

建筑玻璃空气声隔声性能评价与 结构参数化分析

Air-borne Sound Insulation Performance Evaluation and Parameters Analysis of Building Glass

刘正权 彭 超 董人文 刘海波

中国建筑材料检验认证中心 北京 100024

摘 要 本文介绍了建筑构件隔声的基本知识和建筑玻璃隔声性能单值评价指标,分析并比较了玻璃厚度、中空玻璃空气层厚度、夹层玻璃厚度和胶片种类等参数对玻璃隔声性能的影响,为门窗幕墙玻璃的隔声设计提供了一定的参考。

Abstract Basal principles and single-number quantity indexes of sound insulation were introduced. Some parameters of glass structure like thickness of glass and air cavity width affecting the units sound insulation performance were discussed subsequently. Comparison of sound insulation performance was also conducted among monolithic glass, laminated glass, insulating glass, laminated insulating glass and double laminated insulating glass. Conclusion of discussion in this paper provides reference information for sound insulation design of building glass, windows, doors and curtain walls to some extent.

关键词 玻璃 隔声性能 隔声评价 参数分析

Keywords glass sound insulation evaluation parameters analysis

1 引言

交通噪声、工业噪声、建筑噪声和生活噪声是城镇居民面临的四种主要的城市环境噪声污染,对人们的身体健康、日常的工作学习和生活带来了一定的负面影响。所以,建筑和建筑构件的隔声设计和性能评价就显得十分重要。根据声波在建筑和建筑构件中的传递方式,传声可分为空气声传声和固体传声,相应的隔声就分别为空气声隔声和撞击声隔声。空气声隔声是利用墙体、门窗或其他屏障来隔离噪声在空气中的传播,而撞击声隔声是利用弹性阻尼材料降低或隔离由撞击或振动而产生的噪音在结构中的传播。作为建筑围护结构使用的门窗幕墙来说,空气声隔声是评价其隔声性能的主要方面。

玻璃是现代建筑围护结构最常用的一种面板材料,其隔声性能对门窗和玻璃幕墙等建筑构件的隔声性能影响甚大,从而影响着建筑的整体隔声效果。目前,门窗和玻璃幕墙使用的玻璃和玻璃深加工产品种类繁多,且规格不一。不同结构参数的玻璃,其隔声性能大不相同,改变玻璃的结构参数对玻璃的隔声性能的影响程度也不相同。本文介绍了建筑玻璃空气声隔声性能的几种单值评价指标,重点分析玻璃结构参数的改变对玻璃隔声性能的影响,以期为门窗幕墙的隔声设计提供参考。

2 玻璃隔声评价指标

在国内外的隔声评价标准和文献中一般都是采用一个单值评价量来衡量玻璃等建筑材料和构件的隔声效果,例如美国 ASTM E413: 2004 中的隔声等级 STC(Sound Transmission Class)、ASTM E1332: 90(2003)中的室外-室内透声等级 OITC(Outdoor-indoor Transmission class)、国际标准 ISO 717-1 中的计权隔声量 R_w 及频谱修正量 C 和 C_{tr} 以及一些声学研究机构和组织开发的诸如音乐/机器噪声传声等级 MTC (Music/Machinery Transmission Class) 等。

隔声等级 STC 是利用 ASTM E90: 2004《建筑和建筑构件空气声隔声性能实验室测试方法》测得的 125~4000Hz 频率范围内的传声损失 (TL, Sound Transmission Loss) 利用数值计算法或曲线比较法计算而得的隔声性能单值评价指标, 在美洲地区使用较为普遍。隔声等级 STC 广泛用于建筑室内隔墙、天花/地板、门窗和外墙的空气声隔声性能。

