

微穿孔板的应用技术

查雪琴 康 健 张 婷 周晓儒 H. Fuchs

(德国佛朗霍费建筑物理研究所)

(1993年9月10日收到)

摘要 自1975年马大猷教授发表了关于微穿孔板吸声构造的论文^[1,2]以后,微穿孔板吸声构造在我国的应用已日趋扩大。近年来,在欧美,环境和卫生界人士提出矿物性纤维对人体健康有害的见解,虽然对这种见解尚未取得一致的意见,但因此却使人联想到几十年前因石棉对人体有害所引起的建筑物内大量翻修,以新的材料替换石棉的情景。吸声材料的生产厂家迫切要求能生产不含矿物纤维的宽频带吸声材料,而很多建设方也要求在新建筑物内不再使用矿物性纤维吸声材料。微穿孔板正是适应这一要求、不需外加阻尼材料的共振型吸声构造。

新建的联邦德国议会全体会议大厅是周围为玻璃墙面的圆形建筑物,建成首次使用时,发生由于墙面声反射引起会场扩声系统不能正常工作的问题。为了解决这个声学问题而又不改变目前建筑形状和外观,我们设计并试制了透明的微穿孔板吸声构造。

Application approach for microperforated panel sound absorbers

CHA Xueqin KAN Jian ZHANG Tin ZHOU Xiaoru and H. Fuchs

(Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, Germany)

Abstract A computation programme for the sound absorption of microperforated absorbers is based on Maa's theory. Comparison between the theoretical and experimental results shows good agreement for normally incident sound waves. The programme enables accurate definition of the geometrical parameters of a microperforated panel construction according to the respective practical requirements. Estimates are also given for impinging diffuse sound fields. As a successful example, a fully transparent microperforated absorber made of plexiglass was installed in order to eliminate the acoustic and electroacoustic disturbances caused by the large cylindrical glass partition walls between the central plenum and surrounding lobby.

一、基本试验——在驻波管中的测量和计算

在截面为 $200 \times 200\text{mm}$ 及直径 100mm 的驻波管^[3]中,测量了金属板、非金属板、单层、双层串联、并联各种构造的垂直入射吸声系数。与此同时,根据马大猷教授的理论推导,编制了一套已知板厚(t)、孔径(d)、孔距(b)和板后空气厚度(D)时,计算上述各种条件下的垂直入射吸声系数;根据所要求的吸声频带宽度(f_1, f_2)和吸声系数(α)求出应有的 t, d, b, D 各个参数;以及计算扩散场的吸声系数的运算程序。

图1为测量系统方框图,图2为该测量设备的照片。

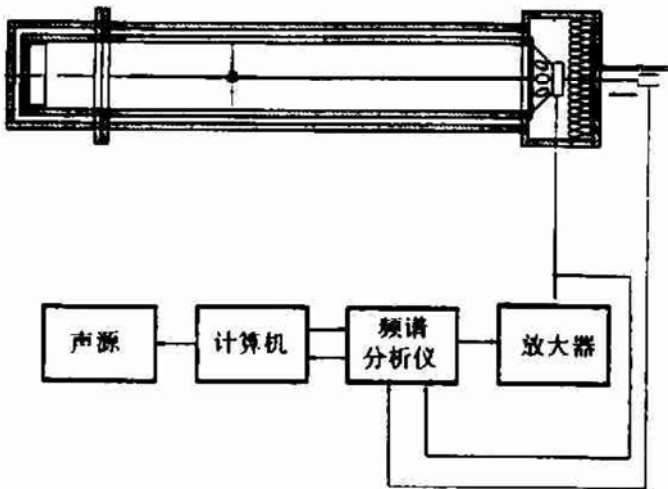
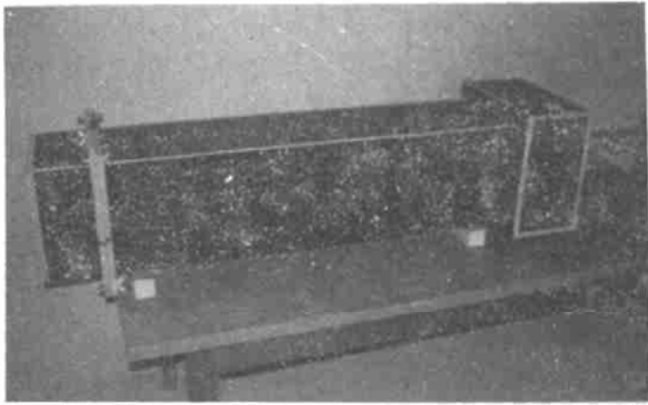


