

成都熊猫基地熊猫兽舍竹纹装饰混凝土墙体 隔热性能改进方法

罗利¹, 周吉日¹, 高志惠¹, 陈雪梅²

(1. 中国五冶集团有限公司, 成都 610063; 2. 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106)

摘要: 为研究大熊猫兽舍饰面混凝土墙体隔热性能,以成都熊猫基地改扩建工程为例,在普通硅酸盐水泥中掺入一定比例的陶粒、聚丙烯纤维等材料,制备降噪隔热混凝土。通过热过程模拟与试验,研究陶粒饰面混凝土的隔热性能影响。同时,结合竹模、吸音孔、吸音棉、消音管等吸声元素,研制出大熊猫馆舍竹纹饰面吸音隔热混凝土。试验结果表明:这种新型混凝土墙体结构不仅满足熊猫兽舍降噪要求而且隔热效果也十分理想,对于动物栖息场所的降噪隔热治理具有较好的推广应用价值。

关键词: 陶粒混凝土; 竹纹饰面; 导热系数; 热工模拟; 隔热性能

中图分类号: TU55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0284-05

在人类生存活动密切相关的城市区域修建动物栖息地及生态公园,不可避免对城市栖息地内的动物在生活和休憩方面造成很大影响。为此,国内外大多数建筑在建造过程中都充分采用了吸音、隔热混凝土材料。多孔、降噪及隔热性混凝土通常暴露在噪声环境下使用,要求混凝土对低音域到中、高音域频率的声波均具有吸收的能力,同时具有良好的隔热、耐火及美观性。

近年来许多机构和高等院校开展了多孔吸音降噪材料的研究工作,通过使用泡沫发泡剂、造孔剂及陶粒为骨料的多孔混凝土等制作成多孔吸音降噪材料^[1-5]。部分研究已广泛应用于房屋建筑噪声控制、轨道交通的声屏障等。胡胜等^[6]、虞秀勇^[7]研制出一种以硅酸盐水泥为胶凝材料、陶粒为骨料的水泥基陶粒吸声混凝土材料,结果表明,将不同单级配陶粒混凝土串联起来能大幅提高其吸声性能。而在陶粒混凝土材料隔热方面的研究则较少,其中王丽刚^[8]研究了陶粒混凝土整体式保温隔热建筑的应用及其效果,发挥了陶粒混凝土最大的应用优势,降低了建筑能耗。宫保聚等^[9]研究了掺加一定比例陶粒、玻化微珠和粉煤灰替代部分水泥而生产出的

混凝土,这种新型混凝土不仅满足喷层强度要求而且隔热效果也十分理想,对于巷道热害的治理具有较为广泛的应用前景。孙英潮^[10]、康亚明等^[11]则针对高速铁路混凝土基床、EPS(聚苯乙烯)轻质保温混凝土保温性能方面进行了试验研究,其中康亚明等^[11]以聚苯颗粒和普通硅酸盐水泥为基础材料开展试验,揭示了EPS轻质保温混凝土的相关性能。

竹纹饰面混凝土也叫竹条清水混凝土,这种混凝土墙面采用的是以竹子的模样制作出来的模板,主要工艺采用原生的竹子作为模板进行现场安装,再浇筑混凝土饰面墙体,此类饰面墙体工艺应用少见。例如,在杭州国家版本馆外立面工程施工时,采用了预制竹纹清水混凝土装饰挂板^[12]。本文以熊猫基地改扩建工程大熊猫馆舍吸音隔热混凝土饰面墙体施工为背景,研究以陶粒基为骨料的多孔混凝土墙体结构隔热性能,利用竹纹模板结合吸音、隔热混凝土工艺的原生态特点,确保动物馆舍建成后的隔热性能满足大熊猫生活舒适要求。

1 竹纹仿生装饰混凝土制备

通过查阅资料、试验试制,最终选择42.5级硅酸盐水泥作为胶凝材料,中粗砂作为细集料,球形

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 四川省自然科学基金-青年基金项目(23NSFSC5925);四川省住房城乡建设领域科技创新立项课题(SCJSKJ2022-38)

