

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-527-05

高温作业环境下人体 热平衡与热应激反应及应对措施研究

陈孜虎

(中冶建工集团有限公司 重庆 400084)

【摘要】 随着生活水平的逐渐提高, 高温环境下的作业人员的身体和生理状况的研究越来越受到重视。高温作业环境不仅对人体的生理影响较大, 同时对人体的生理影响也较大, 人体因环境温度的升高而产生的劳动生产率下降及安全事故发生率的升高; 研究高温环境的气候条件与生理反应之间的关系, 提出针对人体的重点部位降温的技术措施, 对我国职业危害防治方面的标准制定具有重要的意义。

【关键词】 高温作业环境; 人体热平衡; 生理反应; 人体局部降温
中图分类号 X921 文献标识码 A

Study on Heat Balance and Heat Stress Response of Human Body under High Temperature Working Environment and Countermeasures

Chen Zihu

(China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd, Chongqing, 400084)

【Abstract】 With the gradual improvement of living standards, more and more attention has been paid to the study of physical and physiological conditions of workers in high temperature environment. The high temperature working environment not only has a great impact on human physiology, but also has a great impact on human physiology. The human body's labor productivity and the incidence of safety accidents due to the rise of the environmental temperature are reduced. The relationship between the climatic conditions and physiological response of the high temperature environment is studied, and the technical measures for cooling the key parts of the human body are put forward to prevent and control the occupational hazards in China It is of great significance to establish standards.

【Keywords】 High Temperature Working Environment; Heat Balance of Human Body; Heat Stress; Local Cooling of Human Body

基金项目: 重庆市科技重大主题专项项目《建筑行业智慧建造关键技术及管控平台研究与示范推广》
(项目编号: 18jszx-cyztzxX0031)

作者(通讯作者)简介: 陈孜虎(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 841015153@qq.com

收稿日期: 2020-05-12

0 引言

据统计, 我国接触到高温的工作人员有 5000 余万, 经常性户外工作人员约有 3000 万, 如建筑工人、野外勘探人员、消防员、值勤交警等; 尤其

是建筑行业, 由于高温环境会给人的身体机能产生负面作用, 影响工作效率和操作安全性。在高温环境下工作, 不仅损害工人的身体健康, 降低劳动生产率, 而且会影响安全生产。据英国学者的研究,

夏季有通风设备的工厂，生产量较春秋季节降低3%，但缺少通风设备的同类型工厂，夏季生产量降低13%。据研究，意外事故率最低的温度为20℃左右，温度高于28℃时，意外事故增加30%^[1]。因此研究高温环境气候条件和人体生理反应的关系，具有重要意义。

1 人体代谢热平衡

与许多生物体一样，人体是一个机械效率很低的生物热机；人体摄取的营养素相当于燃料，并与氧气结合产生代谢热、机械功和身体的增长。在人体热量平衡状态下，代谢热的产生，是通过身体与周围环境的热传递来达到平衡的。当人体和周围环境换热平衡被打破时，人体就会有意识的减轻这种状况，如脱下衣服、改变活动量等方式来重新建立人体和环境之间的热交换的平衡状态，这就是所谓的“人体热平衡调节”^[2]。然而，代谢热 A_c 的一部分可能积聚在体内，导致核心温度 t_c 和皮肤温度 t_{sk} 的短暂升高。

假设的人体模型中身体由平均温度 t_c 的中心核心组成，被平均温度 t_{sk} 的皮肤外层组织包围，简称为平均皮肤温度。值得注意的是，核心温度不是恒定的，但是对于没有经历热激励的健康个体来说，就身体内的位置和肌肉活动而言，核心温度通常在36到38℃之间变化。根据身体表面的位置、衣服、环境空气的温度和速度、排汗速率以及在较小程度上的代谢活动，皮肤温度会有所变化。皮肤的平均温度和湿润度是生理热交换中最重要的参数。对于处于无冷热感环境中的休息者，平均皮肤温度接近34℃。

