doi：10.3969/j.issn. 1674-2346.2025.04.001

气凝胶面罩设计与保暖性能研究

邓佳雨　李艳梅　秦小丁　高艺超　李金烨

（上海工程技术大学，上海 201620）

摘　要：本研究针对 0℃~-10℃寒冷天气下的面部保暖问题，综合考虑面罩重量、保暖性能等因素，采用气凝胶与其他功能材料的复合，设计了一款高性能保暖面罩。在不影响佩戴者正常活动的前提下，优化了部分可拆卸设计和贴体设计，具备较高的人体贴合度，增加锁温时间，解决了女性扎发佩戴和面罩不易于收纳的难题。通过对面罩面料保暖性、防风透湿性、防水透湿性和耐磨性测试，以及主观面罩穿着生理性评价，发现采用三层压胶 Gore-Tex、气凝胶与摇粒绒或德绒的复合结构设计能够实现最佳性能平衡，展现出优异的综合性能。这一创新设计为冬季寒冷条件下的面部防护提供了可靠解决方案，同时拓展了功能材料在保暖领域的应用范围。

关键词：气凝胶；Gore-Tex；保暖性；面罩设计

中图分类号：TS179　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-2346（2025）04-0001-06

Research on Aerogel Mask Design and Thermal Insulation Performance

DENG Jiayu　LI Yanmei　QIN Xiaoding　GAO Yichao　LI Jinye

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: This study addresses the issue of facial thermal protection in cold weather conditions ranging from 0℃to -10℃, proposing a high-performance thermal mask through composite design incorporating aerogel and other functional materials. The design comprehensively considers factors such as mask weight and thermal performance, achieving an optimal balance between facial conformity and extensive coverage area. The enhanced thermal retention duration is realized through structural optimization while maintaining unimpeded wearer mobility. Notably, detachable modular components are incorporated to accommodate hairstyles such as tied-up hair for female users and facilitate compact storage. Experimental evaluations encompassing fabric thermal insulation, windproof/moisture permeability, waterproof/moisture transmission, and abrasion resistance were systematically conducted. Subjective physiological evaluations of mask-wearing were concurrently collected. Results demonstrate that the composite structure integrating three-layer laminated Gore-Tex,aerogel,and either polar fleece or Thermolite achieves optimal performance equilibrium, exhibiting exceptional comprehensive characteristics. This innovative design provides a reliable solution for facial protection in winter environments while expanding the potential applications of functional materials in thermal insulation fields.

Key words: aerogel, Gore-Tex, thermal insulation, mask design

0　引言

随着科技进步和人们对生活品质要求的提高，保暖材料的研究与开发已经成为一个备受关注的领域。尤其是在寒冷环境中工作的人员、户外运动爱好者以及对温度敏感的特殊人群，对高效保暖装备的需求日益增加。传统的保暖材料虽然在一定程度上能够满足人们的保暖需求，但它们往往存在重量大、体积臃肿、透气性差等问题，限制了其应用范围。气凝胶作为一种新型材料，因其卓越的隔热性能、低密度、

收稿日期：2025-02-22

第一作者简介：邓佳雨，女，在校生。

通讯作者：李艳梅，女，教授，博士。研究方向：服装材料与高性能服装开发

中国知网　https://www.cnki.net

高孔隙率等特性而被广泛认为是下一代保暖材料的理想选择。目前，气凝胶防寒服已经在航空、潜水、极地探险等特殊领域得到应用。例如，针对低温、高压的水下条件，马亮等[1]试制的气凝胶复合材料保暖内胆具备良好的水下隔热性能。苏文桢等[2]研发了一款气凝胶防寒服装，通过真人试穿实验证明了气凝胶防寒服在保暖性方面优于普通冲锋衣。

基于此，为满足人们对冬季防寒面罩轻量化、保暖性能佳、便携可拆卸的需求，本文通过气凝胶与其他功能材料的复合，开发出一种集高效保暖、良好透气性和舒适佩戴感于一体的创新型气凝胶面罩并结合理论分析、实验测试和实际应用评估等多种方法，深入探讨了气凝胶面罩的保暖机制及其对人体热舒适的影响。