作者简介: 罗利(1978—),男,四川宜宾人,正高级工程师,研究方向为建筑与市政技术;周吉日(1981—),男,山东青岛人,博士,正高级工程师,研究方向为绿色建筑与智能建筑;高志惠(1984—),女,四川雅安人,硕士,高级工程师,研究方向为建筑及市政技术;陈雪梅(1987—),女,四川射洪人,博士,副研究员,研究方向为绿色建材。

陶粒作为粗集料,其余外加材料包括聚丙烯纤维、一级粉煤灰、聚羧酸减水剂等。

1.1 试验材料及试验器材

1.1.1 试验材料

(1)硅酸盐水泥。试验使用的水泥为四川峨胜 42.5 硅酸盐水泥,化学成分见表 1。

(2)轻骨料。实验使用的粗骨料来自四川眉山某陶粒厂生产的轻质页岩陶粒,粒径 3~15 mm,筒压强度 3.5 MPa,堆积密度 512 kg/m³,其主要起框架结构作用,化学组成见表 2。

(3)纤维。聚丙烯纤维的物理性能见表 3,主要作用是形成网络结构、提高吸声及隔热性能。

一级粉煤灰采用的是眉山山七粉煤灰,其成分见表 4,主要作用是与水泥混合形成胶凝材料。

(4)外加剂。采用聚羧酸减水剂。

表 1 普通 42.5 硅酸盐水泥的化学成分

强度等级	含量 wt/%					
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	SiO ₂	CaO
42.5	7.21	4.63	2.69	1.79	21.31	54.87
52.5	4.95	3.32	2.23	1.32	20.42	64.05

表 2 陶粒成分

成分	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O	Na ₂ O
含量/wt%	7.67	63.25	8.68	2.74	2.37	0.18

表 3 纤维物理性能

比重/ (g·cm ⁻³)	纤维长度/ mm	燃点/ ℃	熔点/ ℃	抗拉强度/ MPa	直径/ μm
0.93	3~7	580	165	125	60~70

表 4 粉煤灰成分

组成	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	Bao	其他
含量/ %	54.12	18.58	11.46	0.201	11.52	2.71	0.126	0.157	1.08

1.1.2 试验器材

主要试验器材有电子万能材料试验机、单型卧轴混凝土搅拌机、混凝土振动台、恒温干燥箱、混凝土养护箱、双通道阻抗管吸隔声测试系统等。

1.2 混凝土材料的制备

将水泥、水、外加剂等材料依次加入搅拌机搅拌均匀,将已预湿的陶粒与之充分混合,搅拌 90~160 s,再继续搅拌 20~30 s 后倒入圆柱形模具中,模具内表面均匀涂上胶模剂(机油)。注模完成后在水泥振动机上振动 30 s,待半夯实后转放在阴暗通风处养护 1 d,随后脱模继续养护 14 d,制得满足熊猫兽舍墙体装饰混凝土试块。以此试验配合比为基础,通过

