

粉煤灰加气混凝土复掺外加剂和矿渣的性能研究

张巨松¹, 杨秋雨¹, 董建国²

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁秦甄环保建材有限公司, 辽宁 辽阳 110000)

摘要 目的 研究复掺减水剂、矿渣和防水剂对粉煤灰加气混凝土吸水性能和抗压强度的影响, 解决其吸水率高, 抗压强度偏低的问题. 方法 通过复掺减水剂、矿渣和防水剂的手段, 制备 B05 粉煤灰加气混凝土试件, 测试加气混凝土试块的抗压强度和吸水率. 结果 减水剂掺量为 0.60% 时质量吸水率下降到 63%, 抗压强度 3.26 MPa; 复掺减水剂 0.60% 和矿渣掺量 10% 时抗压强度提高到 4.03 MPa; 3 种防水剂中有机硅烷类的防水效果最好, 质量吸水率下降到 57%, 3 种防水剂的掺入均会导致抗压强度下降. 结论 复掺减水剂和矿渣粉选择合适的掺量, 有助于提高抗压强度, 降低吸水率; 复掺减水剂、矿渣和防水剂, 有机硅烷类的防水效果比较显著, 高级脂肪酸类砂浆防水剂和硬脂酸钙乳液的防水效果一般.

关键词 粉煤灰; 加气混凝土; 外加剂; 矿渣

中图分类号 TU522.3+2

文献标志码 A

Study on Performance of Fly Ash Aerated Concrete Mixed with Various Additives and Slag

ZHANG Jusong¹, YANG Qiuyu¹, DONG Jianguo²

(1. Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Qin Zhen Environmental Protection Building Materials Co. Ltd, Liaoyang, China, 110000)

Abstract: Water absorption and compressive strength of fly ash aerated concrete by mixing slag powder, and water reducing agent, slag and waterproofing agent to solve its high-water absorption and low compressive strength. The sample of fly ash aerated concrete was prepared, and its compressive strength and water absorption were measured. Results show when the dosage of water reducing agent was 0.60%, the water absorption rate of aerated concrete dropped to 63% and the compressive strength was 3.26 MPa; Compressive strength increased to 4.03 MPa when the dosage of water reducing agent and slag were 0.6% and 10%, respectively. The polysiloxane water repellents has the best waterproof effect among the three water repellents which water absorption rate decreased to 57%, the three water repellents all lead to the decrease of the compressive strength.

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50274025); 辽宁省教育厅科技攻关项目(11211004)

作者简介: 张巨松(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水泥混凝土耐久性研究.

To choose the appropriate dosage of slag ,help to improve the compressive strength and reduce water absorption ;About water repellents ,the polysiloxane water repellents effect is significant ;Higher fatty acid and Calcium stearate are not so effective.

Key words: fly ash ;aerated concrete ;admixture ;slag

加气混凝土是一种资源、性能与成本最佳组合的新型墙体材料,其孔隙率通常可达到40% ~ 85%,密度为300 ~ 1 800 kg/m³^[1-3],具有节能、资源综合利用、循环使用等优势,其中最突出的优点是节能. 300 mm 厚、密度为500 kg/m³的蒸压加气混凝土已经满足我国寒冷地区65%节能标准中对墙体传热系数的要求. 但就应用现状而言,仅仅是把加气混凝土作为内围护结构填充材料使用,它的节能特性没有得到发挥^[4-6]. 目前,加气混凝土在北方没有得到广泛应用,主要是由于其抗冻性能没有达到使用要求. 加气混凝土吸水性强、易导致砌体强度、抗冻性能、保温隔热性能降低和墙体开裂等通病^[7]. 为了改善加气混凝土砌块的性能,陈建军^[8]通过矿渣粉替代部分水泥应用于加气混凝土生产,在一定条件下矿渣粉可替代水泥用量30% ~ 40%,而且能很好地保证加气混凝土制品的性能,具有很好的经济效益,符合环保利废的要求. 江星^[9]以化学发泡方法制备了碱矿渣加气混凝土(AASAC),研究了其孔结构与宏观性能之间的关系. B. G. Ma^[10]等分析了铁矿尾矿物组成,确定并优化工艺参数,使用铁尾矿取代硅质材料制备蒸压加气混凝土,制备的B05加气混凝土砌块抗压强度为2.5 MPa. 杨力远^[11]采用65%以上的磷尾矿渣作为原材料可以制备出B06级的加气混凝土,制品的强度可以达到3.7 MPa以上.

