

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.07.007

改性磷石膏免烧透水砖的制备与性能

李 征^{1,2}

(1. 北京新桥科技发展有限公司, 北京 100088; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了拓展磷石膏的资源化利用, 进一步实现我国绿色可持续发展的目标, 利用磷石膏作为原材料制备免烧透水砖。试验分析了改性磷石膏对免烧透水砖关键指标的影响规律及作用机制。首先对改性磷石膏免烧透水砖原材料的试验方案进行设计, 通过体积法进行配合比设计优化, 计算得到透水砖初步配合比, 并以磷石膏 pH 值、磷石膏球磨时间及聚合物乳液掺量为改性磷石膏的影响因素, 通过正交试验设计, 以占胶凝材料总质量 30% 的改性磷石膏为主要原料, 采用静压成型工艺制备透水砖, 进行了力学性能和透水性能试验, 并对试验结果进行了极差分析及因素水平分析。结果表明: 磷石膏 pH 值是改性磷石膏免烧透水砖劈裂抗拉强度的主要影响因素, 其次分别是磷石膏球磨时间和聚合物乳液掺量; 磷石膏球磨时间是改性磷石膏免烧透水砖透水系数的主要影响因素, 其次分别是磷石膏 pH 值和聚合物乳液掺量; 改性磷石膏免烧透水砖原材料最佳配合比为: 磷石膏的 pH 值为 10, 磷石膏球磨时间 3 min 左右及聚合物乳液掺量 2%。经生产验证, 批量生产抽样实测改性磷石膏免烧透水砖的 28 d 劈裂抗拉强度为 3.57 MPa, 透水系数为 2.1×10^{-2} cm/s, 满足标准要求。

关键词: 道路工程; 透水砖; 磷石膏; 性能试验; 劈裂抗拉强度; 透水系数

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 07-0049-06

Preparation and Properties of Phosphogypsum Modified Burning-free Permeable Bricks

LI Zheng^{1,2}

(1. Beijing Xinqiao Technology Development Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to expand the resource utilization of phosphogypsum and achieve the goal of green and sustainable development in China, burning-free permeable bricks are prepared by using phosphogypsum as raw material. The influence rule and mechanism of modified phosphogypsum on the key indicators of burning-free permeable bricks are analyzed after test. First, the experimental scheme for raw materials of the modified phosphogypsum non-burning permeable brick is designed. The mix proportion is optimized by volume method, and the preliminary mix proportion of permeable bricks is calculated. Taking the pH value of phosphogypsum, the ball milling time of phosphogypsum and the content of polymer emulsion as the influencing factors of the modified phosphogypsum, through orthogonal experimental design, using the modified phosphogypsum accounting for 30% of the total mass of the cementitious material as the main raw material, the permeable bricks are prepared by the static pressure forming process, the mechanical properties and permeable performance tests are carried out, and the range analysis and factor level analysis on the test result are carried out. The result shows that the pH value of phosphogypsum is the main factor affecting the splitting tensile strength of burning-free permeable bricks modified with phosphogypsum, followed by the ball milling time of phosphogypsum and the amount of polymer emulsion; (2) the optimum mix proportion of the

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 交通运输部公路科学研究所 (院) 科技创新专项资金项目 (2019-C533)

作者简介: 李征 (1989-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士. (lizheng-0513@163.com)

raw materials of burning-free permeable bricks modified with posphogypsum is obtained as follows: the pH value of phosphogypsum is 10, the ball milling time of phosphogypsum is about 3 min, and the content of polymer emulsion is 2%. Through production verification, the 28 d splitting tensile strength of burning-free permeable bricks modified with posphogypsum measured in batch production is 3.57 MPa, and the water permeability coefficient is 2.1×10^{-2} cm/s, which meets the requirements of the standard.

