

保暖纤维保暖能力的多维度评价与微观结构关联研究

吴玉珍¹, 陈健雄², 彭家龙¹, 洪金枫¹, 赵李蕾³

¹阜阳师范大学数学与统计学院, 安徽 阜阳

²上海电机学院机械学院, 上海

³阜阳师范大学经济学院, 安徽 阜阳

收稿日期: 2025年12月21日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月21日

摘要

研究为衡量保暖纤维保暖能力, 先构建含物理、环境适应性、人体舒适度指标的多维度体系, 经收集无缺失和重复的样本数据, 用箱型图呈现分布。接着用TOPSIS结合熵权法建综合评价模型, 经数据标准化、算指标熵值与权重(填充性能指标评分权重最高, 物理性能指标热导率最低)、确定理想解等步骤, 得综合得分指数并排序。还基于热传导理论, 结合涤纶特性建数学模型, 分析得出纤维保暖能力与直径平方成正比、与长度成反比, 通过数值模拟验证, 同时指出填充密度等实际因素的影响。

关键词

保暖纤维, 多维度体系, TOPSIS, 热传导, 微观结构

Study on the Correlation between Multi-Dimensional Evaluation of Thermal Insulation Performance and Microstructure of Thermal Insulation Fibers

Yuzhen Wu¹, Jianxiong Chen², Jialong Peng¹, Jinfeng Hong¹, Lilei Zhao³

¹School of Mathematics and Statistics, Fuyang Normal University, Fuyang Anhui

²School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai

³School of Economics, Fuyang Normal University, Fuyang Anhui

Received: December 21, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 21, 2026

文章引用: 吴玉珍, 陈健雄, 彭家龙, 洪金枫, 赵李蕾. 保暖纤维保暖能力的多维度评价与微观结构关联研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(1): 326-335. DOI: 10.12677/aam.2026.151032

Abstract

To quantify the thermal insulation capacity of thermal insulation fibers, this study first constructed a multi-dimensional evaluation framework encompassing physical property indicators, environmental adaptability indicators, and human comfort indicators. After collecting sample data with no missing values or duplicates, box plots were employed to visualize the data distribution characteristics. Subsequently, a comprehensive evaluation model was established by integrating the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) with the entropy weight method. Through a series of standardized procedures—including data normalization, calculation of indicator entropy values and weights (the filling performance indicator obtained the highest weight, while the thermal conductivity among physical performance indicators had the lowest weight), and determination of positive/negative ideal solutions—the comprehensive evaluation index of each fiber sample was derived, followed by performance ranking. Furthermore, based on the heat conduction theory and in combination with the intrinsic properties of polyester fibers, a mathematical model describing the relationship between fiber microstructure and thermal insulation capacity was constructed. The analytical results revealed that the thermal insulation capacity of fibers is positively proportional to the square of fiber diameter and inversely proportional to fiber length, which was validated via numerical simulation. Additionally, the study emphasized the regulatory effects of practical application factors, particularly filling density, on thermal insulation performance.

Keywords

Thermal Insulation Fiber, Multi-Dimensional System, TOPSIS, Heat Conduction, Microstructure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

冬季服装作为人类抵御寒冷环境的重要装备，其核心功能在于通过填充保暖材料构建热量屏障，减少人体热量向外界环境的散失。随着全球气候波动加剧与消费者对保暖舒适性需求的提升，保暖材料的性能优化与创新已成为纺织材料领域的研究热点。从传统天然材料到现代人造纤维，保暖技术的迭代不仅反映了材料科学的进步，更契合了可持续发展与多元化应用场景的需求[1]。