通过复掺外加剂和矿物掺合料提高普通混凝土性能已经有大量的应用^[12-16],但目前各种外加剂和矿物掺合料应用在加气混凝土中的研究较少,为了提高加气混凝土的性能,笔者通过依次复掺减水剂、矿渣和防水剂制

备B05粉煤灰加气混凝土,进行干密度、吸水率和抗压强度的性能测试,分析和研究复掺减水剂、矿渣和防水剂对粉煤灰加气混凝土吸水性能和抗压强度的影响,解决其吸水率高,抗压强度偏低的问题.

1 试 验

1.1 原材料

粉煤灰:粉煤灰由沈阳红阳热电厂提供,为I级粉煤灰,粉煤灰的主要技术指标如表1所示,细度为0.045 mm方孔筛筛余量6.5%.

表1 粉煤灰的主要技术指标

Table 1 The main technical indicators of fly ash %				
w(CaO)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)
1.64	3.88	53.21	25.08	6.52

石灰:试验所用石灰有效氧化钙70.4%;消化速度8 min 温度达到90.2℃;细度为0.08 mm方孔筛,筛余量8%.

水泥:水泥为42.5的普通硅酸盐水泥.

电厂炉渣:试验所用电厂炉渣的具体化学成分如表2所示.

表2 电厂炉渣的主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of slag in power plant %				
w(CaO)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)
1.47	2.23	45.41	25.22	11.87

铝粉:本试验所用发气材料为铝粉膏.

石膏:选用脱硫石膏,为工业生产中的副产品,由秦甄环保建材公司提供.

减水剂:减水剂为萘系高效减水剂,黄色粉末.

矿渣:矿渣的技术指标如表3所示.

表3 矿渣的技术指标

Table 3 The technical indexes of slag							%
w(CaO)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(FeO)	w(K ₂ O)	w(TiO ₂)	烧失量
30.52	2.23	31.24	19.90	9.35	0.74	1.22	6.37

防水剂:防水剂 A 普通砂浆防水剂,以高级脂肪酸为主要原料经化学处理后制成水性分散乳液;防水剂 B LHT 型混凝土有机硅烷防水剂,褐色溶液;防水剂 C 硬脂酸钙,白色乳液,硬脂酸钙质量分数≥97%.

1.2 试验方法

试验在辽宁秦甄环保建材有限公司进行,采取的制备工艺与生产线基本相同,首先

将粉煤灰、炉渣和水湿磨成浆液,按照表4各组分质量分数称量各个组分,将石灰、水泥、石膏、外加剂和矿渣依次加入料浆搅拌均匀,再加入一定量的铝粉,搅拌1 min后,将料浆浇筑到自制的模框内在静停室发气,发气结束达到一定强度后放入蒸压釜蒸养,蒸养完成后将试块切割成100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块.

表4 加气混凝土各组分质量分数

Table 4 Mass fraction of aerated concrete components						%
w(粉煤灰和炉渣)	w(石灰)	w(水泥)	w(石膏)	w(水)	w(铝粉和稳泡剂)	
46.4	6.8	6.8	3.9	36	0.1	

1.3 试验设备和测试方法

试验设备:SL5001N 型电子秤(精度0.1 g);GJ—1 型数显式抗折抗压试验机;电子秤、搅拌器密封式制样粉碎机;FYS—150C 型负压筛析仪;鼓风干燥箱、切割机、模具.

测试方法:加气混凝土的干密度、抗压强度和吸水率的测试方法均参考《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008)进行测试.

表5 所示.

表5 不同减水剂掺量的各项性能指标

Table 5 The performance indicators of different water reducing agent dosage				
减水剂掺量/%	水料质量比/%	干密度/(kg·m ⁻³)	质量吸水率/%	抗压强度/MPa
0	68	502.3	70	2.72
0.30	60	510.4	66	3.13
0.40	59	503.0	65	3.04
0.50	57	523.1	64	3.16
0.60	55	517.6	63	3.26

2 试验结果及分析

2.1 掺减水剂改变水料比对加气混凝土性能的影响

试验使用减水剂改变水料比,测试加气混凝土的各项性能,通过不同掺量的减水剂制备不同水料比试件.以未加减水剂基准样的扩展度240 mm为浇筑标准.按照表4的配合比,分别添加掺量为石灰和水泥总量0%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%的减水剂,保证240 mm的浇筑扩展度,减去一定量的水,降低水料比,制备不同掺量减水剂的加气混凝土试件,进行性能测试,其各项性能指标如

由表5可以看出,普通的B05级粉煤灰加气混凝土的质量吸水率较高、抗压强度偏低,通过添加减水剂降低水料比后,加气混凝土的质量吸水率逐渐减低,抗压强度不同程度的升高.当减水剂掺量为0.60%时吸水率和抗压强度为变化的峰值,与基准样相比吸水率降低7%,抗压强度提高19.9%.