1　气凝胶概述

气凝胶是一种具有超大比表面积、低密度和高孔隙率的纳米多孔材料，由美国科学家 S. Kistler 于 1931 年首次制备。这种材料因其独特的纳米三维网络结构，在隔音降噪、隔热保温、吸附催化[3]等多个领域表现出广泛的应用价值。常见的制备方法包括溶胶-凝胶法、分子路线法、静电纺丝法以及 3D 打印等[4]，其中溶胶-凝胶法通过将溶胶转化为凝胶并去除液体成分制得气凝胶。其低密度、优异的热绝缘性能和高比表面积使其成为众多高科技领域的重要材料。性能优化则可通过改性实现，例如提高机械强度或增强热稳定性。本次面罩设计采用上海素湃科技公司开发的第二代纺织专用气凝胶复合材料，这种材料具有柔软、轻薄、透气的特点，解决了传统气凝胶容易掉粉、厚重及难以剪裁的问题。

气凝胶在建筑、航天、服装等领域具有重要的应用价值。在建筑中，它能提高保温隔热性能，减少能耗，常用于绝热毡、防火保温板及气凝胶混凝土等材料[5]。在航天领域，陶瓷纤维增强气凝胶已用于航天飞机隔热系统[6]，我国自主研制的高性能纳米气凝胶作为火箭燃气管路系统的隔热材料[7]在中国长征五号火箭和天舟一号中展现了优异的隔热性能。在服装领域，气凝胶材料新型宇航服可适应真空或低压大气，还具备传统压力服性能，因此气凝胶材料是理想选择。美国 Aspen Aerogels 公司研发的聚脲气凝胶材料，通过优化纳米孔洞结构与复合工艺，显著提升了抗粉尘脱落性能，在宽温域测试中表现出卓越隔热性，其轻质化与低热传导特性被 NASA 列为深空宇航服隔热层的重要候选，为极端环境防护提供了创新解决方案[8-9]。

2　保暖面罩创新设计与开发

2.1　防寒面罩研究现状

在冬季户外运动中，人们需要佩戴防寒面罩抵御寒冷天气对运动造成的影响。结构功能上，现有的运动防寒面罩包括仅对面部进行防护的类型以及对面部和脖颈部同时防护的类型，后者保暖防护效果更佳，通常为面罩和脖罩一体化的结构，仅在眼部区域开口以便视物。目前这种面罩和脖罩一体化的防寒面罩，存在面罩不可拆卸而难以满足使用者进食、饮水等行为需求的缺点，并且还存在与人体贴合度低、女性扎发影响穿戴、不易于收纳等缺点。面料性能上，现有的面罩多数采用暖绒材料进行保暖，存在容易起球破损，保暖时间较短的问题。针对以上问题，本研究根据 GB/T2428-1998《成年人头面部尺寸》[10]标准，成年男性平均头围 561mm，成年女性平均头围 546mm 以及面罩运动放松量，满足中国成年人头围大小和运动佩戴需求设计制作了头围尺寸为 580mm，具备便捷性穿戴和收纳能力，能够长时间锁温保暖的创新性防寒面罩。

2.2　防寒面罩面料材料选择

户外防寒面罩的材料选择应考虑保暖性能、耐用性、舒适程度、便携性等元素，增大面罩的防护面积，提升面罩的锁温能力，提高防寒面罩的实用性。本研究设计面罩面料分为 3 部分；(1) 面罩外层面料；(2) 面罩里布面料；(3) 面罩面部夹层材料。为满足面罩外层面料耐磨抗皱性，防风防水性，基于市场调研与材料性能，使用三层压胶 Gore-Tex 面料为面罩外层材料。Gore-Tex 薄膜每平方英寸有 90 亿个极微小细孔，能做到防水与防风兼容。经过耐磨测试，此面料具有良好的抗皱性。分别使用短绒摇粒绒和德绒面料为面罩里布面料，摇粒绒和德绒手感柔软，弹性好，能够提高面罩亲肤舒适程度，增加面

