

全钢化真空玻璃隔声性能仿真分析

袁朝阳¹, 胡东方¹, 李彦兵²

¹河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

²洛阳兰迪玻璃机械股份有限公司, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年9月2日; 录用日期: 2023年10月26日; 发布日期: 2023年11月1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作用。本文利用LMS Virtual.Lab对全钢化真空玻璃的隔声性能进行仿真分析, 并通过测试验证了仿真的合理性。通过对影响全钢化真空玻璃隔声性能的不同因素进行研究, 结果表明, 当玻璃厚度增加时其隔声量与吻合频率均会提高, 但隔声量增加量在逐渐降低, 当其两侧玻璃厚度有差异时其吻合频率亦会提高; 支撑物间距增加时其中低频段隔声量虽有所提升, 但高频段的吻合频率却随之降低。基于仿真结果制备不同规格的全钢化真空玻璃并进行隔声量测试, 测试结果表明6T-0.3V-4T (70)规格的真空玻璃的隔声量高于同厚度下的5T-0.3V-5T (50)、5T-0.3V-5T (70), 略低于6T-0.3V-6T (70), 可作为全钢化真空玻璃的设计选择方案。

关键词

全钢化真空玻璃, LMS Virtual.Lab, 隔声性能, 玻璃厚度, 支撑物间距, 隔声量测试

Simulation Analysis of Sound Insulation Performance of Fully Tempered Vacuum Glass

Zhaoyang Yuan¹, Dongfang Hu¹, Yanbing Li²

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

²Luoyang Landi Glass Machinery Co., Ltd., Luoyang Henan

Received: Sep. 2nd, 2023; accepted: Oct. 26th, 2023; published: Nov. 1st, 2023

Abstract

As an exterior building enclosure structure, glass exterior windows play a crucial role in the sound

文章引用: 袁朝阳, 胡东方, 李彦兵. 全钢化真空玻璃隔声性能仿真分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 4978-4986.

DOI: 10.12677/mos.2023.126452

insulation system of the building. This article uses LMS Virtual.Lab to simulate and analyze the sound insulation performance of fully tempered vacuum glass, and verifies the rationality of the simulation through testing. By studying the different factors that affect the sound insulation performance of fully tempered vacuum glass, the results show that as the thickness of the glass increases, its sound insulation and coincidence frequency both increase, but the increase in sound insulation gradually decreases. When there is a difference in the thickness of the glass on both sides, its coincidence frequency also increases; As the spacing between supports increases, although the sound insulation in the low frequency range increases, the matching frequency in the high frequency range decreases accordingly. Based on simulation results, different specifications of fully tempered vacuum glass were prepared and tested for sound insulation. The test results showed that the sound insulation of vacuum glass with 6T-0.3V-4T (70) specifications was higher than that of 5T-0.3V-5T (50) and 5T-0.3V-5T (70) with the same thickness, and slightly lower than that of 6T-0.3V-6T (70). It can be used as a design option for fully tempered vacuum glass.

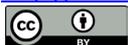
Keywords

Fully Tempered Vacuum Glass, LMS Virtual.Lab, Sound Insulation Performance, Glass Thickness, Pillar Spacing, Sound Insulation Test

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]。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,尤其是对低频噪音无法形成有效阻隔[2] [3]。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[4],而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,且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,因此具备较好的隔声效果[5]。

近年来,随着人们对噪声污染的关注,关于玻璃隔声性能的研究也越来越多。朱曦等[6]通过研究发现当中空玻璃的玻璃厚度恒为 5 mm 时,其隔声性能随着空气层厚度的增加而增强;焦长龙通[7]过实验室实验数据发现无论是单中空腔的双玻还是两个中空腔的三玻,只要它们的玻璃是单片的组合,并且厚度相差不大时,其隔声量十分接近;谢小利等[8]通过研究发现采用夹层玻璃或中空玻璃、增加玻璃和中空玻璃空气层厚度可以有效地提高隔声性能。王路等[9]研究发现复合真空玻璃的隔声性能要比单片玻璃好的多,且玻璃厚度越大其隔声量越大;马攀龙等[10]通过研究发现现有的玻璃产品大多在中低频段噪声的隔声性能方面存在不足。目前对于玻璃隔声性能的研究主要集中在普通玻璃和中空玻璃上,对于全钢化真空玻璃的研究较少,因此对其隔声性能的研究很有必要。

