

# 机场附近隔音玻璃隔声性能对比测试研究

刘亚楠<sup>1,2</sup>, 胡东方<sup>1,2</sup>, 袁朝阳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

<sup>2</sup>河南省机械装备先进制造协同创新中心, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年9月25日; 录用日期: 2023年11月6日; 发布日期: 2023年11月14日

## 摘要

作为外立面建筑围护结构, 玻璃外窗在建筑的隔声体系中起到了关键的作用。对于机场附近的建筑而言, 普通玻璃通常难以抵挡飞机起降时所带来的噪音影响。本试验针对机场噪声特点, 通过在超静音隔音试验箱中搭配不同的隔音玻璃在机场附近进行了隔声量测试研究。机场噪音监测结果表明, 机场周围不同机型所造成的噪音变化量基本一致, 且最大噪音量均在85~90 dB之间; 通过对不同类型的隔声玻璃进行测试分析, 得出相同质量下全钢化真空玻璃的隔声性能大于夹胶玻璃大于中空玻璃, 是机场附近建筑玻璃的最优选择; 对真空玻璃进行配置优化, 通过对其复合阻尼层、中空层并优化玻璃板厚度排布方式, 优选出钢化真空复合玻璃A-Mute1, 且实测其平均隔声量可达50 dB以上, 符合建筑标准的要求。

## 关键词

机场噪声, 超静音隔音试验箱, 隔声性能, 全钢化真空玻璃

# Comparative Test of Sound Insulation Performance of Soundproof Glass near an Airport

Yanan Liu<sup>1,2</sup>, Dongfang Hu<sup>1,2</sup>, Zhaoyang Yuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Hennan Province, Luoyang Henan

Received: Sep. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 6<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 14<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As the exterior facade building envelope, the glass exterior window plays a key role in the sound

insulation system of the building. For buildings near the airport, ordinary glass is usually difficult to resist the noise impact caused by aircraft takeoff and landing. According to the characteristics of airport noise, the sound insulation capacity was tested and studied near the airport by matching different sound insulation glasses in the ultra quiet sound insulation test box. The airport noise monitoring results show that the noise changes caused by different aircraft types around the airport are basically the same, and the maximum noise levels are between 85 and 90 dB; Through testing and analyzing different types of sound insulation glass, it is concluded that under the same quality, the sound insulation performance of fully tempered vacuum glass is greater than that of laminated glass and greater than that of insulating glass, which is the best choice for building glass near the airport; The configuration of vacuum glass is optimized. By optimizing the composite damping layer, hollow layer and glass plate thickness layout, the tempered vacuum composite glass A-Mute1 is optimized. The measured average sound insulation is more than 50 dB, which meets the requirements of building standards.

## Keywords

Airport Noise, Ultra Quiet Sound Insulation Test Box, Sound Insulation Performance, Fully Tempered Vacuum Glass

