

矿用气体降温服通风参数对人体皮肤温度的影响

毛聪¹, 游波^{1,2*}, 李刚², 韩巧云³, 刘剑锋¹, 饶玲瑜¹

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2.金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000;
3.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为了探讨矿用气体降温服通风参数对人体皮肤温度的影响,通过真人受训实验得出人体产热率,构建人体皮肤-微空间-气体降温服三维物理模型,采用数值模拟的方法研究在高温高湿环境下矿用气体降温服的通风温度、风量对人体皮肤温度的影响规律.结果表明:着装气体降温服后,人体的不同躯干部位皮肤温度存在差异,左部皮肤温度低于右部,左肩降温最好;气体降温服与通风温度约成线性关系,通风量分别为15,10,5 m³/h时,通风温度每降低5℃,人体平均皮肤温度分别降低约0.7,0.5,0.3℃.研究结果可为矿井降温个人防护装备的推广与应用提供理论依据.

关键词:气体降温服;通风参数;产热率;皮肤温度;个人防护

中图分类号:X968 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)04-0067-07

Research on the Influence of Ventilation Parameters of Mine Gas Cooling Suit on Human Skin Temperature

MAO Cong¹, YOU Bo^{1,2*}, LI Gang², HAN Qiaoyun³, LIU Jianfeng¹, RAO Lingyu¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. State Key Laboratory of Metal Mine Safety and Health, Ma'anshan 243000, China;
3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to explore the influence of the ventilation parameters of the mine gas cooling suit on the human skin temperature, the human body heat production rate is obtained through the human training experiment, the human skin-microspace-gas cooling suit three-dimensional physical model is constructed, and the numerical simulation method is used to study the influence law of ventilation temperature and air volume of mine gas cooling suit on human skin temperature in high temperature and high humidity environment. Results show that the skin temperature of different trunk parts of the human body is different when wearing a gas cooling suit; the skin temperature of the left part is lower than that of the right part, and the left shoulder has the best cooling effect. The gas cooling suit has a linear relationship with the ventilation temperature. When the ventilation volume is 15, 10, 5 m³/h, the average skin temperature of the human body decreases by about 0.7, 0.5, 0.3℃ for every 5℃ decrease in the ventilation temperature. The research results can provide a theoretical basis for the promotion and application of personal protective equipment for mine cooling.

Keywords: gas cooling suit; ventilation parameters; heat production rate; skin temperature; personal protection

收稿日期:2021-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174179);湖南自然科学基金资助项目(2021JJ40210);金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题资助项目(2020-JSKSSYS-03);湖南省教育厅优秀青年资助项目(20B217);湖南省大学生创新创业训练计划资助项目(S202010534004)

*通信作者,E-mail:494907336@qq.com

随着科学技术发展和人们职业安全健康防范意识的提高以及国家的职业卫生管理标准规范化,提高人体在作业环境中的热舒适性势在必行.许多特殊行业都存在高温高湿环境,常见有冶金工业的炼焦、炼铁、炼钢作业;机械制造工业的铸造、锻造、热处理作业;纺织工业的印染、造纸及煤矿行业的采矿作业等.人们长期暴露在高温高湿条件下从事高强度体力劳动时,导致人体热平衡失衡、水盐代谢失调等,严重时会引起热中暑、热痉挛、热衰竭以及脱水,工作效率会降低,生理和心理健康会遭受到威胁.因此,需设计研究一款气体降温服,其作用可有效降低人体皮肤温度,保护着装者免受热害,提高人体热舒适性.

