合成纤维空气滤清器滤材在潮湿环境中的应用研究

郑琴 李箐 刘建峰 庞磊 赵俊平 陈治颖

（东风商用车技术中心，武汉 430056）

摘要：通过静态吸湿与动态吸湿试验，系统评估了合成纤维滤材与传统木浆纤维滤材在潮湿环境中的耐湿性能差异，并探讨了滤材在高湿环境中进气阻力变化的内在机制。研究结果表明，合成纤维滤材在容尘量、初始过滤精度以及全寿命过滤性能方面均显著优于传统木浆纤维滤材，同时展现出更低的进气阻力和更稳定的结构特性。在潮湿环境台架试验中，合成纤维滤芯表现出优异的耐湿性能，未出现明显的结构变形或阻力上升。转鼓台架试验结果显示，合成纤维滤芯在高湿环境中可降低进气阻力约20%，燃油经济性提升1%。此外，在6×10⁴ km整车搭载试验中，合成纤维滤芯展现出显著的节油效果，验证了其在实际应用中的性能优势。

关键词：空气滤清器 滤芯 滤材 进气阻力 耐湿性

中图分类号：TS761.2 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250253

Research on Application of Synthetic Fiber Filter Materials for Air Cleaners in Humid Environments

Zheng Qin, Li Jing, Liu Jianfeng, Pang Lei, Zhao Junping, Chen Zhiying

(Technical Center, Dongfeng Commercial Vehicle Co., Ltd., Wuhan 430056)

Abstract: The differences in humidity resistance between synthetic fiber filter materials and traditional wood pulp fiber filter materials are systematically evaluated through static and dynamic moisture absorption tests, and the intrinsic mechanism underlying the variation in intake resistance of filter materials under high-humidity conditions is investigated. The results show that synthetic fiber filter materials are significantly superior to traditional wood pulp fiber filter materials in terms of dust holding capacity, initial filtration accuracy and full-life filtration performance, while exhibiting lower intake resistance and more stable structural characteristics. In bench tests under humid environments, synthetic fiber filter elements demonstrate excellent humidity resistance without obvious structural deformation or intake resistance rise. Further drum bench test results indicate that synthetic fiber filter elements can reduce the intake resistance by approximately 20% under high-humidity conditions, improving fuel economy by 1%. In addition, the 60,000 km on-vehicle test verified that synthetic fiber filter elements achieve a remarkable fuel-saving effect, which confirms their performance advantages in practical applications.

Key words: Air cleaner, Filter element, Filter material, Intake resistance, Humidity resistance

1 前言

空气滤清器是发动机进气系统的重要部件，其主要作用是滤除空气中的有害杂质颗粒，保证足量、洁净的空气进入气缸，满足燃料燃烧需求，减少发动机气门、气门座、气缸、活塞、活塞环、缸套的磨损，延长发动机的使用寿命[1]。因此，空气滤清器的性能直接关系到整车的动力性、经济性以及可靠性。

空气过滤材料是空滤性能的关键。空气滤

作者简介：郑琴（1980—），女，博士学位，工程师，研究方向为非金属复合材料研发。

参考文献引用格式：

郑琴，李箐，刘建峰，等. 合成纤维空气滤清器滤材在潮湿环境中的应用研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(2)：10-16.

ZHENG Q, LI J, LIU J F, et al. Research on Application of Synthetic Fiber Filter Materials for Air Cleaners in Humid Environments[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 10-16.

芯的过滤材料不同,其进气阻力、过滤精度、容尘量也不同。传统滤材的主要成分为木浆纤维,具有成本低的优势,因此得到了广泛应用。然而,木浆纤维滤芯在高湿或高尘的复杂环境条件下,易受潮、堵塞甚至破损,导致使用寿命显著缩短,进而增加了维护和更换的频率。此外,传统木浆纤维滤芯的过滤效率和容尘能力相对较低,无法满足现代汽车对空气滤清性能的要求。随着汽车工业的发展和排放法规的日益严格,对空气滤清器的性能提出了更高的要求。在节能环保的大背景下,降低整车的进气阻力、提升燃油经济性成为重要的研究方向。

