

中文引用格式:高振波,刘小勇,李亚运,等. 低温复合环境下睡袋保暖性能试验[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4):176-183.

英文引用格式:Gao Zhenbo, Liu Xiaoyong, Li Yayun, et al. Test study of sleeping bag's thermal insulation performance in low temperature composite environment[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 176-183.

低温复合环境下睡袋保暖性能试验^{*}

高振波^{1,2}, 刘小勇^{1,2}教授, 李亚运^{**2,3}, 汪雪繁², 黄梦瑶³, 操凯²

(1 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2 清华大学 合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601; 3 清华大学 安全科学学院, 北京 100084)

中图分类号:X956

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0805

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3006100);安徽省质量基础设施标准化专项项目(2023MKS20)。

【摘要】 为评价低温、风速与风向环境中睡袋的实际使用过程保暖作用,改善睡袋使用者的舒适度,开展睡袋保暖性能试验。通过低温雨雪冰冻耦合环境舱和牛顿暖体假人系统评估木乃伊式睡袋和信封式睡袋的热阻,测量2种睡袋在变化的环境温度(-20、-15、-10和-5℃)、风速(1、2、3、5和7 m/s)和风向(沿头部、腰部和脚部方向)下的热阻参数以及睡袋内部空气层温度,研究单一低温无风环境和复合低温有风环境对睡袋热阻的影响。结果表明:单一低温无风环境中,木乃伊睡袋热阻值变化比信封睡袋稳定,木乃伊睡袋的保暖性更好;在复合低温有风环境中,增大环境风速会降低空气层热阻;当风速为7 m/s时,空气层热阻下降50%;沿头部方向吹风对睡袋热阻值影响最大,木乃伊睡袋总热阻下降42.8%,信封睡袋总热阻下降50.1%,沿脚部方向吹风对睡袋热阻值影响最小,木乃伊睡袋总热阻下降23.1%,信封睡袋总热阻下降29.3%;沿头部风速为7 m/s时,木乃伊睡袋和信封睡袋脚部空气层温度降至最低分别为21.83和26.54℃。

【关键词】 低温复合环境; 睡袋; 保暖性能; 暖体假人; 风速与风向

Test study of sleeping bag's thermal insulation performance in low temperature composite environment

Gao Zhenbo^{1,2}, Liu Xiaoyong^{1,2}, Li Yayun^{2,3}, Wang Xuefan², Huang Mengyao³, Cao Kai³

(1 College of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2 Hefei Institute of Public Security, Tsinghua University, Anhui Hefei 230601, China; 3 College of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To evaluate the insulation performance of sleeping bags during actual use in various low-temperatures, wind speeds and wind directions, and to improve the comfort of sleeping bag users, an experimental study on the thermal insulation performance of sleeping bags was conducted. The thermal insulation performance of mummy-style sleeping bags and envelope-style sleeping bags was evaluated using a low-temperature coupled environment chamber and "Newton" thermal manikin system. Thermal resistance parameters of the two types of sleeping bags under varying environmental temperatures (-20,

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0176-08 收稿日期:2025-11-11; 修稿日期:2026-01-20

** 通信作者:李亚运(1990—),男,山东枣庄人,博士研究生,主要研究方向为公共安全、个体防护。E-mail:liyayun@tsinghua-hf.edu.cn。

-15, -10, and -5 °C), wind speeds (1, 2, 3, 5, and 7 m/s), and wind directions (along the head, waist, and foot directions) were measured. The effects of a single low-temperature windless environment and a combined low-temperature windy environment on the thermal insulation performance of sleeping bags were studied. The experimental results show that in a single low-temperature windless environment, the thermal resistance value of the mummy sleeping bag changed more stably than that of the envelope sleeping bag, and the mummy sleeping bag has better thermal insulation performance. In a combined low-temperature windy environment, increasing the wind speed would reduce the thermal resistance of the air layer; and when the wind speed was 7 m/s, the thermal resistance of the air layer decreased by 50%. Wind direction along the head direction has the greatest impact on thermal resistance, with the total thermal resistance of the mummy sleeping bag decreasing by 42.8% and that of the envelope sleeping bag decreasing by 50.1%. Wind direction along the foot direction had the least impact on the thermal resistance value of the sleeping bag, with the total thermal resistance of the mummy sleeping bag decreasing by 23.1% and that of the envelope sleeping bag decreasing by 29.3%. When the wind speed along the head was 7 m/s, the air layer temperature at the feet of the mummy sleeping bag and the envelope sleeping bag dropped to the lowest, which were 21.83 and 26.54 °C, respectively.