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

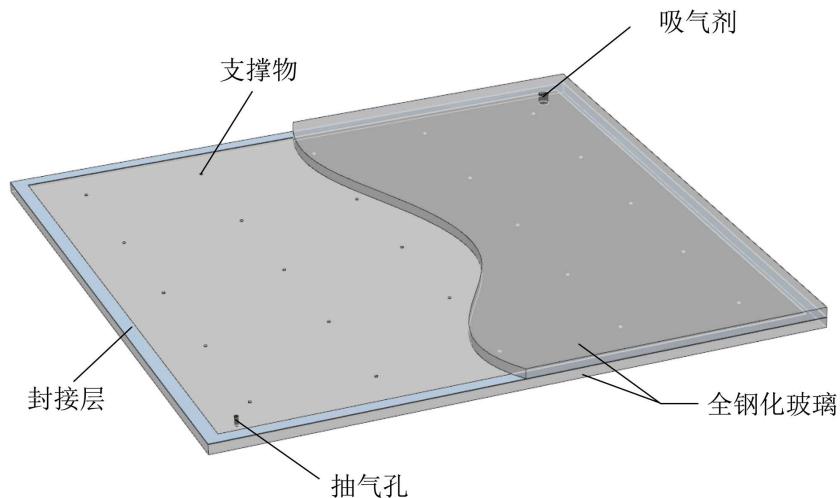
## 1. 引言

随着国家的现代化发展，各类建筑的发展也呈现出了上升趋势，其涉及到的噪音问题也随之增多[1]。越来越多的建筑临近高速公路、轨道交通和机场等高噪音区域，与此同时，人们就尽量减少居住环境周边的噪声提出要求的同时，还对居住建筑的隔声性能提出了更高的要求，安静舒适的工作、生活和睡眠环境越来越受到人们的重视，对环境的隔声需求也变得日益突出[2]。作为外立面建筑围护结构，建筑外窗在整个隔声体系中起到了举足轻重的作用[3]。现代建筑大多趋向于大面积采光式设计，若使用普通玻璃，其隔音效果较差，对噪音无法形成有效阻隔[4]。在外立面建筑围护结构中，玻璃窗是室内外进行能量交换的主要桥梁。按照声音传播途径，声音在建筑物中的传播分为固体传播和空气传播[5]。如图1所示，全钢化真空玻璃的真空层中几乎没有空气，能够用来传声的介质只有封接层与内部微小的支撑物，而封接层和支撑物与钢化玻璃基板的接触面积较小，传声量极为有限，因此与其他玻璃相比具备较好的隔声效果[6]。本试验通过在河南某机场附近的噪声测试，研究了在正常使用状态下夹胶玻璃、中空玻璃与全钢化真空玻璃产品的隔音性能。

## 2. 机场周围噪音控制标准

近年来，随着政府对环保工作的重视，与噪音控制工作相关的专业技术标准也相继颁布执行。目前，在噪声控制评估标准方面，国内环境保护部门制定的《声环境质量标准》(GB 3096-2008) [7]和《机场周围飞机噪声环境标准》(GB 9660-88) [8]分别适用于一般声环境和机场周围区域的声环境质量评价与管理；在既有住宅隔声降噪改造方面，我国也有多部标准，如《民用建筑隔声设计规范》(GB 50118-2010) [9]、《住宅设计规范》(GB 50096-2011) [10]等，适用于全国城镇新建、改建和扩建的住宅等六类建筑中主要用房的隔声、吸声、减噪设计。基于《声环境质量标准》(GB 3096-2008)中对民

用建筑选址做出的规定，对住宅室内允许噪声级提出的要求，规范中的室内允许噪声级采用 A 声级作为隔声量单值评价标准。《民用建筑隔声设计规范》(GB 50118-2010)中室内允许噪声级为关窗状态下昼间和夜间时段的标准值，昼间对应的时间为 6:00~22:00，夜间对应的时间为 22:00~6:00，或者按照当地人民政府的规定。规范中要求卧室昼间噪声级不大于 45 dB，夜间不大于 37 dB；起居室(厅)不论昼夜均不大于 45 dB。



**Figure 1.** Structure diagram of all tempered vacuum glass  
**图 1.** 全钢化真空玻璃结构示意图

### 3. 机场飞机噪声特性

飞机噪音与飞机机型、重量、引擎类型、起降方式紧密相关，并且具备较强的指向性。其最典型的特性就是具有瞬时性和间歇性[11]。

飞机噪音具有瞬时性，这主要是由于飞机在起飞或降落时距离测试点的距离是不断变化的。选择河南某机场距离跑道中心线 400 m，距离起飞端 3 km 设置测量点，可以知道飞机从远处飞近测量点时，先听到轰隆的低频声，随着飞机的接近，声音不断增大，中高频声音所占比例也逐渐增多。当飞机飞到测量点距离最近处，噪音达到最大值，飞机远去时，中高频噪音先降低，低频噪音再逐渐降低至正常水平。由于机场内多架飞机是间断飞行，所以飞机噪音具有间歇性。飞机在起降时噪音一般持续 20~50 s，对于繁忙的机场而言，其飞机起降频次约 3~5 分钟一次，这也就是说，机场周边地区每隔 3~5 分钟的安静时间就会出现一次 20~50 s 的飞机噪音[12]。

由图 2 所示，飞机启动后噪音出现，持续时间约为 25 s 左右，声压级先上升后下降，最高可达到 90 dB 左右。在安静环境中出现的短时间持续噪音非常容易使人们感到不适，也比持续的交通噪音更加令人难以忍受。

从图 2 中也可以看出，不同机型所造成的噪音量变化趋势基本一致，测试点所监测到的最大噪音量均在 85~90 dB 之间。根据《机场周围飞机噪声环境标准》(GB 9660-88)中一类区域(特殊住宅区；居民、文教区)噪音量不大于 70 dB，二类区域(除一类区域以外的生活区)噪音量不大于 75 dB 的要求，该机场普遍存在噪音超标现象，超标量高达 10 dB 以上。

