

暖体假人与防护服舒适性、安全性测评研究的介绍

文 / 裴鹏英, 龚小舟

摘要:暖体假人是防护服测评研究的重要设备,它的研究和推广应用对提高服装舒适性及安全性有着重要的现实意义。文章介绍了暖体假人及其测评防护服舒适性、安全性的方法,其所采用的评价指标包括热阻和蒸发阻抗,并配以数据加以说明解释。另外,文章还介绍了测试热阻和蒸发阻抗的标准及方法。

关键词:暖体假人;防护服;热阻;蒸发阻抗

同普通服装相比,防护服由特定材料组成,其扣紧系统具有创新性,且防护服的设计独特。评价防护服系统的舒适性和使用性能具有重要意义,越来越多的标准测试方法采用与真人一样大小的暖体假人来测试防护服系统的性能。暖体假人被用于评价不同类型防护服的防火性和密封性。^[1-5]此外,暖体假人还被用来评价、比较个体液冷服与防护服配套使用时的有效性。^[6]暖体假人已被许多研究人员用来测量服装系统的热阻和蒸发阻抗。这两项阻值用于预测穿戴者在特定环境下从事某一活动时的热舒适或热应力的生物物理模型。暖体假人最近的发展趋势侧重于模拟人体特定加热部位,如头、手、脚、小腿等,以便更精确地评价用于头盔、手套或连指手套、鞋袜材料的热效率。^[7]值得一提的是,暖体假人不能模拟具有生理意义的人体,它是热计量设备,其身材大小和形状类似于普通人,被加热后其体表温度模拟人体的局部和平均表面温度,但他们不会像人类那样对环境或服装的改变做出及时反应。本文首先对暖体假人进行分类;其次,分别基于暖体假人测量防护服的热阻和蒸发阻抗,以

表征防护服的舒适性、安全性。

1 暖体假人的分类

暖体假人可分为两类:

1.1 多节段暖体假人

大多数暖体假人由温度和测量系统单独控制的多节段组成(尽管其目的是定量描述整体的传热性能),所有节段的表面温度可控制在同一温度水平(34℃),或者节段表面温度各不相同,四肢的温度比头和躯干低。这种暖体假人可以给出在一定的环境条件下各节段的相对热损失,测量各节段的热阻值和蒸发阻抗值。但是,大多数多节段暖体假人从某一节段到另一节段存在内部热传递,服装层内各节段之间有热流——这些将会影响局部阻值的准确性。另外,对于多节段暖体假人,已有两种不同计算服装热阻的方法:①整体法。先将各节段热损失求和,各节段体表温度按面积加权,各节段表面积求和,然后计算服装的总热阻。②局部法。先计算服装各节段的热阻,再按暖体假人各节段的体表面积加权得到服装的总热阻。^[7]局部法常常给出较高的热阻值,由于服装在体表的热阻分布不均匀,用局部法计算得

作者简介:裴鹏英,武汉纺织大学纺织科学与工程学院硕士研究生

通讯作者:龚小舟,武汉纺织大学纺织科学与工程学院副教授

到的热阻变化较大。^[8-9]当某一节段,譬如腹部,相对其他节段绝热性较好,其热损失会很低或接近于零,导致测得的局部热阻值太高,那么用局部法计算的总热阻偏高。

1.2 可活动暖体假人

在多数情况下,人们采用站姿使用暖体假人,但是越来越多的研究人员将暖体假人与外部自动装置相结合,用可行走的暖体假人测量服装热阻。^[10-13]这两种情况下的运动都会增加对流热的损失,降低服装热阻值。这时的热阻称为动态热阻。国际标准 ISO 15831 给出了用可行走的暖体假人测量动态热阻的测试程序。很少有实验室使用过可行走的出汗假人。^[14]

2 采用暖体假人测量防护服的的热阻

20世纪40年代美国军队研究人员研制了第一台暖体假人。^[15]由于织物的测量值不能准确地反映出人体着装后的实际情况,需要使用暖体假人来测量防护服和睡袋的热阻。

2.1 标准

1996年第一个有关暖体假人测试方法的标准——ASTM F1291 获得通过。^[1]最近另一国际标准 ISO 15831 也被颁布。^[16]