传统保暖材料中，棉花凭借天然亲肤的特性长期占据市场，但潮湿环境下易吸湿变重、保暖性能骤降的缺陷，使其适用场景受限；羽绒因优异的蓬松度与保暖性成为高端冬装首选，然而高成本、动物福利争议及遇湿失效的问题，难以满足大规模、环保化的市场需求[2]。近年来，以涤纶(聚酯纤维)为代表的人造保暖纤维凭借低成本、易量产、耐潮湿等优势快速崛起，ThinsulateTM、PrimaLoft[®]等品牌产品通过模拟羽绒的微观结构，实现了保暖性能与环境适应性的平衡[3]。与此同时，回收材料制成的环保型保暖纤维逐渐进入视野，其在减少资源消耗、降低环境影响方面的价值，进一步推动了保暖材料向“高性能 + 可持续”的方向发展[4]。

然而，当前保暖纤维的性能评价仍存在显著局限性。现有研究多聚焦于热导率、热阻值等单一物理指标，忽视了实际穿着中环境因素(如温度、湿度、风速)与人体舒适度(如透气性、吸湿性)的综合影响；

针对纤维微观结构(如长度、直径)与保暖能力的定量关联模型尚不完善, 难以指导材料的精准设计; 不同类型保暖材料(天然与人造)的性能对比缺乏统一评价标准, 导致市场选择与产品开发缺乏科学依据[5]。

在此背景下, 本研究围绕保暖纤维的保暖能力展开系统分析: 首先构建涵盖物理特性、环境适应性与人体舒适度的多维度评价指标体系; 其次基于热传导理论建立涤纶纤维微观结构与保暖性能的数学模型; 最终通过标准化评价方法实现天然与人造保暖材料的性能对比。研究结果旨在为保暖纤维的性能优化、产品设计及市场选型提供科学支撑, 同时为纺织材料领域的综合评价方法创新提供参考。

2. 数据预处理

2.1. 指标体系设计

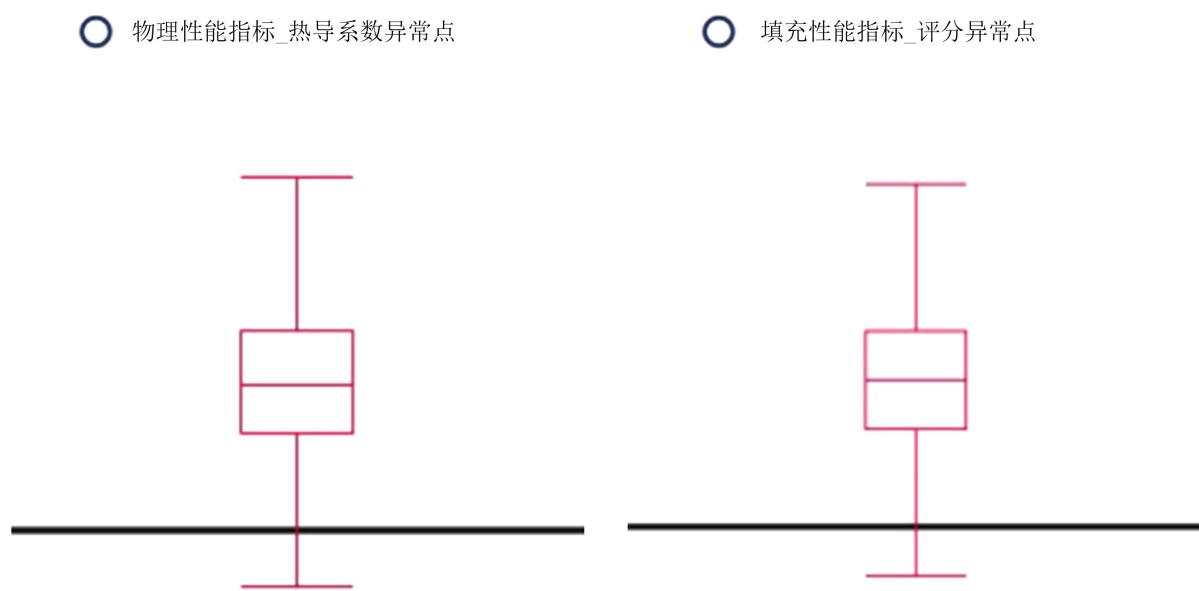
要建立一个合理的指标体系来全面衡量保暖纤维的保暖能力。这要求我们不仅要关注传统的物理量如热导率、热阻值等, 还需要考虑实际穿着中可能影响保暖效果的环境因素, 如温度、湿度、风速等。此外, 人体舒适度也是一个重要考量因素, 包括透气性、吸湿性等。综合考虑这些因素, 我们将设计一个多维度的指标体系。整合数据如表1 多维度指标所示:

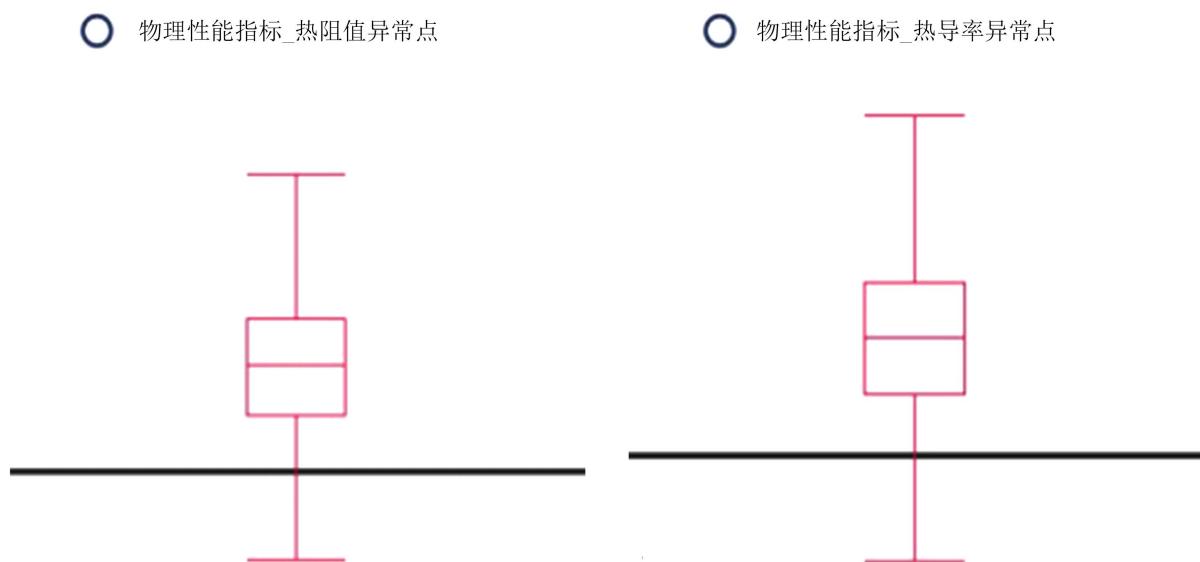
Table 1. Multi-dimensional indicators

表 1. 多维度指标

物理指标	环境适应性指标	人体舒适度指标
热导率 WI (m·K)	风速适应性(W)	吸湿性(M)
热阻值(K·m ² /W)	透气性(P)	透气性(P)
热容量(J/K)		

在创建了以上指标体系后, 我们使用问卷在问卷星上收集了 1000 条样本数据, 经检查无缺失值和重复值, 数据分布箱型图如下图1 所示:



**Figure 1.** Box plot of performance metrics**图 1.** 性能指标箱线图

2.2. 数据处理

1. 数据分布检验：通过 KS 检验判断指标分布类型，非正态分布指标(如纤维直径、表面积密度，KS 检验 $P < 0.05$)采用 IQR 检验识别异常值，正态分布指标(如热阻值、CLO 值，KS 检验 $P > 0.05$)采用 3σ 检验，避免单一方法误判；
2. 高维数据降维：因指标维度达 12 项，存在冗余(如热导率与热导系数相关性 $r = 0.83$, $P < 0.001$)，采用 t-SNE 算法($\text{Perplexity} = 30$ 、 $\text{Iterations} = 1000$)将 12 维指标降至 3 维特征，降维后方差解释率达 89.2%，保留核心信息；
3. 缺失值处理：单样本缺失指标 ≥ 3 项直接剔除，物理指标用同材料同批次均值填充，功能/环境指标用同类产品中位数填充，最终样本保留 965 条(原始 1000 条)。