在粉煤灰加气混凝土中掺入减水剂,减水剂作为表面活性物质,在减去用水量、降低

水料比情况下,其吸附-分散作用和润滑-湿润作用能够使料浆搅拌均匀、不会离散,达到浇筑要求的扩展度.避免通过减少用水量降低水料比,致使料浆稠度较大,黏度增长速度过快,在发气过程中约束气孔的均匀形成及坯体的正常涨大,造成加气混凝土孔结构不理想的情况.改善了加气混凝土内部的均匀性和密实性,毛细孔隙减少,孔壁更加密实,浇筑静养时间缩短,强度提高;根据普通混凝土的水灰比定则:“对于一定材料,强度主要取决于一个因素,即水灰比.”从试验结果来看,加气混凝土的水料比对强度的影响和这一基本规律是一致的,经反复试验,继续增加减水剂掺量降低水料比,加气混凝土试件在蒸压出釜后会发生龟裂现象,切割后的试块出现裂纹.

2.2 复掺减水剂和矿渣对加气混凝土的性能影响

2.2.1 矿渣细度的确定

在试验初期,按照表4的配比只掺入不同细度的矿渣,掺量均为水泥和石灰掺量的20%,制备加气混凝土试件,分析矿渣细度对加气混凝土强度的影响,测试加气混凝土的干密度和抗压强度如表6所示.

表6 矿渣细度对加气混凝土抗压强度的影响
Table 6 The influence of slag fineness on compressive strength of aerated concrete

0.08 mm 方孔筛 筛余量/%	粉磨时 间/min	干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强 度/MPa
52.1	30	520.3	2.93
34.6	60	517.8	3.06
29.3	90	516.4	3.30

由表6可以看出随着细度的增加,抗压强度有所提高,Norifumi Isu等^[17]提出,矿物掺合料细度的提高可以加速托贝莫来石的形成.从抗压强度来看,粉磨90 min效果最佳,矿渣磨细到此细度,进行复掺减水剂和矿渣加气混凝土试件的制备工作.

2.2.2 复掺减水剂和矿渣加气混凝土的性能研究

矿渣作为矿物掺合料与减水剂复掺到加气混凝土中,首先将矿渣磨细,0.08 mm方孔筛,筛余量29.3%.以减水剂掺量为石灰和水泥总量0.60%、水料比为0.55作为基准样,此基准样作为基本配比复掺矿渣,矿渣掺量按照石灰和水泥干料质量的10%、20%、30%、40%掺入,制备复掺减水剂和矿渣的加气混凝土试件,其各项性能指标如表7所示.

表7 不同矿渣粉掺量的各项性能指标
Table 7 The performance indexes of slag powder with different dosage

矿渣粉 掺量/%	干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	吸水 率/%	抗压强 度/MPa
0	517.6	63	3.26
10	523.1	63	4.03
20	522.4	63	4.00
30	520.6	64	3.66
40	524.5	65	3.65

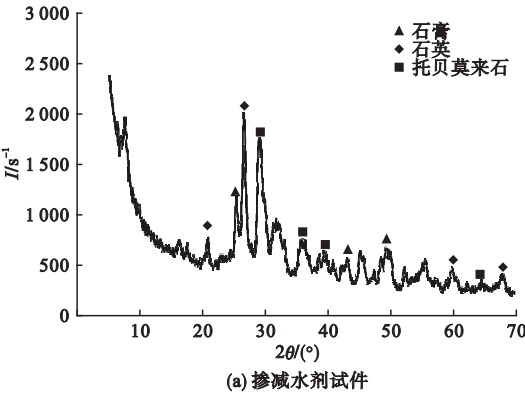
由表7可知,复掺减水剂和矿渣的加气混凝土试件与基准样相比,抗压强度有明显提高.矿渣的掺量为10%时,抗压强度为4.03 MPa,抗压强度提高23.6%,不过随着矿渣掺量的增加,试件抗压强度逐渐降低,掺量为40%时,抗压强度最低为3.65 MPa,与基准样对比提高12.0%.吸水率方面,掺量为10%时,吸水率为63%,随着矿渣掺量的增加,吸水率升高,从63%升高到65%.