Key words: road engineering; permeable brick; phosphogypsum; performance test; split tensile strength; water pervious coefficient

0 引言

绿色可持续发展既是交通强国建设的重要抓手，也是现代交通业的重要特征。随着我国对绿色、生态、节能理念的进一步推进，海绵城市 and 海绵服务区的理念受到越来越多的重视，透水铺装是解决水资源利用、生态修复的有效措施之一^[1-2]。透水砖是透水铺装的一种形式，结构上的大量空隙使雨水能够顺利进入结构内部，从而达到雨水还原地下的目的，此外还能够吸收车辆行驶时产生的噪声。透水砖独特的自身优势，使其不断受到广泛关注，仅北京、上海等一线城市的总需求量已经超过 1 亿 m² 以上^[3-4]，具有较高的研究价值和广阔的应用前景。

透水砖从生产工艺上主要分为烧结型和免烧型^[5]。前者是经高温烧结得到；后者主要由混凝土材料制备，无需在高温条件下制得，又可以结合大量废旧材料，大大地降低了能源的损耗，成为新型绿色节能生态材料。

磷石膏是磷化工企业在湿法制造磷酸过程中排出的工业废渣，主要成分为二水石膏（CaSO₄ · 2H₂O），以及少量未完全分解的磷矿、氟化合物、磷酸、重金属等杂质。我国磷石膏的年均排放量近 8 000 万 t^[6]，加上历年堆积未处理的磷石膏，总量已超过 5 亿 t^[7-8]。目前，仅有 15% 的磷石膏在水泥缓凝剂、建筑材料、农业土壤改良等领域内得到了资源循环利用^[9]，绝大部分磷石膏露天堆置、占据大片土地，且其中的酸性物质及其他有害重金属容易对周边环境造成污染。我国也相继发布政策指导文件，加快磷石膏综合治理与再利用工作^[10]。由此可见，对磷

石膏减量化、资源化利用的需求越来越迫切。

本研究针对磷石膏的物理化学特性，将改性磷石膏应用到免烧透水砖中，设计试验研究改性磷石膏掺量在 30% 的条件下免烧透水砖，得到磷石膏 pH 值、磷石膏球磨时间及聚合物乳液掺量对透水砖性能指标的影响规律，在减轻生态负担的同时，对于工程实践及实际应用具有一定的借鉴和指导意义。

1 原材料与试验

1.1 原材料

(1) 水泥

选用 P. O 42.5 水泥，水泥质量符合国家标准^[11]。主要物理性能指标见表 1。

表 1 水泥主要性能指标
Tab. 1 Main performance indicators of cement

性能 指标	标准稠度 用水量/%	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
实测值	26. 8	160	260	4. 1	8. 8	14. 3	48. 1

(2) 磷石膏

选用云南工业废渣磷石膏，淡黄色粉体，自然状态下含水率约 4. 5%，pH=3. 6，主要化学成分见表 2。

表 2 磷石膏主要化学成分
Tab. 2 Main chemical components of phosphogypsum

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	F
含量/%	4. 03	1. 21	0. 66	32. 88	0. 08	38. 70	0. 77	≤0. 5

(3) 集料

试验中筛取粒径为 5~10 mm 的集料备用，主要性能指标见表 3。

表 3 集料主要性能指标
Tab. 3 Main performance indicators of aggregate

粒径/mm	压碎值/%	针片状含量/%	含泥量/%	表观密度/(kg · cm ⁻³)	紧密堆积密度/(kg · cm ⁻³)	空隙率/%	吸水率/%
5~10	16. 3	3. 4	1. 3	2 760	1 770	42. 3	4. 13

