

空气纤维材料的性能表征及其在汽车座椅中的创新应用研究

李宜炜 于慧杰 牛未冬 王占明 宇航 尚金博 孙辰 曲红阳

长春卓骏汽车技术研发有限公司

摘要:为满足汽车内饰低碳化与可持续需求,提出以聚烯烃弹性体 (POE) 基空气纤维替代传统聚氨酯 (PUR) 泡沫应用于座椅。通过表征其力学性能 (硬度、回弹、拉伸、压缩变形) 并综合评估环境可靠性、耐久性、舒适性及散发性能,揭示了其应用潜力与瓶颈。结果表明: POE 空气纤维具备 100% 可回收性, 表观密度与压缩硬度符合设计要求, 且在环境稳定性、低 VOCs 及压力分散性方面显著优于 PUR 泡沫, 为座椅材料绿色革新提供了依据。

关键词: 空气纤维; POE; 汽车座椅; 可回收材料; 性能表征

0 前言

全球气候危机与资源循环的需求驱动下, 汽车工业亟需突破传统线性经济模式。据 IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会) 评估, 截至 2021 年, 人类工业化活动已导致全球气温上升约 1.1℃, 全球变暖可能在 2040 年达到 1.5℃ 的温度。欧盟《ELV 法规》明确要求车辆可回收率 ≥ 95%, 进一步倒逼材料技术创新。

汽车座椅作为核心内饰部件, 其缓冲材料更是重要组成部分, 而传统 PUR 泡沫因热固性交联结构难以高效回收, 化学降解能耗高且副产物复杂, 因此, 开发可循环替代材料成为行业降碳关键。

如图 1 所示, 空气纤维材料作为一种新型三维网状结构热塑性弹性体, 凭借可回收性、高透气性及低密度特性, 在家居领域已实现商业化应用。本研究以 POE 基空气纤维为对象, 通过多维度性能表征, 探究其在汽车座椅中替代 PUR 泡沫的可行性, 并揭示材料—结构—性能的关联机制, 为工程化应用提供数据支撑。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

(1) 材料: 改性聚烯烃弹性体 (陶氏化学 8000 系列), 丝径 0.8 mm, 表面结皮处理。

(2) 样品设计: 基于表观密度 (40 ~ 80 kg/m³)、厚度 (30 ~ 70 mm) 制备 9 组对比样品, 见表 1。



图 1 空气纤维微观结构示意图

表 1 空气纤维样品矩阵

堆积密度 / (kg/m ³)	厚度 /mm	纤维结构
40	50	实心
50	50	实心
55	50	实心
60	50	实心
65	50	实心
70	50	实心
80	50	实心
50	30	实心
50	70	实心

