

## 甘蔗纖維板穿孔吸声的初步研究<sup>\*1)</sup>

孙广荣 魏荣爵

(南京大学物理系)

### 提 要

本文对国内普遍采用的甘蔗纖維板吸声材料的吸声性质作了初步的研究,而重点則是由这种材料制成的穿孔吸声结构。我們的实验指出这种材料存在着“机械式的振动”和薄板式的共振吸收;而这种材料制成的穿孔结构的共振吸收峰,較一般胶合板等所制成的同类型的结构較为平坦,但在测量的频率范围以内总吸声值要大一些。对文献中提出的两种新穿孔结构也作了简短的探讨。

本文主要给出了管测法的实验结果,混响法的结果只作为参考。对于各种情况下的测量结果主要是从比声阻率的概念作了理论说明。結論中还指出使用这种材料制成的吸声结构的优缺点。

关于各种类型的穿孔吸声结构,文献中已有过许多讨论<sup>[1-7]</sup>,但所涉及的结构只限于用金属板或木质胶合板作为表面穿孔材料。至于以穿孔纖維板制成的吸声结构,由于它可以节省木材和金属,在我国还具有較大的经济意义,我們认为值得探讨。

我們对甘蔗纖維板制成的吸声结构作了初步研究。为了要求对于这类结构吸声机理了解得较为清楚,并便于对实验结果的分析,我們首先对沒有穿孔的材料也进行了一些测量。

### 一、甘蔗纖維板吸声材料的表面声阻抗和吸声系数

纖維板这类材料结构紧密而不均匀,不能很好地满足多孔性吸声材料的理论<sup>[1]</sup>;另一方面,它們还兼具弹性薄板和軟順性吸声材料的某些性质。然而要根据这类材料的一些基本性质从理论上精确地计算出它們的声阻抗和吸声系数是复杂又不切实际的。我們还是从实验方法着手为好。

图1中的虚线就是用管测法测得的两块甘蔗纖維板(紧贴刚性壁)的表面法向比声阻抗率与频率的关系;图2是与之相应的吸声系数与频率的关系。图1中同时给出了厚度为2厘米的胶合玻璃棉的阻抗曲线,以便比较。我們可以看到有下面几个特点:

1. 甘蔗纖維板的声阻的数值远大于玻璃棉的声阻值。这是易于理解的,因为这种材料结构紧密,流阻大。

\* 1961年12月8日收到。

1) 本文根据《建筑声学选集》(建工部建研院編,1960年10月)上孙广荣的文章和1960年南京大学“五·二〇”科学报告会上同一作者的报告整理而成。本文的实验材料是“兆申昌”厂生产的甘蔗纖維板;对于“穗康”厂出品的稻草纖維板等基本上有相同的性质。

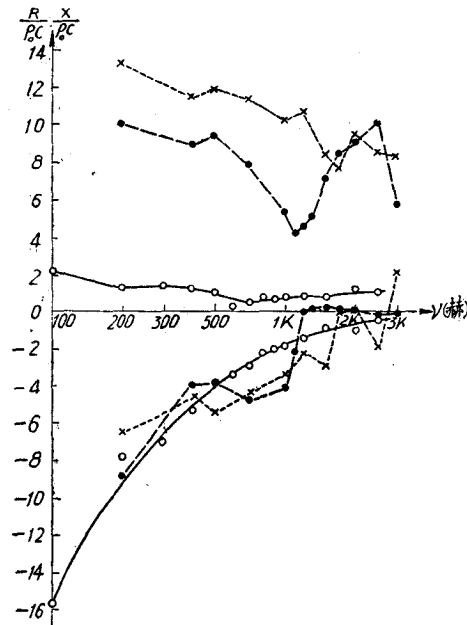


图1 甘蔗纤维板和玻璃棉的比声阻抗率

--- 厚度为 1.4 厘米的甘蔗纤维板(制成样品 I)  
 ..... 厚度为 1.8 厘米的甘蔗纤维板(制成样品 II)  
 —— 厚度为 2 厘米, 密度 0.1 克/厘米<sup>3</sup> 的胶合玻璃棉.

