

# 双掺技术在尾矿砂加气混凝土中的应用

张巨松<sup>1</sup>, 苏杭<sup>1</sup>, 董建国<sup>2</sup>

(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 复掺减水剂、稳泡剂改善尾矿砂加气混凝土孔结构;复掺矿渣、偏高岭土、粉煤灰提高尾矿砂加气混凝土孔间壁密实度,解决其吸水率高,抗压强度偏低,抗冻性偏差的问题。方法 制备 B06 级尾矿砂加气混凝土试件,测试加气混凝土试块的干密度、抗压强度、质量吸水率以及抗冻性能。结果 减水剂掺量为 0.14%,稳泡剂为铝粉掺量的 20% 时,质量吸水率下降到 57%,抗压强度 4.68 MPa;复掺外加剂与各种矿物掺合料可以使抗压强度提高到 5.76 MPa,吸水率降低到 50%。结论 双掺技术可以有效提高加气混凝土的抗压强度,降低吸水率,同时满足寒冷地区冻融 50 次的要求,冻融循环后达到 B06 优等品(A)的冻融标准。

**关键词** 加气混凝土;外加剂;矿物掺合料;冻融

中图分类号 TU522.3<sup>+2</sup>

文献标志码 A

## Study on the Test Performance of Double Mixing Technology in Tailing Aerated Concrete

ZHANG Jusong<sup>1</sup>, SU Hang<sup>1</sup>, Dong Jianguo<sup>2</sup>

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

**Abstract:** The pore structure of autoclaved aerated concrete can be improved by compound water-reducing admixture and foam stabilizing agent. The density of autoclaved aerated concrete holes can be improved by the mixture of slag, metakaolin and fly ash, which can also solve the problems of high water absorption, low compressive strength and deviation of frost resistance. B06 grade tailings sand autoclaved aerated concrete specimens were prepared to test the dry density, compressive strength, mass water absorption and frost resistance of autoclaved aerated concrete specimens. When the content of superplasticizer is 0.14%, and the content of foam stabilizer is 20% of aluminum powder, the water absorption rate decreases to 57%, in the meantime, the compressive strength is 4.68 MPa. Compressive strength can be increased to 5.76 MPa and water absorption can be reduced to 50% by mixing admixtures and mineral admixtures. So when the Double-mixing technology is adopted, the compressive strength of autoclaved aerated concrete will be improved effectively, water absorption will be reduced, the requirements of freeze-thaw 50 times in cold areas

收稿日期:2017-10-25

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方面研究。

can be meet, and the B06 quality(A) freeze-thaw standard can be also achieved after freeze-thaw cycle.

**Key words:** aerated concrete; admixture; mineral admixture; freeze-thaw

发展可持续性建筑就必须使用绿色建筑材料<sup>[1]</sup>. 加气混凝土作为轻质、高强、节能新型墙体材料已经满足我国寒冷地区 65% 节能标准中对墙体传热系数要求<sup>[2]</sup>, 加气混凝土必将向寒冷地区发展. 当今只是把加气混凝土作为内围护结构填充材料使用, 这样不能充分发挥其节能特性<sup>[3-5]</sup>. 因为加气混凝土的吸水性过强, 导致抗冻性能在寒冷地区还不够成熟. 目前通过双掺技术提高普通混凝土性能已经有大量的应用<sup>[6-8]</sup>, 但对加气混凝土中利用双掺技术的研究较少. 笔者以铁尾矿作为主要原料制备加气混凝土, 通过

外加剂改善其的孔隙结构. 矿物掺合料改善其的孔壁结构, 使其更加密实的双掺技术, 有效提高了加气混凝土的抗压强度, 降低吸水率, 同时满足寒冷地区冻融 50 次的要求, 冻融循环后达到 B06 优等品(A)的冻融标准.

1 试 验

1.1 原材料

尾矿砂: 辽阳歪头山铁尾矿, 细度为 0.08 mm, 方孔筛筛余量 18%. 尾矿的主要技术指标见表 1 所示.

表 1 尾矿的主要技术指标

Table 1 The main technical indicators of tailings						%
w( SiO <sub>2</sub> )	w( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w( Fe )	w( Cao )	w( MgO )	w( S )	w( P )
75	7.22	5.4	2	2.75	0.069	0.06

粉煤灰: 由沈阳红阳热电厂提供, 为 I 级粉煤灰, 细度为 0.045 mm, 方孔筛筛余量 6.5%, 粉煤灰的主要技术指标如表 2 所示.