当表 t_{sk} 超过36℃时，人体就会感觉到“热”，当超过37℃时，就威胁到人体的安全，甚至会致命，因此研究人体热平衡对生理过程的影响具有重要意义。

2 人体的传热

人体代谢能 Q 分为代谢热 Q_M 、做功 W ，计算如式(1)所示^[2]：

$$Q = Q_M + W \quad (1)$$

其中较小部分用于对外做功，大部分热保留在体内，若要保持热平衡，人体就必须和周围环境换热，主要通过呼吸、对流、辐射和蒸发进行。或略

其他很小的影响因素，能量平衡方程，如式(2)：

$$Q_M = Q_{Con} + Q_{Rad} + Q_{Evap} + Q_{Br} + Q_{Ac} \quad (2)$$

式中： Q_M 为新陈代谢热量，W； Q_{Con} 为对流换热热量，W； Q_{Rad} 为辐射换热热量，W； Q_{Evap} 为蒸发换热热量，W； Q_{Br} 为呼吸换热热量，W； Q_{Ac} 为体内储热量，W，用于增加体重，提高核心温度和表皮温度。

新陈代谢热和人体活动、健康状况、环境适应情况及情感状态有关，表1为人体不同状态下产生的总能量 W 和以1.83m²（体重70kg，身高1.73cm）为基础换算的单位面积代谢热 Q_M 。

表1 人体不同状态下的代谢热

Table 1 Metabolic rates for various activities

活动状态	新陈代谢能	
	W (W)	Q_M (W)
睡眠	73	40
坐立	107	58.5
非常轻的劳动	174	95
轻劳动	265	145
中等劳动	448	245
重劳动	622	340

2.1 对流传热

人体热传递的对流、辐射和蒸发模式都受到衣服覆盖程度和热性质的影响。在赤裸身体的情况下，对流传热由公式(3)确定^[2]：

$$Q_{Con} = h_c(t_{sk} - t_d) \cdot A_{sk}$$

$$Q_{Con} = \frac{t_{sk} - t_d}{R_{cl} + 1/(f_{cl}h_c)} \cdot A_{sk} \quad (3)$$

式中： q_{Con} 为单位面积上的对流换热热量，W/m²； Q_{Con} 为人体对流换热热量，W； h_c 为对流换热系数，W/(m²·℃)； f_{cl} 为人体覆盖物（如衣服）的面积影响因子，其值为穿衣时身体表面积和赤身时身体表面积之比； R_{cl} 为衣服单位面积的热阻，(m²·℃)/W，其值与相应对流换热系数 h_{cl} 互为倒数， t_{sk} 为体表温度，℃； t_d 为环境的干球温度，℃； A_{sk} 为人体表面积，m²。

求对流换热量的关键在于确定对流换热系数 h_c ，根据 Stewart 在1982年发表于美国采暖、制冷与空调工程师协会的研究结果，适用于人体的对流传热系数的实验数据，并提出了经验公式。该参数取决于空气的湿度条件、局部（小气候）相对速度，

以及身体的尺寸和外形。当气流速度范围在 0.2~5m/s 时, 计算公式可采用 (4):

$$h_c = 0.00878P^{0.6}u^{0.5} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}) \quad (4)$$

式中: P 为当地大气压力, Pa; u 为微环境风流的有效相对速度, m/s。

2.2 辐射传热

人体的辐射换热发生在身体或衣服的外表面和任何周围介质之间。衣服外表面的温度由式 (5) 给出:

$$t_{cl} = t_{sk} - q_{Con} R_{cl} \quad (5)$$

式中: t_{cl} 为体表衣服表面温度, °C; q_{Con} 为对流换热密度, W/m²。

辐射热 Q_{Rad} 计算式如下^[2]:

$$Q_{Rad} = h_r f_r (t_{cl} - t_r) \cdot A \quad (6)$$

式中: f_r 为辐射角系数, 对坐、站立、卧等姿势取值为 0.7~0.75^[3]; h_r 为辐射换热系数, 对于大多数井下环境, 10~40°C 范围内 $h_r=5 \sim 7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; t_r 为辐射温度, °C; A 为表面积, m²。