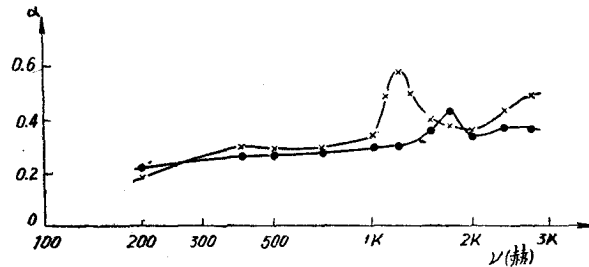


图2 甘蔗纤维板的吸声系数

圆点“●”是厚度为 1.8 厘米的甘蔗纤维板  
 叉号“×”是厚度为 1.4 厘米的甘蔗纤维板.

2. 甘蔗纤维板的声阻、声抗(绝对值)都随频率增高而显著地减小, 并不规则的起伏。其中较显著的低谷是与这项材料本身的“机械振动”<sup>[8]1)</sup>(测量管的直径是 10 厘米)有关; 其它可能是由于材料的不均匀结构。而多孔材料理论上的声阻, 如玻璃棉, 在频率低于 15 千赫时是常数。两种不同厚度的声抗也表现出同类型的差异; 在纤维板的声抗起伏中存在着趋近于零的极小值, 这说明有共振吸收的现象。

3. 这种材料的吸声系数由于流阻大, 因此在 300 赫以上吸声系数随频率的增加就很小了。两种样品分别在 1,200 赫和 1,700 赫处出现共振吸收峰, 这正对应于阻抗曲线上声

1) 引起这种振动的原因很复杂, 它与材料的性质以及它的安装情况有关, 同时也包括类似于“板振动”的简正振动方式。

抗趋于零和阻的低谷处。这种由“机械振动”所引起的共振吸收是与边界条件有关的。

## 二、材料与刚性壁间留有空气层时的吸声系数

通过实验，我们发觉这种纤维板依然存在着薄板式的共振吸收<sup>[7]</sup>，并且计算共振频率的公式也和刚性薄板一致的。图3是1.3厘米厚的甘蔗纤维板的吸声特性，当与刚性壁间留有空隙时，这种共振吸收发生在500赫以下，这与计算（材料密度约为0.19克/厘米<sup>3</sup>）结果基本上相符。图4是2.8厘米厚的甘蔗纤维板的吸声特性。因厚度大，这种共振吸收在图上就不太明显了（图中“L”是材料后面空气层的厚度）。

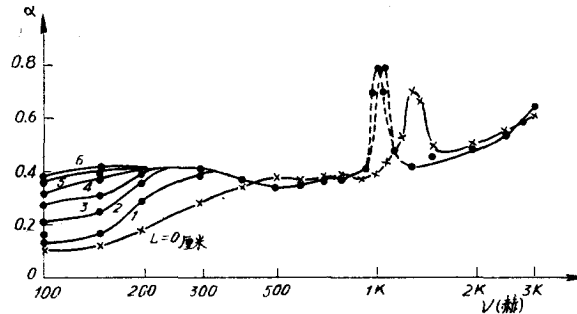


图3 1.3厘米厚的甘蔗纤维板与刚性壁间留有不同空隙L时的吸声特性(管测法)。

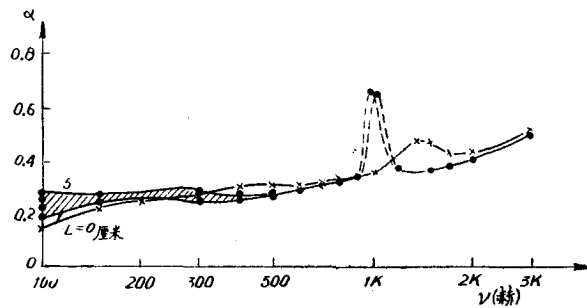


图4 2.8厘米厚的甘蔗纤维板与刚性壁间留有不同空隙L时的吸声特性(管测法)。

作为“机械振动”的共振峰，则发生在1000赫附近。L=0的共振峰离其余的为远，这是材料的机械振动受到了刚性壁的影响，而实际上L又不严格为0，因而共振峰位置移高了，因为这种振动与边界条件（包括边缘的一切情况）有关。这也就是管测法的重要缺点和局限性。