表 2 粉煤灰的主要技术指标

Table 2 The main technical indicators of fly ash					%
w( Cao )	w( MgO )	w( SiO <sub>2</sub> )	w( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
1.64	3.88	53.21	25.08	6.25	

石灰: 辽阳本地普通石灰窑生产石灰, 有效氧化钙 72.3%, 消化速度 8 min 可达 90.2℃; 细度为 0.08 mm, 方孔筛筛余量 8%.

水泥: 42.5 的普通硅酸盐水泥.

发气材料: 普通铝粉膏.

减水剂: 聚羧酸减水剂, 白色粉末.

石膏: 脱硫石膏, 为工业生产副产品, 由辽宁秦甄环保建材公司提供.

稳泡剂: 北京市好发节能科技有限公司生产的稳泡剂, 黄色液体.

偏高岭土: 细度为 0.08 mm, 方孔筛筛余量 ≤ 5%, 偏高岭土的技术指标如表 3.

表 3 偏高岭土的技术指标

Table 3 The technical indexes of Metakaolin %					
w( CaO )	w( MgO )	w( SiO <sub>2</sub> )	w( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w( FeO )	烧失量
0.2	0.1	50.16	30.12	1.5	6.16

矿渣: 粒化高炉矿渣粉, 碱性, 细度为 0.08 m, 方孔筛筛余量 ≤ 13%, 矿渣各项技术的指标见表 4.

表 4 矿渣的技术指标

Table 4 The technical indexes of slag							%
w( CaO )	w( SiO <sub>2</sub> )	w( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w( FeO )	w( K <sub>2</sub> O )	w( Na <sub>2</sub> O )	w( TiO <sub>2</sub> )	烧失量
30.52	31.24	19.90	9.35	0.74	0.21	1.22	6.16

1.2 试验方案

1.2.1 试验配比

笔者与辽宁秦甄环保建材生产 B06 级加气混凝土的实践经验结合,确定配合比范围,在配比范围内进行进一步正交试验,最终确定本试验的最佳配合比.加气混凝土各组分质量分数见表 5.

表 5 加气混凝土各组分质量分数

Table 5 Mix proportion of aerated concrete

w(砂)/ %	w(水泥)/ %	w(石灰)/ %	w(石膏)/ %	w(铝粉)/ %	水料 质量比
66	18	12	4	0.1	0.59

1.2.1 试验步骤

试验在辽宁秦甄环保建材有限公司进行,采用小模具模拟工厂工艺与生产环境.试件制备方法如下:首先将尾矿砂磨细,将石膏、尾矿砂和水按照表 5 的基准配合比称量后混合并搅拌 2 min 形成料浆,再将石灰、水泥、外加剂以及矿物掺合料分别称量之后加入料浆并搅拌 2 min,最后将铝粉膏称量后加水形成铝粉溶液,充分搅拌后倒入料浆并搅拌 1 min,最后将料浆浇筑到自制的模具内并转移到静停室发气,待试件达到切割强度后将试块拆模放入蒸压釜蒸养,之后切割成长宽高为 100×100×100 mm 的立方体试块,将试块放入干燥箱中烘干后冷却到室温并进行各项性能的测试.

1.2.2 试验设备

SL5001N,量程 2 000 g 的电子称,精度为 0.1 g;量程 200 g 精确电子称,精度为 0.01 g;鼓风干燥箱恒温 (80±5)℃;GJ-1 的密封式制样粉碎机;自制胶合板模具,长宽高为 320 mm×320 mm×150 mm;YES-300B 的数字式抗折抗压试验机;FYS-150C 型负压筛析仪;秦臻环保建材大型蒸压釜.

1.2.3 试验测试方法

笔者对加气混凝土的干密度、抗压强度、吸水率、冻融性能进行测试,测试方法均参考《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T

11969—2008)标准.

2 试验结果及分析

2.1 掺减水剂对加气混凝土性能的影响

2.1.1 减水剂对扩展度的影响

初始扩展度将直接影响铝粉发气速度与浆体稠化速度的匹配性问题,进而影响到坯体的稳定性.水料质量比越低,初始扩展度越小,则浆体的黏度增长越快<sup>[9]</sup>.笔者通过初期试探,在表 5 配合比的前提下,未添加外加剂的基准试样的扩展度为 210 mm,水料质量比为 0.59.在此基础上通过掺入不同掺量的减水剂调节扩展度,掺量分别为总干物料的 0.02%,0.04%,0.06%,0.08%,0.1%,不同减水剂掺量各项性能指标见表 6.