汽车进气阻力的大小直接影响整车的动力性能和燃油(气)经济性[2-3]。在汽车进气系统结构确定的情况下,空滤的进气阻力成为整个系统进气阻力的关键影响因素[4-5]。降低空滤的进气阻力不仅有助于提升发动机的进气效率,还能间接改善整车的燃油经济性,减少排放,提升整车的综合性能[6]。

为深入研究新型滤材在潮湿环境中的应用潜力,本文以合成纤维滤材和传统木浆纤维滤材为研究对象,通过静态与动态潮湿试验,系统评估两者在高湿环境下的耐湿性能差异。同时,结合滤芯试样的台架测试、转鼓台架试验以及实车搭载试验,探讨合成纤维滤材在降低进气阻力方面的优势。重点分析新型滤材对燃油(气)经济性的影响,以期为未来空气滤清器材料的优化与升级提供理论依据和技术支持。

2　试验

2.1　试验原料及试剂

试验所用原料及试剂均为市售常用级别:木浆纤维滤材,贺氏(苏州)特殊材料有限公司;合成纤维滤材由DFCV与贺氏(苏州)特殊材料有限公司联合开发。

2.2　试验仪器

试验所用仪器包括:电子天平,梅特勒-托利多公司;测厚仪,沧州精弘工程仪器有限公司;空气滤清器综合试验台,沈阳紫微恒检测设备有限公司;体视显微镜,奥林巴斯公司;恒温恒湿试验箱,北京雅士林试验设备有限公司;转鼓试验台架,AIP;数采仪,Dewesoft;滤芯加湿试验台;空滤总成加湿试验台;潮湿试验箱(自制)。

2.3　滤材潮湿性能试验方法

裁取标准方形滤材,称重、测定其初始厚度。将样品置于温度23 ℃、相对湿度98%的恒温恒湿试验箱中,分别进行24 h和72 h老化处理,取出后再次称量测厚,以评估其静态吸湿性能。

裁取圆形态滤材样品并称重,将其置于温度25 ℃、相对湿度90%的潮湿试验箱内,并设置于出气口位置进行30 min动态暴露试验,模拟实际工作环境中湿度变化对滤材的影响。试验结束后再次称重,用于计算动态吸湿量。吸湿处理后的滤材样品,分别采用光学显微镜对其表面及内部微观结构进行观察与记录。

2.4　滤芯台架试验方法

为系统评估木浆纤维滤材与合成纤维滤材的性能差异,分别采用上述两类滤材制备同规格滤芯,采用空气滤清器综合试验台,依据ISO 5011:2020《内燃机和压缩机进气空滤的性能试验方法》[7]开展滤芯性能测试。

在滤芯潮湿试验中,环境温度为(20±2) ℃,相对湿度维持在30%。试验在滤芯加湿试验台架上进行,设置加湿能力为12 kg/h,进气流量设定为1 000 m^3/h。试验程序包括:开启风机5 min以建立稳定气流,随后进行45 min加湿处理,之后停止加湿并保持气流运行20 min。在此过程中,实时记录滤芯的进气阻力随时间的变化曲线,以评估其在动态加湿条件下的阻力特性。

在空气滤清器潮湿试验中,环境温度为(12±2) ℃,相对湿度维持为40%。试验在空滤总成加湿台架上进行,设置加湿能力为12 kg/h,进气流量设定为900 m^3/h。同样条件下开展潮湿试验,并实时监测滤芯的进气阻力随时间的变化情况,同时记录试验前、后滤芯的质量变化,以评估其在高湿度情况下的吸湿增重行为及其对气动性能的影响。

2.5　转鼓台架和整车搭载试验方法

采用木浆纤维滤材与合成纤维滤材分别制备同规格滤芯。在环境温度分别为25 ℃、相对湿度40%以及35 ℃、相对湿度95%的试验条件下,依据商用车燃料经济性标准循环工况[8],在转鼓试验台

架上开展性能对比试验，以评估其对整车进气与燃烧特性的影响。

将2种滤材滤芯分别搭载于同一型号重载商用车，在实际道路条件下进行6×10^4 km可靠性验证试验，全面考查其在长期运行中的结构稳定性、耐久性及对整车性能的适应性。