现场施工调整,最终获得满足施工配合比的实际浇筑混凝土。具体制备流程如图 1 所示。

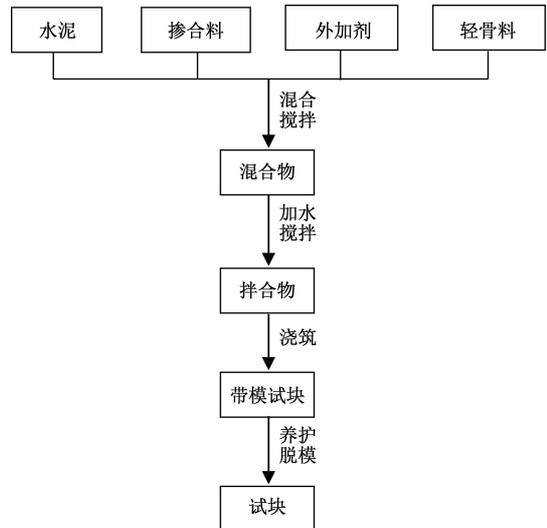


图 1 混凝土材料制备流程

2 竹纹仿生装饰混凝土墙体构造

为满足熊猫生活、睡眠等特殊需求,在隔热混凝土研制的基础上,结合竹模、吸音孔、吸音棉、消音管等吸声元素,研制了大熊猫馆舍竹纹饰面吸音隔热混凝土,如图 2 所示。

竹纹装饰混凝土墙板结构包含了陶粒隔热混凝土墙板,由吸音孔及消音管组成的吸音结构,以及墙板纹理结构。其中,墙板纹理是混凝土墙板外层墙面结构,由竹模浇筑后形成的有规则的凹凸结构。竹纹墙板纹理形成凹凸结构的吸音面,吸音面作为混凝土墙板的第 1 重吸音结构,能够对噪声进行反射,由于其呈凹凸结构,因此噪声不断被吸音面反射,以达到削弱噪声的效果。其次,吸音结构作为第 2 重吸音结构,其中吸音管组成纵横向布置,若干个吸音管构成网格状的连通结构,其内部为噪声传播的通道,噪声在吸音管内无定向地传播,可增加噪声的传播行程,进而达到消除或削弱噪声的目的,保证了混凝土墙板降噪吸音的效果。

3 热性能模拟与分析

热工模拟试验外委第三方实验室进行,每组试验都有 3 个试块用于测定导热系数、密度与热容,尺寸为 300 mm×300 mm×30 mm。

根据实验测定的竹纹仿生混凝土导热系数、密度及比热容等热工性能参数,进行隔热性能模拟分析。为了便于对比,与常规混凝土外保温外墙方案进行比较,两者的具体热工参数见表 5。

