

环境试验与观测

低温复合条件下救灾帐篷环境适应性试验与评价

兰明强^{1,2}, 王祥^{1,2}, 李亚运², 李念思², 郭贤², 张艳³, 刘小勇²

(1.安徽建筑大学 土木工程学院, 合肥 230601; 2.清华大学合肥公共安全研究院 灾害环境人员安全
安徽省重点实验室, 合肥 230601; 3.安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要: **目的** 研究救灾帐篷性能受恶劣环境的影响。**方法** 建立多灾复合环境试验平台, 利用其平台开展救灾帐篷不同工况下的试验研究, 探究不同环境下救灾帐篷内部热环境分布和保温性能的变化。**结果** 帐篷内部热环境分层现象只发生在温度上升阶段, 而在附加风载后, 分层现象减弱, 在下降阶段, 各内表面温度变化情况表现基本一致, 当附加雪载环境温度低于-10℃时, 救灾帐篷的保温性变差。利用价值函数法建立了救灾帐篷耦合环境适应性评价指标体系, 提出了风&低温、雨雪复合环境下救灾帐篷适应性评价方法, 得出评价得分, 并与试验结果相印证。**结论** 低温复合环境下, 帐篷内环境受外界影响较大, 保温性能不佳, 易出现“冷室效应”, 应积极寻找新型材料改善帐篷在恶劣环境下的环境适应性。

关键词: 风&雨雪; 低温复合环境; 救灾帐篷; 环境适应性; 评价方法; 价值函数法

中图分类号: X4; TU29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)07-0121-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.07.016

Experiment and Evaluation of Environmental Adaptability of Disaster Relief Tent under Low Temperature Compound Condition

LAN Ming-qiang^{1,2}, WANG Xiang^{1,2}, LI Ya-yun², LI Nian-si², GUO Xian², ZHANG Yan³, LIU Xiao-yong²

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Hefei Institute of Public Safety Research, Tsinghua University, Anhui Key Laboratory of Disaster Environmental Personnel Safety, Hefei 230601, China;
3. Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effects of harsh environment on the performance of disaster relief tents. A multi-disaster compound environment experimental platform was established to conduct experimental research on different working conditions of disaster relief tents, and to explore the changes of internal thermal environment distribution and thermal insulation performance of disaster relief tents under different external environments. The results indicated that the stratification of thermal environment occurred only in the temperature rising stage, yet weakened after the addition of wind load. In the descending stage, the temperature changes of each inner surface were basically the same. When the ambient temperature of addi-

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-01

Received: 2021-09-07; Revised: 2021-11-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0810603)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2018YFC0810603)

作者简介: 兰明强(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为公共安全、装备的环境适应性。

Biography: LAN Ming-qiang (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: public safety and environmental adaptability of equipment.

通讯作者: 刘小勇(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为公共安全、检验检测。

Corresponding author: LIU Xiao-yong (1980-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: covers public safety and inspection and testing.

引文格式: 兰明强, 王祥, 李亚运, 等. 低温复合条件下救灾帐篷环境适应性试验与评价[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 121-128.

LAN Ming-qiang, WANG Xiang, LI Ya-yun, et al. Experiment and Evaluation of Environmental Adaptability of Disaster Relief Tent under Low Temperature Compound Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 121-128.

tional snow load is lower than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the thermal insulation of relief tents becomes poor. The evaluation index system of disaster relief tent coupling environment adaptability was established by value function method, and the evaluation method of disaster relief tent adaptability under wind-low temperature, rain and snow compound environment was proposed, and the evaluation score was verified by the test results. In conclusion, the internal environment of tents under low temperature compound environment is greatly affected by external environment, and thereby the thermal insulation performance is poor with the “cold chamber effect” easy to appear. Therefore, new materials should be actively sought to improve the adaptability of tents under harsh environment.

KEY WORDS: wind & snow; low temperature compound environment; relief tents; environmental adaptability; evaluation method; value function method; function method; disaster relief tent

近年来,受极端气候影响,自然灾害、事故灾害频发。2021年5月22日,在甘肃省举办的山地马拉松百公里越野赛发生意外,由于天气突变,出现了冰雹、冻雨、强风灾害性天气,气温骤降,运动员身体出现不适、失温等不良反应,此次事件共造成21人遇难^[1]。在救灾过程中,救灾帐篷是过渡安置阶段中一种典型的常见应急救援装备,因其价格低廉、运输方便、使用场合广泛,成为我国应急救援的主力军^[2]。

