

黄敏华,郝小礼,张开通,等.睡眠过程中不同被子组合的热阻[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):32-37.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.005

Huang M H, Hao X L, Zhang K T, et al. The Heat Resistance of Different Quilt Combinations During Sleep[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,35(4): 32-37. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.005

睡眠过程中不同被子组合的热阻

黄敏华¹,郝小礼^{2,3*},张开通²,邢庆伟²,杨轲²

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;

3.湖南科技大学 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心,湖南 湘潭 411201)

摘要:人体在睡眠过程中,被褥热阻对睡眠热舒适性的影响是不可忽略的.被褥热阻作为睡眠热舒适性方程中的一个重要变量,会受被子结构、材料、空气渗透率和被子组合层序等主观因素影响,同时也会受到睡眠环境中的风速、空气湿度、空气层间隙等客观因素的影响.本文通过分析被子覆盖层序、被子厚度以及被子之间存在的空气层厚度对满足睡眠保温性能的影响,提出3种计算模型,最终根据实际情况和理论知识基础,建立一种计算被褥热阻的数学模型,并根据该模型得出最有利于睡眠保温的被子组合层序.

关键词:被褥热阻;被子组合层序;空气层间隙;睡眠热舒适性

中图分类号:TU111 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)04-0032-06

The Heat Resistance of Different Quilt Combinations During Sleep

Huang Minhua¹, Hao Xiaoli^{2,3}, Zhang Kaitong², Xing Qingwei², Yang Ke²

(1.School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3.Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricated Passive House, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The human body in the sleep process, bedding thermal resistance to sleep comfort is not negligible. As an important variable in the sleep comfort equation, it is affected by subjective factors such as quilt structure, material, air permeability, and quilt combination sequence, and is also affected by wind speed, air humidity, and air gap in the sleeping environment and other objective factors. Three kinds of calculation models were put forward based on the analysis of the influence of the quilt cover sequence, the thickness of the quilt and the thickness of the air layer on the performance, finally, according to the actual situation and theoretical knowledge, a mathematical model for calculating the thermal resistance of bedding was established, and according to the model, the most convenient quilt combination sequence was obtained

Keywords: thermal resistance of bedding; quilt combination sequence; air gap; sleep thermal comfort

睡眠过程中,人体既需要向外界环境散热也需要保温,如果睡眠环境温度过低,被子选取不当,睡眠质量就难以得到保障^[1].从睡眠热舒适性方程的角度出发,可以看出影响睡眠热舒适性的因素很多,主要有6个,分别是空气风速、空气温度、空气相对湿度、平均辐射温度、睡眠代谢和热阻,其中又把前面4项划分

收稿日期:2017-05-31

基金项目:湖南省教育厅重点资助项目(19A180)

*通信作者,E-mail: haoxiaoli2002@aliyun.com

为环境因素,后2项划分为非环境因素^[2].环境因素可以通过空气调节来实现,这也正是目前使用最多的用来调节室内睡眠环境的方法.但是人为创造出来的舒适环境也存在一些弊端,如空气湿度过高或者过低、空调风速使人产生吹风感、空调器末端噪声影响睡眠质量等.所以,通过改变非环境因素使人体达到睡眠热舒适是本文的研究重点,但是在2个非环境因素中,要想改变人体睡眠过程中的代谢量是很困难的,因为代谢这种生理现象会受睡眠状态的不同而变化,剩下的就是对被子热阻进行研究^[3].另外,到目前为止,相关学者虽然对前面4项环境因素的研究已取得可观成果^[4],但是非环境因素中的被褥热阻对睡眠热舒适性的研究涉及多学科领域,既包括被子本身的结构和材料等因素,也包括人体睡眠过程中的生理条件,至今没有开展大量研究^[5].所以,本文采取的研究过程是先结合传热学知识对人体睡眠过程中的被褥传热进行分析,把各层热阻假想成串联电路中的电阻,提出3种计算热阻数学模型,采用最合适的一种数学模型研究被子厚度、层序和空气层厚度对被褥热阻的影响.