国内外学者已经对气体降温服进行了大量研究.英国科学家^[1]研制出一套简易降温系统:通过设计通风管路把软管插进衣内空间,接入坦克通风口,通过动力装置把户外较低温空气抽进衣服,可以使温度降至 58 ℃;柳源等^[2]针对矿井热害研制了气冷式的降温防护服,但此类降温服装需要使用电源或蓄电池,不满足矿井的防爆要求;曾彦彰等^[3]研制出一款利用风扇阵列工作时产生强制对流使人体皮肤汗液蒸发散热的人体降温空调服,该降温服能有效降低人体皮肤温度,穿着轻便;洪福银^[4]研发出躯干头部共同降温的风扇降温服,将通风调整件装置在服装后背上部和后领处,形成立体通风道,空气通过后领通风调整件到达头部,让头部实现同步降温;刘何清等^[5]采用真人实验的方法,研究人上体躯干穿着气体冷却服时衣内微空间气候参数及上体躯干皮肤温度受环境温度、劳动强度和通气量变化的影响;Maurissa 等^[6]人将热电制冷器应用于气体降温服内,实验测得空气温度可被降低约 10 ℃;Yi Wen 等^[7]研究了降温服风扇与电池的最佳搭配,但风扇提供的空气流量随着使用时间逐渐降低,降温能力逐渐减小.国内外对矿用气体降温服的实验研究充分,但是仿真模拟较少.本文采用数值模拟的方法,构建人体皮肤-微空间-气体降温服三维物理模型,探讨矿用气体降温服通风参数对人体皮肤温度的影响,为矿井降温个体防护装备的推广与应用提供理论依据.

1 通风服工作原理

正常状态下,人体的产热和散热量处于平衡状态,当人体处于高温高湿环境或重体力劳动强度时,人体产热量急剧增加,人体产热量大于散热量,人体通过汗腺排液难以维持体温平衡,热量便会累积从而使体温上升.人体着装气体降温服后,在人体皮肤表层和服装内层之间存在空气层,这一微小空间被称为人体皮肤-微空间-服装微气候区(如图 1).在人体这一服装微气候区通风后会形成强制对流,服装微气候区中空气流动性显著增强,会带走些许热量;气体介质通过气体降温服内通风管路流动,直接作用于人体皮肤表面,人体皮肤表面的蒸发散热以及与服装微气候区的对流换热会增加,从而降低人体皮肤温度,增加人体热舒适感.

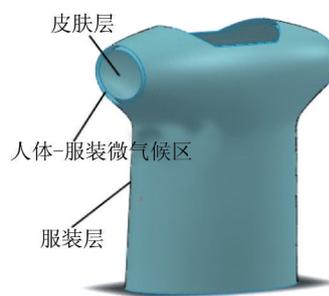


图 1 人体皮肤-微空间-服装微气候区

2 人体产热率

2.1 实验设计

实验邀请了 20 名健康男性研究生,平均年龄(24±2)岁,平均身高(1.75±0.08)m,平均体重(75±10)kg,平均体重指数(24.4±1.9)kg/m².提前进行实验培训,确保实验数据准确有效.采用湖南科技大学资安学院人工环境气候舱模拟矿井条件,温度设定为(30±0.5)℃,相对湿度设定为 80%±2%;采用美国 MAXIM 公司的 DS1922L 温度传感器测量人体皮肤温度,精度 0.05 ℃;一种标准的水银温度计,测量范围为 0~50 ℃,精度 0.05 ℃;运用小米心率手环测量人体心率;服装材料选用无毒无害,柔软性好防水且穿戴轻便,易清洗的食用级硅胶材料,实验设备如图 2 所示.



图 2 实验设备

实验前,实验者在室内(温度为 25 ℃,相对湿度为 50%)静坐休息 30 min,达到不冷不热,无显汗的舒适状态.之后进入人工模拟环境舱,在环境温度为 30 ℃,相对湿度 80%时,持续 40 min,分别测得人体静坐和重体力劳动强度(通过在动感单车上运动,以心率指标的劳动强度分级方法^[8],动态心率稳定在 120~135^[9],模拟人体工作时的重体力劳动强度)时人体上部躯干 8 个不同部位的皮肤温度,皮肤温度面积加权平均值结果见表 1.

