

木质材料隔声性能研究

宋博骐, 彭立民, 傅 峰, 王 东, 刘美宏

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 运用隔声材料阻隔声波传播, 是控制室内噪声的主要手段。在研究木材、木质人造板以及木塑复合材料隔声性能的基础上, 对木质隔墙及木质门的隔声性能进行了分析, 对未来的隔声性能研究提出建议。

关键字: 木质材料; 复合材料; 隔声性能; 隔声量

中图分类号: S781.3; TU531; TU55.2

文献标识码: A

文献编号: 1001-8654 (2016) 03-0033-05

Sound Insulation Properties of Wood-based Materials

SONG Bo-qi, PENG Li-min, FU Feng, WANG Dong, LIU Mei-hong

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Laboratory of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Blocking propagation of sound waves with sound insulation materials is one of the most important methods to control indoor noise. In this article, the authors reviewed current situation of sound insulation properties of wood-based panels and wood/polymer composites, presented applications of wood-based sound insulation materials for doors and partitions of buildings, and provided suggestions for further research and development of wood-based sound insulation materials.

Key words: wood-based material; composite; sound insulation property; sound transmission loss

噪声污染与空气污染、水污染是当今影响环境、危害健康的三大污染。噪声对人体的危害主要包括生理影响(听觉疲劳及损害)以及心理影响(干扰生活, 降低工作效率)。如今, 对工业噪声的治理已全面开展, 但对室内生活中的噪声污染尚未引起足够的重视。

隔声与吸声是噪声控制的重要手段。其中吸声是利用材料自身的多孔性结构或穿孔结构, 当声波振动引起孔隙中空气摩擦和材料内粘弹性损耗, 使声能转化为热能而耗散, 达到减小声源一侧反射声

能的目的; 隔声是利用隔声材料阻挡声能的传播, 把噪声限制在局部区域内, 或使声源另一侧的透射声能减小, 在嘈杂环境中营造一个安静的场所。

在声波的交替作用下, 材料可像膜片一样产生受迫弯曲振动, 这种弯曲波沿材料传播, 引起材料另一侧的空气振动, 而将声音透射至材料的另一面。在工程中通常用隔声量 R (又称传声损失, Sound Transmission Loss, STL) 表示材料或建筑构件的隔声能力。不同频率下, 材料的隔声量不同, 可以用混响室法或声管法进行测量。

评价材料隔声性能的物理指标有: 隔声频率特性曲线、平均隔声量及计权隔声量 R_w 。计权隔声量是更加符合实际效果的一种单值评价量, 常被用来简单比较材料及建筑构件的隔声性能。美国采用声传播等级 (Sound Transmission Class, STC) 来评价

收稿日期: 2015-08-14; 修改日期: 2016-04-11

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划课题“木质隔声和发热新材料制造关键技术与示范”(2015BAD14B04)。

作者简介: 宋博骐(1990—), 男, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

责任作者: 彭立民, 男, 中国林科院木材工业研究所副研究员。

构件的隔声，其方法与计权隔声量基本相同。

在材料隔声理论研究方面，有著名的质量定律（Mass Law）^[1]，即单层均质板的隔声量 R 取决于其单位面积的质量（即面密度 M ）和入射声波频率 f ：面密度增大一倍，隔声量增加 6 dB；频率提高一倍，隔声量同样增加 6 dB。除质量定律外，影响材料或构造隔声的其他因素还有：劲度、共振频率、吻合效应、声桥、板缝和孔洞等。

隔墙等建筑构件的隔声性能符合隔声定律，在隔声要求较高的场所，大多使用厚砖墙及密封性好的钢质门，但通过这种方法来达到隔声效果并不经济，所用材料均不可再生。因此，研究和改进室内木门、隔墙、地板、家具等木材及木质复合材料的隔声性能，具有重要意义。

1 木基材料/木质复合材料的隔声性能研究

1.1 木材/木质人造板的隔声性能

木材/木质人造板的隔声性能表现为中至略差，原因是其面密度较低。35 mm 厚刨花板或 40 mm 厚胶合板的计权隔声量，与 2 mm 厚钢板相当，常用木质人造板的隔声量随频率的变化列于表 1^[2]。

由表 1 可见，对于同种板材，厚度增大，面密度增大，其平均隔声量也随之提高，符合质量定律；对不同种类的人造板进行对比，其平均隔声量并不完全随着面密度的增大而提高。说明除质量定律，还有其他因素影响材料的隔声性能。