目前针对帐篷的研究主要集中在帐篷涂料对隔热效果的影响^[3]、空调送风对帐篷内环境的影响^[4]、淋水对帐篷热环境改善等^[5],而对救灾帐篷灾害环境适应性的研究极少,主要是由于缺失极端灾害环境、多灾耦合环境测试平台。美国阿伯丁实验中心拥有吹风-淋雨综合系统试验平台,通过该系统能够近似模拟自然环境和少数极端环境^[6]。在研究影响帐篷内部湿热环境因素的试验中,Crawford等^[7]通过试验研究了寒冷条件下帐篷内部温、湿度变化情况,进一步发展了评估帐篷内部生活环境质量和居住舒适度的试验方法。国内环境适应性检测平台主要为模拟高温、低温、淋雨等单灾环境平台。王涛^[8]通过对冬季帐篷内部环境的温湿度进行研究,发现夜间帐篷内部有热

源时,可提高人体的热舒适性。孙乐^[9]以人本理念为切入点,通过对人、产品、环境三者的关系进行分析,对帐篷进行了改进设计,使之更符合用户的使用需求。以上研究大多针对单一灾害环境,而在实际救援活动中面临的往往是复杂环境,因此帐篷作为常见的应急救援装备,研究其在风低温雨雪等复合灾害环境下的耦合效应十分有意义。

本研究通过救灾帐篷环境适应性试验平台模拟风、低温、雨雪等多种气候,研究帐篷的环境适应性。同时基于试验研究,提出复合环境下救灾帐篷指标体系,并评估帐篷的灾害环境适应性。

1 环境适应性试验设计

1.1 试验设备

多灾耦合环境适应性试验平台由恒温恒湿环境舱、低温雨雪冰冻耦合环境舱、LD3120G温湿度记录仪、救灾专用帐篷等组成,如图1所示。该平台可提供一个可精确控制的温湿度环境,用以模拟不同环境条件下的各种工况,以便研究各种环境因素对帐篷性能的影响。

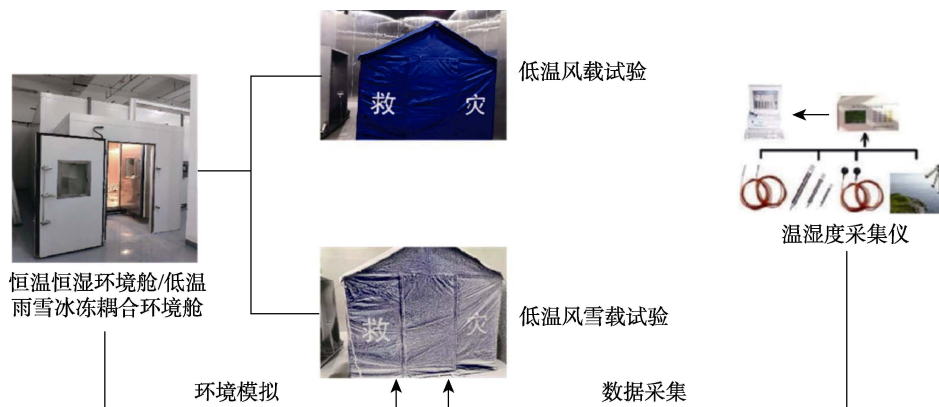


图1 救灾帐篷环境适应性试验平台

Fig.1 Environmental adaptability test platform for disaster relief tents

本试验采用步入式恒定湿热环境舱、低温雨雪冰冻耦合环境舱,可模拟高温、低温、湿度、淋雨、冰

冻、降雪、强风等复合环境条件,开展救灾帐篷复合环境条件下性能测试。温度范围为 $-40\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,降雨

强度为 0~40 mm/h, 雨量自动可调, 覆冰系统的覆冰/降雪厚度为 10 mm/h。LD3120G 温湿度测试记录仪具备多点同步测试的能力, 可实时采集温度、湿度、风速数据。

1.2 测试对象及方案

选取某品牌型号民政救灾棉帐篷为典型救灾帐篷开展试验研究, 其面料为单层 PVC 涂层牛津布, 里料为拉力毛毡。结构尺寸为 2.5 m×2.5 m, 檐高 1.76 m, 顶高 2.5 m, 正面山墙设有尺寸为 0.8 m×1.76 m 的出入口, 两面侧墙分别向外开设 0.5 m×0.5 m 的 2 个窗^[10]。救灾帐篷实物如图 2 所示。

