

DOI: 10.7672/sgjs2026100097

繁华地段轨道交通施工噪声管控技术研究*

邵彦军¹, 陈东霞², 黄建西¹

(1. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

[摘要] 依托厦门轨道交通 3 号线南延段地铁施工项目, 分析了土石方、基础、结构及隧道内施工阶段下常用施工机械噪声的声源及其特性。结果表明, 大部分设备噪声排放超出施工场界昼间标准, 需采取降噪措施。噪声随距离衰减呈阶段性: 6m 内衰减较快, 6~300m 减缓, 大于 300m 趋于稳定。依据施工场界噪声排放标准及 1 类声环境功能区限值, 计算了各阶段机械的达标距离。针对旅游景区及密集居民区等敏感地段, 提出施工初期场地规划布局、设备精细化管理、合理安排施工计划与优化施工工艺、开展施工场地噪声智能监测等全过程精细化管控措施, 确保噪声排放达标。

[关键词] 地铁; 噪声; 衰减; 监测

[中图分类号] TU112.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0097-06

Noise Control Technology of Rail Transit Construction in Downtown Areas

SHAO Yanjun¹, CHEN Dongxia², HUANG Jianxi¹

(1. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Based on the construction project of the Xiamen Rail Transit Line 3 Southern Extension Section, this paper analyzes the sound sources and characteristics of commonly used construction machinery noise during the earthwork, foundation, structural, and tunnel construction stages. The results show that the noise emissions from most equipment exceed the daytime noise emission standard at the construction site boundary, necessitating noise reduction measures. Noise attenuation with distance exhibits staged characteristics: rapid attenuation within 6m, slower attenuation between 6m and 300m, and stabilization beyond 300m. According to the construction site boundary noise emission standard and the class 1 sound environment functional area limit, the compliance distances for machinery at each construction stage are calculated. For sensitive areas such as tourist attractions and densely populated residential zones, a set of whole-process refined control measures is proposed, including site layout planning in the early construction phase, refined equipment management, rational scheduling of construction activities and optimization of construction techniques, and intelligent noise monitoring at the construction site, to ensure that noise emissions meet the required standards.

Keywords: subways; noise; attenuation; monitoring

0 引言

随着各大城市大力发展轨道交通建设, 轨道交通施工噪声成为影响城市环境的重要因素。施工

噪声污染将直接影响施工人员和周边居民正常的工作、学习和日常生活, 危害居民的身心健康。轨道交通开通运营后产生的环境噪声长期存在, 且随着运营周期增长, 环境噪声会逐渐增强。国内外学者对轨道交通工程环境噪声的研究主要集中在运营阶段。敬瑞龙^[1]以南京地铁某地面线为例, 采用加装声屏障的方式, 有效控制地铁运行噪声的影

* 中铁南方 2022 年科技创新计划(202208)

[作者简介] 邵彦军, 工程师, E-mail: 1317772583@qq.com

[通信作者] 陈东霞, 助理教授, 硕士生导师, E-mail: dongxiachen@xmu.edu.cn

[收稿日期] 2025-12-07

响。余奇等^[2]为了解决城市轨道交通低频振动噪声问题,研究了基于局域工程机理技术新型超材料波阻垫,设计该材料几何参数,达到了低频振动控制及地铁减振降噪目的。Huang 等^[3]提出了平均声压级、峰值声压级、百分位数声压级、主频成分和累积时间等指标的噪声评估框架,并基于密度的噪声应用空间聚类法识别噪声模式,评估了其对轨道交通驾驶员的危害。施工阶段噪声研究主要是关于施工场界噪声监测、施工噪声评价及声环境管理方面。陈浩等^[4]通过 Cadna/A 软件建模预测区域声级分布,提出相应的轨道交通施工期噪声控制措施。陈珂等^[5]通过构建以施工噪声健康损害、成本、工期和质量为约束的施工机械配置多目标优化模型,实现施工降噪。目前,基于繁华地段密集居民区的轨道交通施工噪声管控研究较少,施工全过程的噪声精细化管控研究更少。本文依托厦门轨道交通 3 号线南延段地铁施工项目,总结轨道交通施工中常用设备噪声的声源及其声学特性,分析了施工机械噪声随距离的衰减规律;计算施工场界环境噪声排放标准和 1 类声环境功能区噪声限值下的达标距离。最后结合南延段工程实际,针对繁华地段地铁施工提出精细化噪声防治、管理与控制措施。

