

热环境

RE
HUAN
JING

魏润柏 徐文华 编著



同济大学出版社

374533

热 环 境

魏润柏 徐文华 编著



同济大学出版社

(沪)新登字204号

21106/17
内 容 提 要

本书系统地介绍了人与环境的热交换方式(其中包括辐射、对流、蒸发等)、人与环境的热平衡、热舒适环境的定义及建立、过热过冷环境对人体的影响以及在人与环境的热交换过程中起重要作用的服装的热工特性等。书中在阐明有关基本原理的同时,提供了大量可供实际应用的计算、实验、测试方法及数据资料。本书不仅涉及了有关热环境研究的历史,也包括了国内外部分最新研究成果。

本书可以作为供热通风及空气调节、服装、人类工效学、生理学等有关领域的科技人员及大专院校师生的参考书。

责任编辑 张平官

封面设计 王肖生



魏润柏、徐文华编者

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

江苏启东市印刷三厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张9.625 字数270千字

1994年4月第1版 1994年4月第1次印刷

印数: 1—1500 定价: 10.00元

ISBN 7-5608-1311-9/X·14

前 言

人类生存于环境之中,人与环境有密切的联系,人利用和改造环境以获取物质和能量,环境反过来作用和影响人体。在环境对人体的诸多影响方式中,使人产生冷或热感觉是最普遍的形式,因为人无论处在哪一种环境中,都会产生一定的热感觉。我们将影响人体冷热感的各种因素所构成的环境称为热环境。

研究热环境的目的在于为人类的生活提供最佳热舒适条件,在满足工艺要求及不影响工作效率的前提下,人类的工作环境也应当尽可能是热舒适的。为了建立热舒适环境,就必须研究是哪些因素影响了人的热感觉以及用什么方法来调节控制这些因素。最初的研究只涉及到少数简单的环境因素,例如温度与湿度。本世纪初由美国学者提出的有效温度概念,就是综合了这两个主要因素来描述环境对人体产生的热影响的。早期的研究主要服务于军事目的,例如对于军舰轮机舱内的环境研究、对于在炎热或严寒环境中士兵生理和心理方面的研究等。第二次世界大战后,随着科技生产的发展,生活水平不断提高,越来越多的研究转向生产和生活领域。对热环境的研究也涉及到环境的辐射温度、气流速度、人所穿着的服装、人的活动量以及地理位置、民族习俗、年龄性别、体格、体型等更广泛更深入的因素。这些研究及成果在美国供热制冷及空气调节工程师学会 ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineers) 的出版刊物中得到了充分的反映。近年来,丹麦学者范格尔 (Fanger) 教授提出的热舒适理论及热舒适方程式是对热环境研究的重要贡献,获得了国际的公认。现在,对热环境的研究不仅在理论上获得了重大进展,而且在实践上也形成了比较完善的建立热舒适环境

的供热通风及空气调节技术。我国科技工作者在这方面也进行了大量的研究，并且在某些领域的研究和实践中已经达到了较高的水平。

本书将系统地介绍有关热环境的理论以及建立热舒适环境的方法，其内容不仅涉及环境的客观因素，也涉及人的主观因素以及处于人与环境之间的服装。在热环境研究中，人-服装-环境是一个整体系统，因此还要涉及到服装、纺织、生理、人类工效学等领域的知识。至于建立热舒适环境的主要技术，即供热通风及空气调节技术，已有大量的专业书籍可供读者阅读，所以本书不作详细介绍。

