

高速公路声屏障板仿生结构设计及声学力学性能

于征磊^{1,2}, 张超磊², 陈立新², 胡平³, 徐涛³, 郭滨恺²

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 环博经纬新材料科技(威海)有限责任公司, 山东威海 255000)

摘要:为解决传统声屏障性能不足的问题,以犰狳外壳与蜂窝结构为仿生原型,设计了两种仿生声屏障板。通过仿真模拟对其性能进行研究分析,并结合现场测试进行验证。结果表明,仿生声屏障板的隔声性能较传统钢板大幅提高。其中,仿生犰狳外壳声屏障板的隔声量达 37.711 dB,提升了 38.1%。此外,本文对仿生声屏障板的凸尖高度与整体厚度进行了参数化设计。现场测试数据显示,仿生声屏障的插入损失为 23.3 dB,较传统声屏障提高了 50.3%。该设计实现了隔声性能、力学性能与成本的平衡,为高速公路声屏障板提供了一种新的设计思路与研究方法。

关键词:工程仿生学;高速公路;声屏障;降噪性能;有限元仿真;插入损失

中图分类号: TB52

文献标志码: A

文章编号: 1671-5497(2025)09-3079-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250566

Bionic structure design and acoustic and mechanical properties of expressway sound barrier panels

YU Zheng-lei^{1,2}, ZHANG Chao-lei², CHEN Li-xin², HU Ping³, XU Tao³, GUO Bin-kai²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Huanbo Jingwei New Material Technology (Weihai) Co., Ltd., Weihai 255000, China)

Abstract: To address the inadequate performance of traditional sound barriers, two bionic sound barrier panels were designed based on the armadillo shell and honeycomb structure as prototypes. The performance of these panels was studied and analyzed through simulation and validated by field testing. The results indicate that the sound insulation performance of the bionic sound barrier panels significantly surpasses that of traditional steel panels. Specifically, the sound insulation of the bionic armadillo shell sound barrier panel reaches 37.711 dB, an increase of 38.1%. Furthermore, in this paper a parametric design was conducted on the height of the protrusions and the overall thickness of the bionic sound barrier panels. Field tests date

收稿日期: 2025-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375289); 吉林省教育厅博士研究生科研创新能力提升项目(JJ-KH20250151BS); 吉林大学研究生创新研究计划项目(2025CX186).

作者简介: 于征磊(1984-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 仿生结构设计. E-mail: zlyu@jlu.edu.cn

通信作者: 胡平(1955-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 热塑成型碳纤维. E-mail: 641815930@qq.com

show that the insertion loss of the bionic sound barrier is 23.3 dB, which is an improvement of 50.3% over traditional sound barriers. This design achieves a balance between sound insulation performance, mechanical performance, and cost, providing a new design concept and research method for highway sound barrier panels.

Key words: engineering bionics; expressway; sound barrier; noise reduction performance; finite element simulation; insertion loss

0 引言

随着我国高速公路网的快速扩张,交通噪声污染已成为影响沿线居民身心健康和生活品质的突出环境问题^[1-3]。相关研究表明,长期暴露在高强度噪声环境下,不仅会引发听力损伤、睡眠障碍等生理问题,还会增加心血管疾病、心理疾病的发病风险,对沿线居民的身心健康构成严重威胁。同时,噪声污染还会影响学校、医院等特殊区域的正常运营,干扰精密仪器设备的运行精度,产生多方面的负面效应^[4-6]。

传统声屏障材料(如金属板、混凝土板)存在质量大、吸声性能不佳、强度不够、回收利用率低等问题,难以满足绿色交通的发展需求^[7-9]。因此,急需研发兼具轻质、高强、环保且声学性能优异的新型声屏障材料。哈尔滨工业大学陈立庚^[10]研究了橡胶颗粒/水泥复合材料的抗压强度与声学性能,分析结果表明,该材料制成的声屏障降噪效果显著,且频率越高降噪效果越显著,声屏障的综合降噪效果可达 15 dB 左右。东南大学廖陈畅^[11]采用发泡混凝土材料制备声屏障板,并测试其抗冲击性能与声学性能,结果表明,声屏障单元板能承受的极限荷载为 4.025 MPa,插入损失最大可达 4.10 dB。Thakre 等^[12]提出了新型隔音板和植物覆盖物的复合组合,该屏障集成了 45°、90°、180°、270°的可移动噪声帽,以进一步衰减和转移噪声。Yang 等^[13]提出了一种具有蜂窝状外观的通风吸音板,单元模拟结果显示,其隔音带宽范围为 427~5 979 Hz,隔音率为 90%。在传统声屏障材料难以满足环保与性能双重需求的背景下,由聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET)树脂+连续玻纤预浸板与 PET 发泡板合成的三明治板凭借优异的综合性能^[14],成为声屏障材料研发的新方向。其中,PET 树脂具有良好的耐化学腐蚀性、抗老化性和可回收性,符合绿色环保理念;连续玻纤则能显著提升材料

的强度和刚性。二者复合而成的预浸板兼具轻质、高强优势,其密度仅为传统金属材料的 1/3,拉伸强度却可达 400 MPa 以上^[15]。此外,PET 材料的可设计性强,通过调整配方和结构,可实现对隔声性能的精准调控。目前,该材料在航空航天、轨道交通等领域已展现出良好的应用潜力,但在高速公路声屏障领域的系统性研究与规模化应用仍处于起步阶段,亟需通过深入研发,充分挖掘其在噪声治理中的价值。