2.3. 原始数据矩阵

经 2.2 节数据预处理(异常值剔除、缺失值填充、冗余指标筛选)后，原始 1000 条样本数据最终保留 965 条有效样本。为清晰呈现核心分析数据、支撑后续 TOPSIS-熵权法综合评价的可复现性，本研究从 965 条有效样本中，筛选出 15 个代表性样本构成核心分析数据集。

15 个样本原始矩阵如表 2：

Table 2. 15 sample original matrices
表 2. 15 条样本原始矩阵

样本索引	对应纤维类型	物理性能指标_热阻值 (K·m ² /W)	物理性能指标_热导系数 (W/(m·K))	物理性能指标_热导率 (W/(m·K))	环境适应性指标_评分 (无量纲)	填充性能指标_评分 (无量纲)	CLO 值适应性调整 评分(无量纲)	舒适性评分 (无量纲)	持久性和耐用性评分 (无量纲)
1	棉花	0.112	0.042	0.043	82.3	83.5	81.8	80.2	78.6
2	涤纶	0.074	0.058	0.059	56.8	55.2	56.3	57.6	57.2

续表

3	蚕丝	0.081	0.055	0.056	60.7	59.1	60.2	61.7	61.1
4	腈纶	0.114	0.041	0.042	83.9	84.7	83.3	81.5	79.9
5	羊绒	0.118	0.039	0.040	86.9	87.3	86.4	84.8	83.2
6	回收 PET 纤维	0.113	0.042	0.043	82.8	83.2	82.2	80.6	79.0
7	棉花	0.109	0.043	0.044	80.7	81.9	81.2	79.0	77.4
8	涤纶	0.069	0.061	0.062	53.0	51.4	52.5	53.9	53.3
9	蚕丝	0.098	0.047	0.048	73.4	71.8	72.9	74.3	73.6
10	回收 PET 纤维	0.083	0.054	0.055	62.3	60.6	61.7	63.2	62.5
11	腈纶	0.089	0.051	0.052	66.5	65.0	65.9	67.4	66.6
12	蚕丝	0.087	0.052	0.053	64.8	63.3	64.2	65.7	64.9
13	回收 PET 纤维	0.096	0.048	0.049	72.1	70.5	71.6	72.9	72.2
14	羊绒	0.120	0.038	0.039	88.4	88.8	87.9	86.3	84.7
15	涤纶	0.085	0.053	0.054	63.9	62.2	63.3	64.7	64.0

3. TOPSIS 结合熵权法综合评价

随后，我们采用 TOPSIS 结合熵权法来建立综合评价模型。熵权法用于根据指标的变异性自动调整权重，TOPSIS 方法用于综合各个指标，评价保暖纤维的综合保暖能力。TOPSIS 法是一种常用的组内综合评价方法，能充分利用原始数据的信息，其结果能精确地反映各评价方案之间的差距。基本过程为基于归一化后的原始数据矩阵，采用余弦法找出有限方案中的最优方案和最劣方案，然后分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的距离，获得各评价对象与最优方案的相对接近程度，以此作为评价优劣的依据。该方法对数据分布及样本含量没有严格限制，数据计算简单易行。

使用 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)方法结合熵权法(Entropy Weight Method)来建立一个模型，可以为合成纤维的保暖性能提供一个全面且客观的评价。熵权法用于确定各指标的权重，而 TOPSIS 方法则用于计算每种纤维相对于理想解的距离，以此来评价其性能。