2.2 方法

测量热阻时,将服装系统穿在暖体假人上,暖体假人被置于稍凉的人工气候室内。采用电加热方式使暖体假人的体表温度稳定在某一水平(如:33~35°C),在稳态时测量加热功率。加热功率与暖体假人本体的热损失成正比。总热阻值(Rt)就是从体表到环境对显热损失的阻抗值,包括服装及周围空气层的热阻。总热阻可由暖体假人直接测量,由下式计算:

$$R_t = (T_s - T_a) \cdot A_s / H \quad (1)$$

式中: R_t 为服装和边界空气层的总热阻(单位: $m^2 \cdot ^\circ C/W$), T_s 为平均体表温度(单位: $^\circ C$), T_a 为空气温度(单位: $^\circ C$), A_s 为假人体表面积(单位: m^2), H 为加热功率(单位: W)。

克罗值(Clo)是通常用于描述服装热阻的单位,因为该单位与人们平常的着装有关。一

件西服的热阻大约为1克罗值,1克罗值相当于 $0.155 m^2 \cdot ^\circ C/W$ 。^[17]当热阻用克罗值来表述时,通常使用符号I,而不用符号R,因此 I_t 的表达式为:

$$I_t = 6.45 \cdot (T_s - T_a) \cdot A_s / H \quad (2)$$

因为总热阻(R_t 或 I_t)包含着装人体表面空气层的热阻,该值受风速及温度(与入射辐射有关)的影响。对于用于预测人体在一定条件下散热量或得热量的生理模型,人们很容易将这些因素考虑进去。但是,在人们使用一些模型及应用热阻时,更偏爱将服装热阻和空气层热阻分开。

基本热阻(R_{cl} 或 I_{cl})是指服装单独提供的热阻,不包括着装人体表面空气层的热阻,基本热阻 R_{cl} 的定义为:

$$R_{cl} = R_t - (R_a / f_{cl}) \quad (3)$$

基本热阻 I_{cl} 的定义为:

$$I_{cl} = I_t - (I_a / f_{cl}) \quad (4)$$

式中: R_{cl} 为服装的基本热阻(单位: $m^2 \cdot ^\circ C/W$), R_a 为裸体暖体假人边界空气层的热阻(单位: $m^2 \cdot ^\circ C/W$), f_{cl} 为服装面积系数(无量纲), I_{cl} 为服装的基本热阻(单位:Clo), I_t 为服装和边界空气层的总热阻(单位:Clo), I_a 为裸体暖体假人边界空气层的热阻(单位:Clo)。

2.3 服装面积系数对热阻值的影响

服装面积系数(fcl)是人体着装后表面积与裸体表面积的比值。服装的服装面积系数可通过查找标准中的表格获得,譬如,ISO 9920和ASTM F1291,^{[1]、[18]}以及查找与服装有关的数据库,^[19-20]服装面积系数最小为1(裸体),最大为1.7(某些防护服)。

上文中的术语(R_a/f_{cl} 或 I_a/f_{cl})是指着装人体周围空气层提供的热阻,它比裸体周围空气层热阻小,因为人体着装后表面积增加了,导致热传递面积增加了。服装面积系数对服装基本热阻值的影响如表1(见下页)所示。当服装面积系数(f_{cl})增加时,服装的基本热阻也增加(对于给定的总热阻)。夏装的服装面积系数从

1.10 到 1.30,冬装的服装面积系数从 1.25 到 1.45,防护服的服装面积系数从 1.30 到 1.70。热舒适性模型已表明,当人从事低强度活动时,热阻值增加 0.1clo 对人体热感觉的影响相当于其所偏爱的温度下降 0.6°C 对人体热感觉的影响(ASHRAE, 1992)。因此,采用错误的服装面积系数或根本不考虑所造成的偏差将会给热舒适模型带来较小的误差。使用服装面积系数(f_{cl})的估算值比忽略这个因素更为准确。