1.2 测试方法

参照 ISO、DIN 等标准, 结合材料特性自定义关键测试项, 见表 2。

表 2 材料性能测试方法

测试项目	方法标准	备注
表观密度	ISO 845	——
压缩硬度	ISO 3386	以 100 mm/min 的压缩速度压缩至试样初始厚度的 60%，预压 3 次，第 4 次压缩时重新找零点并压缩后将 40% 压缩量对应的压缩硬度作为最终测试结果。
滞后率	ISO 3386	测试过程与压缩硬度测试过程一致，滞后率 = (第 4 次压缩的加载曲线与卸载曲线的闭合图形面积 / 第 4 次压缩的加载曲线与 X 轴闭合图形面积) × 100%。
回弹率	ISO 8307	——
压缩永久变形	DIN EN ISO 1856 (方法 A)	50% 压缩比
抗拉强度	自定义	测试设备：万能材料试验机 (Zwick Z005) 测试方法：试样尺寸为 320 mm × 50 mm，横向和纵向分别进行测试，每个方向 5 个试样，试验速度为 10 mm/min，手动选取第一个平稳段的平均值作为测试结果。
动态疲劳	自定义	测试设备：电动伺服测试系统 (北京鑫盛 SMS-XGLY) 测试方法：试样尺寸为 400 mm × 400 mm × 原始厚度，上下带皮。测量初始厚度 d1 和初始压缩硬度、初始密度、压缩硬度、滞后率、回弹性、抗拉强度 (横向、纵向)，使用直径为 (250 ± 1) mm，下边缘半径 (25 ± 1) mm 的圆角的压盘进行疲劳压缩，每次压缩至初始厚度的 50% 后抬起至初始位置，反复压缩 80 000 次，速率为每分钟 (70 ± 5) 次。动态疲劳结束后再次测量剩余厚度 d2、压缩硬度、密度、压缩硬度、滞后率、回弹性、拉伸强度 (横向、纵向)。
低温落球冲击	(-30 ± 2) °C, (22 ± 2) h,	-30 °C 预处理 24 h 后，500 g 钢球 (φ 50 mm) 从 230 mm 自由下落
热老化	(80 ± 2) °C, (700 ± 2) h	——
湿热老化	(85 ± 2) °C, (85 ± 5) %RH, (450 ± 2) h	——
阻燃性	GB 8410	——
气味	VDA 270	——
雾度	DIN 75201 (方法 B)	——
VOCs	ISO 12219-2	10L 采样袋
压力分布	自定义	测试设备：体压分布测试仪 (XSENSOR X3) 测试方法：将泡沫块放在平台上，将压力分布垫平整的铺放在泡沫上，使用 SAE 假臀放置在压力分布垫上。 SAE 假臀及配重共 45 kg，配重分布：假臀腿部前端左右各加 5 kg 配重，剩余重量加载至 H 点位置。
振动传递特性	自定义	测试设备：三综合振动台 (北京航天希尔 IPA60H/LS437M)、电荷传感器 (北智 BW24108)、三相加速度传感器 (PCB 356A16) 测试方法：将试样放置到试验机的水平台上，置于加压板的中心，将包含加压板质量在内的 50 kg 载荷加压到试样上，启动振动台，测定位于加压板上的载荷中心点的绝对位移量。此时的振动台全振幅定为 5 mm (± 2.5 mm)，将振动频率的范围定为 1 ~ 10 Hz (5 min 扫频)。另外，振动频率的波形原则上为正弦波形。从测定结果得到振动特征图，根据特征图得到共振频率及共振放大倍率。

- (1) 力学性能：压缩硬度 (ISO 3386)、滞后率、抗拉强度 (自定义夹具，速率 10 mm/min)。
- (2) 环境可靠性：低温冲击 (-30 °C, 24 h)、湿热老化 (85 °C, 85% RH, 450 h)。
- (3) 动态疲劳：80 000 次循环压缩 (50% 形变，速率 70 次 / min)，评估厚度损失与性能衰减。
- (4) 舒适性：SAE 假臀压力分布测试 (45 kg 载荷)、振动传递特性分析 (1~10 Hz 扫频)。

2 结果与讨论

2.1 综合性能对比

POE 空气纤维在可回收性、VOCs 及湿热稳定性方面表现突出，见表 3，其硬度和密度区间可以覆盖座椅产品的设计要求，但其滞后率 (25% ~ 35%) 与压缩永久变形 (14% ~ 45%) 显著高于 PUR 泡沫 (15% ~ 25%，≤ 18%)。归因于纤维网络的多孔结构，弹性储

表 3 综合性能对比

性能指标	POE 空气纤维	传统 PUR 泡沫
可回收性	100% 回收	不可回收 (填埋 / 焚烧)
表观密度 / (kg/m³)	40 ~ 100	35 ~ 75
压缩硬度 /kPa	2.0 ~ 15.0	2.0 ~ 13.0
滞后率 (%)	25 ~ 35	15 ~ 25
压缩永久变形 (%) (70 ℃, 22 h)	14 ~ 45	≤ 18
落球回弹率 (%)	50 ~ 60	50 ~ 70
VOCs	低苯系物、低醛酮	高苯系物、高醛酮
燃烧特性 (mm/min)	GB 8410 A-0 级	GB 8410 A-0 级
低温性能 (-30 ℃)	无断裂, 外观稳定 更好的耐低温性能	无断裂, 外观稳定

