

液态硅橡胶涂覆尼龙 66 复合材料的 耐热性研究

刘生广 陈国梁 蒋秋冉
东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要:汽车安全气囊弹射时注入的瞬时高温气流可达 550 °C, 因而气囊需添加隔热层设计。然而气囊隔热层设计存在轻量化与耐热性能难以平衡的缺陷。研究提出液态硅橡胶(LSR)涂覆尼龙 66 织物构建多层隔热体系的设计, 并系统探究纱线线密度、织物密度、涂层面密度、隔热层层数对体系耐热性能的影响。同时, 采用热棒热熔试验评价复合隔热层的耐热性, 通过对比理论值和实测值, 分析气囊隔热层设计关键因素。结果表明, 增加织物密度产生的热熔时间增效效能($0.0154 \text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$), 约是增加纱线线密度产生的热熔时间增效效能($0.0075\sim 0.0083 \text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)的 2 倍; 复合 LSR 涂层后, 耐热性大幅提升。复合 $25 \text{ g}/\text{m}^2$ 的 LSR 涂层时, 产生的热熔时间增效效能均为 $0.0500 \text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$, 此效能不仅源于涂层自身耐热性, 更与涂层阻碍气体流动有关。涂层织物叠加由 2 层增加至 3 层时热熔时间增幅跃升至 2~3 倍, 显著优于非涂层织物的线性倍增, 凸显 LSR 涂层在多层结构中的协同增效作用。研究结论表明, 基于涂层面密度与基材参数的协同优化, 可在控制成本的前提下设计适配高温工况的隔热层方案, 为安全气囊及类似耐高温材料的设计提供技术参考。

关键词: 汽车安全气囊; 隔热层; 液态硅橡胶(LSR); 尼龙 66; 涂层复合材料; 耐热性

中图分类号: TS156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)12-0031-09

Study on heat resistance of liquid silicone rubber coated nylon 66 composites

Liu Shengguang, Chen Guoliang, Jiang Qiuran

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The instantaneous high-temperature gas flow injected during the ejection of an automotive airbag can reach 550 °C, so the airbag requires the addition of a heat insulation layer. However, the design of the airbag's heat insulation layer is difficult to balance lightweight properties with heat resistance performance. The study proposed a multi-layer thermal insulation system comprising liquid silicone rubber (LSR) coated nylon 66 fabric. It systematically investigated yarn linear density, fabric density, coating area density, and heat shield number effected on heat resistance. At the same time, hot rod hot melt test was conducted to evaluate the heat resistance of the composite insulation. By comparing the theoretical values with the measured ones, the key factors underlying

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2232022D-13)

收稿日期: 2025-06-20

作者简介: 刘生广, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 研究方为织物耐热性能及微纳能源收集, 19967292576@163.com

通信作者: 蒋秋冉, 副教授, jj@dhu.edu.cn

the design of the gasbag insulation were identified. The results showed that hot melt time efficiency ($0.0154 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$) produced by increasing the fabric density was approximately twice that produced by increasing the yarn linear density ($0.0075 - 0.0083 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$). After the LSR coating was compounded, heat resistance was significantly enhanced. When a $25 \text{ g}/\text{m}^2$ LSR coating was compounded, hot melt time efficiency was $0.0500 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$. This effect was not only due to the heat resistance of the coating itself, but also related to the coating's hindrance to gas flow. When the number of heat shields was increased from 2 to 3, the increase in hot-melt time was jumped to 2-3 times, was significantly better than the linear doubling of non-coated fabrics, and was highlighted the synergistic effect of LSR coating in multi-layer structures. The research conclusion indicated that based on the collaborative optimization of coating area density and substrate parameters, an insulation layer scheme suitable for high-temperature working conditions could be designed under the premise of cost control, providing a technical reference for the design of airbags and similar high-temperature resistant materials.

Keywords: automotive airbag; heat shield; liquid silicone rubber (LSR); nylon 66; coated composite; heat resister

尼龙 66 作为高温防护领域的经典工程塑料, 凭借其高强度、高延伸率及优异的耐磨、阻燃特性, 在汽车安全气囊产品中占据主导地位^[1-3]。然而, 车辆碰撞触发安全气囊展开时, 烟火式气体发生器会在 30 ms 内释放大量的 500 °C 以上的高温气体进入气囊袋, 如此严苛的工况对织物基气囊导流装置以及气囊隔热层的耐热设计提出严峻挑战^[4]。此外, 新能源汽车碰撞工况中, 气囊需耐受电机短路引发的局部高温 (>250 °C)。而尼龙 66 在 200 °C 以上易发生热分解, 导致气囊织物强度骤降, 存在破裂风险, 因此目前采用多层隔热结构^[5]。但这种结构使质量增加约 40%, 与新能源车轻量化设计 (如车身电池一体化使质量减少 10%) 背道而驰, 还侵占了乘员舱空间, 而且冗余层数阻碍了气囊毫秒级展开的均匀性, 影响对乘员的柔性缓冲效果^[5-6]。