Keywords: low-temperature composite environment; sleeping bag; thermal insulation performance; thermal manikin; wind speed and direction

0 引言

随着户外运动的蓬勃发展,度假参与率和户外活动(如露营和滑雪)随之增加,睡袋成为户外长时间休息的首选装备,作为人体与环境的媒介,睡袋参与建立人体—睡袋和睡袋—环境2个热交换环节,以维持人体与环境间的动态平衡,满足户外运动人员的保暖性需求^[1]。一般将平均气温低于5 °C的环境定义为低温环境^[2-3],由于户外低温和风等因素综合影响,睡袋保暖性能呈现差异性,导致使用者舒适度欠佳及睡眠不良等情况^[4]。因此,开展低温环境下睡袋保暖性能研究,对于睡袋研发,保障户外人员安全具有重要意义。

睡袋的保暖性能受材料、面料、结构和环境变化影响,国内外学者开展了系列睡袋保暖性能评价研究。文献[5-6]研究了春秋睡袋选用木棉、羽绒和涤纶不同填充配料比的性能变化,羽绒保暖性最好,当三者配比为20%/60%/20%时,保暖性能较好且成本更低;同时羽绒、木棉、涤纶的透湿透气性能是依次降低的,同时在制作3组分木棉絮材料时,木棉含量应偏低控制,其保暖效果较好。Dabrowska等^[7]评估了高蓬松度无纺布、鹅绒和鸭绒的保暖性能,发现鹅绒样品在干燥状态下显著高于无纺布。文献[8]研究了羽绒纤维在冬季有较好的保暖作用,属于多孔材料,具有良好的人体亲和性和服用性能。Kumar等^[9]研究了3层织物结构的改良睡袋,

发现优化3层复合织物的热学和透气性能,可以开发更优的睡袋;改变外层的相对水蒸气渗透率,可优化热舒适性。安昱盈等^[10]研究了睡袋结构的传热以及空气运动,发现V型管的隔热性能最好,同时,睡袋内部的传热主要是对流和传导,比例约3:7;睡袋表面传递的热量主要通过对流和辐射,其中对流占比最大。文献[11]测试了睡袋内部产热机理,结果显示,填充量是影响睡袋热阻最要的因素。黄建华等^[12]研究了睡袋保暖值和舒适温度的测算方法,发现睡袋的保暖值越大,其舒适温度就越低。学者通过分析衣下空气层的分布与厚度,探究空气层对服装保暖性能的影响,衣下微环境受人体、服装和环境等因素影响^[13],且在高原严寒进行睡袋保暖发现提高睡袋保暖需要从睡袋设计、材料、以及使用等方面提高,才能有效保暖^[14-16]。这些研究探讨了相对单一环境条件下睡袋的保暖性能,而未考虑复合环境情况。尽管这些研究已取得一些重要进展,主要研究了填充材料、结构设计以及使用温度对睡袋保暖性能的影响,而睡袋整装及分区保暖性能研究不足,且主要集中在单一环境下,缺乏睡袋在低温有风复合环境下保暖性能研究,包括睡袋内部空气层温度的变化情况。

鉴于此,笔者拟运用低温雨雪冰冻耦合环境舱和暖体假人等设备,测量低温复合环境下2种典型睡袋的热阻参数和睡袋内部微环境空气层温度,探究低温环境、风速和风向对睡袋保暖性能的影响;阐

明睡袋在低温复合环境下内部微环境空气层温度变化情况,研究低温有风复合环境中睡袋热阻,以期为户外睡袋的实际应用提供科学依据和参考。

1 睡袋保暖性能试验方案

1.1 睡袋保暖性能测试系统

1) 低温复合环境模拟系统。试验于低温雨雪冰冻耦合环境舱内开展,气候室空间净尺寸为 6 m (长)×5 m (宽)×4.6 m (高)。具备多环境耦合模拟能力。温度可调节范围为-40~30 ℃,精度为±0.5 ℃;相对湿度可调节范围为 30%~95%,精度为±5%;风速可调节范围为 0~25 m/s,精度为±0.5 m/s。低温雨雪冰冻耦合环境舱如图 1 所示。



图 1 步入式人工气候室

Fig. 1 Walk-in artificial climate chamber

2) 暖体假人测试系统。利用牛顿型暖体假人模拟真人开展测试,假人全身划分为 20 个独立温控区域,每个区域配有专用加热元件和高精度温度传感器,能够实现皮肤恒温控制模式。环境感知系统包含多参数传感器阵列,控制终端通过 Therm DAC 软件平台实现指令下发、数据采集及系统联动、支持实时监测与动态调控。外部系统包括电源、控制箱及环境传感器等,试验现场如图 2 所示。

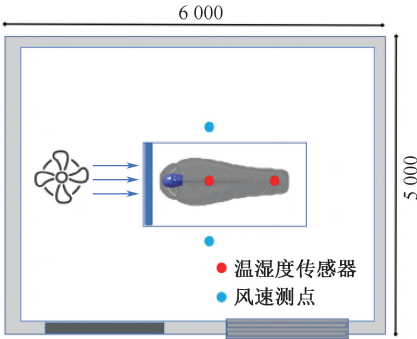


图 2 试验现场

Fig. 2 Experimental site

3) 温湿度记录仪。用于记录空气层的温度,包括纽扣传感器、通信读写设备和配套计算机端软件。

使用时将它放置在睡袋内部空间中。该记录仪采样率为 1 次/min,温度测量范围为-40~+85 ℃,测量精度为±0.5 ℃。

4) 变频离心风机与风速测试仪。变频离心风机通过变频器精准调节电机转速控制风速大小,在气流进入试验段前,设置整流网削弱涡流,同时试验过程中,在睡袋周围放置风速测试仪,测试风速大小,保证风速流场稳定。风速测试仪测试范围为 0.7~30 m/s。