能力受限, 需通过树脂改性提升能量耗散效率。

2.2 表观密度对力学性能的影响

压缩硬度随密度增加呈非线性增长 ($R^2=0.99$), 60 kg/m³ 为拐点, 如图 2 所示。低密度区 (<60 kg/m³) 以弹性形变主导, 硬度增速 0.15 kPa/(kg/m³); 高密度区 (≥ 60 kg/m³) 纤维致密化引发塑性形变, 增速提升至 0.28 kPa/(kg/m³)。

其机理可归因于:

(1) 纤维堆积密度增加, 导致孔隙率降低, 纤维间接触点增多, 有效支撑能力增强; 纤维骨架的协同承载效应凸显, 材料从弹性形变向塑性形变过渡。

(2) 在密度 60 kg/m³ 附近存在明显拐点, 表明材料压缩行为发生相变。拐点前, 材料以开放孔隙的弹性回复为主; 拐点后, 纤维致密化引发应力集中, 压缩模量非线性提升。

(3) 滞后率与回弹率方面, 滞后率波动较小 (25% ~ 27.8%) 随表观密度增加呈现“低增速—稳定化”的特性, 而回弹率随密度增加从 56.3% 降至 48.0%, 该规律表明, 通过调控表观密度 (如选择 60 ~ 70 kg/m³ 区间), 可在保障高支撑性的同时维持较低动态能量损耗, 为汽车座椅材料的抗疲劳设计与舒适性优化提供了关键数据支撑, 如图 3 所示, 见表 4。

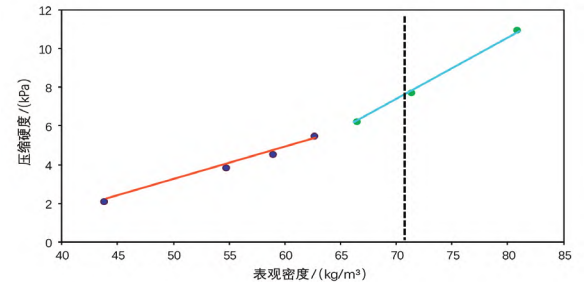


图 2 表观密度与压缩硬度关系

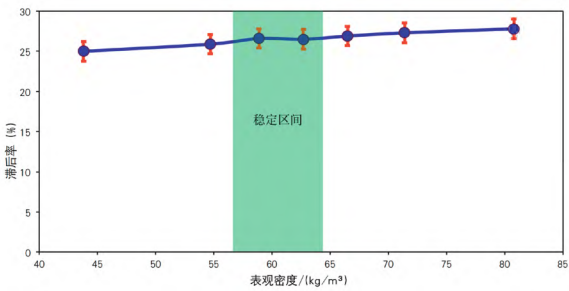


图 3 表观密度与滞后率关系

表 4 表观密度对应硬度、滞后率、回弹率

表观密度 / (kg/m³)	压缩硬度 /kPa	滞后率 (%)	回弹率 (%)
43.8	2.09	25.0	56.3
54.7	3.81	25.9	56.3
58.9	4.51	26.6	55.6
62.7	5.48	26.5	51.8
66.5	6.24	26.9	51.8
71.4	7.73	27.3	49.0
80.8	10.94	27.8	48.0

(4) 抗拉性能见表 5, 空气纤维材料的抗拉性能呈现显著的各向异性特征。抗拉强度随表观密度增加呈现显著的正相关性, 分析其原因为, 表观密度增加导致纤维交联点数量显著上升, 形成更密集的力学传递网络增强了纤维间的协同承载能力, 同时孔隙率降低也减少了应力集中, 提升了整体承载效率。而伸长率则表现出方向依赖性波动, 与表观密度无显著相关性, 纵向伸长率普遍高于横向, 归因于纤维轴向排列的延展优势。这一差异为汽车座椅的多维力学设计提供了理论依据, 在汽车座椅等需多向受力的场景中, 需通过纤维取向设计优化综合力学性能。