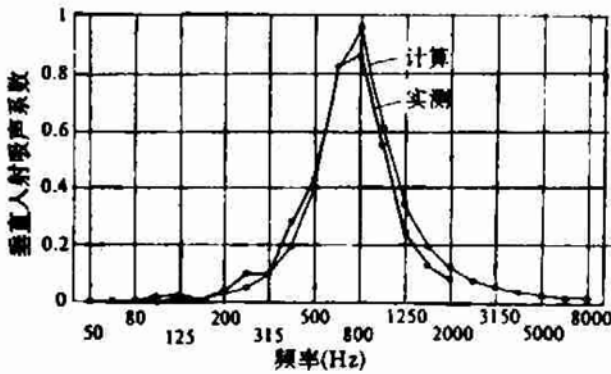
图 1 测量系统方框图

图 2 测量设备的照片

利用这套程序, 不仅可以得出上述各种条件下的计算结果, 还可以同时得出有关的各项参数, 如: 声阻率(r)和声抗率(m)等, 籍此可根据需要改变这些参数, 做出合用的微穿孔板吸声构造的设计。在计算中未考虑板本身的振动。

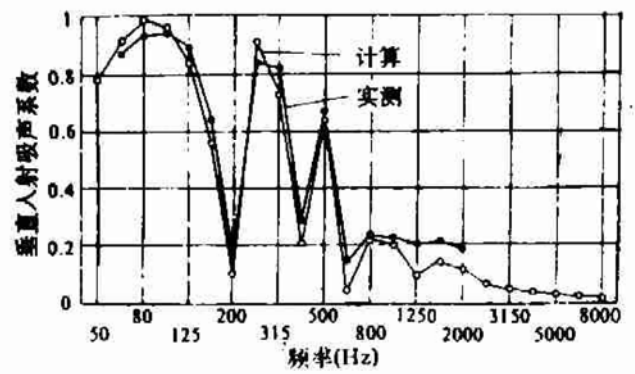
1 实验结果与计算的比较:

图 3—5 给出了单层 (金属板和非金属板)、双层并联和串联构造时的实测结果和计算结果的比较的一些实例。 p 为穿孔率。



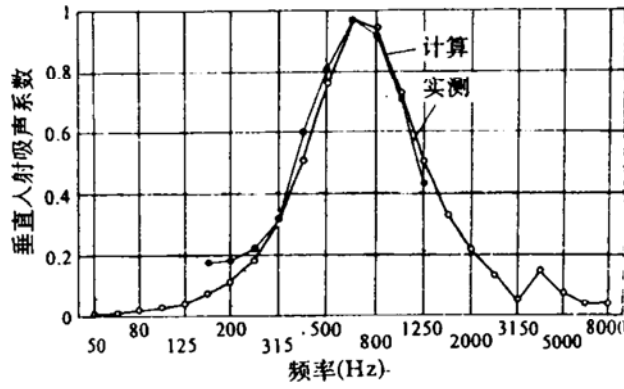
$t=0.8\text{mm}; d=0.8\text{mm}; b=8\text{mm};$
 $D=24\text{mm}; p(\%)=0.79.$