计权隔声量 R_w 是国际标准 ISO 717-1: 1996《声学 建筑和建筑构件隔声分级 第 1 部分: 空气声隔声》中定义的一种墙体、地板、门窗等建筑构件空气声隔声性能的单值评价指标。由 ISO 140 中规定的方法测得的 100~3150Hz 频率范围内各 1/3 倍频程或倍频程的隔声量来确定, 是国际上通用的隔声性能单值评价指标。ISO 717-1: 1996 和 GB/T 50121-2005 中引入了频谱修正量 C 和 C_w 来评价同一建筑或建筑构件在不同噪声源下的实际隔声效果。频谱修正量 C 和 C_w 分别考虑了以生活噪声为代表的中高频成分较多的噪声源和以交通噪声为代表的中低频成分较多的噪声源对建筑物和建筑构件实际隔声性能的影响。

室外-室内透声等级 OITC 是 ASTM E1332: 90 (2003)《室外-室内透声等级测定分类》中定义的一种也是由标准 ASTM E90: 2004 规定的方法测得的传声损失 TL 值进行计算而得到的一个隔声性能单值评价指标。与隔声等级 STC 相比, 它是一个可以较为综合的评价建筑构件对低频交通噪声 (飞机起飞、低速轨道交通和公路交通等) 隔声性能好坏的较为理想的 A 计权声级评价量, 计算频率从 80Hz 到 4000Hz。

由于以上各种隔声性能评价指标的计算方法有所区别, 最低计算频率也不尽相同, 所以, 对于同一种结构配置的玻璃或其他建筑构件, 得出的隔声量结果有时也相差较大。评价不同结构参数玻璃的隔声效果时, 应采取同一种评价体系, 但是其他隔声评价指标也可以作为评价其低频隔声性能好坏的一个辅助量。

3 玻璃隔声性能参数分析

3.1 单层玻璃

单层玻璃和墙体以及各种板材一样, 属于一种单层匀质密实构件, 其隔声能力主要由声波的入射频率和构件的单位面积质量 (即面密度) 决定。单层构件越重, 其隔声效果越好, 同时隔声量随频率的增加而增加, 且构件在高频段的隔声能力远好于低频段, 这是单层构件最基本的隔声特性, 称为隔声质量定律。但是, 构件的隔声性能还受构件的刚度、材料内部阻尼以及边界条件等因素的影响。

通常, 单层匀质密实构件的隔声特性可分为四个区域:

① 区域 I: 在很低的频率范围内, 刚度起主要控制作用, 隔声量随频率升高而减低;

② 区域 II: 频率继续升高, 质量效应增大, 隔声量总体上随频率升高而增大, 由于构件的共振, 在共振频率处出现隔声低谷, 其大小由材料内部阻尼决定;

③ 区域 III: 当频率继续增高到主要声频范围 (125~4000Hz), 隔声由质量定律控制。此时, 若把单层匀质密实构件看成是无刚度、无内部阻尼的柔顺质量, 并不考虑构件周边约束的影响, 则隔声量随单位面积质量的增大而增大, 隔声量 R 可由下式计算:

$$R = 20 \lg f + 20 \lg M - 48 \quad (1)$$

其中, f ——入射频率, Hz;

M ——构件的单位面积质量, kg/m^2 。

式 (1) 说明了单层构件的单位面积质量越大, 隔声效果越好, 理论上质量或频率门楣增加一倍, 隔声量 R 就增加 6dB, 即隔声量按接近每倍频程 6dB 的斜率上升。

对于单片玻璃来说, 密度约为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$, 则其隔声量公式近似等价于:

$$R = 20 \lg f + 20 \lg 2.5d - 48 \approx 20 \lg f + 20 \lg d - 40 \quad (2)$$

式中, d ——单片玻璃的厚度, mm。

④ 区域 IV: 较高的频率范围内, 为质量定律的延伸, 但在临界频率处, 将出现吻合效应的隔声

低谷。

当频率增加到一定程度时, 构件壁面在入射声波激发下, 产生受迫弯曲振动, 当某一频率的入射声波波长在壁面上的投影等于壁面结构的弯曲波波长时, 产生了波的吻合, 由于壁面的弯曲振动, 隔声量明显下降, 即产生了吻合效应。这时隔声量不再符合质量定律, 单层构件的振幅不断增大, 声能大量透过构件, 隔声量急剧下降形成低谷。产生吻合效应的最低频率, 其吻合效应最明显, 这个吻合频率称为临界频率, 它可利用下式计算:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12m(1-\nu^2)}{Ed^3}} \quad (3)$$