目前, 气囊隔热技术呈现多元化发展态势。陶瓷涂层^[7]在极端耐温领域占据一席之地。高性能纤维增强基布^[8]通过提升本体耐热性提供了新路径。多层复合结构^[9]提供了性能优化空间但牺牲了轻量化和紧凑性。气凝胶、相变材料 (PCM)、纳米材料等新兴方向^[10]潜力巨大但面临显著的性能、成本和制造瓶颈。液态硅橡胶 (LSR) 涂层凭借无与伦比的柔韧性、可折叠性、良好的综合隔热密封性、成熟的工艺和相对可控的成本^[11], 为优化织物耐热性能提供了新思路^[12-14], 是气囊隔热层的技术基石

和主流选择。其核心价值在于在众多相互矛盾的性能要求 (隔热、密封、柔韧、可折叠、成本) 中找到最佳平衡点, 但其涂层参数与基材特性的协同增效机制尚未系统阐明, 导致工程实践中存在“过度设计”或“防护不足”的双重风险^[15-16]。此外, 工程技术人员对于气囊性能改进的研究, 通常基于失效模式进行设计验证, 耗时耗力^[17]。

本研究将 LSR 与耐热尼龙 66 织物结合, 制备 LSR 涂层复合尼龙 66 织物气囊材料。基于材料的比热容、熔点、织物密度和面密度等特性值, 通过分析计算获得气囊材料的热能值; 通过构建尼龙 66 织物-LSR 涂层的复合材料模型, 揭示纱线线密度、织物密度与 LSR 涂层面密度的耦合作用规律; 采用热棒热熔试验模拟瞬时高温气流冲击, 量化 550 °C 极端工况下材料的耐热阈值与失效模式, 旨在突破“基材结构设计-涂层优化-叠层结构设计”的全链条技术壁垒, 为航空航天隔热衬层、低空飞行器热防护系统等新兴场景提供轻量化解决方案。研究成果不仅可推动尼龙 66 基复合材料在高温防护领域的技术迭代, 更对降低新能源汽车热失控风险具有显著工程价值。

1 试验

1.1 原料与仪器

原料: 350、470 及 700 dtex 尼龙 66, LSR, 均为实

实验室自制。

仪器:高温熔体物性综合测试仪(上海煜志科技有限公司)、喷水织机(ZW8100 日本津田驹公司)、水洗定型机(日本花山工业公司)、FLEX100 型扫描电子显微镜(SEM, 日本日立公司)、AR1140 型电子天平(奥豪斯仪器有限公司)、涂布机(德国布鲁克纳公司)。

选用 3 种规格的尼龙 66(线密度分别为 350、470 和 700 dtex),采用平纹组织及不同织物密度,织造具有差异化面密度的白坯布基材。经过水洗后,在 120 °C 下热定型,得到非涂层织物试样。通过产线的涂料泵管道打入一定量的 LSR,混合均匀后从出口导入到非涂层织物上,通过控制涂刀与织物在垂直方向的间隙以及织物布卷长度方向的涂层张

力,实现 LSR 在织物上的均匀横向铺开和渗透。织物以 15 m/min 的移动速度依次经过数节 130 ~ 190 °C 的烘箱,在 90 s 左右的时间内使 LSR 和织物进行充分黏接和固化,然后,在标准环境(20 °C, 65% RH)下静置 24 h,得到面密度为 25 g/m² 和 120 g/m² 的涂层织物。试样规格与试样编码见表 1。试样编码设定为“字母 1-数字 1-字母 2-数字 2”的 4 位组合。字母 1 代表织物类型:P 为非涂层平纹织物、C 为涂层平纹织物。数字 1 为纱线线密度。字母 2 代表相同纱线线密度的织物经纬密相对大小:L 为低织物密度、M 为中织物密度、H 为高织物密度。若无线密度相同的织物,则无字母 2。数字 2 代表 LSR 涂层面密度,如无 LSR 涂层则无数字 2。

表 1 织物制备规格参数

Tab. 1 Fabric specification parameters for preparing

试样编码	试样名称	试样组织	纱线线密度/ dtex	织物密度/[根·(10 cm) ⁻¹]		LSR 涂层面密度/ (g·m ⁻²)
				经密	纬密	
P-350	非涂层织物	平纹	350	235	235	0
P-470-L	非涂层织物	平纹	470	180	180	0
P-470-M	非涂层织物	平纹	470	195	195	0
P-470-H	非涂层织物	平纹	470	209	209	0
P-700	非涂层织物	平纹	700	160	160	0
C-470-L-25	涂层织物	平纹	470	180	180	25
C-470-M-25	涂层织物	平纹	470	195	195	25
C-700-25	涂层织物	平纹	700	160	160	25
C-470-L-120	涂层织物	平纹	470	180	180	120

