

尾矿砂制备装配式预制保温墙体性能分析

刘卫东¹, 汤士海¹, 刘佳¹, 欧阳瑞^{1,2}, 陈宁², 方乙涵¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市建筑研究科学院, 上海 201108)

摘要: 针对我国目前尾矿的环境污染问题, 利用尾矿砂作为主要原料制备加气混凝土, 通过正交试验设计($L_9(3^4)$), 运用权矩阵分析不同配比条件下加气砌块的干密度和力学性能. 结果表明: 水泥用量为 150 g, 石灰用量为 96 g, 尾矿砂用量为 420 g, 水料质量比为 0.55 时, 加气混凝土的性能最优. 采用自主研发的稳态平板导热仪测量砌块导热系数, 实验结果说明砌块保温性能较好, 可用于制备装配式预制保温墙体. 最后, 对仪器的实用性、创新性以及热电偶标定技术的精确性进行了验证.

关键词: 尾矿砂; 权矩阵; 装配式预制保温墙体; 稳态平板法; 导热系数

中图分类号: TU 528.04

文献标志码: A

Performance Analysis of Prefabricated Insulating Walls Made by Tail Sand Blocks

LIU Weidong¹, TANG Shihai¹, LIU Jia¹, OUYANG Rui^{1,2}, CHEN Ning², FANG Yihan¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Institute of Construction Science, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to solve the problem of environmental pollution in tail sand by China, the aerated concrete was prepared by using tail sand as the main raw material. The orthogonal test design ($L_9(3^4)$) was used to analyze the dry density, mechanical properties and thermal insulation properties of aerated blocks under different matching conditions. The results show that when the cementing capacity is 150 g, the amount of lime is 96 g, the tail sand is 420 g and the ratio of water to material is 0.55, the performance of the aerated concrete is the best. Its thermal conductivity was measured by the steady plate method for practical engineering reference. The experimental results show that the heat preservation performance of aerated blocks is good and can be used to prepare prefabricated walls. The instrument's practicality, innovativeness and the accuracy of the thermocouple calibration technology were verified.

Keywords: tail sand; weight matrix; prefabricated insulating wall; steady plate method; thermal conductivity

我国矿产资源丰富,是国民经济发展的重要支柱.随着矿产资源的不断开采,尾矿数量也不断增加.据统计,每开采 1 t 金属矿就会产生 0.92 t 尾矿,尾矿的随意堆砌对土壤和水体造成严重污染^[1].由于尾矿富含二氧化硅,故可作为加气混凝土的硅质原材料而有效利用,从而解决尾矿的环境污染问题^[2-5].本文以浙江某尾矿为例制备蒸压加气混凝土砌块,利用正交试验设计,运用矩阵分析法以及自主研发的仪器对试验砌块进行热工性能的研究,从而得出生产加气混凝土的最优配合比^[6-7].

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥:万安 P.O42.5,物理及力学性能指标见表 1;尾矿砂:技术指标见表 2;石灰:中速消化石灰,上海建研建材有限公司,主要化学性能见表 3;石膏:主要化学指标见表 4;铝粉:80 μm ,筛余 2%,山东兴源金属颜料有限公司;水:试块制备选用自来水,蒸压釜用水为蒸馏水.

表 1 水泥物理及力学性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of cement

拌合需水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
29	190	225	3.8	7.8	20.8	43.2

表 2 尾矿主要化学成分

Tab.2 Main chemical composition of tail sand

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	As ₂ O ₃	MgO	CaO	烧失量
82.93	7.78	1.55	1.58	0.27	0.21	0.51	1.35	2.19

表 3 石灰主要化学成分

Tab.3 Main chemical composition of lime

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	烧失量
68.92	7.66	2.87	2.28	0.834	5.81

表 4 石膏主要化学成分

Tab.4 Main chemical composition of gypsum

CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	烧失量
32.01	30.04	21.23	2.53	2.44	0.84	8.9

1.2 试验流程及试验方法

本试验流程参照上海大来新型建筑材料有限公司生产工艺,具体试验流程^[8-9]如图 1 所示.

试验参照国家标准 GB 11969—2008《蒸压加气混凝土试验方法》^[10]进行,测试制品的干密度及抗压强度.经大量实验表明,石膏与石灰的质量比为 4:1,本试验石膏产量随石灰变化,按 4:1 比例选用.同时试验按照 L₉(3⁴)正交试验表设计试验,考虑的因素包括水泥掺量、尾矿砂掺量、石灰掺量和水料比,每个因素取 3 个水平,各因素水平见表 5.本试验以 B06 加气砌块为参考,铝粉质量掺量为 1‰,试验配合比见表 6.砌块的抗压强度以及干密度为参考依据,进而确定最优基准配合比.

