

城市地下空间声信号对人员疏散效率的影响^{*}

谢辉^{1,2}, 肖玉玮^{1,2}, 张秋敏^{1,2}

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆, 400045)

摘 要: 地下空间作为解决城市核心区域土地资源不足的空间形式, 其数量与日俱增。火灾时人员安全疏散是对各类建筑空间的基本要求, 然而地下空间由于其“封闭”的环境特征, 在防火疏散方面存在安全隐患。本文分析了不同类型地下空间的声学特征, 并选取重庆市某地下防空洞作为模拟火灾烟雾环境的实验场地, 旨在探讨声信号对疏散效率的影响, 从而为地下空间的疏散设计提供新思路。62位受试者被随机分为3组, 分别在无声信号、有警报声和语音声的环境下进行疏散实验。通过分析实验数据、疏散人员心理与性别, 结果显示声信号的引导能显著提高地下长空间的疏散效率, 有警报声组和语音声组分别比无声信号组的疏散成功率提高了25.5%和35.0%。

关键词: 地下空间; 声信号; 疏散

中图分类号: TU984.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)03-0595-06

The Effect of Acoustic Signals on the Evacuation in Underground Space

Xie Hui^{1,2}, Xiao Yuwei^{1,2}, Zhang Qiumin^{1,2}

(1. School of Architecture and Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, P.R. China)

Abstract: Underground space is a good spatial form to solve the shortage of land resources in the core urban areas, and its total number is increasing recently. The evacuation of personnel in case of fire is the basic requirement of all kinds of building space. However, due to the closed environmental characteristics, fire smoke and hot air in underground space can spread rapidly and fill the entire space, resulting in significant security risks. This paper classified the types of underground space and analyzed its acoustic characteristics. An air-raid shelter in Chongqing was selected as the experiment site, to simulate the real smoky environment of underground fire. The purpose of this paper is to explore the effect of acoustic signal on evacuation efficiency, and thereby develop new guidelines for evacuation design of underground space. A total of 62 subjects were randomly divided into 3 groups, provided with no acoustic signals, alarm sound and voice sound respectively, as the evacuation guide. The psychological and gender influence on the personnel evacuation were analyzed, and it has been shown that the guidance of acoustic signals can significantly improve the effectiveness of underground evacuation. The evacuation success rate of alarm sound group and voice group was 25.5% and 35.0% higher than non-acoustic signal group.

Keywords: underground space; acoustic signal; evacuation

^{*} 收稿日期: 2017-12-10(修改稿)

作者简介: 谢辉(1982-), 男, 山东莱芜人, 博士, 研究员, 主要从事城市声环境研究。E-mail: xh@cqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51678089); 重庆大学前沿交叉学科培育专项(106112017CDJQ198841)

0 引言

在《中国“十二五”科学和技术发展规划》、《中国土地利用总体规划纲要（2006-2020 年）》政策指导下,土地高效集约利用日益成为衡量城市可持续发展的重要标志和必然趋势,我国学者对地下商业空间、隧道及地下交通枢纽等各类地下空间疏散都开展了研究^[1-3]。但现阶段的研究均偏向于对地下空间形式、已有地下建筑疏散效率、火灾排烟方法等研究,而针对地下空间安全疏散的研究并不完善,尤其缺少紧急情况下如何提高人员疏散效率的方法。

地下空间由于其“封闭”的环境特征,火灾时浓烟和热气会迅速蔓延充满整个地下空间,且紧急疏散标志与应急灯容易被烟雾遮挡,导致地下空间在防火疏散方面存在安全隐患。声学指示区别于基于光传播的普通标示,很难被浓烟所阻挡。根据 Bryan 研究发现,当火灾发生时,人体感受中听觉刺激占 53.3%^[4],即大部分人员可通过声音信号感知火灾危险。Wong 等研究者发现,高龄人群(66~88 岁)与中青年人群(22~48 岁)相比,在火灾中需要更高的报警声压级^[5]。针对建筑火灾疏散声信号的研究正逐步开展,但针对地下空间声信号的疏散影响研究很少,故笔者设计了地下空间声疏散实验,分析地下空间声信号对人员疏散效率的影响。

1 城市地下空间类型及其声学特征

1.1 城市地下空间类型

根据地下空间的声场特性以及空间尺度,可将其分为以下两种主要类型:

一是长空间,这类空间的长度远远大于宽度和高度,而空间的宽度和高度较为接近,一般空间的长度是宽度的 6 倍以上;其空间高度多大于 5 m,宽度为 10~20 m,而长度则基本在百米以上;其形式常见于地下商业街与地下隧道等。二是扁平空间,这类空间的特点在于空间的长度和宽度相对接近,常见于地下车库与地下广场。若地下空间的宽度远大于高度,虽然长度和横截面积比值很大,则该空间也依旧归类于扁平空间^[6]。

1.2 不同空间形式的声学特征

地下长空间的混响时间随着空间长度方向改变,因此,声学经典理论不适用于长空间。长空间的混响时间计算必须明确声源的位置,且当空间横

截面积固定、空间高宽比越趋近于 1 时,混响时间趋于最大;对于一个高宽比固定的空间,混响时间随着横截面积的增加而增加^[7]。

地下空间声音混响时间在扁平空间中分布不均匀,并且空间越扁平声场扩散度越低,传统声场理论不适用^[8]。扁平空间中吸声材料的布置对混响时间影响较大,均匀地将吸声材料布置在空间顶部有利于改善空间声环境。

2 实验方法

2.1 疏散实验

地下商业长空间中的人员密度高,长度多大于 30 m,火灾发生时疏散困难,应为火灾疏散研究的主要对象。故本研究选取了重庆市某地下防空洞作为长空间实验场所,并假定其为在高层民用建筑底部双向疏散的地下商场。

根据现场实测,实验场地的平面为 L 形,平均高度约 4 m,平均宽度约 6 m,总长度为 116 m(如图 1)。G 点被设为疏散实验的出发点,A 点为封闭端。为满足《高层民用建筑设计防火规范》

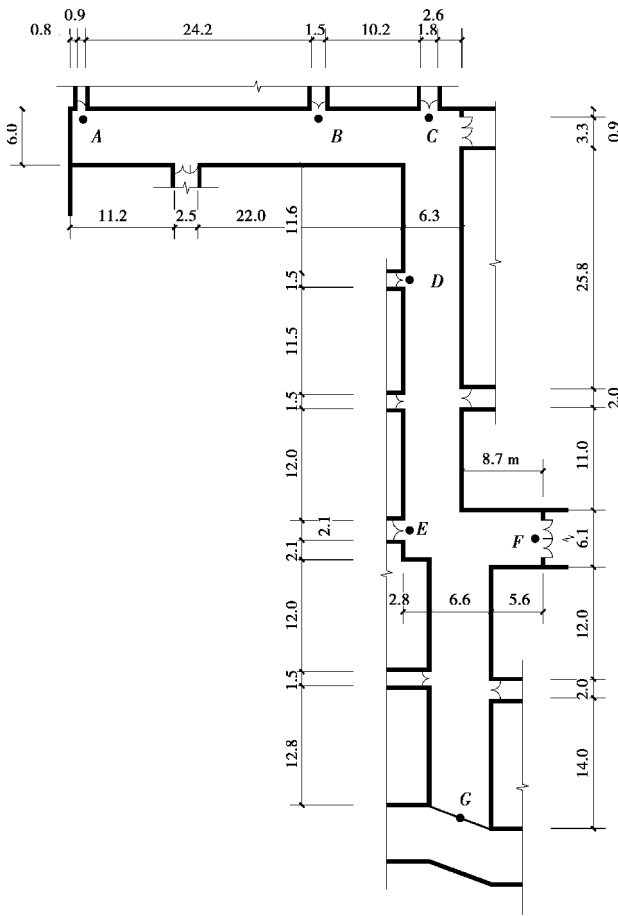


图 1 重庆某防空洞平面图(单位:m)
Fig. 1 Layout of selected shelter in Chongqing(unit:m)

(GB 50045—95)中“商业建筑位于两个安全出口之间的房间的距离不大于 40 m”的疏散距离规定, B 点被设为实验的疏散出口^[9]。此外,声信号装置被安装在 B 点处作为疏散引导。因长空间中声压级沿着空间长度方向衰减^[10],实验前工作人员进行预先测试,确保 B 点发出的疏散声信号能够被 G 点的受试者感知。

实验在 B 点设置一扇疏散门,并贴上受试者在 2 m 范围内可看到夜光消防的安全标识牌。防空洞内放置了夜间摄像仪用于采集疏散行为数据,架设于隐蔽处,不会对疏散过程产生影响,并已提前告知受试者。疏散实验中无自然光的干扰,唯一的光源是满足疏散最低照度要求的双头应急疏散灯(贴片白光 LED,应急输出光源≥50 Lm)。