复掺矿渣和减水剂的加气混凝土试件,当矿渣掺量为10%和20%时,加气混凝土的抗压强度较高,由于试验所用矿渣为碱性矿渣,再经磨细处理后,其具有良好的胶凝性和较大的潜在活性,其组分由于参与化学反应对水泥强度有贡献作用,在水热反应过程中,矿渣中的 SiO_2 和 Al_2O_3 可以与料浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成水化硅酸钙、水化铝酸钙产物,从而使加气混凝土制品早期达到一定的强度,蒸压后强度提高^[18],矿渣中的玻璃体解体后自

身发挥吸收熟料水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生的火山灰反应.当矿渣掺量增加 30% 和 40% 时加气混凝土的抗压强度下降,在试验过程中,矿渣掺量增加,出现静停养护、坯体稠化时间增长的现象,对强度有一定程度的影响,其原因是矿渣水化反应速度较慢,钙质材料过量,多余的一部分水泥在水化后不能生成 $\text{CSH}(\text{B})$ 而生成强度较低的 $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ [19].

2.2.3 加气混凝土蒸压后 X - 射线粉末衍射 (XRD) 分析

图 1 为加气混凝土蒸压后 XRD 分析.通



过图 1 可以看出,两者的 XRD 衍射图谱基本相似,水化反应生成托贝莫来石,反应剩余的硬石膏和石英.复掺矿渣和减水剂与只掺减水剂的试件相比,石英和托贝莫来石衍射峰较强,其他物质基本相同,生成托勃莫来石晶体较多,加气混凝土的内部结构更加致密,进而有利于增强加气混凝土制品的抗压强度、降低吸水率,进而提升其抗冻性能,可见 XRD 分析结果进一步验证了掺入矿渣能够提高加气混凝土的抗压强度.

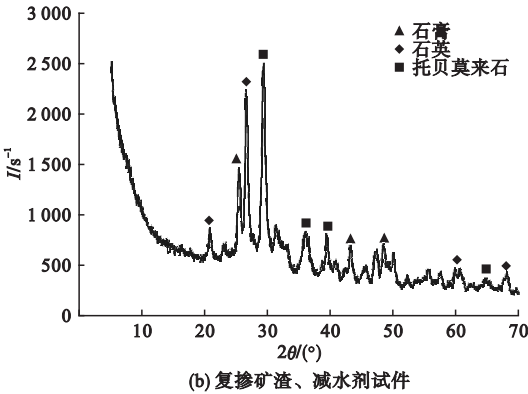


图 1 加气混凝土试件的 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of aerated concrete

2.3 复掺减水剂、矿渣和不同种类的防水剂对加气混凝土性能的影响

2.3.1 抗压强度的影响

3 种防水剂使用方法均为内掺法.选取减水剂掺量为石灰和水泥总质量的 0.60%、水料比为 0.55、矿渣掺量为石灰和水泥干料质量的 10% 作为基本配比复掺防水剂.防水剂的掺量为粉煤灰、炉渣、石灰和水泥总质量的 0.2%、0.4%、0.6% 和 0.8%,保证扩展度在 240 mm,制备不同掺量和种类防水剂的 B05 粉煤灰加气混凝土试件,进行各项性能测试,其各项性能指标如表 8 所示.

复掺减水剂和矿渣加气混凝土试件的抗压强度为 4.03 MPa,复掺减水剂、矿渣和防水剂的试件与其相比抗压强度均有不同程度的下降,其中防水剂 A 随着掺量增加抗压强度下降明显,掺量为 0.8% 时抗压强度为最

表 8 加气混凝土抗压强度

Table 8 The compressive strength of autoclaved aerated concrete

防水剂掺量/%	抗压强度/MPa		
	防水剂 A	防水剂 B	防水剂 C
0	4.03	4.03	4.03
0.20	3.40	3.52	3.23
0.40	3.13	3.32	3.54
0.60	3.04	3.43	3.76
0.80	3.01	3.61	3.34

小值,下降 25.3%;掺防水剂 B 的试件抗压强度下降效果相对较小,掺量为 0.4% 时抗压强度为最小值,下降 17.6%.掺防水剂 C 随着掺量的增加抗压强度有所提高,当掺量为 0.2% 时,抗压强度为最小值,下降 19.9%.三者最高抗压强度相比,防水剂 C 高于防水剂 B,防水剂 B 高于防水剂 A,未复