(a) 单层金属板



$t=0.8\text{mm}; d=0.8\text{mm}; b=8\text{mm};$
 $D=800\text{mm}; p(\%)=0.79.$

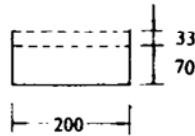
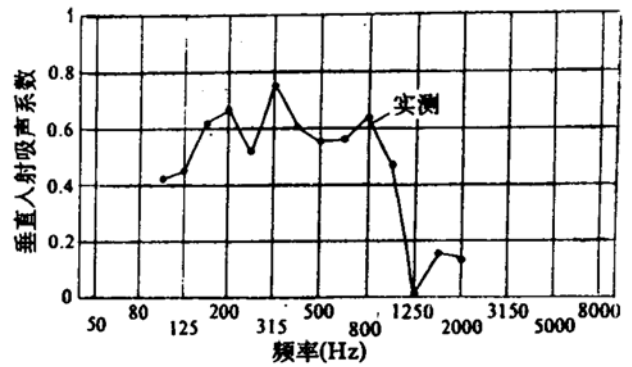
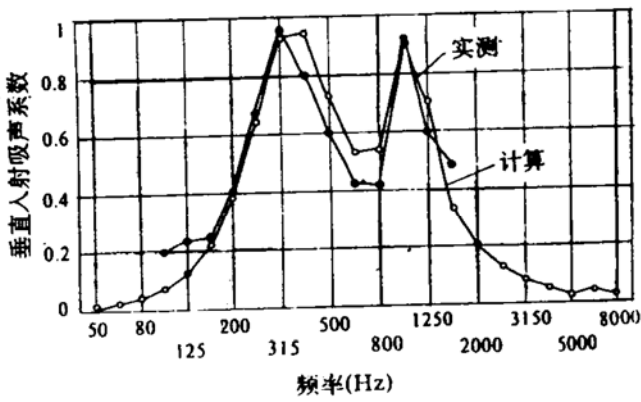
(b) 单层金属板



$t = 3\text{mm}; d = 0.4\text{mm}; b = 1.8\text{mm}; D = 50\text{mm}; p(\%) = 3.88.$

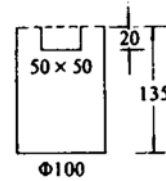
(c)单层非金属板

图 3



前 $t = 1\text{mm}; d = 1\text{mm}; b = 6\text{mm};$
 $D = 33\text{mm}; p(\%) = 2.18.$
 后 $t = 1\text{mm}; d = 1\text{mm}; b = 9\text{mm};$
 $D = 70\text{mm}; p(\%) = 0.79.$

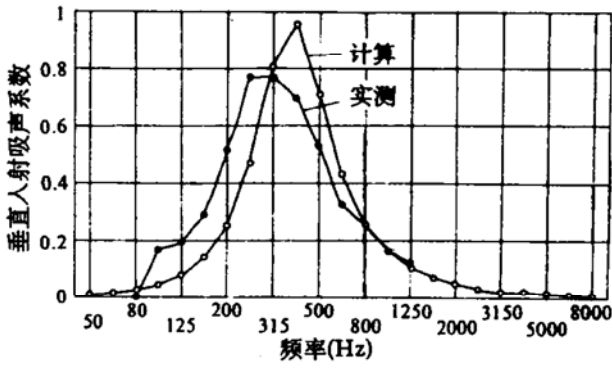
图 4 双层串联



$t = 0.8\text{mm}; d = 0.8\text{mm}; b = 8\text{mm};$
 $D = 20\text{mm}, 135\text{mm}; p(\%) = 0.79.$