为模拟真实的火灾场景,提高受试者在疏散过程中的应急水平,实验采用燃放对人体无害的烟雾饼来达到模拟火灾烟雾场景的效果。烟雾饼在 A、B、C、D、F、G 6 个点同时燃放。实验过程中,空间内烟雾浓度会逐渐降低,因此每隔 10 min,研究人员根据能见度的五级量表评级进行相应的补烟,从而保证每位受试者在实验时防空洞内的烟雾浓度保持一致。为确保受试者的安全以及健康,实验过程中每位受试者都佩戴了自吸过滤式防毒半面罩(如图 2)。



图 2 疏散实验场景

Fig. 2 Evacuation experiment scenes

为避免周围环境噪声对实验造成干扰,疏散实验时间选取在晚上 7 点。工作人员在实验前对实

验报名人员进行样本筛选,内容包括视力达标筛选、听力达标筛选、烟雾的过敏性筛选,以及是否进入过该防空洞。实验前每位参与人员填写了知情同意书,并被告知有随时退出的权利。

此次试验共分为 A、B、C 3 组,共 31 男 31 女。其中 A 组(10 男 10 女)为基准参考组,在有烟雾的情景下,无任何声信号地进行地下空间火灾疏散实验;B 组(10 男 11 女)在有烟雾的情景,以警报声作为声信号进行疏散实验;C 组(11 男 10 女)在有烟雾的情景,以语音声(具体语音内容为“疏散口在这里”)作为声信号进行疏散实验。B 组与 C 组的声信号的声压级大小一致(73.4 dB 与 74.6 dB)。实验设置为单人依次疏散,即单个受试者完成整个疏散过程后,再开始下一个受试者的疏散实验。工作人员在实验开始前,告知每一位受试者必须要以最快的速度找到疏散出口,并告知 B 组与 C 组的受试者,可根据听到的声信号来寻找疏散的出口。

因真实火灾会产生大量的氢化氰、一氧化碳、二氧化碳等有毒有害气体,故最佳逃亡时间为 30 s~1 min,在这段时间内被困人员如果没有脱离危险区域,存活时间仅有 2~3 min。所以实验结果分析时,选择疏散时间在 2 min 之内的受试者为成功疏散人员,疏散时间超过 2 min 的视为疏散失败人员^[11]。

2.2 问卷设计

每位受试者在完成疏散实验后填写问卷,共收到 62 份有效问卷。其中第 1 题与第 2 题是针对疏散声信号而设计的,选项采取五级量表(从“完全没有影响”到“影响非常大”)。第 1 题“您觉得疏散引导声的音量大小对自身疏散的影响程度”;第 2 题“您觉得疏散引导声的不同类型(比如语言声、哨声等)对自身疏散的影响程度”;第 3 题“请按以下因素对您选择逃生路径时的影响程度排序(填写数字 1~4,影响程度最大的为 1)”,选项包括“烟气障碍”、“声引导信号”、“疏散通道宽度”、“疏散标志”。

3 实验结果

3.1 地下空间声信号疏散实验结果

表 1 显示了每个实验组的平均疏散时间、疏散时间的标准差和疏散成功率,3 组的疏散时间如图 3~5 所示。疏散时间是指从起点处 G 点发出疏散指令,至受试者找到疏散出口 B 点的这段时间。实验结果显示,有警报声引导的 B 组和语音声引

导的 C 组比 A 组疏散成功率提高了 25.5% 和 35.0%。其中 A 组男生的疏散成功率仅为 40%，而女生的疏散成功率高达 90%，造成这一现象的主要原因在于不同性别的行为模式差别。结合夜视仪录像，可发现 A 组男生虽然疏散的时间比女生快，但基本都是凭借本能地向前冲，10 名男同学中仅有 2 人是直接到达疏散出口 B 点；而女生仅有 2 名出现了折返现象，其余均相对缓慢地成功疏散。

表 1 各组疏散时间统计
Table 1 Statistics of evacuation time

组别	平均值/s	标准差/s	疏散成功率/%
A 组男受试者	130.3	47.87	40
A 组女受试者	87.2s	49.52	90
B 组男受试者	49.9s	14.85	100
B 组女受试者	71.8s	47.38	81.8
C 组男受试者	51.4s	15.85	100
C 组女受试者	46.7s	12.11	100

