

提高轻板隔墙的隔声性能

王季卿 顾樵国

(同济大学声学研究室)

1982年5月12日收到

影响轻板隔墙隔声性能的因素是多方面的。本文着重研究了降低龙骨的传声、附加构造的作用以及墙板的选择等方面。文中通过理论分析和实验比较,说明这些措施对提高轻板隔墙的隔声性能是有效而可行的。

在当前住宅建设中,推广轻板隔墙的一个主要障碍是它的隔声性能差,往往满足不了一般的隔声要求。(最近颁布的我国住宅隔声标准,其二级要求是达到隔声指数 I_a-45)。从这类墙体的隔声构造来分析,其影响因素主要有三个方面:(1)龙骨的声桥作用,(2)墙板的物理性能(重量、厚度等)以及它的装置情况,(3)墙板之间的空腔传声作用。为了探讨提高轻板隔墙的隔声,作者之一曾进行过一系列的实验研究^[1],本文则进一步分析研究有关龙骨与墙板的问题。

一、减少龙骨的传声

声音通过双层墙的传透除了通过空腔透射以外,有相当部份的声能是通过两层墙板之间的声桥——龙骨来传透的,在中、高频尤其突出。Heckl^[2]曾指出这里存在着一个分界的所谓声桥频率 f_B 。当高于 f_B 时,通过声桥所传透的声能超过了通过空腔所透射的声能,且随着频率升高,后者几乎可以忽略不计。因此减少龙骨的传声作用,可大大提高双层墙的中、高频隔声性能。

1. 以钢龙骨取代木龙骨

许多实验结果表明^[1-3],在同样墙板构造条件下,钢龙骨双层墙的透射损失 TL 比木龙骨的要大得多(表 1)。这是因为木龙骨是一实心体,故属于刚性声桥,当墙的一侧受到声波作用时,

在龙骨两侧的振动几乎相同。而钢龙骨是由薄壁(通常为 0.7 到 1.0mm 厚的铁皮)成型的 U 字形构件组成,在它的断面上具有侧向的弹性作用,从而减弱了对振动的传递,于是提高了双层墙的隔声效果。因此我们称它为弹性声桥。

表 1 钢龙骨和木龙骨双层墙透射损失的比较

		二层板		三层板		四层板	
		I_a	$\overline{TL}$	I_a	$\overline{TL}$	I_a	$\overline{TL}$
12mm 石膏板 层墙,空腔双 填50mm 超细 玻璃棉	钢龙骨45×75	43	43	49	48	53	50
	木龙骨45×75	38	38	42	41	45	44
	隔声差值	5	5	7	7	8	6
11mm 水泥刨 花板 双层墙, 空腔无吸声填 料	钢龙骨50×70	43	42	51	47	53	50
	木龙骨50×90	39	37	44	43	50	47
	隔声差值	4	5	7	4	3	3

注: I_a ——隔声指数, $\overline{TL}$ ——100Hz 到 4000Hz 的 1/3 倍频带透射损失的平均值。

有关刚性声桥(木龙骨)双层墙的透射损失 TL 已有简单表达式可以预计^[4] (适用于 $f < \frac{1}{2} f_c$, 此时空腔内空气驻波共振基本已由吸声填料所消除):

$$TL = \begin{cases} TL_M & (\text{dB}) \\ TL_1 + TL_2 + 20 \lg(f \cdot d) - 29 & (\text{dB}) \\ TL_M + \Delta TL_M & (\text{dB}) \end{cases} \quad \begin{matrix} f < f_0 \\ f_0 \leq f < f_B \\ f \geq f_B \end{matrix} \quad (1)$$

式中, $TL_M = 20 \lg(Mf) - 48$ (dB) (质量定律),
 $TL_1 = 20 \lg(m_1 f) - 48$ (dB) (质量定律),

$$TL_2 = 20 \lg(m_2 f) - 48(\text{dB}) (\text{质量定律}),$$

$$\Delta TL_M = 10 \lg(b f_c) + 20 \lg(m_1 / (m_1 + m_2)) - 18(\text{dB}) \quad (\text{线声桥})$$

