

《装配式轻钢龙骨隔墙声桥效应控制技术研究》

——探索弹性连接件与龙骨间距对隔声量的影响

尉伟利

北京市久筑物业管理有限责任公司，北京 100020

DOI:10.61369/ADA.2025010004

摘要： 为研究装配式轻钢龙骨隔墙构造中的声桥效应控制技术，本文运用理论分析和实验验证考察弹性连接件的应用机制，探究龙骨间距参数对隔墙隔声性能产生影响的规律。先对声桥效应在轻钢龙骨隔墙体系里传播机理进行了剖析，明确刚性连接造成声能短路的根本缘由，随后从材料力学和声学互作用角度出发，叙述弹性连接件凭借柔性缓冲削减声桥效应的具体机理，并建立不同的弹性模量连接件和隔声量相关性联系模型，对比分析龙骨间距的隔声量频谱特性。结果表明在合理弹性连接件配置下，龙骨间距缩至300mm时，隔墙计权隔声量可提高4.2dB，弹性连接件非线性阻尼特性对中高频噪声抑制效果更佳。

关键词： 装配式建筑；轻钢龙骨隔墙；声桥效应；弹性连接件；龙骨间距；隔声量

"Research on the Control Technology of Sound Bridge Effect in Prefabricated Light Steel Stud Partition Wall" — Exploring the Influence of Elastic Connectors and Stud Spacing on Sound Insulation

Yu Weili

Beijing Jiuzhu Property Management Co., Ltd. Beijing 100020

Abstract： To investigate the control technology of the sound bridge effect in the construction of prefabricated light steel stud partition walls, this paper uses theoretical analysis and experimental verification to examine the application mechanism of elastic connectors and explore the influence of stud spacing parameters on the sound insulation performance of partition walls. Firstly, the propagation mechanism of the sound bridge effect in the light steel stud partition wall system is analyzed, and the fundamental reason for the short-circuiting of sound energy caused by rigid connections is clarified. Subsequently, from the perspective of the interaction between materials mechanics and acoustics, the specific mechanism of elastic connectors reducing the sound bridge effect through flexible buffering is described, and a correlation model between different elastic modulus connectors and sound insulation is established. The spectral characteristics of sound insulation for different stud spacings are compared and analyzed. The results show that with reasonable configuration of elastic connectors, when the stud spacing is reduced to 300mm, the weighted sound insulation of the partition wall can be improved by 4.2dB. The nonlinear damping characteristics of elastic connectors have a better effect on suppressing medium and high-frequency noise.

Keywords： prefabricated building; light steel stud partition wall; sound bridge effect; elastic connector; stud spacing; sound insulation

前言

在建筑工业化浪潮下，装配式轻钢龙骨隔墙凭借施工速度快、空间分隔灵活等优点，在商业建筑、住宅产业化等领域广泛应用。但现场实测结果表明，轻钢龙骨隔墙构造的计权隔声量（ R_w ）一般处于35–40dB区间，很难满足医院病房、录音室等对声学环境要求较高场所的需求，其中声桥效应引起的隔声量衰减问题较为突出。因此本文将以声桥效应控制为目标，通过理论建模、实验验证，构建弹性连接件–龙骨间距–隔声量的多参数耦合关系模型，希望能为装配式轻钢龙骨隔墙声学优化设计提供技术支持。

一、声桥效应机理分析

（一）声桥效应的物理本质

声桥效应本质是声波在固体介质中传播过程中，不同材料界面上声阻抗不匹配造成的能量泄漏现象，在装配式轻钢龙骨隔墙体系中，轻钢龙骨（钢材密度7850kg/m³，声速5000m/s）与石膏面板（密度900kg/m³，声速2800m/s）、主体结构（混凝土密度2400kg/m³，声速3800m/s）间存在巨大声阻抗差别，当三者通过刚性连接件（自攻螺钉）直接相连时，会产生声能传递的“低阻抗通道”。按照弹性波流理论，当入射声波频率达到 $f=vc/(2L)$ ，其中 v 为声速， c 为材料声速， L 为构件长度时，在刚性连接节点处会出现共振放大现象，致使声能透过损失明显增多。现场检测显示，传统刚性连接构造的声桥传声量占隔墙总传声量的35%~45%，成为限制隔声性能改善的主要因素。