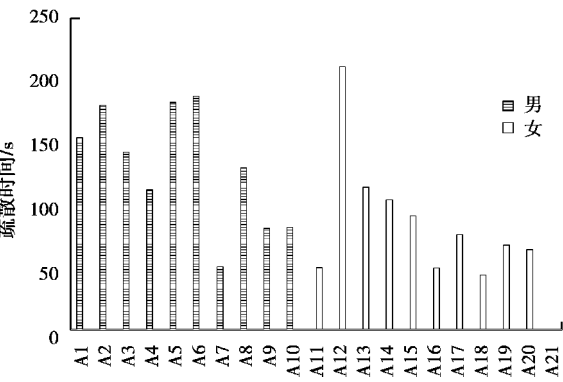


图 3 A 组的疏散时间分布

Fig. 3 Distribution of evacuation time in group A

B 组男生疏散效率的提高最为明显，10 名男生没有出现折返现象；疏散成功率从 40% 提高到 100%；疏散平均时间从 130.3 s 提高到 49.9 s。根据录像分析发现，由于声信号的引导，提高了男生对正确疏散路径的选择，从而提高了疏散效率。实验后通过访谈 B 组 2 名疏散失败的女生，得知女生在视觉受限的环境中较为紧张，对声信号的反应并不敏感，反而觉得持续的警报声甚至有些恐怖，影响了自身的疏散行为，导致疏散失败。这说明选

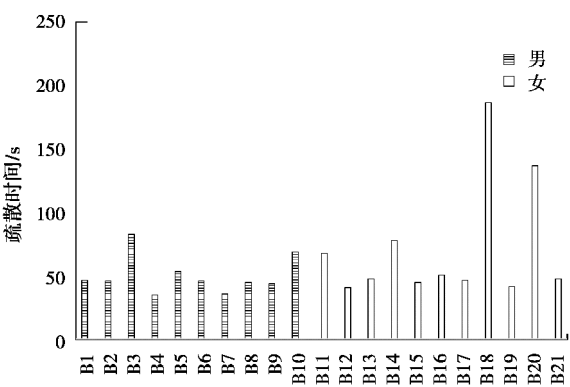


图 4 B 组的疏散时间分布

Fig. 4 Distribution of evacuation time in group B

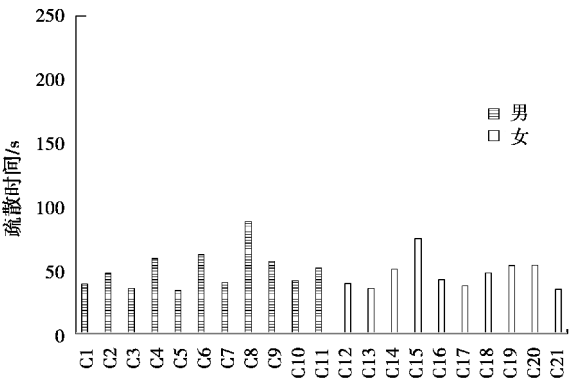


图 5 C 组的疏散时间分布

Fig. 5 Distribution of evacuation time in group C

择疏散声信号时，不仅需要考虑到声信号的可辨识度，也要考虑到声信号类型的可靠性。

C 组男生与女生的疏散时间相近，分别为 54.1 s 与 46.7 s，受试者疏散时间较为稳定。11 名男生，其中 8 名一次性疏散成功，没有折返；10 名女生，7 名女生一次性疏散成功，没有折返。结果表明，语音声信号在火灾疏散中比警报声的引导性好，更容易让处于紧张状态下的疏散者寻找到声源的位置，从而成功疏散。

使用 SPSS 统计软件对 3 组实验的疏散时间差异 T-test 检验。结果显示实验 A 组和 B 组 ($p=0.002$)、A 组和 C 组 ($p=0.002$) 之间，疏散时间存在着显著差异；B 组和 C 组 ($p=0.152$) 之间，疏散时间无显著差异。说明疏散信号都对疏散效率有着明显的提高，但语音声信号与警报声信号对疏散效率的影响差异并不明显。另一方面，对不同男女性别的疏散时间差异进行统计检验，结果表明性别与疏散时间没有显著的差异性 ($p=0.522$)。但对比 A、B 两组相关数据，发现加入声信号之后男生