1.3 测点布置

根据帐篷内部框架结构, 选取各杆件交点位置布置温度、湿度传感器, 如图 3a 所示。因帐篷内部空间较大, 内部温度分布情况未知, 选取帐篷内部上、

下 2 部分中心位置分别布置温湿度测点, 如图 3b 所示。同时在试验舱内布置温度、湿度、风速传感器, 测量结果作为室内温度、室内湿度、室内风速。



图 2 救灾帐篷实物
Fig.2 Actual picture of relief tent

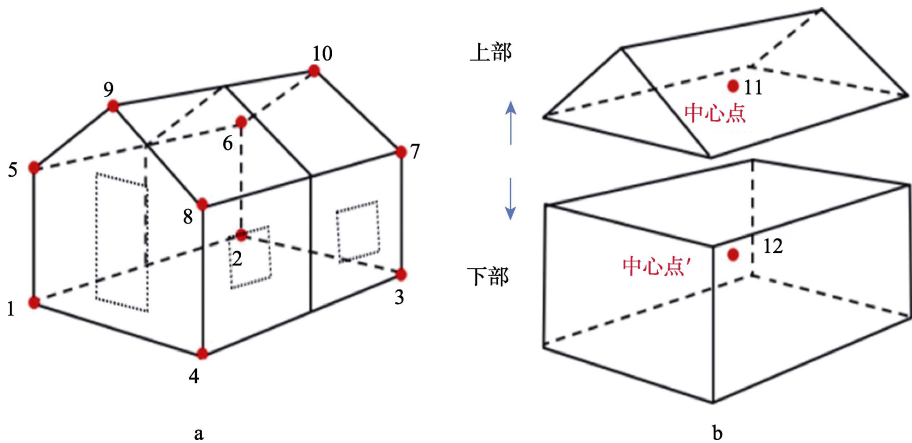


图 3 帐篷结构测点布置
Fig.3 Layout of measuring points for tent structure

2 风&低温耦合试验

2.1 测试工况

参考 GJB 1172.2—1991《军用设备气候极值地面气温》中记录的我国地面最高、最低气温值以及近年来我国内陆地区平均气温的变化情况^[11], 选定低温试验上限为 10 ℃、下限为-20 ℃。此外, 根据救灾帐篷实际使用情况, 选取 2 种极限状态进行测试(一种门窗全部打开, 另一种门窗全部关闭), 研究不同

环境条件下, 救灾帐篷内部温度的变化情况。具体的试验工况设置见表 1。

2.2 篷围内表面温度变化分析

因各点温度可能存在不均匀的情况, 为减小试验误差, 将帐篷内表面划分为底面、侧面(左/右/前/后)、顶面(左/右)。以各面为研究对象, 取帐篷各面上温度传感器温度的平均值对救灾帐篷内表面温度进行分析, 结果如图 4—7 所示。

表 1 低温有无风载试验工况及操作流程
Tab.1 Low temperature with and without wind load test conditions and operation flow

试验名称	试验参数	主要试验步骤	试验工况
低温试验	温度: -20~10 ℃	室温→10 ℃→-20 ℃→10 ℃→室温	试验 1: 门窗全打开 试验 2: 门窗全关闭
低温风载试验	温度: -20~10 ℃ 风速: 3 m/s	室温→10 ℃→加风载→-20 ℃→10 ℃→室温	试验 3: 门窗全打开 试验 4: 门窗全关闭