2.3 蒸发传热

随着气温持续升高, 人体不断对外做功, 会导致身体开始出汗, 身体表面出现部分湿润。此时身体传热过程将发生重大变化, 就是伴随蒸发冷却现象的出现。首先, 在出汗的整个过程中, 直到体表完全湿润, 蒸发冷却减缓了皮肤温度相对于环境温度持续上升的速度。此外, 在整个这一阶段, 对流和辐射冷却的主导地位逐渐被蒸发传热所取代。当皮肤温度接近并超过约 34°C 时, 皮肤会产生反应, 进一步增强出汗的强度, 蒸发冷却的效果也进一步提高。然而, 当皮肤变得完全湿润时, 只能通过皮肤温度的升高来获得换热量的进一步增加。因此, 皮肤温度恢复了较高的增长率。因此, 蒸发换热在一定区间内维持皮肤温度相对稳定, 有着重要的意义。

蒸发换热 Q_{Evap} 由下式计算:

$$Q_{Evap} = \frac{w(e_{sk} - e)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl}h_e)} \cdot A_{sk} \quad (7)$$

$$R_{e,cl} = \frac{1}{i_{cl} \cdot h_{e,cl}} \quad (8)$$

$$h_{e,cl} = 0.0007h_{cl} \frac{L_{sk}}{P} \quad (9)$$

$$\text{得出: } R_{e,cl} = \frac{h_c R_{cl}}{h_e i_{cl}}$$

带入 (7) 可得:

$$Q_{Evap} = \frac{wh_e(e_{sk} - e)}{\frac{h_c R_{cl}}{i_{cl}} + \frac{1}{f_{cl}}} \cdot A_{sk} \quad (10)$$

式中: w 为皮肤湿润分数, 根据润湿表面占总表面大小 0~1 之间取值, 当湿球温度达到 33°C 时 $w=1$, 一般情况下 $w=0.06$, 取值可参考 ASHRAE^[4]; h_e 为体表蒸发传热系数, W/(m²·°C); e_{sk} 为潮湿表面温度下的饱和蒸气压, Pa; e 为巷道风流实际气压, Pa; i_{cl} 为衣服的蒸发渗透率, 0~1, 赤身时取 1, 一般取值为 0.35~0.41。

2.4 呼吸传热

人体肺部的大的内部面积和湿度提供了良好的热交换效率, 相当于一个高效的换热器。呼吸冷却传热取决于呼吸速率和环境空气的湿球温度。呼吸传热量 Q_{Br} 计算式如下^[2]:

$$Q_{Br} = m_{resp}(S_{out} - S_{in}) \quad (11)$$

式中: m_{resp} 为呼吸空气的质量流量, kg/s; S_{out} 为排除空气焓值, J/kg; S_{in} 为吸入空气焓值, J/kg。

S_{out} 、 S_{in} 可以根据湿球温度计算, S_{out} 与呼出气体湿球温度 t_{ex} 和人体温度、周围空气条件有关, 其计算的公式为^[3]:

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066t_d + 0.0002p_0 \quad (12)$$

式中: t_{ex} 为呼出气体的湿球温度, °C; t_d 为空气干球温度, °C; p_0 为当地大气压力, Pa。

2.5 体内储热量

在平衡状态下, 代谢热的产生是由身体向周围环境的热传递来维持平衡的。然而, 一部分代谢热 A_c 可能在体内积聚, 导致核心温度瞬间升高 Δt_c 和皮肤温度瞬间升高 Δt_{sk} 短暂升高。假设 80% 的身体质量处于核心温度 t_c , 20% 处于皮肤温度 t_{sk} , 热积累速率可近似为:

$$Q_{Ac} = \frac{m_b C_b (0.8\Delta t_c + 0.2\Delta t_{sk})}{T} \quad \text{W} \quad (13)$$