疏散效率与疏散成功率明显提高,说明声信号对男性疏散效率的潜在改善影响较大。

通过对受试者的访谈与录像的分析表明,L形地下防空洞的拐角处为疏散速度的一个转折点。A组在G点到C点前70 m的疏散距离中花费的平均时间,约占40%的总疏散时间,而从C点至找到疏散出口B点约15 m,约占60%的疏散时间;B组从G点到C点,平均占46%的疏散时间,而从C点至B点占54%的疏散时间。即当视野受限的程度较低时,视觉信息占据主要地位,而声信号基本被忽略;但当环境较为复杂时,声信号占据了主要引导地位,受试者更倾向于通过声信号来寻找出口,而不是根据视觉信息辨别方向从而进行疏散行为。

3.2 主观问卷结果分析

实验中共有8人疏散失败,疏散成功的受试者中,55%将疏散成功归因于声引导信号明确。在实际火灾中由于烟雾无法及时排出,影响被困人员视觉感知的几率较高,因此声信号的引导在地下空间的疏散中起着重要作用。

52%的受试者认为声引导信号对疏散的影响程度最大,其次为疏散标志31%,烟气障碍13%(图6)。约50%的受试者认为音量大小对地下空间的疏散影响比较大,而27%认为音量大小对疏散的影响非常大(图7);47%的受试者认为不同疏散引导声的类型对地下空间疏散影响比较大,15%的受试者认为影响非常大(图8)。因此,需要根据具体的地下空间形式来选择适宜的疏散声信号,并保证声信号的清晰度以及合适的声压级。

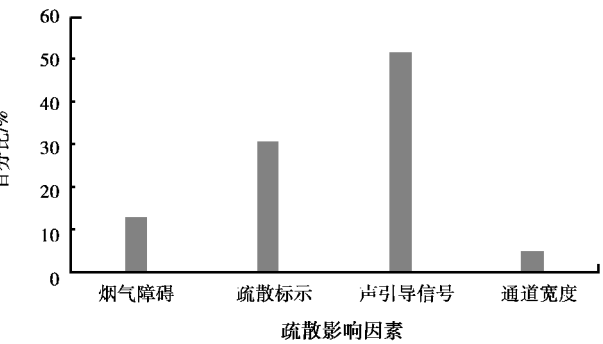


图6 疏散影响因素的优先级选择

Fig. 6 The main impact factors of evacuation in underground space

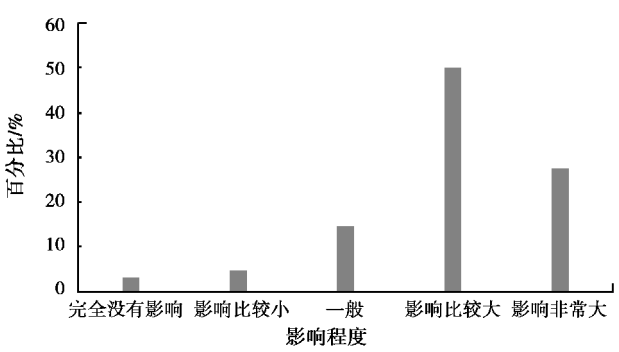


图7 疏散引导声的音量大小对自身疏散的影响程度

Fig. 7 The impact of sound level of signal on evacuation

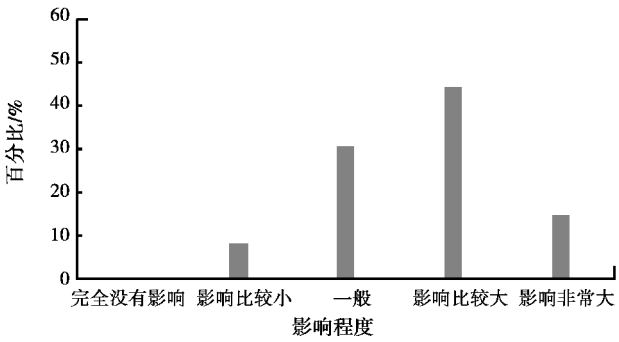


图8 不同类型的疏散引导声对自身疏散的影响程度

Fig. 8 The impact of different evacuation sounds on self-evacuation

3.3 地下长空间声学疏散设计

地下长空间疏散声信号设计不仅应当考虑声信号的声压级,还应注意混响时间、语言清晰度、声学材料以及声源的合理布置。

3.3.1 合理的混响时间与语言清晰度

地下长空间中,围合界面使用材料的吸声系数越小,声能的衰减会越慢,严重的混响声会影响地下长空间的语言清晰度。一般强度高、易清洗、光滑耐磨的墙面与地面装饰材料的吸声系数都很小,因此应在吊顶的设计中选用适当的声学材料或构造;同时在电梯、楼梯设置围合墙体,并在楼梯间内侧墙体铺设吸声材料,达到降低噪声、控制混响时间与提高声场均匀度的目的。