1.2 睡袋试验样品

针对低温复合环境中户外睡袋的需求,选购木乃伊式羽绒睡袋和信封式羽绒睡袋作为测试样品,如图 3 所示。木乃伊式睡袋和信封式睡袋重量和睡袋尺寸基本相同,面料成分、填充材料、填充量和蓬松度完全相同,但睡袋的样式封装类型不同。试验中睡袋和睡袋防潮垫由用于人体模型试验的 14 mm 木板支撑。



(a) 信封式睡袋

(b) 木乃伊式睡袋

图 3 测试试验样品

Fig. 3 Test sample of the experimental product

1.3 睡袋试验方法

设置单一温度、温度与风组合环境对睡袋保暖影响试验。在试验开始前,预处理睡袋在 20 ℃ 的恒温恒湿间,预处理时间为 12 h。试验开始时,待低温雨雪冰冻耦合环境舱内温度稳定后,给暖体假人穿上 2 件式套装、长袜和睡袋,使假人水平躺在放有防潮垫的木板子上面,腿伸直,手臂自由的放在人体模型两侧;拉上睡袋拉链,睡袋的兜帽盖住假人头部,兜帽的绳索尽可能收紧;在睡袋内部胸部区域和脚部区域各放置一个温度传感器,同时开始记录假人和睡袋空气层温度传感器的各项数据。

1) 单一温度环境试验方案。设置低温雨雪冰冻耦合环境舱温度-20、-15、-10 和-5 ℃,相对湿度 50%、风速 0.3 m/s (相对无风),睡袋均是在暖体假人已穿戴保暖内衣和长袜子的基础上穿戴,在暖体假人皮肤温度为 34 ℃ 的恒温模式下,记录假人各部位的热流以及睡袋内部空气层温度。

2) 低温有风环境试验方案。保持低温雨雪冰冻耦合环境舱温度-10 ℃、相对湿度 50%、设置风速分别为 0.5、1.5、3.0、5.0、7.0 m/s,以及 3 个风向,

沿着睡袋头部面向风机、睡袋脚部面向风机和睡袋腰部垂直面向风机。同样记录假人各部位热流。

1.4 热阻计算方法

根据国际标准 *Clothing—Physiological effects—Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin* 规定^[17],运用串联法分别计算睡袋的总热阻 I_t (包含睡袋表面空气层热阻);睡袋表面空气层热阻 I_a ;睡袋基本热阻 I_b ;睡袋相对热阻(不包含睡袋空气层热阻和脸部热阻),用符号 I_c 。睡袋总热阻 I_t 计算公式如下:

$$I_t = \sum f_i \left[\frac{(t_{si} - t) \times a_i}{H_{ci}} \right] \tag{1}$$

式中: I_t 为人模型静止时的睡袋整体热阻, clo; f_i 为人模型的第 i 个身体部位表面积占总表面积的比例; t_{si} 为假人模型的第 i 个身体部位的皮肤表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为气候室内部空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; a_i 为人模型的第 i 个身体部位的表面积, m^2 ; H_{ci} 为提供给假人模型的第 i 个身体部位的加热功率, W 。

睡袋基本热阻 I_b 计算公式如下:

$$I_b = I_t - \frac{I_a}{f_{cl}}, \text{ 其中, } f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A} \tag{2}$$

式中: A_{cl} 为穿着服装的人体模型的表面积, m^2 ; A 为裸体假人体模型表面积, m^2 ; f_{cl} 为服装面积因子, 定义为 A_{cl} 与 A 的比值。

睡袋有效热阻为 I_c 计算公式如下:

$$I_c = I_t - I_a \tag{3}$$

式中: I_c 为睡袋有效热阻, clo; I_t 为人模型静止时的睡袋整体热阻, clo; I_a 为空气层热阻, clo。

2 睡袋保暖性能试验结果与讨论

2.1 单一低温无风环境对睡袋热阻的影响

图4为相同材料的不同类型睡袋在不同环境温度下的热阻测试结果。从图中看出,在-10 $^{\circ}\text{C}$ 时木乃伊睡袋和信封睡袋总热阻最大,分别为 10.67, 10.1 clo。木乃伊式睡袋和信封式睡袋总热阻分别在-20 和-15 $^{\circ}\text{C}$ 最小,分别为 9.91 和 8.28 clo;木乃伊式睡袋热阻比信封式睡袋热阻高。随着温度的改变,不同类型睡袋的热阻略有变化,其中木乃伊式睡袋的热阻值变化幅度较小,信封式睡袋热阻值变化幅度略明显,在同一温度下木乃伊类型睡袋热阻值略高于信封类型睡袋的热阻值,表明木乃伊式的睡袋保暖效果略好,信封式睡袋的保暖效果略低。在低温环境中,对滑雪服进行耐低温保暖性能研究,发