一般而言,当声波入射频率为 200~300 Hz 及以下时称之为低频声,频率为 500~1000 Hz 时称之为中频声,2000~4000 Hz 及以上的声波频率则为高频声[11]。而人耳则对 100~3150 Hz 频率范围内的声音较为敏感。本文对全钢化真空玻璃 100~3150 Hz 声波频率范围以内的隔声性能展开研究,首先采用 LMS Virtual.Lab 对其进行仿真分析,并对仿真进行测试以验证其合理性,随后对其影响因素进行研究和试验,确定出较合理的设计方案。

2. 全钢化真空玻璃结构

全钢化真空玻璃结构如图 1 所示，它由上下两层全钢化玻璃、封接层、支撑物和吸气剂组成，并在其中一片玻璃上钻孔用以抽取中间层的气体来形成真空层。由于内部真空层的存在，使得其具备良好的保温与隔声效果。与普通真空玻璃相比，全钢化真空玻璃具备更高的安全性能，其破碎后产生不带锐角的小颗粒，对人体的伤害也更小[12]，因此是新一代透明、节能、隔声性能良好的绿色安全玻璃。

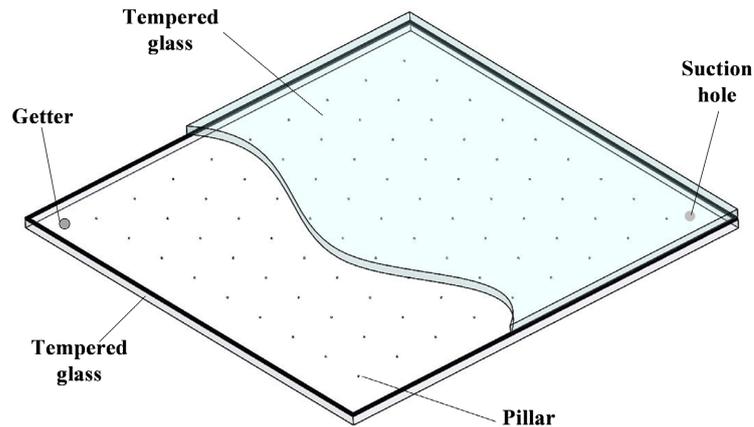


Figure 1. Fully tempered vacuum glass structure

图 1. 全钢化真空玻璃结构

3. 全钢化真空玻璃隔声性能仿真分析

3.1. 仿真条件分析

隔声构件的测量方式有理论计算、仿真模拟以及测试等方式。对于仿真而言，为了得到较为准确的结果，一般会尽可能去模拟隔声实验室中的测试环境。对于一般的隔声构件，通常采用如图 2 所示的隔