表 1 人体皮肤温度

运动方式	皮肤温度/℃								标准差	
	左胸	右胸	左腹	右腹	左肩	右肩	左腰	右腰		平均温度
静坐	32.62	32.73	33.04	33.16	33.36	33.58	32.89	32.84	33.05	0.28
重体力劳动	33.58	33.80	33.23	33.55	34.41	34.19	33.43	33.25	33.70	0.37

2.2 产热率计算

实验结果表明在高温高湿环境(环境温度为 30 ℃,相对湿度 80%)下,从事重体力劳动强度,人体皮肤温度升高.其原因为随着劳动强度增大,人体在高温环境中,环境对人体的对流和辐射作用加强,人体新陈代谢的作用增强,产热量大于散热量,导致人体皮肤温度上升.根据热能式(1)计算得出结果见表 2.

$$Q_1 = CM\Delta T. \tag{1}$$

$$\text{推导得出: } \nu = \frac{Q_1}{Vt} = \frac{CM\Delta T}{Vt} = \frac{\rho_1 C\Delta T}{t}.$$

式中: C 表示人体皮肤的比热, $J/kg \cdot ^\circ C$; ν 表示人体产热率, W/m^3 ; ρ_1 表示人体皮肤的密度, kg/m^3 ; t 表示时间, s ; M 表示人体质量, kg ; ΔT 表示温度变化量, $^\circ C$.

表 2 不同躯干部位产热率

躯干部位	左胸	右胸	左腹	右腹	左肩	右肩	左腰	右腰
产热率/(W/m^3)	1 597.1	1 780.1	316.1	648.8	1 247.7	1 014.8	898.3	682.7

3 数值模拟

3.1 模型设计

参考国家标准 GB/T 5703—1999 上躯干物理模型各项尺寸数据^[10],设计上体躯干物理模型气体降温服,利用 SolidWorks 软件能构建复杂的曲面设计功能来构建着装人体上躯干三维物理模型.构建厚度为 10 mm 的服装微气候区,其内部布置有 1 根直径为 8 mm 的通气横管和 8 根直径为 6 mm 相互垂直的竖管的通气管路系统,每根供气竖管间隔约 80 mm,且每根供气竖管上每 40 mm 等距布置 17 个直径为 4 mm 的出气小孔,小孔方向向里;入口在服装左侧,直径为 8 mm 且将模型分为 8 个部分,其模型尺寸详情见表 3 及图 3.

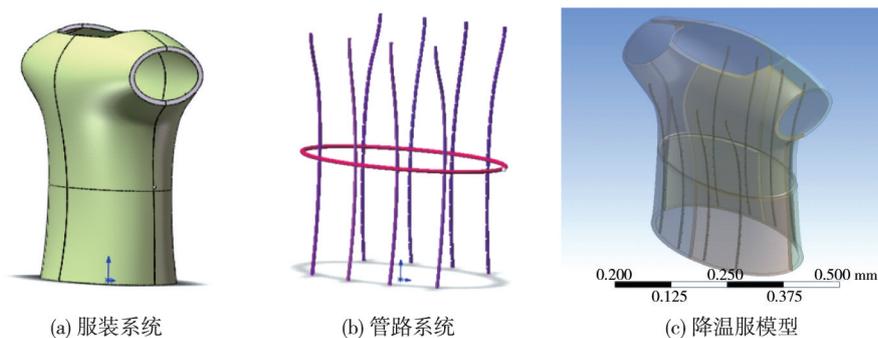


图3 服装模型设计图

表3 男性上躯干模型尺寸

尺寸	高度	肩宽	臀宽	胸围	腰围	臀围
数值/mm	650	540	390	1 036	998	1 036

3.2 网格划分

本文利用有限元体积法 Ansys Meshing 对模型进行适应性强、拟合实体精确的非结构化四面体网格划分,控制网格增长率在 1.2 以内,在入口、小孔及管壁处进行网格加密,如图 4 所示,网格数量为 5 085 524,如图 5 所示。