1 工程概况

厦门市轨道交通 3 号线南延段工程起于沙坡尾站,北至厦门火车站,全长 8.5km,线路沿民族路、大学路、环刀南路、龙虎山路敷设。途径沙坡尾景区和胡里山炮台景区、厦门大学及多处沿街民房、商铺及住宅区。对于旅游文明城市繁华地段的轨道交通施工,尤其要重视施工过程中的环境保护,如施工噪声、振动和扬尘控制等。

2 轨道交通施工噪声的声源及特点

轨道交通施工阶段的噪声来源包括施工机械噪声、施工人员噪声和现场作业噪声。其中,施工人员噪声和现场作业噪声通常属于瞬时噪声,其声压级较高,频率范围相对较窄,对周边居民造成的健康影响小且短暂。施工机械噪声是施工噪声的主要来源。基坑施工现场大型施工机械种类、数量多,噪声排放主要表现为低频噪声,低频噪声的波长较长,衰减相对较慢,更容易穿越障碍物,所以对周边居民造成的影响也更大。轨道交通施工设备噪声源特性分析如表 1 所示^[6-8]。

结合表 1,关于地铁工程施工现场的常见施工机械噪声特点,可总结如下。

1) 不同类型的施工机械噪声幅值差别较大,且以稳态噪声为主。土石方施工阶段,噪声最小幅值

为装卸机低速移动时的 57.2~68.6dB(A),最大幅值为破碎机在破拆混凝土块时的 96.9~102.8dB(A)。基础施工阶段,噪声最小幅值为履带式起重机吊装钢筋时的 54.5~59.3dB(A),最大幅值为正循环钻机高速挡运转时的 74.2~77.6dB(A)(瞬态除外)。结构施工阶段,噪声最小幅值为钢筋切断机空转时的 55.4~60.7dB(A),最大幅值为圆盘锯作业时的 91.3dB(A)。隧道内施工阶段,噪声最小幅值为盾构机拼装管片时的 83dB(A),最大幅值为凿岩机作业时的 106.6dB(A)。整个施工期间稳态噪声幅值最大值和最小值相差 52dB(A) 以上。会产生较大稳态噪声幅值的施工机械主要有破碎机、风镐、履带式起重机、平地机、圆盘锯、切割机,凿岩机,日间施工噪声管理应重点关注这些声源。

2) 同一施工机械,不同工况下其噪声大小相差较大。一般情况下,机械负荷状态越高,其噪声排放越大。如空气压缩机在驱动 1 把风镐和 2 把风镐时,声强可相差近 15dB(A)。在进行施工噪声模拟预测时需考虑机械设备的负荷状态变化对噪声排放的影响。

3) 轨道交通施工过程中,超过 2/3 的施工机械噪声超出了施工场界昼间噪声限值 70dB(A),所有的施工机械噪声均超出施工场界夜间噪声限值 55dB。因此,有必要在施工过程中精心部署,有效开展施工噪声管理与控制,确保施工场界噪声排放达标。

3 轨道交通施工噪声的达标距离

施工机械噪声对施工场界的影响可近似作为点声源处理。参考 HJ 2.4—2021《环境影响评价技术导则声环境》,只考虑几何发散衰减时,距声源 r 处的 A 声级 $L_A(r)$ 计算如下:

$$L_A(r) = L_A(r_0) - A_{\text{div}} \quad (1)$$

式中: $L_A(r_0)$ 为距声源 r 处的 A 声级; A_{div} 为几何发散引起的衰减, dB(A)。

施工机械的噪声衰减主要为几何发散引起的衰减。此外,施工场界内一般没有植物、建筑物等,因此仅考虑空气吸收与地面效应引起的衰减。采用无指向性点声源衰减模型对地铁施工期间施工场界的噪声影响进行分析,预测点声压级计算如下:

$$L_p(r) = L_p(r_0) - 20 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) A_{\text{atm}} - A_{\text{gr}} \quad (2)$$