(4) 外加剂

选用 KS-199 聚羧酸减水剂，主要性能指标见表 4。

推荐掺量为 0. 8%~1. 5%，通过减水剂调整拌和物的工作状态，当拌和物用手能轻松攥成团，表面出现

表 4 减水剂主要性能指标

Tab. 4 Main performance indicators of water reducing agent

性能指标	外观	减水率/%	PH 值	比重	固含量/%
实测值	淡黄色液体	28~34	6.7	1.08	42

光泽,说明拌和物和易性好^[12]。

选用 BC-01 苯丙乳液,主要技术参数见表 5。

表 5 BC-01 苯丙乳液主要技术参数

Tab. 5 Main technical parameters of BC-01 styrene-acrylic emulsion

外观	黏度/(MPa·s)	最低成膜温度/℃	pH 值	玻璃化温度/℃
乳白色液体, 略带蓝光	600~5 000	23±1	7.0~9.0	25

(5) 水

本试验所采用的拌和水均为普通自来水。

1.2 试验方案设计

(1) 配合比设计

设计目标空隙率为 25%,水胶比为 0.30,磷石膏掺量按胶凝材料总质量的 30%采用内掺法计。通过体积法进行配合比设计优化,计算得到透水砖初步配合比见表 6。

表 6 初步配合比 (单位: kg/m³)Tab. 6 Preliminary mix proportion (unit: kg/m³)

胶凝材料	水泥	磷石膏	集料	水
350	245	105	1 734	105

(2) 影响因素

①磷石膏 pH 值

未改性的磷石膏含有磷酸(H₃PO₄)和氢氟酸(HF),pH 值为 3。为消除磷石膏中酸性缓凝杂质对试件的危害,将对磷石膏进行改性^[13]。通过掺加碱性物质,能中和磷石膏中的酸性,促进基体早期碱度的增长和水化反映的进程,从而提高基体强度^[14]。通过添加生石灰作为填料调整磷石膏的 pH 值,根据 pH 为 8,10 和 12 时的数值来确定生石灰的掺量。

②磷石膏球磨时间

球磨使磷石膏中的规则而均匀的二水石膏晶体遭到破坏,使其颗粒形貌呈柱状、板状、粒状等多样化^[15]。磷石膏经球磨后颗粒粒度变小,比表面积进一步降低,增加胶结材料的流动性,颗粒较小的磷石膏充当细集料在凝胶材料中均匀分散,起到微集料效应^[16],从根本上改善了硬化体结构疏松的缺陷。球磨时间过多或过少,会影响透水砖内部的连续空隙率,导致透水系数产生较大变化。因此,本研究选用磷石膏球磨时间的 4 个水平分别为:球磨 0 min,球磨

3 min,球磨 5 min,球磨 9 min 的磷石膏,其比表面积分别为 1 707,3 755,4 476,8 825 cm²/g。

③聚合物乳液掺量

本研究中选用苯丙乳液作为增强剂,作用是通过聚合物在胶材中的交联来提高骨料中点与点之间的黏结强度,使胶结体结构密实度更高,提升透水性能^[17-18]。本研究采用掺量为(以水泥用量为基准):0,1%,2%,3%。

(3) 正交试验设计

采用磷石膏 pH 值、磷石膏球磨时间及聚合物乳液掺量作为正交试验的 3 个因素,每个因素设置 4 个水平,不考虑因素之间的交互作用以简化结果分析,查正交设计表^[19],选用 L16(3⁴) 正交表安排 16 个试验,经试配后确定因素水平设置如表 7 所示。

表 7 正交试验因素水平

Tab. 7 Orthogonal test factor level

因素	编号	水平			
		1	2	3	4
磷石膏 pH 值	A	3	8	10	12
磷石膏球磨时间/min	B	0	3	5	9
聚合物乳液掺量/%	C	0	1	2	3

1.3 试件制备

搅拌工艺:按上述配合比称取原材料,采用砂浆搅拌机进行搅拌。先将集料与约 50%的水搅拌均匀,当集料表面处于饱和面干状态后,加入胶凝材料及剩余的水和外加剂,继续拌和,拌和时间 5 min。