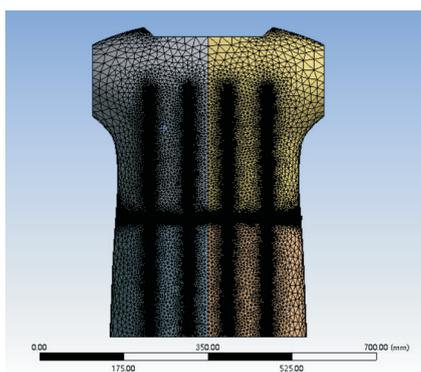


图4 网格划分

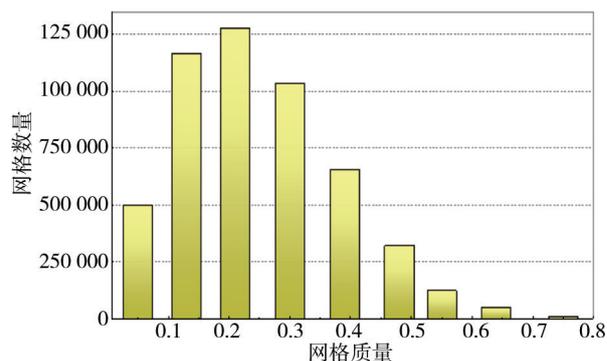


图5 网格质量分布

3.3 控制方程及边界条件设置

本文所运用的数学模型控制方程^[11-13]:

质量守恒控制方程(又称连续性方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; u, v, w 分别为速度 U 沿 x, y, z 三个方向的速度矢量。

能量守恒定律控制方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T. \quad (3)$$

式中: c_p 为定压比热容; S_T 为内热源项,表示的是由于黏性作用造成的动能转化为热的耗散过程。

Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型采用了新的、更为合理的湍流黏度公式; ε 是由涡流脉动均方根传输方程推导得来,其满足对雷诺应力的约束条件。

Realizable $k - \varepsilon$ 模型^[14]的湍动能 k 和湍流耗散 e 运输方程如式(4)和式(5):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + S_\varepsilon. \quad (5)$$

其中 $C_1 = \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$.

式中: G_k 为平均速度产生的湍动能; G_b 为浮力产生的湍动能; Y_M 是可压缩湍流脉动膨胀到全局流程中对耗散率的贡献项; $C_{1\varepsilon}, C_2, C_{3\varepsilon}$ 为常量; S_k, S_ε 为自定义湍动能项和湍能耗散源项.

文章数值模拟中的边界条件设置:将全部的出气小孔设置为 interior 条件,采用对流换热与辐射混合 (MIX) 处理皮肤边界,设置为 wall 条件,袖口领口及服装底部设置为压力出口 pressure-out 条件,选择半隐式算法 SIMPLE 算法,高曲率计算区域流动常用的 PRESTO! 处理压力方程,对于动量、湍流动能、湍流耗散率以及能量,采用稳定好且精度高的二阶迎风格式进行离散化处理,进行模拟分析.

对气体降温服内流动与换热数值模拟研究过程做出以下假设:(1) 气体降温服内气体的流动与换热状态为稳态;(2) 通入该气体降温服中的空气流动为不可压缩流体流动;(3) 不考虑基础服装与通气管道的厚度;(4) 忽略由于呼吸散热及人体皮肤汗液蒸发所造成的热量损失;(5) 忽略环境湿度对模拟过程的影响;(6) 人体所处的外界环境空气处于静止状态.

4 结果与讨论

运用 ANSYS 软件,模拟运算稳态下各个物理变量的残差值都达到收敛标准时人体的皮肤温度,通过控制变量法分别研究通风温度、通风量对人体皮肤温度的影响.人体皮肤温度越低,表明气体降温服降温效果越好.

4.1 人体躯干温度及分布

在 30 ℃ 环境温度,入口设置通风气流温度为 30, 25, 20 ℃,通风量 Q 为 15, 10, 5 m³/h (换算成气流速度 82.95, 55.30, 27.65 m/s) 时,探究着装气体降温服后人体不同躯干部位的皮肤温度,其结果如图 6 所示.