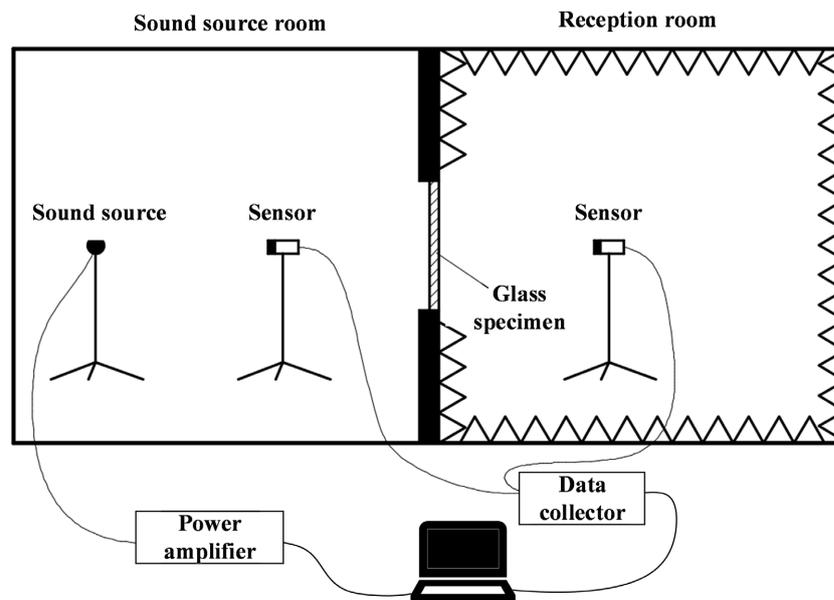


Figure 2. Schematic diagram of sound insulation test room

图 2. 隔声实验室示意图

声实验室进行测试。为模拟隔声实验室中的试验环境,采用 LMS Virtual.Lab 对全钢化真空玻璃模型使用直接声震耦合模块进行有限元计算,声源室和接收室分别使用发声侧和接收侧声学网格来代替,发声侧声源为平面波,质点震速为 0.1 m/s,对接收侧声学网格赋予 AML (Automatically Matched Layer)属性以模拟接收室的吸声效果。为使仿真结果尽可能准确,使全钢化真空玻璃模型尺寸与后续试验所使用的试件尺寸一致,大小为 500 × 500 mm,单片玻璃厚度为 5 mm,封接层厚度与支撑物高度为 0.3 mm,支撑物为圆柱型,与玻璃接触面直径为 0.3 mm,排布间距为 50 mm。通过与企业相关人员沟通,得到全钢化真空玻璃仿真模拟所需的材料参数如表 1 所示。在 LMS Virtual.Lab 中所建立的有限元计算模型如图 3 所示。

Table 1. Material parameters

表 1. 材料参数

Materials	Density/(kg·m ⁻³)	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio
全钢化玻璃	2.5×10^4	6.76×10^4	0.24
封接材料	7.37×10^4	5.6×10^4	0.4
支撑物	7.85×10^4	2×10^5	0.3

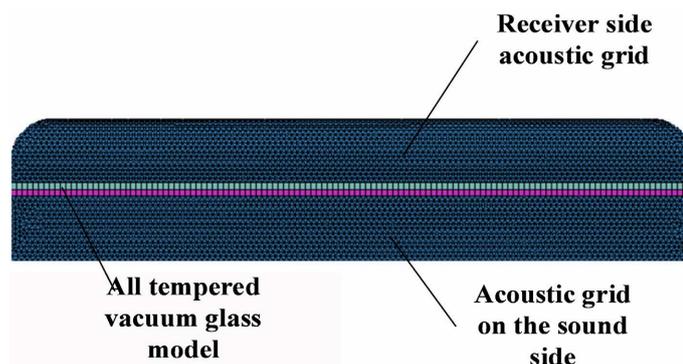


Figure 3. Finite metacomputing calculation model of sound insulation of fully tempered vacuum glass

图 3. 全钢化真空玻璃隔声量有限元计算模型

3.2. 仿真模型与试验对比

利用隔声实验室对全钢化真空玻璃样片进行测试,并将测试结果与仿真进行对比,其对比结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,当入射声波频率较低时仿真所测的隔声量较高,这是因为在理论情况下,声波频率低于构件的第一共振频率时构件的隔声量由其本身的刚度所决定,随着频率的升高,构件的隔声量也开始下降,并在声波频率与构件本身的共振频率相吻合时其隔声量降到最低。而对于试验样片而言,由于实验室内存在难以消除的背景噪音,再加上样片安装、密封等条件的限制,使得无法准确获得样片在低频段的隔声量。当频率逐渐升高时可以从图中看出,仿真值与实验值的拟合度也越来越高。同样由于样片安装、密封等原因,试验中在 800 Hz 以及 1600 Hz 处所测得的隔声量与仿真值存在较大差异。通过以上对比可以看出,仿真模型在中高频段仍具备较高的精度,能够满足全钢化真空玻璃隔声性能分析需求。