表 1:采用不同的服装面积系数对计算服装基本热阻值的影响

室内夏装(Icl =0.5clo)	室内冬装(Icl =1.0clo)	防寒服(Icl =2.5clo)
1.11 - (0.7/1.00) = 0.41	1.54 - (0.7/1.00) = 0.84	2.97 - (0.7/1.00) = 2.27
1.11 - (0.7/1.05) = 0.44	1.54 - (0.7/1.05) = 0.87	2.97 - (0.7/1.05) = 2.30
1.11 - (0.7/1.10) = 0.47	1.54 - (0.7/1.10) = 0.90	2.97 - (0.7/1.10) = 2.33
1.11 - (0.7/1.15) = 0.50	1.54 - (0.7/1.15) = 0.93	2.97 - (0.7/1.15) = 2.36
1.11 - (0.7/1.20) = 0.53	1.54 - (0.7/1.20) = 0.96	2.97 - (0.7/1.20) = 2.39
1.11 - (0.7/1.25) = 0.55	1.54 - (0.7/1.25) = 0.98	2.97 - (0.7/1.25) = 2.41
1.11 - (0.7/1.30) = 0.57	1.54 - (0.7/1.30) = 1.00	2.97 - (0.7/1.30) = 2.43
1.11 - (0.7/1.35) = 0.59	1.54 - (0.7/1.35) = 1.02	2.97 - (0.7/1.35) = 2.45
1.11 - (0.7/1.40) = 0.61	1.54 - (0.7/1.40) = 1.04	2.97 - (0.7/1.40) = 2.47
1.11 - (0.7/1.45) = 0.63	1.54 - (0.7/1.45) = 1.06	2.97 - (0.7/1.45) = 2.49
1.11 - (0.7/1.50) = 0.64	1.54 - (0.7/1.50) = 1.07	2.97 - (0.7/1.50) = 2.50
		2.97 - (0.7/1.55) = 2.52
		2.97 - (0.7/1.60) = 2.53
		2.97 - (0.7/1.65) = 2.55
		2.97 - (0.7/1.70) = 2.56

注:用黑体表示的例子采用正确的与套装对应的服装面积系数。其他例子说明在测量或估算服装面积系数时的误差是如何影响由总热阻计算基本热阻。

3 测量防护服系统的蒸发阻抗

用于测量服装的蒸发阻抗或湿阻的出汗假体人相对较少。^[9]有些假人的表面被覆盖一层纯棉针织物,用蒸馏水弄湿,以此模拟饱和的出汗皮肤,但是,模拟的皮肤将渐渐变得干燥,除非模拟皮肤附着若干细管,以必要的速率给模拟皮肤供水,维持其饱和状态。^[20]还有些假人在身体不同部位有若干个出汗孔,从假人内部给每一个出汗孔供水,给水速率可调;^[22]一种新型的出汗假人使用防水透湿织物来模拟皮肤,水蒸气从假人内转移到皮肤表面;^[23]还有些假人在出汗皮肤表面和服装之间加上一层微孔薄膜,

防止服装被弄湿,但这种构造会增加裸体假人的热阻。

3.1 标准

美国试验与材料学会(ASTM)与防护服有关的技术委员会最近批准了新标准 ASTM F2370,用出汗假人测量服装的蒸发阻抗。^[1]该标准规定了在等温条件下测量服装系统蒸发阻抗的测试程序。该标准也给出了另外的测试方案,在模拟实际使用的环境条件下测量

服装的蒸发阻抗,这就是所谓的非等温测试。在进行服装热阻测试和非等温出汗假人试验时,采用相同的环境条件,且空气温度低于假人体表温度,由此显热损失与蒸发热损失同时存在,水蒸气会在服装内冷凝。在非等温条件下测得的蒸发阻抗称为表观蒸发阻抗。配套服装的表观蒸发阻抗只能与在同一环境条件下测得的其他配套服装的表观蒸发

阻抗进行比较。

3.2 方法

在进行出汗假人试验时,将假人的体表温度加热到人体皮肤温度,并用水弄湿,维持在饱和状态。接着将服装穿在假人身上,服装系统的蒸发阻抗通过测量假人的加热功率获得。即使在等温条件下,也需要采用电加热的方式维持假人的体表温度,因为假人体表的水分蒸发会带走热量,在非等温条件下则需要采用更高的加热功率。