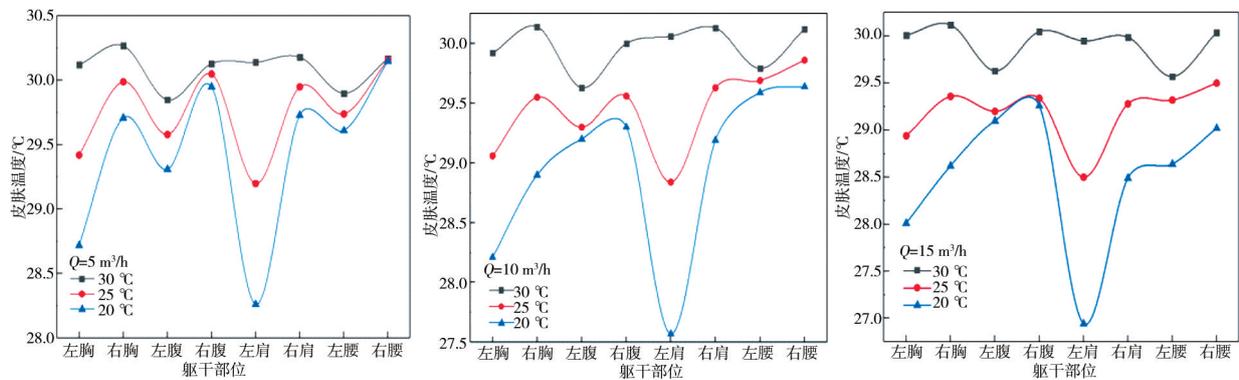


图 6 不同躯干部位的温度

由图 6 可知,气体介质通过在气体降温服管路系统的流动,从服装管路上的出气小孔流入微气候区并吹到人体皮肤表面,再由服装领口袖口等处流出到周围环境中,能加强对流换热及辐射换热与微环境中的气体进行热量交换,加快皮肤表面汗液蒸发,从而降低人体皮肤温度,提高着装者的人体热舒适性.气体降温服有显著的降温效果,服装管路系统复杂,不同躯干部位的冷却性能存在差异,总体而言,左部效果明显好于右部,左胸和左肩部位的效果最好.

4.2 人体皮肤温度场及通风管路中气体流速分布

通风温度为 30 ℃、通风量分别为 15, 10, 5 m³/h 时,人体皮肤温度场分布如图 7 所示,气体降温服通风管路中气体速度分布如图 8 所示.

