和 20.75% ;压力为 76 kPa 时对流散热量和蒸发散热量减少的比率分别为 47.88% 和 23.01% 。

4 结论

4.1 低气压环境主要影响人体的对流散热和蒸发散热。其他条件不变时,对流散热量随压力的降低而减少,蒸发散热量随压力的降低而增加,但蒸发散热损失的增加量大于对流热损失的减少量。

4.2 其他条件不变时,压力越低,对流散热量和蒸发散热量与常压下的差值越大,但是总的趋势仍是蒸发散热损失的增加量大于对流热损失的减少量。因此,与常压相比,低压下的人体失热量明显增大,且压力越低,人体失热量越大。

4.3 温度和压力一定时,随风速的增加,常压和低压工况下的对流和蒸发散热量都增加,而且风速越大,对流和蒸发散热量变化的速率越大。

4.4 风速 $v<0.10\text{ m/s}$,压力一定的条件下,对流散热量和蒸发散热量随温度的升高而降低,而且压力越低时对流散热量和蒸发散热量降低的比率越大。

上述结论是在本次实验条件下得出的,当环境条件发生变化时,对流及蒸发散热的变化趋势应与此一致,但相对的变化幅度会有所不同。若进一步研究低气压环境人体热舒适,还应进一步探讨与人体生理反应有关的呼吸散热、代谢产热量变化,以及各散热量变化比例对人体热舒适感的影响。

参考文献:

- [1] 刘成明. 青藏高原地区人口、资源、环境与可持续发展[J]. 青海社会科学,2003(1):39-41
- [2] 陈信,袁修干. 人-机-环境系统工程生理学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000
- [3] Liu Guodan, Zhou Jingzhong, Liang Bin, et al. Study on thermal comfort equation under low-pressure environment [C] // the 5th HVAC International Symposium; 579-584
- [4] ASHRAE. 2005 ASHRAE handbook; fundamentals [M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2005
- [5] 梁斌. 低气压环境对空调器用管翅式换热器的性能影响研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2007:33-34
- [6] 辛岳芝. 高原中海拔地区低气压环境下人体热舒适初步研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2008:37-41
- [7] Iwajlo M K. Heat and mass exchange process between the surface of the human body and ambient air at various altitude [J]. Int J Biometeorol, 1999, 43:38-44