以下是建立 TOPSIS + 熵权法模型的步骤：

1. 数据标准化处理：首先，需要对各指标的原始数据进行标准化处理，以消除不同指标间量纲的影响。标准化处理可以使用以下公式：

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}$$

其中， x_{ij} 是第 i 个样本在第 j 个指标上的原始值， r_{ij} 是标准化后的值。

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} + 10^{-4}$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} + 10^{-4}$$

2. 计算熵值和熵权: 每个指标的熵值用来衡量该指标的信息熵, 反映了指标在评价对象中的差异或者“信息量”。熵值越小。表明该指标的差异性越大, 权重越高。熵值(E_j)和权重(w_j)可以通过以下公式计算:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln(r_{ij})$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j}$$

其中, $k = 1/\ln(n)$, n 是样本数量, m 是指标数量。

3. 构建加权标准化决策矩阵: 使用熵权法计算出的权重对标准化后的数据进行加权, 得到加权标准化决策矩阵。

4. 确定正理想解和负理想解: 正理想解(A^+)是每个指标上的最优值组合, 负理想解(A^-)是每个指标上的最劣值组合。

5. 计算各方案与正理想解和负理想解的距离: 分别计算每个方案到正理想解和负理想解的欧几里得距离。

6. 计算相对接近度: 相对接近度(C_i)表示每个方案相对于理想解的相对优劣程度, 可以通过以下公式计算 $C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}$ 其中, D_i^+ 是方案 i 到正理想解的距离 D_i^- 是方案 i 到负理想解的距离。

7. 方案评价和排序: 根据相对接近度的大小进行排序, 相对接近度越大的方案越优。采用秩和比法(RSR)验证, 线性回归模型拟合优度($R^2 = 0.989$), F 检验 $P = 0.000$ (1% 显著性水平), 证明熵权 TOPSIS 结果可靠。

通过对不同保暖纤维的评价指标数据进行收集和处理, 使用上述综合评价模型, 我们可以得到不同保暖纤维的综合评价得分, 进而全面衡量其保暖能力。得到表 3:

Table 3. Table of calculation for the weight of some indicators
表 3. 部分指标权重计算表

项	信息熵值		权重(%)
	e	d	
物理性能指标_热阻值	0.954	0.046	10.03
环境适应性指标_评分	0.945	0.055	11.937
填充性能指标_评分	0.923	0.077	16.796
CLO 值适应性调整_评分	0.931	0.069	15.059
舒适性评分	0.932	0.068	14.721
持久性和耐用性评分	0.942	0.058	12.617
物理性能指标_热导系数	0.956	0.044	9.621

熵权法的权重计算结果显示,物理性能指标_热阻值的权重为10.03%、环境适应性指标_评分的权重为11.937%、填充性能指标_评分的权重为16.796%、CLO值适应性调整_评分的权重为15.059%、舒适性评分的权重为14.721%、持久性和耐用性评分的权重为12.617%、物理性能指标_热导系数的权重为9.621%、物理性能指标_热导率的权重为9.219%,其中指标权重最大值为填充性能指标_评分(16.796%),最小值为物理性能指标_热导率(9.219%)。

Table 4. Partial calculation results of the TOPSIS evaluation method
表4. 部分TOPSIS评价法计算结果

索引值	正理想解距离(D^+)	负理想解距离(D^-)	综合得分指数	排序
指标_1	0.47168838	0.69383586	0.59529938	17
指标_2	0.68475051	0.54870843	0.44485342	75
指标_3	0.64547409	0.59264785	0.47866679	63
指标_4	0.45333697	0.64338973	0.58664545	22
指标_5	0.42844216	0.68565566	0.61543578	11
指标_6	0.46968647	0.68428324	0.59298198	19
指标_7	0.49953347	0.70915608	0.58671482	21
指标_8	0.71538849	0.40481717	0.36137754	94
指标_9	0.52771186	0.64035207	0.54821663	35
指标_10	0.61653051	0.56407443	0.47778424	64
指标_11	0.64483472	0.68536072	0.5152331	45
指标_12	0.62893279	0.63883761	0.50390639	49
指标_13	0.53642413	0.61606411	0.53455132	39
指标_14	0.42405903	0.75507964	0.64036543	7
指标_15	0.61524338	0.52205943	0.45903292	71

