

# 基于多因素融合的夏热冬暖地区教室声环境改善

樊景怡,蔡阳生,陈永乐,朱啸寅,张杨

(福建理工大学 建筑与城乡规划学院,福建 福州 350118)

**摘要:** 针对教室声环境普遍不达标的问题,通过实地测量不同教室的混响时间,探讨在满足采光、通风及防火等设计要求的前提下,结合容积和吸声设计改善声环境的可行性。研究发现,容积较大的教室混响时间较难达标,但展开教室窗帘、在教室顶棚和后墙安装防火等级高的吸声材料(如穿孔铝板)或采用平齐梁底的吊顶设计减小教室容积,可使混响时间接近标准要求,从而改善声环境。在夏热冬暖地区教室声环境优化中,建议严格控制新建教室容积,对现有教室可采用吊顶改造、窗帘利用和吸声材料布置等措施改善声环境。

**关键词:** 教室声环境;混响时间;容积;吸声

中图分类号: TU112

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0060-07

## Improvement of classroom acoustic environment in hot summer and warm winter area based on multi-factor fusion

FAN Jingyi, CAI Yangsheng, CHEN Yongle, ZHU Xiaoyin, ZHANG Yang

(School of Architecture and Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to address the problem that the acoustic environment in the classroom is generally below the standard, the feasibility of improving the acoustic environment by combining volume and acoustic design is explored under the premise of meeting the design requirements of lighting, ventilation and fire prevention through field measurement of reverberation time of different classrooms. It is found that it is hard for the reverberation time of classrooms with larger volume to meet the standard. However, unfolding classroom curtains, installing high fire-resistant sound-absorbing materials (such as perforated aluminum plates) on the classroom ceiling and back wall, or using a ceiling design with a flush beam bottom to reduce the volume of the classroom can bring the reverberation time closer to the standard requirements, thereby improving the acoustic environment. In the optimization of the acoustic environment of classrooms in hot summer and warm winter areas, it is recommended to strictly control the volume of new classrooms, and measures such as ceiling renovation, curtain utilization and sound-absorbing material arrangement can be used to improve the acoustic environment in existing classrooms.

**Keywords:** classroom acoustic environment; reverberation time; volume; sound absorption

教室声环境是影响教学效果的关键因素,其主要评价指标混响时间与语音清晰度直接相关<sup>[1]</sup>。然而,研究发现,国内外学校教室的声学

性能普遍不达标,混响时间过长成为共性问题。国内多项调研<sup>[2-4]</sup>显示,大量中小学教室混响时间超出《民用建筑隔声设计规范》(GB50118-

收稿日期:2024-12-09

基金项目:福建省科技计划项目(2025Y0033);厦门建设科技计划项目(XJK2023-1-9);福建理工大学科研启动项目(GY-Z220214)

第一作者简介:樊景怡(1998—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向:建筑声学。

通信作者:蔡阳生(1980—),男,福建泉州人,副教授,博士,研究方向:建筑声学。

2010)的要求,达标比例较低;国外研究也表明,芬兰、葡萄牙等国的教室同样普遍存在混响时间超标的情况,有些甚至达到标准限值的两倍<sup>[5-6]</sup>。综上,教室声学缺陷是一个广泛存在的课题。

针对教室声学优化,多位学者提出了不同的改造方案,其核心方法均以布置吸声材料为主,但具体策略各有侧重。张轶稀<sup>[7]</sup>的方案较为系统,主张在普通合班教室的声环境改造中,在不同部位(如顶棚后半部、后墙和侧墙)分别使用吸声涂料、硅酸钙板等特定材料进行协同改造,以整体满足声学标准。Russo 等<sup>[8]</sup>则更注重实用性与经济性,提出了无需改动教室结构的低成本方案,其关键是在天花板和墙壁上采用棋盘形分布的吸声板,并对包括靠近声源区域在内的天花板进行全面吸声处理。胡亦川等<sup>[9]</sup>的方案针对性强,重点在于解决低频声能吸收问题以提升语言清晰度;他们通过在教室角部精心布置吸声体(设计了多种布置方式),显著降低了混响时间,且对教室原有布局和使用影响极小。这些研究共同表明,通过针对性、策略性的吸声处理,可以有效改善教室声学环境。