式中: $L_p(r)$ 为预测点处声压级; $L_p(r_0)$ 为参考位置 r_0 处的声压级; r 为预测点距声源的距离; r_0 为参考位置距声源的距离; $20 \lg(r/r_0)$ 为点声源的几何发散衰减; A_{atm} 为大气吸收引起的衰减; A_{gr} 为地面效

表 1 轨道交通施工设备噪声源特性					
Table 1 Characteristics of noise sources in rail transit construction equipment					
施工阶段	施工机械	工况	声强/dB(A)	类别	备注
土石方施工阶段	挖土机	挖土	71.4	稳态	79.0dB(A)/5m
	装卸机	负荷低速移动	57.2~68.6	稳态	78.0dB(A)/5m
	长臂挖掘机	周期性作业	64.7~68.5	稳态	80.6dB(A)/5m
	小型挖掘机	周期性作业	61.4~64.8	稳态	—
		抖土	69.8~72.4	瞬态	—
	风镐	破拆地下连续墙	79.0~86.4	稳态	95.3dB(A)/5m
	破碎机	破拆混凝土块	96.9~102.8	稳态	—
	空气压缩机	驱动 1 把风镐	54.9~56.0	稳态	—
		驱动 2 把风镐	66.2~69.8	稳态	82.1dB(A)/5m
	平地机	作业时	86.0~92.0	稳态	—
基础施工阶段	推土机	作业时	82.0	稳态	89.0dB(A)/5m
	正循环钻机	中速档	68.1~71.2	稳态	—
		高速档	74.2~77.6	稳态	—
	灌注桩	正常作业	65.5~69.7	稳态	—
	履带式起重机	吊装钢筋	54.5~59.3	稳态	—
		在混凝土地面行走	72.6~77.8	稳态	—
	汽车式起重机	吊装钢筋	65.5~71.7	稳态	—
	混凝土输送泵车	鸣笛	95.8	瞬态	—
		低负荷输送混凝土	63.6	稳态	—
		高负荷输送混凝土	66.2~70.8	稳态	—
	混凝土搅拌车	原地低速搅拌	57.4~60.5	稳态	—
		高速搅拌	62.3~67.4	稳态	—
	成槽机	作业	68.6~73.6	稳态	—
	泥浆泵	抽泥浆(配合钻机)	64.2~71.6	稳态	—
结构施工阶段	振捣棒	振捣作业时	73.0	稳态	79.0dB(A)/5m
	钢筋切断机	空转	55.4~60.7	稳态	—
	渣土车	原地待机	56.8~58.6	稳态	—
		鸣笛	91.8~95.3	瞬态	—
		空载低速通过	60.0~64.8	稳态	—
		满载低速通过	61.6~68.6	稳态	—
	圆盘锯	作业时	91.3	稳态	95.8dB(A)/5m
	切割机	作业时	83.0	稳态	95.4dB(A)/5m
	门式起重机	倒/出土箱与集土坑壁碰撞	78.5~83.6	瞬态	距离机械 30m
	搅拌机	搅拌砂石等	75.2	稳态	82.7dB(A)/5m
	工程运输车	作业时	82.0	稳态	—
	盾构机	拼装管片	83.0	稳态	盾构机前操作台附近
		掘进	89.5	稳态	—
	地下电瓶车	运送管片	90.3	稳态	隧道内电瓶车旁
		卸载钢管(钢管碰撞地面)	118.0	瞬态	—
隧道内施工阶段	冻结站	制冷功率 122kW	88.7	稳态	制冷剂组护栏附近
	低噪轴流通风机	风量 24 500m ³ /h,转速 1 450r/min	93.6	稳态	距通风机 1m
	矿用轴流通风机	风量 220m ³ /min,转速 2 930r/min	102.9	稳态	距通风机 1m
	鼓风机	作业时	84.8	稳态	92.3dB(A)/5m
	移动发电机	作业时	92.0	稳态	—
	凿岩机	作业时	106.6	稳态	—

注:施工机械的噪声源强无特殊备注,均取同一参考位置,即测量距离为 10m,测量高度为地面以上 1.2m;79.0dB(A)/5m 表示测量距离为 5m,测量高度为地面以上 1.2m 时的声强为 79.0dB(A)