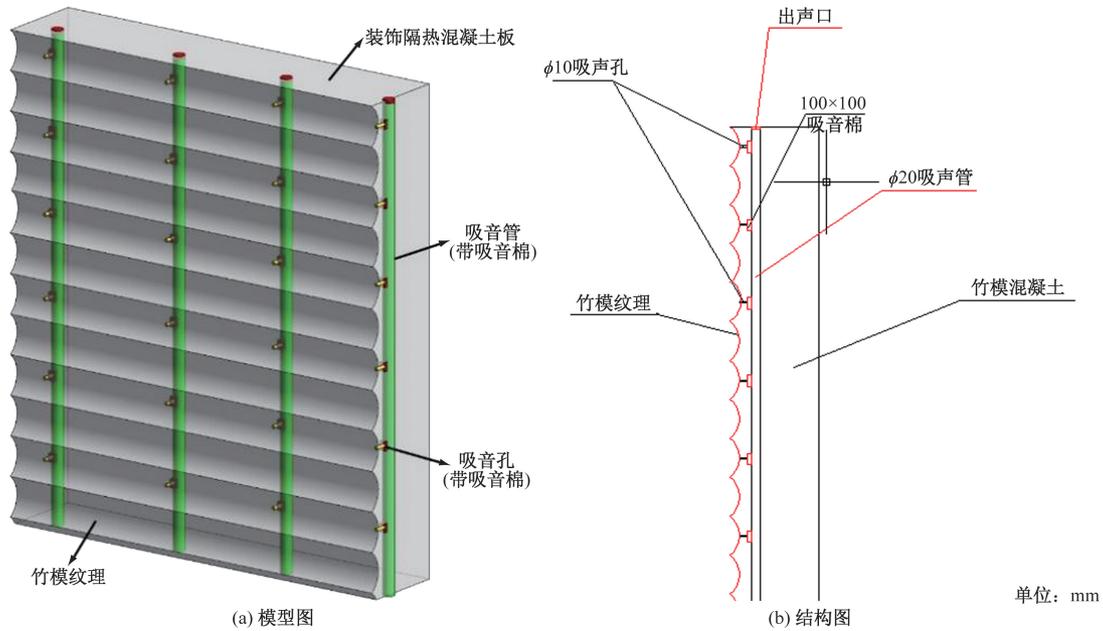


图 2 竹纹饰面混凝土结构

表 5 竹纹仿生混凝土与常规混凝土外保温外墙热工性能参数

建筑外墙形式	材料	厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]
竹纹仿生混凝土	水泥抹灰	20	1 800	0.93	1 050
	竹纹仿生混凝土	300	760	0.32	521
	石棉硅酸钙板	8	1 200	0.3	—
混凝土外保温	水泥抹灰	15	1 800	0.93	1 050
	挤塑聚苯板	30	35	0.03	1.41
	钢筋混凝土	200	2 500	1.74	920
	水泥抹灰	15	1 800	0.93	1 050

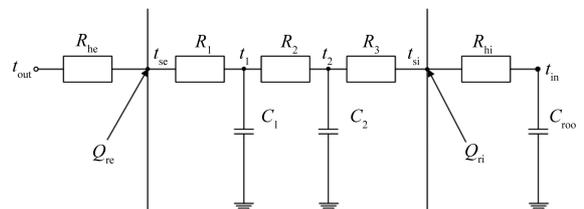
墙体为非透明围护结构,其热过程是由墙体外表面热平衡、墙体内部热平衡以及墙体内部的非稳态传热组成,3个热平衡的数学描述如下:

$$\begin{cases}
 -\lambda_0 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma I_s + h_{k0} (t_{out} - t_{s0}) - q_s \\
 -\lambda_1 \frac{\partial t_i}{\partial x} \Big|_{x=l} = h_{kl} (t_a - t_{s,l}) + \sum_{i \neq j} h_{r_i} (T_i - T_j) + \epsilon SHGCI_s + q_{al} \\
 c(x)\rho(x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right]
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ_0 、 λ_1 分别为非透明围护结构最外层、最内层材料的导热系数, W/(m·K); I_s 为所在面的太阳辐射强度, W/m²; σ 为所在面的太阳辐射吸收率; h_{k0} 、 h_{kl} 分别为非透明围护结构外、内表面对流换热系数, W/(m²·K); t_{s0} 为 τ 时刻某非透明围护结构外表面温度, °C; q_s 为围护结构外表面与天空、大地的长波辐射热交换量, W/m²; q_{al} 为围护结构内表面吸收的辐射型内热源热量, W/m²; h_{r_i} 为内表面 i 与内表

面 j 之间当量辐射换热系数; T_i 、 T_j 分别为内表面 i 与表面 j 之间的内表面温度, K; ϵ 为某单位面积的透过窗户的太阳直射的分配比例; SHGC为窗户的日射的热系数。

采用等效热容热阻热网络模型(RC模型)进行建筑围护结构的热过程计算^[13],具体热网络模型如图3所示。



t_{out} 为室外环境温度, °C; t_{se} 为墙体内部表面温度, °C; t_{si} 为墙体外部表面温度, °C; t_{in} 为室内温度, °C; Q_{re} 为墙体外表面的太阳辐射得热量, J; Q_{in} 为墙体内部的热辐射得热量, J; R 为墙体各部分之间的等效热阻, K/W; C 为墙体各部分之间的等效热容, J/(kg·K)

图 3 等效热容热阻热网络模型

根据式(1),各节点的热工参数热平衡关系如下:

$$t_{se} = \frac{t_{out}R_1 + t_1R_{he} + \dot{Q}_{re}R_1R_{he}}{R_1 + R_{he}} \quad (2)$$

$$t_{si} = \frac{t_{in}R_3 + t_2R_{hi} + \dot{Q}_{ri}R_3R_{hi}}{R_3 + R_{hi}} \quad (3)$$

$$C_1 \frac{dt_1}{dt} = \frac{t_{se} - t_1}{R_1} + \frac{t_2 - t_1}{R_2} \quad (4)$$

$$C_2 \frac{dt_2}{dt} = \frac{t_1 - t_2}{R_2} + \frac{t_{si} - t_2}{R_3} \quad (5)$$