上述实际项目中的改善大多从建筑声学的专业视角出发,聚焦于如何通过改造教室以使其声学效果达到既定标准。然而,教室的设计在满足声学功能的需求之外还需兼顾建筑隔热、自然采光以及消防安全等多重因素。因此,如何巧妙地将这些面向建筑设计的策略与声学改善策略相融合,以创造出既符合声学标准又满足其他建筑设计要求的教学环境,仍是一个亟待深入探索的课题。

综上,本研究对夏热冬暖地区的两间教室进行声学测量,结合教室长宽高的参数,考虑教室需要满足的采光、以及防火等要求,讨论如何对教室进行尺寸设计、改造或设置声学材料以满足教室声学标准要求,研究成果可为夏热冬暖地区教室声环境优化提供更全面地参考。

## 1 教室声环境评价参数

混响时间(reverberation time, RT)是室内声学最重要也是最基本的指标,是指当室内声场达到稳态后,令声源停止发声后至声压级衰变60 dB所经历的时间,记作 RT,单位为 s。<sup>[10]</sup>教室的混响时间可用赛宾公式估算,如式(1)。

$$RT = \frac{0.161V}{A} \quad (1)$$

其中, $V$ 为教室的房间容积, $m^3$ ;  $A$ 为吸声量。一般把 500 Hz 和 1 000 Hz 的混响时间平均值称为中频混响时间。

世界各国基于自身独特的文化背景、建筑风格、教育模式、经济发展水平以及科研投入状况,纷纷制定了符合本国国情的教室声学标准,各国混响时间规范见表 1。各国标准在分类逻辑、技术参数、公式表达等方面存在差异。美国 ANSI S12.60 系列标准依据教室体积划分等级设定限值,注重教学空间功能分级;英国 Building Bulletin 93 基于教育阶段和建筑类型制定规范,考虑了低幼年级的学生听力发育不充分的特点,凸显动态适应性;也有国家采用公式化分类,强调声学参量的动态计算,构建综合评价框架。

表 1 不同国家和组织对于混响时间的规范

Tab.1 Specifications of reverberation time in different countries and organizations

国家/组织	法律法规/标准号	法律法规/标准名称	频段范围	RT/s
中国	GB 50118-2010	民用建筑隔声设计规范	500~1 000 Hz 平均值	普通教室空场: $\leq 0.8 (V \leq 200 m^3)$ $\leq 1.0 (V > 200 m^3)$
美国	ANSI/ASA S12.60-2010	Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools—Part 1; Perm	500~2 000 Hz 平均值	空场: $\leq 0.6 (V \leq 283 m^3)$ $\leq 0.7 (283 < V \leq 566 m^3)$
英国	Building Bulletin 93(2015)	Acoustic design of schools: performance standards	500~2 000 Hz 平均值	$\leq 0.6$ (幼儿园或小学) $\leq 0.8$ (中学)
法国	Arrêté du 25 avril 2003	relatif a la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement	500~2 000 Hz 平均值	$0.4 \sim 0.8 (V < 250 m^3)$ $0.6 \sim 1.2 (V > 250 m^3)$

表 1(续)

国家/组织	法律法规/标准号	法律法规/标准名称	频段范围	RT/s
日本	AIJES-S001-2020	Academic Standards and Design Guidelines for Sound Environment in School	500~1 000 Hz 平均值	$\leq 0.6 (V \approx 200 \text{ m}^3)$ $\leq 0.7 (V \approx 300 \text{ m}^3)$
德国	DINI18041-2016	—	500~2 000 Hz 平均值	0.3lgV-0.17
比利时	NBN S 01-400-2(2012)	—	—	0.35log(1.25V)
葡萄牙	Decree, 129/02	—	500~2 000 Hz 平均值	$0.15 * V^{(1/3)}$
WHO	—	GUIDELINES FOR COMMUNITY NOISE	—	$\leq 0.6$