在此，对为本书提供部分实验数据及资料的于航、钱锋同志表示感谢，并真诚地希望读者对书中不妥之处提出宝贵意见。

魏润柏

徐文华

1993.3

基本符号表

为方便读者查阅，每一符号后标明它在本书中首次出现的公式编号或章节。

α	导温系数 m^2/s	(4-7)
A_D	人体杜波依斯(DuBois)外表面积 m^2	(1-2)
A_{eff}	着装人体有效辐射面积 m^2	(3-19)
A_p	人体投影面积 m^2	(3-25)
A_{rsw}	汗水湿润的人体表面积 m^2	(5-10)
$BSAC$	服装覆盖人体表面积率 %	(8.3.2)
C	人体与环境的对流热交换 W/m^2	(1-1)
c_b	人体组织平均比热 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$	(1-3)
c_p	空气定压比热 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$	(5-7)
c_{rea}	呼吸显热损失 W/m^2	(5-7)
d_e	呼气中的含湿量 $\text{kg水蒸气}/\text{kg干空气}$	(5-2)
d_i	吸气中的含湿量 $\text{kg水蒸气}/\text{kg干空气}$	(5-2)
d_a	空气的含湿量 $\text{kg水蒸气}/\text{kg干空气}$	(5-4)
E	人体的蒸发散热量 W/m^2	(1-1)
E'	实际物体全辐射力 W/m^2	(3-9)
E_b	黑体全辐射力 W/m^2	(3-6)
$E_{b\lambda}$	黑体单色辐射力 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$	(3-4)
E_{diff}	皮肤水分扩散热损失 W/m^2	(5.2)
E_{max}	皮肤最大蒸发热损失 W/m^2	(5.2)
E_{rea}	呼吸蒸发热损失 W/m^2	(5-2)
E_{rsw}	皮肤实际蒸发热损失 W/m^2	(5-10)
E_{sk}	皮肤总的蒸发热损失 W/m^2	(5-20)
ET	有效温度 $^{\circ}\text{C}$	(7.3.2)
ET^*	新有效温度 $^{\circ}\text{C}$	(7.3.2)

E_0	单向辐射力 $W/m^2 \cdot sr$	(3-13)
F_{cl}	服装基本传热效率 %	(4-42)
f_{cl}	服装面积系数 %	(3-20)
F_{clo}	服装有效传热效率 %	(4-35)
f_{eff}	有效辐射面积系数 %	(3-20)
F_{i-j}	i 表面对 j 表面的辐射角系数 %	(3-17)
f_p	投影面积系数 %	(3-25)
F_{pct}	服装渗透系数 %	(5-22)
G_r	葛拉晓夫数	(4-8)
g	重力加速度 m/s^2	(4-8)
H	人体净得热量 W/m^2	(2-3)
h	人的身高 m	(1-2)
h_a	空气的焓 kJ/kg 干空气	(7-8)
h_c	对流换热系数 $W/m^2 \cdot ^\circ C$	(4-1)
h_{cr}	综合显热换热系数 $W/m^2 \cdot ^\circ C$	(4-33)
h_e	蒸发传热系数 $W/m^2 \cdot kPa$	(5-16)
h_r	线性辐射换热系数 $W/m^2 \cdot ^\circ C$	(3-23)
HSI	热应力指标	(7.2.3)
H_s	经人体表面散失的总热量 W/m^2	(5-27b)
I	辐射强度 $W/m^2 \cdot sr$	(3-15)
I_a	空气层热阻 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 或 clo	(4-39)
I_{cl}	服装的基本热阻 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 或 clo	(6-12)
I_{clo}	服装的有效热阻 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 或 clo	(4-39)
I_t	服装的总热阻 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 或 clo	(4-39)
I_0	单向辐射强度 $W/m^2 \cdot sr$	(3-15)
K	通过服装的传热损失 W/m^2	(6-3)
L_e	刘易斯数 $^\circ C/kPa$	(5-17)
$LPPD$	可能的最低不满意百分数 %	(7.3.4)
M	人体新陈代谢率 W/m^2	(1-1)