1.2 性能评价

在标准环境(20 °C, 65% RH)下平衡 24 h 后,称量织物涂层前后的质量。织物经喷金处理后,使用 FLEX100 型扫描电子显微镜在 50 倍率和 100 倍率下对其表面和截面结构进行表征。根据尼龙 66 织物密度和 LSR 涂层面密度(表 1),以及二者的物理性能(表 2),计算织物的理论熔化热 λ :

$$\lambda = (T_1 - T_0) \times (M_1/1\ 000) \times C_1 + (T_2 - T_0) \times (M_2/1\ 000) \times C_2 \quad (1)$$

式中: T_1 为尼龙 66 熔点; T_2 为 LSR 熔点; C_1 为尼龙 66 比热容; C_2 为 LSR 比热容; M_1 为尼龙 66 织物的面密度; M_2 为 LSR 涂层面密度; T_0 为室内温度(23 °C)。

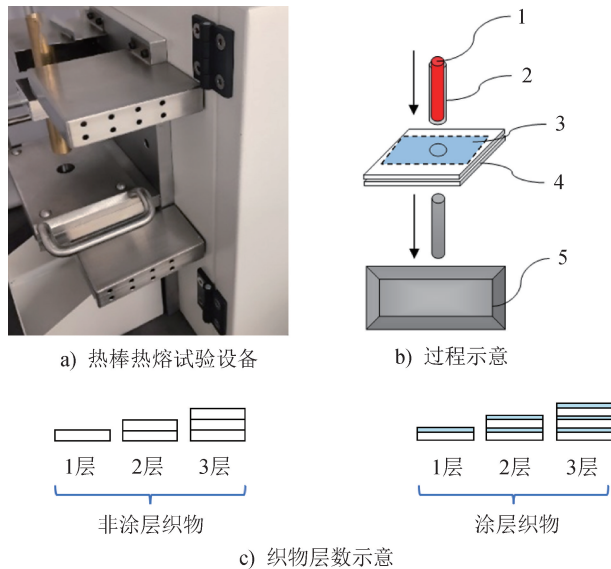
织物耐热性采用热棒热熔试验来评价,如图 2

所示。将表 1 中提及的各试样,按 1~3 层叠放于测试台上,其中涂层织物的涂层面朝上,用 2 个带有圆孔形通道的钢质夹板平整夹持固定。将热棒置于隔热炉加热至 550 °C,模拟烟火式气体发生器工作温度。加热后的金属热棒放入固定管中,自然下落与织物试样接触,记录热棒接触试样至熔穿的热熔时间(t, s),熔穿后热棒掉落到底部的收纳盒中。每种试样测试 3 次,结果取均值。

表 2 材料物理性能

Tab. 2 The material physical properties

参数	尼龙 66	LSR 涂层
材料密度/(g·cm ⁻³)	1.14	1.10~1.20
熔点/°C	260	450
比热容/[kJ·(kg·°C) ⁻¹]	1.67	1.50



1—热棒;2—固定管;3—固定的织物试样;4—测试台;5—底部收纳盒。

图1 热棒热熔试验示意

Fig. 1 Illustration of hot rod hot melt test

2 结果与分析

2.1 织物结构特性

图2展示了不同试样的基布面密度及总面密度。未涂层织物的面密度差异源于基布结构调控,前5组未涂层织物的总面密度与基布面密度完全一致,其变化主要由基布纱线线密度和织物密度两项结构参数主导,证明增加纱线堆叠密度是提升基布面密度的有效途径。涂层工艺显著改变面密度构成比例,后4组涂层织物的总面密度呈现了基布贡献率下降、涂层贡献率上升的趋势,且在相同LSR涂层面密度下,C-470-L-25涂层织物总面密度仍比C-470-M-25涂层织物低,表明基布初始面密度主导涂层织物的总面密度。

图3展示了P-470-L织物涂层前后表面及截面结构。涂层复合前,织物结构紧密,纱线中尼龙66平行排列,结构清晰。与25 g/m²的LSR涂层复合后,复丝间和纱线间的间隙被LSR覆盖填充,复丝织造结构依然可见,涂层织物表面依然具有起伏的布面结构。当LSR涂层面密度提升至120 g/m²时,复丝织造纹路不可见,涂层织物表面均匀覆盖LSR涂层,形成较为光滑的表面。由于复丝织物结构较为紧密,从织物截面可见,LSR涂层主要滞留于表层