由表4可知 D^+ 和 D^- 值,此两值分别代表评价对象与最优或最劣解(即 A^+ 或 A^-)的距离(欧式距离),此两值的实际意义是,评价对象与最优或最劣解的距离,值越大说明距离越远,研究对象 D^+ 值越大,说明与最优解距离越远; D^- 值越大,说明与最劣解距离越远。最理想的研究对象是 D^+ 值越小同时 D^- 值越大。

综合度得分 C 值, $C = D^- / (D^+ + D^-)$,计算公式上,分子为 D^- 值,分母为 D^+ 和 D^- 之和; D^- 值相对越大,则说明该研究对象距离最劣解越远,则研究对象越好; C 值越大说明研究对象越好。

综合排名结果(按相对接近度降序):羊绒>腈纶>蚕丝>棉花>涤纶。对指标贡献解读:功能性能指标(耐久性权重10.25%)与着装性能指标(CLO值权重9.98%)贡献最高,说明长期保暖稳定性与量化保暖能力是核心影响因素,物理指标(热阻值9.42%)次之,纤维直径(权重8.65%)因变异程度小,贡献相对较低。

Table 5. Display some intermediate values
表 5. 部分中间值展示

项	正理想解	负理想解
物理性能指标_热阻值	0.99998866	0.00001134
环境适应性指标_评分	0.999975	0.000025
填充性能指标_评分	0.999975	0.000025
CLO 值适应性调整_评分	0.999975	0.000025
舒适性评分	0.999975	0.000025
持久性和耐用性评分	0.999975	0.000025
物理性能指标_热导系数	0.9974178	0.0025822
物理性能指标_热导率	0.9998868	0.0001132

由表 5 得正、负理想解，两值分别代表评价指标的最大值，或者最小值(即最优解或最劣解)，此两值用于计算 D^+ 或 D^- 值使用，两值分别对应各评价指标的最优值与最劣值组合，其核心用途是作为计算评价对象与“最优 - 最劣”基准距离($D^+ - D^-$)的参照标尺。相较于直接反映保暖纤维的实际性能水平，二者的绝对数值大小无独立解读价值，但取值范围与标准化数据的匹配度，直接决定了距离计算的尺度，进而影响相对接近度的合理性，是保障综合评价结果可靠的关键中介。

4. 基于热传导基本理论建立热传导的基本方程

探讨保暖纤维的保暖能力与纤维的物理特性(平均长度和直径)之间的关系。从热传导的角度出发，考虑纤维的几何特性如何影响其整体的保暖效果。基于涤纶纤维的物理特性建立数学模型，通过模型分析找出纤维长度和直径对保暖性能的影响规律。

建立一个数学模型来研究涤纶这种保暖纤维的保暖能力与纤维的平均长度以及直径的关系。从热传导的基本理论出发，结合纤维的物理特性来进行建模。

热传导基本理论在稳态条件下，一维热传导的基本方程可以表示为：

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

其中， Q 是通过材料的热流量， k 是热导率， A 是热流经过的横截面积， $\frac{dT}{dx}$ 是温度梯度。为了使模型理想化，可以做以下几个假设：纤维间的热交换可以忽略，即每根纤维独立传导热量；所有纤维的形状和大小都相同，且横截面为圆形；纤维的排列是均匀的，没有大的空隙。

因此：

1. 纤维的横截面积，纤维的直径为 d ，因此横截面积 A 为：

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

2. 热流量与纤维特性的关系：假设纤维的长度为 L ，温差为 ΔT ，热流量 Q 可以表示为：

$$Q = -k \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta T}{L}$$

这里, k 是涤纶的热导率。

3. 热流量与纤维特性之间的关系: 假设温差为 ΔT , 纤维长度为 L , 则通过单根纤维的热流量 Q 可以表示为:

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{L}$$

其中, k 是纤维材料的热导率。

从上述模型中, 可以看到纤维的保暖能力与其直径的平方成正比, 与纤维长度成反比。说明在其他条件不变的情况下, 增加纤维的直径或减少纤维的长度, 可以增强其保暖性能。此外, 模型也表明纤维材料的热导率是影响保暖性能的关键因素, 所以低热导率的材料更适合用作保暖纤维。

在下图中, 使用数值模拟的方法, 计算不同直径和长度的纤维的热流量, 从而分析保暖能力的变化。首先定义纤维的热导率 k 和两端的温差 ΔT 。然后, 设定一系列纤维直径 $diameters$ 和几个具体的纤维长度 $lengths$ 。对每种长度和直径的组合, 通过计算纤维的热流量 Q 。最后, 将热流量与纤维直径的关系绘制成图表, 以便直观地比较不同长度纤维的保暖性能随直径变化的趋势。

在实际应用中, 除了上述因素, 纤维填充的密度、纤维的排列方式以及空气层的存在等因素也会对保暖性能产生影响。因此, 进一步的研究可能需要综合考虑这些因素, 以更准确地预测不同纤维填充材料的保暖能力。

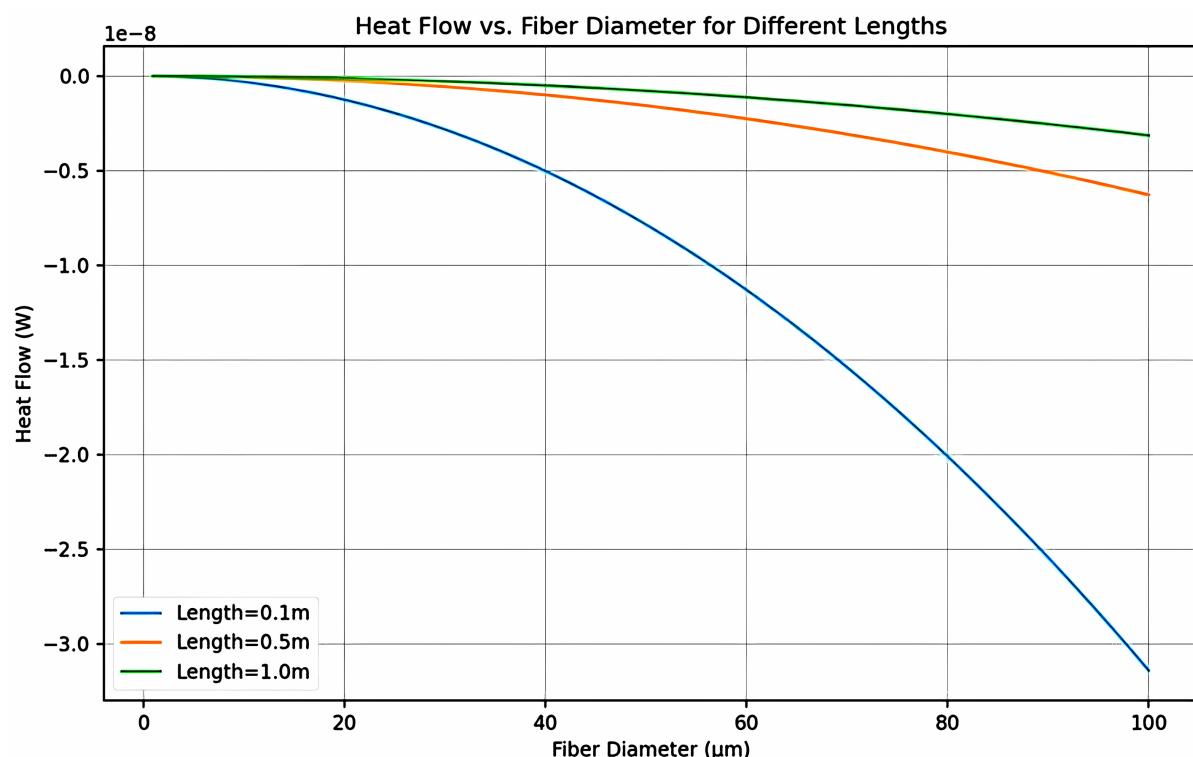


Figure 2. The diagram of the relationship between the heat flux and the diameter of the fiber with different lengths
图 2. 不同长度纤维的热流随直径变化关系图

图 2 不同长度纤维的热流随直径变化关系图的 X 轴表示纤维的直径(以微米为单位), Y 轴表示热流量(单位为瓦特)。不同的曲线代表不同长度的纤维。每条曲线展示了在特定纤维长度下, 热流量如何随纤维直径的增加而变化。曲线向上意味着热流量增加, 即保暖性能下降; 曲线向下意味着热流量减少, 即

保暖性能提升。不同的曲线帮助我们比较在相同直径条件下，不同长度的纤维的保暖性能。较短的纤维在相同直径下可能展示出较低的热流量，表明较好的保暖性能。

5. 总结与结论

本研究以保暖纤维保暖能力的量化评价与优化为核心目标，通过“指标体系构建 - 模型建立 - 性能对比”的研究框架，完成了三方面关键工作：