现温度对服装热阻略有影响,但总体变化不大^[10],与本文结果类似。这是由于木乃伊类型睡袋更贴合人体,睡袋整体封闭性好,空气流通慢,热量散出慢,因此,木乃伊样式睡袋的保温效果更好。张振方等^[6]在纺织品中户外睡袋发展研究中提到,木乃伊睡袋更适用于在低温环境中使用。

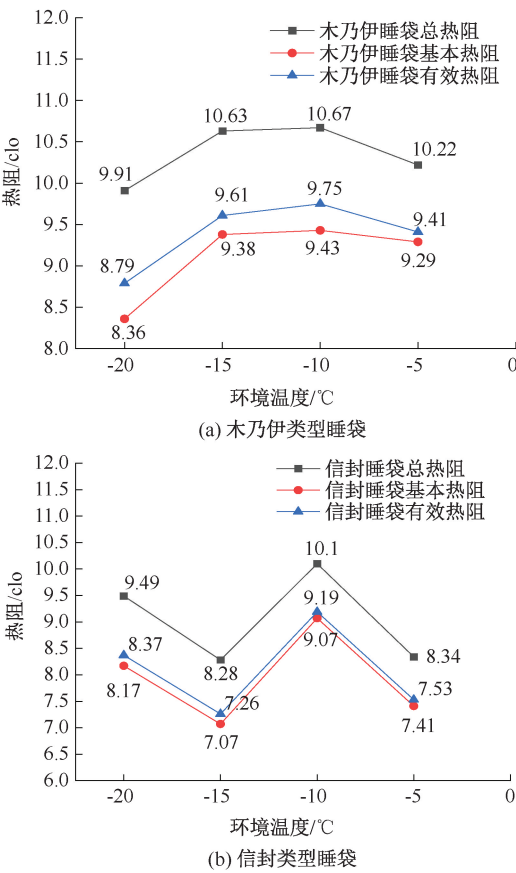


图4 2种睡袋在不同环境温度的热阻值
Fig. 4 Thermal resistance values of two sleeping bags at different ambient temperatures

图5为低温环境下,2种睡袋热阻试验过程中胸部和脚部微环境温度变化情况。从睡袋内部温度总体趋势来看,木乃伊式睡袋内部温度普遍高于信封式睡袋;从局部温度变化情况看,木乃伊式脚部和信封式胸部微环境温度变化比较明显。衣下微环境的研究表明:提到微环境温度的变化受空气层厚度以及服装开口大小影响,其中,木乃伊式脚部微环境温度变化明显,这是因为木乃伊式睡袋的脚部区域与脚部近,与脚部贴合性好,因此在低温环境中睡袋内部脚部微环境温度更高一些,在-20 $^{\circ}\text{C}$ 时脚部微环境温度比信封更低,这是因为木乃伊式睡袋脚部空气层更少且睡袋与脚部贴合性好,热量散发的方式主要是热传导为主,散热更快;与此同时,信封脚

部区域却趋于稳定,是因为信封脚部空间大,空气层较厚,热量散失比较缓慢,所以脚部微环境温度更稳定。信封式胸部微环境温度变化比较明显,是因为信封开口处较大,更容易与空气产生热对流,因此微环境温度变化较为明显,而木乃伊式睡袋与身体贴合性好,睡袋开口处较小,热量不易散失,保温性能更好。木乃伊类型睡袋中微环境温度变化相较于信封睡袋更高一些。

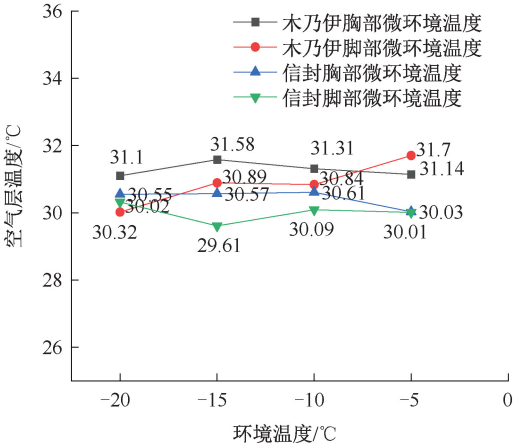


图5 2种睡袋胸部和脚部微环境温度变化

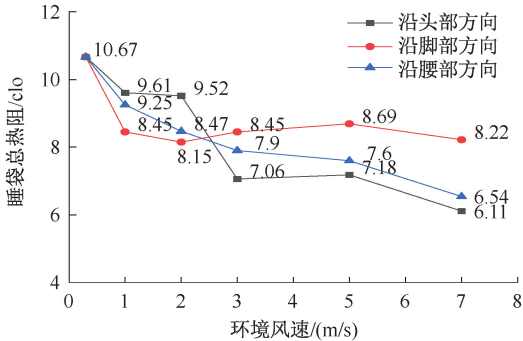
Fig.5 Temperature changes of the chest and feet in two different types of sleeping bags