## 2 教室室内声学测试

### 2.1 研究对象

教室窗户开启或关闭会较大影响教室吸声量,但夏热冬暖地的教室经常会在炎热的夏天开启空调或者寒冷的冬天时关闭窗户,而在春秋两季室外气温适中时开窗通风,既追求较舒适的热环境,也可提供新风保障空气质量,还可以在春秋两季节约能源。因此选取该地区的教室为研究对象,在空场条件下进行混响时间测量。具体实验方式依照《室内混响时间测量规范》(GB/T 50076-2013)<sup>[11]</sup>,测量时关闭教室内的设备如投影仪、电脑、风扇等,避免实验过程中产生噪声,并结合《民用建筑隔声设计规范》(GB50118-2010)进行讨论。

为调研夏热冬暖地区教室在不同使用条件下的声环境,依据《民用建筑隔声设计规范》(GB50118-2010),选取一间容积大于 220 m<sup>3</sup>,混响时间目标值为 1.0 s 的教室作为实验对象。在空场条件下进行混响时间测量,具体实验方式依照《室内混响时间测量规范》(GB/T 50076-2013)<sup>[11]</sup>。测量时关闭教室内的设备如投影仪、电脑、风扇等,避免实验过程中产生噪声。为全面了解教室的空间特征,对教室 A 的基本情况进行了测量与统计。该教室开间 10.9 m,进深 9.4 m,层高 4.4 m,整体容积达 440 m<sup>3</sup>;配备 77 个座位,每座容积为 5.7m<sup>3</sup>,其现场照片如图 1 所示。

教室内部未经过任何声学处理,墙面和天花为水泥砂浆抹面粉刷,教室桌椅为活动木板桌椅,窗户为单层玻璃推拉窗和固定窗的组合,窗帘为

涤纶材质,地板为釉质瓷砖满铺,教室平面为矩形,教室南面外墙连接外廊,北面外墙为教学楼外立面。



图 1 教室 A 现场照片

Fig.1 Scene photos of classroom A

### 2.2 测量方案

在教室测量室内混响时间  $T_{20}$ ,在测量时,声源位置取讲台中央,模拟教师在讲台授课的教学状态,测点则均匀地分布在学生座位空间。声源与测点位置如图 2 所示。

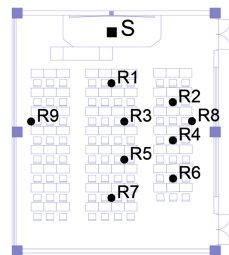


图 2 声源与测点位置

Fig.2 Sound source and measuring point positions

声源采用爱华 AWA 5510 十二面体扬声器,麦克风采用 NTI M2230 量测传声器。测试时,扬

声器位于讲台中央并距离地面 1.5 m,麦克风设置在教室座位上并距离地面 1.2 m。采用室内声学软件 Dirac 测量教室各测点的空场房间脉冲响应,得到混响时间  $T_{20}$ 。测量时设置门窗关闭,窗帘侧收与展开两种状态,模拟日常授课时教室声环境的教室室内使用条件。

根据《公共建筑节能设计规范》(GB50189-2015)<sup>[12]</sup>、《建筑采光设计标准》(GB50033-2013)<sup>[13]</sup>和《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB55015-2021)<sup>[14]</sup>对于福州所处的夏热冬暖地区的教育建筑设计的要求:教育建筑的普通教室采光标准不应低于采光等级Ⅲ级的采光标准值,侧面采光的采光系数不应低于 3.0%,室内天然光照度不应低于 450lx;窗墙面积比不小于 0.4 等等,教室通常有较大面积的侧窗。窗帘是具有吸声性能的多孔吸声材料,也是具有保温、隔热、遮阳等用途的教室室内常用材料。窗帘与墙壁保持一定的距离,形成的空腔能提高其吸声效果,可用于调节室内混响时间。