3 试验结果与分析

3.1 滤材潮湿试验

3.1.1 静态吸湿

滤材静态吸湿试验结果如表1所示。由数据可知，在23 ℃、98%相对湿度的恒温恒湿环境下，木浆纤维滤材表现出显著的吸湿性。经过24 h和72 h的静态吸湿处理后，其厚度分别增加了7.3%和12%，显示出纤维结构在吸湿作用下的膨胀特性；同时，滤材的质量分别提升了3.4%和4.1%，进一步验证了其较高的吸湿能力。这种吸湿膨胀行为可能导致滤材在高湿环境中的结构稳定性下降，从而影响其在实际应用中的过滤性能和气流阻力特性。

相比之下，合成纤维滤材在相同试验条件下，其外形尺寸及厚度均未发生明显变化，质量变化亦极为微小，表现出优异的耐湿稳定性。该特性表明合成纤维滤材在高湿环境下仍能维持良好的结构完整性和气流通道稳定性，有利于保障其在复杂工况下的过滤效率和使用寿命。

表1 滤材静态吸湿结果

滤材类型	初始厚度/mm	24 h厚度/mm	72 h厚度/mm	初始质量/g	24 h质量/g	72 h质量/g
木浆纤维滤材	0.273	0.293	0.305	5.700 0	5.895 6	5.936 8
合成纤维滤材	0.395	0.395	0.395	4.964 0	4.965 7	4.963 1

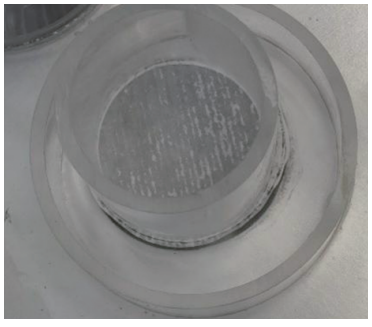
3.1.2 动态吸湿

滤材动态吸湿试验结果如表2所示。试验数据表明，在温度25 ℃、相对湿度90%的动态加湿环境下暴露30 min后，木浆纤维滤材的质量增加了288%，而合成纤维滤材的质量仅增加0.7%。该结果表明，木浆纤维对环境湿度具有极高的敏感性，在潮湿条件下吸湿能力显著。相比之下，合成纤维滤材在相同试验条件下表现出优异的抗湿性能，吸湿率极低，推测其纤维结构具有良好的疏水特性，能够有效抵御湿气侵入，从而在高湿环境下仍能维持性能稳定。

表2 滤材静态吸湿结果 g

滤材类型	初始质量	加湿后质量	增重
木浆纤维滤材	0.470 7	1.827 6	1.356 9
合成纤维滤材	0.403 3	0.406 2	0.002 9

通过观察发现，木浆纤维滤材在加湿仅1 min后即被水分迅速浸润，表现出较强的亲水性；而合成纤维滤材在加湿过程中，即使延长加湿时间，其表面仍无明显变化，水汽仅在纤维表面发生冷凝，未出现渗透或润湿现象。2种滤材在加湿后的状态差异如图1所示，进一步验证了木浆纤维滤材的高吸湿性与合成纤维滤材的优异疏水性能。



(a)木浆纤维滤材

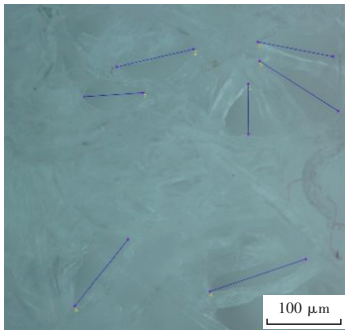


(b)合成纤维滤材

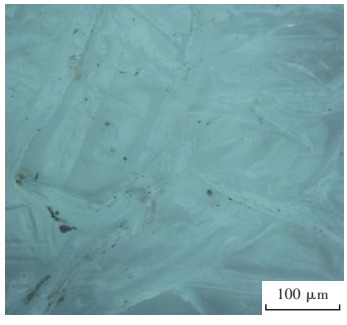
图1 滤材加湿后表面形貌

滤芯透气孔的尺寸与分布直接影响滤材的原始气流阻力和过滤性能。通过光学显微镜对干燥及吸湿状态下的滤材进行微观形貌观察，结果如图2所示。可以看出，木浆纤维在吸湿后发生显著膨胀，纤维直径增长1倍以上，导致滤材内部孔隙结构