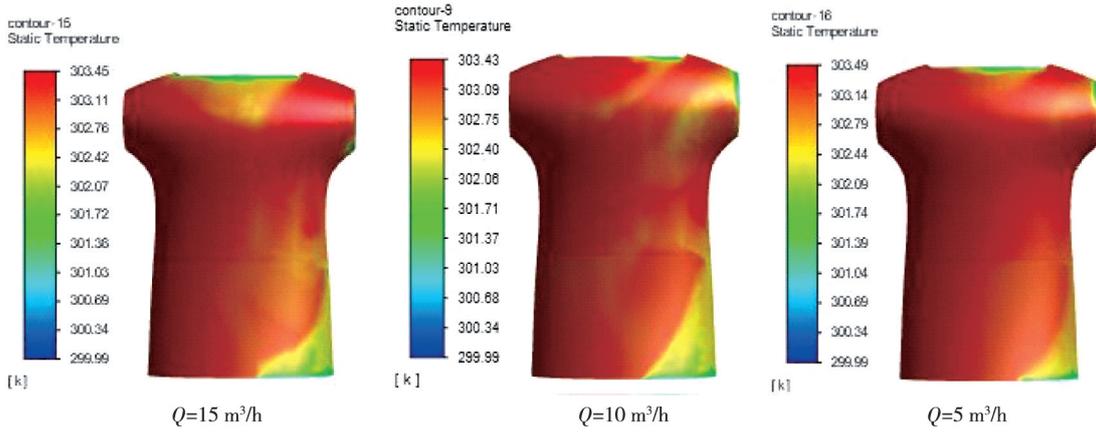


图7 人体皮肤温度场分布

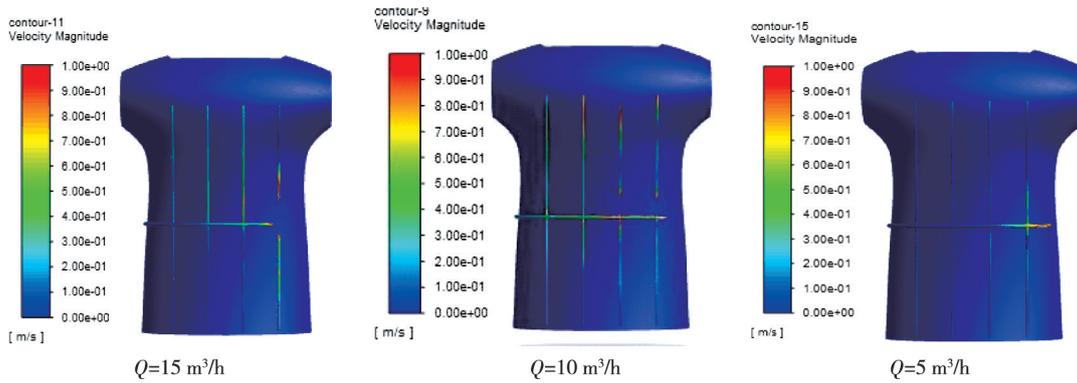


图8 通风管路中气体流速分布

由图7和图8可知,增大入口风量,通风管路中气体流速明显增大,越靠近通风入口,流速越大.由于气体降温服构造复杂,管路系统分支多,出气小孔数量多,导致通气管路中风流阻力大,风流速度逐渐减弱,导致身体右部躯干汗液蒸发散热、人体与微气候区对流换热及辐射换热明显不如左部躯干.同一环境温度下,风量增加,通风管路中气体速度流速并无明显增大,对人体皮肤温度降幅不大.

4.3 通风温度、通风量对人体平均皮肤温度的影响

当人体处于高温高湿的工作环境或高强度劳动的工作时,蒸发散热量和辐射散热量将会受到很大程度的限制,皮肤温度会逐渐升高,当皮肤温度与核心温度相一致时,人体已达到热应力忍耐极限,应立即停止工作.人体平均皮肤温度反应气体降温服降温效果并可用于评价高温高湿工作环境下人体热舒适性.通风温度与通风量对人体面积加权平均皮肤温度的影响及关系如图9和图10所示.