3.3.2 避免声学缺陷

地下长空间因其封闭以及较狭长的空间特性,在实际运用中常常引入中庭空间以削弱地下长空间的封闭感。但中庭是容易出现声学缺陷的空间,在设计时应避免声聚焦等声学问题,避免使用大功

率、高分贝设备,并建议在中庭围合界面多采用吸声材料。目前多用各类穿孔吸声板作为面材,或是在装饰性吊顶内贴矿渣棉等纤维多孔吸声材料。

3.3.3 扬声系统设计

地下长空间的扬声系统中的扬声器布置宜采用分散式布置,可使长空间获得均匀的声场,保持较高的直达声与混响声的声能比值,获得较好的清晰度。通常布置方式分为两种,单独在吊顶布置扬声器或壁装的小功率声柱。

4 结语

通过问卷调研、模拟真实火灾场景的疏散实验,分析了 3 组受试者的疏散时间的分布、声信号与疏散时间的相关性。在真实火灾烟雾环境使视觉受限的情况下,有声信号引导的受试组的疏散时间要显著少于无声信号引导的组别;语音声信号引导的 C 组平均疏散时间要少于警报声引导的 B 组,即语音声信号可更有效地提高地下长空间疏散效率。因此,未来在进行地下空间的疏散设计时,不仅应该考虑建筑功能、布局形式,地下空间的疏散声信号设计也十分重要。

参考文献(References)

[1] 常守民, 汤桦, 陈保健. 大型地下商场安全疏散厅设计探析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5):798-802. (Chang Shoumin, Tang Hua, Chen Baojian. Study on designing of safe evacuation hall in large underground market [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(5): 798-802. (in Chinese))

[2] 吴敏慧. 基于试验的钱江隧道火灾人员疏散综合研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2):460-467. (Wu Minhui. Study on the personnel evacuation under fire conditions of Qianjiang tunnel based on test analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2):460-467. (in Chinese))

[3] 吕元, 向鑫, 胡斌, 等. 交通枢纽型地下综合体疏散空间设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2):259-264. (Lü Yuan, Xiang Xin, Hu Bin, et al. Research on the design for underground complex

evacuation space in transport hub[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 259-264. (in Chinese))

[4] Bryan J L. Smoke as a determinant of human behavior in fire situations[M]. Washington D.C.: National Bureau of Standards, 1977.

[5] Wong L T, Leung L K. Minimum fire alarm sound pressure level for elder care centres[J]. Building and Environment, 2005, 40(1):125-133.

[6] Kang J. Acoustics in long space: theory and design guide[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2002.

[7] 康健. 长空间声学理论及其在地铁车站设计中的应用[J]. 地下工程与隧道, 1998, 8(4):43-46. (Kang Jian. Long space acoustics theory and application in subway station design[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1998, 8(4):43-46. (in Chinese))

[8] 余斌, 蒋国荣. 扁平空间中混响时间的空间分布[A]//建筑环境科学与技术国际学术会议论文集[C]. 东南大学出版社, 2010: 618-621. (Yu Bin, Jiang Guorong. Spatial distribution of reverberation time in flat enclosures [A]//International Conference on Environmental Science and Technology Building [C]. Southeast University Press, 2010: 618-621. (in Chinese))

[9] 中华人民共和国公安部. 高层民用建筑设计防火规范(GB 50045-95)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. (Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Code for fire protection design of tall buildings(GB 50045-95)[S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese))

[10] 陈妍. 长空间的声学特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. (Chen Yan. A study on the acoustics of long enclosures [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese))

[11] 黄冷雨, 江舜勇. 浅析火灾烟气的危害与防范对策[J]. 中国公共安全(学术版), 2011(2): 78-80. (Huang Lengyu, Jiang Shun Yong. Analysis on the hazards of fire smoke and countermeasures [J]. China Public Security (Academy Edition), 2011(2): 78-80. (in Chinese))