应引起的衰减。
 A_{atm} 计算如下^[9]：

$$A_{atm} = \frac{\alpha(r - r_0)}{1\ 000} \tag{3}$$

式中: α 为与温度、湿度和声波频率有关的大气吸收衰减系数,预测计算中一般根据建设项目所处区域常年平均气温和湿度选择相应的大气吸收衰减系数;厦门地区可取温度 20℃、湿度 70%对应的 α 值。

考虑到施工场地内大部分土质地面处于开挖状态,多为疏松地面或大部分为疏松地面的混合地面。同时,施工机械噪声不是纯声,声波接收点仅计算 A 声级,满足 A_{gr} 另一种计算方法的前提条件,

即对于任意形状的地面,地面衰减计算如下^[9]:

$$A_{gr}=4.8-\frac{2h_m}{d}(17+300/d)\geq 0\quad (4)$$

式中: h_m 为传播路程的平均离地高度; d 为声源至接收点的距离;若得出的 A_{gr} 为负值,则用 0 代替。

从表 1 中挑选出噪声时域特性为稳态噪声且噪声强度超过夜间施工噪声限值 55dB(A) 的施工机械,按式(2) 计算得出轨道交通施工阶段各主要施工机械(取各工况下的最大噪声级)在不同距离处的参考声级,如表 2 所示^[10]。

表 2 环境噪声限值

Table 2 Environmental noise limits dB(A)				
声环境功能区分类		昼间	夜间	
0 类	康复疗养区等特别需要安静的区域	50	40	
	居民住宅、医疗卫生、文化教育、科研设计、行政办公为主要功能需要保持安静的区域	55	45	
2 类	商业金融、集市贸易为主要功能,或者居住、商业、工业混杂需要维护住宅安静的区域	60	50	
	工业生产、仓储物流为主要功能,需要防止工业噪声对周围环境产生严重影响的区域	65	55	
4 类	4a 高度公路、一二级公路、城市快速路、城市主次干路、城市轨道交通、内河航道两侧区域	70	55	
	4b 铁路干线两侧区域	70	60	

建筑施工机械和工程车辆的噪声量很大。在实际地铁工程施工过程中一般是多种机械同时作业,各种噪声源辐射的噪声相互叠加,影响更严重。多个施工机械共同作用时,总声级计算如下:

$$L_p=10\lg\left(\sum_{i=1}^n10^{0.1L_{pi}}\right)\quad (5)$$

式中: L_p 为 n 个噪声源的噪声在预测点叠加后的总噪声级; L_{pi} 为第 i 个噪声源单独在预测点处的声压级。

施工机械噪声级 L 与距离噪声源距离 r 的变化关系如图 1 所示。由图 1 可知,施工机械噪声级随着距离的增大而减小,且距离噪声源越近处噪声衰减较快。当距离噪声源越远时,噪声衰减越慢。距离噪声源<60m,噪声衰减速率较快;当距离噪声源 60~300m 时,噪声衰减速率明显降低;当距离噪声源>300m 后,噪声衰减速率逐渐趋于稳定。

厦门市轨道交通 3 号线南延段工程项目下辖 2 个工区:1 工区途径沙坡尾、厦门大学附属医院、厦门市第一离职干部修养所、厦门大学访客中心、厦大白城站和胡里山炮台;2 工区途径厦门市科技中学、厦门岷厦国际学校、文曾书苑、铁路疗养院等。2 个工区周边均有学校及密集街民房、商铺及住宅