2.2 复合低温有风环境对睡袋热阻的影响

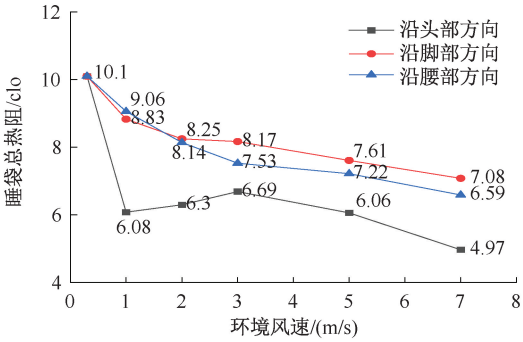
2.2.1 风速与风向对睡袋总热阻的影响

低温复合环境中风速风向与 I_t 的关系如图6所示,由图6可知:风速与睡袋总热阻有显著的负相关性。当测试环境为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.3 m/s 时,2种睡袋 I_t 分别为10.67、10.10 clo;当风速上升到 7 m/s 时,木乃伊式睡袋沿头部方向、腰部方向和脚部方向热阻分别为6.11、6.54和8.22 clo,分别下降42.8%、38.7%和23.1%;信封式睡袋沿头部方向、腰部方向和脚部方向热阻为4.97、6.59和7.08 clo,分别下降50.1%、34.2%和29.3%。总体来说,随着风速的增加,睡袋的总热阻都会有不同程度的降低,其中信封类型睡袋总热阻受风速影响较为明显,这是由于信封式类型睡袋相较于木乃伊内部空间大且开口处较为宽松,睡袋内部空气层与外部热交换更为迅速。关于服装款式与热阻研究中提到的开口过大会导致热阻值降低研究结果类似。木乃伊式类型睡袋在风速大于 3 m/s 时,信封式类型睡袋在有风时,木乃伊式和信封式睡袋沿头部吹风睡袋总热阻变化最大,这是因为沿头部方向吹风,睡袋内部会灌入低温空气,加快睡袋内外部空气的流动,导致睡袋内部热量

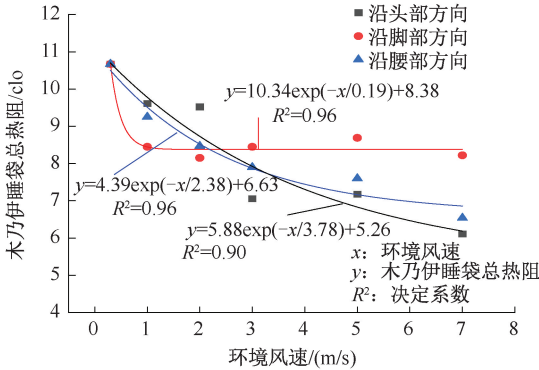
的传导,因此,随着风速的增加,热量散失速率加快,睡袋的总热阻急剧减少;沿脚部方向吹风对睡袋总热阻影响最小,沿脚部方向吹风加速睡袋表面空气



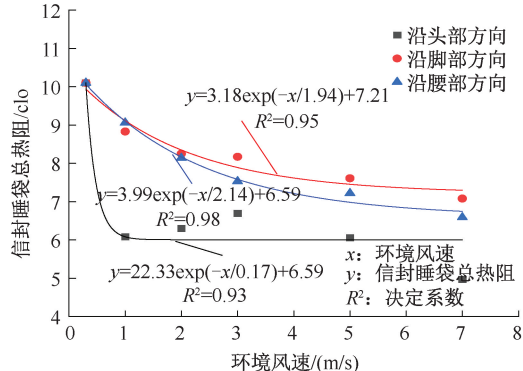
(a) 木乃伊类型睡袋



(b) 信封类型睡袋



(c) 木乃伊类型睡袋拟合曲线



(d) 信封类型睡袋拟合曲线

图6 2种不同类型睡袋总热阻变化

Fig.6 Graph showing the total thermal resistance changes of the two different types of sleeping bags

的流速,使睡袋与外界环境的热传导变快,导致睡袋总热阻减少。因此,在低温户外环境中使用睡袋时应避免头部吹风。衣下空气层的研究中,增大环境风速会加大着装人体向外界的散热量,从而导致睡袋的保暖效果变差。随着风速的增加,睡袋的总热阻值有不同程度的降低,降低的过程非线性的,因此通过非线性曲线进行拟合,得到如木乃伊类型睡袋