其中, $M = m_1 + m_2$, m_1 和 m_2 分别为两侧墙板的
面密度 (kg/m^2), f ——频率 (Hz), b ——线
声桥的间距 (m), f_c ——第二块墙板的临界频率
(Hz), d ——双层墙空腔深度 (m), $f_0 = \frac{1}{2\pi} \times$

$$\sqrt{3.8 \rho c^2 / m' d}, f_B = f_0 \cdot 10^{\left(\frac{\Delta TL_M}{40}\right)}, m' = 2m_1 m_2 / (m_1 + m_2), \rho \text{——空气密度 } (\text{kg}/\text{m}^3), c \text{——空气中声速 } (\text{m}/\text{s}).$$

至于弹性声桥(薄壁型钢龙骨)双层墙的透
射损失 TL 主要在 f_B 以上有所不同, 它的表达
式最近已由本文作者提出^[5]:

$$TL = TL_1 + TL_2 - 20 \lg K - 10 \lg(L / S f_c) + 101(\text{dB}), f \geq f_B \quad (2)$$

式中, K ——钢龙骨每单位长度的侧向等效刚
度(N/m) (对 1mm 厚 70mm 宽的钢龙骨, 由实

验得出其 K 值约为 $10^7 \text{N}/\text{m}$),

S ——试件的单面面积 (m^2),

L ——线声桥总长度 (m).

$$f_B \approx \frac{313 \times 10^4}{k d} \sqrt{\frac{S f_c}{L}} (\text{Hz}).$$

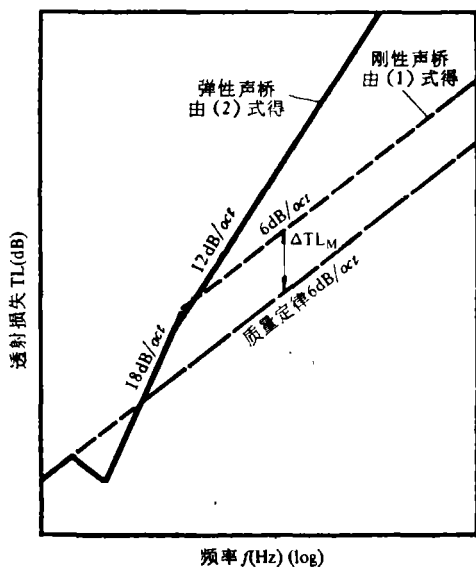


图1 弹性声桥(钢龙骨)和刚性声桥(木龙骨)双
层墙透射损失预计曲线的比较。

应用声学

由(1)和(2)式比较可知, 当频率高于 f_B 时,
刚性声桥双层墙的透射损失曲线是以 $6\text{dB}/$ 倍
频程的斜率上升, 而弹性声桥双层墙则以 $12\text{dB}/$
倍频程的斜率上升, 两者的差别很是明显 (图
1)。可见在同样墙板条件下, 采用型钢龙骨对提
高墙的隔声有利, 也是节约木材的一种良好措
施。

由(2)式可知, 要提高钢龙骨双层墙在 $f >$
 f_B 时的隔声性能, 除与墙的质量有关外, 还与龙
骨的侧向等效刚度 K 、每单位面积墙板上线声桥
(即钢龙骨) 的长度 L/S 和墙板的临界频率
 f_c 等因素有关。前两者涉及龙骨的截面设计和
龙骨的布置间距, 后者涉及墙板的物理性能及
其厚度。当已知这些量值时, 便可对提高墙的
隔声性能作出定量估计。