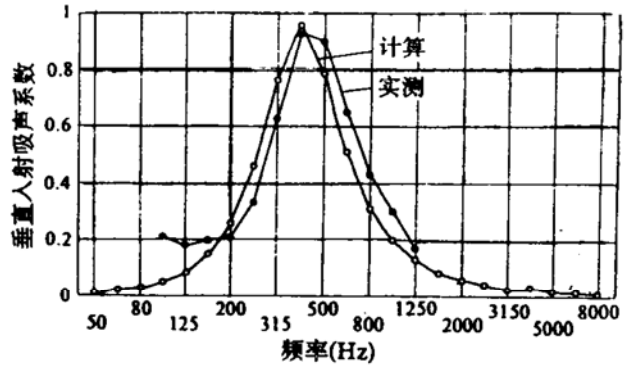
图 5 并联

上述比较说明，无论是金属板或非金属板，单层板或双层构造，在垂直入射及板本身的振动可以忽略的条件下，计算与实验结果非常一致。由计算得出的吸声系数与实测结果如此吻合，这种例子是很少见的。正是由于有了理论计算和实验结果一致这一基本事实，我们才能在联邦议会全体会议大厅改建工程的组织机构提出 8 周内交出完整产品的要求下，用了 4 周时间就完成了满足工程要求的设计、试制、测试及最后提交工厂生产的全部任务，在解决联邦议会全体会议大厅的声学问题中争得了一定的地位。由于理论计算与实测结果一致，还可以根据两者之间的比较来检验穿孔板实际加工后的规格。图 6(a)、(b)是两块板的实测和计算的吸声系数的比较。图中的两条曲线吻合得不是很好。调整计算程序中的参数：对图 6(a)，孔径；对图 6(b)，孔距，得图 7(a)、(b)的结果，两条曲线完全吻合，由此可知：图 6(a)中的实测用板的孔径比设计的大了，而图 6(b)的实测板的孔距比设计的却小了。用机械测量方法验证，板的实际规格和图 7 中表示的一致。



$t = 2\text{mm}; d = 0.6\text{mm}; b = 6\text{mm};$
 $D = 50\text{mm}; p(\%) = 0.78.$

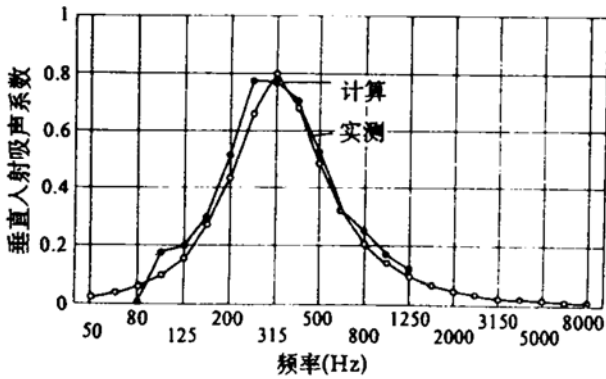
(a)板 1 实测结果



$t = 5\text{mm}; d = 0.55\text{mm}; b = 3.5\text{mm};$
 $D = 50\text{mm}; p(\%) = 1.94.$

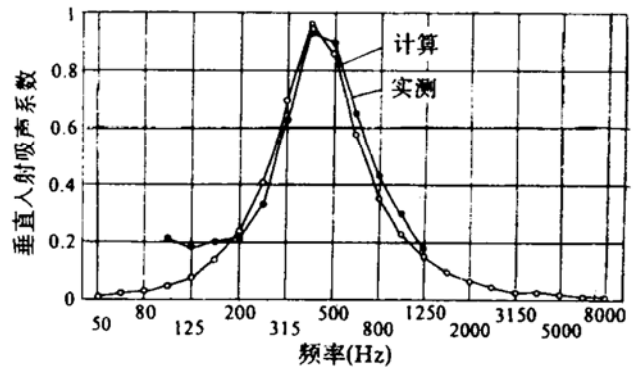
(b)板 2 实测结果

图 6



$t = 2\text{mm}; d = 0.5\text{mm}; b = 6\text{mm};$
 $D = 50\text{mm}; p(\%) = 0.55.$

(a)板 1 计算修正



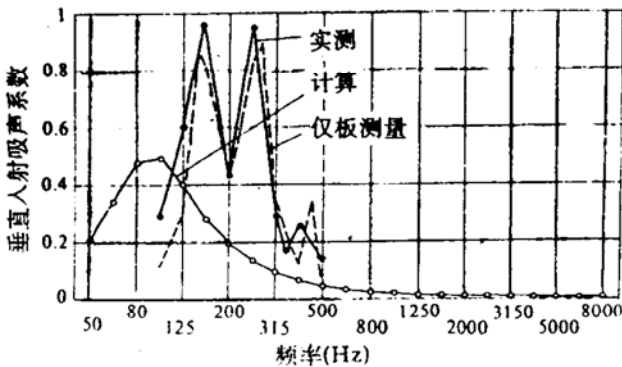
$t = 5\text{mm}; d = 0.55\text{mm}; b = 3.52\text{mm};$
 $D = 50\text{mm}; p(\%) = 1.93.$