成型工艺:将拌和物装入 200 mm×100 mm×60 mm 模具和 Φ75 mm×60 mm 模具中,插捣、振捣密实,静压工艺模压成型(30 MPa),加载速率为 1~3 kN/s,稳压 20 s,脱模后置于 20 ℃,90% RH 下经过湿养护规定龄期,测试相关性能。

1.4 性能检测

(1) 劈裂抗拉强度

参照《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)对透水砖的劈裂抗拉强度进行测定。采用 WDW1020 微控电子万能试验机,加载速率为 1~3 kN/s。

(2) 透水系数

参照《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)对透水砖的透水系数进行测定。

2 结果与讨论

2.1 极差分析

改性磷石膏免烧透水砖 28 d 劈裂抗拉强度及透

水系数的试验结果详见表 8。由表 8 可知,各因素不同水平掺量下:28 d 的劈裂抗拉强度变化幅度范围为 3.06~3.53 MPa。透水系数幅度变化范围为 $2.1 \times 10^{-2} \sim 2.8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

表 8 正交试验结果
Tab. 8 Orthogonal test result

组号	A	B	C	劈裂抗拉强度/MPa	透水系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	3	0	0	3.06	0.028
2	3	3	1	3.27	0.026
3	3	5	2	3.28	0.021
4	3	9	3	3.25	0.022
5	8	0	2	3.35	0.022
6	8	3	3	3.46	0.021
7	8	5	0	3.38	0.025
8	8	9	1	3.37	0.024
9	10	0	3	3.38	0.024
10	10	3	2	3.53	0.024
11	10	5	1	3.49	0.022
12	10	9	0	3.32	0.023
13	12	0	1	3.24	0.024
14	12	3	0	3.38	0.023
15	12	5	3	3.37	0.023
16	12	9	2	3.36	0.022

改性磷石膏免烧透水砖 28 d 劈裂抗拉强度及透水系数的极差分析计算结果详见表 9。从表 9 中各因素 R_{ji} 的大小关系:0.21(A)>0.15(B)>0.09(C),可以推导出影响劈裂抗拉强度的主次顺序是:磷石膏 pH 值>磷石膏球磨时间>聚合物乳液掺量。

表 9 正交试验极差分析表
Tab. 9 Range analysis table of orthogonal test

项目	劈裂抗拉强度/MPa			透水系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	A	B	C	A	B	C
K_1	12.86	13.03	13.14	0.097	0.098	0.099
K_2	13.56	13.64	13.37	0.092	0.094	0.096
K_3	13.72	13.52	13.52	0.093	0.091	0.089
K_4	13.35	13.30	13.46	0.092	0.091	0.090
K'_1	3.22	3.26	3.29	0.024	0.025	0.025
K'_2	3.39	3.41	3.34	0.023	0.024	0.024
K'_3	3.43	3.38	3.38	0.023	0.023	0.022
K'_4	3.34	3.33	3.37	0.023	0.023	0.023
Max	A3	B2	C3	A1	B1	C1
R_j	0.21	0.15	0.09	0.001	0.002	0.003
—	A>B>C			C>B>A		

注: K_i 为各列第“ i ”水平值的求和,A,B,C各列分别计算; K'_i 为各列第“ i ”水平值的平均值,A,B,C各列分别计算; R_j 为每一列中3个水平值的平均值的极差 $\max\{\}$ 为 $\min\{\}$; R_{j1} 为劈裂抗拉强度平均值的极差; R_{j2} 为透水系数平均值的极差。

从表 9 中各因素 R_{j2} 的大小关系:0.003(C)>0.002(B)>0.001(A),可以推导出影响透水系数的主次顺序是:磷石膏球磨时间>磷石膏 pH 值>聚合物乳液掺量。