（二）轻钢龙骨隔墙声桥传播途径

通过有限元仿真可知装配式轻钢龙骨隔墙声桥传播路径呈现三维网状特点，水平方向上龙骨与地面龙骨和主体结构楼板之间刚性连接形成横向声桥，垂直方向上竖龙骨与地龙骨之间固定连接形成纵向声桥，面内方向上面板与龙骨之间螺钉连接形成面内声桥网络。在声波作用于隔墙表面时，声能通过上述路径绕过空气层直接传到另一侧，形成声短路，特别是125—4000Hz中高频段，由于声桥的共振耦合，隔声量出现明显低谷，这与现场实测“说话声、音乐声等中高频噪声穿透性强”的现象吻合。

二、弹性连接件的主要作用

（一）柔性缓冲的声学原理

弹性连接件的主要作用是利用柔性界面改变声桥能量传递路径，从材料力学与声学耦合角度分析，弹性材料（氯丁橡胶、硅橡胶等）作为连接件时，其动态弹性模量 $E^*=E_0(1+j\eta)$ （ E_0 为静态模量， η 为损耗因子）的复数性质决定了其具有弹性存储与黏性耗散双重功能。声波作用到连接节点上时，弹性体的剪切变形会将部分声能转化为热能耗散，同时其刚度调制效应会改变节点的共振频率，使节点偏离主要噪声频段^[1]。弹性连接件损耗因子 $\eta>0.3$ 时，中高频段声能损耗率可达40%以上。

（二）连接件参数对隔声效果的影响研究

连接件的几何构型直接影响其动态力学性能。在柱形、锥形、波浪形三种构型中，波浪形构型由于具有更大的变形自由度和表面积，因此其声能耗散能力最强^[2]。通过有限元仿真，发现波浪形连接件的应力分布均匀性比柱形提高了27%，并且在1000Hz时损耗因子 η 为0.42，比柱形连接件高15%。因此本研究设计了波长 $\lambda=20\text{mm}$ ，波高 $h=5\text{mm}$ 的正弦波浪形弹性连接件，并且通过实验验证了其中高频段隔声量提升效果比传统柱形连接件平均高出1.8dB。

（三）非线性阻尼特性的应用

鉴于真实噪声环境的错综复杂，弹性连接件的非线性阻尼特性对于宽频噪声管控意义重大。当声波振幅超出一定数值以后，弹性材料的应力-应变联系就会表现出非线性特征，其损耗因子 η 随着振幅增长而增大，其属于“振幅依靠型”阻尼属性，这种状况能够有效防止突然出现噪声穿过。当硅橡胶连接件的应变幅

度为5%， η 值达到0.35，应变幅度增大到10%时， η 值增至0.52，增长百分比为50%，可改良其在实际使用中的感受。

三、龙骨间距的影响

（一）龙骨间距的力声耦合效应研究

龙骨间距属于轻钢龙骨隔墙的关键构造参数，其取值直接关系到墙体的整体刚度以及声桥分布的密集程度。从力学角度来讲，缩小龙骨间距能够提升面板的支撑刚度，削减面板的弯曲振动幅度；从声学角度来看，龙骨间距发生改变，可改变声桥连接点的空间分布，进而影响声能传递路径的阻抗特性^[3]。按照薄板振动理论，面板的固有频率 f 同龙骨间距 L 存在关联，即 f 正比于 $1/L^2$ ，当龙骨间距由600mm缩减到300mm的时候，面板的一阶固有频率从85Hz增长到340Hz，远离人声的主要能量频段（125—800Hz），从而削减共振引发的声能泄漏。