式中: f_c ——临界频率, Hz;

c ——空气中的声速, 常温下为 340m/s;

m ——构件材料的面密度, kg/m^2 ;

ν ——构件材料的泊松比, $\nu \approx 0.3$;

E ——构件材料的弹性模量, Pa;

d ——单层构件的厚度, m。

由式 (3) 可以看出, 一种构件材料的临界频率主要取决于该种材料的弹性模量和面密度。吻合效应对构件的隔声性能有极大的影响, 应设法调整构件的劲度与面密度, 避免临界频率出现在对人有明显影响的 100~3150Hz 的频率范围内。

几种不同厚度的单层玻璃的隔声性能如图 1 所示。

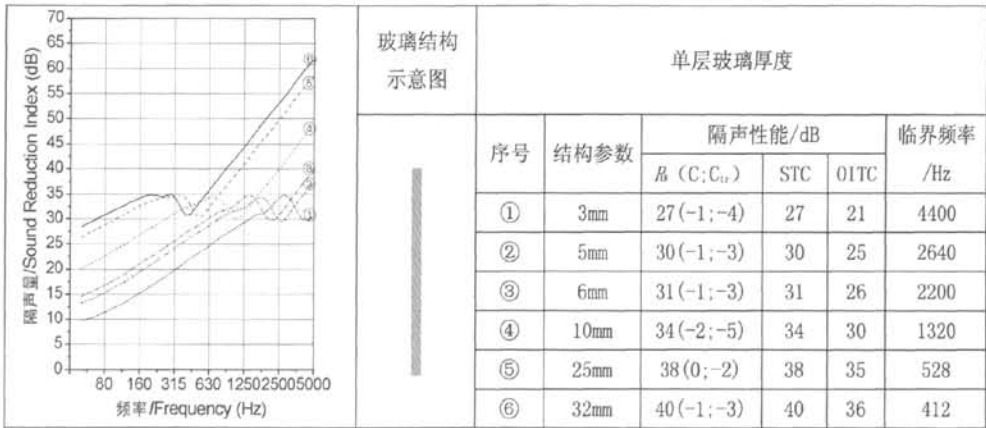


图 1 单层玻璃厚度对隔声性能的影响

由图 1 可以看出, 增加玻璃厚度, 即增加玻璃的单位面积的质量, 是提高玻璃隔声性能的一种有效途径。在低于临界频率的范围内, 隔声量满足质量定律, 即增加玻璃厚度, 其隔声性能增加。例如 3mm 厚的单片玻璃, 计权隔声量 R_w 值为 27dB, 厚度增加到 6mm, 其计算隔声量 R_w 值约为 31dB, 增加了 4dB。随着玻璃厚度的增加, 其临界频率降低, 即吻合谷向低频段移动。在使用时应尽量避免使吻合谷处于声源最强频率处。

3.2 单片夹层玻璃

图 2 为不同厚度的夹层玻璃隔声性能。从图中可以看出, 与单片玻璃类似, 中间胶片厚度不变, 增加每层玻璃的厚度, 其整体隔声性能提高。

图 3 为两种同厚度的单片玻璃和夹层玻璃的隔声量曲线对比, 从图中可以看出, 在质量控制区, 同厚度的夹层玻璃与单片玻璃的隔声量近似相等; 在共振频率处, 夹层玻璃的吻合处隔声量要高于单片玻璃, 这是由于夹层玻璃胶片层的高阻尼性所决定的。例如, 3mm+0.76PVB+3mm 厚夹层玻璃在临界频率处的隔声量要高 6mm 单片玻璃在临界频率隔声量 5dB 左右。另外, 同厚度的夹层玻璃的临界频率要高于单片玻璃, 即吻合谷向高频方向移动。