服装总蒸发阻抗的计算公式如下:

$$R_{et} = (P_s - P_a) \cdot A_s / [H - (T_s - T_a) \cdot A_s / R_t] \quad (5)$$

式中： R_{et} 为服装和边界空气层的总蒸发阻抗（单位： $m^2 \cdot kPa/W$ ）； P_s 为皮肤表面的水蒸气压（单位： kPa ）； P_a 为环境空气的水蒸气压（单位： kPa ）； R_t 为服装和边界空气层的总热阻（单位： $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ）； T_s 为假人的平均体表温度（单位： $^\circ C$ ）； T_a 为空气温度（单位： $^\circ C$ ）； A_s 为假人的体表面积（单位： m^2 ）； H 为假人的加热功率（单位： W ）。我们通过干性试验测得的服装总热阻平均值 R_t 用于计算总蒸发阻抗 R_{et} 。

该标准也给出了通过称重出汗假人计算假人表面的水分蒸发速率来确定蒸发阻抗的

方法，计算式如下：

$$R_{et} = [(P-s-P_a)A_s] / \lambda (dm/dt) \quad (6)$$

式中： λ 为测量时假人表面温度下水的汽化潜热（单位： J/g ）； dm/dt 为假人出汗表面水分的蒸发速率（单位： g/s ）。计算服装本身的基本蒸发阻抗的计算式同计算服装基本热阻的计算式类似：

$$R_{ecl} = R_{et} - (R_{ea}/f_{cl}) \quad (7)$$

式中： R_{ea} 为服装表面静止空气层的蒸发阻抗（单位： $m^2 \cdot kPa/W$ ）。

表 2: 用暖体假人测得的配套服装热阻和蒸发阻抗数据

配套服装及组成	总热阻 R_{t0} ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	服装面积系数 f_{cl}	总湿阻 R_{et} ($m^2 \cdot kPa/W$)	透湿指数 i_m
1. 男式职业套装(三角内裤, T 恤衫, 长袖衬衫, 夹克衫, 背心, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, 领带)	1.69 (0.262)	1.32	0.044	0.36
2. 女式职业套装(紧身短衬裤, 短衬裙, 长袖女衬衫, 合体夹克衫(双搭门), 齐膝直筒裙, 连裤袜, 鞋)	1.60 (0.248)	1.30	0.039	0.39
3. 牛仔裤及衬衫(三角内裤, 长袖衬衫, 牛仔褲, 运动袜子, 运动鞋)	1.27 (0.197)	1.22	0.031	0.39
4. 夏季短裤及衬衫(三角内裤, 短袖衬衫, 短裤, 运动袜子, 运动鞋)	1.02 (0.158)	1.10	0.023	0.42
5. 女式短裤及背心(短衬裤, 无袖大圆领女式背心, 短裤, 凉鞋)	0.93 (0.144)	1.08	0.022	0.40
6. 运动汗衫(紧身短衬裤, 长袖汗衫, 汗裤, 运动袜子, 软底运动鞋)	1.35 (0.209)	1.19	0.029	0.44
7. 保暖服(长袖保暖衬衣和长裤腿保暖裤子, 短袜, 保暖连衣裤, 靴子)	1.95 (0.302)	1.26	0.048	0.38
8. 清洁工作服(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, 机织物连衣裤)	1.55 (0.240)	1.26	0.039	0.37
9. Tyvek 工作服(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, 非织造布连衣裤)	1.53 (0.237)	1.26	0.045	0.32
10. PTFE 防水套装(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, PTFE 夹克衫和裤子)	1.73 (0.268)	1.28	0.044	0.37
11. 防化套装(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, 带头巾酸泼过的聚氯乙烯夹克衫和连衣裤)	1.69 (0.262)	1.28	0.126	0.13
12. 聚丁橡胶涂层锦纶工作服(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 皮带, 袜子, 鞋子, 带头巾聚丁橡胶 / 锦纶夹克衫和工装裤)	1.70 (0.264)	1.28	0.120	0.13
13. 衬衫和裤子(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 袜子, 运动鞋)	1.12 (0.173)	1.30	0.028	0.37
14. 冬装(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 袜子, 运动鞋, 夹克衫, 连指手套, 帽子)	2.19 (0.393)	1.40	0.053	0.39
15. 阻燃防护服(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 袜子, 运动鞋, 长袖衬衫或夹克衫, 长裤(外层), 手套)	1.60 (0.248)	1.35	0.037	0.41
16. 防化服(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 袜子, 运动鞋, 长袖衬衫和夹克衫, 手套, 头巾)	1.84 (0.285)	1.50	0.098	0.18
17. 冬季防风防水套装(三角内裤, 短袖衬衫, 长裤, 袜子, 运动鞋, 长袖保暖衬衣和长裤腿保暖裤子, 起绒衬衣和起绒裤子, 防水夹克衫长裤, 连指手套, 头巾)	2.63 (0.407)	1.45	0.099	0.25