(b)板 2 计算修正

图 7

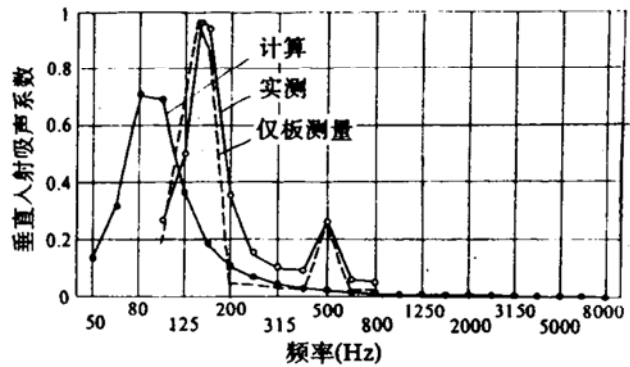
2 板振动的影响

如上所述, 在微穿孔板吸声构造的计算中, 都未考虑板本身的振动。图 8 中的一组曲线给出了在板振动影响下的各种情况:



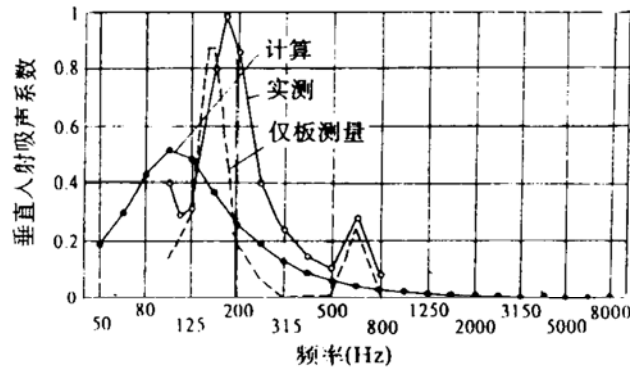
$t = 0.3\text{mm}; d = 1\text{mm}; b = 45\text{mm};$
 $D = 100\text{mm}; p(\%) = 0.04.$

(a)板振动影响 1



$t = 0.8\text{mm}; d = 2\text{mm}; b = 65\text{mm};$
 $D = 100\text{mm}; p(\%) = 0.07.$

(b)板振动影响 2



$$t = 1\text{mm}; d = 1\text{mm}; b = 30\text{mm}; D = 100\text{mm}; p(\%) = 0.09.$$

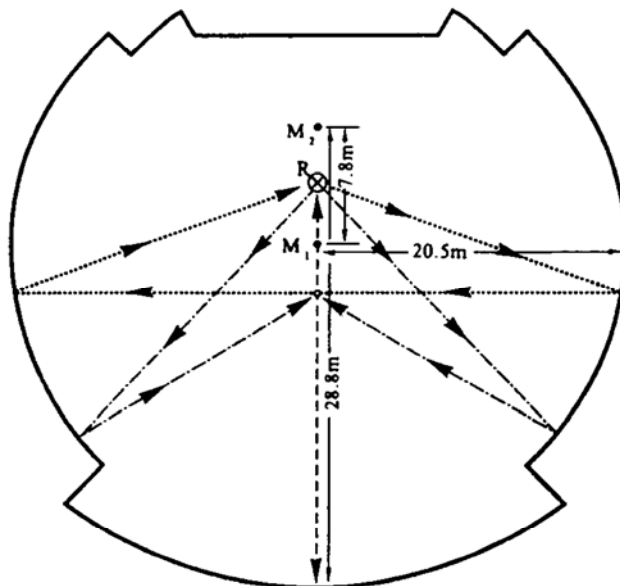
(c)板振动影响 3

图 8

可以注意到，图 8 中给出的各种微穿孔板的穿孔率都已小于 0.1%。板共振系统与微穿孔板吸声构造共振系统之间的关系将在另一文中讨论。

三、透明的吸声构造

玻璃墙面，圆形或多边形的大厅，对建筑学或建筑光学来说，也许有它独特的优点，但是却往往会因此而引起声学上的问题。特别是对于要求听闻条件好的大厅，有可能会因此产生不得不停止使用的严重后果。德国联邦议会全体会议大厅就是一例。大厅平面如图 9 所示。