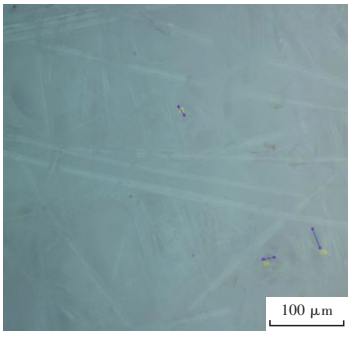
大幅减少甚至消失,进而影响其透气性与过滤效率。而合成纤维滤材在相同观察条件下,纤维排列清晰、根根分明,未出现吸湿变形现象。分析表明,其表面具有良好的疏水性能,水分子仅附着于材料表面,未渗透纤维结构,透气孔保持原有状态,未受湿气影响。该结果进一步验证了合成纤维滤材在高湿环境下的结构稳定性和透气性能优势。



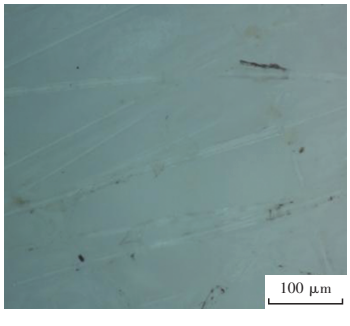
(a)木浆纤维(干)



(b)木浆纤维(湿)



(c)合成纤维(干)



(d)合成纤维(湿)

图2　木浆滤材和合成纤维滤材微观形貌对比

3.2　不同材料滤芯的台架试验

3.2.1　空气滤清器综合试验台架试验

滤芯台架试验是评估空气滤清器过滤性能的直接手段。将2种滤材制成相同规格的滤芯后,进行性能对比测试,结果如表3所示。数据显示,随着滤材性能的提升,滤芯的整体性能也得到了显著优化。具体而言,采用合成纤维滤材制成的滤芯在多个关键指标上表现优异:其进气阻力较传统木浆纤维滤芯降低了7.9%,原始过滤效率提升了0.33%,全寿命过滤效率提高了0.02%,容尘量提升了87%。这些改进不仅体现了合成纤维滤材在过滤精度和使用寿命方面的优势,也表明其在保障发动机进气洁净度和提升空气流动效率方面具有更高的综合性能,为滤芯设计和材料选择提供了有力的数据支持。

表3　不同材料滤芯的综合试验台架结果

滤材类型	进气阻力/kPa	原始过滤效率/%	全寿命过滤效率/%	容尘量/g
木浆纤维滤材	1.14	99.60	99.97	2 444
合成纤维滤材	1.05	99.93	99.99	4 574

3.2.2　滤芯加湿台架试验

为验证合成纤维滤材在高湿环境下的性能稳定性,特在专用潮湿试验台架上开展加速潮湿试验。该试验台架可将滤芯区域的湿度提升至90%,从而模拟车辆长期在高湿度环境下行驶的实际工况。试验装置如图3所示,通过该测试可有效评估滤材在潮湿环境中的耐受性及其对滤芯整体性能的影响。

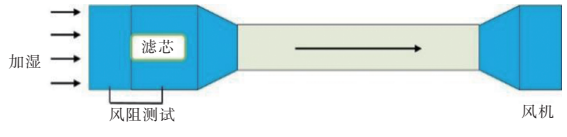
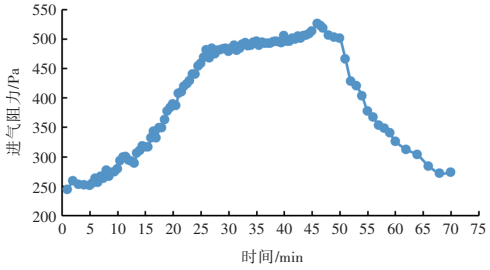