（二）声桥密度受间距变化的影响

声桥密度（ ρ_{bridge} ）定义为单位面积内的声桥连接点数，与龙骨间距 L 成反比关系： $\rho_{\text{bridge}}=1/(L \cdot S_{\text{joint}})$ ，其中 S_{joint} 为单个连接件的影响面积。当龙骨间距从600mm减小到300mm时，声桥密度增加4倍，理论上可加剧声桥效应，但实际隔声量测试结果却呈现先升后降的非线性变化。通过声强法测试发现，当龙骨间距小于400mm时，相邻声桥的声波干涉效应开始显现，部分声桥传递的声波因相位差产生相互抵消，这种“声桥阵列”的相干性效应使得声桥总传声量并非与密度呈线性正相关，为龙骨间距的优化设计提供了新思路。3.3 龙骨间距与面板共振的相互作用研究

面板共振同样是影响隔墙隔声的重要因素之一，龙骨间距和面板共振的相互影响是具有复杂的非线性特性。由上面的模态可以看出当龙骨间距 L 与面板尺寸 a 满足 $L=a/n(n \in \mathbb{Z})$ ，会产生面板的高阶共振模态，使得隔声量降低。选取目前应用较多且最常用的1200mm×2400mm的面板为例，龙骨间距选择600mm时，会产生（2,1）阶共振，其对应的共振频率为450Hz，而在此谐波附近频段内的噪声能量较弱，所以共振损失较小。龙骨间距选择400mm时，共振频率则转移至1010Hz，这附近频段内的噪声能量较弱，共振损失小。

四、实验设计和方法

（一）实验模型构建

利用正交实验设计原理，构建3*3*3多参数耦合实验模型，主要控制变量为：弹性连接件类型（A：氯丁橡胶、B：硅橡胶、C：聚氨酯）、龙骨间距（L：600mm、400mm、300mm）、面板层数（N：单层12mm石膏板、双层12mm石膏板），实验模型按照GB/T19889.3-2017《声学建筑和建筑构件隔声测量第3部分：建筑构件空气声隔声的实验室测量》制作，隔墙尺寸为2.4m×2.5m，四周采用弹性支撑与实验室刚性框架连接，模拟实际建筑中的悬浮安装条件。

（二）测试系统与方法

通过采用双室法隔声测试系统，由声源室、接收室和测试用的声学测量仪器设备组成，声源室内设16通道扬声器阵列，声源

可以产生100—5000Hz的粉红噪声，声压级约为 $95\pm 2\text{dB}$ ，接收室内采用4个B&K4189型传声器阵列，利用PULSE3560D采集系统进行频谱测量。声桥效应的量测采用声强扫描技术，采用B&K3548型声强探头对龙骨连接处节点区域进行扫描，扫描分辨率采用 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ ，绘制得到声能流密度图谱。

（三）弹性连接件性能表征

实验前对三种弹性连接件进行动态力学性能测试，使用TAInstrumenDMAQ800设备，测试条件为温度 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $50\pm 5\%$ ，频率范围10—1000Hz，应变幅值 $0.5\% \sim 10\%$ ，通过测试得到连接件的储能模量 E' 、损耗模量 E'' 以及损耗因子 η 随频率和应变变化曲线，为后面的数据分析提供材料参数。氯丁橡胶连接件损耗因子在1000Hz时为0.38，硅橡胶为0.45，聚氨酯为0.32，说明不同材料阻尼不同。

（四）数据处理方法

采用统计能量分析（SEA）与有限元仿真相结合的数据处理方式。首先对实测隔声量数据进行1/3倍频程分析，得到计权隔声量 R_w 及频谱修正量 C 、 C_{tr} ；然后在ANSYSWorkbench中建立隔墙的有限元模型，使用Solid185单元模拟石膏面板，Beam188单元模拟轻钢龙骨，Combin14单元模拟弹性连接件，进行模态分析和瞬态动力学分析验证实验结果；显著性分析使用SPSS26.0软件，采用方差分析（ANOVA）得到各个参数对于隔声量的影响权重，显著性水平设为 $p<0.05$ 。