被褥热阻是在人体睡眠过程中被子阻止热量向外界环境传递的综合性参数.根据《ASHRAE手册基础》^[6],最准确的测量热阻的方法有2种:一种是通过暖体假人进行测量,另一种方法是直接对睡眠人体进行测量.这2种方法都可以测出热阻,并存在各自优势,但也存在一定的弊端:第一种方法中暖体假人散热是均匀的,与实际人体不符;第二种方法中实际人体睡眠过程会有出汗或者翻身现象,这些都会影响热阻值的大小.当然,对于大多数情况,热阻值很难直接进行测量,应用表格列举出各种材料热阻、水蒸气有效渗透率等,根据实际情况逐个累加就成为求解热阻的另一种方法,这种方法操作起来很方便,然而被褥热阻不仅仅是各种材料热阻的逐个叠加,还要考虑叠加效应,如层序、厚度以及层与层之间的空气层作用等^[7].为了研究热阻与人体热舒适性的关系,很多学者做了相关实验或模拟,并得出部分结论,大致可把这些研究分为2类.第一类是基于人体代谢产热、皮肤表面水蒸气压力对热阻值的影响,英国拉夫堡大学的George Havenith等^[8]对这类因素做了研究,在另外一篇文章中,他们也研究服装材料和透气性对热阻影响^[9].另一类是服装被褥类型、使用顺序对热阻值的影响,香港理工大学的Shingming Deng等^[10]运用试验的方法对不同被子组合热阻进行测量;印度理工学院的Apurba Das等^[11]采用理论加实验的方法研究多层服装热阻与热舒适性的关系,把多层服装保温层近似当成平面处理;美国加利福尼亚大学的Stefano Schiavon等^[12]根据室内外温度变化建立一种动态预测人体所需热阻模型;另外,Matthew P Morrissey^[13]研究了风速、人体移动等对服装热阻的影响.但本文所研究的是睡眠环境,风速不会超过0.5 m/s,人体翻身次数也不会很多,故本文没有考虑.

1 被褥热阻值计算

在进行被褥热阻值计算时,需做出如下假设:

1) 人体达到睡眠热舒适性的情况下,代谢率和睡眠姿势均保持不变,皮肤表面水蒸气分压力较低,不存在翻身现象.

2) 不考虑人体服装热阻的影响.

3) 睡眠传热过程中,没有考虑人体下表面通过床垫面的散热,这是因为和被褥热阻值相比,床垫面热阻远远大于被褥热阻值,通过床垫面的传热量远远小于被褥覆盖部分的散热,故假设这部分传热可以不考虑.

1.1 被褥热阻计算导出公式

根据人体睡眠热平衡方程导出计算热阻公式如式(1)所示.

$$R_{\text{sys}} = R_{\text{cl}} + \frac{1}{hf_{\text{cl}}} = \frac{t_{\text{sk}} - t_{\text{o}}}{q} \quad (1)$$

式中: R_{sys} 为睡眠系统总热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; R_{cl} 为被褥热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; h_t 为总显热传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; f_{cl} 为睡眠系统面积因素; t_{sk} 为皮肤表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{o} 为环境空气温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为人体睡眠散热率, W/m^2 .

在式(1)中,满足人体睡眠状态皮肤表面温度 t_{sk} 为 34.6°C , 人体睡眠散热率 q 为 $40 \text{ W}/\text{m}^2$ ^[14], 故可以

根据环境温度变化计算出睡眠时所需要的热阻,进而选取合适的被子.虽然利用上述公式可以计算出环境温度与热阻之间的关系,然而并没有从本质上研究不同被子组合、厚度和空气层间隙对热阻的影响.

1.2 被褥理想状态热阻值计算

在计算被子热阻时,可以把它近视当做平壁处理.假设人体所盖被褥只有一层,第一层被子与人体接触的部分存在一层空气间隙,因为空气层比较薄,故该层空气假定不发生流动,不考虑空气对流传热,当然也可以分析空气间隙不存在的可能性.讨论的结果并不限于只有一层被子的情况,对任意层被子的壁面也同样适用,被褥理想状态传热原理和串联热阻电路模型如图 1 和图 2 所示,各层壁面串连在一起,类似于一个串联电路,此处没有考虑最外层对流传热热阻,故总热阻等于各层热阻之和,即

$$R_t = \sum_{i=1}^3 R_i = R_1 + R_2 + R_3; \tag{2}$$

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \tag{3}$$

式中: R_t 为被褥总热阻, $(m^2 \cdot K)/W$; R_i 为每一层相应的热阻, $(m^2 \cdot K)/W$; δ_i 为每一层相应的厚度, m ; λ_i 为每一层相应的导热系数, $W/(m \cdot K)$ [15].