m	皮肤渗透系数 $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$	(5-13)
N_a	努谢尔特数	(4-10)
O_i	吸气中氧气的体积百分比 %	(2-1)
O_e	呼气中的氧气体积百分比 %	(2-1)
p	大气压 kPa	(5-4)
p_a	空气中水蒸气分压力 kPa	(5-4)
p_a^*	环境空气温度下水蒸气饱和分压力 kPa	(5-6)
PPD	预测不满意百分数 %	(7.3.4)
PMD	预测平均投票值	(7.3.3)
P_r	普朗特数	(4-7)
p_{sk}^*	皮肤温度下水蒸气饱和分压力 kPa	(5-13)
R	人体与环境的辐射热交换 W/m^2	(1-1)
r	气化潜热 kJ/kg	(5-1)
R_e	雷诺数	(4-3)
RQ	呼吸商	(2-2)
S	人体蓄热率 W/m^2	(1-1)
SET	标准有效温度 $^{\circ}\text{C}$	(7.3.2)
S_i	斯坦登数	(4-9)
T	绝对温度 K	(3-4)
t_a	空气温度 $^{\circ}\text{C}$	(4-24)
t_{act}	作用温度 $^{\circ}\text{C}$	(5-28)
t_b	人体平均温度 $^{\circ}\text{C}$	(1-3)
$T_{cl}(t_{cl})$	着装人体外表面平均温度 $\text{K}(^{\circ}\text{C})$	(3-19)
t_{co}	人体核心温度 $^{\circ}\text{C}$	(2.3)
t_d	空气露点温度 $^{\circ}\text{C}$	(7.1.3)
t_e	呼出空气温度 $^{\circ}\text{C}$	(5-7)
t_F	华氏温度 $^{\circ}\text{F}$	(9-1)
t_f	流体温度 $^{\circ}\text{C}$	(4-1)
$T_g(t_g)$	黑球温度计读数 $\text{K}(^{\circ}\text{C})$	(7-11)

THICK	织物厚度 cm	(8.3.1)
$T_{mrt}(t_{mrt})$	平均辐射温度 K(°C)	(3-19)
t_{sk}	人体皮肤平均温度 °C	(2.3)
t_{ns}	自然湿球温度 °C	(9-4)
t_o	折算温度 °C	(4-33)
t_{oh}	湿折算温度 °C	(7.2.2)
t_s	空气湿球温度 °C	(5-14)
t_{sk}	人体皮肤温度 °C	(2.3)
t_{sub}	主观温度 °C	(7-26)
t_w	固体壁面温度 °C	(4-1)
V	呼吸换气量 l/s	(2-1)
v	流速 m/s	(4-3)
V_{O_2}	人体耗氧量 l/min	(2-2)
W	人所完成的机械功 W/m ²	(1-1)
w	人体重量 kg	(1-2)
WBGT	湿黑球温度指标 °C	(9-4)
WCI	风冷指标 kg·J/m ² ·h	(9-9)
W_{rsu}	皮肤湿度 %	(5-10)
W_t	皮肤总湿度 %	(5-21)
β	流体容积膨胀系数 1/K	(4-8)
ϵ	黑度	(3-10)
ϵ_p	人体辐射率 %	(3-14)
η	人的机械效率 %	(2-4)
λ	导热系数 W/m·°C	(4-5)
μ	流体动力粘滞系数 Pa·s	(4-2)
ν	流体运动粘滞系数 m ² /s	(4-3)
ρ	密度 kg/m ³	(4-3)
σ_b	黑体辐射常数 W/m ² ·K ⁴	(3-7)

τ	粘滞剪应力 Pa	(4-2)
φ_a	空气相对湿度 %	(5-6)
ψ	环境传热特性系数 kPa/℃	(5-28)
$d\omega$	立体角	(3-14)