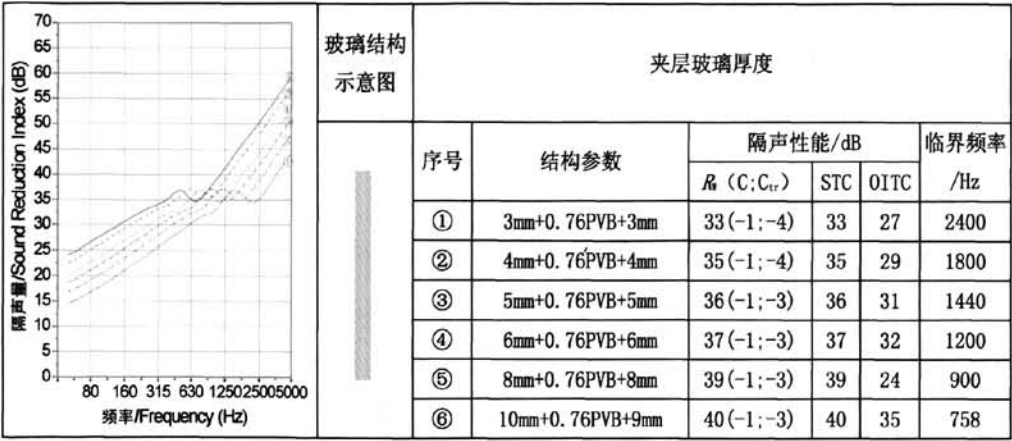


图 2 夹层玻璃厚度对隔声性能的影响

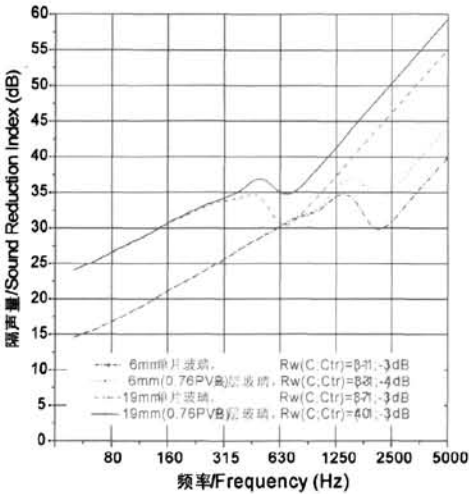


图 3 同厚度的单片玻璃和夹层玻璃的隔声量对比

3.3 中空玻璃

对于中空玻璃来说，增加单片玻璃的厚度，其总的隔声性能随之增加，临界频率向低频方向移动，而共振频率几乎不变，但共振频率处的隔声量变大，如图 4 所示。

理论上，由于中空玻璃中间的空气层具有弹性，声波所引起的第一层玻璃的振动在通过空气层传给第二层玻璃时，就会由于空气层的弹性变形而使传递给第二层玻璃的振动大为减弱，从而提高中空玻璃的总体隔声量。但是，当中空玻璃的空气层厚度较小时，两层玻璃被密封的空气严重地耦合在一起，振动方式就像连在一起的单层窗一样，中空玻璃的隔声量还会因为发生共振而下降，即双层玻璃和空气层之间组成了固有频率为 f_0 的振动系统：

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{L}} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \tag{4}$$

式中： M_1, M_2 ——中空玻璃每层玻璃的面密度， kg/m^2 ；

L ——中空玻璃空气层的宽度， cm 。

如果入射声的频率接近固有频率，将使中空玻璃发生共振，隔声量显著下降。对于中空玻璃，尤其当空气层厚度较小时，固有频率可以高达 200Hz，使得在共振频率处中空玻璃的隔声能力反而不及同样重的单层玻璃。另外，对中空玻璃分别采用不同厚度的玻璃，可以使各层的吻合谷错开，

在一定程度上以减轻吻合效应的不利影响。如果将中空玻璃的其中一层玻璃作成倾斜的, 可以使得中空玻璃上下具有不同的空气层厚度, 也有利于防止两层玻璃之间产生共振, 提高其隔声性能。