设置门窗关闭,模拟冬季或气候寒冷春冬时节温度较低或者空凋制冷时段,以及观影或投影授课开启空凋的授课时段。窗帘侧收的教室室内条件有助于其获得较好的采光以及隔绝其他教室授课时段传来的部分噪声,接收太阳直射光保证室内非供暖得热;而窗帘展开则是为了减少室外人员活动或者直射阳光对测试的干扰,对紫外线进行隔挡遮阳,以防止眩光。

### 3 教室声学测量结果

为了防止眩光,窗内侧通常会悬挂窗帘,这些窗帘在一定程度上可作为吸声单元,增加教室的吸声量,从而对教室的声环境产生积极的改善作用。教室 A 在“门窗关闭-窗帘侧收”和“门窗关闭-窗帘展开”两种使用状态下的混响时间结果如表 2、表 3 所示。

可见,无论窗帘侧收还是展开,教室 A 的混响时间都较长,其 500~1 000 Hz 频段的混响时间平均值都超过了标准建议的 1.0 s,其中 125 Hz 的混响时间更是达到了 2.1 s,与 500~1 000 Hz 频段的平均值之比为 1.4。这与参考文献[3][6]的结果一致,较长的混响时间会降低教室的语言清晰度,影响上课时师生的听闻感受,说明大部分教室的声环境有待改善。

表 2 教室 A“门窗关闭-窗帘侧收”下的混响时间

Tab.2 Reverberation time of classroom A under “doors and windows closed and curtains side-folded”

测点	不同频率(Hz)下的混响时间/s					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
R1	2.11	1.31	1.40	1.57	1.52	1.47
R2	1.69	1.45	1.39	1.51	1.60	1.49
R3	1.71	1.45	1.35	1.55	1.64	1.48
R4	2.23	1.51	1.53	1.59	1.60	1.46
R5	2.14	1.51	1.37	1.56	1.60	1.49
R6	2.24	1.42	1.39	1.50	1.61	1.48
R7	2.24	1.49	1.43	1.56	1.61	1.49
R8	2.18	1.30	1.45	1.49	1.61	1.46
R9	2.11	1.34	1.52	1.56	1.60	1.48
平均	2.13	1.42	1.42	1.54	1.60	1.48

表 3 教室 A“门窗关闭-窗帘展开”下的混响时间

Tab.3 Reverberation time of classroom A under “doors and windows closed and curtains unfolded”

测点	不同频率(Hz)下的混响时间/s					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
R1	1.86	1.27	1.19	1.15	1.17	1.15
R2	1.74	1.31	1.11	1.13	1.22	1.07
R3	1.93	1.38	1.19	1.20	1.18	1.12
R4	1.89	1.34	1.26	1.13	1.15	1.11
R5	1.95	1.32	1.11	1.10	1.18	1.07
R6	1.88	1.41	1.23	1.14	1.18	1.09
R7	2.45	1.27	1.17	1.16	1.14	1.07
R8	1.93	1.17	1.24	1.14	1.22	1.12
R9	2.17	1.17	1.26	1.17	1.24	1.13
平均	1.98	1.29	1.19	1.15	1.19	1.10

### 4 讨论

GB/T 51356-2019《绿色校园评价标准》<sup>[15]</sup>明确提出了对教学用房混响时间的控制要求,旨在减少不利的反射声,提升语言清晰度,并特别强调了作为主要教学场所的普通教室的声学性能评价。然而,当前教学楼建设与教室装修,往往忽视

了声学设计的重要性,这成为教室混响时间难以达到标准规定的主要原因之一<sup>[16]</sup>。

根据公式(1),教室的混响时间长短与其容积成正比,与教室室内具有的吸声量成反比。而教室必须配的桌椅受其材质和做法的影响都具有一定的吸声量。

#### 4.1 教室容积设计及其对混响时间的影响

《建筑设计资料集》<sup>[17]</sup>对高等院校公共教学楼各类教室的常用指标建议如表4,其中人数少于80人教室的层高常用参考指标为3.9 m。容纳人数超过100人的教室适宜起坡布置,每排升高0.1 m,或在错排布置时隔排升高0.12 m左右。