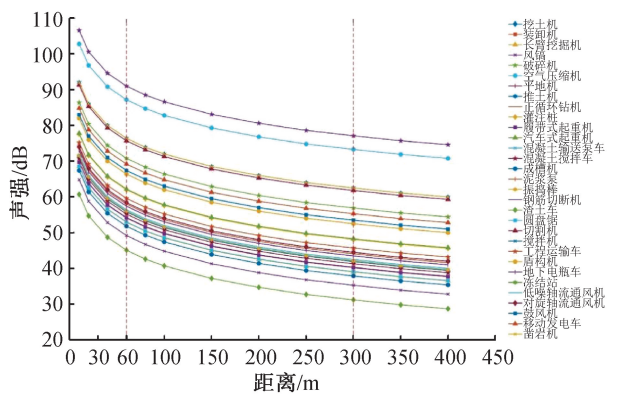


图 1 施工机械噪声衰减曲线

Fig.1 Noise attenuation curve of construction machinery

区。环境噪声限值如表 2 所示。由表 2 可知,2 个工区周边环境大多属于 1 类声环境功能区。其中,个别地段属于 0 类声环境功能区,如厦门市第一离职干部修养所和铁路疗养院附近地段。0 类和 1 类环境噪声限值分别为昼间 50,55dB(A) 和夜间 55,45dB(A),均低于施工环境场界的噪声限值。因此,在南延段项目施工过程中,更需重视施工噪声管理与控制。

由于大部分噪声超标的施工机械均禁止在夜间时段施工,且隧道内施工阶段基本处于密闭环境,因此,此处仅讨论土石方阶段、基础阶段和结构阶段频繁作业的施工机械昼间达标距离。由前述可知,施工场界环境噪声昼间排放限值为 70dB(A),1 类声环境功能区昼间环境噪声限值为 55dB(A),计算得到达标距离如表 3 所示。由表 3 可知,土石方阶段,施工机械(破碎机、平地机、风镐、推土机除外)昼间达标距离为 6~13m,即该阶段施工时,上述机械设备距离场界 13m 以上;基础阶段,施工机械距离场界 25m 以内可满足昼间施工噪声排放标准;结构阶段(圆盘锯除外)昼间达标距离约为 45m;隧道内施工阶段(移动发电机及凿岩机除外)昼间达标距离约 55m。按 1 类声环境功能的噪声限值要求,昼间达标距离(距离居民区、医院、学校等):土石方阶段为 66m 内;基础阶段为 138m 内;结构阶段为 251m 内。

4 南延段地铁施工噪声精细化管控

南延段工程(SEP)施工中,开展考虑噪声控制的施工组织设计,进行施工全过程的噪声精细化管控,确保噪声排放达标,以满足绿色施工的各项要求。

4.1 施工场地合理规划布局

1) 运输道设置时尽量远离密集居民区,无法远离时则优化路线,选择途径房屋最少的路线。例如在施工总平面布置方面,施工现场的搅拌站、仓

表 3 施工机械噪声达标距离

Table 3 Construction machinery noise standard distance

m			
施工阶段	施工机械	施工场界昼间 达标距离	1 类声环境功能 昼间达标距离
土石方 阶段	挖土机	12	66
	装卸机	9	48
	长臂挖掘机	9	48
	小型挖掘机	6	31
	风镐	66	372
	破碎机	437	2 455
	空气压缩机	10	55
	平地机	126	708
	推土机	40	224
	正循环钻机	24	135
基础阶段	灌注桩	10	54
	履带式起重机	25	138
	汽车式起重机	12	69
	混凝土输送泵车	11	62
	混凝土搅拌车	8	42
	成槽机	15	85
	泥浆泵	12	68
	振捣棒	14	80
	钢筋切断机	4	19
	渣土车	9	48
结构阶段	圆盘锯	116	653
	切割机	45	251
	搅拌机	18	103
	工程运输车	40	224

库、加工厂、作业棚、材料堆场等布置靠近已有交通线路或临时交通线路,缩短运输距离。

2)临时设施布置注重远近结合(本期工程与下期工程),减少和避免大量临时建筑拆迁和场地搬迁,即减少前期工程中拆迁和搬迁带来的噪声污染。

4.2 施工设备精细化管理

1)选择低噪声的施工设备,装载机可选择 XC968-EV 纯电动装载机,推土机选择 DH17-C3 履带式推土机等。个别设备噪声较大,可加阻尼消声器、微孔消声器等减少施工噪声;噪声大的强噪声设备可以加装独立的隔声罩,如风机隔声罩。

2)合理放置噪声设备,使其对周边噪声污染最小化。在施工现场布置机械设备时,尽可能远离居民区;在噪声污染严重或设备密集的施工点周围建造围墙或隔声屏障。在南延段白城地铁站施工时,噪声污染较大,而该地段紧邻厦门大学和胡里山炮台及白城沙滩景区,因此设置了围挡隔声屏障,如图 2 所示。