## 三、纤维板穿孔结构

我们研究如图5所示的纤维板穿孔吸声结构。在低频时，即满足  $kL \ll 1$  的条件下（ $k = \omega/c$ ， $\omega$  为圆频率），我们仍然可以应用一般穿孔结构的公式<sup>[1,7]</sup>，共振频率是

$$\nu_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{l_c L}}, \quad (1)$$

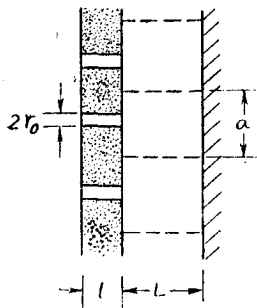


图5 穿孔结构剖面图

式中  $l_c = l + \delta, \delta = \frac{16}{3\pi} r_0$ , 是相应于辐射抗的修正项;  $P$  是穿孔百分率. 共振吸收峰的高度是

$$(\alpha_0)_{res} = \frac{4\mu}{(1+\mu)^2}, \quad (2)$$

(2)式中  $\mu = \frac{R}{n\rho_0 C}$  是比声阻率,  $\frac{R}{n}$  是比声阻,  $n$  是单位面积穿孔数. 共振峰的宽度以倍频程数“ $O$ ”表示, 当  $O$  较小时:

$$O = 1.442 \sqrt{GL(1+\mu)}, \quad (3)$$

(3)式中  $G = \frac{nS}{l_c} = \frac{n\pi r_0^2}{l_c}$ . 我们看到  $(\alpha_0)_{res}$  与  $O$  都与  $\mu$  有很大的关系.

在共振吸收峰以外的高频部分, 吸声的贡献主要是原来不穿孔的材料表面比声阻抗的作用.

**1. 管测法的实验结果**

管子直径 10 厘米, 我们把图 1 中两块材料做成两种样品: 样品 I 的厚度为 1.4 厘米, 穿孔率 2.25%, 穿孔直径 0.5 厘米, 孔排成方形图案, 以空隙  $L$  为参数的吸声系数与频率关系的实验结果见图 6 所示; 样品 II 的厚度为 1.8 厘米, 穿孔率 4%, 穿孔直径 0.5 厘米, 孔也排成方形图案, 相应的吸声系数曲线的实验结果见图 7 所

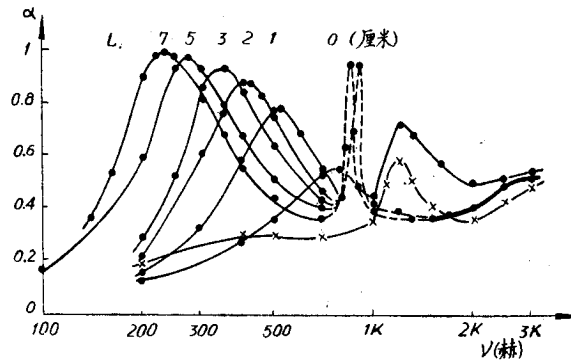


图6 纤维穿孔板(样品 I)管测法的吸声曲线;打“×”的曲线是不穿孔的纤维板紧贴刚性壁的吸声特性.

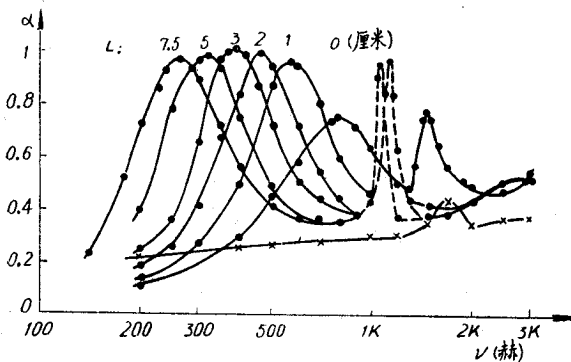


图7 纤维穿孔板(样品 II)管测法的吸声曲线;打“×”的曲线是不穿孔的纤维板紧贴刚性壁的吸声特性.