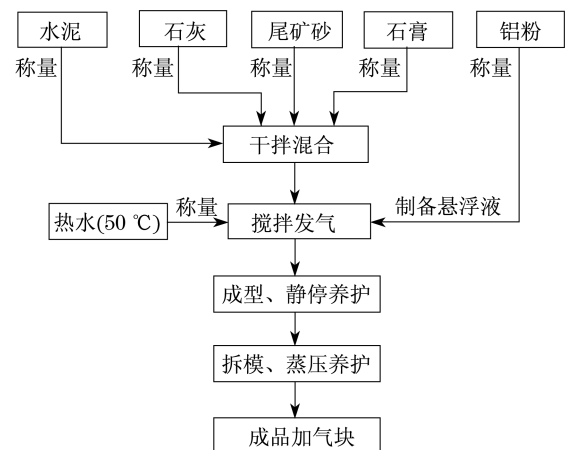


图 1 试验的工艺流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental process

表5 正交试验因素及水平设计

Tab.5 Orthogonal test factors and level designs

kg/m³

水平	水泥用量(A)	石灰用量(B)	尾矿砂用量(C)	水料比(D)
1	90	96	420	0.50
2	120	120	450	0.55
3	150	144	480	0.60

表6 试验配合比

Tab.6 Test mixing ratios

kg/m³

编号	水泥	石灰	石膏	砂	铝粉	水	水料比
1	90	96	24	420	0.76	315	0.50
2	90	120	30	450	0.83	380	0.55
3	90	144	36	480	0.90	450	0.60
4	120	120	30	420	0.83	414	0.60
5	120	144	36	450	0.90	375	0.50
6	120	96	24	480	0.86	396	0.55
7	150	144	36	420	0.90	413	0.55
8	150	96	24	450	0.86	432	0.60
9	150	120	30	480	0.94	390	0.50

2 试验结果分析

经试验测得加气砌块的干密度及抗压强度如表7所示.

表7 加气砌块的干密度及抗压强度值

Tab.7 Dry density and compressive strength of aerated blocks

编号	干密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa
1	582	2.68
2	546	2.55
3	537	2.51
4	529	2.88
5	515	2.92
6	523	2.72
7	560	3.20
8	552	2.90
9	618	3.01

试验中,抗压强度指标越大性能越好,干密度指标越小性能越好.下述采用矩阵分析法,计算影响试验结果的各因素水平权重,根据权重大小,得出每个因素对应的水平对结果的影响权重,并最终得出最优配合比.影响试验指标值的权矩阵见式(1).

$$K = MTS$$

(1)

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ K_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{1m} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & K_{2m} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{l1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{l2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{ln} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & T_l \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_l \end{bmatrix}$$

式中: K 为正交试验指标值的权矩阵; M 为正交试验考察的指标矩阵; T 为正交试验因素矩阵, $T_i =$

$1/\sum_{j=1}^m K_{ij}$; S 为正交试验水平矩阵. MT 为某一水平指标值占有所有指标值总和的比; s_i 为某因素极差占有所有因素的极差总和的比,两者的乘积不仅能够反映因素某一水平对指标值的影响程度,而且能够反

映因素极差的大小.

第一个考察指标为加气块的抗压强度,权矩阵计算如下:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 2.58 & 0 & 0 & 0 \\ 2.82 & 0 & 0 & 0 \\ 3.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.77 & 0 & 0 \\ 0 & 2.81 & 0 & 0 \\ 0 & 2.88 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.92 & 0 \\ 0 & 0 & 2.79 & 0 \\ 0 & 0 & 2.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.87 \\ 0 & 0 & 0 & 2.82 \\ 0 & 0 & 0 & 2.76 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1/8.44 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8.46 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8.46 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8.45 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.46 & 0.11 & 0.17 & 0.11 \\ 0.86 & 0.86 & 0.86 & 0.86 \end{bmatrix}^T$$

$$K_1 = M_1 T_1 S_1 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.1654 & 0.1808 & 0.1949 & 0.0657 & 0.0430 & 0.0441 \\ 0.0690 & 0.0660 & 0.0650 & 0.0440 & 0.0432 & 0.0423 \end{bmatrix}^T$$