纱线间隙,形成局部包覆结构,未渗入复丝内部单纤维间,且未抵达织物底层纱线,该现象源于LSR的高黏度与织物密实结构的协同阻滞效应。

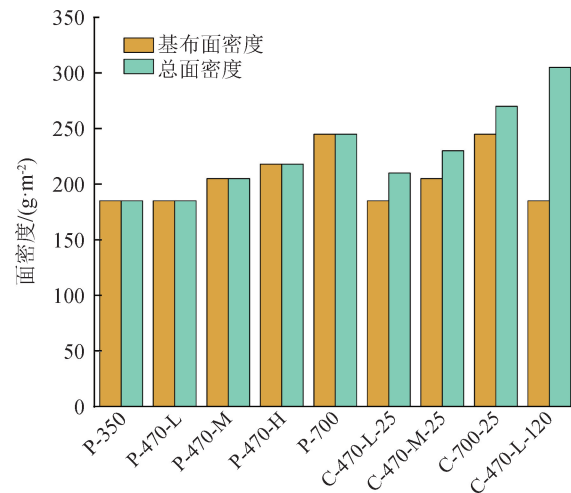


图2 各试样的基布面密度与总面密度

Fig. 2 Base fabric area density and total area density of samples

2.2 织物的理论熔化热

织物的理论熔化热如图4所示。非涂层织物的纱线线密度从350 dtex (P-350)增加到700 dtex (P-700)时,基布面密度 M_1 增加,熔化热从73.2 kJ/m²提升至97.0 kJ/m²,增幅32.51%。对比试样P-470-L和P-470-H可知,在纱线线密度相同时,织物密度增加16.11%,理论熔化热可提高17.90%。以上结果均表明,面密度高的基布更耐外热冲击,单位面积上材料量的增加可使同样多的热量在更多的材料上进行分配,从而降低对材料的伤害^[18-19]。

将C-470-L的LSR涂层面密度由25 g/m²提升至120 g/m²,理论熔化热提升60.9 kJ/m²。经计算可知,LSR可带来的理论熔化热增效效能约为0.64 kJ/g(表3)。然而,尼龙66纱线线密度由350 dtex提升至700 dtex,其理论熔化热增效效能仅为0.40 kJ/g(表3)。LSR的耐热性能优于尼龙66。试样C-470-L-25和C-470-M-25的熔化热分别可达89.2 kJ/m²和97.1 kJ/m²,而试样P-470-H和P-700的熔化热分别为86.3 kJ/m²和97.0 kJ/m²。

2.3 织物的实际耐热性

图5显示了不同织物接触了550℃热棒后的热熔时间。随着基布面密度的增加,热熔时间逐渐增加。然而增加面密度的方法不同,所产生的增幅效果也有差异(表4)。对比试样P-470-H和P-470-M,

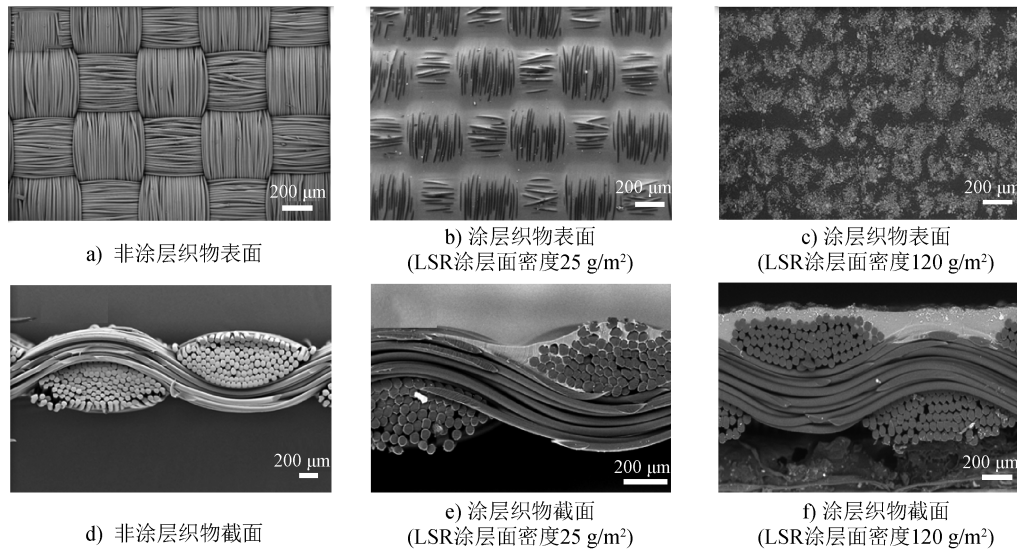


图 3 织物 LSR 涂层前后表面及截面的结构

Fig. 3 Surface and cross-section structure of fabrics before and after LSR coating

计算可得通过增加织物密度而提升基布面密度,所带来的热熔时间增效效能为 $0.0154 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$,而对比试样 P-350 和 P-700 以及 P-470-M 和 P-700 可知,通过增加纱线线密度来提升织物基布面密度,所带来的热熔时间增效效能分别为 $0.0083 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.0075 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ 。即便增加 LSR 涂层后,依靠线密度提升所带来的热熔时间增效效能同样为 $0.0075 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ 。因此增加织物密度,比增加纱线线密度,效果更为明显。此结果与表 3 中理论熔化热的结果有所差异。因理论熔化热的计算式中仅有各材料组分的热性能和面密度占比,但忽视了纱线结构和织造结构的影响。增加纱线线密度的同时,也必将降低织物密度,织物的结构较为疏松。但线密度不变,增