近年来,仿生设计为声屏障领域注入了新的活力。从自然界获取灵感,为声屏障结构创新开辟了新路径^[16]。例如,猫头鹰羽毛的多级微孔结构^[17-19]、蜂窝结构的层状阻尼特性^[20-22]、犰狳外壳独特的分层结构和几何形鳞片拼接方式均为吸声降噪与结构强化提供了仿生原型。Xie 等^[23]分析了海螺模拟腔结构(Conch-inspired cavity structure, CICS)的内部设计和实验结果,发现该结构能有效提高声屏障的吸声和隔声性能,达到提高声学性能的目的,为实现多噪声环境下的吸声降噪提供了新的解决方案。Li 等^[21]提出了多层蜂窝膜型声学超结构,该结构可以同时实现宽带隔音和承重功能,成为一种有效的轻质多功能隔音结构。这些研究表明,通过仿生设计可以有效提高结构的声学性能,为声屏障结构创新提供新思路。当前,将有限元仿真与仿生设计相结合已成为高性能声屏障研发的主流方向^[24];通过数字仿真验证仿生结构的可行性,再借助实体试验修正仿真模型,形成“仿生构思-仿真优化-工程验证”的闭环研发模式。这种模式既能突破传统材料的性能极限,又可大幅减少实体试验次数,缩短传统试错法的研发周期,同时降低高速公路声屏障板的研发成本。

本文在现有研究基础上,首次将仿生犰狳外壳与蜂窝结构创新性地应用于高速公路声屏障设计,设计出仿生犰狳外壳(Bionic armadillo shell, BAS)声屏障板和仿生蜂窝结构(Bionic honey-

comb structure, BHS)声屏障板。通过有限元仿真模拟,将其与传统钢板型(Steel plate type, SPT)声屏障板进行全面对比分析,并对整体结构开展力学分析和现场测试验证。本文旨在通过跨学科融合,挖掘新型材料和仿生结构的潜力,寻求隔声性能、力学性能与成本之间的最优平衡方案,为高速公路声屏障的设计与应用提供新的理论与实践依据。

1 仿生声屏障板设计及仿真

1.1 仿生声屏障板结构设计

犰狳的外壳具有独特的分层结构和几何形鳞片拼接方式,展现出精准的结构-功能协同效应。这种结构使其具有很好的柔性和防护能力。本文借鉴犰狳外壳的分层结构^[25],设计出多层隔声材料。其核心在于通过“硬外层、软内心”的分层结构实现对声波传递的阶梯式削弱。其中,外层采用的PET树脂+连续玻纤预浸板具有高声阻抗特性,当交通噪声入射时,硬外层通过声阻抗不匹配效应直接反射部分入射声能,形成第一道隔声屏障。而内层的PET发泡板为多孔柔性结构,其内部密布的闭孔与微孔网络构成高效吸声通道,声波透射至内层后,空气分子在孔隙中发生剧烈的粘滞摩擦,同时发泡材料的骨架振动,通过阻尼作用将声能转化为热能,对中高频声波有较好的吸收效果。此外,发泡材料表面四边形突起结构的设计进一步强化了降噪效果。突起的几何尺寸与交通噪声波长精准匹配,使声波在突起表面发生多次反射与散射,部分声波被突起直接阻挡并反射回声源方向,部分声波在相邻突起间形成绕射,导致声波传播路径延长。同时,不同反射路径的声波因相位差产生干涉抵消,显著降低了声波的相干性,较平面结构额外提升了隔声量。这种结构设计完美借鉴了犰狳鳞片紧密拼接的防护逻辑,通过物理阻挡与能量耗散的双重作用削弱声能传递。

蜂窝结构因其轻质、高强的特点,被广泛应用于建筑、交通、航空航天等领域。它由一系列排列整齐的六边形小室组成,不仅轻便、坚固,而且对声音的传播有很好的阻碍作用。本文所提的蜂窝结构仿生设计依托六边形小室的多尺度声阻调控机制实现高效降噪^[21]。由PET材料构建的六边形小室形成规则排列的封闭腔室系统,对声波传

播形成三重阻碍。一是蜂窝壁的刚性反射作用使入射声波在相邻腔室间形成往复反射,延长声能衰减路径。二是腔室内空气柱在声波激励下产生亥姆霍兹共振效应,当声波频率接近腔室共振频率时,空气柱振动加剧,通过黏性损耗消耗大量声能,实现局效吸声。三是蜂窝状突起设计进一步增加声阻抗的空间不连续性,使声波在传播过程中发生多次折射与绕射,降低其定向透射能力。两种仿生蜂窝结构中,蜂窝状突起通过优化声能散射角度,使其在交通噪声主要频段的平均隔声量较传统蜂窝结构有明显提升,能很好地适配高速公路噪声的主要频率特征。仿生声屏障板设计如图1所示。

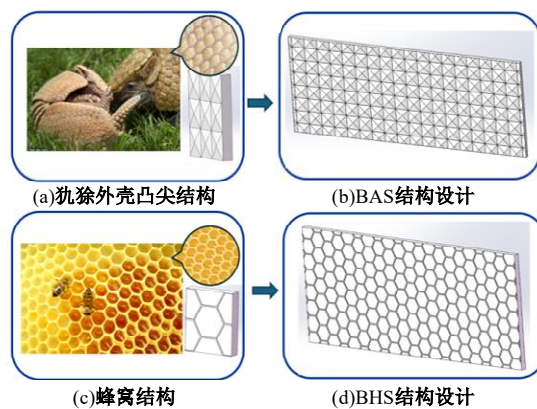


图1 仿生声屏障板设计

Fig. 1 Bionic sound barrier plate design

1.2 仿生声屏障板设计参数

BAS结构的凸尖部分设计为四边形突起,并且在三明治板的背面对应设计四边形凹槽,仿生结构胞元图案设计为135 mm的正方形,突起尺寸设计为5 mm,并通过阵列形成。BHS结构的突起部分设计为蜂窝状突起,每个突起的宽度为8 mm、高为5 mm,蜂窝胞元的尺寸为127 mm。仿生声屏障板设计参数如图2所示。