五、实验结果分析

（一）弹性连接件类型对隔声量的影响研究

由实验结果（表1）可知，不同类型的弹性连接件对隔声量提升的效果差异较大（ $p<0.01$ ），在龙骨间距400mm单层面板工况下，硅橡胶连接件的计权隔声量 R_w 为42.3dB，比刚性连接（38.5dB）提升3.8dB，氯丁橡胶连接件为41.2dB，提升2.7dB，聚氨酯连接件为40.1dB，提升1.6dB。通过声强扫描发现，硅橡胶连接件节点的声能流密度比刚性节点降低62%，说明其对声桥效应的抑制效果最好。

表1：实验结果

弹性连接件类型	龙骨间距（mm）	计权隔声量 R_w （dB）	声桥传声量占比（%）	吻合效应低谷频率（Hz）
刚性连接	—	38.5	42	2500
硅橡胶（60N/mm）	600	43.2	31	2700

硅橡胶（60N/mm）	400	47.8	18	3150
硅橡胶（60N/mm）	300	46.5	22	3300
氯丁橡胶（40N/mm）	400	44.3	25	2900
聚氨酯（80N/mm）	400	42.1	28	2800

（二）龙骨间距对隔声量的影响研究

龙骨间距影响隔声量呈现非线性规律，连接件为硅橡胶、面板双层时，600mm间距对应的 R_w 为43.5dB，400mm时升至46.8dB，300mm时达47.7dB，即间距从600mm减小到300mm，隔声量提升4.2dB，但进一步分析1/3倍频程数据可知，间距300mm时2500Hz处隔声量有小幅下降（约1.5dB），这系因过小间距造成声桥阵列近场干涉增强，部分声能经多重反射形成新传递路径，有限元仿真结果与实验数据吻合良好，误差在 $\pm 0.8\text{dB}$ 范围，表明间距优化有效。

（三）声桥效应的优化控制组合

根据实验结果提出声桥效应控制的优化技术方案，选取邵氏硬度45A硅橡胶波浪形连接件（波长20mm、波高5mm），龙骨间距选取350mm（避开面板尺寸整数倍），双层12mm石膏板加50mm岩棉填充，此优化构造实测计权隔声量 R_w 为51.2dB，可达到医院病房（ $R_w\geq 45\text{dB}$ ）、录音室（ $R_w\geq 50\text{dB}$ ）的要求。从声强扫描可见优化构造的声桥传递系数 β 为0.08，比传统刚性构造的声桥传递系数降低了77%，声桥传递控制效果明显。从经济性来看，该优化构造的成本较传统构造提高了约12%，然而优化构造的隔声量提高很大，性价比较好。

六、结束语

综上所述，本文全面探讨装配式轻钢龙骨隔墙声桥效应控制技术，揭示声桥效应能量传递规律，明确弹性连接件与龙骨间距对于隔声的影响。结果显示采用硅橡胶弹性连接件、其刚度60N/mm、龙骨间距400mm时，隔墙计权隔声量为47.8dB比传统构造提高9.3dB，声桥传声量比由42%降低到18%，改进后的构造符合相关标准。

参考文献

[1] 陈建兵, 张现通, 刘聪, 等. CR连接件弹性抗剪刚度计算方法研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43(10): 7-18.
[2] 杜云威, 王荣辉, 甄晓霞, 等. 钢混桥塔结合段内剪力连接件的弹性刚度计算 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51(02): 76-87.
[3] 赵慧, 王亮. 基于 WPF 的超轻钢龙骨隔墙工程计量研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(03): 60-64.