示。

低頻的共振吸声峯是显著的,下一节将对它作专门的討論。2,000 赫以上的高頻段的吸声系数要比不穿孔的情形要高,但因测量只到 3,000 赫为止,因此还不很显著。在 1,000 赫附近的尖銳的吸收峯是  $L = 1-7$  厘米情况下的“机械振动”的共振吸收,而在  $L = 0$  的情形,这个峯沒有这样尖銳,且峯的位置与不穿孔情况下的共振峯的位置差不多。

**2. 混响室的測量結果** 我們进行測量的混响室是由一个地下室临时改装成的,体积只有  $4.2 \times 3.5 \times 2.6$  米<sup>3</sup>,平均混响时间在 3 秒左右;扩散也比较差。所用的甘蔗纤维板的規格如下:材料面积  $4.2 \times 2.2$  米<sup>2</sup>,厚度 1.4 厘米,穿孔率 2.7%,穿孔直径 0.5 厘米,(我們称它为样品 III)鋪設在混响室的一个面上。我們这一系列的測量目的也无非是希望得一些定性的結果,以資参考。

图 8、9、10 是空隙分别为 2、5、10 厘米时的实验結果。因为在实际建筑施工时常把穿孔板釘在  $45 \times 90$  厘米的木筋上,所以我們的实验有釘木筋与不釘木筋两种情形。在图上也同时給出了沒有穿孔的同一种纤维板的吸声特性,以便比較。

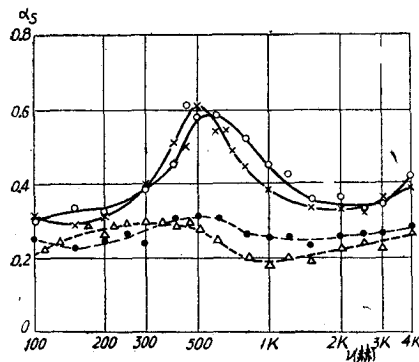


图 8 样品 III 的吸声特性(混响法)之一。  
 圈点实綫:空隙  $L = 2$  厘米,后釘木筋。  
 ×号实綫:空隙  $L = 2$  厘米,不釘木筋。  
 三角虛綫:空隙  $L = 2$  厘米,沒有穿孔,  
 圓点虛綫:不穿孔、緊貼牆壁。

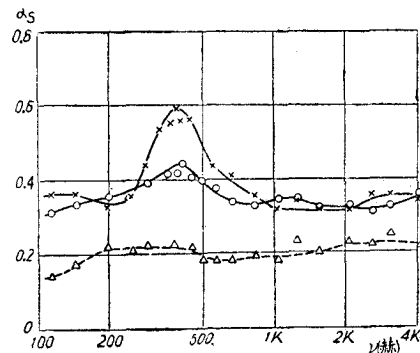


图 9 样品 III 的吸声特性(混响法)之二。  
 圈点实綫:空隙  $L = 5$  厘米,后釘木筋。  
 ×号实綫:空隙  $L = 5$  厘米,不釘木筋。  
 三角虛綫:空隙  $L = 5$  厘米,沒有穿孔。

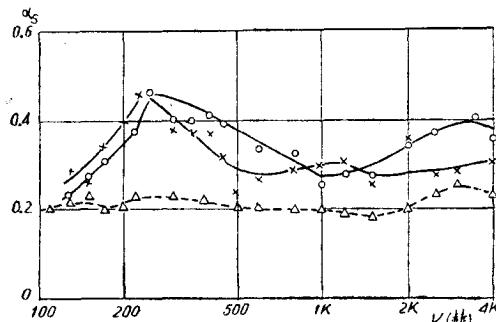


图 10 样品 III 的吸声特性(混响法)之三。  
 圈点实綫:空隙  $L = 10$  厘米,后釘木筋。  
 ×号实綫:空隙  $L = 10$  厘米,不釘木筋。  
 三角虛綫:空隙  $L = 10$  厘米,沒有穿孔。

#### 四、纖維穿孔板低頻段共振吸声的討論

我們先研究图 6 和图 7 的管測法的实验結果。

表 1 对应于图 6 的  $\nu_{res}$  值

L (厘米)	$\nu_{res}$ (赫)	
	实验值	計算值
1	510	610
2	410	430
3	350	350
5	270	270
7	230	230

表 2 对应于图 7 的  $\nu_{res}$  值

L (厘米)	$\nu_{res}$ (赫)	
	实验值	計算值
1	570	740
2	460	520
3	390	425
5	320	330
7.5	265	270

1. 实验測得的共振頻率的位置, 与用(1)式計算所得的結果相比較, 列于表 1 和表 2. 在  $L$  較大时, 两者能很好地相一致. 而在  $L$  較小时, 实验值与計算值相差較大. 这是因为(1)式是在波长甚大于“共鳴器”的綫度时才成立, 因此当  $L$  小时, 共振頻率提高, 波长短了, 不能很好地滿足(1)式成立的条件了.