图3　潮湿试验台架示意

木浆纤维滤芯的进气阻力随时间变化曲线如图4a所示。其初始进气阻力为254 Pa;在加湿27 min后,进气阻力稳定在490 Pa,增幅达93%;停止加湿后,进气阻力虽有所下降,但未能恢复至初始水平。试验结束后可明显观察到滤芯多处发生严重形变,如图4b所示。结合进气阻力–时间曲线与外观形貌分析可知,木浆纤维滤材在潮湿环境中吸湿后发生膨胀变形,且变形具有不可逆性,导

致进气阻力显著升高，反映出其在高湿环境下的结构稳定性较差。



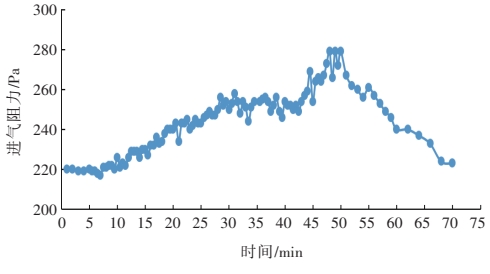
(a)进气阻力-时间曲线



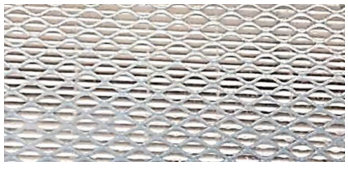
(b)试验后表观

图 4 木浆纤维滤芯的进气阻力随时间变化示意

合成纤维滤芯具有较低的初始进气阻力，为 219 Pa；在加湿 30 min 后，进气阻力达到峰值 250 Pa，增幅仅为 14%。其最大进气阻力约为木浆纤维滤芯最大阻力的一半。在整个加湿过程中，合成纤维滤芯的进气阻力始终低于木浆纤维滤芯。停止加湿后，进气阻力迅速恢复至初始水平。合成纤维滤芯的进气阻力-时间变化曲线如图 5a 所示。试验结束后观察滤芯外观，滤材表面未出现皱褶或弯曲变形，结构保持完整，如图 5b 所示。结合进气阻力-时间曲线与外观形貌分析可知，由于合成纤维滤材具有优异的耐湿性能，在高湿环境下仍能保持结构稳定，未发生吸湿变形，因此进气阻力变化较小，表现出良好的湿态工作性能。



(a)进气阻力-时间曲线



(b)试验后表观

图 5 合成纤维滤芯的进气阻力随时间变化示意

3.2.3 空滤总成加湿台架试验

空滤总成加湿台架的加湿原理与滤芯加湿台架相同。在进气流量为 900 m^3/h 的条件下，对空滤滤筒进行了 1.5 h 的加湿试验，其进气阻力随时间变化的曲线如图 6 所示。进气阻力和质量的变化如表 4 所示。试验结果显示，木浆纤维滤芯的初始进气阻力为 800 Pa，峰值进气阻力达到 1 480 Pa，试验结束时进气阻力为 1 340 Pa；而合成纤维滤芯的初始压差为 670 Pa，峰值进气阻力为 1 240 Pa，试验结束时进气阻力为 1 050 Pa。木浆纤维滤芯的增重为 1.834 kg，增重率达到 54.9%；而合成纤维滤芯的增重为 0.886 kg，增重率为 29.9%。2 种滤芯的进气阻力及质量变化趋势与滤芯加湿台架试验结果一致，试验结果进一步验证了合成纤维滤材在吸湿性方面具有显著优势，在加湿环境下仍表现出更优的结构稳定性和较低的阻力增长。