M_1 : 圆形侧墙的中心点

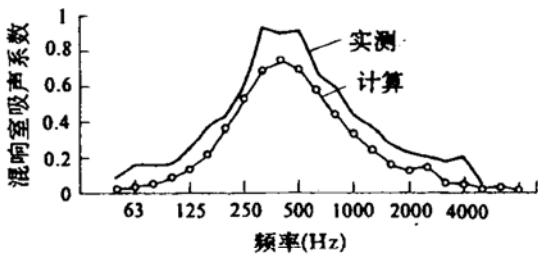
M_2 : 圆形后墙的中心点

R : 讲台

图 9 波恩新议会大厅平面

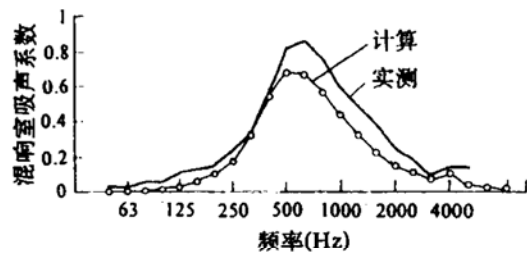
要解决因为周围的玻璃墙面的声反射使扩声系统不能正常工作的问题，而同时又要保持原建筑物风格，利用玻璃或有机玻璃的微穿孔板吸声构造，是个好的解决方案。根据建筑设计的要求，板的厚度不能小于 5mm。有效频率范围为 250Hz 以上（在此频率以下由系统本身解决）。

图 10 为一种有机玻璃 (Plexiglas) 微穿孔板吸声构造在混响室中的测量结果和计算值的比较。



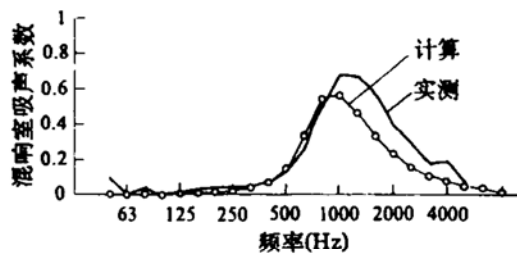
$t = 5\text{mm}; d = 0.55\text{mm}; b = 3.5\text{mm};$
 $D = 100\text{mm}; p(\%) = 1.94.$

(a)



$t = 5\text{mm}; d = 0.55\text{mm}; b = 3.5\text{mm};$
 $D = 50\text{mm}; p(\%) = 1.94.$

(b)



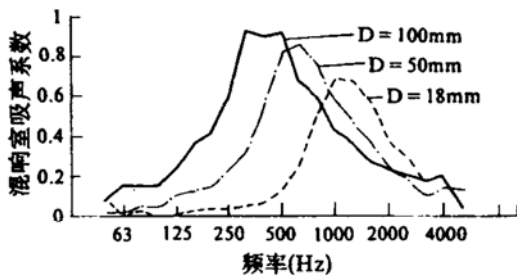
$t = 5\text{mm}; d = 0.55\text{mm}; b = 3.5\text{mm}; D = 18\text{mm}; p(\%) = 1.94.$

(c)

图 10 混响室中的测量结果和计算值的比较

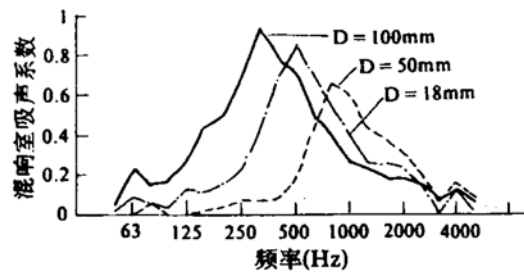
比较结果表明, 混响室中测得的吸声系数频率特性曲线比计算曲线的右侧更向右(高频)移动; 曲线的左侧(低频)则基本不变。整个吸声频段向高端展宽, 吸收峰值也相应加大。