为了使室内达到《民用建筑隔声设计规范》(GB 50118-2010)中室内噪声最低要求 45 dB，必须要求机场噪音影响区域使用隔声量至少 40~45 dB 的门窗才能满足建筑隔声标准要求。

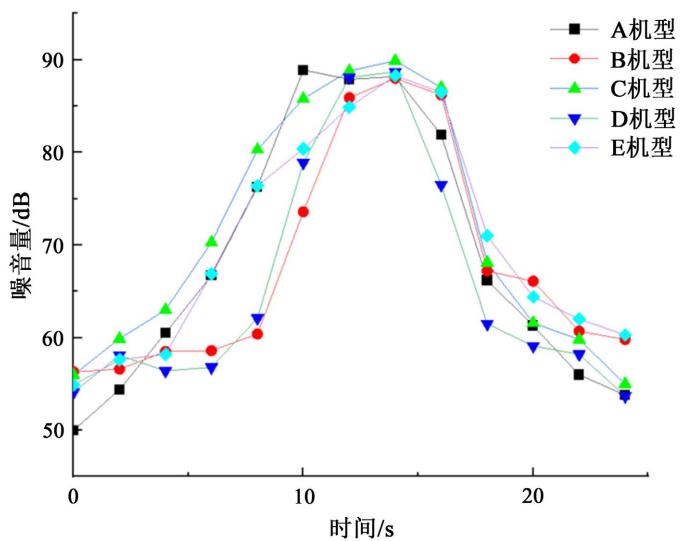


Figure 2. Variation of noise amount of different models over time  
图 2. 不同机型噪音量随时间变化图

## 4. 全钢化真空玻璃机场降噪测试研究

### 4.1. 机场测试原理

本研究主要目的是通过将全钢化真空玻璃、中空玻璃、夹层玻璃、全钢化真空复合玻璃安装于静音试验箱洞口，对比分析其机场降噪能力。静音试验箱测量参考隔声间、隔声罩等标准测量方法，即假定飞机产生的外部声场为扩散声场。建筑隔声是描述一个封闭结构(如隔声间、隔声罩等)降低噪声效果的一个常用评价量，即在一个固定接收点测量采用该结构前后的声压级差或在一个等效参考点和结构内测点同时测量的声压级差。《机场周围飞机噪声环境标准》(GB 9660-88)中对机场周边区域的室外环境噪声采用 LWECPN 作为评价量并作出了限值规定，但未对室内的计权等效连续感觉噪声级作出标准限值。另一方面，其他相关标准均采用 A 计权等效声级作为隔声量单值评价量，而 LWECPN 和等效声级间没有简单的可换算对应关系。因此，为和其他标准协调并有效地提出降噪效果，采用 A 计权等效声级作为飞机噪声对室内噪声影响的评价量。

基于以上标准要求及测量方法，本研究选取距离起飞点 3 km，距离跑道中心线 400 m 的居民区，利用本体隔音量为 60 dB 的静音试验箱，如图 3 所示，箱体内部及外部均放置噪音测量声级计，对试验箱洞口安装不同的玻璃进行隔声性能测试分析。本试验所使用的全钢化真空玻璃、中空玻璃、夹层玻璃、全钢化真空复合玻璃及静音试验箱全部由兰迪玻璃机械股份有限公司生产提供。

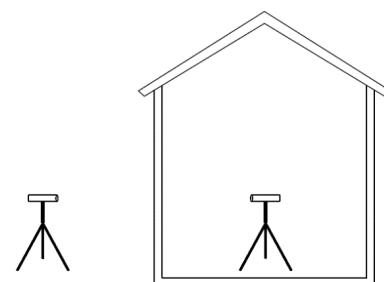


Figure 3. Silent test chamber test schematic  
图 3. 静音试验箱测试原理图

## 4.2. 测试过程

- (1) 选择河南某机场距离跑道中心线 400 m 处布置静音测试箱，箱体门洞朝向航线。
- (2) 将待测试的几种玻璃试样安装在隔音量为 60 dB、本体噪音为 20 dB 的超静音隔音测试箱洞口内，四周压紧并密封。
- (3) 使用 2 台 AWA6228+型多功能声级计同步监测试验箱内外测点飞机飞过时的 A 计权噪声量及噪声频谱。《机场周围飞机噪声测量方法》(GB 9661-88) [13] 中要求监测仪器精度不得低于 2 型声级计，而 AWA6228 型多功能声级计精度达到了 1 型精度，可见该声级计满足标准要求。
- (4) 根据不同类型玻璃安装时试验箱内外噪声量及噪声频谱，分析测试玻璃的隔音特性。