图 1 为木质人造板隔声频率特性曲线^[3]。

图 1 显示，几种人造板的隔声频率曲线相似。在高频处出现隔声曲线低谷；在低频段，板的隔声性能主要受劲度和共振影响。当声波入射至板材表

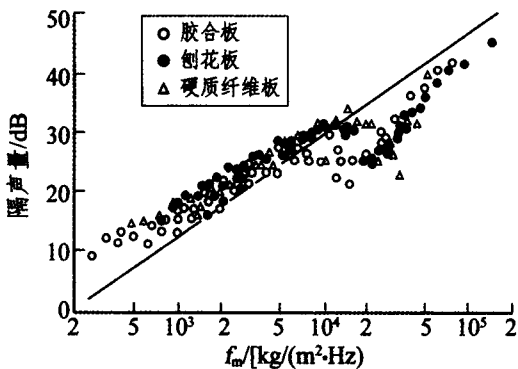


图 1 木质人造板隔声频率特性曲线

Fig.1 Sound insulation frequency curves of wood-based panels

面时，激励板材产生弯曲振动，板材的劲度越大，则抵抗弯曲的能力越强，即隔声性能越好。材料的劲度与厚度、弹性模量以及泊松比有关，厚度增加或弹性模量增大，都可提高板材的劲度。

对于钢混墙、砖墙等建筑构件，由于厚度较大，100 Hz 以下的共振频率对其隔声的影响可忽略不计，而相对于较薄的人造板，共振频率在人的听觉范围内，当入射的声波频率等于其固有频率时，即可产生共振，使其此时的隔声效果大大降低。

通常采用增加阻尼或不同材料层积复合的方法，改善共振对材料隔声性能的影响^[3]。

当材料中弯曲波与空气中声波相位相同，声波可加强弯曲波的振动，振动随着距离增大而增大，这一现象称为吻合效应，对单质薄板的隔声性能影响很大，使材料在某一频率范围的隔声效果变差。隔声曲线低谷称为吻合谷，产生吻合效应的最低频率称为临界频率，与材料的面密度、泊松比、弹性模量及厚度有关。

表 2 为部分木材及木质人造板的临界频率值^[4]。

表 1 不同频率下的木质人造板的隔声量
Tab.1 STL of wood-based panels with different frequencies

板材类别	板厚/ mm	面密度/ (kg·m ⁻²)	不同频率时的隔声量 /dB						平均值
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz	
胶合板	6	3	11	13	16	21	25	23	18.2
	12	8	18	20	24	24	25	30	23.5
	40	24	24	25	27	30	38	43	31.2
刨花板	6	4.5	18	18	22	27	32	31	24.7
	20	13	24	27	26	27	24	33	26.8
	35	17	21	23	27	28	24	29	25.3
软质纤维板	12	3.8	13	12	17	23	29	32	21
硬质纤维板	5	5.1	21	21	23	27	33	36	26.8

表2 木材及木质人造板的临界频率
Tab.2 Critical frequency of solid wood and
wood-based panels

材料 类别	密度/ (g·cm ⁻³)	不同材料厚度的临界频率/ Hz			
		2 mm	5 mm	20 mm	30 mm
冷杉木材	0.50	-	-	500	330
榉木木材	0.75	-	2400	600	400
胶合板	0.55	7000	2800	700	470
刨花板	0.66	-	4300	1090	725

值得注意的是,对20~30 mm厚木材或人造板,其临界频率均在低频范围内(<1 000 Hz)。为了减小吻合效应的影响,可采用增加材料阻尼、改变材料刚度或厚度、在材料上增加加强筋等方法。

目前,国内外对于木质材料隔声性能的研究多集中在建筑用材的性能评价与利用。

1) 定向结构板(OSB)的隔声性能研究表明,单层OSB的隔声性能较差,若将两张板层叠,或在两张板中间设置一定厚度的空气层,可显著提高隔声性能^[5]。

2) 芬兰职业健康研究所用混响室法测量27种芬兰常用建筑板材的隔声性能,以及损耗系数、面密度、弹性模量,为设计及研究提供了数据支持^[6]。

3) 对单板层积材(LVL)隔声性能的研究发现,贴面后LVL的隔声性能优于未贴面的LVL素板;提高LVL芯层的密度,对500~2 000 Hz的隔声量,可提高约5 dB;提高面层的劲度,可以降低共振对隔声量的影响^[7]。

4) 利用异氰酸酯胶和不同尺寸的马来甜龙竹(*Dendrocalamus asper*)刨花,分别制成密度为0.5 g/cm³和0.8 g/cm³的刨花板,并利用混响室法测试其隔声量。对比发现,密度高的刨花板,STL值较密度低的刨花板高出15 dB;另外,细小刨花制成的刨花板隔声性能最好,大刨花次之,中等尺寸刨花板最差^[8]。这可能与板中孔隙数量与板劲度有关。