本试验第二个考查的指标为干密度,显然干密度指标越低,加气块的质量越好,同理其权矩阵计算如下:

$$T_2 = \begin{bmatrix} 183.593 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 180.149 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 184.790 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 183.649 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 55 & 27 & 31 & 33 \\ 146 & 146 & 146 & 146 \end{bmatrix}^T$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1/555 & 0 & 0 & 0 \\ 1/522 & 0 & 0 & 0 \\ 1/577 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/552 & 0 & 0 \\ 0 & 1/564 & 0 & 0 \\ 0 & 1/537 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/557 & 0 \\ 0 & 0 & 1/538 & 0 \\ 0 & 0 & 1/569 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/572 \\ 0 & 0 & 0 & 1/543 \\ 0 & 0 & 0 & 1/539 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = M_2 T_2 S_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.1246 & 0.1325 & 0.1197 & 0.0604 & 0.0591 & 0.0620 \\ 0.0704 & 0.0729 & 0.0690 & 0.0726 & 0.0764 & 0.0770 \end{bmatrix}^T$$

本正交试验考查指标的总权矩阵为两个指标值的权矩阵的平均值,计算如下:

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.1450 & 0.1567 & 0.1573 & 0.0631 & 0.0511 & 0.0531 \\ 0.0697 & 0.0695 & 0.0670 & 0.0583 & 0.0598 & 0.0597 \end{bmatrix}^T =$$

$$[A_1 \ A_2 \ A_3 \ B_1 \ B_2 \ B_3 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \ D_1 \ D_2 \ D_3]^T$$

由以上计算可知,A因素的3个水平对于试验结果影响的权重分别为: $A_1 = 0.1450$, $A_2 = 0.1567$, $A_3 = 0.1573$, A_3 占的权重最大;同理B因素中 B_1 占的权重最大,C因素中 C_1 占的权重最大;D因素中 D_2 占的权重最大;因此本试验最优方案为 $A_3 B_1 C_1 D_2$,即水泥用量为150 g,石灰用量为96 g,尾矿砂用量为420 g,水料比为0.55.由总权矩阵可知,各因素对正交试验的抗压强度指标以及干密度指标影响的顺序为: $A > C > D > B$,即水泥>尾矿砂>水料比>石灰.

3 热工性能分析

由于上述试验已得出,水泥对加气混凝土砌块影响最大,故本实验选取水泥用量相同的第7,8,9号配合比试块进行导热系数测量.

3.1 试验仪器简介

采用上海理工大学课题组专门设计的平板导热仪,核心方法是稳态平板法,是一种应用一维稳态导热过程的基本原理来测定材料导热系数的方法^[11],适用于测定均质板材的导热系数.其原理是:加热板被加热时,热量由内向外传递,由于加热板两边的条件对称,故两侧传递的热量均为板加热量的一半^[12].

本仪器低电压、小功率,保证了使用的安全性;在仪表选择、试件制作、箱体设计和制造方面注意了可靠性、耐用性和组装的便捷性;热电偶标定时直接使用本机仪表,保证了测试的精度.用于放置试块的保温材料为锌铜,隔热效果很好,并且采用三元乙丙进行密封,最大限度地降低不必要的散热.能同时测量两块试块,大大提高了试验效率,解决了稳态法测量周期较长的这个问题,很好地克服了稳态法的缺

点,目前该仪器已经申请发明专利.试验装置示意图如图2所示.

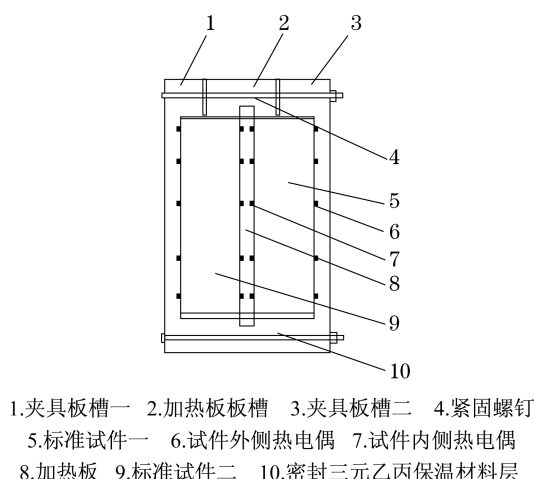


图2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental installation

3.2 试验数据分析

由铜-康铜热电偶分度表可对应得出试块表面实际温度,从而得出导热系数^[9].

$$\lambda = \varphi \delta / [2a(t_1 - t_2)] \quad (2)$$

式中: φ 为板的总加热量(电功率),W; δ 为单块试样的厚度,m; t_1 、 t_2 分别为试材的内表面温度和试材的外表面温度,℃,按试材内侧的热电偶和试材外侧热电偶所测温度分别取其算术平均值; a 为试材截面积,为 $0.2 \times 0.12 = 0.024 \text{ m}^2$.