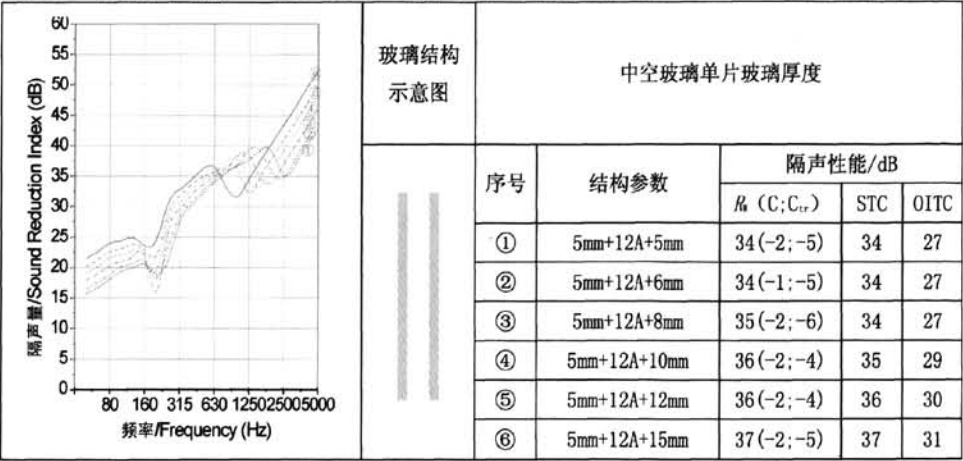


图 4 不同单片玻璃厚度对中空玻璃总体隔声量的影响

如果一直增大两片玻璃之间的空气层厚度, 空气层的弹性变形将会使得声波所引起的第一片玻璃的振动传递给第二片玻璃的振动大幅度减弱, 所以由其组成的双层玻璃系统的总体隔声量将会在很大程度上提高。如图 5 所示, 当两片 5mm 玻璃之间的空气层厚度达到 100mm 时, 由其组成的双层玻璃计权隔声量 R_w 可达到 44dB, 隔声性能较 5mm+12A+5mm 的 33dB 大幅度提高。所以, 双层玻璃窗的隔声性能一般要优于采用同样厚度玻璃的中空玻璃窗, 中间留有一定宽度空气腔的双层玻璃幕墙具有较好的空气声隔声性能也是源于此。同样, 双层中空玻璃也具有较好的空气声隔声性能。