1.2 木材/高聚物复合材料的隔声性能

由于自身化学链状结构,粘弹性高聚物具有优异的阻尼减振作用。然而,大多高聚物的弹性模量较小,表面密度不高,单独使用时隔声性能亦欠佳。而将木质材料与高聚物复合,不仅改善高聚物的物理力学性能,同时也能增大材料的面密度,从而提高隔声性能。

1) 利用木刨花、木纤维等与废旧轮胎橡胶颗粒混合,热压制成的一种新型复合材料,具有良好的阻尼减震效果。这是由于橡胶良好的阻尼性能,在声波作用下发生高弹形变,分子链产生拉伸、扭曲变形,同时分子链之间产生相对滑移,当载荷去除时,应变部分复原,释放外力做功;另一部分功转化为热能而耗散于周围环境中。

利用多功能振动数字信号分析仪,对不同木/橡胶比、橡胶粒径、胶黏剂配比的板材,测试其在受到激励振动时,信号传感点的弯曲和扭转,由此得出系统阻尼比和固有频率。研究表明,随着橡胶比例的增加,复合材料阻尼减振效果增强;橡胶颗粒尺寸对复合材料的阻尼减振效果有一定影响^[9]。

利用驻波管法,测试普通刨花板、复合地板以及木/橡胶复合材料隔声性能,结果表明,木/橡胶复合材料的隔声性能最优^[9]。

2) 木塑复合材料(WPC)具有较高的面密度及劲度,因此隔声性能良好。

用聚丙烯(PP)分别与天然辐射松木浆(MP)、合成玻璃纤维(FG)等增强纤维混和,注塑模压成型,并与同厚度的石膏板进行隔声性能比较。试验表明,PP/MF或PP/FG等复合材料的隔声性能均优于石膏板,其中PP/FG复合材料的隔声性能略优于PP/MF复合。随着MP或FG掺入比例增大,复合材料的临界频率降低,但掺入比例对隔声性能的影响不显著^[10]。

3) 将一定比例的无机粒子,如沉淀碳酸钙^[11]或蒙脱土^[12],掺入木粉/高密度聚乙烯(HDPE)中,制成木塑复合材料,材料的弹性模量、劲度、面密度均增大,隔声性能提高。

从声波传播的角度分析,无机粒子均匀分布的WPC基体,由于WPC基体与无机粒子填料的密度差异,当声波传播至填充粒子时,将发生多次折射及散射,声波传播路径增长,声能损耗同样增大。另一方面,HDPE基体中的木粉和无机粒子,限制了聚乙烯大分子链的运动,应变、应力的增加相对滞后,材料的模量和粘度明显提高,其介质损耗和玻璃化转变温度也相应改变,故声能损耗增大^[13-14]。

WPC的隔声量受掺入粒子的比例及粒径影响,掺入比例越大,散射声波能力也就越大,隔声性能

越好;在高频段,无机粒子粒径越大,则隔声性能越好。但掺入量过大时,易在粒子表面产生应力集中,使得WPC材料的静曲强度降低。影响无机填充物改良WPC隔声性能的关键因素,也是材料的劲度和面密度。

2 木质隔墙及木质门的隔声性能研究

2.1 结构对隔声性能的影响

2.1.1 墙体

单层墙的隔声也遵循质量定律,要提高墙体的隔声性能,需增加墙体密度或厚度,但也会增加建筑构件自重及占用空间。要得到高隔声性能且轻质的墙体,常采用具有一定空气层厚度的双层结构。

两层板之间封闭的空气层具有一定弹性,可看作“质量-弹簧-质量”组成的振动系统。入射波经过两次反射,两次吸收,最终从第二层板透射的声能被大大衰减^[15]。

墙骨在木质隔墙中起到支撑面板、增加刚度、提高侧向抗剪力作用。墙骨的规格决定了双层结构中空气层的厚度,空气层厚度增大,隔声量也增大。墙骨截面积增大,墙体整体的劲度也增大,尤对100~500 Hz频率范围内的隔声量有较大提高。

墙骨在声波透射过程中起到声桥的作用,墙骨数量增加,必然削弱空气层的吸声作用,进而导致隔声量的下降。墙骨间距增大,则数量减小,共振频率向低频方向移动。在墙体隔声设计中,通常将共振频率设计在100 Hz以下,以减小共振对听阈频率范围内隔声性能的影响,提高隔墙的隔声性能^[16]。