中国知网　https://www.cnki.net

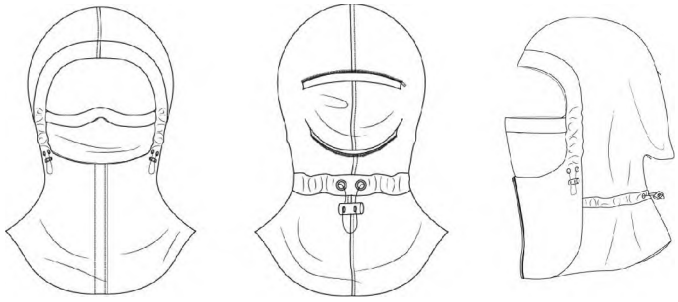
罩保暖性能。德绒绒毛较短、弹性好、透气性良好，提升了面罩佩戴时的呼吸舒适度和保暖性能；在设计上，人体头部有头发覆盖，可以最大程度地防止热量流失，而人体面部在长期冬季冷风环境下容易受寒导致面部抽搐等问题，基于此，需要对面罩面部材料进行特殊处理，面部夹层材料采用气凝胶 2mm 薄片（上海素湃科技有限公司）以达到良好的保暖效果，利用气凝胶密度低，材料轻薄的特点，能够提高面罩湿舒适性和面罩轻量化，保持佩戴者脸部干爽舒适，减轻面罩对头部施加的压力。

2.3　防寒面罩结构功能设计

对比现有的运动防寒面罩，本研究对面罩整体进行结构改良和创新设计，如图 1 所示，面罩本体包含头罩部和下方的脖罩部，头罩部分的前部开口和开口处底部口罩布通过魔术贴相连，形成面罩一体化结构。

通过在口罩布左右两处和底部与面罩主体相接处设置魔术贴，在面罩的前表面中部竖向设有一颈部拉链，拉下后方便佩戴者活动，解决了当前面罩不可拆卸问题，方便佩戴者在户外运动中进食、饮水、说话等行为，也便于防寒面罩的局部清洗和替换；同时头罩与口罩可以通过魔术贴结合成为整体，增大面罩覆盖面积，起到防风保暖作用。利用面罩脸颊两侧的两个抽绳装置，可以根据自己的头围大小、脸围大小调节抽绳；通过伸缩后表面脖罩处的抽绳装置，可以让面罩更加贴合人体生理曲度；口罩布顶端横向埋设有用于贴合使用者面部的定位金属片，按压金属片可以让其更加贴合人体鼻梁高度。缩小面罩和人体之间的缝隙，减少冷空气的进入，提升面罩保暖性能。面罩下摆扩大且配合人体曲线的圆弧设计利于佩戴者头肩部活动方便。口罩布部分 Gore-Tex 面料设计能增加防风性能，但透湿性能欠佳，考虑到口部呼出水蒸气较多，并参考其他面部防护产品，故在口罩上方设置通孔作为开口处理，以补充其透湿性能的欠缺，增加佩戴舒适性。

头罩部的后表面局部外凸且下垂形成一倒锥形，它的上下两侧分别设有一半拉链，将两者拉拢形成一收纳拉链。折叠上下两侧各设一半拉链，一方面解决长发佩戴者穿戴舒适性问题，另一方面方便佩戴者收纳面罩，以便携带，防止面罩因为不恰当收纳被拉扯损坏或者丢失。面罩的前表面中部竖向设有一颈部拉链，拉下后方便佩戴者活动。



(a) 面罩设计正面图　　(b) 面罩设计背面图　　(c) 面罩设计侧面图

图 1　防寒面罩结构设计图

3　实验测试与数据分析

3.1　实验测试面料

根据 2.2 防寒面罩面料材料选择分析，实验测试面料分为两部分：(1) 面罩部分，三层压胶 Gore-Tex 和摇粒绒的复合面料；(2) 口罩部分，三层压胶 Gore-Tex、气凝胶材料、德绒的复合面料。为了确保以上面料能够在 0℃~-10℃天气环境下有效阻挡外部冷空气，保持面部温暖，预防冻伤等健康问题，需要对这两部分复合材料进行保暖性能测试实验；除了保暖性能，为确保该款防护面罩的实用性和安全性，防水透湿性能、防风透湿性能和耐磨性也应在考量范围之内。防护面罩不仅能有效阻挡外界环境的影响，如雨水、风沙等，还需要保证内部空气的流通以及汗液蒸发，以维持佩戴者脸部周围的微气候。在恶劣