表4 高等院校公共教学楼各类教室的常用参考指标

Tab.4 Common reference indexes of various classrooms in public teaching buildings in colleges and universities

教室类别	使用面积/ m <sup>2</sup> ·座 <sup>-1</sup>	进深×开 间/m×m	层高/ m
30~40人的小教室	1.80~1.50	6.50×9.60	3.60
50~60人的小教室	1.50~1.40	7.80×10.80	3.90
80~90人的中教室	1.30~1.20	8.40×13.20	3.90
100~120人的中教室	1.20~1.10	12.00×12.60	4.20
150~180人的阶梯教室	1.10~1.00	12.30×15.30	4.50
240~250人的阶梯教室	1.00~0.90	13.70×21.00	4.80
300~360人的阶梯教室	0.90	15.00×20.00	5.40

本实验中,教室A的长宽高尺寸为10.9 m×9.4 m×4.4 m,容积为440 m<sup>3</sup>,频混响时间在窗帘侧收和展开分别为1.48、1.17 s。教室A共有座位数77个,参考表5,取3.9 m调整其层高,则所对应的容积约为390 m<sup>3</sup>,若教室装修界面不变,即室内材料声学特性不变,根据赛宾公式,其中频混响时间在两种窗帘状态时分别约为1.38、1.09 s,可见在建筑设计时适当控制尺寸可以较好地改善教室声环境,结合窗帘甚至可以较为简单使教室接近标准建议的混响时间要求。由于高校普通教室的尺寸和容积并没有明确的标准供参考,对教室的尺寸和容积的设计需要考量座位上的同学与黑板之间的视线角度关系、课桌的尺寸大小和座位数,以及日常走动和疏散所必须的座位间距,未来可借鉴《中小学设计规范》(GB 50099-2011)<sup>[18]</sup>中的设计元素结合我国高校现状

制定规范。

表5 吸声材料和吸声结构的吸声系数

Tab.5 Absorption coefficient of sound-absorbing materials and structures

吸声 材料	不同频率(Hz)下的混响时间/s					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
槽木吸声板	0.46	0.85	0.90	0.78	0.53	0.51
聚酯纤维吸声棉	0.08	0.13	0.36	0.83	0.70	—
穿孔铝板 (穿孔率20%)	0.30	0.60	0.70	0.75	0.75	0.70

注:材料数据来源自测。

实验时,教室A由于结构要求有梁,如图1所示,对应梁高0.8 m,梁底与天花板之间的空间较大,不仅会影响天花板对天空漫射光的反射,从而影响采光效果,且在使用空调时,会由于容积较大浪费空调能耗。而教室A的梁高对比其净高占比约为18%,若采用平齐梁底的吊顶,不仅改善采光效果,还可以使教室的容积变小,减少空调能耗,且改善声学效果。

对于教室A,若教室装修界面不变,采用平齐梁底的吊顶时,根据赛宾公式,低频混响时间在两种窗帘状态时分别约为1.32、1.04 s,可见窗帘展开时,教室A的混响时间基本能满足相关标准的要求。

#### 4.2 教室吸声设计及其对混响时间的影响

依据赛宾公式,要改善教室声环境,除了控制教室尺寸规模之外,还可以在室内采用吸声措施控制混响时间。

综合考虑建筑隔热、采光等实际需求,选取了多种多孔吸声材料和共振吸声结构作为教室声环境改造的备选方案。根据吸声性能需求和空间改造预算等因素,选取7种合适的吸声材料或结构,并列出行教室声环境改造所需增加的吸声量以及各区域可使用的面积。材料1是木丝板(厚25 mm,50 mm空腔),吸声系数为0.47,需增设面积52.9 m<sup>2</sup>。材料2为槽木吸声板,由中密度板正面开槽(槽宽3 mm、条面宽13 mm)、背面开孔(孔径10 mm、孔距16 mm、穿孔率12%),槽深8 mm且槽孔相对,搭配50 mm厚玻璃棉(容重32 kg/m<sup>3</sup>)和50 mm空腔,吸声系数高达0.84,需增设面积仅