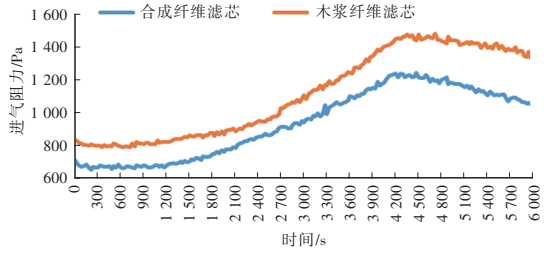


图 6 2 种滤芯在进气流量 900 m^3/h 时的进气阻力-时间曲线

表 4 木浆纤维滤芯和合成纤维滤芯的进气阻力和质量变化

滤材类型	初始进气阻力/Pa	最高进气阻力/Pa	终止进气阻力/Pa	质量增加量/kg	增重率/%
木浆纤维滤芯	800	1 480	1 340	1.834	54.9
合成纤维滤芯	670	1 240	1 050	0.886	29.8

3.3 滤材对经济性的影响

3.3.1 转鼓试验台架

采用相同规格尺寸、由不同滤材制成的滤芯搭载于同一重载柴油车上进行转鼓试验。试验结果如表 5 所示，以木浆纤维滤芯的油耗为基准值。试验结果表明，在低温低湿环境中，采用木浆纤维滤芯与合成纤维滤芯的平均进气阻力基本一致，油耗变化不显著。然而，在高温高湿环境中，木浆纤维滤芯的平均进气阻力增大至 1.26 kPa；其油耗

明显上升,百公里油耗增加了1.12 L。相比之下,合成纤维滤芯在高温高湿环境中的进气阻力为0.95 kPa,显著低于木浆纤维滤芯的进气阻力,低24.6%;其油耗在高温高湿环境下仅较低温低湿环境略有上升,但仍显著低于木浆纤维滤芯在高温高湿环境下的油耗,同比降低1.18%。转鼓试验结果充分验证了合成纤维滤芯在降低进气阻力、提升整车燃油经济性方面的显著优势,为其实际应用提供了依据。

表5　不同材料滤芯的转鼓试验结果

滤材类型	测试环境	平均进气阻力/kPa	百公里油耗变化/L
木浆纤维滤芯	20 ℃,40%	0.14	基准值
木浆纤维滤芯	35 ℃,90%	1.26	+1.12
合成纤维滤芯	20 ℃,40%	0.135	−0.08
合成纤维滤芯	35 ℃,90%	0.95	+0.66

3.3.2　整车搭载试验

为验证不同滤材制成的同规格滤芯在实际工况下的长寿命性能,将2种滤芯分别搭载于同一型号的重载柴油车上,开展累计6×10^4 km的道路试验。试验过程中,搭载木浆纤维滤芯的试验车辆共出现多次空滤传感器报警,每次均通过拆卸滤芯并进行反向吹灰处理后重新安装。同时,观测到木浆纤维滤芯的褶皱均出现不同程度的弯曲变形。而搭载合成纤维滤芯的试验车辆在整个测试周期内未出现空滤故障报警或滤芯破损等异常情况。在完成6×10^4 km寿命验证后,对2种滤芯的进气阻力及油耗性能进行了对比测试。试验选取相同高速坡道路段进行,测试结果如表6所示。数据显示:搭载木浆纤维滤芯的车型,其进气阻力最大值为2.35 kPa,而搭载合成纤维滤芯的车型最大进气阻力为2.24 kPa,降低4.7%;在平均进气阻力方面,前者为1.60 kPa,后者为1.24 kPa,降幅达22.5%。油耗表现方面,以木浆纤维滤芯车型的油耗值为基准,合成纤维滤芯车型瞬时油耗降低1.18 L/h,油耗降幅为2.3%。

在连续山区坡道工况下,对2种滤芯的进气阻力及油耗表现进行了对比测试。试验结果如表7所示,结果显示:搭载木浆纤维滤芯的车型最大进气阻力为2.62 kPa;而搭载合成纤维滤芯的车型最大进气阻力为2.37 kPa,较前者降低了10%。在平均进气阻力方面,木浆纤维滤芯车型为1.53 kPa,合成纤维滤芯车型为1.28 kPa,降幅为16.3%。以木浆纤维滤芯车型的油耗值为基准,搭载合成纤维滤芯车型的瞬时油耗下降了1.3%。试验结果表明,合成纤维滤芯在复杂山区道路条件下仍具备更优的进气性能和更高的燃油经济性。

