

文章编号:1006-1355(2018)03-0186-04+224

# 板与龙骨通过螺钉连接的结构传声作用探讨

王季卿<sup>1</sup>, 顾樯国<sup>2</sup>

(1. 同济大学 声学研究所, 上海 200092, 2. 上海建工设计研究总院, 上海 200235)

**摘要:**考虑轻钢龙骨薄板间壁隔声中的龙骨传声时,连接板与龙骨的螺钉传声作用也很重要。它与螺钉的数量有关,常以沿龙骨布置的螺钉中心距离作为表征。钉距小则螺钉密集使板与龙骨成线状连接,传声效率高,间壁的隔声量将有所下降。钉距大时则可视作点状连接,间壁隔声量有所提高。两者的区分还与频率有关,大致取板材弯曲波长之半为界。许多实验结果可以说明不同钉距对间壁隔声量的影响,文中还对其预计方法进行了探讨。

**关键词:**声学;房屋隔声;隔声设计;间壁隔声;螺钉传声

中图分类号:O422.6

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.036

## Analysis of the Structural-borne Sound Transmission between Panels and Studs via Screw Connections

WANG Jiqing<sup>1</sup>, GU Qiangguo<sup>2</sup>

(1. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Construction Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

**Abstract:** When studying the influence of screw connection on the sound transmission characteristics of the panel-stud partitions, the spacing of screws is considered as an important factor for predicting the sound insulation effects of the partitions. The screws can be modeled as a series of independent points or as a line connection along the stud, depending on the screw spacing and concerned frequency. For the small screw spacing, the connection between the panel and stud can be treated as a line connection and has high sound transmission effect and low sound insulation effect. While for the large screw spacing, the connection can be treated as independent point connection and has high sound insulation effect and low sound transmission effect. The distinction of the two connections is related to the frequency. Usually, the line of distinction is that the half bending wavelength is equal to the screw spacing. Experimental results also demonstrate the influence of the screw spacing on the sound insulation of the partitions. Finally, the prediction methods of the sound insulation of the partitions are discussed.

**Keywords:** : acoustics; sound insulation in buildings; sound insulation design; sound insulation of partitions; sound transmission via screws

对于轻钢龙骨薄板间壁结构,考虑间壁隔声中的结构固体传声途径时,除了龙骨影响外,还要考虑连接石膏板与龙骨的螺钉传声这一环节。实用中,螺钉是沿着龙骨方向成排等距布置的。在石膏板间拼接处,更是双排紧凑布置在一起。它们对间壁隔声的影响不容忽略。因此有必要对螺钉传声作用进行研究。

## 1 早期工作概况

1978年Sharp(1978)研究双层薄板间壁隔声时,特别注意到将板片固定在木龙骨上的螺钉传声影响<sup>[1]</sup>。他在预估木龙骨间壁隔声量时,认为大多情况下宜按线状连接来考虑。只有很少情况下会出现所谓的点状连接,并特意用一个构造图(见图1)来说明。在预估间壁隔声量时,又分别对它们相比于质量定律的隔声增量 $\Delta R$ 提出不同的估算式如下:

按点状连接:

$$\Delta R_M = 20 \lg(ef_c) + 20 \lg(m_1 / (m_1 + m_2)) - 45 \text{ (dB)} \quad (1)$$

按线状连接:

收稿日期:2017-09-22

作者简介:王季卿(1929-),男,教授,研究方向为建筑声学。

通信作者:顾樯国,上海建工设计研究总院。

E-mail: gqg124@139.com

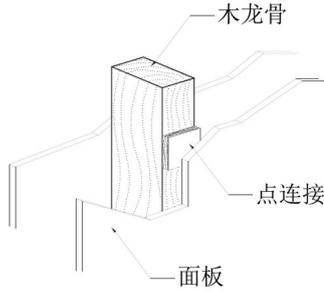


图1 典型点状连接之例<sup>[1]</sup>

$$\Delta R_M = 10 \lg(bf_c) + 20 \lg(m_1/(m_1+m_2)) - 18 \text{ (dB)} \quad (2)$$