声波除了通过隔墙,还可能通过楼板传播至楼下或相邻房间,称为侧向传声。芬兰学者研究了双层木质隔墙隔声性能,并利用统计能量分析法,建立隔墙的隔声模型。试验结果表明,结构侧向传声对隔声量影响显著。由于侧向传声的存在,隔墙隔声量试验值低于理论值。为降低侧向传声对隔墙隔声性能的影响,可在底层楼板上铺设非连续浮筑楼板(即先铺设粘弹性层后,再铺设楼板,各房间的浮筑楼板相对独立),隔声量将提高大约10 dB^[17]。

2.1.2 房门

房门是隔墙的一部分,也是结构中隔声性能最薄弱的部分。为了使木质门具有良好的隔声性能,

可以在门扇结构及安装密封等方面进行设计。

根据芬兰学者的研究,减少门板间的连接,即减少胶黏剂和木板条用量,可降低固体振动传导率,是提高门扇隔声性能的关键。为了提高门扇的强度,可在木板条与门面板连接处增加弹性减震条或用蜂窝纸芯,既保证强度,又可降低声桥耦合作用对隔声的影响^[18]。

提高房门安装密封性,是比门扇结构优化更为有效的隔声方法。声强法可以探测到漏声的路径,用来测量门扇密封前后的隔声性能。研究表明,密封前门的主要漏声是在门扇靠近地面处;密封后的隔声量,特别是高频隔声性能,得到很大提升^[19]。

门缝的构造与门的类型、门框门槛设计有关。主要密封类型有:软质包边密封,异型密封胶条,充气隔声带,门扇下沿隔声缝等。

2.2 选用材料对隔声性能的影响

隔墙双层结构的墙板材料对隔声量影响很大。以竹胶合板^[20],胶合板、空心刨花板^[21]、石膏板以及OSB^[5]等作为墙板的隔声性能研究结果显示:不同墙板材料对隔声的影响遵循质量定律,相同厚度的竹胶合板和石膏板面密度接近,隔声性能相差不大。在有些情况下,使用面密度大的厚板,与临界频率高的轻质薄板复合,会得到更佳的隔声性能^[22]。

在双层墙体或门扇中填充多孔性材料,如岩棉、玻璃纤维等,既可以起到保温作用,也可吸收声能,起隔声作用;在空气层中悬挂或放置吸声材料,当声波透过隔墙面层传播至空气层时,吸声材料的流阻特性可损耗部分声能,从而提高隔声量。

一般填充多孔性吸声材料,附加隔声量可达5 dB。考虑吸声材料的容重及占用部分空气层厚度,填充后木结构墙体的隔声量实际仅提高2~4 dB^[16]。若将吸声材料填满空气层,对结构的隔声改善作用反而下降。

3 结语

目前国内外木材或木质人造板隔声性能的研究,主要集中在建筑构件的隔声性能评价与结构改良,以及木材/高分子复合材料的隔声性能的研究;从隔声理论方面,进行木质隔墙与木质门的性能研究。

利用木质材料与橡胶、沥青、塑料等具有粘弹

性高分子材料复合,或在木质材料中添加有机、无机或金属填料的方式,增加其面密度,改善其物理学及隔声性能,是今后隔声材料发展的新趋势。

根据振动和噪声的传播途径不同,采用减振降噪材料来处理。在建筑隔声设计中,可采用双层隔声材料来阻断声波传播;在交通工具设计中,主要利用粘弹性高分子阻尼材料和复合阻尼结构,通过减振的方式防止固体声的产生^[23]。

弹性—粘弹性阻尼复合结构在空气声激励作用下,具有很好的隔声性能,结构振动衰减与空气隔声性能有着密切的联系^[24]。

目前对于阻尼复合结构的隔声性能研究,多集中于金属-粘弹性材料阻尼复合结构,且主要用于交通工具减振降噪。使用木质材料与高分子阻尼材料复合,制成适用于室内隔声的新型建材,将具有广泛的应用空间。

参考文献:

- [1] 钟祥璋,建筑吸声材料与隔声材料[M].北京:化学工业出版社,2012:76.
- [2] 柳孝图等,建筑物理[M]第二版,中国建筑工业出版社,2000.
- [3] 刘一星,于海鹏,赵荣军.木质环境学[M].北京:科学出版社,2007:273-274.
- [4] Bucur V. Acoustics of Wood[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2006:25-27.
- [5] 周晓燕,华毓坤,朴雪松,等.定向结构板复合墙体隔声性能的研究[J].林业科技开发,1999,(4):10-12.
- [6] Larm P, Hakala J, Hongisto V. Sound insulation of Finnish building boards[J]. Work Environment Research Report Series 2006, 22.
- [7] Chou C W, Chen C Y, Lai R P, et al. Sound insulation of application for composite wood panel[C]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2014.
- [8] Karlinasari L, Hermawan D, Maddu A, et al. Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material [J]. Bioresources, 2012, 7(4):5700-5709.
- [9] Zhao J, Wang X M, Chang J M, et al. Sound insulation property of wood-waste tire rubber composite[J]. Composites Science & Technology, 2010, 70(14):2033-2038.
- [10] López J P, El Mansouri N, Alba Fernández J, et al. Acoustic properties of polypropylene composites reinforced with stone groundwood[J]. Bioresources, 2012, 7(4):4586-4599.
- [11] Li P, Kim B J, Wang Q, et al. Experimental and numerical analysis of the sound insulation property of wood plastic composites (WPCs) filled with precipitated CaCO_3 [J]. Holzforschung, 2013, 67(3): 301-306.
- [12] Kim B J, Huang R, Xu X, et al. Sound transmission properties of mineral-filled high-density polyethylene (HDPE) and wood-HDPE composites[J]. Bioresources, 2015, 10(1):510-526.
- [13] Liang J, Li R, Tjong S. Effects of glass bead content and surface treatment on viscoelasticity of filled polypropylene/elastomer hybrid composites[J]. Polymer International, 1999, 48(11):1068-1072.
- [14] 梁基照,蒋兴华.聚合物基复合材料隔声性能的研究[J].工程塑料应用,2003,31(8):45-47.
- [15] Basten T G H. Damping of double wall panels including a viscothermal air layer[C]. 4th European Conference on Noise Control EURONOISE, 2001.
- [16] 周海滨.木结构墙体隔声和楼板减振设计方法研究[D].中国林业科学研究院,2006.
- [17] Quirt J D, Nightingale T R T, Halliwell R E. Dealing with flanking transmission in wood-Framed construction[J]. Canadian Acoustics, 2003, 31(3):52-53.
- [18] Hongisto V, Keranen J, Lindgren M. Sound insulation of doors-Part 2: Comparison between measurement results and predictions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 230(1):149-170.
- [19] 蔡阳生,赵越喆,吴硕贤.声强测量隔声技术及其在绿色建筑评价中的应用[J].南方建筑,2015,(2):43-46.
- [20] 高黎,王正,常亮.预制竹木组合墙体的保温与隔声性能[J].木材工业,2010,24(1):26-28.
- [21] 周统建,王志强,徐才峰,等.银杏木空心刨花板复合墙体隔声性能[J].林产工业,2012,39(6):11-13.
- [22] Matias Remes. Sound insulation of wooden double-leaf partitions[D]. Helsinki University of Technology, 2009.
- [23] 谭亮红.阻尼材料和隔声材料的开发及应用研究[D].中南大学,2013.
- [24] 郑辉,陈端石.阻尼复合板的隔声性能研究[J].应用声学,1996,15(2):1-6.
- [16] Li S, Zhang S, Wang X. Fabrication of superhydrophobic cellulose-based materials through a solution-immersion process[J]. Langmuir, 2008, 24(10): 5585-5590.
- [17] Zheng Q, Cai Z, Gong S. Green synthesis of polyvinyl alcohol (PVA)-cellulose nanofibril (CNF) hybrid aerogels and their use as superabsorbents[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(9): 3110-3118.
- [18] Mirvakili M N, Hatzikiriakos S G, Englezos P. Superhydrophobic lignocellulosic wood fiber/mineral networks[J]. ACS applied materials & interfaces, 2013, 5(18): 9057-9066.
- [19] Zhang M, Wang S, Wang C, et al. A facile method to fabricate superhydrophobic cotton fabrics[J]. Applied Surface Science, 2012, 261: 561-566.
- [20] Kota A K, Kwon G, Choi W, et al. Hygro-responsive membranes for effective oil-water separation[J]. Nature Communications, 2012, 3: 1025.
- [21] Rohrbach K, Li Y, Zhu H, et al. A cellulose based hydrophilic, oleophobic hydrated filter for water/oil separation[J]. Chem Commun, 2014, 50(87): 13296-13299.
- [22] Pan S, Guo R, Xu W. Durable superoleophobic fabric surfaces with counterintuitive superwettability for polar solvents[J]. AIChE Journal, 2014, 60(8): 2752-2756.
- [23] Molina R, Gómez M, Kan C W, et al. Hydrophilic-oleophobic coatings on cellulosic materials by plasma assisted polymerization in liquid phase and fluorosurfactant complexation[J]. Cellulose, 2014, 21(1): 729-739.

(责任编辑 姜征、劳万里)

(责任编辑 姜征)

(上接第32页)