图 11(a), (b)为两种不同规格的微穿孔板吸声构造在空腔不同条件下, 以混响室法测得的吸声系数。



$t = 5\text{mm}; d = 0.8\text{mm}; b = 6\text{mm};$
 $p(\%) = 1.4.$

(a)

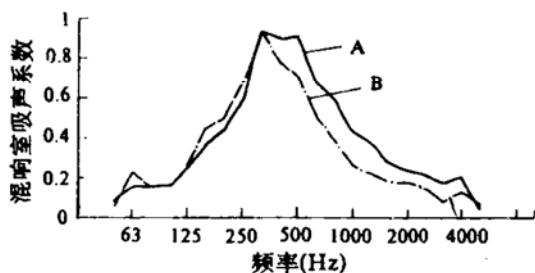


$t = 5\text{mm}; d = 0.8\text{mm}; b = 6\text{mm};$
 $p(\%) = 1.4.$

(b)

图 11 在混响室中测得的吸声系数

图 12 为上述两种微穿孔板, 当板后空腔厚度相等时, 混响室中测出的吸声系数的比较。



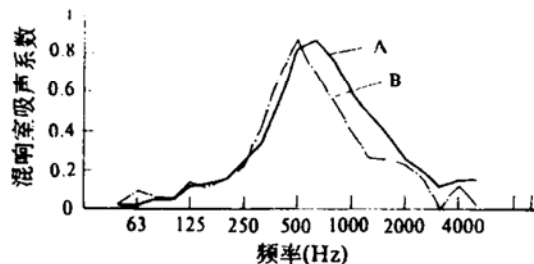
A: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.55\text{mm}$; $b = 3.5\text{mm}$;

$D = 100\text{mm}$; $p(\%) = 1.94$.

B: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.8\text{mm}$; $b = 6\text{mm}$;

$D = 100\text{mm}$; $p(\%) = 1.4$.

(a)



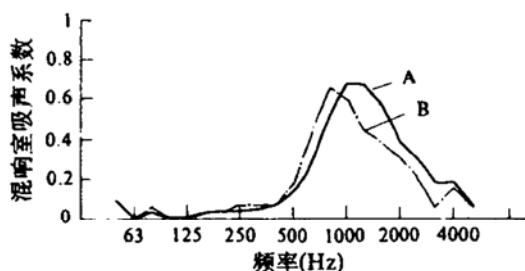
A: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.55\text{mm}$; $b = 3.5\text{mm}$;

$D = 50\text{mm}$; $p(\%) = 1.94$.

B: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.8\text{mm}$; $b = 6\text{mm}$;

$D = 50\text{mm}$; $p(\%) = 1.4$.

(b)



A: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.55\text{mm}$; $b = 3.5\text{mm}$; $D = 18\text{mm}$; $p(\%) = 1.94$.

B: $t = 5\text{mm}$; $d = 0.8\text{mm}$; $b = 6\text{mm}$; $D = 18\text{mm}$; $p(\%) = 1.4$.

(c)

图 12 空腔不同时吸声系数

由图 11 和 12 可看出:

1. 同一种微穿孔板, 板后空气层加大时, 按吸声系数最大值的一半定义的相对吸声频带宽度几乎不变 (图中实例约为 2 倍频程), 正如文献 [1、2] 中所述, 吸声频带宽度决定于板本身的声阻率与声抗率之比, 即: r/m 。

2. 同一种微穿孔板, 板后空气层厚度不同时, 吸声系数的最大值, 将随空气层的加大而增加。

3. 空气层加大的主要效果, 是吸声曲线的左侧 (低频端) 更向左移动。

4. 由图 12 看出, 板的声性能 (r, m) 变化, 主要引起吸声曲线的右侧 (高频段) 发生变化, 缩小微穿孔板的孔径(d)、孔距(b), 可得到使吸声曲线向高频段扩展的效果。