若设置声屏障后噪声依然较大,可考虑采用全封闭施工。厦大白城站—曾厝垵站区间盾构井邻近珍珠湾花园小区,且作为后期矿山的施工窗口,噪声影响较大,为保证绿色施工,减少噪声影响,厦



图 2 施工场地隔声屏障

Fig. 2 Noise barriers at construction sites

曾厝垵井采用全封闭施工(见图 3)。



图 3 盾构井效果

Fig. 3 Shield tunnel shaft effect

3)钢筋加工区设置加工棚。对于成品或半成品构件的加工制作,通常会产生强噪声,可将其放在工厂或车间完成。钢筋切割、拉直、焊接等加工操作均在钢筋加工棚内完成,有效减少了噪声污染。

4)机械设备操控过程管理。建立主要固定设备的噪声排放指标;记录设备运转时长占所有工作时间的比例,将其用于细化模型分析;定期维护和修理会消除或明显减少设备发生故障的概率。同时,操作设备和搬运材料时将撞击声降至最低。运输车辆进出施工场地时减速慢行、禁止鸣笛,减少交通噪声和鸣笛噪声的干扰。不使用时关闭或切断发电机、起重机等设备。

4.3 合理安排施工计划

1)集中进行噪声较大的作业。集中作业产生的总噪声水平不会明显大于分开作业。

2)合理安排施工计划,减小噪声强度和敏感点噪声干扰的时间。如避免在居民区进行夜间作业,在特殊时段(如高考期间)不进行有噪声的作业;噪声超标的施工机械严禁在中午(12:00—14:00)和夜间(23:00—7:00)时段施工。

3)结构施工完成后,将部分施工设备移入结构内的地下空间,减少在地面施工产生的噪声。

4.4 施工工艺优化

改进或优化施工工艺也可有效降低施工期的噪声。针对南延段厦大白城站基坑内存在石方的情况,原方案采用炸药爆破处理。考虑采用炸药破碎石不仅会对基坑产生较大的扰动,同时会在环

岛路旅游区产生较大的噪声污染。项目组设计采用圆盘锯切割技术破除基坑内石方,即利用矿山采石机将基岩切割为 1m 左右的方块,底部采用液压扩张器使基岩分离,再采用吊装设备将标准石块移除。改进后的处理方式可有效降低噪声且安全环保。

4.5 机械设备噪声智能监测

智能监测系统能实时采集噪声数据并传输到中心控制台或云端服务器进行分析处理^[11],还可通过数据和算法优化实现噪声源的识别和定位,帮助施工管理人员迅速了解施工噪声状况,及时调整施工方案,减少噪声对周边环境的影响。

采用环境监测仪在各施工场地进行环境噪声 24h 实时监控测量,分析处理后的噪声数据,结果每分钟上传 1 次。该系统已接入南延段工程的智慧工程管理信息平台(见图 4),可实现手机实时查看。一旦监测到场界噪声超过噪声排放标准值,可通过查看实时监控,立即采取如切断噪声源等有效措施,确保噪声排放达标,切实打造绿色施工环境。

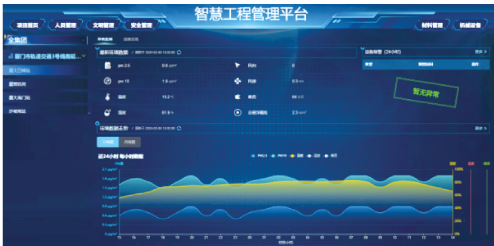


图 4 南延段全自动噪声、扬尘监测系统
Fig.4 Automatic noise and dust monitoring system of the SEP

4.6 施工人员的管理教育工作

1)定期开展施工教育,宣传文明施工理念,提高施工人员素质,强化施工人员防治噪声污染的意识。

2)设置警示牌或粘贴标语,协助规范工人的施工行为。如在运输车辆进出场地处设置减速慢行和禁止鸣笛的警示牌;在材料装卸堆放处设置“轻拿轻放”和“防止碰撞”等标语。

3)为隧道内施工人员配置噪声防护用具,关注他们的职业健康,防止长期噪声环境作业带来的职业危害。

5 结语

1)轨道交通施工过程中各施工阶段绝大部分机械设备的噪声均超过施工场界昼间噪声限值,噪声最小幅值为履带式起重机吊装钢筋时的 54. 5dB,噪声最大幅值为凿岩机作业时的 106. 6dB。同一设