2. 降低钢龙骨的侧向刚度

既然钢龙骨双层墙的隔声优越性在于声桥
具有一定的弹性作用, 那末降低钢龙骨的侧向
等效刚度 k 显然对提高隔声是有利的。诸如减
薄型钢的厚度、加大龙骨腹板高度, 在龙骨的腹
板上镂空或采用“拉花”龙骨 (对墙内敷设管线
也提供了方便) 以及采用一些可增加侧向弹性的
异形截面等 (图2), 都会在一定程度上降低
龙骨的 K 值。但从墙体结构稳定性要求来看,
龙骨的 K 值不允许有较大降低。如果常用钢龙
骨的 K 值有可能降低 20% , 它对透射损失的提
高也不过 2dB 而已。因此只有在钢龙骨侧壁两
旁附加弹性钢垫片才是合理而有效的措施, 其
平均透射损失可有 5dB 或更大的提高。

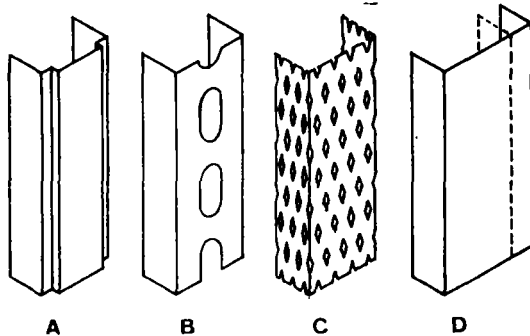


图2 降低钢龙骨侧向等效刚度 k 的几种措施示意图。

A. 异形截面, B. 腹板镂空, C. 拉花钢板, D. 增加腹板高度。

3. 龙骨上附加弹性阻尼垫条

在龙骨上附加弹性阻尼垫条是另一项简单而有效的隔声改进措施。表2所示为采用13mm厚软质纤维板作为垫条后对墙的隔声性能改进情况。这里垫条的作用主要有两个方面。一是垫条的弹性减弱了龙骨对振动的传递,并使原来构造的线声桥转变为以螺丝为中心的点声桥。二是垫条在龙骨和墙板之间由螺丝夹紧时,将成为有约束的阻尼层,而且作用在墙板的边角处,对降低墙板辐射噪声是比较有效的。还需指出,由于钢龙骨本身已具有一定的弹性,故垫条的作用对木龙骨墙更为明显。

表2 双层墙龙骨上附加垫条后隔声的比较

	50×70 钢龙骨, 双面4厚TK板		50×70 钢龙骨, 双面11厚水泥刨花板内填50玻璃棉		50×90木龙骨, 双面11厚水泥刨花板	
	I_a	$\overline{TL}$	I_a	$\overline{TL}$	I_a	$\overline{TL}$
无垫条	36	41	47	47	39	37
双面附加13mm厚软质纤维板垫条	39	44	51	52	47	46
隔声差值	3	3	4	5	8	9

图3所示的实验结果,还表明附加垫条后不仅在以声桥传声为主的中、高频透射损失有改进,且由于垫条使空腔深度略有增加,对低频的透射损失也有相应提高。此外,由于点声桥激发墙板振动的有效辐射面积随频率上升而减小,则垫条的阻尼面积相对于点声桥有效辐射面积之比将随频率上升而增大,因此附加垫条后墙的透射损失比之采用附加垫块更为有效。

根据钢龙骨双层墙附加弹性阻尼垫条后成为点声桥的连接,作者对这类构造墙的透射损失提出了如下的表达式^[5]:

$$TL = TL_1 + TL_2 - 20 \lg K' - 10 \lg (n/S) + 122(\text{dB}), f \geq f_B \quad (3)$$

式中, k' ——每个声桥点上龙骨的等效刚度(N/m),实验表明 $K' \approx 1.86hK$ (h 为龙骨腹板的高度, m)。 n ——点声桥数目,对于两个或几个螺丝紧靠在一起时,它们的间距远小于板中弯曲波波长的一半,则应作为一个声桥点来考虑。