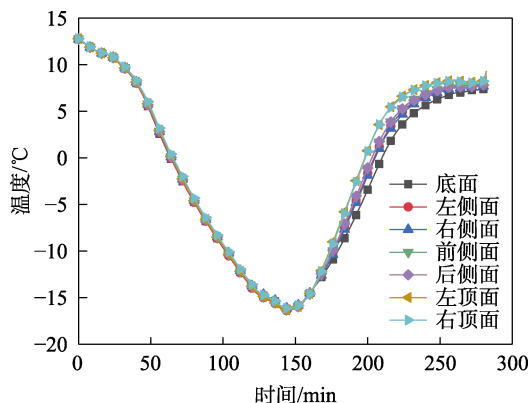


图4 门窗关闭

Fig.4 Closing doors and windows

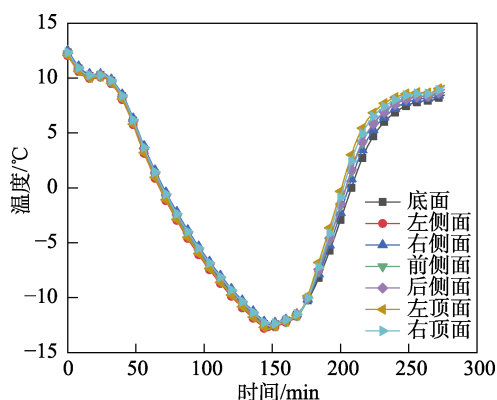


图5 门窗关闭加风载

Fig.5 Wind loading after doors and windows are closed

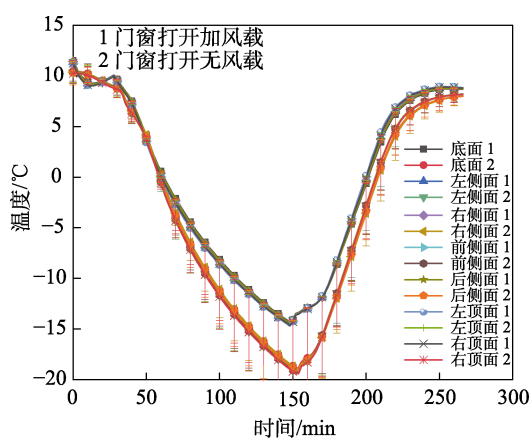


图6 门窗打开情景下有无风载

Fig.6 With and without wind load when doors and windows are open

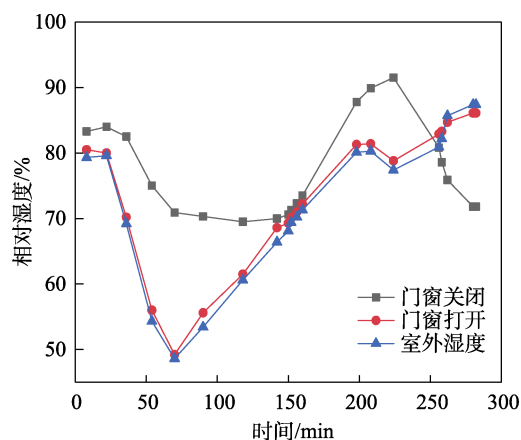


图7 门窗打开和门窗关闭相对湿度变化趋势

Fig.7 Relative humidity variation trend between doors and windows opened and closed

由图4中各面温度变化曲线可知,底面和右顶面的温差最大达到2.5℃。对比图4和图6中曲线2可知,相同试验流程,门窗打开时帐篷内部各表面温度相近,而在门窗关闭情境下的升温阶段,温度曲线出现分层现象。这是由于热空气上升、冷空气下降造成的,门窗打开使得通风面积增大,流场扰动使内部温度场被破坏,内部各面温度更快趋向于一致,从而使分层现象消失。对比图4和图5可以发现,附加风载后,温度的下降速率较快,主要是由于在降温初期,风力使帐篷周围空气流动增加,导致温度下降速率变快。对比图6中2条曲线可知,在相同降温过程中,门窗打开情境下,有无风荷载时的最低温度相差5℃。由图7相对湿度变化趋势可知,门窗打开,帐篷内和室外的湿度变化趋势基本一致;而门窗关闭时,相对湿度在试验250 min前一直高于门窗打开和室外湿度,并在220 min左右达到最大相对湿度91.5%。至于有风工况下,风对湿度传感器的影响比较大,测不到相关湿度,暂不对其分析。

2.3 帐篷内部温度变化分析

救灾帐篷内部是灾民赖以生存的环境,而内部环境温度的高低直接影响人的热舒适性,因此常用保温

性来衡量帐篷抵抗温度变化能力。为了排除外界空气流动对帐篷保温性的影响,以门窗全封闭状态对帐篷内部温度的变化进行研究。

对有无风载帐篷内部温度的变化情况进行分析,门窗关闭情况下,试验舱内外温度变化的曲线形成的面积,代表日常使用过程中由于人员进出和环境温度变化所引起的温度变化区间。以两者形成的面积(S)代表帐篷保温性能的大小。通过对比图8a、b可知, $S_{\text{无风}} > S_{\text{有风}}$,说明附加风载后会降低帐篷的保温性能,使其更快达到耐受极限。在回温阶段,帐篷门窗全打开时的内部温度高于门窗全关闭时的内部温度,说明帐篷在冬天温度变化时易出现“冷室效应”,应在早晚适当打开门窗改变内部热环境,保持一个舒适的居住环境,也可选择合适地布^[12]提高人员居住的舒适度。