总体而言, 从密度对力学性能的影响机制来看, 空气纤维材料与传统聚氨酯泡沫表现出相似的整体趋势, 即硬度随密度增加呈分段正相关, 滞后率呈“低速—稳定化”行为, 抗拉强度亦与密度正相关。然而, 二

表 5 表观密度对应抗拉性能

表观密度 / (kg/m³)	抗拉强度 /kPa		伸长率 (%)	
	横向	纵向	横向	纵向
43.8	40.1	12.9	36.3	63.2
54.7	77.4	18.5	37.1	51.0
58.9	82.9	21.2	33.4	51.7
62.7	100.1	24.6	40.5	61.2
66.5	109.7	29.0	39.2	52.7
71.4	108.5	30.2	34.1	51.9

者在微结构演变与力学响应方面存在重要差异：高密度聚氨酯泡沫通常具有更细小、均匀的泡孔结构，有助于实现更均匀的应力传递与分散，从而在理想开孔率条件下可改善滞后率和回弹性能。相比之下，空气纤维材料通过挤出堆积形成三维搭接结构，其结构均匀性与空间对称性较低，导致抗拉性能表现出更明显的各向异性特征。这一区别在实际应用中需予以充分考虑，特别是在涉及多向受力的工况下。

2.3 环境可靠性

基于空气纤维材料的环境可靠性测试数据，见表 6，与传统的聚氨酯泡沫相比空气纤维材料拥有更广的耐温范围，适用于高寒与高温地区。同时相较于聚氨酯泡沫湿热环境下吸湿性能下降的特点，空气纤维材料吸湿率趋近于 0，性能保持率 ≥ 95%。空气纤维材料在汽车座椅应用设计中展现出卓越的环境可靠性优势，为在复杂工况下的长效服役提供了关键保障。其环境可靠性与回收性、高透气的协同优势，为新一代汽车座椅在极端气候适应性、耐久性 & 用户体验提升方面提供了革新性解决方案。

表 6 环境可靠性表现

测试项目	测试方法	测试结果
低温落球冲击	-30℃ 预处理 24 h 后，500 g 钢球（φ 50 mm）从 230 mm 自由下落	材料未断裂，无可见损伤
湿热老化	(85±2)℃，(85±5)% RH，(450±2) h	无吸湿膨胀，表面无腐蚀

2.4 动态疲劳性能

80 000 次循环压缩后，横向抗拉强度下降 48.6%，纵向强度逆增 10.3%，见表 7，此各向异性归因于纤维网络剪切断裂与轴向应力路径重构，建议采用梯度密度设计平衡承载方向性差异。此外，材料压缩硬度下降 34.4%，落球回弹率降低 15.5%，表明循环载荷导致不可逆孔隙塌陷与弹性储能能力衰退。与传统聚氨酯泡沫相比，空气纤维横向抗疲劳性与回弹稳定性存在一定短板，在汽车座椅中应用仍需通过材料-结构-工艺协同创新，平衡其各向异性特性与耐久性需求，以实现传统聚氨酯泡沫的局部替代及性能超越。

2.5 舒适性优化潜力

(1) 压力分布

POE 空气纤维较 PUR 泡沫平均压力降低 21%，峰值压力分散性提升，如图 4 所示。

如图 5 所示，低密度材料 (<60 kg/m³) 平均压力在 0.31 ~ 0.34 N/cm² 之间波动，通过多级孔隙塌陷实

表 7 动态疲劳前后性能变化

测试项目	动态疲劳前	动态疲劳后	变化率
厚度损失 /mm	49.5	52.1	+5.30%
ILD50 压陷硬度 /N	192.50	162.00	-15.84%
压缩硬度 /kPa	3.81	2.50	-34.38%
滞后率 (%)	25.92	26.30	+1.47%
落球回弹 (%)	52.30	44.20	-15.50%
横向拉伸强度 /N	77.40	39.80	-48.60%
纵向拉伸强度 /N	18.50	20.40	+10.30%