3.3. 全钢化真空玻璃隔声性能仿真研究

由于全钢化真空玻璃内部为真空层,因此声波主要通过两层玻璃板及内部支撑物来进行传播。由质量定律可知,当板件单位质量不变时其厚度每增加一倍,其隔声量约增加 6 dB;而当支撑物间距变化时,

支撑物数量以及支撑物与玻璃接触面积随之发生变化，其隔声量亦随之发生变化。为探究玻璃厚度和支撑物间距对全钢化真空玻璃隔声性能的影响，本节利用前文所述的有限元计算方法，分别对单片玻璃厚度为4~8 mm的全钢化真空玻璃以及在单片玻璃厚度为5 mm的情况下对支撑物间距为50~90 mm的全钢化真空玻璃进行仿真分析。

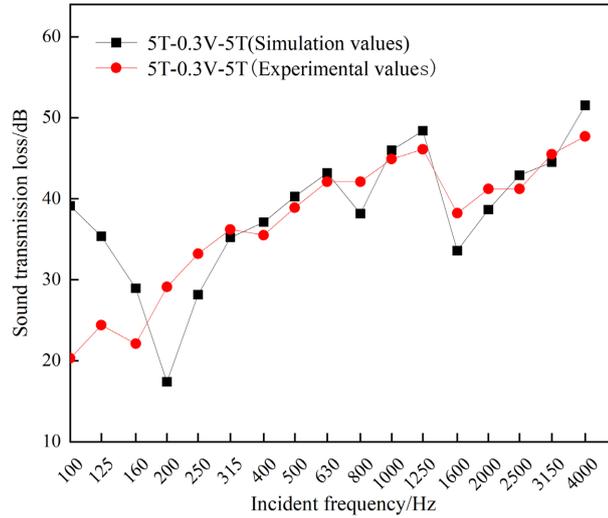


Figure 4. Comparison of test and simulation results
图 4. 测试与仿真结果对比

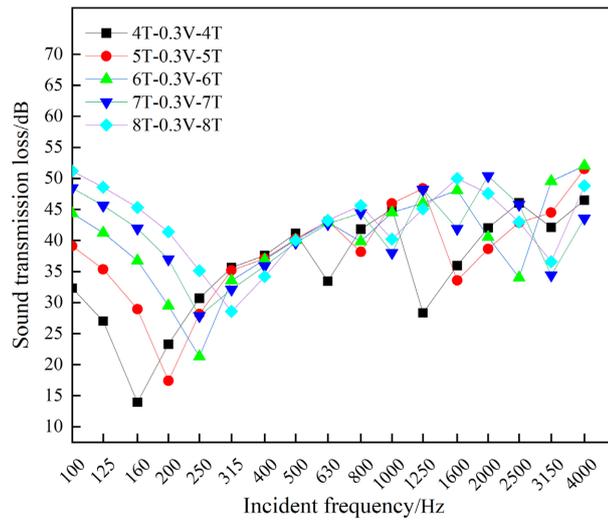


Figure 5. Sound insulation curve of fully tempered vacuum glass with different thicknesses
图 5. 不同厚度的全钢化真空玻璃隔声曲线图

从图 5 中可以看出，可以看出在 160~315 Hz 频率范围内不同厚度玻璃的隔声曲线中均出现了隔声低谷，这是由于当入射声波频率较低时与全钢化真空玻璃本身的吻合频率产生共振，从而引起了共振效应，导致声波透过量增加。在低频段中玻璃越厚，其隔声量越高，对应的共振频率及共振频率处的隔声量也变得更高。当频率继续升高时可以看到，玻璃 4T-0.3V-4T 在 630 Hz 处首先出现为隔声低谷，随后玻璃 5T-0.3V-5T、6T-0.3V-6T 在 800 Hz 处出现隔声低谷，7T-0.3V-7T、8T-0.3V-8T 则在 1000 Hz 处出现隔声低谷，且随着频率的增加，各片玻璃也都出现了多个隔声低谷。这是因为随着入射声波频率的增加，玻璃