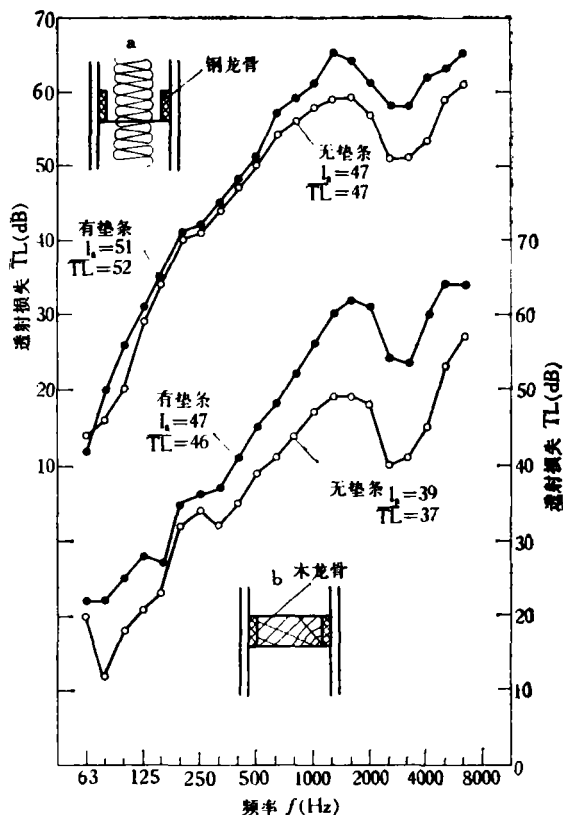


图3 龙骨上附加垫条前后的双层墙透射损失比较。

a. 钢龙骨, 双面11mm厚水泥刨花板, 50mm厚矿棉板填充, 垫条为13mm厚软质纤维板。 b. 木龙骨, 无矿棉板填充, 余同a。

$$f_B = \frac{358 \times 10^5}{K'd} \sqrt{\frac{S}{n}}$$

二、墙板上附加阻尼层的作用

建筑中的墙板一般很少采用阻尼层处理, 因为墙板附加阻尼层后, 其相对阻尼因子是相对弹性模量和相对厚度的函数, 要使附加阻尼层有效, 除选用合适的高阻尼材料外, 还须有相当的厚度, 这在实际难以做到, 也不经济。但如果墙板很薄(例如上海石棉水泥制品厂生产的低碱水泥板, 简称TK板, 其厚度为4—6mm), 则不妨可以试用附加阻尼层来改善墙的隔声。图4所示实验结果表明, 在4mmTK板双层墙的一侧, 附加了以点状粘贴的油毡阻尼层后, 隔声指数 I_a 提高了4, 平均透射损失增加了2dB。

从透射损失曲线来看,在吻合区和低频共振区的改进更多一些.这是由于在吻合区,墙板的质量抗和劲度抗互相抵消,由阻尼控制了声能的透射;而在“质量-空气-质量”共振区附近,空腔中空气的劲度抗和墙板的质量抗相抵消,板的阻尼大小决定了共振低谷的深度.此外,还由于油毡与所粘贴的墙板之间空气薄层在振动时起到空气泵的作用,这部分空气的粘滞作用也产生了一定的阻尼.

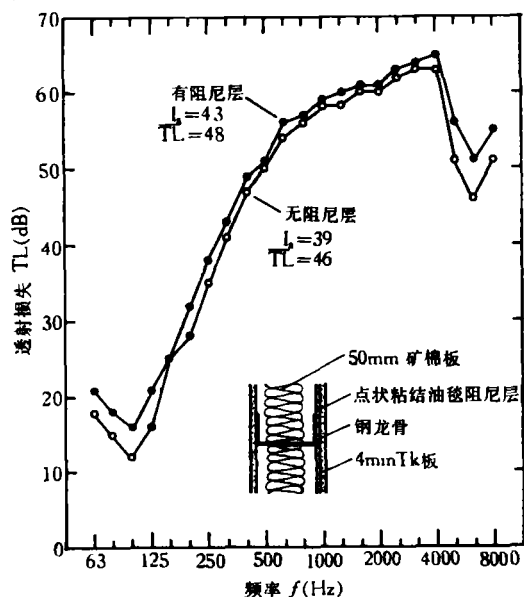


图4 墙板附加阻尼层后对隔声性能的提高

表3 TK板双层墙与单层圬工墙的隔声性能比较

隔墙种类	重量 kg/m ²	I _a	TL
单面有油毡阻尼层的4mmTK板 钢龙骨隔墙,腔内50mm矿棉板	24	43	48
140mm 硅酸盐条板隔墙	220	44	42
150mm 振动砖板隔墙	300	45	43