式中: m_b 为体重, kg; C_b 为人体平均比热, 取 3470J/(kg·K); T 为时间, s。

3 环境温度对工作的影响

随着周围气流的冷却功率降低到大约 300W/m² 以下, 人员的工作效率将大大降低, 工作的速度和质量将会下降, 不但生产效率出现下降, 而且劳动事故率也会出现升高。国外学者研究表明:

同感温度22℃工作绩效为100%，27℃开始下降，超过30℃出现快速下降趋势^[5,6]。环境温度和工作效率之间的影响关系曲线如下图1所示^[2]。

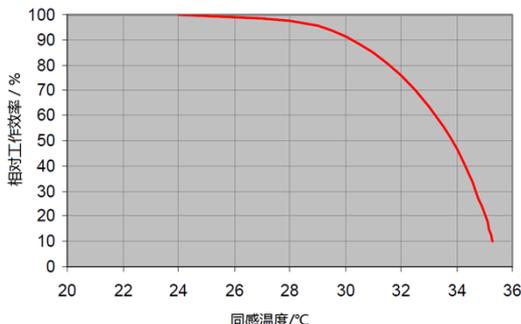


图1 同感温度与工作绩效之间的关系曲线

Fig.1 Influence of Effective Temperature on worker performance

随着空气对人体的冷却能力的下降，劳动生产效率也会出现较大幅度的下降^[2]，两者之间的影响关系统计如图2所示。

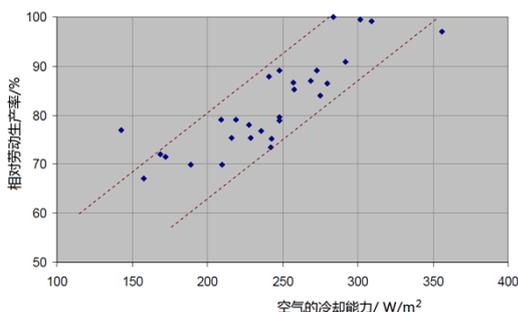


图2 人体周围空气的冷却能力与劳动生产率之间的影响关系

Fig.2 Effect of Air Cooling Power on labor productivity

任何引起身体不适的环境因素都会导致工作人员对工作的注意力与关注度下降，进而引发事故的发生。在机械化生产中，事故所产生的损失可能会更大，因为一个错误的操作会导致更加严重的后果。另外，高温环境会导致工作人员的士气低落、易怒，这也是热应激反应的早期症状，很容易导致紧张劳资关系。必将会对工期产生灾难性的影响。

4 人体热应激反应的影响及处理

人体的体温调节系统依赖于机体温度感受组织的有效反应，血液在全身尤其是人体内部和皮肤组织之间的流动以及排汗。如果这些机制中的任何一种失效，甚至减弱，那么身体将逐渐表现出一种或多种统称为热病的一系列疾病的症状。这些疾病

可能是由可识别的原因引起的独立的、可识别的疾病。然而，对于在湿热环境中工作的工人来说，它们可能同时发生。

典型的初始症状是对任务无法集中注意力和难以保持警惕性。在任何不利的环境中，寻求更舒适环境的愿望是一种心理反应，它既是体温调节作用的一部分，也是身体防御机制的一部分。当舒适环境的需求被抑制时，可能会导致易怒或表现出愤怒情绪。即使是对这种影响不敏感的人也可能会出现这种情况。身体症状通常首先表现为失去协调性和灵活性，严重影响安全生产。

因此，即使从这些中暑的最初症状来看，体力劳动和脑力劳动的生产率都会受到影响，士气很可能会低落、安全标准也会下降。

中暑的主要症状有以下几个方面：

(1) 热晕厥，会导致脑部暂时缺血，丧失意识。

(2) 热疲劳，血液流动主要作用之一是将身体核心热量带走，通过皮肤进行散热，如果供血不足就会引发中暑，身体水或盐分不足会导致脱水，造成供血不足。其表现的特征是疲劳、头晕、头痛、恶心、手脚指疼痛或麻木、呼吸困难、心悸、视力模糊、昏厥、皮肤冰冷、脸色发灰或发红。