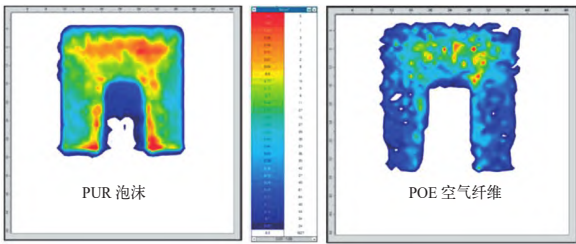


图 4 压力分布对比

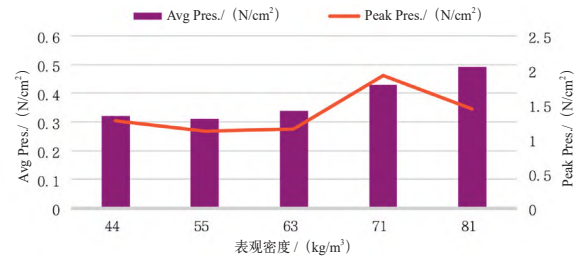


图 5 表观密度与体压分布的对应关系

现应力均化。高密度材料 (>70 kg/m³) 平均压力随密度增加显著上升 (0.43 → 0.49 N/cm²)，并易引发局部应力集中。

主要原因为受空气纤维高孔隙结构的影响，低密度区间高孔隙率 (> 40%) 使纤维网络在受压时发生多级孔隙塌陷，通过层级变形分散应力，降低平均与峰值压力，中高密度区间孔隙率降低 (20% ~ 30%) 导致纤维骨架刚性增强，压缩变形从多级塌陷转向整体塑性形变，引发局部应力集中 (如 D70 峰值压力骤增)。

在汽车座椅设计中，建议采用梯度密度分区与复合层状结构，以协同优化支撑性、压力分布及长期舒适性。未来研究可结合有限元仿真，进一步探索纤维网络拓扑结构与压力响应的映射关系。

(2) 振动传递

POE 空气纤维材料的共振频率范围在 5 ~ 8 Hz 见表 8，普遍高于 PUR 泡沫的共振频率 2 ~ 3 Hz，并且处于人体的敏感频率范围结合不同表观密度 POE 空气纤维材料的传递特性可以看出，随着表观密度的增加，POE 空气纤维的共振频率向低频区转移，同时低频区的放大

倍率逐渐增大，高频区的放大倍率逐渐降低。分析原因主要为密度增加导致材料刚性的提升，使得材料固有频率的降低同时引发材料在低频段（< 6 Hz）和高频段（> 10 Hz）共振行为的变化，同时高密度空气纤维材料孔隙率的差异导致对振动能量的吸收和高频振动传递的方式产生实质性变化，进而形成高密度低孔隙率材料，纤维网络刚性增强，能量传递路径集中，加剧低频共振。需通过复合结构设计偏移共振频带。

表 8 表观密度与传递特性对应关系

密度 / (kg/m ³)	最大传递率 / (g/g)	最大传递率时的频率 / Hz	6 Hz 放大倍率 / (g/g)	10 Hz 放大倍率 / (g/g)
45.6	2.52	7.89	1.27	1.41
51.1	2.75	6.75	1.44	1.04
60.2	3.03	5.92	2.95	0.85
68.2	3.28	5.63	2.80	0.71
77.0	3.34	5.92	3.22	0.67