1.3 声屏障板仿真设置

根据《公路声屏障 第2部分:总体技术要求》(JT/T 646.2—2016)^[26]第5.3条规定:公路声屏障声学材料应考虑声学性能、力学性能、防腐性能、防火性能和外观,其技术要求应符合JT/T 646.4的规定。根据《公路声屏障第4部分:声学材料技术要求及检测方法》(JT/T 646.4—2016)^[27]第4.1条规定:非透明声屏障声学材料的计权隔声量应不小于26 dB,透明声学材料的计权隔声量应不小于20 dB。具有吸声性能要求的

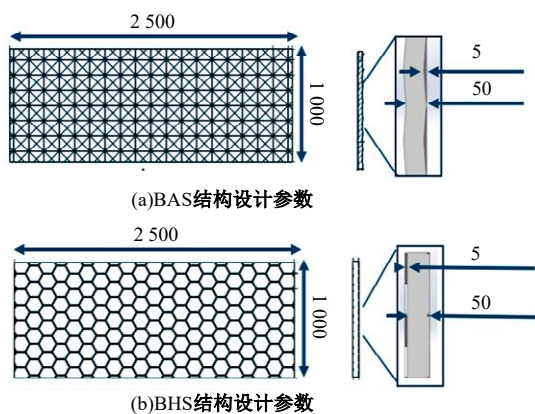


图2 仿生声屏障板设计参数(单位:mm)

Fig. 2 Design parameters of bionic sound barrier panels (unit:mm)

声学材料,其降噪系数应不小于0.60。第4.2.1条规定:声屏障声学材料抗不应产生功能障碍、残余变形或损坏,其最大弹性挠度不应超过 $L/300$ (L 为声学材料最大自由长度),残余变形不应超过 $L/600$ 。根据要求分析声屏障板的隔声与抗风压性能。

1.3.1 声屏障板声学仿真设置

基于Comsol仿真软件的压力声学模块,对声屏障板的隔声性能进行仿真分析。建立隔声分析模型,从左到右依次为:长度为1000 mm的入射声源室空气域、隔声分析样件、长度为1400 mm的接收室空气域、可以完全吸收声波且不会因为声波的反射造成干扰的完美匹配层。通过压力声学模块的平面波辐射条件施加1 Pa的声压,并通过测量声源室内与接收室内平均声压级,得出被测样件的隔声量。由于样件具有对称性,考虑到资源与计算时间,本文只截取了结构的一部分进行隔声性能的分析,并在上下面与前后面上设置周期性边界条件,模拟样件的整体结构,如图3(a)所示。

1.3.2 声屏障板力学仿真设置

声屏障板的力学性能检测是保障其在复杂荷载下结构稳定、避免因变形损坏导致降噪效果衰减的必要前提^[10, 11]。建立全尺寸(2500 mm×1000 mm)的仿生声屏障板,分别施加 $P_1=500$ Pa、 $P_2=1.5 \times P_1$ 、 $P_3=2.5 \times P_1$ 的压强分析其结构强度。

建立有限元仿真模型,如图3(b)所示,其边界条件设置如图3(c)所示。对外部的PET树脂+连续玻纤预浸板采用2D网格建立,对内部的PET发泡板采用3D六面体网格建立,并将外板

与内板共节点连接。对声屏障板的短边进行固定,分别向面板施加均匀的1250、1875、3125 N的力,使面板受到500、750、1250 Pa的压力,检测声屏障板最大弯曲挠度。

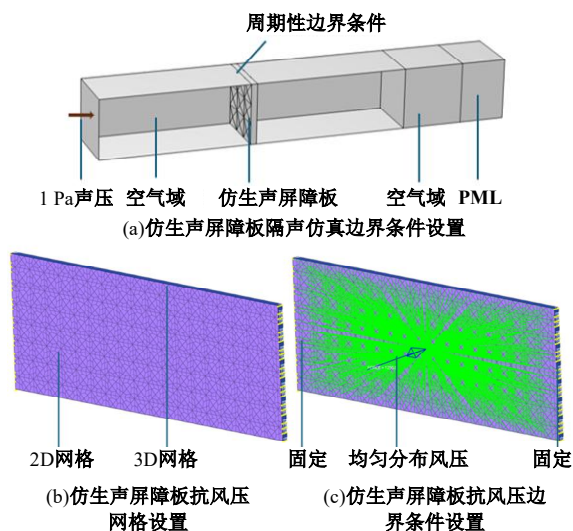


图3 仿生声屏障板仿真设计

Fig. 3 Simulation design of bionic sound barrier panels

1.4 声屏障板现场测试

参考《公路声屏障 第5部分:降噪效果检测方法》(JT/T 646.5—2017)^[28]第3.2条规定:参考点在尽量保持噪声源、地形、地貌、地面和气象条件不变情况下,不受声屏障安装影响的声音监测点。现场测试风速 <5 m/s,温度为27~37℃,测试位置车速为80~120 km/h。通过车辆类型中,七座以下客车约占全部车流量的78%,大型货车等车型约占全部车流量的22%。接收点为声屏障插入损失的测量位置。图4为参考点与接收点位置。参考点位为声屏障下方,接收点位为声屏障

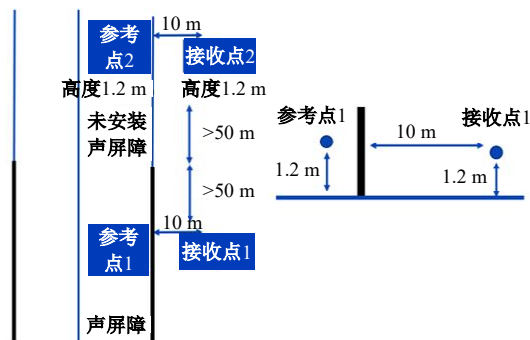


图4 高速公路声屏障板测试参考点与接收点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the positions of reference points and the receiving points for the sound barrier panels test on the expressway