注：裸体假人表面空气层的的热阻为 $0.112 m^2 \cdot ^\circ C/W$ ($0.72 cl_0$)；裸体假人表面空气层的的湿阻为 $0.014 m^2 \cdot kPa/W$ ，透湿指数为 0.48 。（数据来源：#1-12^[21]；#13-17^[9]）。

3.3 透湿指数

透湿指数(i_m)表示人体着装后的最大蒸发传热与未着装时的最大蒸发传热的比值。其定义为^[24]:

$$i_m = (R_i / R_{et}) / LR \quad (8)$$

式中: i_m 为透湿指数(无量纲); LR 为刘易斯(Lewis)常量,通常取值 $16.5^\circ\text{C}/\text{kPa}$ 。透湿指数的范围一般在 0.5(裸体假人)到 0.05(低热阻且高蒸发阻抗的单层服装)之间变化。

4 用暖体假人测配套服装和防护服

总热阻和总蒸发阻抗在各实验室之间差异较大,这主要由于测试用的设备和采用的风速不同,造成在裸体假人测试时的空气层阻抗不同。当比较基本热阻和基本蒸发阻抗时,各实验室之间的一致性较好。^[9]一些常用配套服装和防护服的测试数据列于表 2(见上页)。该表给出了总热阻和总蒸发阻抗,但基本热阻和基本蒸发阻抗可由空气层阻抗(表 2 注)和各配套服装的服装面积系数计算得到。

5 描述服装系统对整个个体与环境之间热交换的影响

暖体假人能反应,影响人体与环境热交换的因素,这些因素包括:①人体被织物覆盖的表面积和裸露皮肤的表面积;②人体表面服装层和空气层的分布(即非均匀性);③松紧度;④因人体着装后散热面积的增加(即服装面积系数);⑤产品设计的影响;⑥着装特征的改变(拉链被打开、戴头巾等);⑦人体不同部位温度(和散热量)的差异;⑧人体姿势的影响(如站姿、坐姿、躺着);⑨人体活动的影响(如步行、骑自行车);⑩暖体假人试验可反应真实情况,因为这样的试验可定量描述服装系统对整个个体与环境之间热交换的影响。

6 结语

暖体假人将继续用于测量防护服系统的热阻和蒸发阻抗。在防护服系统的研发过程中,它是一种有用的工具。暖体假人可以在稳定状态和瞬态条件下用来评价防护服,以及预

测穿戴者的舒适(或热应力)。虽然暖体假人易使用,但是假人、人工气候室、计算机控制与数据采集系统费用昂贵,维护复杂,但是暖体假人是防护服测评研究的重要设备,它的研究开发与推广应用有着重要的现实意义。相信各有关研究机构通力合作,在不久的将来,暖体假人测试技术会有更大的发展。

参考文献:

- [1] American Society for Testing and Materials [M]. 2005 Annual book of ASTM standards, Vol. 11.03.
- [2] Crown E.M., Ackerman, M.Y., Dale J.D. and Tan, Y., Design and evaluation of thermal protective flightsuits. Part II: Instrumented mannequin evaluation [J]. Clothing and Textile Research Journal, 1998(16):79-81.
- [3] Lee C, Kim I Y and Wood A. Investigation and correlation of manikin and bench-scale fire testing of clothing systems [J]. Fire and Materials, 2002(26):269-278.
- [4] Prezant D J, Barker R L, Bender M and Kelly K J, Predicting the impact of a design change from modern to modified modern firefighting uniforms on burn Evaluation of protective clothing systems using manikins 231 injuries using manikin fire tests [C]. in Nelson C N and Henry N W, Performance of Protective Clothing: Issues and Priorities for the 21st Century: [A]. 2000(7):224-233.
- [5] Rossi R M and Bolli W P. Assessment of radiant heat protection of firefighters' jackets with a manikin [C]. in Nelson C N and Henry N W, Performance of Protective Clothing: Issues and Priorities for the 21st Century: [A]. 2000(7):212-223.
- [6] Teal W. A thermal manikin test method for evaluating the performance of liquid circulating cooling garments [C]. in Shapiro Y, Moran D S and Epstein Y, Environmental Ergonomics: Recent Progress and New Frontiers [A]. London, Freund Publishing House, Ltd., 1990:355-358.
- [7] Kuklane, K., Nilsson, H., Holmer, I., Liu,

- X. Methods for handwear, footwear and headgear evaluation [C]. Proceedings of a European Seminar on Thermal Manikin Testing at the National Institute for Working Life [A]. Hakan O. Nilsson and Ingvar Holmer (eds.), 1997: 23-29.
- [8] Nilsson, H. Analysis of two methods of calculating the total insulation [C]. Proceedings of a European Seminar on Thermal Manikin Testing at the National Institute for Working Life [A]. 1997: 17-22.
- [9] McCullough E A, Barker R, Giblo J, Higenbottam C, Meinander H, Shim H, and Tamura T. Interlaboratory evaluation of sweating manikins [C]. 10th int conf Environmental Ergonomics [A]. Japan, 2002: 467-470.
- [10] McCullough, E. A., Hong, S. A data base for determining the decrease in clothing insulation due to body motion [J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(1): 765-775.
- [11] Kim, C.S. & McCullough, E.A. Static and Dynamic Insulation Values for Cold Weather Protective Clothing in Performance of Protective Clothing [C]. Issues and Priorities for the 21st Century. C.N. Nelson & N.W. Henry (eds.), 2000(7): 233-247.
- [12] Nilsson, H., Gavhed, D., Holmer, I... Effect of step rate on clothing insulation measurement with a moveable thermal manikin. [C]. Proceedings of the fifth International Conference on Environmental Ergonomics [A]. 1992: 174-175.
- [13] Olesen, B.W., Sliwiska, E., Madsen, T.L., and Fanger, P.O., Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing: measurements by a movable thermal manikin [J]. ASHRAE Transactions, 1982, 88(Part 1): 791-805.
- [14] Richards M. Development of a sweating agile thermal manikin (SAM) [C]. Proceedings of the Fourth International Meeting on Thermal Manikins, Lerchenfeldstrasse, Switzerland: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research [A]. 2001.
- [15] Belding H S. Protection against dry cold [M]. In: Newburgh L H. Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing. Philadelphia: Saunders Co., 1949. 351-367.
- [16] ISO 15831-2004 [S]. Clothing Physiological effects measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin.
- [17] Gagge A P, Burton A C, Bazett H D. A practical system of units for the description of heat exchange of man with his environment [J]. Science, 1941, 94(2445): 428-430.
- [18] ISO 9920-1995 [S]. Ergonomics of the thermal environment-estimation of the thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.
- [19] McCullough E A, Jones B W, Ruck J. A comprehensive data base for estimating clothing insulation. ASHRAE Transactions [J]. 1985, 91(2): 29-47.
- [20] McCullough E A, Jones B W, Tamura.T. A data base for determining the evaporative resistance of clothing [J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95(2): 316-328.
- [21] Holmer, I., Nilsson, H., Meinander, H., Evaluation of clothing heat transfer by dry and sweating manikin measurements [C]. In Performance of Protective Clothing, 1996: 360-366.
- [22] Fan J, Qian X. New functions and applications of Walter, the sweating fabric manikin [J]. European Journal of Applied Physiology, 92(6): 641-644.
- [23] Woodcock A H. Moisture transfer in textile systems, part 1 [J]. Textile Research Journal, 1962, 32(8): 628-633.

(收稿日期: 2014年10月25日)