式中： $f_c$ 为临界吻合频率(Hz)， $e$ 为螺钉的点间距离(m)(假设各点之间为等距)， $b$ 为各线状连接(即各龙骨)之间距离(m)， $m_1$ 、 $m_2$ 分别是两侧面板的面密度。可是他的实验结果并未能说明两类钉距(分别为305 mm和610 mm)对间壁在主要频段内的隔声量有何差异。两者的隔声量-频率曲线几乎完全重叠一致。对此，他作出的解释是：可能是因该实验中仅在间壁单面墙板作了点状连接，另一侧仍然处于线状连接所致。我们对此实验结果和解释是存疑的。

在考虑轻钢龙骨间壁隔声时，也曾对板与钢龙骨间的螺钉传声分别按线状和点状连接两种条件来讨论，并提出一个新的概念。即认为在常规螺钉间距工况下，两种连接方式对隔声特性的影响主要只是使声桥频率 $f_b$ 有所不同，即声桥对间壁传声开始起主导作用的频率 $f_b$ 为

$$\text{按点状连接: } f_b = \frac{358 \times 10^5}{Kd} \sqrt{\frac{S}{n}} \text{ (Hz)} \quad (3)$$

$$\text{按线状连接: } f_b = \frac{313 \times 10^4}{K'd} \sqrt{\frac{Sf_c}{nl}} \text{ (Hz)} \quad (4)$$

式中： $K'$ 为每单位长度声桥的等效刚度(N/m)， $d$ 为双层间壁的空腔宽度(m)， $S$ 为间壁面积(m<sup>2</sup>)， $n$ 为间壁中声桥数量， $l$ 为线声桥长度(m)。

至于 $f_b$ 以上的隔声量 $R$ 与频率 $f$ 的斜率则基本相同。于是，声桥频率 $f_b$ 以上的隔声量可按线状连接估算。其隔声量 $R$ 估算如下：

$$R = R_1 + R_2 - 20 \lg K' - 10 \lg(sf_c/n) + 101 \text{ (dB)} \quad (5)$$

式中： $R_1 = 20 \lg(m_1 f) - 48 \text{ (dB)}$ ， $R_2 = 20 \lg(m_2 f) - 48 \text{ (dB)}$ ，由此估算出1/2临界频率 $f_c$ 以下的隔声量，与实验结果基本相符(见图2)。

上述理论是在Sharp工作基础上发展出来的。把木龙骨定义为刚性声桥，而把轻钢龙骨定义为弹性声桥。在“质量-空气-质量”共振频率 $f_0$ 以上，刚性声桥和弹性声桥的隔声曲线斜率相同，都是18 dB/oct。在声桥频率以上，刚性声桥隔声曲线的斜率是6 dB/oct，而弹性声桥隔声曲线的斜率是12 dB/oct。这表明在声桥频率以上，钢龙骨双层墙的隔声要显著优于木骨双层墙，前者的隔声量又与龙骨侧向等

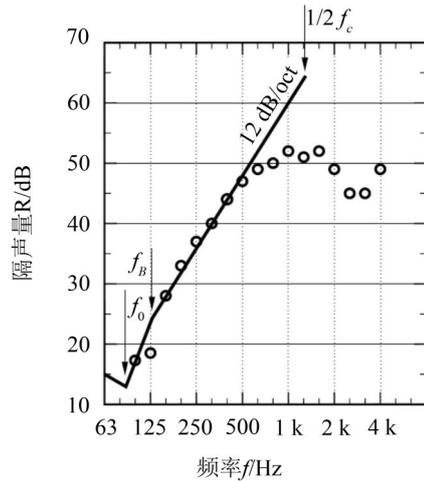


图2 钢龙骨双层墙隔声量测定值和式(5)预计曲线的比较  
注：采用双面12 mm石膏板、4.5 mm×7.5 mm拉花钢板龙骨，空腔内填50 mm厚玻璃棉  
效刚度密切相关。