3 风&低温雨雪耦合试验

3.1 测试工况

为了更全面地了解帐篷在各种灾害环境的环境适应性,将帐篷门窗关闭,移入低温雨雪冰冻耦合环境舱进行试验,试验工况见表2。

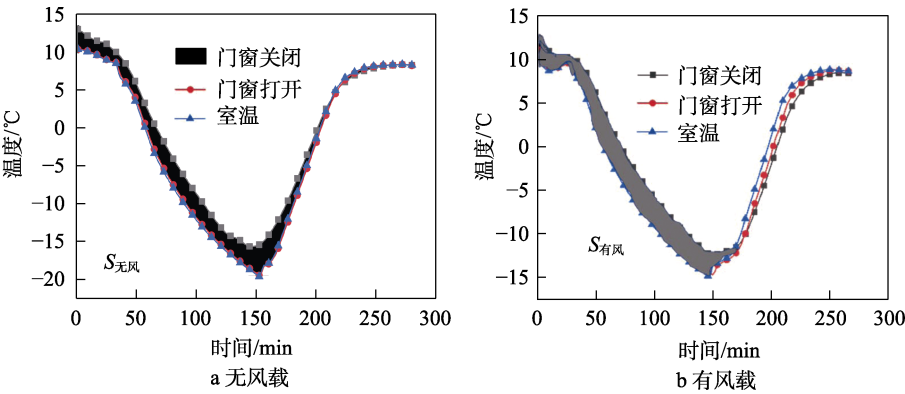


图 8 低温帐篷内外温度变化
Fig.8 Temperature changes inside and outside a low-temperature tent: a) no wind-borne; b) with wind-borne

表 2 低温风/风雪载试验工况及操作流程
Tab.2 Low temperature wind/wind and snow load test conditions and operation flow

试验名称	试验参数	主要试验步骤	试验工况
低温风载试验	温度: -20~10 ℃, 风载: 3 m/s	室温→10 ℃→加风载→-20 ℃	试验 5: 门窗全封闭
低温风雪载试验	温度: -20~10 ℃, 风载: 3 m/s	室温→10 ℃→加风载→-15 ℃→降雪→-20 ℃	试验 6: 门窗全封闭

3.2 篷围内表面温度变化分析

由图 9 可知,当只有风载时,篷围内表面温度下降比较正常;当雪形成时,由于水蒸气凝固形成晶体而放热,因此短时间篷围内表面温度有所上升。待自然回温时,帐篷内部热环境又出现分层现象。主要是由于底部未铺设地布,地面温度影响下部空气层温度传递,且风载作用于左侧,使底面温度最低,左侧面次之,右顶面温度最高。另外,低温时,内表面温度低于外表面,说明内部温度低于外部。

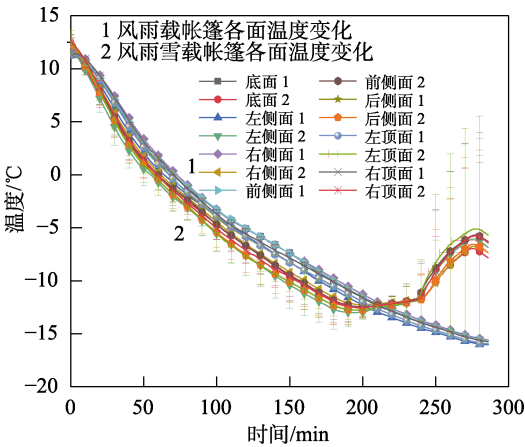


图 9 低温风/雪载各面温度变化
Fig.9 Temperature change of each surface under low-temperature wind/snow load

3.3 帐篷内部温度变化分析

由图 10 对帐篷的保温性能进行研究。通过对比可知, $S_{风} > S_{风雪}$, 说明附加雪载后会影响帐篷的保温性,且当温度降到-10 ℃后,由于保温材料的局限性,帐篷的保温性能急剧下降,表明其在低温风雨雪中环境的适应性较差。由图 11 可知,由于雪的产生使风

雨雪耦合工况下帐篷内部相对湿度始终高于风雨耦合帐篷内部湿度,这 2 种工况下相对湿度都超出人体舒适的范围,总体湿度较大,应常开窗,改善人体的舒适感。

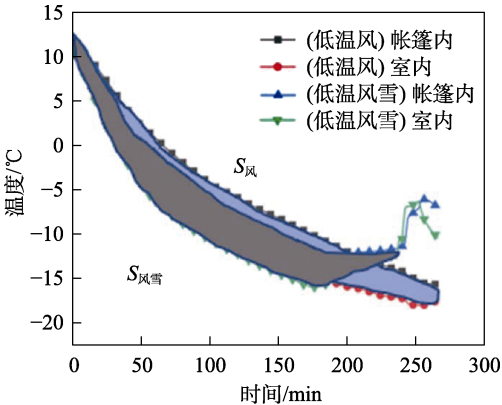


图 10 低温风雪温度变化对比
Fig.10 Comparison of temperature changes of low-temperature snowstorm