目 录

前言

基本符号表

第一章 人体与环境的热交换	1
第二章 人体的新陈代谢	8
第一节 人体新陈代谢率	8
第二节 人体所作的机械功	18
第三节 人体温度	21
第三章 人体与环境的辐射热交换	27
第一节 辐射的基本原理	27
第二节 人体与环境的辐射热交换	37
第三节 有关辐射热交换计算的重要参数	42
第四章 人体与环境的对流热交换	79
第一节 对流换热的基本原理	79
第二节 人体与环境的对流热交换	90
第三节 折算温度与综合显热换热系数	101
第五章 人体的蒸发热损失	105
第一节 呼吸造成的蒸发热损失	106
第二节 皮肤水分蒸发热损失	109
第三节 热平衡方程式的应用	114
第六章 热舒适方程式	120
第一节 热舒适方程式的建立	121
第二节 热舒适图	128
第三节 影响热舒适方程式应用的其他因素	139
第七章 热环境指标	154
第一节 直接指标	154
第二节 理论推导的指标	163
第三节 实验性指标	168

第四节 热环境指标的比较及选择	212
第八章 服装的热工性能	215
第一节 服装热阻	216
第二节 服装热阻的测定	220
第三节 影响服装热阻的因素	231
第九章 热舒适环境及过热过冷环境	258
第一节 热舒适环境	259
第二节 热舒适环境的建立	267
第三节 过热过冷环境对人体健康的影响	276
第四节 过热过冷环境对工作能力的影响	284

参考文献

第一章 人体与环境的热交换

在自然界里，任何物体之间总是相互不断地进行着能量的传递，或者说能量的交换。例如，一块铁放到炉子里加热到一定温度后，再放在空气中冷却。铁块先从炉子获得热量，使自身温度上升，然后又将热量释放到温度比它低的空气中去。人作为一个有机的生命体，他与其他物体或者周围环境的能量交换当然要比铁块复杂得多。首先，人获得能量主要是靠进食，但是食物必须经过由呼吸所取得的氧气的氧化作用才能转化为能量。这些能量一部分用于人体的各器官的运动和对外作功，另一部分转化为维持一定体温所需的热量，如果有多余的热量，则还要释放到周围环境中去。与铁块相同的是，如果人体温度与周围环境温度不同，那么人体也会直接从环境获得热量或向环境散发热量。此外，人体不断地进行呼吸，皮肤表面不断地挥发水分或出汗，这些复杂的生理过程也伴随着与环境的能量交换。最后，人体排泄废物也会带走一部分能量。但是，不管人体的生理活动多么复杂，从热力学的观点来看，人与环境的热交换与铁块一样，同样是遵循自然界的最基本的法则——能量转换及守恒定律，或者叫热力学第一定律。如果将人体看作为一个系统，那么系统所获得的能量减去系统所失去的能量等于系统的能量积累。从这一观点出发，可以用热平衡方程式来描述人与环境的热交换，即

$$S = M - W - R - C - E(W/m^2) \quad (1-1)$$

式中 M ——人体新陈代谢率， W/m^2 ；

W ——人所完成的机械功， W/m^2 ；

R ——人体与环境的辐射热交换， W/m^2 ；

C ——人体与环境的对流热交换， W/m^2 ；

E ——人体由于呼吸、皮肤表面水分蒸发及出汗所造成的
与环境的热交换, W/m^2 ;

S ——人体的蓄热率, W/m^2 。

上式中的各项采用的单位均为 W/m^2 , 这是因为具体的人其
体型、年龄、性别、习性等均各不相同, 以人作为研究单位在数学表
达及处理上十分困难。有关研究表明, 式(1-1)中各项, 特别是 E 、
 R 、 C 等项与人体外表面积成一定的线性关系, 因此将各项都表
示为单位人体外表面积的热交换量, 使有关研究大为方便且具有
可比性。但是人体的外表面积又是一个相当复杂的变量, 它同样
与人的体型、年龄、性别等有一定关系。许多学者进行了研究, 得
出了不同的计算方法。目前国际上最常用的是杜波依斯(DuBois)
公式, 即

$$A_D = 0.202w^{0.425}h^{0.725}(m^2) \quad (1-2)$$

式中 A_D ——人体的杜波依斯外表面积, m^2 ;

w ——人的体重, kg ;