中国知网　https://www.cnki.net

天气条件下，例如降雨或强风时，有效的防水和防风性能也能够保护佩戴者的面部免受直接伤害。针对以上需求，对面罩外层三层压胶 Gore-Tex 面料进行防水透湿性能与防风透湿性能测试，分析面罩外层透湿性能是否可以防止面罩内侧因为汗水积聚或呼出气体而变得潮湿，从而保持佩戴者的舒适感。结合面料耐用程度需求，对面罩里层摇粒绒面料、德绒面料进行耐磨测试。

3.2 保暖性能测试

面料的保暖性能依据 GB/T 11048-2018《纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定（蒸发热板法）》[11] 测定。

如表 1 示，三层压胶 Gore-Tex、摇粒绒复合面料保暖率为 56.3%，在 30%以上；克罗值为 0.90，在 0.5 以上，面料保暖性能良好。如表 2 所示，三层压胶 Gore-Tex、气凝胶、德绒复合面料保暖率为 64.87%，在 30%以上；克罗值为 0.92，在 0.5 以上，作为冬季面罩材料保暖能力良好，和三层压胶 Gore-Tex、摇粒绒复合面料相比面料保暖性能好，适合用在面部进行保暖。

表 1　三层压胶 Gore-Tex、摇粒绒复合面料保暖性能

保温率（%）	热传系数[W/(m²·K)]	克罗值[(m²·oC/W)]
56.30	7.27	0.9

表 2　三层压胶 Gore-Tex、气凝胶、德绒复合面料保暖性能

保温率（%）	热传系数[W/(m²·K)]	克罗值[(m²·oC/W)]
64.87	8.95	0.92

3.3 防水透湿性能与防风透湿性能

面罩面料中，Gore-Tex 作为外层防护主要面料，其防水测试结果如表 3 所示，说明其具有优异的防水性能。

表 3　Gore-Tex 防水性能

静水压（kPa）	沾水等级
67.9	4-5 级

根据纺织行业标准 FZ/T 01149-2019 [12]，防风透湿性能指织物既能抵抗空气透过，又能将水蒸气排出的性能，一般以透气率和透湿率综合表征。根据上文所选取面料分别制作 5 组样品，测量计算其透气率和透湿率，取平均值，结果见表 4。根据纺织行业标准 FZ/T 01149-2019，评级为III级，面罩部分具有优异的防风透湿性能；口罩部分虽然有更良好的防风性能，但透湿性能欠佳，考虑到口部呼出水蒸气较多，并参考其他面部防护产品，故在口罩上方设置通孔作为开口处理，以补充其透湿性能的欠缺，增加佩戴舒适性。

表 4　防风透湿性能

	透气率（mm/s）	透湿率[g/(m²·24h)]
Gore-Tex、气凝胶、德绒	1.315625	941.34
Gore-Tex、摇粒绒	4.103625	7915.19

3.4 耐磨性能

面料的耐磨性能依据 GB/T 21196.4 2007《纺织品 马丁代尔法织物耐磨性的测定》第四部分外观变化的评定来测定。

如表 5 所示，三层压胶 Gore-Tex 面料无明显起毛起球现象，耐磨性能较好，硬度好，适合做外层耐

中国知网　https://www.cnki.net

磨面料。摇粒绒、德绒面料起毛起球现象明显，耐磨性能较差，但柔软度高，适合做内层面料，增加面罩穿戴舒适性。

表 5 面料耐磨性能

面料	实验现象
三层压 Gore-Tex	无明显起毛起球现象
德绒	起毛起球现象明显
摇粒绒	起毛起球现象较为明显

4 面罩冬季户外生理性穿着评价

4.1 实验对象、实验环境和实验方式

实验对象共 10 名，年龄 20~50 岁，均为正常体型。女性 5 名，男性 5 名，其中各有配戴眼镜者 4 名，女性长发者 4 名，头围 54~58cm，实验对象皆有户外运动喜好。在冬季气温 0℃~ -10℃、相对湿度 60±3% 条件下佩戴本实验 58cm 头围大小的防寒面罩，通过静止、跑步、跳跃运动，对面罩穿着贴合舒适度、保暖性能、透气度、湿舒适度进行主观评价。