29.6 m<sup>2</sup>。材料3是聚酯纤维吸声棉(800±50 g/m<sup>2</sup>),吸声系数0.60,需增设面积41.4 m<sup>2</sup>。材料4为铝穿孔吸声板(厚1 mm,正方形排孔,孔径3 mm,穿孔率28.3%,后贴46 kg/m<sup>2</sup>吸声毡,100 mm空腔),吸声系数0.54,需增设面积46.0 m<sup>2</sup>。材料5是直穿孔板(后贴吸声毡+50 mm空腔),吸声系数0.57,需增设面积43.6 m<sup>2</sup>。材料6为穿孔铝板(厚1 mm,孔径9 mm,穿孔率4.5%,100 mm空腔,内填30 kg/m<sup>3</sup>超细玻璃棉),吸声系数0.29,需增设面积85.7 m<sup>2</sup>。材料7是穿孔铝板(厚1 mm,孔径9 mm,穿孔率20%,100 mm空腔,内填30 kg/m<sup>3</sup>超细玻璃棉),吸声系数0.73,需增设面积34.0 m<sup>2</sup>。

目前,针对500~1 000 Hz频段,教室内需增加的吸声量为24.84,不同区域可用于增设吸声材料的面积:后墙面积41.4 m<sup>2</sup>,窗下面积14.7 m<sup>2</sup>,顶棚面积102.5 m<sup>2</sup>。

在现有教室中,后墙面积与窗下侧墙面积足够设置4种符合条件的吸声材料及结构,这些材料包括:槽木吸声板、聚酯纤维吸声棉配以穿孔率为20%的穿孔铝板;木丝板、铝穿孔吸声板、直穿孔板以及穿孔率为4.5%的穿孔铝板。这些材料在设置时,除了充分利用后墙空间外,还需酌情利用教室窗下的侧墙或顶棚面积。在设置这些材料时,需综合考虑其吸声性能、消防安全性、耐久性以及装饰效果等多重因素。特别是在教学场所,内部装修材料的燃烧性能等级有着严格的规定:顶棚装修材料的燃烧性能等级不得低于A级,而墙面装修材料的燃烧性能等级则不得低于B1级<sup>[20]</sup>。

鉴于聚酯纤维吸声棉和木丝板作为多孔吸声材料,其防火性能相对较低,因此不宜用于吊顶位置。在铺设时,应将它们主要应用于侧墙和后墙位置。相比之下,穿孔铝板具有较高的防火等级,增设顶棚部分比较安全。然而,穿孔铝板若穿孔率较高,可能会降低光反射比,进而对室内的采光质量产生不利影响。因此,在选择穿孔铝板时,应权衡其吸声效果与采光影响,以确保教室环境的整体舒适性。

Peng等<sup>[21]</sup>的研究发现,即便教室的中频混响时间相近,过长的低频混响时间仍可能显著掩盖语音信号,进而对学生的语音感知造成不利影响。为此,本研究对比了另外两种吸声材料及结

构在低频段的吸声性能,具体数据如表8所示。结果表明,槽木吸声板在低频段的吸声性能表现更为优越,它能够在占用相对较少的后墙面积的情况下,有效地提升教室的吸声量;此外,该材料在满足公共建筑严格的消防要求的基础上,对教室内学生座位区域的采光影响也较小。此外,槽木吸声板的日常维护成本相对较低,并且其装饰效果与教室室内设计单元相得益彰。

综上所述,综合考虑教室的采光、通风以及日常维护等因素,在教室后墙增设槽木吸声板是当前在满足现有使用面积条件下,改善教室声环境的最佳方案。针对受测教室混响时间需要提升室内总吸声量以达到现行标准值的问题,已知在教室容积为440 m<sup>3</sup>的情况下,需要达到70.84 m<sup>2</sup>的室内总吸声量。在进行教室改造时,这一数据可以作为选取吸声材料以优化教室室内声环境的参考依据。