的振动方式以低频段的整体运动为主变成了中高频段以弯曲运动为主，从而出现吻合效应。板状构件在中高频段中往往存在多个模态频率，同时由于玻璃相对于其他建筑材料而言面密度较低，从而使得其临界吻合频率处于中频范围之内[13]，这也使得其中高频段内出现了多次吻合效应，出现多个隔声低谷。另外从图5中可以看出，随着玻璃厚度的增加，其临界吻合频率也在向着高频段移动。当频率继续升高至超过中频段后可以看出，不同厚度的玻璃在不同频率处均出现了较深的隔声低谷。同时随着玻璃厚度的增加，其在低谷处所对应的隔声量也就越高，可见玻璃厚度的增加在一定程度上抑制了玻璃的弯曲振动。

由表2不同厚度玻璃的隔声量变化量可知，全钢化真空玻璃的隔声量虽然随着单片玻璃厚度的增加而增加，但其增加量却在逐渐减少。这意味着在增加单片玻璃厚度的同时其隔声量收益一直在减少。又因制作更厚的全钢化真空玻璃意味着更高的生产运输成本，故在实际生产中不能为了提升隔声量而无节制的去增加全钢化真空玻璃的厚度。

Table 2. Average sound insulation and its variation of fully tempered vacuum glass with different thicknesses at 100~3150 Hz
表 2. 100~3150 Hz 下不同厚度的全钢化真空玻璃平均隔声量及其变化量

Glass type	Thickness/mm	Average sound insulation/dB	Increased sound insulation/dB
4T-0.3V-4T	8.3	34.78	-
5T-0.3V-5T	10.3	37.31	2.53
6T-0.3V-6T	12.3	39.34	2.03
7T-0.3V-7T	14.3	40.91	1.57
8T-0.3V-8T	16.3	42.24	1.33

图6为两侧玻璃厚度差异对隔声量的影响，从图中可以看出，当真空玻璃两侧玻璃厚度不同时在低频段其隔声量明显更高，且在中高频段出现了吻合谷向高频段偏移的现象。这是因为玻璃厚度的不对称分布不仅削弱了构件的共振效应，还使整个构件高频区的吻合频率向更高频区移动，从而导致对应的吻合谷向更高频区偏移。由于这一现象的存在，在对钢化真空玻璃进行优化设计时应当首先考虑在其两侧分布不同厚度的玻璃。

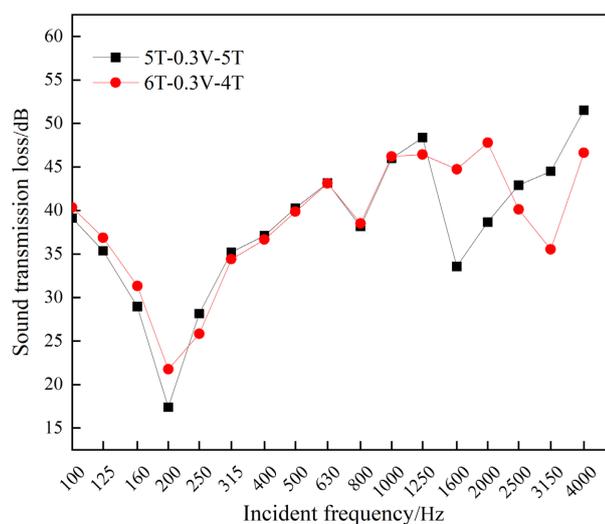


Figure 6. The influence of thickness difference between two sides of glass on sound insulation
图 6. 两侧玻璃厚度差异对隔声量的影响

图 7 为单片玻璃厚度为 5 mm 的情况下不同支撑物间距的全钢化真空玻璃的隔声曲线图。从图 7 中可以看出,在中低频时随着支撑物间距的增加其隔声量有所增加,且在 200 Hz 吻合谷处隔声量增幅较大。这是因为当支撑物间距增加时,其数量也会减少,因此透过的声波量减少,当声波频率与全钢化真空玻璃的吻合频率发生共振时,其传递的声波能量也会降低,最终引起隔声量的增加。值得注意的是,随着支撑物间距的增加,其高频吻合谷在向中低频移动。该现象表明支撑物间距的改变不仅能通过影响支撑物与玻璃板的总接触面积来影响其隔声量,还能通过影响其吻合频率来改变整片玻璃的隔声性能。这也意味着当全钢化真空玻璃的支撑物间距过大时反而会导致其整体隔声性能的下降。另一方面支撑物的间距及数量也关系到全钢化真空玻璃的力学性能,当支撑物间距超过 80 mm 时,支撑区域的应力集中现象会较为明显[14],同时考虑到全钢化真空玻璃的吻合频率会随着支撑物间距的增加而降低,因此在实际生产中对支撑物间距取值 70 mm 较为合理。