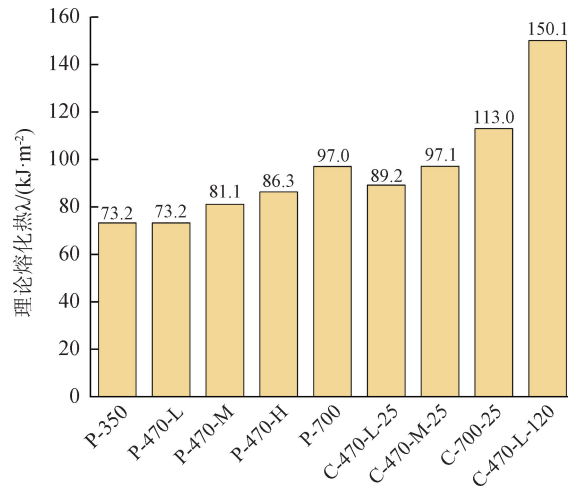


图 4 各织物试样的理论熔化热

Fig. 4 Theoretical melting heats of fabric samples

表 3 基于不同织物理论熔化热差的理论熔化热增效效能

Tab. 3 Theoretical melting heat efficiency based on theoretical melting heat difference of different fabrics

对比试样组		理论熔化热差 $\Delta\lambda / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	面密度差 $\Delta G / (\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	理论熔化热增效效能 $\Delta\lambda / \Delta G / (\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
P-470-M	C-470-M-25	16.0	25	0.64
C-470-L-25	C-470-L-120	60.9	95	0.64
P-470-M	P-470-H	5.2	13	0.40
P-350	P-700	23.8	60	0.40
P-470-M	P-700	15.9	40	0.40
C-470-L-25	C-470-M-25	7.9	20	0.40

注: $\Delta\lambda/\Delta G$ 表征单位面密度增加引起的热导率绝对变化量,反映材料热力学性能的调控效率。

加织物密度,则织物透气性降低,因而热气流受限,热传递效率会降低^[20]。

当织物表面复合了 LSR 涂层后,耐热性大幅提升。如 P-470-M 和 P-700 试样复合涂层后,热熔时

间均提升 1.25 s, 提升率为 86.20% (C-470-M-25) 和 71.42% (C-700-25)。排除尼龙 66 织物密度这一影响因素, 从无涂层到负载 25 g/m² 的 LSR 涂层, 热熔时间增效效能为 0.050 0 s·m²/g。但该种效能并非仅源于 LSR 涂层本身的耐热性, 对比 C-470-L-120 和 C-470-L-25 试样, 均为涂层织物, 仅依靠增加涂层面密度, 所带来的热熔时间增效效能只有 0.014 2 s·m²/g。因此可推断, 复合 LSR 涂层后, 在高温工作条件下, 热气体在尼龙 66 织物内部孔隙中的渗透和对流传热过程被极大抑制, 也会产生增效效能^[21]。试样 P-700 和 C-470-M-25 的理论熔化热相似 (97.0 kJ/m², 97.1 kJ/m²), 但实际热熔时间相差较大 (0.95 s), 也可证明以上推断。对比试样

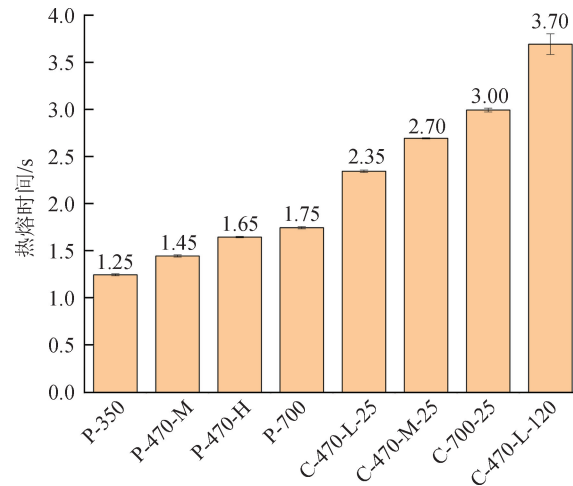


图 5 各织物试样的热熔时间
Fig. 5 Hot melt time of fabric samples

表 4 基于不同织物热熔时间差的热熔时间增效效能

Tab. 4 Hot melt time efficiency based on heat fusion time difference of different fabrics

对比试样组		热熔时间差 $\Delta t/s$	面密度差 $\Delta G/(g \cdot m^{-2})$	热熔时间增效效能 $\Delta t/\Delta G/(s \cdot m^2 \cdot g^{-1})$
P-470-M	C-470-M-25	1.25	25	0.050 0
P-700	C-700-25	1.25	25	0.050 0
P-470-M	P-470-H	0.20	13	0.015 4
P-350	P-700	0.50	60	0.008 3
P-470-M	P-700	0.30	40	0.007 5
C-470-M-25	C-700-25	0.30	40	0.007 5
C-470-L-25	C-470-L-120	1.35	95	0.014 2
C-470-L-25	C-470-M-25	0.35	20	0.017 5

注: $\Delta t/\Delta G$ 表征单位面密度增加所获得的隔热时间增益, 用于评估材料在时效维度上的性价比。 $\Delta t/\Delta G$ 与 $\Delta \lambda/\Delta G$ 分别从动力学与热力学角度量化面密度增加对隔热性能的贡献, 二者量纲不同, 不存在数学换算关系。