## 2 若干实验结果的启示

后续一些研究者的实验结果对点状连接和线状连接给出了一些更直观的比较，使我们对此进一步加深了认识。例如1982年Green等的实验说明<sup>[3]</sup>，除了螺钉之外，在钢龙骨翼面上加涂黏胶使石膏板与龙骨更加紧贴，两者形成更完全的线状连接，结果隔声量明显下降，在中频段(250 Hz~1 000 Hz)下降了3 dB~8 dB之多(见图3)。可见后者的线状连接，对隔声不利。该文还指出，由于板材紧贴轻钢龙骨翼面使龙骨刚度增大，从而使间壁隔声量下降。文中并未注明螺钉间距，此项实验是在美国石膏板公司实验室和加拿大国立实验室进行的，螺钉间距按其施工惯例应为300 mm。

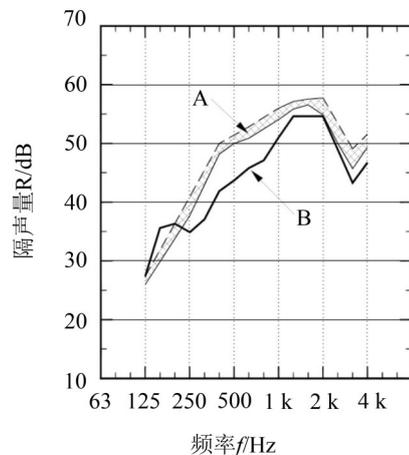


图3 采用13 mm石膏板与63 mm轻钢龙骨间壁(厚0.5 mm)时腔内填充吸声绵工况下的间壁隔声量  
注：A线区：只用螺钉固定；B线区：除螺钉外，还用黏胶将龙骨翼面与板面紧贴

1993年 Walker 对不同间距螺钉的间壁进行了隔声实验,获得一些颇有意义的结果<sup>[4]</sup>。所用间壁的构造为双面单层 16 mm 石膏板、C92 mm 龙骨(厚 0.5 mm)和腔内填充 75 mm 厚吸声绵。螺钉只限于布置在竖立的龙骨上。试件的上下栏均不设螺钉,只用密封膏固定。实验表明,间壁隔声量随螺钉中距增大而上升,当中距为 300 mm、600 mm、1 200 mm 时它们的 STC(与 ISO 的计权隔声量  $R_w$  大致相当)分别为 48、51 和 51。无螺钉时隔声量又有较大提高,STC 达到 56(见图 4)。至于螺钉中距为 600 mm 与 1 200 mm 时的隔声量几无变化,尚难解释。

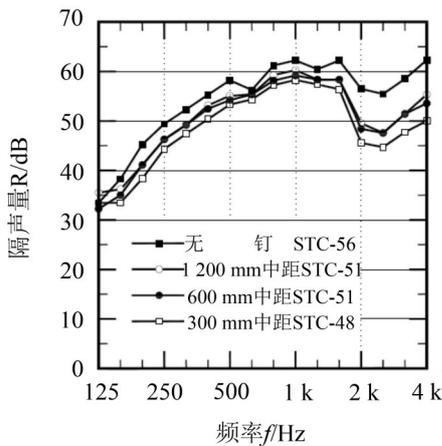


图 4 螺钉间距改变(中距分别为 1 200 mm, 600 mm 和 300 mm)和无钉对间壁隔声量的影响

此工况间壁为 C 92 mm 轻钢龙骨(厚 0.5 mm)、双面单层 16 mm 厚石膏板、腔内 75 mm 厚吸声绵。

该实验的另一戏剧性变化是:当腔内无吸声绵时,重复上述四种条件下的实验,结果发现间壁的隔声量与螺钉间距根本无关(见图 5)。Walker 对此现象解释为:此时声波透过间壁传声时,主要通过空气腔体这一途径。于是,间壁隔声性能服从传声过程中的薄弱环节-无绵空腔了。