2.6 散发性能

空气纤维材料与聚氨酯泡沫相比，在散发性能的表现具有明显优势，见表 9，因此规避了传统聚氨酯泡沫材料中苯系物和醛类等国标管控的八项有害物质散发的弊端，同时兼具高温低气味和低雾度的优点。

表 9 散发性能表现

测试项目	空气纤维	典型汽车内饰	合规性
气味（80℃）	3.0 ~ 3.5（塑料味）	≤ 3.5（部分车企要求 ≤ 3.0）	临界 / 部分不合规
雾度	0.1 mg	≤ 2.0 mg	完全合规
总碳	0.66 μgC/g	≤ 20 μgC/g	完全合规
苯	N.D.	≤ 100 μg/m ³	合规
甲苯	10.5 μg/m ³	≤ 100 μg/m ³	合规
乙苯	15.1 μg/m ³	≤ 100 μg/m ³	合规
二甲苯	75.4 μg/m ³	≤ 150 μg/m ³	合规
苯乙烯	6.7 μg/m ³	≤ 150 μg/m ³	合规
甲醛	12.82 μg/m ³	≤ 100 μg/m ³	合规
乙醛	N.D.	≤ 100 μg/m ³	合规
丙烯醛	N.D.	≤ 100 μg/m ³	合规

3 结语

本研究从材料特性角度系统评估了 POE 空气纤维材料在汽车座椅缓冲应用中的性能表现。结果表明，该材料在宏观硬度方面符合当前座椅产品的设计需求，并在可回收性、VOCs 释放量和湿热稳定性等方面展现出明显优势。其力学性能与表观密度呈显著正相关，表明可通过调控表观密度与纤维空间结构实现对材料宏观性能的

有效设计。在舒适性方面，POE 空气纤维表现出优于传统聚氨酯泡沫的压力分布性能，并可借助梯度密度设计进一步调节其压力分散与能量传递行为。

然而，与聚氨酯泡沫相比，POE 空气纤维在回弹性与耐热变形性方面仍存在一定差距。其高孔隙搭接结构在单元强度方面存在局限，导致动态疲劳性能相对较弱，同时空气纤维孔隙单元较聚氨酯泡沫更大且无规则，导致其出现按压异响和表面粗糙，这为其全面替代聚氨酯泡沫带来挑战。

基于当前研究结果，未来应在以下方面持续推进该材料的技术突破与应用研究：

- （1）材料改性。通过引入纳米增强相或动态交联剂，改善滞后损失与抗疲劳性能。
- （2）结构创新。开发梯度密度 - 纤维取向复合层状结构，实现支撑性与振动阻尼性能的协同优化。
- （3）工艺优化。调控熔融挤出工艺参数，着力解决异响与表面平整度问题。

本研究为汽车座椅材料的低碳化发展提供了新路径，有望通过多学科交叉与材料 - 结构 - 工艺一体化创新，推动汽车内饰系统向循环经济与智能舒适化方向演进。

参考文献

[1] ULRICH H, TUCKER B, ODINAK A, GAMACHE A R. Recycling of thermoset elastomers[J]. *Elastomers and Plastics*, 1979, 11: 208.

[2] GERLOCK J L, BRASLAW J, ZIMBO M. Polyurethane waste recycling 1: Glycolysis and hydroglycolysis of water-blown foams[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1984, 23: 545-552.

[1] AIRWEAVE Inc. Three-dimensional filaments-linked structure manufacturing apparatus, manufacturing method of three-dimensional filaments-linked structure, and mattress core material[P]. US Patent: US20180148312A1, 2018-05-31.

[4] 胡冲冲, 沈国平, 黄旭, 等. 聚氨酯高回弹泡沫的滞后性能研究 [J]. *聚氨酯工业*, 2015, 30(4): 18-21.

[5] 张芳园. 工程车辆座椅垂直振动及其对人体影响的试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.

[6] 林杰威, 李蒙, 郭智, 等. 垂直振动下坐姿人体局部频率敏感特性研究 [J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2024, 57(5): 120-128.