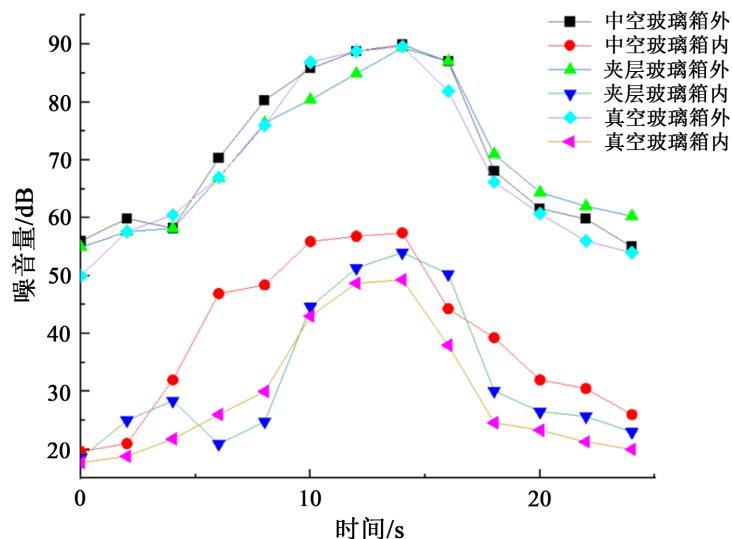
## 4.3. 结果

对试验箱安装真空玻璃、中空玻璃、夹层玻璃时试验箱内外噪音各进行 3 次测量，并对测量结果求取平均值，不同结构的玻璃在箱体外噪音最大时的隔声量如表 1 所示。飞机飞过时安装不同玻璃静音试验箱内外噪声量变化如图 4 所示。

**Table 1.** Sound insulation test results of glass airfields with different structures

**表 1.** 不同结构玻璃机场隔音测试结果

玻璃类型	玻璃结构	试验箱外飞机最大噪声量/dB	试验箱内噪声量/dB	隔声量/dB
真空玻璃	5T-0.3V-5T	89.6	49.3	40.3
夹层玻璃	5T-0.76P-5T	89.4	54	35.4
中空玻璃	5T-12A-5T	89.9	57.4	31.5

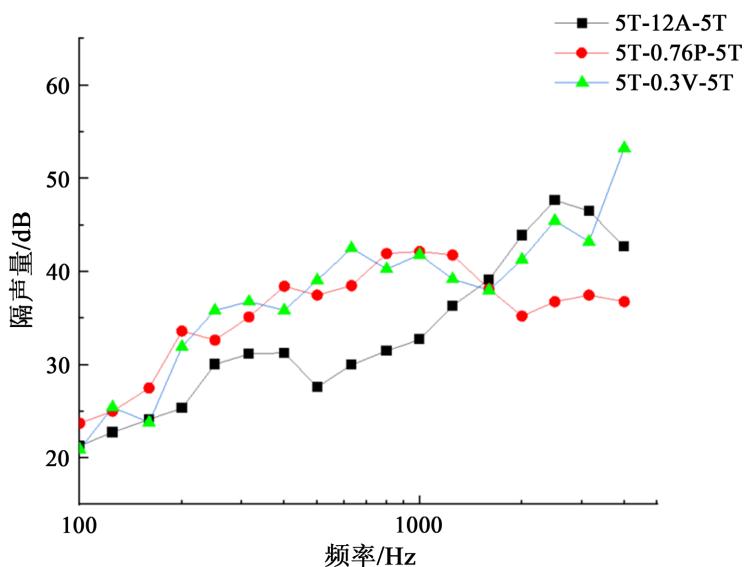


**Figure 4.** The amount of noise inside and outside the chamber when the aircraft is silenced

**图 4.** 飞机飞过时静音试验箱内外噪音量

从表 1 及图 4 可以看出，对于相同质量的玻璃，真空玻璃隔声性能大于夹层玻璃大于中空玻璃。由声学基本定律“质量定律”可知，相同质量的相同材料隔音量相同。5T-0.3V-5T、5T-12A-5T 及 5T-0.76P-5T 三者的质量密度基本相同，隔声量的差异主要取决于中间层结构差异造成声音传播过程中的衰减量差异。