后10 m,高度为1.2 m。由于声屏障已安装在现场无法移去,因此采用间接法测量插入损失。选择一个与测试路段等效的无声屏障场所作为参照,即选取距原声屏障位置一定距离的无声屏障区域模拟安装声屏障前的情况。

1.5 分析评价指标

为了评价仿生声屏障板的隔声性能与力学性能,本文采用两种分析指标对其进行分析,分别为隔声量与面法线挠度。

隔声量是1/3倍频程中心频率为125~4 000 Hz的传声损失按标准方法计算得出的单值评价量。分析频率为125、160、200、250、315、400、500、630、800、1 000、1 250、1 600、2 000、2 500、3 150、4 000 Hz,计算各频率下隔声量的平均值。

隔声量 R 为入射到受分析件上的声功率 W_1 与透过试件的透射声功率 W_2 比值的10倍对数,单位为dB,计算公式为:

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad (1)$$

本文中隔声量 R 可由下式求得:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (2)$$

式中: L_1 为声源室内平均声压级,dB; L_2 为接收室内平均声压级,dB; S 为试件面积, m^2 ,等于分析洞口的面积; A 为接收室内吸声量, m^2 。

变形检测中,受力构件的法线挠度计算的公式如下所示。

$$f_{\max} = (b - b_0) - \frac{(a + a_0) + (c - c_0)}{2} \quad (3)$$

式中: $f_{\max}$ 为面法线挠度值,mm; a_0 、 b_0 、 c_0 为各测点在预备加压后的稳定初始读数值,mm; a 、 b 、 c 为某级检测压力作用过程中各测点的面法线位移,mm。由于有限元仿真中已将两短边固定,因此 a_0 、 c_0 、 a 、 c 均为0 mm。

声屏障插入损失的检测结果按式(4)计算得出:

$$IL = (L_{\text{ref},a} - L_{\text{ref},b}) - (L_{r,a} - L_{r,b}) \quad (4)$$

式中:IL为声屏障的插入损失,dB; $L_{\text{ref},a}$ 为安装声屏障后参考点处的声压级,dB; $L_{\text{ref},b}$ 为安装声屏障前或等效参考点处的声压级,dB; $L_{r,a}$ 为安装声屏障后接收点处的声压级,dB; $L_{r,b}$ 为安装声屏障前或等效接收点处的声压级,dB。

2 仿生声屏障板性能分析

2.1 仿生声屏障板隔声性能分析

图5为现有SPT结构与仿生声屏障板的胞元及隔声性能对比,胞元对比如图5(a)所示,隔声量对比如图5(b)所示。其中,SPT结构的隔声量为27.303 dB,满足隔声量不小于26 dB的标准要求;当BAS结构的凸尖高度为5 mm时,其隔声量为37.711 dB,相比SPT结构隔声量提高了38.100%;BHS结构的隔声量为37.535 dB,相比SPT结构隔声量提高了37.5%。由隔声分析曲线图5(b)可见,两种仿生声屏障板的隔声量均优于SPT结构,并且相对于BHS结构,BAS结构具

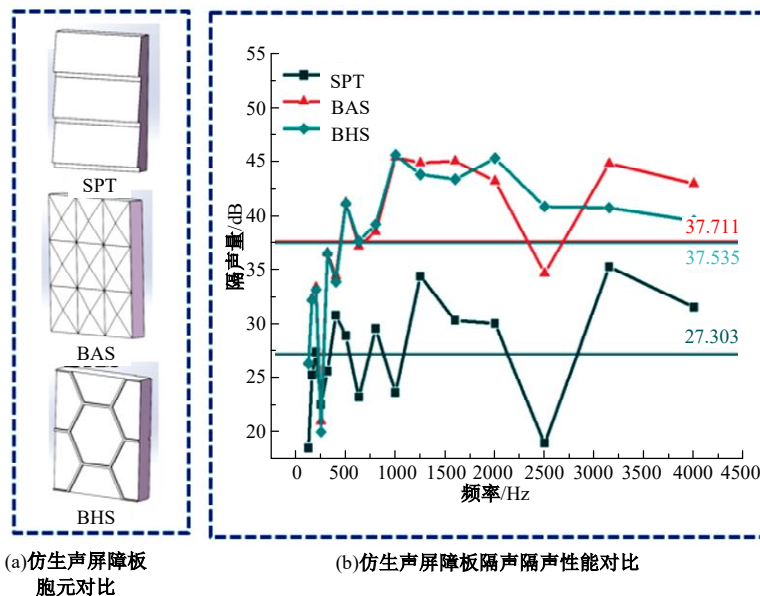


图5 仿生声屏障板胞元及隔声性能对比

Fig. 5 Comparison of cell and sound insulation performance of bionic sound barrier panels

有更好的隔声性能。

观察图 5(b) 可以发现, 在低频范围内, 相较于 SPT 结构, BAS 结构与 BHS 结构的隔声性能并无太大提高。由图 6(a) 仿生声屏障板在 250 Hz 下的声压级对比可以发现, 在低频时, 由于低频声波穿透能力强, BAS 结构的硬外层和 BHS 结构的蜂窝壁难以对其形成有效反射, 大部分低频声能会直接透射过结构外层。同时, 由于低频声波波长较长, BAS 结构表面的凸尖结构和 BHS 结构的蜂窝小室尺寸小于低频声波波长, 无法满足有效散射和共振吸收的条件, 因此低频隔声性能未得到明显改善。而在中高频时, BAS 结构与 BHS 结构的隔声性能相较于 SPT 结构提升明显。由图 6(b) 仿生声屏障板在 3 150 Hz 下的声压级对比可以发现, 在中高频时, BAS 结构与 BHS 结构的分层结构外层 (PET 树脂+连续玻纤预浸板) 凭借高声阻抗特性, 对入射声波形成高效初次反射, 可直接削减部分声能。而内层 PET 发泡板的多孔柔性结构则通过空气粘滞摩擦和材料骨架振动阻