式中: t_{out} 为室外环境温度; t_{si} 为墙体内部表面温度; t_{se} 为墙体外表表面温度; t_{in} 为室内温度; \dot{Q}_{re} 为墙体外表表面的太阳辐射得热量; \dot{Q}_{ri} 为墙体内部表面的热辐射得热量; R 为墙体各部分之间的等效热阻; C 为墙体各部分之间的等效热容。

项目所在地为四川省成都市,采用成都典型年气象参数中的最热月典型天和最冷月典型天进行热性能分析。其中最冷月典型天两种墙体对应的内表面温度及室内温度如图4所示。

由图4可见,竹纹墙内表面全天平均温度为 $3.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,优于传统墙的 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季室内动物可以较少地向外墙辐射热量;同时,竹纹墙下的全天室内平均温度为 $4.26\text{ }^{\circ}\text{C}$,也优于传统墙的 $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以以相对较少的热量消耗满足室内供暖需求。另外,温度波动值竹纹墙的全天内表面温度波动($0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$)和室内温度波动($1.36\text{ }^{\circ}\text{C}$),也好于传统墙的($0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.41\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

最热月典型天两种墙体对应的内表面温度及室内温度如图5所示。

由图5可见,竹纹墙内表面全天平均温度为 $28.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,优于传统墙的 $28.55\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季室内动物可以较少地受外墙热辐射的影响;同时,竹纹墙下的全天室内平均温度为 $29.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,也低于传统墙的 $29.65\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有更好的凉爽体感。

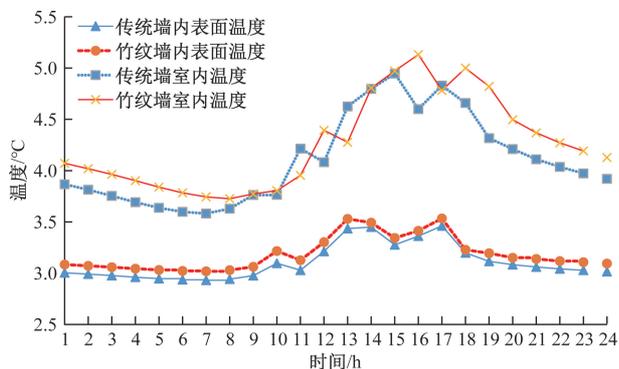


图4 最冷月典型天两种墙体对应的内表面温度及室内温度

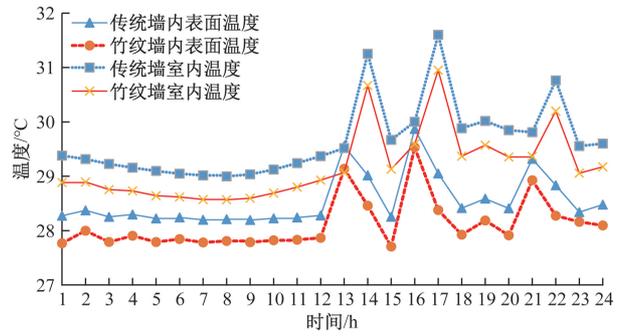


图5 最热月典型天两种墙体对应的内表面温度及室内温度

经热性能模拟与分析,竹纹仿生混凝土作为外墙使用时,其热工性能明显优于常规混凝土外保温外墙。表现为不论冬季还是夏季,可以以相对较少的热量消耗满足室内供暖或空调需求,同时具有更好的热过程稳定性和动态保温效果。