真空玻璃中间层为真空层，夹胶玻璃中间层为阻尼胶片，中空玻璃中间层为空气或稀有气体层。如图 5 所示，真空玻璃 5T-0.3V-5T 及夹胶玻璃箱内噪声曲线接近，隔声性能优于中空玻璃。对于真空玻璃，声波在透过第一层玻璃后，由于中间真空层的存在减弱了声波的透射，透射声波在传到第二层玻璃时再次发生反射，声能量多次衰减，造成了声波损失。夹胶玻璃 5T-0.76P-5T 由于中间层的存在，使得声波在透过第一层玻璃时，由于玻璃外侧及两层玻璃中间材料的特性阻抗不同，使声波发生两次反射，再加上中间阻尼材料附加吸收作用，使得声波振动能量衰减，声波再传到第二层玻璃时，又发生两次反射，声能量再次减少，造成了更多的传播损失。中空玻璃 5T-12A-5T 结构虽然与真空玻璃 5T-0.3V-5T 类似，但中间层气体层对声波吸收作用均不明显，因此隔声性能低于相同质量密度的真空玻璃及夹胶玻璃。

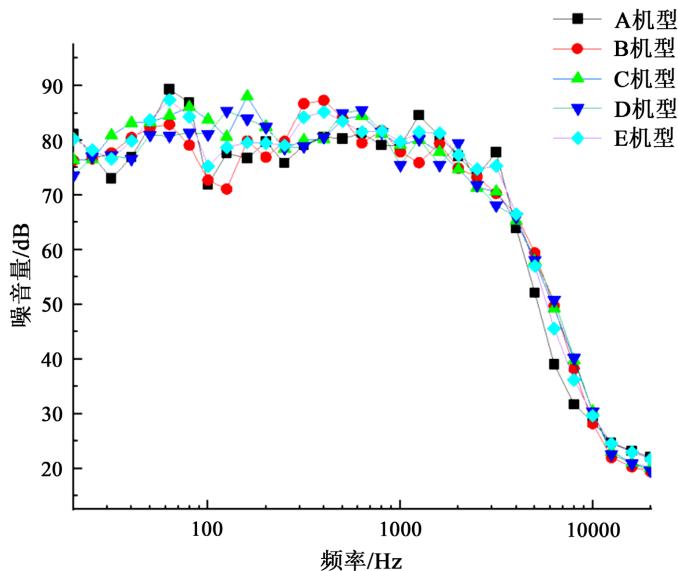


**Figure 5.** Three kinds of glass sound insulation spectrograms were tested in the laboratory  
**图 5.** 实验室测试三种玻璃隔音频谱图

对于固态材料来说，隔声量与声波的频率密切相关，低频时的隔声量较低，高频时的隔声量较高。声波在板状构件中容易产生弯曲波，在一定频率下会产生类似共振现象的吻合效应，使构件隔声量大幅度下降。图 5 是按照标准《声学建筑和建筑构件隔声测量第 3 部分：建筑构件空气声隔声的实验室测量》(GBT 19889.3-2005) [14]、《建筑隔声评价标准》(GBT 50121-2005) [15] 下测得的不同结构玻璃隔声频谱图，由图可以看出，结构为 5T-0.3V-5T 真空玻璃在 100~1000 Hz 具有良好的隔声性能，在 1000~2000 Hz 内隔声量出现吻合谷，但在中高频段仍具备良好的隔音性能。结构为 5T-0.76P-5T 夹层玻璃在 160~1600 Hz 具有良好的隔声性能，自 1600 Hz 以后隔声量出现快速下降趋势，中高频隔声性能较差，在 1250 Hz 及 4000 Hz 出现吻合谷。结构为 5T-12A-5T 中空玻璃在 1600 Hz 以内隔声性能远低于真空玻璃和夹层玻璃，且在 500 Hz 出现吻合效应，但其在中高频隔声量较高。