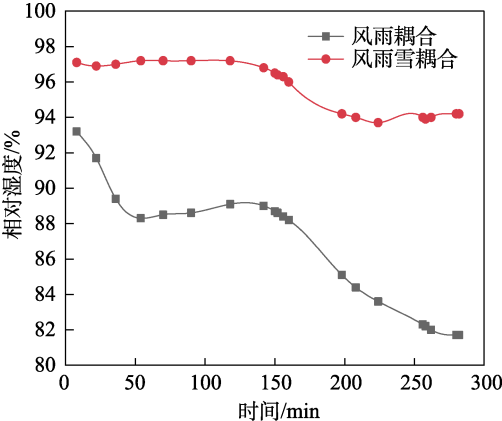


图 11 低温风雨雪帐篷内部相对湿度趋势变化
Fig.11 Variation trend of relative humidity inside low-temperature storm and snow tents

4 风&低温&雨雪复合环境下救灾帐篷评价

4.1 评价思路

目前市面上帐篷生产一直处于一种无序的状态, 主要由于无法使用一种方法来评判其环境适应性的好坏。因此, 本文利用搭建的多灾耦合环境适应性平台, 对救灾帐篷开展了风雨雪低温环境下的试验研究, 从中提炼出多灾复合条件下救灾帐篷的关键性能指标, 建立复合环境下帐篷的环境适应性指标体系。根据试验获得的数据, 利用层次分析法^[13]对指标体系进行权重设置, 再采用模糊分析法^[14]、价值函数法^[15]设置评分矩阵, 将各功能得分与权重因子结合, 得出帐篷的指标评分, 从而评估低温复合环境下帐篷的环境适应性。

4.2 评价指标体系

以救灾棉帐篷为例, 选取 MZT 011.2—2010《救灾帐篷 第4部分: 12 m² 棉帐篷》^[16]中的检测指标, 同时结合救灾帐篷环境适应性试验结果, 筛选出受复合环境影响较为严重的参数进行分类, 得到救灾帐篷耦合环境下的评价指标体系, 如图 12 所示。

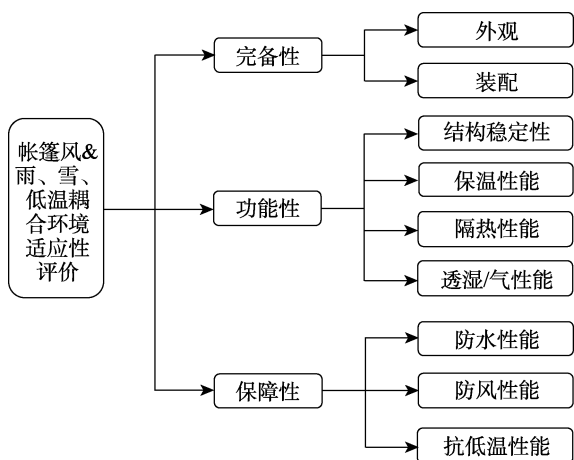


图 12 帐篷低温耦合环境下的评价指标

Fig.12 Evaluation index of tent in low-temperature coupling environment

首先, 建立价值函数法模型, 应先利用层次分析法确定目标层的 3 个指标, 即设完备性、功能性、保障性, 分别为 α 、 β 、 γ , 再设其权重向量为 $\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2\}$, $\bar{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$, $\bar{\gamma} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$ 。

其次, 由于因素层指标中各种参数单位、取值范围、衡量方式等各不相同, 导致无法统一进行计算, 因此可将定性指标 (如外观、装配、结构稳定性、透湿/气性能、防风性能) 先进行量化 (见表 3), 再将定量指标 (如保温性能、隔热性能、防水性能、抗低温性能) 标准化^[17]。为方便计算, 将外观、装配分

别设为 x_1 、 x_2 ; 结构稳定性、保温性能、隔热性能、透湿/气性能分别设为 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 ; 防水性能、防风性能、抗低温性能分别设为 z_1 、 z_2 、 z_3 。

表 3 定性指标量化标准

Tab.3 Qualitative indicators Quantitative standards

因素指标	取值			
	优(1)	良(0.7)	中(0.5)	差(0.3)
外观	完好	少量瑕疵	大量瑕疵	破坏严重
装配	完好	少量缝隙	大量缝隙	密封很差
结构稳定性	完好	轻微晃动	晃动幅度稍大	严重晃动
透湿/气性能	完好	轻微滴水	少量滴水	大量滴水
防风性能	完好	有轻微风	有少量风	有大量风

注: 两级别中间值分别取 0.85、0.60、0.40。

标准化定量指标则采用线性插值来确定, 当指标值小于或等于理想值取 1, 指标值大于无效点值取 0。根据实际试验情况来确定各定量指标的理想化值。以保温隔热性能指标为例, 当单位时间帐篷内部降温或升温速率实际值 l 为 10% 及以下时, 其标准值为 1; 当其实际值为 20% 以上时, 其标准值为 0, 从而得到其实际值与标准化值 y_2 之间的分段线性函数为:

$$y_2 = \begin{cases} 1 & 0 < l \leq 10\% \\ 2 - 10l & 10\% < l \leq 20\% \\ 0 & 20\% < l \end{cases} \quad (1)$$