2. 图 7 的峯值都接近于 100%, 图 6 的峯值則随  $L$  增大而增至 100%. 由实验測得的  $\mu$  值再用(2)式所計算得到的  $(\alpha_0)_{res}$  值与直接測到的吸收峯值是一致的. 这里把样品 I 的  $\mu$  与  $(\alpha_0)_{res}$  值列于表 3; 因为  $\mu$  值都大于 1, 所以  $\mu$  值愈大,  $(\alpha_0)_{res}$  值愈小<sup>[7]</sup>. 样品 II

表 3 样品 I 的  $\mu$  值和  $(\alpha_0)_{res}$  值

L (厘米)	$\mu$ (实验值)	$\frac{4\mu}{(1+\mu)^2}$	$(\alpha_0)_{res}$ (实验值)
1	2.8	0.78	78%
2	2.3	0.84	88%
3	1.7	0.93	93%
5	1.3	0.98	97%
7	1.1	1.00	99%

情形的  $\mu$  值則在 1 兩側. 从吸收峯的高度來說, 它是优于胶合板的穿孔結構的. 我們可以后者在相近的穿孔率和  $L$  的情况下所測得数据相比較(参考文献[7]中的图 11 及图 13). 測量說明, 纖維板穿孔結構的比声阻率是較易地調节到 1 的附近.

3. 要从实际曲綫上估計共振吸收峯的寬度, 則我們应用下面的算式比較方便:

$$O = \log_2 \frac{\nu_2}{\nu_1}, \quad (4)$$

(4)式中  $\nu_1, \nu_2$  为共振吸收曲綫上吸收系数降至峯值的二分之一时的左右两个頻率讀数. 所有曲綫的倍頻程数  $O$  均在 1.3 左右 (即  $\frac{\nu_2}{\nu_1} = 2.5$ ) 如  $L$  小, 則  $O$  稍为大一些. 这个倍頻程数要比一般胶合板穿孔結構大些, 如文献[7]的图 13(厚 0.35 厘米的三合板, 穿孔率 5%, 孔直径 0.48 厘米; 空腔  $L$  分别为 2.5、5、7.5 厘米三种情形) 中的吸收峯倍頻程数在 1 左右. 金属板穿孔結構的  $O$  值当然更小了. 这可由公式(3)得到部分解释.

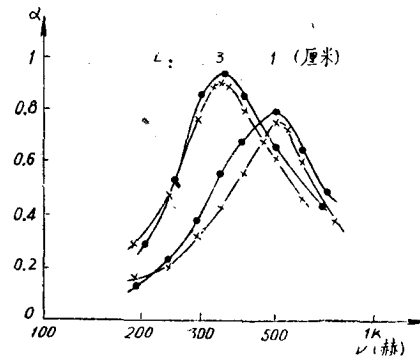


图 11 纖維穿孔板后貼一层龙头細布后对吸声的影响  
圓点“●”是样品 I 的吸声特性;  
叉号“×”是加一层龙头細布后的吸声特性.

4. 如果在穿孔板后衬一层龙头细布, 则将会增加系统的声阻。这对于原来系统的  $\mu$  值小于 1 的穿孔结构是有利的<sup>[7]</sup>, 共振峰宽度的增加是显著的, 并能提高  $(\alpha_0)_{res}$  的值。但对甘蔗纤维板穿孔结构来说, 就不一定这样, 例如表 3 所列,  $\mu$  值已大于 1, 同时样品厚度也较通常穿孔板为大, 因此增加一层龙头细布对吸收并不有利, 见图 11。实验的结果表明, 这样的处理完全是多余的。

由于混响室条件的限制, 我们从所获得的测量结果(8—10)而作较细致的分析是不相宜的, 但我们也可以看出以下两点: 1) 穿孔结构的共振吸收的频率与用(1)式所计算的结果基本上相符, 其位置也随  $L$  增大而向低频移动; 2) 与墙壁间留有空隙而没有穿孔的纤维板在低频段也给出“薄板式”共振吸收, 频率在 200—700 赫附近。