4 结论

为使熊猫基地兽舍墙体满足吸音隔热要求,研制了吸音隔热混凝土墙体结构,并通过混凝土热性能模拟分析,获得了较好的保温隔热效果,具体结论如下。

(1)通过在混凝土中掺加球形陶粒粗集料后,混凝土性能得到优化和改善,试验表明,其热工性能明显优于常规混凝土外保温外墙,墙体具有更好的热过程稳定性和动态保温效果。

(2)通过采用竹纹模板浇筑饰面墙体结构,确保了竹纹清水饰面效果,其混凝土表面的凹凸纹理,使得墙体具有一定的隔热和降噪作用;同时,墙体设置的吸音管等通风空腔将混凝土墙和饰面墙隔开,保护了内部空间免受热量和噪声的影响。

(3)竹纹饰面墙体吸声原理为:利用竹模混凝土纹理的凹凸状,进行一次降噪;竹模混凝土内设置的吸音孔和设置在吸音孔内吸音棉,对导入混凝土内部的噪声进行二次吸收;利用与吸音孔垂直连接的竖向消声管和设置在消声管内的吸音棉,对混凝土内部的噪声三次吸收。

参考文献

[1] 胡瑜,汪益,杨洁珍,等. 玻化微珠作为混凝土骨料的吸声性能研究[J]. 广州化工, 2019, 47(12): 70-74.
 [2] 张瑞东. 建筑垃圾再生料吸音陶粒的制备与性能研究[D]. 南宁: 广西科技大学, 2018.
 [3] 陈灵芝,马永存,秦雪花,等. 聚丙烯纤维对多孔混凝土吸声性能的影响[J]. 安徽化工, 2022, 48(2): 23-25.
 [4] 孙亮. 透水混凝土的吸声性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(11): 159-162.

- [5] 邓凯, 吴碧桥. 扇形仿贝壳屋面混凝土结构的模板施工技术[J]. 建筑施工, 2019, 41(1): 121-124.
- [6] 胡胜, 虞秀勇, 陈炜, 等. 水泥基陶粒混凝土在中低频范围内的吸声性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1166-1170, 1178.
- [7] 虞秀勇. 水泥基中低频段吸声材料合成与性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [8] 王丽刚. 陶粒混凝土整体式保温隔热建筑关键技术的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(5): 13-15.
- [9] 宫保聚, 姚文杰, 黄金坤. 新型隔热混凝土强度和导热系数试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(34): 166-169.
- [10] 孙英潮. 严寒地区高速铁路混凝土基床聚氨酯保温特性试验研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(2): 238-242.
- [11] 康亚明, 何贤元, 陈静波, 等. EPS轻质保温混凝土的制备及其物性特征研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 268-272.
- [12] 朱晓博, 冯明水, 唐其斌, 等. 预制竹纹清水混凝土挂板在杭州国家版本馆中的应用[J]. 浙江建筑, 2023, 40(2): 58-62.
- [13] ZHOU J R, YU T. A dynamic model of hollow ventilated interior wall integrated with solar air collector[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 1-12.

Improvement Method of Thermal Insulation Performance of Bamboo Decorative Concrete Wall in Panda House of Chengdu Panda Base

LUO Li¹, ZHOU Jiri¹, GAO Zhihui¹, CHEN Xuemei²

(1. China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610063, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: To study the thermal insulation performance of the decorative concrete walls of giant panda animal shelters, taking the Chengdu Panda Base renovation and expansion project as an example, a certain proportion of materials such as ceramic particles and polypropylene fibers were added to ordinary portland cement to prepare noise reducing and thermal insulation concrete. Through thermal process simulation and test, the influence of ceramic particle veneer concrete on thermal insulation performance is studied. At the same time, by combining sound-absorbing elements such as bamboo molds, sound-absorbing holes, sound-absorbing cotton, and sound-absorbing pipes, a bamboo pattern decorative sound-absorbing and heat-insulating concrete has been developed for the Giant Panda Pavilion. The experimental results show that this new type of concrete wall structure not only meets the noise reduction requirements of panda animal houses, but also has ideal insulation effects, which has good promotion and application for noise reduction and insulation treatment in animal habitats.

Keywords: ceramic aggregate concrete; bamboo grain finish; thermal conductivity; orthogonal experiment; thermal insulation performance