4.2 面罩舒适性评价

4.2.1 穿着贴合舒适评价

通过受试者分别穿戴调节好的整体面罩和头罩部分在静止和跑动后，对人体头部、面部、耳部、脖颈部的合体度来评价面罩贴合程度。将合体性着装效果分为“非常贴合、较贴合、一般贴合、较不贴合、不贴合”5 个等级，对应评价值为“5、4、3、2、1”。通过把主观感受进行评分，更客观准确地表达穿着适体性效果[13]。

如表 6 所示，受试者对面罩的贴合性着装效果评价较高，平均值都达到了 4 分以上。他们认为面罩按需求穿戴后与自身头部、耳部、面部、脖颈部和头发凸起处等位置贴合度较好，能够配合受试者运动时使用。面罩倒三角锥形能够缓解贴体面罩对头发凸起造成的不适感，减少面罩与人体之间的空隙，大大提高保暖效果。

表 6 面罩合体性评价均值

名 称	平均值	标准差
面罩头部的贴合程度	4.300	0.483
面罩耳部的贴合程度	4.400	0.699
面罩面部的贴合程度	4.600	0.516
面罩脖颈部的贴合程度	4.400	0.516
面罩倒三角区对扎发凸起的贴合程度	4.250	0.500

4.2.2 接触舒适性评价

接触舒适性是着装对人体肌肤产生刺激而形成的一种生理主观感受。防寒面罩接触舒适性评价采用主观问卷评价（表 7），通过实验对象对面罩佩戴和皮肤接触后的语言描述进行分析，选取 4 种主观感觉指标（粗糙、柔软、厚实、轻薄）进行多选评价[13]。

表 7 面罩接触舒适性评价

名 称	选项	频数
面罩接触舒适性评价	柔软	9
	厚实	10

中国知网 https://www.cnki.net

如表 7 所示，受试者佩戴面罩后接触舒适性评价结果中，厚实一项选择频数为 10，柔软一项选择频数为 9。综上，本研究面罩作为防寒面罩能够起到较好的保暖性，面罩里层使用短绒摇粒绒面料和德绒面料，柔软厚实，提高面罩佩戴舒适程度。

4.2.3　服装局部活动难易程度

通过实验者穿戴调节好的整体面罩，向上、下、左、右转头 4 个方位观察，上下蹦跳，前后跑动，对头部、脖颈部、眼部进行评价。把服装局部活动难易程度分为“严重受限、部分受限、不受限”3 个等级，对应评价值为“3、2、1”。配戴眼镜的实验者佩戴整体面罩后静止向外哈气 5 次，查看眼镜起雾程度。眼镜起雾程度分为“严重、较轻、无”3 个等级，对应评价值为“3、2、1”。通过以上实验评价面罩视觉遮挡范围大小（表 8）。

表 8　面罩局部活动难易程度评价

名　　称	样本量	平均值	标准差
穿戴调节好的整体面罩，向上、下、左、右转头 4 个方位观察，上下蹦跳，前后跑动后，评价对头部受限程度	10	1.500	0.527
穿戴调节好的整体面罩，向上、下、左、右转头 4 个方位观察，上下蹦跳，前后跑动，评价对脖颈部受限程度	10	1.100	0.316
穿戴调节好的整体面罩，向上、下、左、右转头 4 个方位观察，上下蹦跳、前后跑动，评价对眼部受限程度	10	1.700	0.675
眼镜佩戴者向外哈气 5 次后，评价眼部受限程度	4	1.400	0.516

如表 8 所示，受试者根据佩戴面罩充分活动后对面罩局部活动难易程度进行评价，平均得分在 1~2 之间，整体面罩在活动中局限性影响较小，能够在冬季户外运动和日常生活中使用。

4.2.4　面罩湿舒适性评价

通过实验者穿戴调节好的整体面罩后分别在冬季温度 0℃~ -10℃、相对湿度 60±3%环境下静坐和跑动 10 分钟，分别测试佩戴前后面罩内头顶、脖颈两侧、口罩的温度变化，测 10 次取平均值后进行评价。同时对面罩里层进行触摸打分，分为“潮湿、较潮湿、干燥”对应分数为“3、2、1”，通过打分计算平均值。如表 9 所示，受试者对静止和跑动后触摸里层感受评分均在 1~2 之间，整体评价较干燥，呼气和吸气顺畅，面罩湿舒适性良好。