C-470-L-25 和 C-470-M-25, 在涂层复合结构下, 提升织物密度, 热熔时间增效效能可达 0.017 5 s·m²/g, 比增加 LSR 涂层量更为有效。但通过增加纱线线密度提升耐热性的效率就降低很多, 仅为 0.007 5 s·m²/g。

2.4 叠层织物的耐热性

图 6 和表 5 显示了叠层设计对织物热熔时间的影响。叠层的设计可显著提升隔热性能, 增加织物层数可大幅提高耐热性 (以热熔时间为量化指标)。所有尼龙 66 织物试样叠加 2 层后, 热熔时间提升超 100% (106%~330%), 叠层增加至 3 层后, 热熔时间提升超 200% (220%~319%)。该现象归因于层间空气隔热层的引入有效抑制了热传导与对流^[22-23]。未涂层织物, 每增加 1 层 (1 层→2 层或 2 层→3 层) 带来的热熔时间提升幅度相似, 均超过且接近 100%。这表明未涂层织物的隔热机制具有累加性,

每层提供近似的热阻增益。如表 5 所示, 未涂层织物由 1 层叠加至 2 层时, 热熔时间提升效能较接近, 约在 0.008 1~0.008 7 s·m²/g, 而由 2 层叠加至 3 层时, 热熔时间提升效能会降低一半, 约 0.003 8~0.004 3 s·m²/g, 表明随层数增加存在最高效益递减的情况, 因而在设计产品时, 如需平衡面密度和耐热效果, 并非层数越多的设计综合性能越好。

但 LSR 涂层在叠层结构中具有协同效应。若涂层面密度在 25 g/m² 时, 从 1 层叠加至 2 层时, 涂层织物热熔时间增幅高于未涂层织物, 所带来的热熔时间提升比例依然接近未涂层组 (略超 100%), 其热熔时间提升效能显著高于非涂层织物, 可达 0.012 4~0.012 8 s·m²/g。然而叠层由 2 层叠加至 3 层时, 热熔时间增幅接近 200%, 显著突破未涂层织物的近线性倍增模式, 叠层至 3 层时的热熔时间

提升效能增幅较为接近,为 $0.0094 \sim 0.0125 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ 。厚涂层织物 ($120 \text{ g}/\text{m}^2$) 从 1 层叠加至 2 层时,即出现 330% 的热熔时间高增幅,表现出最高的单位增重耐热提升效能 [$0.0400 \text{ s} \cdot \text{m}^2/\text{g}$],进一步佐证涂层本身在低层数下的主导作用。涂层织物的非线性跃变显示出 LSR 涂层多层协同作用机制,涂层间的相互作用形成超越单层叠加效果的超强热屏障。

尼龙 66 基布的价格大致为 $15.8 \text{ 元}/\text{m}^2$, LSR 涂层的材料与处理,大致成本为 $22.3 \text{ 元}/\text{m}^2$ 。相对市场上的陶瓷、涂层高性能纤维增强基布、多层复合结构等处理方法,本技术的成本相对较低,且更为有效。但因本处理的成本涉及商业竞争等内部信息,因而并未在文中详细讨论,也无法给出具体的数据。

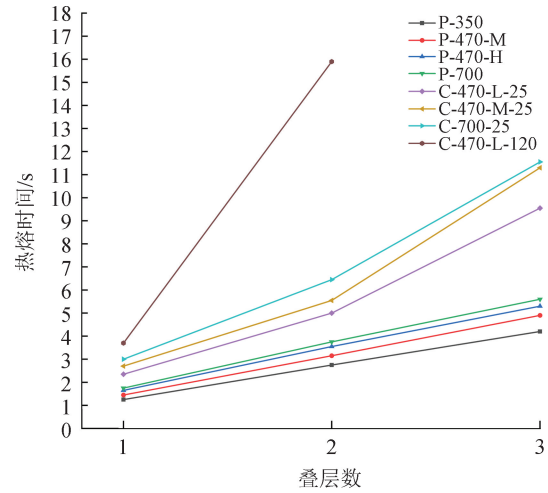


图 6 不同叠层数织物的热熔时间
Fig. 6 Hot melt time of fabric samples with different layers

表 5 不同叠层数织物的热熔性能

Tab. 5 Hot melt properties of fabric samples with different layers

试样编号	叠层变化	热熔时间提升量/s	热熔时间提升率/%	热熔时间提升效能/ $(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
P-350	1 层→2 层	1.50	120	0.008 1
	2 层→3 层	1.45	116	0.003 9
	1 层→3 层	2.95	236	0.012 0
P-470-M	1 层→2 层	1.70	117	0.008 3
	2 层→3 层	1.75	121	0.004 3
	1 层→3 层	3.45	238	0.012 6
P-470-H	1 层→2 层	1.90	115	0.008 7
	2 层→3 层	1.75	106	0.004 0
	1 层→3 层	3.65	221	0.012 7
P-700	1 层→2 层	2.00	114	0.008 2
	2 层→3 层	1.85	106	0.003 8
	1 层→3 层	3.85	220	0.012 0
C-470-L-25	1 层→2 层	2.65	113	0.012 6
	2 层→3 层	4.55	194	0.010 8
	1 层→3 层	7.20	306	0.023 4
C-470-M-25	1 层→2 层	2.85	106	0.012 4
	2 层→3 层	5.75	213	0.012 5
	1 层→3 层	8.60	319	0.024 9
C-700-25	1 层→2 层	3.45	115	0.012 8
	2 层→3 层	5.10	170	0.009 4
C-470-L-120	1 层→3 层	12.20	330	0.040 0