(3) 热痉挛，人体血液电解平衡遭到破坏后，就会产生手臂、腿和腹部发生疼痛性肌肉收缩，这是由于盐分缺失造成的。

(4) 热射病，是身体体温调节出现障碍时，电解质代谢紊乱、神经系统功能损害的症状的总称。是一种严重威胁生命的急性病，不及时治疗，可引起抽搐甚至死亡、永久性脑损害或肾脏衰竭等后果。

当发生热应激反应后，轻者引起劳动效率下降，提高安全事故的发生概率，重者导致身体的严重损伤，甚至导致死亡。因此，必须重视高温环境下作业工人的温度环境。

对于不同型式的中暑表现^[6]，应及时采取对应的治疗措施：发生热晕厥、热疲劳时，尽快让病人平躺在较凉爽的地方，脱下衣物，使脑部供血恢复。间断的移动身体可降低热晕厥发生率，给患者多补充水分。热痉挛是由于缺盐造成的，医学建议可用不高于0.1%的盐水及时治疗。热射病的常规治疗方法是立即采取有效的降温措施，直到身体核心温度得到控制。降温的急救方式包括：用水或者空气冷

却身体, 介质温度不应低于15℃, 避免温度过低导致表皮毛细血管收缩。

5 预防措施

针对高温工作环境的气候条件, 做好中暑的预防措施, 具有十分重要的意义, 主要方法如下:

(1) 采取人体局部温度控制装置, 对人体体表温度进行有效控制;

(2) 作业场所提供冷饮、盐水、维生素C等饮品;

(3) 加强培训, 让高温场所作业人员了解出现中暑的身体反应, 从而及时准确的判断自身的工作状态, 避免严重中暑症状的发生;

(4) 进行热习服训练, 通过体检, 筛选出能够适应热环境工作的年轻力壮的工作人员, 进行热习服训练^[2]。

以上方式方法中, 最行之有效的办法是采取人体局部微环境温度控制措施, 通过制冷装置对人体体表温度进行有效控制, 如半导体制冷空调服、相变材料空调服、压缩制冷空调服等。半导体空调服可以降低人体微环境气温降低8~10℃, 持续运行时间4h左右, 能够满足工作时间的要求, 另外, 风机可以保持人体体表周围气体循环保持一定的速度, 进一步增加体感舒适性, 降低高温环境对人体产生的伤害, 提高劳动效率, 增加生产安全性。

6 结论

在高温环境中工作, 不仅要考虑生理影响、也要考虑心里影响, 当人体对环境散热能力下降到300W/m²以下, 劳动效率就会大大降低。高温的工作环境会导致注意力不集中、安全警惕性下降、士

气低落、事故率升高、中暑等。国外学者研究表明同感温度22℃工作绩效为100%, 27℃开始下降, 超过30℃出现快速下降趋势。

通过对人体热平衡、常见中暑疾病症状及预防措施的研究, 可以科学准确的掌握热环境和人体热平衡之间的关系, 对高温工作环境的人员管理与组织、科学防治、应急治疗措施等具有一定的指导意义。同时, 改善高温作业环境工人的工作条件, 不仅能够降低职业危害、保护工作人员的生命与人身安全, 并且可以提高工作效率、降低安全事故的发生, 具有显著的社会和经济效益。

参考文献:

- [1] 郭伏, 钱省三. 人因工程学(第2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 36-48.
- [2] Malcolm J. McPherson. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering [M]. Kluwer Academic Publishers, 1993: 2-39.
- [3] ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers [M]. Fundamentals Handbooks, 1989: 672-684.
- [4] Gagge J. The prediction of thermal comfort when thermal equilibrium is maintained by sweating [M]. ASHRAE Trans, 1969, 75: 108.
- [5] Winham C H. The physiological and psychological effects of heat [M]. Aviat Space Environ Med, 1974: 352-369.
- [6] Visagie M E. Changes in vitamin A and C levels in black mine workers [J]. S. African Med. Journ, 1974, 48: 2502-2506.