与信封类型睡袋拟合曲线。参照王发明等^[18]的研究结果进行曲线拟合。

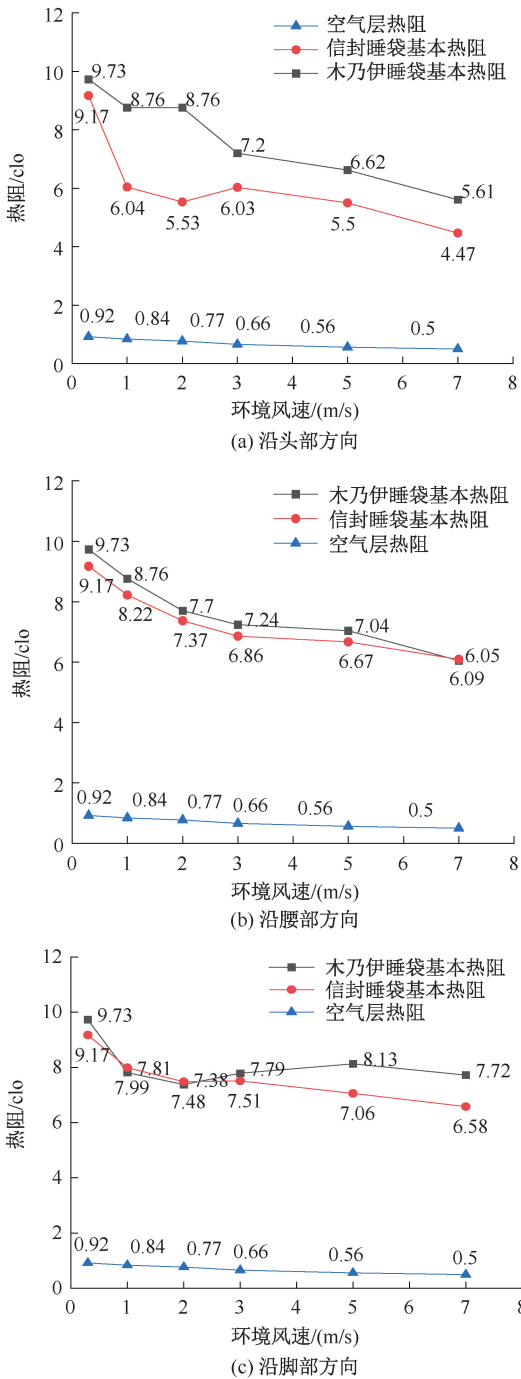


图 7 2 种睡袋在不同风向中的热阻

Fig. 7 Thermal resistance values of two sleeping bags in different wind directions

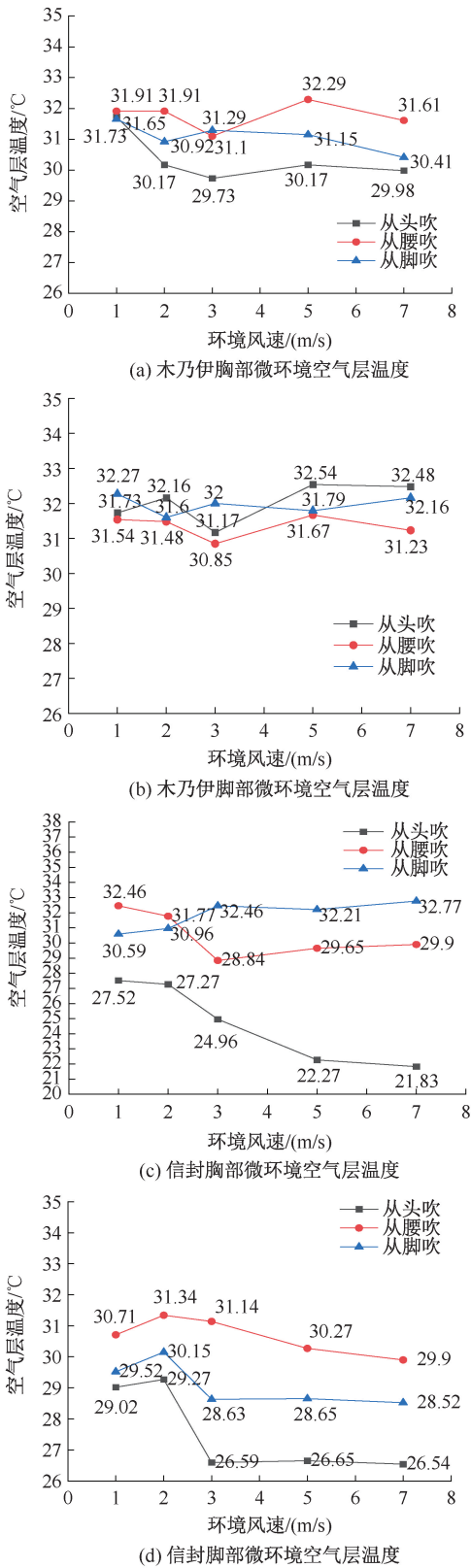


图 8 2 种睡袋中胸部和脚部微环境空气层温度变化
Fig. 8 Temperature diagrams of the air layers in the chest and feet of two sleeping bags