根据不同的应用场景,基于以上结果,本研究所开发的材料可在控制成本的前提下设计适配高温工况的隔热层方案,为安全气囊及类似耐高温材料领域提供技术参照。推荐的设计包括:1)耐热-轻量化主导型设计。双叠层结构 C-470-L-120 在面密度低的前提下,通过致密表层和低渗 LSR 涂层协同机制实现轻量化与最优隔热效能,适用于面密度敏感型

应用场景(如新能源汽车安全气囊)。2)耐热-成本主导型设计。3 叠层 P-350 未涂层织物隔热性能较优,凭借基布材料成本优势(单位成本仅为 LSR 涂层的 35%)及可循环特性,在成本敏感型工况(如工业设备周期性更换隔热衬)中具备显著全生命周期性价比。3)性能-成本均衡型设计。3 叠层 C-470-M-25 以中等面密度和可控涂层用量,实现高隔热性能,适用

于综合性能优先的场景(如飞行器发动机短舱隔热)。

3 结论

本研究系统探究了模拟汽车安全气囊气体发生器经受瞬时高温(550 ℃)冲击时,LSR 涂层对尼龙 66 织物复合材料耐热性能的优化作用及协同机制,旨在指导高温隔热层的轻量化设计。增加织物密度产生的热熔时间增效效能($0.0154\text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)约是增加纱线线密度产生的热熔时间增效效能($0.0075\sim 0.0083\text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)的 2 倍。理论熔化热计算忽略结构效应,即高密度限制透气性从而抑制对流传热,而高线密度形成的多孔结构削弱耐热性。添加 LSR 涂层($25\text{ g}/\text{m}^2$)使热熔时间普遍提升 1.25 s ($71.4\%\sim 86.2\%$),热熔时间增效效能为 $0.0500\text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 。该效能不仅源于涂层自身耐热性(纯涂层热熔时间增效效能为 $0.0142\text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$),更归因于其对气体渗透的抑制。在涂层织物中,优化织物密度(热熔时间增效效能为 $0.0175\text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)优于增加涂层面密度以及纱线线密度。非涂层织物每增加 1 层(1 层叠加至 2 层或 2 层叠加至 3 层),热熔时间呈近似线性倍增。涂层织物呈现非线性协同:由 1 层叠加至 2 层时热熔时间提升约 1 倍,而 2 层叠加到 3 层后热熔时间增幅可达 2~3 倍(如 C-470-L-120 热熔时间增加大于 3 倍),证实了 LSR 涂层在多层次间气隙隔热中的增效作用。等量增重条件下,对热熔时间的提升效果,织物密度提升优于 LSR 涂层增量优于纱线线密度增加量。多层堆叠(尤以 C-470-L-120 从 1 层叠加至 2 层)实现峰值效能,超越单一结构优化策略,对新一代气囊材料的开发与结构设计具有指导意义。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 王敏,韩斌,刘新新,等. 耐高温尼龙的发展与应用[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3): 170-175.
- [2] 赵勋,李亚情. 耐高温尼龙材料的研究进展[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(12): 52-54.
- [3] 李波,张庆峰,王铎,等. 甲基乙烯基硅橡胶的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(2): 119-123.
- [4] 钮嘉颖,徐蓝青,王高阳. 某轿车乘客安全气囊和侧气帘静态起爆试验失效问题分析[J]. 专用汽车, 2025(5): 77-78.
- [5] 满其祥,岳晓丽. 双层热定型碳纤维增强衬套的损伤分析及成型工艺优化[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 131-139.
- [6] 徐强. 尼龙改性材料的发展及应用[J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(10): 22-24.
- [7] 张金萌,沈少波,郭薇,等. Gd-Sc(Yb)-YSZ 陶瓷涂层的隔热性能及抗 CMAS 热腐蚀性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(5): 18-26.
- [8] 王文才,杨福江. 湿热条件对多层碳纤维增强基复合材料圆柱壳的宏观力学性能影响研究[J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(6): 47-54.
- [9] 武娟娟,管全梅,郭金城. 国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(4): 30-34.
- [10] 张睿涵,王连军,江莞,等. 阴离子-基质分子间作用调控增强 PEO 基离子凝胶热电性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 31-37.
- [11] LIU X R, MA Z Y, AUHL D, et al. Effects of nanoparticles and surface modification on thermal, mechanical, and electrical properties of composites from liquid silicone rubber with expanded graphite[J]. ACS Omega, 2025, 10(16): 16370-16383.
- [12] 刘菁. 硅胶黏度对汽车安全气囊涂层织物力学性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(2): 41-44.
- [13] 诸文旒,祝国成. 安全气囊织物发展现状[J]. 现代纺织技术, 2021, 29(3): 40-44.
- [14] 申婷,魏孟媛,刘芳,等. 汽车安全带市场调研及实证分析[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(6): 33-36.
- [15] 同黎娜. 尼龙 66 材料迎来“风口”[N]. 中国纺织报, 2024-07-01(3).
- [16] 刘经吉,刘萍,张薄. 涂层方式对芳纶阻燃性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(1): 38-46.
- [17] 戴佳欣,李小辉. 热防护服隔热层材料的成型工艺研究[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(增刊 1): 13-17.
- [18] 郭建业,李文静,苏力军,等. 功能梯度复合材料的制备及隔热性能模拟研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(5): 156-161.
- [19] 杨晓军,文卿,符寒光,等. 无机填料对硅橡胶基耐热复合涂层的影响[J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(1): 13-21.