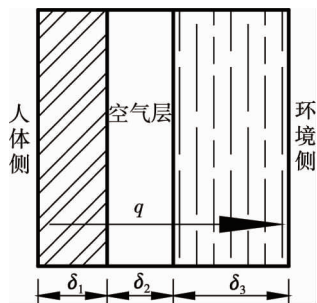


图 1 被褥理想状态传热原理



图 2 串联热阻电路模型

图 1 中,假定人体皮肤表面与第一层被子接触良好,不存在空气间隙,即没有附加热阻,而相邻两被子之间存在空气层,空气层厚度视具体情况而定.人体散热量经皮肤表面通过最内层被子传递到中间空气层,空气层热量经最外层被子与空气侧发生对流、辐射传递到周围环境,那么热量在整个传递过程中就有这样一种关系,当人体皮肤表面温度和环境温度一定时,人体睡眠散热率 q 是不变的,经过每一层的热流密度也会相等,也就是说改变内外层被子顺序的保温效果一样.然而,当热流密度通过的不是平壁面而是半圆筒壁面,虽然总热流量恒定,但是不同半径处壁面表面积不同,热流密度也会不相同,故当被子顺序改变时,如蓬松的蚕丝纤维被子盖于外侧,棉纤维被子盖于内侧,改变两者的叠放顺序,有可能影响总热阻值,所以需要进一步分析.

1.3 被褥实际状态热阻值计算

与前面分析被褥理想状态串联热阻电路的原理相同,不同的是此处随着半径变化,壁面单位面积热流量并不相等.单层和两层被褥实际传热原理如图 3 和图 4 所示.选取生活中常见的几种被子材料,各种被子物理参数如表 1 所示.两种情况下最里面的部分是人体躯干,躯干与第一层被子不完全接触和完全接触,当不完全接触时,存在一层空气间隙,否则无间隙,两层被褥的情况则需要考虑被褥与被褥间还存在一层空气间隙,空气间隙都算入层数.

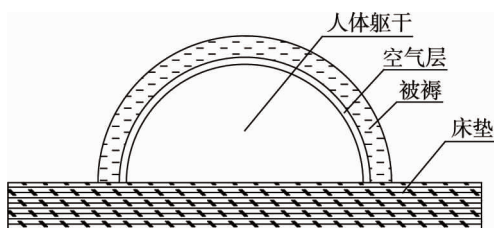


图 3 单层被褥实际传热原理

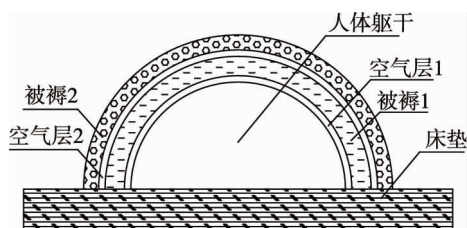


图 4 两层被褥实际传热原理

表1 不同被子物理参数

被子序号	材料	厚度/mm	单位面积质量/(kg/m ²)	导热系数/(W/(m·K))
a类	涤纶纤维		0.56	0.084
b类	棉纤维	8~24	0.31	0.072
c类	蚕丝纤维		0.84	0.051

对于单层、多层被子的实际覆盖情况,采用式(4)和式(5)计算被褥热阻.

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{\pi l \lambda_i} + \frac{1}{h \pi l r_{i+1}}; \quad (4)$$

$$I_T = K R_1. \quad (5)$$

式中: n 为层数; r_i 为每一层的外壁面半径; r_1 为人体躯干半径,m; l 为被子长度,m; h 为最外层表面传热系数,W/(m²·K); I_T 为被褥热阻,clo; K 为单元常数,等于6.45 cloW/(m²·K).