尼作用, 对透射至内层的中高频声波进行二次吸收。这种“反射-吸收-散射”的多级降噪机制, 大幅提升了对中高频声波的阻隔效果, 使 BAS 结构与 BHS 结构的隔声性能优于传统 SPT 结构。

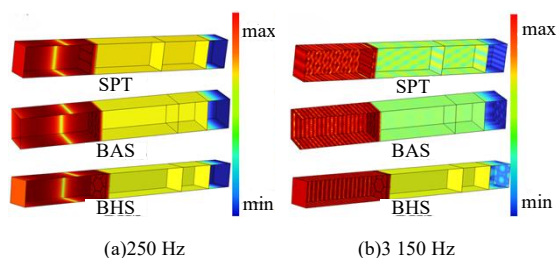
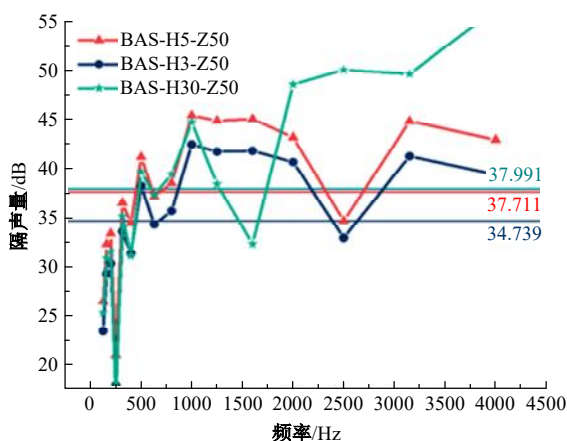


图 6 仿生声屏障板隔声声压级对比

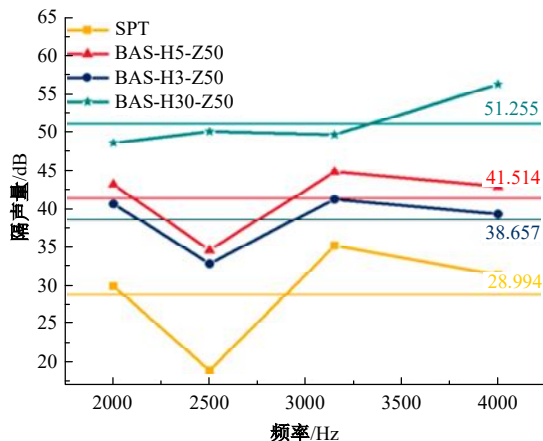
Fig. 6 Comparison of sound pressure levels of the bionic sound barrier panels

2.2 仿生声屏障板参数化分析

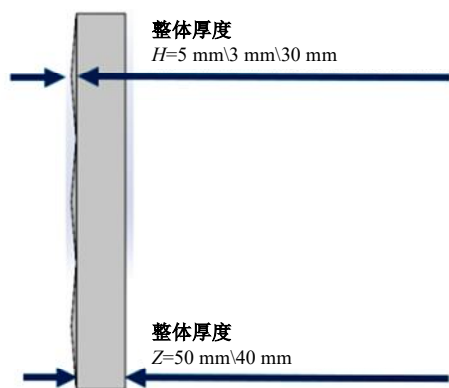
如图 7 所示, 通过改变 BAS 结构的凸尖高度 H (5、3、30 mm) 与厚度 Z (40、50 mm), 探究其对 BAS 结构隔声性能的影响。其中, 当凸尖高度 H 为 5 mm、厚度 Z 为 40 mm 时表示为 BAS-H5-



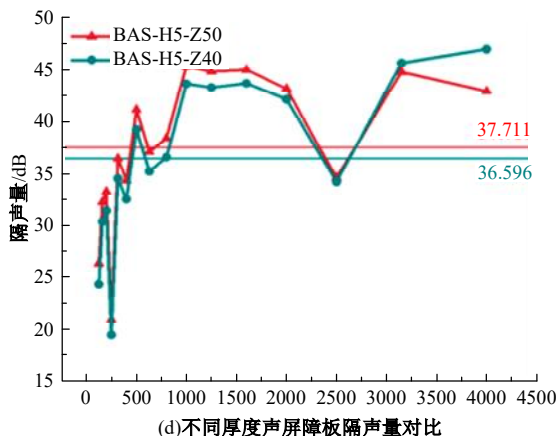
(a) 不同凸尖高度声屏障板隔声量对比



(b) 不同凸尖高度声屏障板中高频隔声量对比



(c) 声屏障板凸尖高度与整体厚度优化



(d) 不同厚度声屏障板隔声量对比

图 7 仿生声屏障板参数对比

Fig. 7 Comparison of parameters of bionic sound barrier panels

Z40。不同凸尖高度声屏障板隔声量对比如图7(a)所示。当BAS结构的凸尖高度为3 mm时,其隔声量为34.739 dB,较SPT结构提高了27.1%;当凸尖高度为30 mm时,其隔声量为37.991 dB,较SPT结构提高了39.1%。研究发现,凸尖高度越大隔声量越大,尤其是在2 000~4 000 Hz的中高频率内,隔声量的改善更为明显。不同凸尖高度声屏障板中高频隔声量对比如图7(b)所示。由于在125~2 000 Hz频率范围内声屏障板的隔声性能的改善并不明显,而本次分析是由1/3倍频程中心频率为125~4 000 Hz的传声损失按标准方法计算得出的隔声单值评价量,因此其隔声量总平均值提升并不明显。而在中高频范围内,SPT结构的隔声量为28.994 dB,当BAS结构的凸尖高度为3 mm时,其隔声量为38.657 dB,相对于SPT结构提升了33.3%;当凸尖高度为5 mm时,其隔声量为41.514 dB,相对于SPT结构提升了43.2%;当凸尖高度为30 mm时,其隔声量为51.255 dB,相对于SPT结构提升了76.8%。