由此可以看出,磷石膏 pH 值对强度影响最大,磷石膏球磨时间对透水系数影响最大。

2.2 因素水平分析

采用正交试验,通过综合分析法从 3 个因素中找到最优组合,见图 1~图 3。

(1) 磷石膏 pH 值对透水砖性能的影响

由图 1 可知,透水砖的强度随着磷石膏的 pH 值先增加后降低。当 pH 值调整为 10 时,透水砖的劈裂抗拉强度处于最优状态。这是因为未改性的磷石膏呈酸性,会大量消耗水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 从而影响试件的强度发展。通过掺加生石灰调整磷石膏的 pH 值,可以促进试件水化反应的进程和碱度的增长从而提高强度。对于透水系数而言,随着磷石膏的 pH 值升高逐渐降低,呈现先加速下降后逐渐平稳的趋势。我们发现,透水砖的力学性能和透水性是一对相互矛盾的指标:力学性能好,透水性就差,反之,透水性好,力学性能就会降低。综合考虑经济成本及透水砖相关性能,特选取 pH 值为 10 的磷石膏为最佳 pH 值。

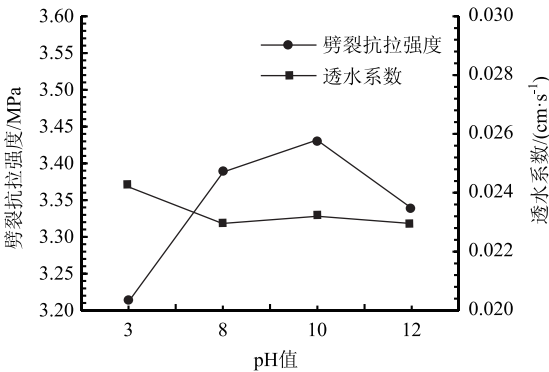


图 1 磷石膏 pH 值综合分析曲线

Fig. 1 Comprehensive analysis curves of pH value of phosphogypsum

(2) 磷石膏球磨时间对透水砖性能的影响

由图 2 可知,透水砖的强度随着磷石膏球磨时间的增加先增大后减少,当磷石膏球磨 3 min 时,透水砖的劈裂抗拉强度处于最优状态。透水砖的透水系数随着磷石膏的球磨时间的增加先下降后趋于稳定,在球磨 3 min 后,磷石膏的透水系数降低不再明显。为了提高磷石膏水泥复合凝胶材料的性能,同时节约能源,磷石膏改性的最佳球磨时间设置在 3 min。

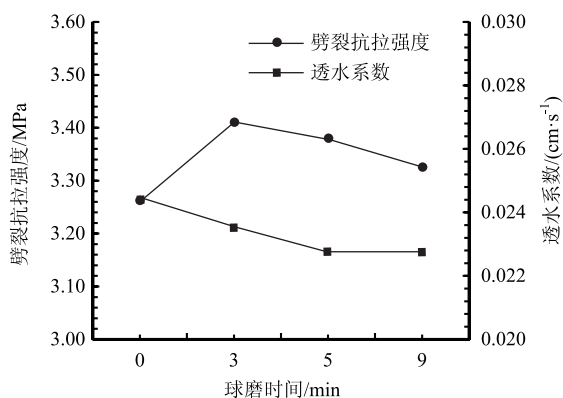


图2 磷石膏球磨时间综合分析曲线

Fig. 2 Comprehensive analysis curves of phosphogypsum ball milling time

(3) 聚合物乳液对透水砖性能的影响

由图3可以看出,通过掺加聚合物乳液质量为胶凝材料的2%时,对透水砖的劈裂抗拉强度处于最优状态。透水系数随着聚合物乳液掺量的增加先加速下降后逐渐平稳,在聚合物乳液掺量为2%后,磷石膏的透水系数降低不再明显。为了提高磷石膏水泥复合凝胶材料的性能,同时提高经济效益,磷石膏改性的聚合物乳液含量设置为2%。