同理, 帐篷防水、抗低温分段线性函数分别为:

$$z_1 = \begin{cases} 0 & 0 < l \leq 30 \\ 0.01l - 0.3 & 30 < l \leq 130 \\ 1 & 130 < l \end{cases} \quad (2)$$

$$z_3 = \begin{cases} 0 & 0 < l \leq 3 \\ 0.1l - 0.3 & 3 < l \leq 13 \\ 1 & 13 < l \end{cases} \quad (3)$$

设救灾帐篷环境适应性评价指标为 F , 则:

$$F = \alpha \cdot \bar{\alpha} \cdot \bar{x} + \beta \cdot \bar{\beta} \cdot \bar{y} + \gamma \cdot \bar{\gamma} \cdot \bar{z} = \alpha \cdot (\alpha_1, \alpha_2) \cdot (x_1, x_2) + \beta \cdot (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) \cdot (y_1, y_2, y_3, y_4) + \gamma \cdot (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \cdot (z_1, z_2, z_3) \quad (4)$$

再引入环境适应度^[18], 将评判结果分 4 级, 依次为极好、好、中等、差, 具体划分见表 4。

表 4 救灾帐篷环境适应性评价结果划分标准

Tab.4 Classification standards of environmental adaptability evaluation results of tents for disaster relief

评价等级	综合评判指标 F 值
极好	0.8~1
好	0.6~0.8
中等	0.4~0.6
差	0.4 以下

4.3 案例分析

为验证本评价指标体系的合理性, 选取某品牌救灾帐篷(如图 2 所示)开展试验。试验前, 在室温状态下测试该帐篷各性能均良好, 随后依据试验后数据对该救灾帐篷在低温复合条件下的环境适应性进行评价。

首先, 基于层次分析法进行权重计算^[19]。通过计算各个判断矩阵的最大特征值, 对所有矩阵进行一致性检验^[20], 最终得到帐篷的完备性、功能性、保障性指标权重分别为 0.194 7、0.717 2、0.088 1, 对应的权重向量分别为: $\bar{a} = \{0.2, 0.8\}$, $\bar{\beta} = \{0.459\ 4, 0.324\ 8, 0.149\ 1, 0.066\ 7\}$, $\bar{\gamma} = \{0.581\ 6, 0.309\ 0, 0.109\ 5\}$ 。其次, 引入实测参数值量化得到评价原始值, 再把评价原始值通过表 3 和公式(1)、(2)、(3)得到标准化值。最后将指标权重、权重向量代入公式(4)得到 F , 具体结果见表 5。

表 5 帐篷环境适应性评价
Tab.5 Adaptability evaluation of tent environment

类别	评价原始值	标准化值	F	评价等级
外观	优	0.7	0.574	中等
装配	良	0.7		
结构稳定性	优	0.6		
保温性能	15%	0.5		
隔热性能	15%	0.5		
透湿/气性能	良	0.4		
防水性能	100	0.6		
防风性能	优	0.6		
抗低温性能	11	0.4		

结果表明, 该型号帐篷的低温耦合环境适应性评价得分为 0.574, 属于“中等”, 相对室温状态下各性能良好有较大变化, 其中保温、隔热、抗低温性能受影响较大, 和低温复合环境下帐篷各性能变化结果一致。可见该评价方法合理, 同时可知低温耦合环境对帐篷性能的影响很大。

5 结论

本文通过对救灾帐篷提炼典型灾害环境因子, 模拟耦合灾害环境, 开展风&低温、雨雪试验, 对其温度变化、保温性能有了一定了解。得到以下结论:

- 1) 救灾帐篷在面对风雨雪低温复杂环境下, 篷围内表面温度只在上升阶段呈现分层现象, 而门窗打开时, 会破坏内部稳定状态; 当帐篷从-15℃回温时, 帐篷内部温度上升速度反而慢于室外温度, 会出现内部温度低于外部温度, 此时应该打开帐篷门窗, 改善内部热环境。
- 2) 创新性地提出针对典型灾害环境下的救援帐

篷环境适应性评价方法, 利用层次分析法结合价值函数法, 选取某一型号的救灾帐篷进行试验, 得出得分。从试验结果可知, 面对低温复杂气候, 应寻找新型材料改善帐篷的保温、隔热、透气等性能。

参考文献:

[1] 陈一竹. 甘肃马拉松, 致命的失温[J]. 人人健康, 2021(11): 18-21.
CHEN Yi-zhu. Fatal hypothermia in Gansu Marathon[J]. Health for Everyone, 2021(11): 18-21.