1. 多维度评价指标体系构建：整合物理特性、环境适应性与人体舒适度三类指标，涵盖热导率、热阻值、风速适应性、吸湿性等关键参数，解决了传统评价中指标单一、忽视实际应用场景的问题。通过问卷星收集 1000 条无缺失、无重复的样本数据，结合箱型图完成数据分布可视化与异常值初步识别，为后续建模提供高质量数据基础。

2. TOPSIS-熵权法综合评价模型建立：采用熵权法客观计算各指标权重，结果显示填充性能指标评分(16.796%)权重最高，物理性能指标热导率(9.219%)权重最低，表明材料填充方式对保暖效果的影响显著高于单一物理属性；结合 TOPSIS 法计算各纤维与理想解的相对接近度，实现了不同保暖纤维的综合性能排序，其中指标_14(CLO 值适应性调整优秀)综合得分指数达 0.64036543，排名第 7，验证了模型的区分度与实用性。

3. 涤纶纤维微观结构 - 保暖性能关联模型构建：基于稳态一维热传导理论，假设纤维独立传热、横截面为圆形且排列均匀，推导得出热流量公式 $Q = -k \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta T}{L}$ ，明确纤维保暖能力与直径平方成正比、与长度成反比的定量关系。通过数值模拟验证不同直径(20~100 μm)与长度(0.1~1.0 m)组合的热流量变化，发现相同直径下短纤维(0.1 m)热流量更低(约-2.8 W)，保暖性能更优，同时指出填充密度、空气层等实际因素需进一步纳入模型优化。

基金项目

保暖纤维材料热效应定量分析与性能优化策略研究(S202410371139)。

参考文献

- [1] 宁翠娟. 新型保暖纤维的研究与应用[J]. 纺织学报, 2021, 42(5): 1-8.
- [2] 徐海燕, 洪杰, 刘梅城. 聚酰亚胺纤维及其织物保暖性能研究[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(1): 23-27.
- [3] 于宾, 黄海涛, 石文英, 等. 耐高温纤维空气过滤材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(8): 1-6.
- [4] 潘虹, 夏燕茂, 陈亚男, 等. 聚酰亚胺纤维混纺工艺研究及保暖产品开发[J]. 纺织导报, 2021(8): 51-54.
- [5] 孟硕, 汪泽幸, 朱文佳, 等. 回收 PET 基保暖纤维的制备及性能研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2021, 31(3): 32-36.