表 9　面罩湿舒适性评价

名　　称	样本量	平均值	标准差
佩戴整体面罩静止 10 分钟后触摸面罩里层的生理感受	10	1.200	0.422
佩戴整体面罩跑动 5 分钟后触摸面罩里层的生理感受	10	1.600	0.516

5　结论

气凝胶的导热系数远低于传统保温材料，意味着气凝胶面罩可以在冬季寒冷环境中提供出色的隔热效果，有效防止面部热量的散失。通过创新设计能显著提升服装保温性能，而保暖服装的面料也逐渐从单一层面料向多层结构面料转变。通过将气凝胶材料与其他保暖材料进行复合，复合气凝胶面罩可以在寒冷环境下保持表面干燥，具有高保暖性和透气性，能够避免因结冰而导致的视线受阻问题。

随着冬季气温降低，人们在户外场景需要使用面罩进行防寒。在面罩的使用过程中，不少佩戴者反映面罩存在漏风，保暖性能不佳，穿戴舒适性差，不好收纳容易丢失，佩戴面罩后无法自由进食喝水等问题。本文对冬季防寒面罩面料和整体设计进行创新改造，气凝胶和 Gore-Tex 面料的使用增加了面罩的保温能力和防风防水能力，解决了现有防寒面罩存在的锁温时间短、不能部分拆卸、与人体贴合度低、女性扎发影响穿戴、不易于收纳的问题。

（下转第 22 页）

中国知网　https://www.cnki.net

[29]张元龙.服装品牌国潮策略及对消费者购买意愿的影响研究[D].上海：东华大学，2023.
[30]徐文.全球品牌虚拟代言人形象对 Z 世代消费者品牌酷感知的影响[D].上海：东华大学，2023.
[31]张茁.消费认同对品牌购买意愿的影响机制研究[D].杭州：浙江工商大学，2014.
[32]Lee Y，Kozar K A.Designing usable online stores:a landscape preference perspective[J].Information & management，2009(01):31-41.
[33]Fornell C,Larcker D F.Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error[J].Journal of marketing research,1981(02):337-346.
[34]Hair J F,Anderson L E,Tatham L L.Multivariate data analysis[M].New York:Macmillan,1998:40-45.
[35]方杰，张敏强，邱皓政.中介效应的检验方法和效果量测量：回顾与展望[J].心理发展与教育，2012(01)：105- 111.
[36]温忠麟，刘红云，侯杰泰.调节效应和中介效应分析[M].北京：教育科学出版社，2012：70-87.

（上接第 6 页）

参考文献

[1]马亮，俞旭华，刘文武，等.气凝胶复合材料在干式潜水服内胆隔热性能提升中的应用[J].纺织学报，2024，45(07)：181-188.
[2]苏文桢，卢业虎.气凝胶防寒服的研制与性能评价[J].丝绸，2020，57(09)：58-62.
[3]张克超.氧化铝纳米纤维及其气凝胶材料的制备及性能研究[D].吉林：长春工业大学，2022：1-2.
[4]张飞飞，王峰，王万安，等.气凝胶在隔热防护领域中的研究进展[J].复合材料学报，2022,39(03)：42.
[5]徐婉婷.SiO2 气凝胶的增强及其在建筑材料领域的应用研究概况[J].建材技术与应用，2024(05)：33-39.
[6]王锋，赵坚，张琪凯.陶瓷气凝胶柔性隔热材料应用于航空航天的研究进展[J].聚酯工业，2024，37(05)：70-73.
[7]周文俊.气凝胶：超轻材料改写生态未来[J].广州化工，2019，47(04)：12-13.
[8]Lee J K,Gould G L,Rhine W.Polyurea based aerogel for a high performance thermal insulation material[J].Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2009, 49(2):209-220.
[9]Lee J K .Polyurea-Based Aerogel Monoliths and Composites[J]. 2012：68-69.
[10]GB/T 2428-1998，成年人头面部尺寸[S].
[11]GB/T 11048-2018，纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法)[S].
[12]FZ/T 01149-2019，纺织品 防风透湿性能的评定[S].
[13]罗雨轩，马新宇，季云慧，等.女性多功能生理内裤的研制与评价[J].服装设计师，2024(12)：65-71.
[14]李诗诗.气凝胶材料在保暖服装设计中的应用分析[J].西部皮革，2024，46(16)：2-4.

中国知网　https://www.cnki.net