表6　6×10^4 km高速坡道试验结果

滤材类型	平均油门开度/%	进气阻力最高值/kPa	平均进气阻力/kPa	瞬时油耗变化/L·h^{-1}	油耗变化率/%
木浆纤维滤芯	78.94	2.35	1.6	基准值	基准值
合成纤维滤芯	77.39	2.24	1.24	−1.18	−2.3

表7　6×10^4 km连续山区坡道试验结果

滤材类型	平均油门开度/%	进气阻力最高值/kPa	平均进气阻力/kPa	瞬时油耗变化/L·h^{-1}	油耗变化率/%
木浆纤维滤芯	77.72	2.62	1.53	基准值	基准值
合成纤维滤芯	76.94	2.37	1.28	−2.34	−1.3

通过整车搭载试验还可观察到,当进气阻力较高时,发动机的油门开度加大,进气流量随之增加,进而导致发动机负荷率升高。尽管在实际整车搭载过程中需综合考虑同一路段可能出现的多种路况,以及驾驶员对路况的响应与操作差异等因素,但本次道路试验仍能说明:采用合成纤维滤芯后,整车在不同工况下的进气阻力和油耗均表现出一致的降低趋势,合成纤维滤芯在长里程使用条件下仍能保持优异的进气性能与燃油经济性。

4　结束语

本文通过静态吸湿与动态吸湿试验,系统对比了合成纤维滤材与传统木浆纤维滤材在潮湿环境下的耐湿性能差异,并深入探讨了高湿环境中滤材进气阻力变化的内在原因。研究结果表明,新型合成纤维滤材在容尘量、初始过滤精度及全寿命过滤性能方面均显著优于传统木浆纤维滤材,同时表现出更低的进气阻力和更稳定的结构性能。在潮湿环境台架试验中,合成纤维滤芯展

现出优异的耐湿性，未出现结构变形或阻力异常上升现象；转鼓台架试验结果显示，其在高湿环境下较木浆纤维滤芯的进气阻力低20%，燃油经济性提升1%。整车搭载的实际道路试验进一步验证了合成纤维滤芯的优异性能。在累计6×10^4 km的行驶验证中，搭载合成纤维滤芯的试验车未出现空气滤清器报警或滤芯结构破损，与搭载木浆纤维滤芯的试验车相比，平均进气阻力下降约20%，油耗降低1.3%以上，充分体现了其在提升进气效率与燃油经济性方面的实际优势。

为进一步提升研究数据的代表性与可靠性，建议后续延长测试里程、扩大样本数量，并在更多样化环境与复杂路况下开展试验，以全面评估合成纤维滤芯对整车经济性的长期影响。

综上所述，合成纤维滤芯在进气性能、燃油经济性及耐久性方面均优于传统木浆纤维滤芯，尤其在潮湿环境中具有良好的应用前景，对提升整车性能、降低能耗与运营成本具有重要意义。

参考文献：

[1] 韦荣灵. 浅谈机柴空滤清器的滤纸材料[J]. 内燃机与配件, 2019(2): 66-68.

[2] 王玉文. 空气滤清器进气阻力的影响因素及其应用案例[J]. 汽车画刊, 2024(2): 205-207.

[3] 李俊勋. 进气阻力和排气背压对增压中冷柴油机性能影响的试验研究[J]. 柴油机设计与制造, 2018(3): 32-36.

[4] 李刚. 影响空气滤清器进气阻力的因素[J]. 内燃机与配件, 2011(1): 1-2.

[5] 牛军, 梁永森, 崔艳军, 等. 进气阻力对柴油机性能影响的试验研究[J]. 车用发动机, 2010(4): 79-82.

[6] 王宠, 李亚南, 白晓鑫, 等. 进气湿度对增压汽油发动机额定功率的影响[J]. 内燃机与配件, 2022(21): 1-3.

[7] Inlet Air Cleaning Equipment for Internal Combustion Engines and Compressors — performance testing: ISO 5011: 2025[S/OL]. [2025-09-12]. https://www.iso.org/search.html?q=ISO%205011: 2025.

[8] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 重型商用车燃料消耗量测试方法: GB/T 27840—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

AT&M