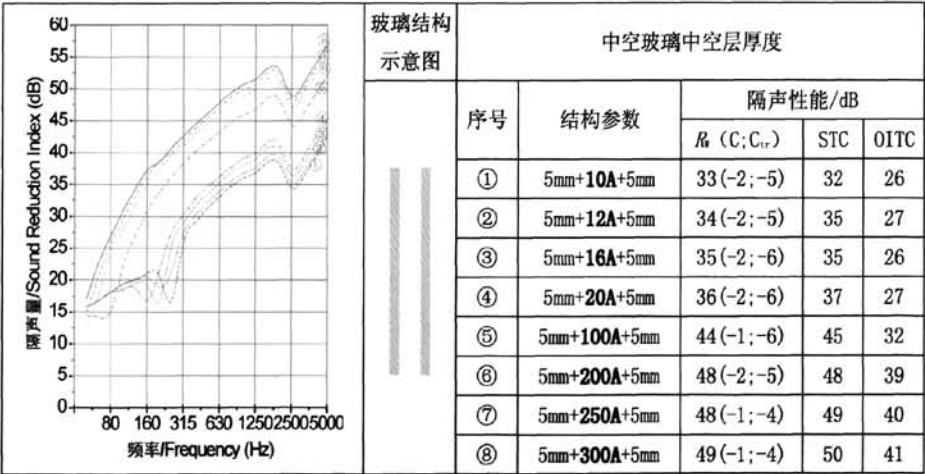


图 5 不同空气层厚度对中空玻璃总体隔声量的影响

3.4 夹层中空玻璃

对于夹层中空玻璃来说, 其空气声隔声性能要好于相同厚度的中空玻璃, 双夹层中空玻璃的隔声量要高于单夹层中空玻璃。如图 6 所示, 6mm+12A+6mm 中空玻璃的计权隔声量 R_w 为 35dB, 而 (3+0.76PVB+3) mm+12A+6mm 单夹层中空玻璃的计权隔声量 R_w 为 39dB, (3+0.76PVB+3) mm+12A+(3+0.76PVB+3) mm 双夹层中空玻璃的计权隔声量 R_w 高达 43dB。从图中可以看出, 随着空气层厚度的增加, 三种中空玻璃的计权隔声量 R_w 均呈增加的趋势。相同空气层厚度的单夹层中空玻璃的计权隔声量 R_w 比中空玻璃的计权隔声量 R_w 高 3~4dB, 双夹层中空玻璃的计权隔声量 R_w 比单夹层中空玻璃的计权隔声量 R_w 高 3~4dB。为了得到较好的保温效果, 围护结构一般采用中空玻璃, 但是隔声性能

提高不大,若采用夹层中空玻璃,则可以在保温和隔声两方面均能达到较好的效果。

与中空玻璃一样,增加单片夹层中空玻璃的夹层玻璃的厚度也可以提高其整体的隔声性能。当表面质量相同时,隔声性能从差到好依次为中空玻璃、单片玻璃、夹层玻璃、单夹层中空玻璃和双夹层中空玻璃。

4 结语

科学的建筑玻璃隔声设计应首先对所处的环境进行噪声源分析和频谱检测,确定主要噪声源的频谱特性,再调整玻璃的结构和配置,以满足在整个频谱范围内都能有较好的隔声性能。另外,在实际应用时,门窗、幕墙等采用玻璃作为主要面板材料的建筑围护结构构件的密封性能对其整体隔声效果的影响也较大。尽管如此,清楚了解不同结构参数玻璃的隔声特性仍是门窗、幕墙隔声设计的基础和重要依据。

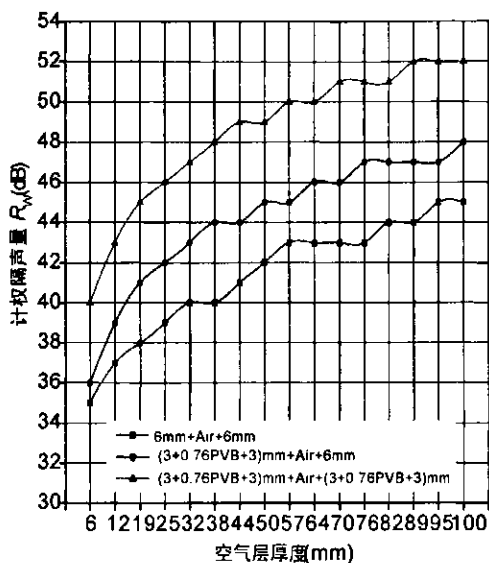


图6 空气层厚度对夹层中空玻璃隔声量的影响

参考文献

- [1] ASTM E413-04, Classification for Rating Sound Insulation[S].
- [2] ASTM E90-04, Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements[S].
- [3] ASTM E1332-90(2003), Standard Classification for Determination of Outdoor-Indoor Transmission Class[S].
- [4] ISO 717-1:1996, Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation[S].
- [5] ISO 140-3:1995, Acoustics -Measurement of sound insulation in buildings and of building elements-Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements[S].
- [6] GB/T 50121-2005 建筑隔声评价标准[S].
- [7] 华南理工大学等. 建筑物理[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [8] 刘正权, 彭超, 刘海波等. 门窗幕墙及其玻璃空气声隔声性能评价指标[J]. 门窗, 2009, (6): 14~21.
- [9] 丁建洛, 王新春. 玻璃的隔声性能及降噪设计[J]. 玻璃, 2006, (6): 49~53.
- [10] 庞堃. 建筑玻璃隔声性能及检测方法研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2007.

作者简介

刘正权 (Liu Zhengquan), 1981年6月出生, 男, 河南商丘人, 工程师, 主要从事门窗、幕墙和玻璃的检测及性能评价技术研究工作。工作单位: 中国建筑材料检验认证中心 (China Building Material Test & Certification Center)。通信地址: 北京市朝阳区管庄东里1号 CTC 大楼, 邮政编码: 100024。

E-mail: lzq@ctc.ac.cn