## 五、高频段的吸收特性

图 6 和图 7 上管测法的结果, 纤维板穿孔结构在高频段(高于 2,000 赫)的吸声系数比没有穿孔时紧贴在刚性壁上的吸声值稍为大一些, 但不很显著。而混响室的测量结果表明了穿孔后对高频吸声也有显著的增加, 这是由于穿孔后增加了材料表面积和有效孔率的结果(当然这部分测量是还不够全面的)。

## 六、空气层 $L$ 连续改变的情形

为了达到在较宽的频程内都有较高的吸声系数而选择性又不是很强的吸声目的, 我们考虑了一种穿孔板与墙壁间的空隙  $L$  连续改变的吸声结构, 即穿孔板与墙壁不平行而是装成一定的倾斜角度, 由于空气层的厚度是连续改变的, 这样就可能使共振频率分散在一定频段内了。图 12 就是这样一种装置(倾角是  $2^\circ$  多些,  $L$  是从 2—10 厘米)的混响室的测量结果, 结果似乎表明这种考虑是可以成功的。

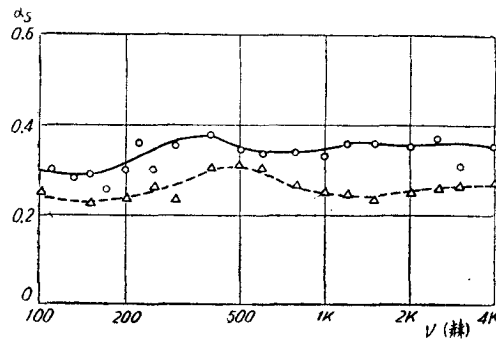


图 12 圈点实线: 样品 III, 空隙  $L = 2-10$  厘米连续改变的吸声特性(混响法), 三角虚线: 纤维板紧贴刚性墙的吸声特性(混响法)。

## 七、穿孔板前再加一层玻璃棉的吸声结构

在图 6 的甘蔗纤维板前再加一层密度为 0.1 克/厘米<sup>3</sup> 的玻璃棉, 这种结构的吸声系数(管测法)见图 13 所示。低频段是穿孔结构的共振吸声作用; 高频段(高于 1000 赫)则主要是玻璃棉的吸声作用。在图 13 的第三种情形,  $\alpha$  值在 300 赫以上均高于 70%。这无

論是比厚度相近的玻璃棉<sup>[7]</sup>或单独的纖維板穿孔結構的吸声特性都要好些。因此,这种类型的吸声結構值得重視。

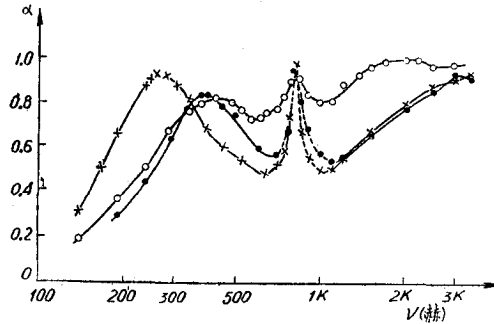


图 13 在图 6 吸声結構(样品 1)前再加一层玻璃棉的吸声特性(管測法)。

×号实綫:空隙  $L = 5$  厘米,玻璃棉厚 3 厘米。

圓点实綫:空隙  $L = 2$  厘米,玻璃棉厚 3 厘米。

圈点实綫:空隙  $L = 2$  厘米,玻璃棉厚 5 厘米。

虛綫部分为纖維板作“机械振动”的共振吸收峯。

在玻璃棉制成的楔形結構后加共振吸收的复合吸声結構,已为西德 Göttingen 大学消声室<sup>[9]</sup>所采用。莫斯科大学消声室也是采用以圓錐形多孔材料与穿孔結構組合起来的复合吸声結構。他們的研究<sup>[10]</sup>指出,穿孔結構的参量的选择,对吸声性能有很显著的影响。关于楔形吸声結構的研究,已做了許多实验測量工作<sup>1)</sup>。根据我們的初步結果得出:在楔形穿孔板外面鋪一层玻璃棉的吸声結構,比实心的楔形玻璃棉可以有更好的吸声特性。

## 八、結 語

綜合以上我們所測得的結果,可以得到下面的几点結論:

1. 象甘蔗纖維板这种吸声材料,也具有弹性薄板的共振現象。当緊貼墙壁按装时,低頻吸声系数很低<sup>[5]</sup>,如果适当地留有空隙,則可利用这种共振吸收,因而增大低頻的吸声系数。