h ——人的身高, m ,

本书有关的计算公式均采用杜波依斯人体外表面积。例如某
人身高为 $1.73m$, 体重为 $70kg$, 他的人体外表面积为 $1.829m^2$ 。
用式(1-2)计算的结果与真实测量的结果是有一定误差的。有些
研究认为, 计算结果比实际值要小一些。不过仍可以采用该式来
进行有关计算, 因为热平衡方程式的各项均采用同一个式子来计
算人体外表面积, 则系统的误差相互抵消了。我国人体外表面积
也可用下式推算

$$A = 0.61h + 0.0128w - 0.1529(m^2) \quad (1-2a)$$

现在来讨论一下热平衡方程式中各项的物理意义及符号选取
问题。

M 是人体通过新陈代谢作用将食物转化为能量的速率, 简称
新陈代谢率。人体摄取食物就是获得能量。需要说明的是, 食物
本身也具有一定的温度, 即食物本身携带着一定的热量, 但是这部

分热量是相当小的,因此在研究人体与环境的热交换中,不考虑这部分热量的进入。顺便说一句,也不考虑排泄物所带走的热量。这里主要是指食物通过氧化作用所能释放出的能量。因此,在热平衡方程式中, M 项始终是正值。

W 是人体所完成的机械功。人体对外界作机械功,例如人走上楼梯,身体的势能增加了,这部分增加的势能是由新陈代谢所产生的能量转换而来的,因此 W 取正值,即从 M 值中减去。反之,如果人体从外界获得机械功,例如人走下楼梯,人体原先具有的一部分势能将通过复杂的生理过程转化为进入人体内的热量,此时, W 要取负值。

R 是人体通过辐射的形式与环境的热交换。当人体表面温度高于环境壁面(如墙面、地面、天花板等)的温度时,热量会以辐射能的形式传给环境壁面, R 为正值,是人体系统的热损失。反之,当环境壁面的温度高于人体表面温度时,热量由环境壁面辐射给人体, R 为负值,成为人体系统的得热项。两者温度相等时,辐射仍在进行,但人体辐射失热与辐射得热相等, R 值为零。

C 是人体通过对流的形式与环境的热交换。当人体表面温度高于周围空气温度时,发生对流散热, C 项为正值。反之,人体通过对流从周围空气获得热量, C 项为负值。

R 与 C 项所涉及的人体表面温度,对于裸体的人来说就是皮肤表面温度,对于穿着一定服装的人来说,因为他身体的若干部分为服装所覆盖,情况就比较复杂了。关于服装对人体与环境的热交换的影响,将在以后有关章节中专门加以分析。

人从环境吸入空气,经过呼吸道到达肺泡,完成氧气与二氧化碳的交换后再呼出体外。在这一生理过程中发生了两种热交换过程:一种是由于吸入和呼出的空气温度发生的变化,例如吸入 18°C 的空气,呼出 36°C 的空气,那就要从人体带走热量;另一种是由于吸入和呼出的空气湿度发生的变化,通常是呼出的空气中含有更多的水蒸气,这部分增加的水蒸气来自于人体,要带走相应的气化

潜热。另外,人体的皮肤表面不断地向周围空气蒸发水分,人体出汗时,汗液在人体皮肤表面蒸发,这两种情况都会从人体带走气化潜热。 E 项表示的就是由上述几种情况造成的人体热损失,通常情况下 E 为正值。只有在环境湿度非常大的情况或某些特殊情况下, E 才会出在负值。

式(1-1)等式右侧的各项的代数和若为正值,说明人体系统的得热量大于失热量,导致人体内热量的积蓄,则等式左侧的 S 项为正值。反之,人体不断丧失热量, S 项为负值。如果右侧各项代数和正好为零,则蓄热率 S 为零,人体得热正好等于失热,从动态平衡的角度看,人体正处于热平衡状态。