- [20] 翁小霞, 王泉, 邵灵达, 等. 机织物结构设计及其红外隐身性能的研究[J]. 丝绸, 2020, 57(7): 31-36.
- [21] 白婷, 金子敏, 韩溶, 等. 基于不同散热机制的调温纺织品材料研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2024(4): 106-121.
- [22] WANG W Q, LI Y, HUAN D J, et al. Application and thermal field analysis of multilayer thermal insulation in *in situ* forming process of thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024, 37(8): 2608-2634.
- [23] LEE S, PARK S, WON J, et al. Influential factors on thermal performance of energy slabs equipped with an insulation layer[J]. Renewable Energy, 2021, 174: 823-834.

欢迎订阅 2026 年《国际纺织导报》

《国际纺织导报》(双月刊),大 16 开,全彩色印刷,定价 12.00 元/册,全年 72.00 元,中国标准连续出版物号 ISSN 1007-6867
CN 31-1743/TS, 邮发代号 4-245。

《国际纺织导报》由东华大学主办,东华大学期刊中心编辑出版。期刊已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台及长江文库,入选 CACJ 中国应用型入库期刊,为第五届上海市高校科技期刊案例库特色科技期刊。

《国际纺织导报》报道国内外纺织、服装、设计以及其相关领域科研、生产和技术应用的最新成果,介绍行业内的重要学术会议、展览及技术经济信息。依托东华大学纺织、服装、纤维材料等优势学科,开设“工程科技”“时尚设计”“前沿动态”“产业服务”等栏目。

《国际纺织导报》将利用丰富的信息源架起中国与

世界纺织业间的桥梁,推进中国纺织行业的进一步发展。

《国际纺织导报》承接相关广告,并热诚为客户宣传,欢迎有意者来电、来函或 E-mail 联系。

地址:上海市延安西路 1882 号

东华大学第三教学楼 15 楼

电话:021-62373227

E-mail: mc@dhu.edu.cn

采编平台:https://gfzb.cbpt.cnki.net



欢迎订阅 2026 年《产业用纺织品》

《产业用纺织品》(月刊),大 16 开,全彩色印刷,定价 12.00 元/册,全年 144.00 元,中国标准连续出版物号 ISSN 1004-7093
CN 31-1595/TS, 邮发代号 4-492。

《产业用纺织品》创刊于 1983 年,由教育部主管,东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办,中国产业用纺织品行业协会协办,东华大学期刊中心编辑出版,月刊,是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一;为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊,已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台等;多次入编《中文核心期刊要目总览》;入选 RCCSE 中国准核心学术期刊、CACJ 中国应用型扩展期刊;为第五届上海市高校科技期刊案例库特色科技期刊;“综述”栏目入选第七届华东地区期刊“优秀栏目”。

秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风,《产业用纺织品》致力于建设高质量、高水平一流学术期刊。期刊以“产业用纺织品”为特色,主要刊登国内外有关纺织品的综述文章,科研、生产技术报告,报道相

关领域的新产品、新材料、新技术及新设备,并介绍相关的专利、标准、测试方法,以及相关领域的行业动态、市场信息等。

2026 年,《产业用纺织品》重点选题方向包括高品质非织造材料、安全防护与应急救援用纺织品、航空航天用高性能纺织品、海洋产业与渔业用纺织品、医疗健康用纺织品、交通运输用纺织品、土工建筑用纺织品、过滤用纺织品等,并欢迎自荐栏目主持人。热忱欢迎国内外产业用纺织行业相关企业工程技术人员、纺织高等院校师生、科研人员等将优秀研究论文发表在《产业用纺织品》上。

《产业用纺织品》承接相关广告,并热诚为客户宣传,欢迎有意者来电或 E-mail 联系。

地址:上海市延安西路 1882 号

东华大学出版社楼 207 室

电话:021-62378228

E-mail: techtex@dhu.edu.cn

采编平台:https://cyf.cbpt.cnki.net