备,不同工况下其噪声大小相差较大。负荷状态越高,其噪声排放越大。

2)施工设备噪声级随着距离的增大而减小。距离噪声源越近处噪声衰减较快。距离噪声源 60m 内,大部分施工设备噪声衰减速度较快;60~300m 噪声衰减速度明显降低;超过 300m 后,噪声衰减速度逐步趋于稳定。

3)满足施工场界噪声排放和 1 类声环境噪声限值要求下,轨道交通各施工阶段频繁作业的机械设备昼间达标距离:土石方阶段分别为 13m 和 66m 内,基础阶段分别为 25m 和 138m 内,结构阶段分别为 45m 和 251m 内。

4)繁华地区轨道交通工程,建议开展施工全过程的噪声管控;施工初期对施工场地进行规划布局,施工过程中对机械设备精细化管理,合理安排施工计划,优化施工工艺,开展噪声智能监测,实现施工噪声的精细化管控,确保噪声排放达标。

参考文献:

[1] 敬瑞龙. 地铁地面线加装声屏障的施工安全与运营防护[J]. 市政技术,2017,35(1):92-94,98.
JING R L. Construction safety and operating protection of retrofitting noise barriers of ground subway lines[J]. Municipal engineering technology,2017,35(1):92-94,98.
[2] 余奇,赵才友,张鑫浩,等. 铁路超材料波阻垫设计与低频减振降噪应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(12):5221-5231.
YU Q, ZHAO C Y, ZHANG X H, et al. Research on the design and frequency vibration and noise reduction application of railroad metamaterial wave-resistant pads[J]. Journal of railway science and engineering, 2024,21(12):5221-5231.
[3] HUANG L,SUN Z Q,YU C C,et al. The noise exposure of urban rail transit drivers: hazard classification, assessment, and mitigation strategies[J]. Applied sciences,2024,14(16):7388.
[4] 陈浩,赵文文,王大鹏. 城市轨道交通工程施工噪声污染管控技术研究[J]. 交通节能与环保,2022,18(1):156-161.
CHEN H, ZHAO W W, WANG D P. Research on managing construction noise on metro tunnel project[J]. Transport energy conservation & environmental protection,2022,18(1):156-161.
[5] 陈珂,孟晓峰,蒋伟光. 基于施工机械配置优化的施工噪声管理方法[J]. 科学技术与工程,2024,24(18):7859-7866.
CHEN K, MENG X F, JIANG W G. Construction noise management based on optimization of construction machinery configuration[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(18):7859-7866.
[6] 胡厚兰,司光晔. 高速公路施工期噪声影响及防治对策[J]. 公路,2013,58(6):212-215.
HU H L, SI G Y. Influence of noise during expressway construction and its prevention countermeasures [J]. Highway, 2013,58(6):212-215.

[7]

周利睿,耿飞,林辉,等. 细砂对泡沫混凝土物理力学性能及孔结构的影响[J]. 建筑节能,2018,46(5):135-138,145.
ZHOU L R,GENG F,LIN H,et al. Effect of fine sand on strength and pore structure of foam concrete [J]. Building energy efficiency,2018,46(5):135-138,145.

[8]

崔玉理,贺鸿珠. 温度对泡沫混凝土性能影响[J]. 建筑材料学报,2015,18(5):836-839,846.
CUI Y L,HE H Z. Influence of temperature on performances of foam concrete[J]. Journal of building materials,2015,18(5):836-839,846.

[9]

杨之璋,詹炳根. 外加剂对泡沫混凝土早期收缩开裂的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(9):1234-1239.
YANG Z Z,ZHAN B G. Effect of admixture on early shrinkage cracking of foam concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science),2020,43(9):1234-1239.

[10]

吴森宝,宗琦,王军国,等. 低温下泡沫混凝土的动态力学性能[J]. 硅酸盐通报,2022,41(1):76-87.
WU S B,ZONG Q,WANG J G,et al. Dynamic mechanical properties of foamed concrete at low temperature[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2022,41(1):76-87.