从图 5 三种不同结构的玻璃隔声性能分析可知，真空玻璃 5T-0.3V-5T 与 5T-0.76P-5T 低频隔音效果较好，这是因为低频声波主要以玻璃振动方式传递，由于夹胶层和真空层作为有效的减震层提高了玻璃低频隔声性能。中空玻璃 5T-12A-5T 隔声性能取决于两板的质量、两板之间空气层的厚度，隔声原理为“质量 - 弹簧 - 质量”，在低频段形成了更多振动传播，因此其低频隔声效果较差，而中间空气层对中高频噪音衰减作用明显，在中高频有较好的隔声效果。

根据对该机场 5 种主要机型峰值噪声频谱测试, 频谱图如图 6 所示, 可以看出机场中不同机型整体噪声特性曲线及噪声量非常接近, 声源噪音高噪音量频谱分布在 3150 Hz 以内。通过对真空玻璃、夹层玻璃、中空玻璃频谱测试分析及机场实测分析可知, 真空玻璃隔声性能与机场降噪需求匹配度最好。



**Figure 6.** Noise spectrum distribution of 5 main aircraft types at an airport in Henan Province  
**图 6.** 河南某机场 5 种主要机型噪音量频谱分布图

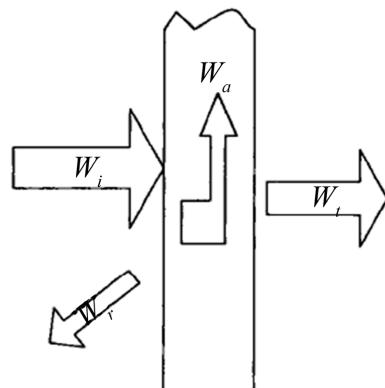
#### 4.4. 全钢化真空复合玻璃 A-Mute1 性能测试

通过对真空玻璃的隔声性能分析, 结合机场噪声特点, 为了提高真空玻璃机场降噪效果, 需要从以下两个方面进行优化: 1) 提高全频段隔声性能同时着重提高中高频隔声性能; 2) 弱化吻合谷效应或将吻合谷推后到人耳不敏感频段即 3150 Hz 以上。

对于给定的固体构件, 声源的声波入射到玻璃上, 其中一部分被反射, 一部分被吸收, 只有一小部分声能透过结构辐射出去, 如图 7 所示。根据能量守恒定律, 则有:

$$W_i = W_t + W_r + W_a \quad (1)$$

式中:  $W_i$  为入射声波的声强;  $W$  为透射声强;  $W_r$  为反射声强;  $W_a$  为吸收声强。



**Figure 7.** Acoustic wave transmission diagram  
**图 7.** 声波传递示意图

因隔声量

$$TL = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

其中透射系数

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (3)$$

由上式可知，通过对真空玻璃进行复合阻尼层提高声波传递过程中的吸收声强  $W_a$ ，同时减少玻璃低频振动传递能量，最终达到降低透射系数  $\tau$ ，提高玻璃隔声量。

从真空玻璃隔声频谱分析可知在 2000~5000 Hz 范围内出现的吻合谷，而机场声源噪音高噪音量频谱分布在 3150 Hz 以内，需要将真空玻璃吻合频率后移至 3150 Hz 以上，尽量减少吻合效应的影响，进而提高真空玻璃对机场的整体隔声降噪性能。

由吻合效应公式可知影响吻合效应临界频率为

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho H}{B}} \quad (4)$$

式中： $c_0$  为空气中声速； $\rho$  为构件密度； $H$  为构件厚度； $B$  为弯曲劲度。

由式(4)可知，可通过对真空玻璃复合中空层及调整玻璃厚度来调整玻璃吻合频率及提高中高频隔声量。

综上诉述，通过对真空玻璃复合阻尼材料、复合中空层、调整玻璃总厚度及优化多层玻璃板厚度分布方式，优选出了适用于机场降噪的最佳配置全钢化真空复合玻璃 A-Mute1。如图 8 所示，该配置实测平均隔声量可达 51 dB，能够保证试验箱内最大噪声量不超过 40 dB，满足了标准要求的白天室内不大于 45 dB 的要求。