如果人体处于热不平衡状态,例如得热量大于散热量,多余的热量将在体内积蓄,导致体温上升。当然,只要蓄热率不是很大,经过一段较长的时间,由于人体自身的调节机能及体温上升造成 R 、 C 、 E 等失热的增加,可以使 S 项重新变为零,即达到新的热平衡状态。不过,在短时期内,由于人体本身具有较大的热容量,加上人体体温调节系统的调节功能(如控制血流量、出汗量等)可以保证人体在热不平衡状态下只有很小的体温变化。

人体蓄热率 S 与人体温度之间的关系可由下式表示:

$$S = \frac{C_b w}{A_p} \cdot \frac{dt_b}{dt} (W/m^2) \quad (1-3)$$

式中 C_b ——人体组织的平均比热, $kJ/kg \cdot K$;

t_b ——人体平均温度, $^{\circ}C$;

t ——体温变化时间, s ;

$\frac{dt_b}{dt}$ ——体温变化率, $^{\circ}C/s$ 。

人体组织的平均比热由盖吉(Gagge)和尼西(Nishi)导出,大约为 $3.49 kJ/kg \cdot ^{\circ}C$,这个数值大约为水的比热的83%。如果一个体重为 $70 kg$ 、具有 $1.8 m^2$ 体表面积的人在一小时内体温上升了 $1^{\circ}C$,意味着此时的蓄热率为 $38 W/m^2$ 。反之,运用式(1-3)我们也

可求得在某一蓄热率下人体平均温度的上升率。

通常,裸体的人在气温为 $29\sim 31^{\circ}\text{C}$ 的环境中,一般着装的人在 $23\sim 27^{\circ}\text{C}$ 的环境中,既不感到冷,也不感到热,我们称之为处于热中性状态。此时,人体的生理控制系统不必为了维持一定的体温而进行工作,例如增加或减少流向皮肤的血液、出汗、使肌肉收缩或打冷战等。此时,人的皮肤平均温度为 $33\sim 34^{\circ}\text{C}$,直肠温度为 $36.9\sim 37.1^{\circ}\text{C}$,相应的人体平均温度为 $36.3\sim 36.5^{\circ}\text{C}$ 。

如果人处在较热的环境里,通过辐射及对流散失的热量变小,为了维持热平衡,只好增加出汗来使蒸发热量增加。但是在很热的环境里,人体的出汗机能也无法保证人体的热平衡,体温就会逐渐上升。因此,在过热的环境中滞留的时间将取决于人体被加热到危险水平的的时间。通常认为人的核心温度在 $31\sim 43^{\circ}\text{C}$ 之间可以生存。当然,在此温度区间的大部分情况下人已感到相当难受甚至致病,而超出此范围,无论是过高还是过低,都可能致死。

在热平衡方程式(1-1)中,除了 W 项以外,其他各项都直接表示所传递或积累的热量,为了从概念上统一起见,也可定义 $H = M - W$ (W/m^2),表示人体由新陈代谢所获得的净热量。当 $W = 0$ 时, $H = M$,表示新陈代谢产热全部成为人体得热;当 $W > 0$ 时,人体对外界作机械功, $H < M$,说明新陈代谢产热一部分用以对外作功,剩余的才成为人体得热;当 $W < 0$ 时,外界对人体作功, $H > M$,外界功与新陈代谢产热共同成为人体得热。

需要说明的是不同的学者在不同的文献里提出的热平衡方程式的形式各不相同,但是从本质上讲,都是遵循热力学第一定律而建立的方程式,只不过是不同传热方式的表达与归纳形式不同,以及数学运算符号的表达方式不同。在运用热平衡方程式(1-1)时,也不必拘于形式,可以根据实际情况和所需精度,增减某些项目。

具有传热学基本知识的读者一定知道传热有三种最基本的方式:导热、对流与辐射。在热平衡方程式中已包括了人体与环境的辐射传热 R 及对流传热 C ,为什么没有通过热传导的热交换项