计算过程中,分别对被子厚度、种类和叠放顺序与热阻的关系进行研究,人体半径0.25 m,20℃时空气导热系数取0.023 W/(m·K),最外层表面对流传热系数为5.1 W/(m²·K),辐射换热系数为4.7 W/(m²·K).在单层被褥的计算过程中,人体与被褥之间的间隙假设为2 mm或者不存在空气间隙^[16],被子厚度在8~24 mm变化,被褥厚度与热阻的关系如图5所示.在两层被子的计算过程中,固定其中某一床被子的厚度,使另一床被子的厚度在8~24 mm变化,根据表1中给出的3种不同序号的被子,对其任意组合,改变内外层被子叠放顺序来研究被褥的热阻变化.为研究空气层对热阻的影响,选取a类和b类被褥组合,a类被子15 mm,b类被子23 mm,假定第一层空气间隙为2 mm,第二层进行变动,也可以假定第二层空气间隙为2 mm,第一层进行变动.结果如图6和图7所示.

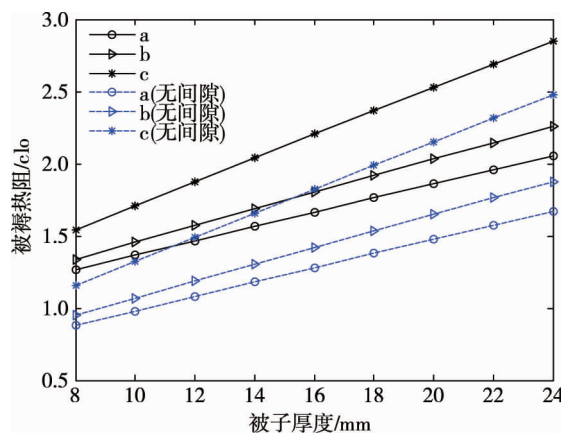


图5 被褥厚度与热阻的关系

图5为单层被褥覆盖,人体与被褥之间的间隙为2 mm时,被子厚度与被褥热阻的关系.从图5中可以看出:随着被子厚度的增加,热阻值不断增加,且a类和b类被子大约每改变1 mm厚度,热阻值变化0.05 clo,c类被子大约每改变1 mm厚度,热阻值变化0.075 clo,说明在采用厚度相同的单层被子睡眠时,选用导热系数小的材料,更有利于保温.此处c类指蚕丝纤维材料被子,或者说在满足相同的睡眠保温的情况下,选用导热系数小的材料可以减少被子覆盖的厚度.当人体与被褥之间不存在空气间隙时,被子厚度对被褥热阻的影响明显小于有空气间隙的情况.对比有空气间隙的情况可以发现,空气层间隙的存在可以增加保温效果,增加幅度约0.4 clo,当然,即使不存在空气间隙,增加被子厚度依然可以使被褥热阻增加.

图6为多层被褥覆盖,两层空气间隙都为2 mm时,被子厚度与被褥热阻的关系.其中,横坐标表示内层被子厚度,也就是图6中所示加号前的被子序号.计算过程中,固定第二层被子的厚度,即加号后的被子厚度,使内层被褥厚度在8~24 mm取值,改变内外层被子序号,观察被褥热阻值的变化.从图6中可以看

出:增加内外层被子的厚度都可以达到保温效果,当第一层被子种类相同、第二层被子厚度相同时,外侧被子导热系数越小越有利于保温.交换内外两层被子,当内层被子厚度小于外层被子厚度时,使导热系数小的被褥盖在内层更有利于保温.

图 7 为多层被褥覆盖时,空气层厚度与被褥热阻的关系.从图 7 中可以看出:不论是第一层还是第二层空气层厚度增加,均会使被褥热阻增加,且每增加 1 mm 空气层厚度可以使热阻增加 0.18 clo,其效果远大于通过改变被褥厚度来增加热阻值的方式.当空气层厚度变化小于 20 mm 时,无论是改变第一层还是第二层空气层间隙的厚度,其保温效果相同;当空气层厚度变化大于 20 mm 时,改变第一层空气层的厚度更有利于保温.