图 7 为睡袋基本热阻和空气层热阻随风速与风向变化的曲线图。可见:当风速从 0.3 m/s 增加到 7 m/s 时,沿头部方向吹风,木乃伊式睡袋和信封式睡袋基本热阻为 5.61 和 4.47 clo,分别下降 42.4%、51.2%;沿腰部方向吹风,木乃伊式睡袋和信封式睡袋基本热阻为 6.05 和 6.09 clo,分别下降 37.8%、33.5%;沿脚部方向吹风,木乃伊式睡袋和信封式睡袋基本热阻为 7.72 和 6.58 clo,分别下降 20.7%、28.2%。这是因为随着风速增大,睡袋表面的空气流速增大,风压增加,睡袋在风的压力下被压缩,导致睡袋蓬松度和睡袋中静止的空气含量降低,睡袋表面空气在风速的快速流动下,带走内部热量使得睡袋内部静止的空气变的活跃,导致热量的散失,从而导致从而导致 I_b 减小。图 7a 中,沿头部方向吹风对睡袋基本热阻影响较大,图 7c 中,沿脚部方向对睡袋基本热阻影响较小;这是因为沿头部方向,风会进入睡袋内部,大大增加了睡袋内部的空气热对流;沿脚部风速与风向更多从睡袋表面的热量,对睡袋内部的微环境影响较小。在环境舱中通过模拟冬季羽绒服热阻受温度、风速等环境因素的影响,研究发现随着风速的增大,羽绒服的固有热阻逐渐降低^[19],该结果与文中睡袋试验结果一致。

从图 8 可以看出,空气中风速与风向的不同导致睡袋表面空气层热阻变化况,当测试环境温度 -10℃,环境风速 0.3 m/s 时, I_a 最大为 0.92 clo,这是因为在相对无风环境中,静止的空气层在睡袋中可以起到一定的保暖隔热作用。当风速增大到 7.0 m/s 时, I_a 为 0.5 clo,最大降幅为 50%,睡袋表面空气层变得非常稀薄。

图 8 为低温复合环境中 2 种不同类型睡袋中胸部和脚部微环境空气层温度变化图。从图 8 中看出,随着风速与风向改变,木乃伊胸部和信封睡袋胸

部微环境空气层温度变化相对比较稳定,相较于暖体假人皮肤温度设定的 34℃,睡袋内部的微环境空气层温度为 30~32℃。胸部是人体重要的保暖部位,微环境空气层温度高有益于维持人体体温;木乃伊睡袋脚部和信封睡袋脚部微环境温度受风速和风向变化的影响较为明显,特别是沿头部方向吹风过程中,木乃伊式睡袋和信封式睡袋脚部微环境空气层温度在 7 m/s 的风速下分别下降到 21.83 和 26.54℃,此时微环境空气层的温度对脚部的保暖性大大降低。研究发现,随着风速与风向的改变,开口程度越大,服装内部微环境空气层温度越低,信封睡袋受风速和风向影响较大,因此,在 -10℃ 的低温有风环境中使用睡袋尽量避免风沿头部方向吹入睡袋。在低温环境中睡袋脚部位的容易受到低温损伤,所以在使用睡袋时脚部保暖尤其重要,使用加热装置可有效提高保暖效果。

3 结 论

1) 单一低温环境中木乃伊式睡袋总热阻值为 9.909~10.667 clo,相较于信封式睡袋热阻值高出 0.652~1.63 clo;单一温度环境的变化对睡袋热阻值影响不显著。

2) 低温复合环境中增大环境风速会降低睡袋总热阻、基本热阻和空气层热阻。当风速为 7 m/s 时,木乃伊睡袋总热阻下降 42.4%,信封睡袋总热阻下降 50.2%;空气层热阻下降 50%。风向对睡袋热阻影响较大,信封式睡袋热阻值受风向影响较为突出;沿头部方向吹风对睡袋热阻值影响最大,沿脚部方向吹风对睡袋热阻值影响最小。

3) 通过暖体假人试验研究了睡袋的保暖性能,真人试验验证比较重要,由于试验条件相对恶劣,真人试验还需进一步优化,后续会开展真人试验,完善睡袋保暖性能的试验研究。

参 考 文 献

[1] 王小东,张弘.我国户外运动发展现状及对策探析[J].白城师范学院学报,2022,36(5):75-79.
Wang Xiaodong, Zhang Hong. Analysis of the development status and strategies of outdoor sports in china[J]. Journal of Baicheng Normal University, 2022, 36(5):75-79.

[2] 任可,吴建松,胡祝强,等.低温作业环境下应急救援人员局部冷损伤预测评价[J].科学技术与工程,2019,19(22):384-388.
Ren Ke, Wu Jiansong, Hu Zhuqiang, et al. Prediction and evaluation of local cold injury of emergency rescuers in low temperature working environment[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 384-388.