2. 由甘蔗纖維板制成的穿孔吸声結構具有下列的优点: a) 兼有較大的高頻吸声特性和利用穿孔結構控制低頻共振吸声的优点; b) 如果吸声結構的参数选择适当,則这种結構的共振吸收峯寬要比同类型的胶合板或金属板的穿孔結構的共振峯寬要大,即“O”大,故总吸声大; c) 因为纖維板比胶合板或金属板厚,因此一般情况下,在相同的共振頻率要求下,纖維板穿孔結構的空隙  $L$  可以小很多。这从公式(1)可以看出,因此能节省房屋的使用空間。如 0.35 厘米厚的胶合板,穿孔率为 5%,則欲获得 170 赫的共振吸收,空隙  $L$  需留 140 多厘米(如在南京《曙光》电影院的音質設計中,对于低頻的吸声采用了胶合板穿孔吸声結構,胶合板与墙壁的距离最大达 90 厘米,在一定程度上影响到房屋的使用空間)。而若在同样情况下,以 1.4 厘米厚的纖維板代替胶合板,則  $L = 35$  厘米就够了。

3. 纖維板的价格比同样面积的胶合板还要便宜,符合經濟原則。

1) 1962 年南京大学“五、二〇”科学討論会上沙家正同志曾作了《楔形吸声結構声学性质的研究》的报告;此項工作正在繼續进行中。



4. 在某一定的吸声要求下, 穿孔板和刚性壁间不平行的吸声结构以及穿孔板上加铺一层多孔性的吸声材料的吸声结构, 都具有实际意义。特别是后者, 值得我们在理论上作进一步研究, 并向楔形穿孔板与多孔性材料组合的复合结构方向发展。

当然, 这种纤维板本身也存在着不能防潮、易于变形, 产品规格难以严格控制等等缺点。但是, 我们认为, 这种材料既已为吸声处理所广泛采用, 则进一步如何使这种材料发挥穿孔吸声结构的吸声效果, 还是一个值得注意的方向。本文只提供初步的测量结果, 特别是混响室的测量尚待继续。

### 参 考 文 献

- [1] (A) Zwicker, C. and Kosten, C. W., *Sound Absorbing Materials* (Elsivier, 1949), (B) Richardson, E. G., *Technical Aspects of Sound I* (Elsivier, 1953), Chap. 4.
- [2] Bolt, R. H., *J.A.S.A.*, **19** (1947), 917.
- [3] Smits, J. M. A. and Kosten, C. W., *Acoustica*, **1** (1951), 114.
- [4] Ingård, U. and Bolt, R. H., *J.A.S.A.*, **23** (1951), 533.
- [5] Ingård, U., *ibid.*, **26** (1954), 151.
- [6] Becker, E. C. H., *ibid.*, **26** (1954), 798; **28** (1956), 1068.
- [7] 魏荣爵、余崇智, *物理学报*, **13** (1957), 365.
- [8] Mariner, T., *Noise Control*, **2** (1956) No. 6, 25.
- [9] Meyer, E., Kurtze, G., Severin, H. und Tamm, K., *Acustica*, **3** (1953), 409.
- [10] К. А. Велижанина, С. Н. Ржевкин, *Акуст. Ж.*, **III** (1957), 23.

## PRELIMINARY STUDIES OF PERFORATED "SUGAR-CANE FIBERBOARD" SOUND ABSORBERS

SUN KUAN-YUNG, WEI YUNG-CHIO  
(Department of Physics, Nanking University)

### ABSTRACT

This paper is a preliminary report on acoustical studies of the sugar-cane fiberboard, emphasis being made for cases in which the fiberboard was perforated.

Experiments with the non-perforated fiberboard indicated the existence of "mechanical vibration" determined by its boundary conditions including peripheral constraint, as well as of resonance absorption of thin panels backed by an air-space. When the fiberboard was perforated, resonance peaks became less prominent but the over-all absorption was higher than ordinary perforated panel absorbers previously investigated. In addition, two new types of perforated sound absorbers were briefly discussed.

For most cases theoretical interpretations were given, especially on the basis of specific acoustic resistance, and both advantages and disadvantages for these fiberboard sound absorbers were discussed in the conclusion.