不同厚度Z(40、50 mm)BAS结构的隔声量对比如图7(d)所示。分析结果表明,当整体厚度为40 mm时,仿生声屏障板的隔声量为36.596

dB,相比整体厚度为50 mm时的隔声量降低了3.0%,但此时声学性能依旧满足标准要求。

综合考虑声学性能与制造成本,可以采用凸尖高度为5 mm、厚度为40 mm的BAS结构。仿生声屏障板隔声量对比如表1所示。

表1 声屏障板隔声量

Table 1 Sound insulation values of sound barrier panels

声屏障板	SPT	BHS	BAS	BAS	BAS	BAS
			-H5-	-H3-	-H30-	-H5-
			Z50	Z50	Z50	Z40
隔声量/dB	27.303	37.535	37.711	34.739	37.991	36.596

2.3 仿生声屏障板结构强度分析

根据有限元模型仿真,当BAS结构的凸尖高度为5 mm、整体厚度为50 mm时,其在 P_1 、 P_2 、 P_3 压力下的位移云图及应力云图如图8(a)(b)所示。其面法线挠度分别为0.289、0.432、0.723 mm,满足国标规定 $L/300=8.330$ mm(L 为声学材料最大自由长度)。其最大应力分布在声屏障板边界固定处,分别为4.019、6.013、10.050 MPa,满足PET树脂+连续玻纤的最大应力限值1 279 MPa。

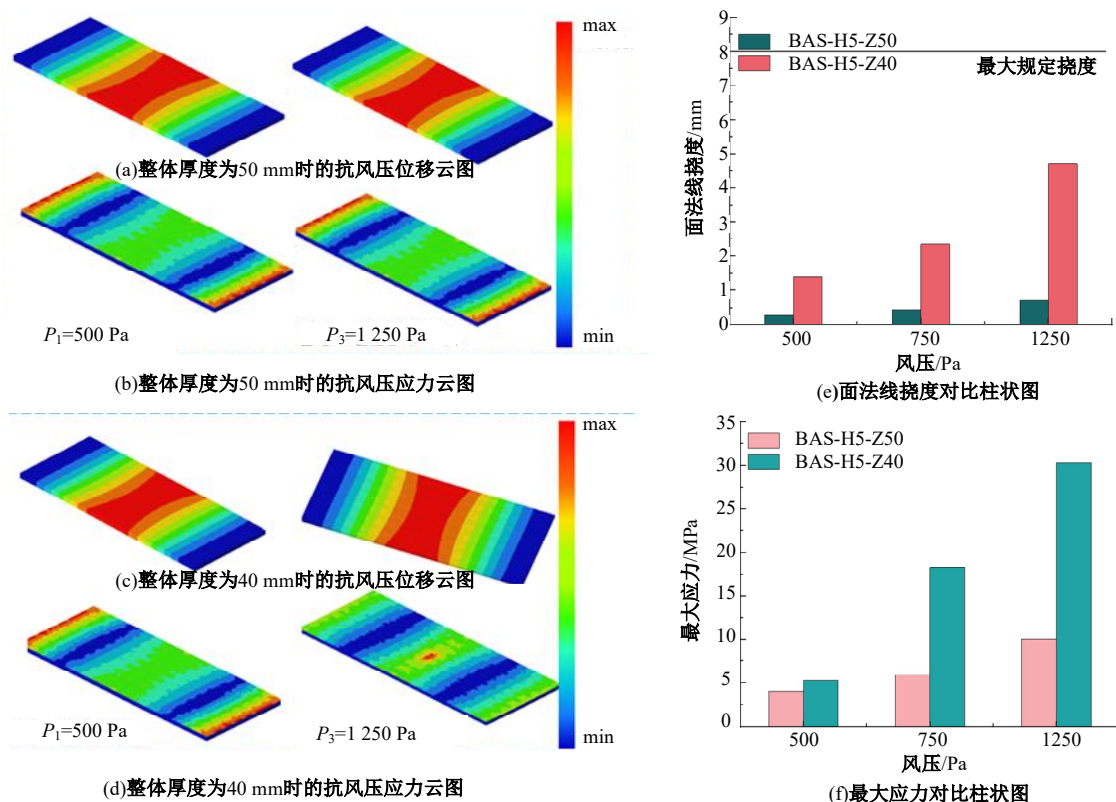


图8 仿生声屏障板结构强度参数对比

Fig. 8 Comparison of structural strength parameters of bionic sound barrier panels

当BAS结构的凸尖高度为5 mm、整体厚度为40 mm时,其在 P_1 、 P_2 、 P_3 压力下的位移云图及应力云图如图8(c)(d)所示。其面法线挠度分别为1.411、2.352、4.711 mm,比整体厚度为50 mm时的面法线挠度分别高出388%、444%、552%,满足国标规定 $L/300=8.33$ mm(L 为声学材料最大自由长度)。其最大应力在 $P_1=500$ Pa时分布在声屏障板两侧固定处,在 $P_2=750$ Pa和 $P_3=1\,250$ Pa时分布在声屏障板中间位置处,对应数值分别为5.357、18.210、30.350 MPa,比整体厚度为50 mm时的最大应力分别高出33%、203%、202%,满足PET树脂+连续玻纤的最大应力限值1 279 MPa,符合声屏障声学材料抗风压性能标准。40 mm与50 mm厚度BAS结构的面法线挠度对比柱状图与最大应力对比柱状图如图8(e)(f)所示,具体数值在表2中列出。