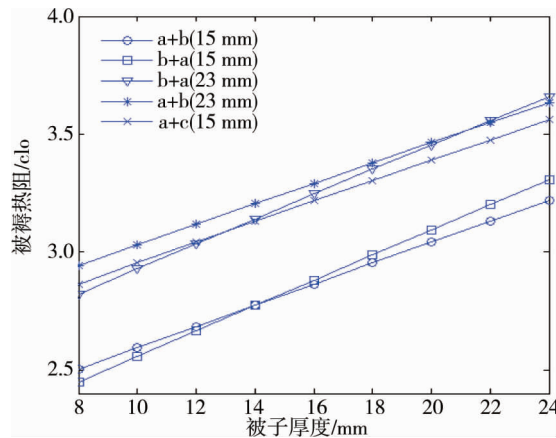


图 6 两层被褥厚度与热阻的关系

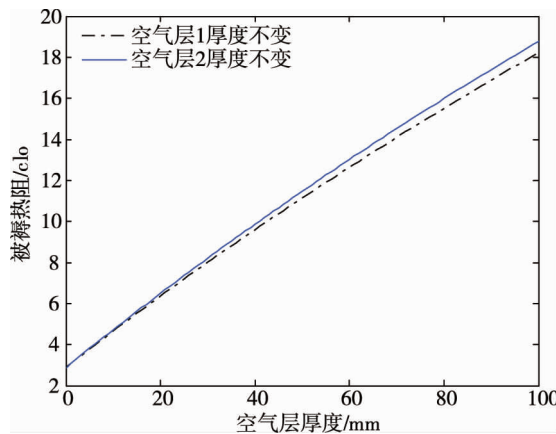


图 7 空气间隙厚度与被褥热阻的关系

2 结论

1) 被褥热阻是人体睡眠热舒适性研究过程中一个重要因素,本文提出 3 种计算被褥热阻的数学方法,根据已有相关研究和理论基础,最终采用被褥实际状态热阻计算数学模型,分别对被子覆盖层序、被子厚度以及被子之间是否存在空气层及其厚度进行分析.

2) 改变被子层序、厚度、空气层厚度都会对被褥的热阻值产生影响,被子、空气层间隙越厚,被褥热阻越大,越利于保温.交换内外两层被子时,当内层被子厚度小于外层被子厚度,将导热系数小的被褥盖在内层更有利于保温.

3) 不管是第一层还是第二层存在空气层,两者在很大程度上均可以提高被褥的热阻值,每增加 1 mm 空气层厚度可以使热阻增加 0.18 clo,而每增加 1 mm 被褥厚度最多只能增加热阻 0.075 clo,其效果明显大于通过增加被褥厚度的方式,所以为了达到更好的保温效果,应想办法增加睡眠过程中被褥空气层的厚度.

参考文献:

- [1] Song C, Liu Y, Zhou X. Temperature field of bed climate and thermal comfort assessment based on local thermal sensations [J]. *Building and Environment*, 2016, 95:381-390.
- [2] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 潘黎. 基于人体生理参数的清醒和睡眠状态的热舒适研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [4] Zhang H, Yao D, Hong S. Calculation model of total thermal resistance of bedding and clothing system in low pressure environments[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2017, 39(4):6-10.
- [5] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE Inc., 2005.
- [7] 李东平. 服装材料的保暖性与服装热阻之关系[J]. *纺织学报*, 1998, 19(5):28-30.
- [8] Havenith G, Holmér I, Parsons K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production[J]. *Energy and buildings*, 2002, 34(6): 581-591.
- [9] Havenith G. Heat balance when wearing protective clothing[J]. *Annals of occupational Hygiene*, 1999, 43(5): 289-296.
- [10] Lin Z P, Deng S M. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(5): 905-916.
- [11] Das A, Alagirusamy R, Kumar P. Study of heat transfer through multilayer clothing assemblies; A theoretical prediction[J]. *Autex Research Journal*, 2011, 11(2): 54-60.
- [12] Schiavon S, Lee K H. Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures [J]. *Building and Environment*, 2013, 59: 250-260.
- [13] Morrissey M P, Rossi R M. The effect of wind, body movement and garment adjustments on the effective thermal resistance of clothing with low and high air permeability insulation[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(6): 583-592.
- [14] Lin Z P, Deng S M. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 70-81.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 李东平. 服装穿着层序与服装热阻之关系[J]. *纺织学报*, 1997, 18(6):23-25.