[2] 周理洁, 蒋雨彤, 胡中取. 基于应急救灾背景下的产品性能对比及发展方向探究[J]. 中国住宅设施, 2019(12): 84-86.
ZHOU Li-jie, JIANG Yu-tong, HU Zhong-qu. Research on Product Performance Comparison and Development Direction Based on the Background of Emergency Relief[J]. China Housing Facilities, 2019(12): 84-86.

[3] 田丰, 胡名玺, 倪爱娟, 等. 应急防控帐篷涂层隔热效果实验研究[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(9): 12-15.
TIAN Feng, HU Ming-xi, NI Ai-juan, et al. Experimental Study on Thermal Insulation Effect of Insulation Coatings of Emergency Treatment Tent[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(9): 12-15.

[4] 安瑞楠, 杨小凤, 庄春龙. 军用帐篷供暖送风方式的模拟分析[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(2): 206-210.
AN Rui-nan, YANG Xiao-feng, ZHUANG Chun-long. Optimization and Simulation of Heating Supply for Military Tents[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2015, 29(2): 206-210.

[5] 胡绍华, 孟庆林, 王超民. 淋水对帐篷热环境改善的实验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(2): 81-83.
HU Shao-hua, MENG Qing-lin, WANG Chao-min. Experimental Research of Improvement on Thermal Environment of Tents' by Passive Cooling[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, 23(2): 81-83.

[6] 郑陆枝. 框架式帐篷结构抗风可靠性分析及评价方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
ZHENG Lu-zhi. Wind Resistance Reliability Analysis and Evaluation Method Study on Frame Tent Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.

[7] CRAWFORD C, MANFIELD P, MCROBIE A. Assessing the Thermal Performance of an Emergency Shelter System[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(5): 471-483.

[8] 王涛. 救灾帐篷热湿环境测试与改善措施的模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
WANG Tao. Research on Indoor Thermal and Humidity Environment and Simulation of Improvement Measures for Relief Tents[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

[9] 周乐. 人本理念下的救灾帐篷设计研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.

- ZHOU Le. Research on the Design of Disaster Relief Tents under the Concept of Humanism[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [10] 徐坚强. 应急救援装备灾害环境适应性研究——以无人机、救灾帐篷为例[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
- XU Jian-qiang. Study on Environmental Adaptability of Emergency Rescue Equipment —Take UAV and Disaster Relief Tent as an Example[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020.
- [11] 林钧, 刘靖, 唐凤英. 重要的依据: GJB 1172《军用设备气候极值》[J]. 航空兵器, 1995, 2(1): 21-26.
- LIN Jun, LIU Jing, TANG Feng-ying. Important Basis: GJB 1172 Extreme Climatic Value of Military Equipment[J]. Aero Weaponry, 1995, 2(1): 21-26.
- [12] 郑建阳. 关于消防应急救援帐篷的分析报告[J]. 今日消防, 2020, 5(5): 22-23.
- ZHENG Jian-yang. Analysis Report on Fire Emergency Rescue Tent[J]. Fire Protection Today, 2020, 5(5): 22-23.
- [13] 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- QIAN Song-di. Operations Research[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [14] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 季敏. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.
- HAN Li, MEI Qiang, LU Yu-mei, et al. Analysis and Study on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 86-89.
- [15] 张生瑞. 公路交通可持续发展系统分析与评价[D]. 西安: 长安大学, 2002.
- ZHANG Sheng-rui. System Analysis and Evaluation of Highway Traffic Sustainable Development[D]. Xi'an: Changan University, 2002.
- [16] MZ/T 011.4—2010, 救灾帐篷 第4部分[S].
- MZ/T 011.4—2010, Relief Tent Part 4[S].
- [17] 王国良, 崔建岭, 申绪洞, 等. 面向逼真度评估的指标标准化方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(2): 155-160.
- WANG Guo-liang, CUI Jian-ling, SHEN Xu-jian, et al. Research on Normalizing Methods of Index Based on Fidelity Evaluation[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(2): 155-160.
- [18] 罗天元. 装备环境适应性的量化表征技术探讨[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 150-152.
- LUO Tian-yuan. Study on Quantitative Characterization Technique of Environmental Worthiness of Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 150-152.
- [19] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw Hill Inc, 1982: 13-53.
- [20] 金菊良, 魏一鸣, 潘金锋. 修正 AHP 中判断矩阵一致性的加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(1): 63-69.
- JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, PAN Jin-feng. Accelerating Genetic Algorithm for Correcting Judgement Matrix Consistency in Analytic Hierarchy Process[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(1): 63-69.

责任编辑: 刘世忠