[11]

张鑫. 浅谈外加剂和配合比对泡沫混凝土降低吸水率的影响[J]. 建材发展导向,2021,19(24):73-75.
ZHANG X. Discussion on the influence of admixture and mixing ratio on reducing water absorption of foam concrete [J]. Development guide to building materials,2021,19(24):73-75.

[12]

龚建清,周孜豪. 纤维和外加剂对泡沫混凝土收缩性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(5):76-85.
GONG J Q,ZHOU Z H. Effects of fiber and admixture on shrinkage performance of foamed concrete[J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2019,46(5):76-85.

[13]

邓均,霍冀川,宋言红,等. 聚乙烯醇纤维泡沫混凝土的性能试验[J]. 混凝土与水泥制品,2012(2):41-44.
DENG J,HUO J C,SONG Y H,et al. Properties experimeilt on foamed concrete with polyvinyl alcohol fibre[J]. China concrete and cement products,2012(2):41-44.

[14]

詹炳根,李建勋,林涛. 混杂纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(3):400-405.
ZHAN B G,LI J X,LIN T. Effect of hybrid fiber on shrinkage cracking of foam concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science),2020,43(3):400-405.

[15]

马一平,李国友,杨利香,等. 表观密度和聚丙烯纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J]. 材料导报,2012,26(6):121-125.
MA Y P,LI G Y,YANG L X,et al. Effect of the apparent density and polypropylene fiber on drying shrinkage cracking properties of foam concrete[J]. Materials review,2012,26(6):121-125.

[16]

徐徐,徐怡,蒋林华. 聚苯乙烯改性泡沫混凝土的强度和收缩性能研究[J]. 混凝土,2020(1):69-73,77.
XU X,XU Y,JIANG L H. Study on strength and shrinkage of EPS modified foam concrete[J]. Concrete,2020(1):69-73,77.

[17]

YAVUZ BAYRAKTAR O,KAPLAN G,GENCEL O,et al. Physico-mechanical,durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag [J]. Construction and building materials,2021,288:123128.

[18]

宋强,张鹏,鲍玖文,等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.
SONG Q,ZHANG P,BAO J W,et al. Research progress and application of foam concrete[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2021,49(2):398-410.

[19]

丰土根,杨航,张箭. 水灰比对泡沫混凝土性能的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(2):1-6.
FENG T G,YANG H,ZHANG J. Study on the effect of water/ cement ratio on the performance of foamed concrete[J]. Journal of Hebei University of Engineering (natural science edition),2024,41(2):1-6.

(上接第 102 页)

[7]

刘宗彬,黄均,白旭辉,等. 城市轨道交通工程施工噪声影响分析及降噪管理措施研究[J]. 工程管理学报,2024,38(3):76-81.
LIU Z B,HUANG J,BAI X H,et al. Research on construction noise monitoring and noise reduction measures of urban rail transit projects[J]. Journal of engineering management,2024,38(3):76-81.

[8]

张振华,白永厚,郭春,等. 钻爆法施工隧道噪声传播特性研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(6):821-826.
ZHANG Z H,BAI Y H,GUO C,et al. Noise propagation characteristics of tunnel construction by drilling and blasting method[J]. Tunnel construction,2020,40(6):821-826.

[9]

电子工业部第三研究所,中国科学院声学研究所,北京大学,等. 声学 户外声传播的衰减第 2 部分:一般计算方法:GB/T 17247.2—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
The Third Research Institute of the Ministry of Electronic Industry, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Peking University, et al. Acoustic attenuation of outdoor sound propagation Part 2: general calculation method: GB / T 17247.2—1998 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1998.

[10]

中国环境科学研究院,北京市环境保护监测中心,广州市环境监测中心站. 声环境质量标准:GB 3096—2008[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing Environmental Protection Monitoring Center, Guangzhou Environmental Monitoring Center Station. Acoustic environmental quality standard: GB 3096—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.

[11]

黄文强. 智能监测系统在建筑施工噪声与污染控制中的作用研究[J]. 绿色建造与智能建筑,2024(10):56-58,82.
HUANG W Q. Research on the role of intelligent monitoring system in controlling construction noise and pollution[J]. Green construction and intelligent building,2024(10):56-58,82.