因此, 要取得低频段的展宽, 就要牺牲空间; 而要想得到更多的高频段的声吸收, 则需要付出更多的投资: 第一种微穿孔板每平方米的孔数为 28,000; 而第二种微穿孔板每平方米的孔数却是 81,000 个。

为适应联邦议会全体会议大厅改建的声学要求, 设计了半圆柱形的微穿孔板吸声结构。图 13 为该构件的照片。在混响室中的测量结果如图 14 所示。

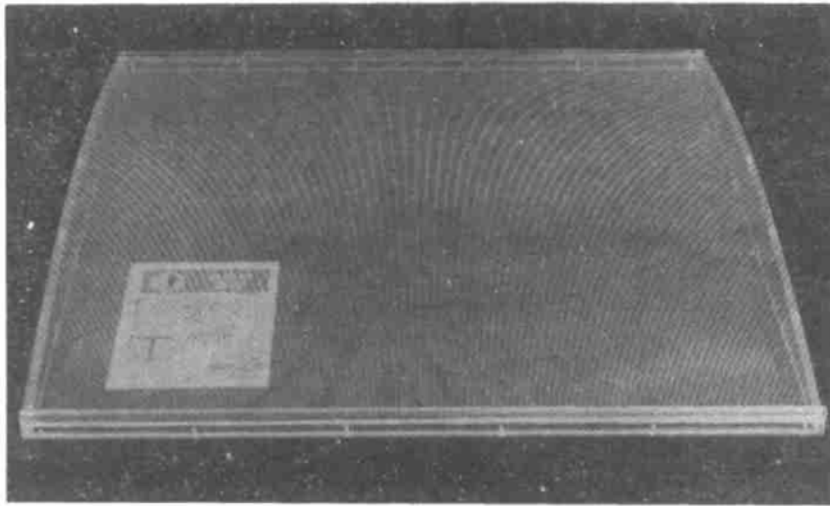


图 13 透明的有机玻璃凸面吸声构造

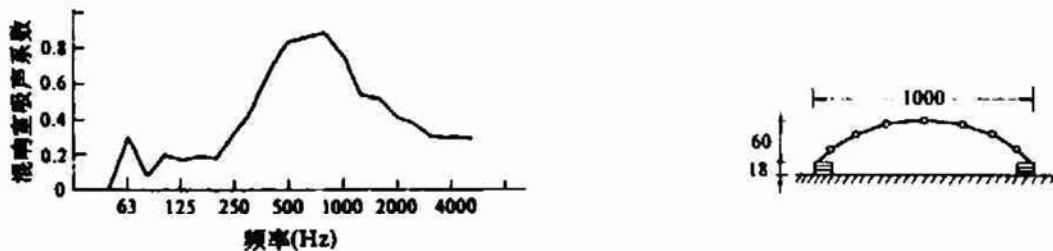


图 14 混响室中测得的吸声系数

图 14 表明, 这种构造的吸声系数比单一空腔厚度的有明显改善, 在其吸声系数较小的高频段 (2000Hz 以上) 则可由于它的弧形表面而改变垂直入射反射声方向的效果(该大厅中声源向墙面的人射, 主要是垂直向的)。

在大厅的改建设计中采用了这种吸声构造, 外形作了一些改变, 如图 15 所示。

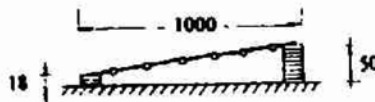


图 15 透明的斜面有机玻璃吸声构造

四、结 束 语

本项目是在德国科研部 (BMFT) 及德国航空航天局 (DLR) 的支持下完成的, 在此向他们致谢。

参 考 文 献

- [1] 马大猷, “微穿孔板吸声结构的理论和设计”, 中国科学, 1975年第1期。
- [2] Maa Dah-You, “Wide-band Sound Absorber Based on Microperforated Panels”, inter-noise '84, Honolulu, USA.
- [3] W. Frommhold, J. Hunecke, “Impedanzmessungen im Rohr bei tiefen Frequenzen”, DAGA 93 - Frankfurt am Main(1993).