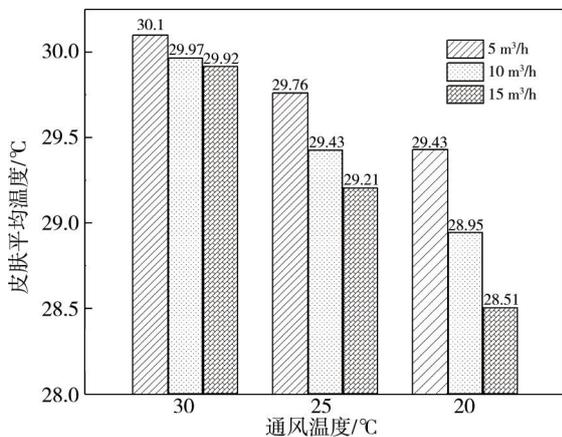


图9 通风温度与通风量对人体平均皮肤温度的影响

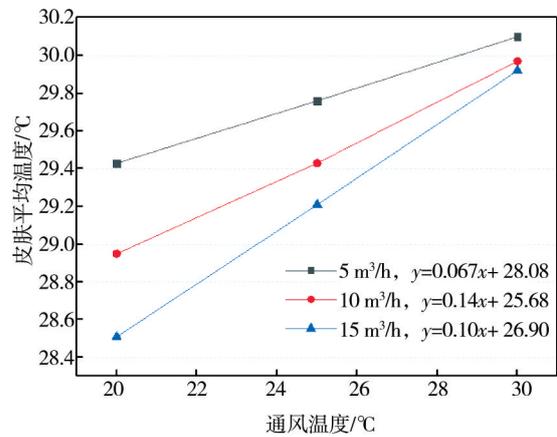


图10 通风温度与平均皮肤温度的关系

由图9可知,随着通风量的增加,通风温度的降低,冷气体直接作用于皮肤表面,人体的蒸发散热作用加强,微气候区对人体的对流换热增加,人体的热调节机制会对外界环境的改变做出相应的调整,人体平均皮肤温度会降低.通风量分别为15,10,5 m³/h时,通风温度每降低5℃,人体平均皮肤温度分别降低约0.7,0.5,0.3℃.一定范围内,通风量越大,通风温度越低,气体降温服的降温效果越好,人体的热舒适感越强.

由图10可知,相同风量下,人体平均皮肤温度与通风温度约成线性关系,通风量分别为15,10,5 m³/h时,通风温度每降低1℃,人体平均皮肤温度降低0.100,0.140,0.067℃.相同通风温度条件下,通风量为10 m³/h时,气体降温服降温效果最好.通风温度每降低1℃相比于通风量提高1 m³/h,对平均皮肤温度的影响更大.

5 结论

1)设计的气体降温服能明显降低人体温度,一定范围内,降低通风温度相比于增大风量更能降低皮肤温度.

2)人体皮肤温度与气体降温服入口位置有关,人体皮肤温度呈“左冷右热”的规律.

3)气体降温服在通入相同通风量的情况下,人体平均皮肤温度与通风温度约成线性关系.通风量分别为15,10,5 m³/h时,通风温度每降低1℃,人体平均皮肤温度约降低0.100,0.140,0.067℃.

参考文献:

- [1] 赵蒙蒙,柯莹,王发明,等.通风服热舒适性研究现状与展望[J].纺织学报,2019,40(3):183-188.
- [2] 柳源,陈宁,王磊,等.矿井热害气冷式个体防护服设计及研制[J].煤炭工程,2011(7):120-121.
- [3] 曾彦彰,邓中山,刘静.基于微型风扇阵列系统的人体降温空调服[J].纺织学报,2007(6):100-105.
- [4] 洪银福.一种冷却服:CN107440181A[P].2017-12-08.
- [5] 刘何清,高黎颖,游波,等.影响气体冷却服热舒适性因素的实验[J].西安科技大学学报,2018,38(6):910-918.
- [6] D' Angelo M, D' Angelo J, Almajali M, et al. Augmented cooling vest system subassembly: Design and analysis[J]. Energy Conversion & Management, 2014,79:140-145.
- [7] Yi W, Zhao Y, Chan A. Evaluation of the ventilation unit for personal cooling system (PCS)[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017, 58:62-68.
- [8] 廖斌,杨琴,高慧.体力劳动强度评价方法研究[J].中国安全生产科学技术,2013,9(2):162-166.
- [9] 王静,蔡林,陈学伟,等.心率作为评价体力劳动强度优选指标的探讨[J].中华劳动卫生职业病杂志,2017,35(3):196-198.
- [10] 呼慧敏,晁储芝,赵朝义,等.中国成年人人体尺寸数据相关性研究[J].人类工效学,2014,20(3):49-53.
- [11] 许鹏飞,唐豪.气冷服近体调温性能的数值分析[J].低温与超导,2017,45(8):68-72.
- [12] 林家泉,王瑞婷.A320飞机客舱热舒适性及PM₁₀浓度分布的数值模拟[J].系统仿真学报,2018,30(1):164-170.
- [13] 吕孝鲁,陈振雷,何海涛,等.抽油烟机新风系统对厨房热舒适性的影响研究[J].计算机应用与软件,2019,36(7):99-104.
- [14] 闫晓惠,陈新,李华煜.基于标准和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型的阶梯式溢洪道流的数值模拟[J].水利科技与经济,2015,21(10):29-31.