[3] 陈飞宇,付明,申世飞,等.-10℃~5℃低温环境下体育锻炼人员人体热反应关键参数的实验研究[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(6):1059-1066.
Chen Feiyu, Fu Ming, Shen Shifei, et al. Experimental study of thermo-physiological responses of exercising subjects in

- 10℃-5℃ cold environments[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(6):1059-1066.
- [4] 兰明强,李亚运,王祥,等. 冷环境下基于暖体假人的帐篷内部热舒适性研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3):220-227.
Lan Mingqiang, Li Yayun, Wang Xiang, et al. Thermal comfort study on tent interior based on thermal manikin in cold environment [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3):220-227.
- [5] 李会改,张振方,程浩南,等. 睡袋用木棉/羽绒/涤纶填充料配比的优化分析[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(9):44-47.
Li Huigai, Zhang Zhenfang, Cheng Haonan, et al. Optimization analysis the ratio of kapok/down/polyester filler for sleeping bags [J]. Shanghai Textile Science&Technology, 2018, 46(9):44-47.
- [6] 张振方,王梅珍,万明,等. 纺织品中户外睡袋的发展研究[J]. 合成纤维, 2015, 44(7):51-54.
Zhang Zhenfang, Wang Meizhen, Wan Ming, et al. Research on the development of outdoor sleeping bags[J]. Synthetic Fibers in China, 2015, 44(7): 51-54.
- [7] Dabrowska A K. Assessment of the non-woven, goose down and duck down as thermally insulating materials for the clothing protecting against cold[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2017, 29(3):380-393.
- [8] Gao Jing, Pan Ning, Yu Weidong, et al. Fractal character forecast of down fiber assembly microstructure[J]. Journal of the Textile Institute, 2009, 100(6):539-544.
- [9] Kumar S B, Murugan T. Thermal property analysis of tri layer composite fabric towards the utility of sleeping bag[J]. Research Journal of Textile and Apparel, 2022, 26(2):124-137.
- [10] 安昱盈,温润,徐广标. 户外睡袋用面料防水透湿性能的评价[J]. 丝绸, 2020, 57(7):66-71.
An Yuying, Wen Run, Xu Guangbiao. Water resistance and moisture permeability of fabrics for outdoor sleeping bags[J]. Journal of Silk, 2020, 57(7): 66-71.
- [11] An Yuying, Xu Guangbiao, Shen Hua. Factors influencing thermal resistance of a down sleeping bag[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2021, 33(6):966-979.
- [12] Huang Jianhua. Prediction of air temperature for thermal comfort of people using sleeping bags: a review[J]. International Journal of Biometeorology, 2008, 52(8):717-723.
- [13] 代萌婷,屠晔. 衣下空气层对咖啡碳纤维防寒服保暖性的影响[J]. 丝绸, 2021, 58(11):33-39.
Dai Mengting, Tu Ye. Influence of air layer entrapped in clothing on thermal insulation property of coffee carbon fiber cold protective clothing[J]. Journal of Silk, 2021, 58(11):33-39.
- [14] Wang Faming, Peng Hui, Shi Wen, et al. The relationship between air layers and evaporative resistance of male Chinese ethnic clothing[J]. Applied Ergonomics, 2016, 56:194-202.
- [15] 史雯,卢业虎,王发明. 中国20个少数民族男性服装整体和局部热阻的研究[J]. 丝绸, 2015, 52(10):11-18.
Shi Wen, Lu Yehu, Wang Faming. A study on overall and local thermal resistance of male costumes from twenty minority ethnic groups in china[J]. Journal of Silk, 2015, 52(10): 11-18.
- [16] 张昭华,王云仪,李俊,等. 衣下空气层厚度对着装人体热传递的影响[J]. 纺织学报, 2010, 31(12):103-107.
Zhang Zhaohua, Wang Yunyi, Li Jun, et al. Effect of thickness of air layer under clothing on heat transmission of wearer[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(12):103-107.
- [17] 郭贤,李亚运,付明,等. 低温复合环境冰雪运动服装保暖性能实验研究[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2021, 41(4):42-49.
Guo Xian, Li Yayun, Fu Ming, et al. Experimental research on thermal insulation performance of ice and snow sports clothing in compound environment under low temperature[J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(4):42-49.
- [18] 王发明,及二丽,郑智毓,等. 多层服装热湿传递特性的预测[J]. 苏州大学学报(工科版), 2007, 27(6):1-6.
Wang Faming, Ji Erli, Zheng Zhiyu, et al. Prediction on the heat and moisture transfer property of multi-layers garments[J]. Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition), 2007, 27(6):1-6.
- [19] 张梦妮,骆鑫荣,陈少伟,等. 风速影响下羽绒服保暖性能定量研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2021, 38(3):18-23.
Zhang Mengni, Luo Xinrong, Chen Shaowei, et al. Quantitative study on warmth retention properties of down jacket under wind speed[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2021, 38(3):18-23.
- [20] Zhang Chengjiao, Ren Chongguang, Li Ying, et al. Designing a smart electrically heated sleeping bag to improve wearers' feet thermal comfort while sleeping in a cold ambient environment[J]. Textile Research Journal, 2017, 87(10):1251-1260.