表2 不同厚度面法线挠度及最大应力

Table 2 Surfaces normal deflection and maximum stress of different thickness

风压/Pa	Z=50 mm	Z=40 mm	Z=50 mm	Z=40 mm
	面法线挠度/mm	面法线挠度/mm	最大应力/MPa	最大应力/MPa
$P_1=500$	0.289 1	1.411	4.019	5.357
$P_2=750$	0.432	2.352	6.013	18.210
$P_3=1\,250$	0.723	4.711	10.050	30.350

2.4 仿生声屏障板安装及检测

对仿生声屏障板进行现场安装及检测,根据JT/T 646.5—2017《公路声屏障 第5部分:降噪效果检测方法》^[28],降噪效果采用声屏障插入损失描述^[29]。通过对比仿生声屏障板插入损失与传统声屏障板插入损失,验证仿生声屏障板具备更好的降噪效果^[30]。

仿生声屏障板结构安装示意图与现场安装如图9和图10所示。仿生声屏障板整体尺寸为2.5 m×3.35 m。现场测量以道路上实际行驶车辆产生的声音作为测试的自然声源,声屏障内侧距声屏障1 m处等效连续声压级>85 dB,背景噪声值比声源测量值低10 dB。

为评价仿生声屏障板的降噪性能,与传统声屏障板进行对比测试。高速公路声屏障插入损失现场检测声压级如图11所示,具体插入损失数据如表3所示。其中,安装高速公路声屏障前的等效点位声源区噪声级为92.1 dB,外围区域自然衰减至75.6 dB,仅产生16.5 dB的声压级降低。

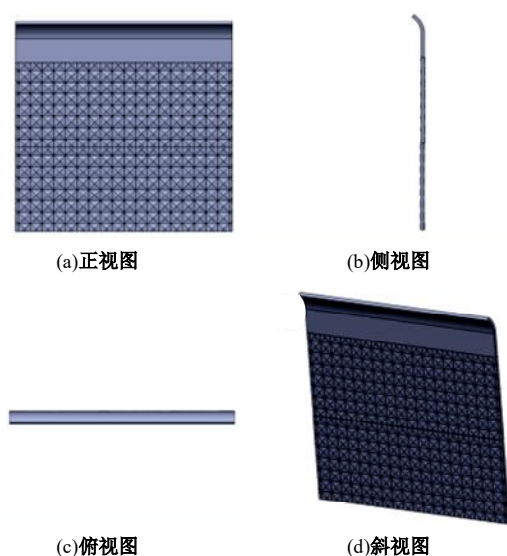


图9 仿生声屏障板结构安装示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the structure installation of the bionic sound barrier plate



图10 仿生声屏障板结构工人现场安装

Fig. 10 On-site installation of the bionic sound barrier panels structure by workers

传统高速公路声屏障内侧噪声级为96.5 dB,外侧为64.5 dB,降噪效果为32 dB。仿生声屏障板内侧噪声级为92.3 dB,经隔声处理后外侧降至52.5 dB,降噪效果为39.8 dB。其中,传统声屏障板插入损失为15.5 dB;仿生声屏障板插入损失为23.3 dB,优于传统声屏障板7.8 dB,相比传统声屏障板提高了50.3%。可见,仿生声屏障板在相同条件下的插入损失均大于传统声屏障板。

仿生声屏障板的设计不仅保证了仿生声屏障板的降噪效果及力学性能,并且PET树脂+连续玻纤预浸板与PET发泡板合成的三明治板具备更好的耐化学腐蚀性、抗老化性和可回收性。本文的研究成果为高速公路声屏障的设计与应用提供了新的理论与实践依据,降低了高速公路声屏障板的研发成本。



图 11 高速公路声屏障插入损失现场检测声压级

Fig. 11 On-site detection of sound pressure level of sound barrier insertion loss on expressways

表 3 高速公路声屏障插入损失检测

Table 3 Detection of insertion loss of expressway

类型	sound barriers				dB
	参考点 2	接收点 2	参考点 1	接收点 1	
新型高速公路声屏障	92.1	75.6	92.3	52.5	23.3
传统高速公路声屏障	92.1	75.6	96.5	64.5	15.5

3 结 论

(1)与SPT结构相比,BAS结构和BHS结构的隔声性能均大幅提高。其中,BAS结构的隔声量为37.711 dB,相比SPT结构提高了38.1%;BHS结构的隔声量为37.535 dB,相比SPT结构提高了37.5%。

(2)通过对BAS结构的凸尖高度与整体厚度进行参数化分析发现,当凸尖高度为5 mm、整体厚度为40 mm时,其隔声性能、力学性能与制造成本可实现较好平衡。此时,其隔声量为36.596 dB,最大面法线挠度为4.711 mm,最大应力为30.35 MPa。

(3)通过对仿生声屏障板进行制造与现场安装测试发现,其降噪性能可达23.3 dB,相比传统声屏障板提高了50.3%。

参考文献:

[1] 陈亮. 高速公路噪声污染法律责任研究[D]. 兰州: 兰州大学法学院, 2018.

Chen Liang. Research on legal responsibility of highway noise pollution[D]. Lanzhou: Law School, Lanzhou University, 2018.

[2] 路晓东. 城市规划层面的道路交通噪声控制研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2013.

Lu Xiao-dong. Study on road traffic noise control from the angle of urban planning[D]. Dalian: College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2013.

[3] 张子健. 高速公路声屏障顶端加强降噪结构设计及降噪性能分析[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2024.

Zhang Zi-jian. Design and performance analysis of noise reduction structures at the top of highway noise barriers[D]. Beijing: College of Transportation, Beijing Jiaotong University, 2024.

[4] 熊积斌. 浅谈噪声污染的现状、危害及其治理[J]. 资源节约与环保, 2018(6): 139.

Xiong Ji-bin. A brief discussion on the current situation, hazards and control of noise pollution[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2018(6): 139.