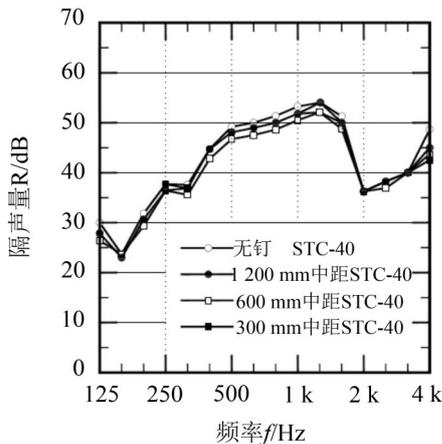


图 5 间壁隔声量

注:间壁构造和钉距变化同图 4,只是腔内无吸声绵

2000年 Craik and Smith 用统计能量分析 SEA 方法来模拟和估算轻质双层木板龙骨间壁的声传输<sup>[5]</sup>。这个方法在我国曾由秦佑国于 1982 年引入到间壁隔声估算中<sup>[6]</sup>,只是近年才有了更多发展。他们在处理石膏板与木龙骨之间结构传声时,考虑到连接件钉子(不是螺钉)数量的影响。这些钉子一般按等距布置,故常以钉距作为参量。从声学上考量,如在低频域,石膏板面上沿龙骨方向钉与钉之间的振级相同,与板面其它部位则不同,此属线状连接。在高频时,板面上沿龙骨方向钉间的振级,与板面其它各处的平均振级相同,只是在钉子处小范围内的振级不同,此时可称为点状连接。因此,钉与钉之间相距较大时按点状连接考虑,相距较近时则作为线状连接考虑。这里所谓钉距“较大”和“较近”的区分与频率有关。通常取石膏板表面弯曲波长  $\lambda_b$  之半作为界限。

图 6 所示为 100 mm 厚木龙骨石膏板内填充吸声绵的间壁随钉子数量(以钉距作为参数)不同而测得的隔声量变化。间壁双面以 30 mm 中距和 300 mm 中距两种条件分别作为区分点状和线状连接的隔声量对比结果。另以钉距 150 mm 作为点/线中间状态。从这些实测结果来看,钉距对中高频段隔声量的影响因点状和线状连接不同而不同,相差可达 10 dB 乃至更多。至于低频段(约 200 Hz 以下)的隔声量,则基本上不分点状或线状连接了。图中所示按 SEA 估算的隔声曲线与实验结果大致相符。对于轻钢龙骨的情况,连接处是用螺钉将石膏板与龙骨翼面固定的,传声情况与钉子和木龙骨连接会有一些差异。

从上述钉距变化引发的点状和线状的不同连接方式对间壁隔声量的影响来看,其变化规律与我们当初提出其主要引发声桥频率  $f_b$  变化,隔声量随频率其它变化规律则仍然相同。

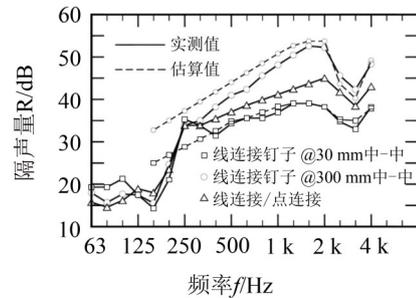


图 6 100 mm 厚木龙骨内填充吸声绵间壁在不同数量钉子情况下的隔声量<sup>[5]</sup>

注:钉距 30 mm 和 300 mm 作为线状和点状连接的代表,钉距 150 mm 作为线/点中间状态。虚线表示用 SEA 法模拟线状和点状所得的分析结果。

2002年 Hongisto 等的实验结果<sup>[7]</sup>再次说明螺钉距离变化(从 170 mm 变化至 340 mm 和 680 mm)对隔声量的影响。它们相比于龙骨间距变化(275 mm 和 1 100 mm 相比),影响大得多。

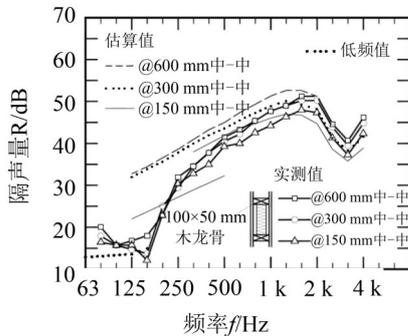


图7 50 mm 木龙骨双面薄板内填吸声绵间壁在不同数量钉子工况下的隔声量<sup>[5]</sup>

注: 钉距分别为 600 mm、300 mm, 作为线状和点状连接之代表, 钉距 150 mm 作为线/点中间状态。虚线表示用 SEA 法模拟线状和点状所得的隔声量结果。