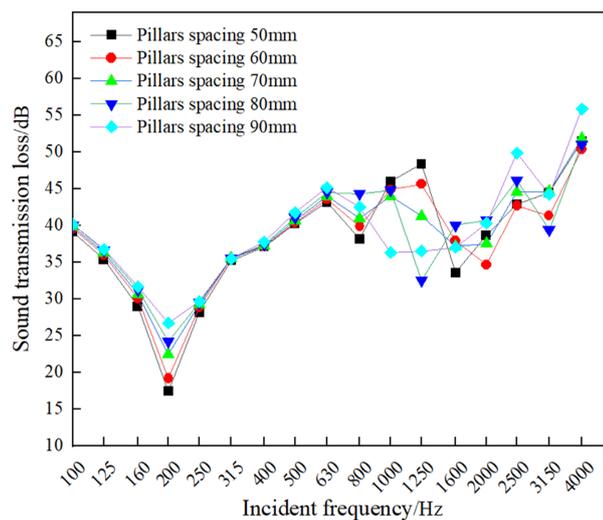


Figure 7. Sound insulation curve of fully tempered vacuum glass under different pillar spacing
图 7. 不同支撑物间距下全钢化真空玻璃隔声曲线图

3.4. 全钢化真空玻璃隔声性能测试研究

为验证上述仿真优化结果,因此试制不同规格的全钢化真空玻璃试件并对其隔声性能进行测试。囿于现实条件等因素,在已制备了支撑物间距为 50 mm 的全钢化真空玻璃 5T-0.3V-5T(50)的前提下又仅制备了支撑物间距为 70 mm 的 5T-0.3V-5T(70)、6T-0.3V-4T(70)、6T-0.3V-6T(70)三种规格的全钢化真空玻璃,并在隔声实验室中对后三种试件进行隔声量测试。通过将后三种试件的测试结果和已测量过的 5T-0.3V-5T(50)测试结果进行对比,对比结果如图 8 所示。

从图 8 的测试结果中可以看出,当全钢化真空玻璃厚度相同时,支撑物间距较大的全钢化真空玻璃在低频段的隔声性能更好,吻合谷处所对应的隔声量更高,同时其中高频所对应的吻合谷频率也发生了下降。支撑物间距为 50 mm 时的玻璃试件 5T-0.3V-5T 中高频吻合谷所对应的频率为 1600 Hz,而当其厚度不变、支撑物间距变为 70 mm 时,隔声量在 1250 Hz 时便开始下降,直至 2000 Hz 时隔声量才出现回升,这说明随着支撑物间距的增加,全钢化真空玻璃在中高频段的吻合频率确实在降低,这与上文仿真所得到的结论也相一致。从图 8 中也可以看出,当全钢化真空玻璃总厚度相同时,两侧玻璃厚度存在差异时隔声性能更好,高频段吻合谷对应的频率也更高。可见两侧玻璃厚度不对称分布确实在一定程度上削弱了全钢化真空玻璃的共振效应,也使得高频段吻合谷向着更高的频段移动。同时通过表 3 中的平

均隔声量可以看出, 6T-0.3V-4T(70)规格的全钢化真空玻璃的平均隔声量高于 5T-0.3V-5T(50)和 5T-0.3V-5T(70), 略低于 6T-0.3V-6T(70), 可作为全钢化真空玻璃的设计选择方案。