以上数据可知,通过矩阵得出的最优配合比导热系数较小,并且三者均相差不大,即说明加气砌块保温性能较好,可作为装配式预制保温墙体.同时,该自主研发的仪器在试验中体现出使用方便、易操作,在干燥恒温环境便可使用等优点,故该仪器使用的稳态平板导热法是测定固体导热系数的优选方法.试验中测得的三组矿砂保温墙体材料导热系数值如表8所示.

表8 尾矿砂保温墙体材料导热系数值

Tab.8 Thermal conductivity value of tail sand insulation wall material

参数	配比7	配比8	配比9
内侧平均温度/℃	83.648	77.282	70.351
外侧平均温度/℃	45.135	47.423	43.492
温差/℃	38.513	29.859	26.859
导热系数 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	0.133	0.165	0.186

4 结 论

a. 在强度权矩阵和干密度矩阵中,水泥的权重均为最大,分别为0.54和0.37,说明水泥对加气砌块的强度以及干密度影响最大,其用量直接影响料浆稠度,影响铝粉发起过程中料浆的粘滞阻力.

b. 综合强度和干密度两方面,各因素的影响顺序为水泥、尾矿砂、水料比、石灰.最优配合比为:水泥用量为150 g,石灰用量为96 g,石膏用量24 g,尾矿砂用量为420 g,水料比为0.55.本试验的试验分析可为各地尾矿砂用于加气砌块的生产提供一定的指导作用.

c. 通过对尾矿砂保温墙体材料导热系数进行测量,发现其热工性能较好,且最优配合比下的砌块保温性能较好,可作为装配式预制保温墙体,同时也对自主研发仪器的实用性以及创新性进行了验证,热电偶标定技术更体现了该仪器的精确性.

参考文献:

- [1] 谭宝会,朱强,陈莹,等.我国尾矿综合利用现状及存在的问题和发展对策[J].矿山机械,2013,41(11):1-4.
- [2] KARAKURT C.KURAMA H, TOPÇU İB. Utilization of natural zeolite in aerated concrete production [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(1): 1-8.
- [3] 陈友治,蔡云,李方贤,等.利用尾矿生产加气混凝土的试验研究[J].广东建材,2007(11):23-25.
- [4] 温欣子,李富平,王建胜.铁尾矿砂制备加气混凝土砌块的试验研究[J].绿色科技,2013(11):251-252.
- [5] 杨国华,郭建文,王建华.尾矿综合利用现状调查及其意义[J].矿业工程,2010,8(1):55-57.
- [6] 周玉珠.正交试验设计的矩阵分析方法[J].数学的实践和认识,2009,39(2):202-207.
- [7] 钱惠生,白士龙,张春植,等.尾矿轻集料混凝土小型空心砌块配比试验[C]//全国地震灾区固体废弃物资源化与节能抗震房屋建设研讨会论文集.重庆:中国硅酸盐学会,2009.
- [8] 朱敏聪,朱申红,夏荣华,等.利用矿山尾矿制作蒸压砖的试验研究[C]//2007中国可持续发展论坛论文汇编.广州:中国可持续发展研究会,2007.

- [9] LIKHACHEV V N, ASTAKHOVA T Y, VINOGRADOV G A. Heat conductivity of a nonlinear β -FPU lattice [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2011, 5 (6): 1023 - 1037.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 蒸压加气混凝土性能试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] 曾悠兵, 李艳宁, 张立雄, 等. 导热系数测定仪的系统稳定状态判定方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2010 (10): 18 - 20.
- [12] 冯毅, 梁满兵. 稳态平板导热系数测定仪的误差分析 [J]. 广州华工, 2006, 34(1): 56 - 58, 64.
- (编辑: 丁红艺)

(上接第 268 页)

- [15] HENDERSON-SELLERS B. Bridging metamodels and ontologies in software engineering [J]. Journal of Systems and Software, 2011, 84(2): 301 - 313.
- [16] NI F, WANG M Z, LIAO J J, et al. M3 based executable architecture modeling and validation [J]. Journal of Information and Computational Science, 2010, 7(3): 703 - 715.
- [17] GERBER A, KOTZÉ P, VAN DER MERWE A J. Towards the formalisation of the TOGAF content metamodel using ontologies [C] // Proceedings of the 12th International Conference on Enterprise Information Systems. Funchal: AIDSS, 2010.
- [18] KWON Y M, SOHN M, LEE H J. The design and implementation of ontology for architecture framework (ONT-DAF) in military domain [J]. International Journal of Control and Automation, 2012, 5(2): 141 - 150.
- (编辑: 石 瑛)