掺减水剂、矿渣和防水剂。

随着防水剂 A 随着掺量增加试件出现少量微裂纹,由于此类防水剂的粘结效果一般,蒸压后导致强度降低。内掺防水剂 B 和防水剂 C 的粘结性好,充分地分散到加气混凝土的内部时使加气混凝土整体结构致密,连通孔减少。

2.3.2 吸水性能的影响

复掺 3 种防水剂制备粉煤灰加气混凝土试件吸水试验的结果如图 2 所示。

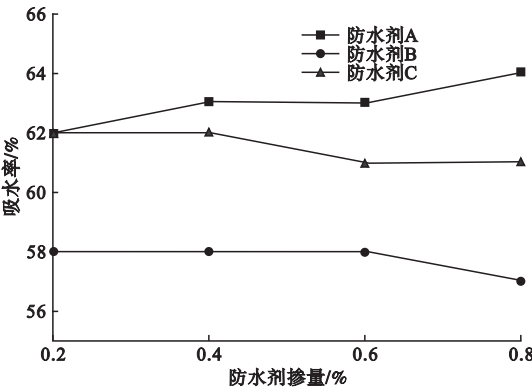


图 2 B05 粉煤灰加气混凝土的质量吸水率

Fig. 2 The water absorbing rate of autoclaved aerated concrete

普通的 B05 粉煤灰加气混凝土吸水率为 70%,基准样的吸水率为 63%。由图 2 可以看出防水剂 B(有机硅烷防水剂)的防水效果最佳,掺量为 0.8% 时质量吸水率达到最小值为 57%,其他掺量均为 58%,没有明显的波动;防水剂 A 的防水效果一般,在掺量为 0.2% 时,防水剂 A 质量吸水率达到最小值为 62%,随着掺量的增加,防水剂 A 都有小幅度的提高,掺量为 0.6% 时升高到 64%;防水剂 C 掺量为 0.6% 时,质量吸水率降低至最小值 60%。

内掺型防水剂遇水后适时释放并在基体固化后,在基体整个结构中形成憎水保护,阻止材料中毛细孔对水的吸收,极大地降低了基体的吸水率^[20];高级脂肪酸类砂浆防水剂 A 粘结效果一般,随着掺量增加试件有微裂纹产生,毛细吸水量增加。有机硅烷类防水剂

B 在碱性环境下硅烷中亲水的有机官能团水解形成憎水的有机官能团,使得试件的憎水效果更加显著。硬脂酸钙防水剂 C 适当的掺量能够降低吸水率,但是效果一般。

通过复掺减水剂、矿渣和防水剂的手段可以降低吸水率,同时提高一定的强度。综合抗压强度和吸水率试验结果,复掺减水剂、矿渣和防水剂 B 掺量 0.8% 时效果最好,与不添加减水剂、矿渣和防水剂的基准样相比,抗压强度 2.72 MPa 提高到 3.61 MPa,吸水率由 70% 降到最小值 57%。

3 结 论

(1)通过减水剂降低水料比的手段,对提高粉煤灰加气混凝土的抗压强度,降低其质量吸水率有显著效果。当减水剂掺量为 0.60 时效果最显著,吸水率为 63%,和基准样比降低了 7%,抗压强度与基准样相比提高 28%。

(2)矿渣选择合适的细度和掺量与减水剂复掺,有助于改善粉煤灰加气混凝土的抗压强度;矿渣粉的掺量为 10% 时效果最显著,抗压强度与掺减水剂的基准样相比提高 23.6%,吸水率为 63%,变化不明显。

(3)通过复掺减水剂、矿渣和防水剂能够有效地降低吸水率,并保证强度有所提高。3 种防水剂中,复掺有机硅烷类防水剂对降低吸水率有显著效果,掺量为 0.8% 时吸水率为 57%,抗压强度为 3.61 MPa;而复掺高级脂肪酸类砂浆防水剂和硬脂酸钙乳液的效果一般。

参考文献

[1] UNCIK S,STRUHAROVA A,HLAVINKOVA M,et al. Effect of bulk density and moisture content on the properties of autoclaved aerated concrete [J]. Cement wapno beton, 2013, 18 (4) : 189 - 196.