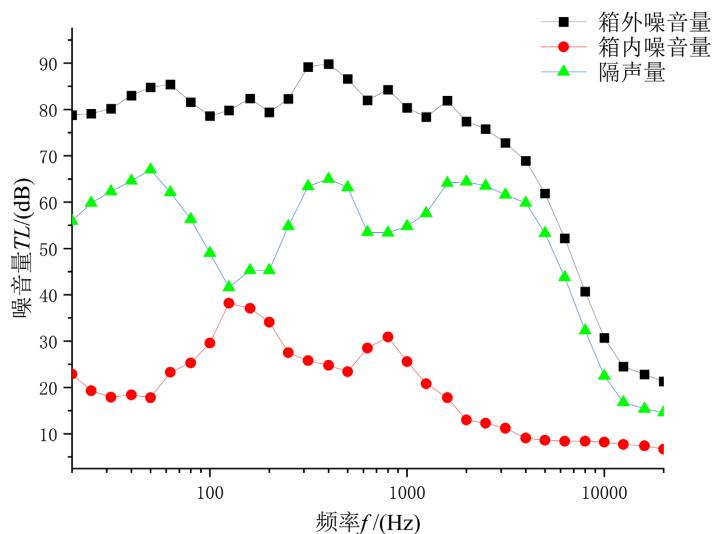


Figure 8. Acoustic insulation spectrogram of composite all-tempered vacuum glass airfield  
图 8. 复合全钢化真空玻璃机场实测隔声频谱图

## 5. 结论

本研究针对机场噪声特点，对隔音量为 60 dB、本体噪音为 20 dB 的超静音隔音测试箱，在其洞口搭

配不同配置的隔音玻璃作为观察窗，对隔音箱内外的噪声进行隔声性能测试分析。研究结果表明：

(1) 对于机场周围不同机型所造成的噪音量变化趋势基本一致，最大噪音量均在 85~90 dB 之间，声源噪音高噪音量频谱分布在 3150 Hz 以内。

(2) 经过对不同玻璃隔声频谱测试分析，全钢化真空玻璃隔声性能与机场降噪需求匹配度最高。相同质量玻璃结构隔声性能全钢化真空玻璃(5T-0.3V-5T)大于夹胶玻璃(5T-0.76P-5T)大于中空玻璃(5T-12A-5T)，实测最大隔声量分别为 40.3 dB、35.4 dB、31.5 dB。

(3) 为提高真空玻璃机场降噪能力，可以从以下两个方面进行优化：a) 提高全频段隔声性能同时着重提高中高频隔声性能；b) 弱化吻合谷效应或将吻合谷推后到人耳不敏感频段即 3150 Hz 以上。故优选出了适用于机场降噪的最佳配置全钢化真空复合玻璃 A-Mute1。

## 基金项目

河南省创新示范专项资助项目(191110211600)；河南省高等学校重点科研项目计划(19A460020)。

## 参考文献

- [1] 杨道训. 玻璃幕墙隔声防噪设计分析[J]. 城市建筑, 2015(17): 12.
- [2] 郑宇, 张彩艳. 浅析影响建筑外窗隔声性能的因素[J]. 门窗, 2009(10): 47-49.
- [3] Miskinis, K., Dikavicius, V., Bliaudzius, R., et al. (2015) Comparison of Sound Insulation of Windows with Double Glass Units. *Applied Acoustics*, **92**, 42-46. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.007>
- [4] 周雯静. 外窗和玻璃幕墙空气声隔声性能分析[J]. 上海建设科技, 2019(3): 80-83.
- [5] Asakura, T. and Sakamoto, S. (2009) Finite-Difference Time-Domain Analysis of Sound Insulation Performance of Wall Systems. *Building Acoustics*, **16**, 267-281. <https://doi.org/10.1260/135101009789877004>
- [6] 张佰恒, 赵占庶. 真空玻璃的发展与应用[J]. 绿色建筑, 2016(2): 31-33.
- [7] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3096-2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [8] 国家环境保护局大气处. GB 9660-1988 机场周围飞机噪声环境标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建筑部. GB 50118-2010 民用建筑隔声设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 中国建筑设计研究所. GB 50096-2011 住宅设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [11] 王英, 陈洋, 蔡乐刚. 机场附近既有住宅室内噪声控制技术及应用[J]. 建筑结构, 2017, 47(S2): 528-532.
- [12] 陆芝伟, 柏松. 机场周围飞机噪声测试研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(10): 164-165.
- [13] 国家环境保护局大气处. GB/T 9661-1988 机场周围飞机噪声测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19889.3-2005 声学建筑和建筑构件隔声测量第 3 部分: 建筑构件空气声隔声的实验室测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [15] 北京市建筑设计研究院. GB/T 50121-2005 建筑隔声评价标准[S]. 北京: 北京市兴顺印刷厂, 2005.