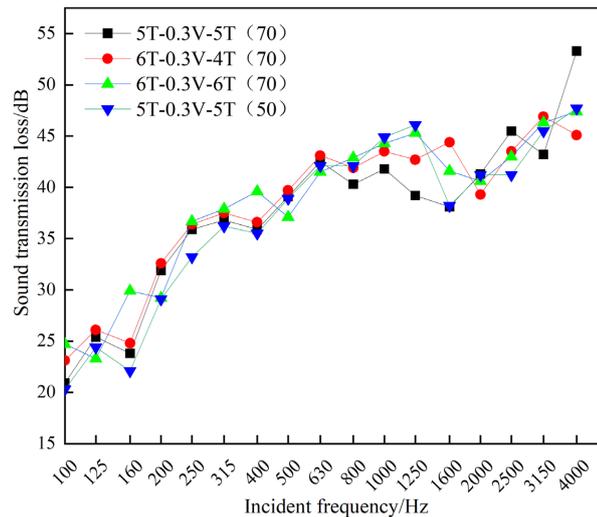


Figure 8. Measured sound insulation curve of fully tempered vacuum glass of different specifications
图 8. 不同规格的全钢化真空玻璃实测隔声量曲线

Table 3. Average sound insulation of fully tempered vacuum glass of different specifications
表 3. 不同规格全钢化真空玻璃平均隔声量

Glass type	Pillar spacing/mm	Thickness/mm	Average sound insulation/dB
5T-0.3V-5T	50	10.3	36.18
5T-0.3V-5T	70	10.3	36.35
6T-0.3V-4T	70	10.3	37.63
6T-0.3V-6T	70	12.3	37.74

4. 结论

本文对全钢化真空玻璃的隔声量进行仿真分析, 并基于试验对仿真结果进行了验证。结果表明, 仿真与试验结果隔声量除低频区和高频吻合谷之外增长趋势基本相同。基于同种分析方法对不同厚度及不同支撑物间距的全钢化真空玻璃的隔声量进行分析, 得出结论如下:

(1) 随着玻璃基片厚度的增加时, 其对应的吻合频率变高, 平均隔声量也随之增加, 但平均隔声量增加量在逐渐减少。

(2) 在玻璃构件厚度相同的情况下对两侧玻璃厚度不均等分布的全钢化真空玻璃进行仿真分析, 分析表明其在不增加玻璃构件整体厚度的前提下能够使吻合频率向高频区移动, 隔声性能明显优于两侧玻璃厚度均等分布的全钢化真空玻璃。

(3) 当全钢化真空玻璃内部的支撑物间距增加时, 其隔声量有所增加。但随着支撑物间距的增加, 其中高频时对应的吻合频率也随之降低。

(4) 通过在隔声实验室对不同规格的全钢化真空玻璃试件进行隔声量测试, 测试结果表明优化后的玻璃 6T-0.3V-4T(70)隔声量高于同厚度下的 5T-0.3V-5T(50)、5T-0.3V-5T(70), 略低于 6T-0.3V-6T(70), 可作为全钢化真空玻璃的设计选择方案。

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. 玻璃幕墙隔声降噪设计分析[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., Bliudzius, 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. (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] 朱曦, 王丽娟, 王晓理, 等. 双层中空玻璃隔声性能仿真研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 256-262.
- [7] 焦长龙. 基于实测数据对建筑门窗隔声性能的研究[J]. 建设科技, 2022(10): 100-103.
- [8] 谢小利, 卢凌寰, 梁凯, 等. 基于极差分析法的外窗隔声性能研究[J]. 绿色建筑, 2021, 13(5): 35-36+40.
- [9] 王路, 岳高伟, 蔺海晓, 等. 复合钢化真空玻璃隔声性能理论与分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2): 630-637.
- [10] 马攀龙, 田苏, 陈海涛, 等. 中国隔声玻璃研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 1-9.
- [11] 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.
- [12] 康玉成. 建筑隔声设计: 空气声隔声技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 3.
- [13] 孙景春, 刘忠伟, 蒋毅, 等. 真空玻璃安全性综述[J]. 建设科技, 2018(9): 32-36.
- [14] 李彦兵, 岳高伟. 钢化真空玻璃支撑点的排布方式[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(6): 955-959, 966.