由表3可知,这类轻板隔墙的隔声性能与普通单层圬工墙相近,而其重量却相差一个数量级之多.如果双面墙板均附加阻尼层和(或)龙骨上附加弹性阻尼垫条,它的隔声性能不难做到 $I_a = 45$ 的住宅隔声标准.当然,如采用油毡作为阻尼层,施工和防火等问题在实用中还必须注意解决.

应用声学

三、增加墙板重量和采用多层薄板

一般说来,增加墙体重量对提高隔声总是有利的,尤其对双层墙的作用比单层墙更大.因为通常单层墙的质量加倍,其透射损失约可提高6dB,而由(2)式可知,钢龙骨双层墙的质量加倍时,则约可提高12dB(图5).再说,双层轻板隔墙自身重量比单层圬工墙轻很多,即使增加一倍重量后,相比还是很轻,对隔声的提高则收效甚大.

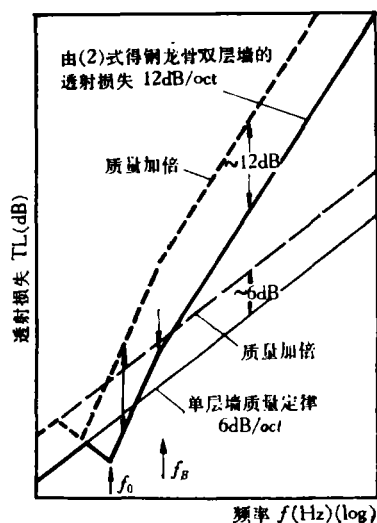


图5 在不计吻合影响时,单层墙和钢龙骨双层墙质量加倍后透射损失提高情况的比较

如果考虑到墙板的吻合效应影响,那么为了增加质量而采用较厚重的墙板,则往往会使临界频率下移至重要听闻频段,严重影响到高频甚至中频的透射损失.图6示明同样构造的双层墙,在低中频区墙板厚重者隔声好,而在2000—4000Hz的高频区,因厚板的吻合谷下移,其隔声性能反比薄板隔墙明显降低.这时如果改用多层薄板,则可在不使临界频率下移的情况下增加质量,从而提高了隔声性能.因为在高频时,板中弯曲波的波长 λ_B 远小于固定墙板的螺丝间距 a ($\lambda_B \ll a$),多层板的各层几乎完全独立地运动,这时墙体的临界频率相当于每层板各自的临界频率.至于多层薄板叠合时,各表面之间不可能相互紧贴而出现空气薄