## 5 结论

本研究通过对不同教室在室内使用条件下的混响时间进行实地测量与分析,分析夏热冬暖地区教室的声环境,在确保满足采光、通风以及防火等教室室内设计关键要素的前提下,结合了教室的容积设计和吸声设计两个方面,探讨了改善教室声环境的可行性,得出了以下结论:

1)对于容积较大的教室其混响时间不容易达到标准要求,窗帘作为教室常用遮光措施,展开后对教室混响时间有明显的降低作用,此外由于其较高的吸声性能,也能够有效降低混响时间。因此,在新建教室时,选择合适的窗帘能够改善教室声环境,是一种满足内装与音质改善的经济型措施。

2)控制教室尺寸可有效地使教室达到或接近混响时间的标准要求。对于新建教室,建议根据视线角度关系、学生体型大小、课桌的尺寸大小和座位数等因素合理设计教室尺寸,减少由于容积过大导致混响过长的声环境问题。

3)采用平齐梁底的吊顶设计,可以进一步改善教室的声环境,使大部分教室更好地满足混响时间的标准要求。这不仅对新建教室的设计具有指导意义,而且在对现有教室进行改造时,也具有较高的可行性。

4)在顶棚和后墙安装吸声材料能有效缩短

混响时间,改善教室声环境,但是需要结合教室的防火要求,采用防火等级高的吸声材料,除此之外,教室采光要求顶棚要较高的光反射比,因此需要采用颜色浅且穿孔率小的吸声材料。性

能,导致光反射比低于规定的 0.75 标准,因此,在选择穿孔铝板时,需要合理控制穿孔率,以确保其既能满足吸声需求,又能保持良好的光线反射性能。

### 参考文献:

- [1] KLATTE M, MEIS M, SUKOWSKI H, et al. Effects of irrelevant speech and traffic noise on speech perception and cognitive performance in elementary school children[J]. *Noise & Health*, 2007, 9(36): 64-74.
- [2] 徐欢, 欧达毅. 福清市中小学教室声环境调查与评价[J]. *建筑科学*, 2016, 32(4): 77-86.
- [3] 李楠, 赵越喆, 吴硕贤. 我国亚热带地区中小学校教室声环境分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 9-14, 40.
- [4] 李楠. 中小学教室声环境现状、问题及对策[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [5] SALA E, RANTALA L. Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 114: 252-259.
- [6] PINHO P G, PINTO M, ALMEIDA R M S F, et al. Aspects concerning the acoustical performance of school buildings in Portugal[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 106: 129-134.
- [7] 张轶稀. 既有高校教室室内声环境分析与改造: 以沈阳建筑大学为例[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [8] RUSSO D, RUGGIERO A. Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 146: 280-287.
- [9] 胡亦川, 张三明. 基于角部吸声体的教室声环境优化研究与实践[J]. *建筑与文化*, 2023(3): 19-21.
- [10] 吴硕贤, 张三明, 葛坚. 建筑声学设计原理[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 41.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室内混响时间测量规范: GB/T 50076—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [12] 北京市质量技术监督局, 北京市规划委员会. 公共建筑节能设计标准: DB11/687—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色校园评价标准: GB/T 51356—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [16] 李杰, 李浩, 张蓓. 普通教室混响时间的测量与分析[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(12): 122-125.
- [17] 宋春华, 王珮云, 沈元勤, 等. 建筑设计资料集[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019, (18): 41.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中小学校设计规范: GB 50099—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 杨柳. 建筑物理[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 122-125.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑内部装修设计防火规范: GB 50222—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [21] PENG J X, LAU S K, ZHAO Y Z. Comparative study of acoustical indices and speech perception of students in two primary school classrooms with an acoustical treatment[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 164: 107297.

(责任编辑: 方素华)