[5] 党广彬. 山东省高速公路现状交通噪声特性分析[J]. 山东交通科技, 2019(1): 86-89, 94.

Dang Guang-bin. Analysis of the current highway traffic noise characteristics in Shandong province[J]. Shandong Transportation Science and Technology, 2019(1): 86-89, 94.

[6] 王立璇. 高速公路噪声污染及治理对策[J]. 生物化工, 2022, 8(2): 105-109.

Wang Li-xuan. Analysis of highway noise pollution and treatment countermeasures[J]. Biological Chemical Engineering, 2022, 8(2): 105-109.

[7] 林向楠, 乔小龙, 王琳. 京津冀地区高速公路车辆噪声分析与声屏障设计研究[J]. 交通世界, 2024, (7): 7-9.

Lin Xiang-nan, Qiao Xiao-long, Wang Ling. Research on vehicle noise analysis and sound barrier design of expressways in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Transpo World, 2024(7): 7-9.

[8] Qian D W, Yang X W, Zhang Z, et al. Analysis of the noise reduction of low-height porous absorptive barrier in urban rail transit[C]//Second International Conference on Rail Transportation. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 495-502.

[9] Astrauskas T, Baltrėnas P, Januševičius T, et al. Louvred noise barrier for traffic noise reduction[J]. 2021, 16(1): No. 18641.

- [10] 陈立庚. 废旧轮胎橡胶颗粒/水泥复合声屏障研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 2019.
- Chen Li-geng. Study on the noise barrier manufactured by the waste-tyre crumb rubber and cement composites[D]. Harbin: School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, 2019.
- [11] 廖陈畅. 发泡混凝土声屏障声学与力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2022.
- Liao Chen-chang. Study on acoustic and mechanical properties of foamed concrete sound barrier[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2022.
- [12] Thakre C, Bisarya A, Laxmi V, et al. An innovative design and development of noise barrier with newly composite mix of acoustic panel[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 361: No. 121276.
- [13] Yang C C, Lin D K, Xiao X W, et al. A compact honeycomb-based ventilated sound barrier with broad bandwidth and a subwavelength thickness[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 226: No. 110182.
- [14] 张志成. PET发泡材料结构性能关系模型及其夹芯结构的优化设计方法研究[D]. 北京: 北京化工大学机电工程学院, 2024.
- Zhang Zhi-cheng. Study on the structure and properties of PET foam and its sandwich[D]. Beijing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [15] 张磊, 刘哲, 谭宗尚, 等. 不同高性能工程树脂在玻璃纤维增强热塑性复合材料中的应用研究[J]. *纤维复合材料*, 2025, 42(3): 40-45.
- Zhang Lei, Liu Zhe, Tan Zong-shang, et al. Application of different high-performance engineering resins in GFRTTP[J]. *Fiber Composites*, 2025, 42(3): 40-45.
- [16] 张立华, 韩忠铎, 毕超, 等. 碳纤维高速公路仿生声屏障降噪性能分析[J]. *时代汽车*, 2025(9): 181-183.
- Zhang Li-hua, Han Zhong-duo, Bi Chao, et al. Analysis of noise reduction performance of carbon fiber highway bionic sound barrier board[J]. *Auto Time*, 2025(9): 181-183.
- [17] Wang Y H, Xu C Y, Wan Y L, et al. A modal approach for the efficient analysis of a bionic multi-layer sound absorption structure[J]. *Steel and Composite Structures*, 2016, 21(2): 249-266.
- [18] Wang Y H, Zhang C C, Ren L Q, et al. Acoustic performance analysis of bionic coupling multi-layer structure[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 461: 22-30.
- [19] Ji G S, Cui J, Fang Y, et al. Nano-fibrous composite sound absorbers inspired by owl feather surfaces[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 156: 151-157.
- [20] Wang X X, Fu T. Improvement of broadband low-frequency sound insulation of sandwich plates with negative Poisson's ratio butterfly-shaped auxetic cellular[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2024, 166: No. 105852.
- [21] Li X Y, Wang X Y H, Wu Q Q, et al. Design of lightweight multifunctional honeycomb membrane-type acoustic metastructures for sound insulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 227: No. 112364.
- [22] Zhang X, Wu J W, Mao Q B, et al. Design of a honeycomb-microperforated panel with an adjustable sound absorption frequency[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 164: No. 107246.
- [23] Xie S C, Yang S C, Yan H Y, et al. Sound absorption performance of a conch-imitating cavity structure[J]. *Science Progress*, 2022, 105(1): No. 35102795.
- [24] 周信. 高速铁路声屏障降噪效果预测及新型声屏障设计[D]. 重庆: 西南交通大学机械工程学院, 2013.
- Zhou Xin. Noise reduction prediction and design of new type of noise barrier for high-speed train[D]. Chongqing: School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2013.
- [25] Rhee H, Horstemeyer M F, Ramsay A. A study on the structure and mechanical behavior of the *Dasyus novemcinctus* shell[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2011, 31(2): 363-369.
- [26] JT/T 646.2—2016. 公路声屏障 第2部分: 总体技术要求[S].
- [27] JT/T 646.4—2016. 公路声屏障 第4部分: 声学材料技术要求及检测方法[S].
- [28] JT/T 646.5—2017. 公路声屏障 第5部分: 降噪效果检测方法[S].
- [29] 李杰, 李佳莉, 周兴宇, 等. 拓宽桥梁大跨全封闭声屏障车道噪声仿真分析[J/OL]. [2025-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1824.u.20250320.1657.065>
- [30] 杨帆. 新型嵌板型声屏障在福建省高速公路中的应用与效果评估[J]. *福建交通科技*, 2024, 12: 175-179.
- Yang Fan. Application and effect evaluation of the new panel-type sound barrier in expressways of Fujian province[J]. *Fujian Traffic Science and Technology*, 2024, 12: 175-179.