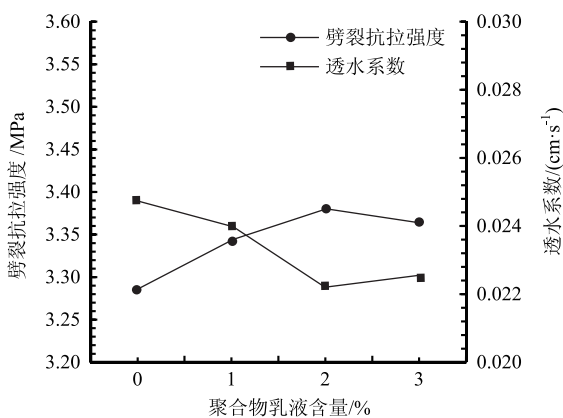


图3 聚合物乳液含量综合分析曲线

Fig. 3 Comprehensive analysis curves of polymer emulsion content

由验证性试验可知,掺入30%磷石膏的透水砖,其透水系数一直保持在 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 以上,满足规范要求,故透水系数在本研究中不作考量。综合考虑经济效益及透水砖相关性能,选择磷石膏pH值为10,球磨时间设置为3 min,聚合物乳液含量为2%为最佳组合。

2.3 生产验证

根据上述分析,选择磷石膏pH值为10,球磨时间设置为3 min,聚合物乳液含量为2%时进行改

性磷石膏免烧透水砖的生产。批量生产抽样实测该透水砖28 d劈裂抗拉强度为3.57 MPa,透水系数为 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,满足《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)标准要求。

由于批量生产,试样拌和均匀性及压砖机的稳定性要优于试验室制备试样,透水砖骨料结合更加紧密牢固,故力学性能有少许提高及透水系数有略微降低。

3 结论

本研究以磷石膏pH值、磷石膏球磨时间及聚合物乳液掺量为影响因素设计正交试验,进行30%改性磷石膏取代胶凝材料制备透水砖及性能研究。通过极差分析、影响因素分析及生产验证,得出满足改性磷石膏透水砖性能的最优配合比。

(1) 磷石膏的pH值是改性磷石膏透水砖的劈裂抗拉强度影响最重要的因素,在磷石膏pH值相同的情况下,磷石膏的球磨时间和聚合物乳液含量也是决定透水砖强度的影响因素。

(2) 聚合物乳液含量是改性磷石膏透水砖的透水性能最重要的因素,其次是磷石膏的球磨时间和磷石膏的pH值。

(3) 通过因素水平分析与室内试验验证,得到改性磷石膏免烧透水砖的最佳配合比是磷石膏pH值为10,球磨时间设置为3 min,聚合物乳液含量为2%。

(4) 经生产验证,透水砖28 d劈裂抗拉强度为3.57 MPa,透水系数为 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,满足《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)标准要求。

参考文献:

References:

- [1] HE B J, ZHU J, ZHAO D X, et al. Co-benefits Approach: Opportunities for Implementing Sponge City and Urban Heat Island Mitigation [J]. Land Use Policy, 2019, 86: 147–157.
- [2] 李睿喆. 浅析海绵城市中透水砖的应用与发展前景 [J]. 砖瓦, 2018 (8): 52–54.
LI Rui-zhe. Application and Development Prospect of Permeable Brick in Sponge City [J]. Block-Brick-Tile, 2018 (8): 52–54.
- [3] YUAN X, TANG Y Z, LI Y, et al. Environmental and Economic Impacts Assessment of Concrete Pavement Brick and Permeable Brick Production Process: A Case Study in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171:

- 198-208.
- [4] 张栋, 齐敏. 透水砖的优势及市场前景分析 [J]. 砖瓦, 2014 (1): 38-40.
ZHANG Dong, QI Min. Analysis of Advantage and Market Prospect of Water Permeable Brick [J]. Block-Brick-Tile, 2014 (1): 38-40.
- [5] 程娟, 李伟, 郭向阳. 透水砖的研制及应用 [J]. 混凝土, 2009 (4): 120-121.
CHENG Juan, LI Wei, GUO Xiang-yang. Porous Concrete Brick's Preparation and Application [J]. Concrete, 2009 (4): 120-121.
- [6] 工业和信息化部. 关于工业副产石膏综合利用的指导意见 [R]. 北京: 工业和信息化部, 2011.
Ministry of Industry and Information Technology. Guidance on Comprehensive Utilization of Industrial By-product Gypsum [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2011.
- [7] 陈安, 何坤. 统筹推进磷石膏污染防治与综合利用 [N]. 中国环境报, 2021-09-15 (3).
CHEN An, HE Kun. Overall Promotion of Phosphogypsum Pollution Prevention and Comprehensive Utilization [N]. China Environment News, 2021-09-15 (3).
- [8] 叶学东. 2019 年我国磷石膏利用现状及形势分析 [J]. 磷肥与复肥, 2020, 35 (7): 1-3.
YE Xue-dong. Status and Situation Analysis of Phosphogypsum Utilization in China in 2019 [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35 (7): 1-3.
- [9] 工业和信息化部. 工业绿色发展规划 (2016—2020 年) [R]. 北京: 工业和信息化部, 2016.
Ministry of Industry and Information Technology. Industrial Green Development Plan (2016-2020) [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2016.
- [10] 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部. 关于推进大宗固体废弃物综合利用产业集聚发展的通知 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2019.
National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology. Notice on Promoting Industrial Agglomeration Development of Comprehensive Utilization of Bulk Solid Waste [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2019.
- [11] GB175—2007, 通用硅酸盐水泥 [S].
GB175—2007, Common Portland Cement [S].
- [12] FUJIWARA H, TOMITA R, OKAMOTO T, et al. Properties of High-strength Porous Concrete [C] // International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Tokushima: [s. n.], 2001.
- [13] 巴太斌, 徐亚中, 卢文运, 等. 石灰中和预处理磷石膏试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2018 (2): 96-99.
BA Tai-bin, XU Ya-zhong, LU Wen-yun, et al. Experimental Study on the Lime Neutralizing Pretreatment of Phosphogypsum [J]. New Building Materials, 2018 (2): 96-99.
- [14] 王贻远, 王加荣, 刘家祥. 磷石膏制备胶结材和混凝土的研究 [J]. 矿产综合利用, 2014 (5): 70-73.
WANG Yi-yuan, WANG Jia-rong, LIU Jia-xiang. Research on Preparation of Binding Material and Concrete with Phosphogypsum [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014 (5): 70-73.
- [15] 欧阳嘉艺, 刘数华. 磷石膏改性机制及其在超硫酸盐水泥中的应用进展 [J]. 混凝土世界, 2019 (9): 60-66.
OUYANG Jia-yi, LIU Shu-hua. Modification Mechanism of Phosphogypsum and Its Application Progress in Supersulfate Cement [J]. China Concrete, 2019 (9): 60-66.
- [16] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 若干因素对多孔透水混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8 (5): 513-519.
JIANG Zheng-wu, SUN Zhen-ping, WANG Pei-ming. Effects of Some Factors on Properties of Porous Pervious Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8 (5): 513-519.
- [17] 沈凡, 黄绍龙, 孙政, 等. 水性环氧树脂-水泥-乳化沥青复合胶结体系的硬化机理 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (1): 105-110.
SHEN Fan, HUANG Shao-long, SUN Zheng, et al. Hardening Mechanism of Waterborne Epoxy-cement-emulsified Asphalt Bonding System [J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2012, 43 (1): 105-110.
- [18] 李子成, 张爱菊, 隋修志, 等. 透水混凝土界面增强增韧效应研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (2): 747-752.
LI Zi-cheng, ZHANG Ai-ju, SUI Xiu-zhi, et al. Reinforcing and Toughening Performance of Interface in Pervious Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36 (2): 747-752.
- [19] 邱轶兵. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2008.
SHEN Yi-bing. Experiment Design and Data Processing [M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2008.