2012年 Davy 对间壁固体传声中的点状和线状连接发表了专题研究报告<sup>[8]</sup>, 认为在早期工作中对中频段隔声量估值过高, 因为那时是按线状连接估算的。他在分析时, 对龙骨与板之间加装弹性垫条, 又按线状连接进行分析, 而实际墙体构造中, 龙骨与垫条两者成直角布置, 因而一定是点状连接。另一个不解的是: Hirakawa 和 Davy<sup>[9]</sup> 在 2015 年的论文中却得出点状和线状连接的间壁隔声量估算值几乎完全相同的结果(见图 8)。

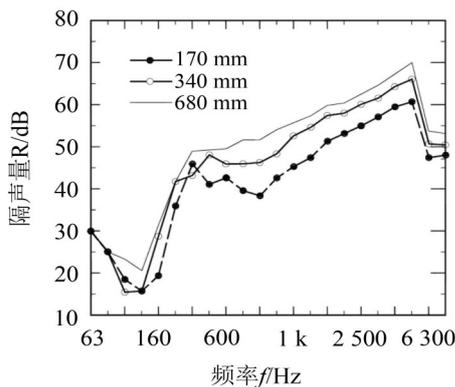


图8 木龙骨间壁改变钉距(170 mm、340 mm 和 680 mm)后隔声量的变化<sup>[8]</sup>

注: 双面为 2 mm 厚钢板, 取其吻合频率出现在常用频段之外(约高于 5 000 Hz)。龙骨中距为 275 mm, 腔厚  $d=84$  mm, 内填吸声绵。

又从我们早期在龙骨与板片之间加软质纤维板作为垫条的实验结果<sup>[2]</sup>来看, 更接近于点状连接条件, 且由于它的阻尼作用, 使龙骨的传声效果更为减弱。看来, 一般间壁作为点状与线状的中间状态, 或

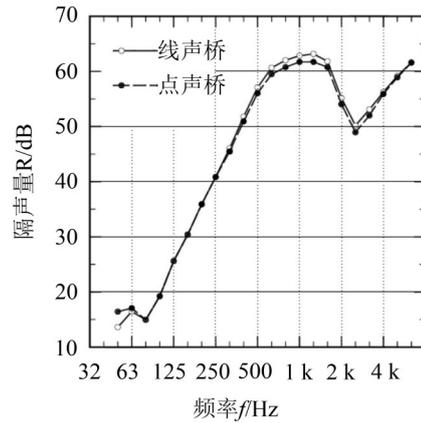


图9 Davy 等对 16 mm 厚石膏板、90 mm 轻钢龙骨(610 mm 中距)间壁隔声量按其点状连接和线状连接估算的结果比较<sup>[9]</sup>

称为准线状来考虑, 较为合适。

### 3 结语

许多实验报告很少提到板材安装时的螺钉距离, 只有加拿大的测试报告有详细交代<sup>[10]</sup>。所有试件安装时, 在板材边缘处的螺钉中距取 305 mm, 采用双层板时底层板的中央区中距取为 610 mm, 如单层板则中央区中距仍取为 305 mm。

我国设计标准图集<sup>[11]</sup>中, 规定石膏板边缘上的螺钉中心距离一律不大于 200 mm, 板片中央部位的螺钉中心距离不大于 300 mm。而且所用螺钉亦规定取为  $\Phi 3.5$  mm。这些规定主要出于结构强度和消防等安全方面的考虑。因此实用中, 不能为了隔声效果而把螺钉间距加大。本文的讨论旨在搞清螺钉间距在间壁隔声预估中按点状和线状连接考虑的后果, 以及在预估间壁隔声量时该如何处理螺钉传声的作用。

参考文献:

- [1] SHARP B H. Prediction methods for the sound transmission of building elements[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1978, 11(2): 53-63.
- [2] 顾樯国, 王季卿. 弹性联接对钢龙骨轻板隔墙隔声量的影响[J]. *声学学报*, 1983, 8(1): 1-12.
- [3] GREEN D M, SHERRY C W. Sound transmission loss of gypsum wallboard partitions. Report #2, Steel stud partitions having cavities filled with glass fiber batts[J]. *The Journal of the Acoustical of Society America*, 1982, 71(4): 902-907.
- [4] WALKER K W. 20 years of sound rated partition design [J]. *Sound & Vibration*, 1993: 14-21.