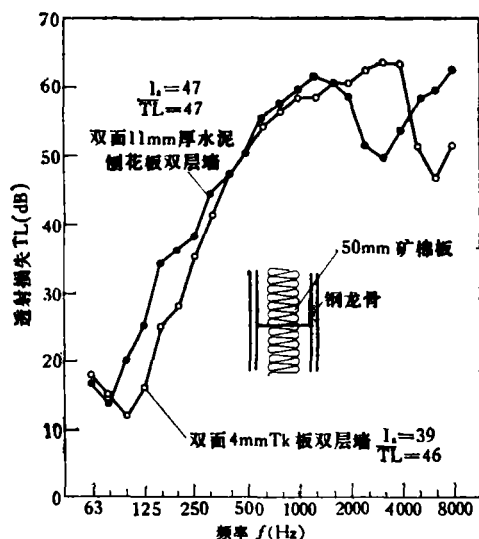


图6 4mmTK板双层墙 (22kg/m²) 和 11mm 水泥刨花板双层墙 (37kg/m²) 的隔声性能比较

层,虽有可能因阻抗失配而使声波反射,但此空气层厚度与声频波长相比毕竟太微小了,其作用也就忽略不计。

图7所示的实验结果,说明三层4mmTK板隔墙和两层6mmTK板隔墙的总质量相同,但由于前者的临界频率高,使它在100到4000Hz范围内的平均透射损失 $\overline{TL}$ 提高了2dB。从(2)可知,在墙体总质量保持不变情况下,只有当两侧墙板的质量相同时 ($m_1 = m_2$),才能得到最大的透射损失,即 ($m_1 \cdot m_2$) 达到极大值。因此对两侧墙板的重量或厚度作不平衡的布置并

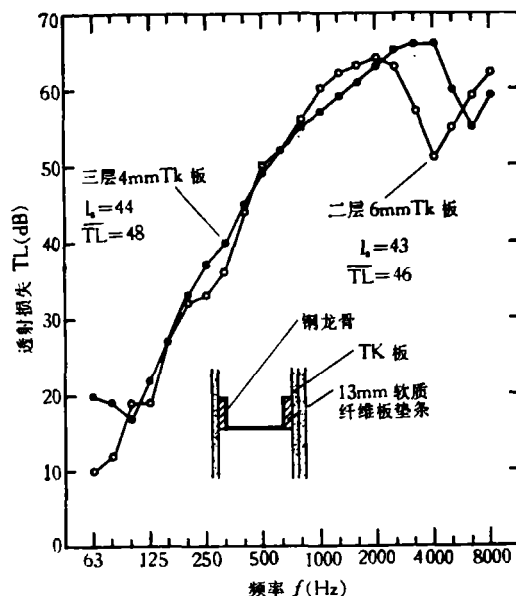


图7 三层4mmTK板隔墙和两层6mmTK板隔墙的隔声性能比较

非完全必要。图7的例子只是用来说明临界频率的影响而已。

参 考 文 献

- [1] 王季卿, 同济大学学报2 (1981), 79.
- [2] M. Heckl, *Acustica* 9 (1959), 371.
- [3] 石膏板轻质隔墙隔声试验报告. 四机部第十设计院, 1979年10月.
- [4] B. H. Sharp, *Noise Control Engineering*, 11 No. 2 (1978), 53.
- [5] 顾禧国、王季卿, 声学学报, 8(1983), 1.

(上接第27页)

四通路立体声效果(环境声或环绕立体声),可以用各种扬声器布置方案来获得。目前四通路立体声扬声器的布置还没有严格的规则,收听四通路立体声的方法也不是唯一的。听众应该对不同布置方式做一下试验以选择。图6给出几种可采用的四通路立体声扬声器布置方案。在图6中,方案(a)是标准布置方法,能产生较佳的四通路立体声效果。听众位于完全对称布置的中间位置,可以获得良好的环境声和环绕立体声效果。如果房间内不允许采用方案(a),则可采用其它方案。例如方案(b)的环境声稍差一些,但可提供空间感觉强烈的环绕立

体声。

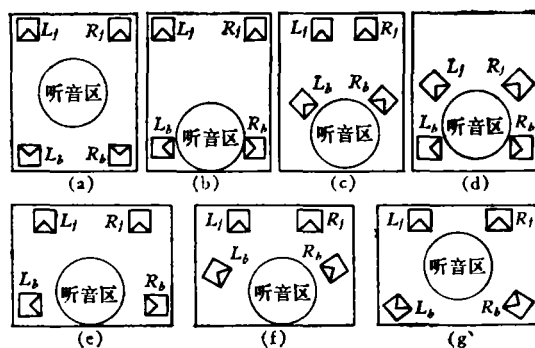


图6 四通路立体声扬声器的位置和方向

(高保真立体声全文完)