[2] KOUTNÝ O,OPRAVIL T,POŘÍZKA J. Application of metakaoline in autoclaved aerated concrete technology [J]. Advanced materials

- research, 2014, 1000: 174 – 177.
- [3] HUANG X Y, NI W, WANG Z J, et al. Experimental study on autoclaved aerated concrete made from copper tailings without using lime as calcareous materials [J]. Materials science & technology, 2012, 20 (1) : 11 – 15.
 - [4] DROCHYTKA R, ZACH J, KORJENIC A, et al. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste [J]. Energy & buildings, 2013, 58 (2) : 319 – 323.
 - [5] ZUO J. Aerated concrete block in engineering application [J]. Applied mechanics & materials, 2012, 174/177: 1056 – 1059.
 - [6] 刘凡. 当代建筑节能研究 [J]. 上海建材, 2010 (4) : 25 – 26.
(LIU Fan. Research on energy saving of contemporary architecture [J]. Shanghai building materials, 2010 (4) : 25 – 26.)
 - [7] 相秋迪, 吴叶, 李菊, 等. 加气混凝土吸水特性研究优化 [J]. 新型建筑材料, 2014 (10) : 46 – 49.
(XIANG Qiudi, WU Ye, LI Ju, et al, Investigation on water absorption behavior of autoclave aerated concrete and optimization [J]. New building materials, 2014 (10) : 46 – 49.)
 - [8] 陈建军. 矿渣粉在生产蒸压加气混凝土中的应用 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2016 (1) : 36 – 38.
(CHEN Jianjun. Application of slag powder in production of autoclave aerated concrete [J]. Wall materials innovation & energy saving in buildings, 2016 (1) : 36 – 38.)
 - [9] 江星, 姚晓乐, 王磊, 等. 碱矿渣加气混凝土制备与性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (10) : 3229 – 3234.
(JIANG Xing, YAO Xiaole, WANG Lei, et al, Preparation and properties of alkali-ctivated slag aerated concrete [J]. Bulletin of the chinese ceramic society, 2016, 35 (10) : 3229 – 3234.)
 - [10] MA B G, CAI L X, LI X G, et al. Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products [J]. Journal of cleaner production, 2016, 127: 162 – 171.
 - [11] 杨力远, 万惠文, 李杰. 利用磷尾矿制备加气混凝土工艺参数的探索研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (9) : 41 – 44.
(YANG Liyuan, WAN Huiwen, LI Jie. Research of technological parameter of air-entrained concrete made of phosphorus tailing [J]. Journal of wuhan universiti of technology, 2011, 33 (9) : 41 – 44.)
 - [12] KUNCHARIYAKUN K, ASAWAPISIT S, SOMBATSOMPOP K. The effect of rice husk ash on properties of aerated concrete [J]. Advanced materials research, 2013, 747: 420 – 423.
 - [13] FANG M, WANG Z, SHI F, et al. Analysis on life cycle CO₂ emission of aerated concrete production in china [J]. Materials science forum, 2013, 743/744: 509 – 515.
 - [14] ZUO R F, DU G X, MEI L F, et al. Preparation and properties of sintering brick from iron tailings [J]. Key engineering materials, 2012, 512/515: 1023 – 1027.
 - [15] YANG F, SUN L Z, XIE Z L, et al. Intelligent optimization of material mixing ratio and process parameters for aerated concrete [J]. Advanced materials research, 2011, 243/249: 7026 – 7035.
 - [16] KARAKURT C, KURAMA H. Utilization of natural zeolite in aerated concrete production [J]. Cement & concrete composites, 2010, 32 (1) : 1 – 8.
 - [17] NORIFUMI I, HIDEKI S. Takeshi mitsuda influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation [J]. Cem. con. res., 1995, 25: 243 – 248.
 - [18] 钱嘉伟, 倪文, 许国东. 矿渣粉在加气混凝土中的应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2012, 39 (8) : 62 – 64.
(QIAN Jiawei, NI Wen, XU Guodong. Study on the application of slag powder in aerated concrete [J]. New building material, 2012, 39 (8) : 62 – 64.)
 - [19] 张超. 粉煤灰和炉渣作为水泥混合材及粉煤灰掺量对不同水胶比混凝土的强度影响研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
(ZHANC Chao. study on fly ash cinder used as cement admixture and the influence of fly ash dosage on the strength of concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecure and Technology, 2012.)
 - [20] 李悦, 李战国, 秦宪明. 憎水剂对加气混凝土强度及吸水性能的影响 [J]. 中国科技论文, 2016, 11 (1) : 49 – 52.
(LI Yue, LI Zhanguo, QIN Xianming. The effect of water repellent on the strength and hydration capability of areated concrete. [J]. Chinese science paper, 2016, 11 (1) : 49 – 52.)