表 6 不同减水剂掺量的各项性能指标

Table 6 Performance indexes of different superplasticizer quantity

减水剂 掺量/%	扩展度/ mm	干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强 度/MPa	吸水率/ %	试块 状态
0.00	210	611	3.88	64	发气正常
0.02	230	605	3.99	62	发气正常
0.04	240	599	4.11	62	发气正常
0.06	260	595	4.26	62	发气正常
0.08	275	606	3.85	62	试件冒泡
0.10	300	637	3.49	65	试件塌模

由表 6 可知,B06 级别的普通加气混凝土的抗压强度仅为 3.88 MPa,吸水率高达 64%,不能达到国标优等品的水平.随着减水剂掺量的增多,料浆的初始扩展度增加,试件的干密度降低,试件的抗压强度增加,吸水率轻微降低.在扩展度为 260 mm 时,试件的抗压强度可达 4.26 MPa,达到最高,抗压强度相比空白组增加 9.7%,说明最佳扩展度为 260 mm,浆体的极限剪应力与气泡中的压力平衡性达到最佳<sup>[10]</sup>.继续增加扩展度,料浆稠度增长速率不够,随着气泡内的压力继续增大,料浆的塑性不能使得气泡保持完整,浆体的极限剪应力不足导致气泡继续增大合

并,料浆顶部出现冒泡甚至塌模现象.

2.1.2 减水剂降低水料比的试验结果

同水泥混凝土性能一样,加气混凝土的水料质量比越低,浆体硬化后的微观结构越好,抗压强度越高<sup>[11]</sup>.以水料质量比为0.59为基础,保持最佳扩展度260 mm不变,降低水料质量比并试探增加减水剂的用量,制备试件并进行性能测试(见表7).

表7 不同减水剂掺量的各项性能指标

Table 7 Performance indexes of different superplasticizer quantity

水料质量比	减水剂掺量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	干密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	抗压强度/MPa	吸水率/%	试块状态
0.59	0.06	595	4.26	62	发气正常
0.57	0.08	601	4.35	61	发气正常
0.55	0.10	598	4.49	61	发气正常
0.53	0.14	593	4.58	61	发气正常
0.52	0.16	635	4.56	61	试块下沉
0.50	0.20	649	4.72	62	下沉开裂

由表7可知,随着水料质量比的降低,减水剂的掺量增加,抗压强度在逐渐增高,吸水率略微下降.当水料质量比降低到0.53时,抗压强度可以达到4.58 MPa,相比水料质量比0.59提高了7.5%.当继续降低水料比时,发现浇注稳定性不好,试块有下沉现象.因为水料质量比持续降低之后,原料的细度有限,导致水料质量比较小的料浆中悬浮性达到极限,浆体分散不够均匀,料浆发气不够稳定,进而容易塌模.同时水分过少也容易使

坯体在静停的过程中失水过多而产生出釜开裂现象.

2.2 稳泡剂对加气混凝土性能的影响

加入减水剂降低水料比后,由于水料质量比的降低和尾矿原料细度的局限性导致气孔均匀性不够理想,气泡容易合并.气孔结构好而均匀,可以明显的提高强度,降低吸水率<sup>[12]</sup>.因此在水料质量比为0.53的基础之上,掺入稳泡剂,将其与铝粉一起稀释成200 mL溶液,充分搅拌2 min,掺量分别为铝粉掺量质量的5%、10%、15%、20%、25%、30%.测试性能结果如图1所示.由图1可知,随着稳泡剂的掺量增大,加气混凝土的抗压强度先增大后减少,在掺量为2%时,抗压强度达到4.68 MPa,同比增长2%.而吸水率则由61%下降到了57%.

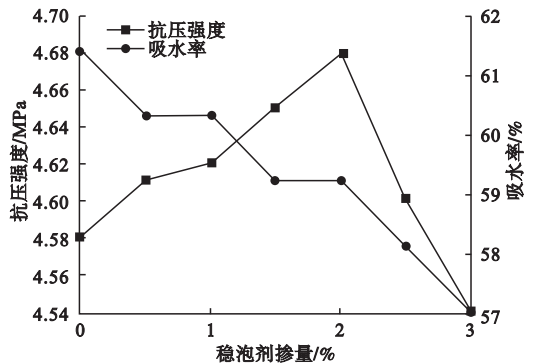


图1 稳泡剂对加气混凝土的影响

Fig. 1 Effect of foam stabilizer on compressive strength of aerated concrete

稳泡剂对加气混凝土结构的影响如图2所示.

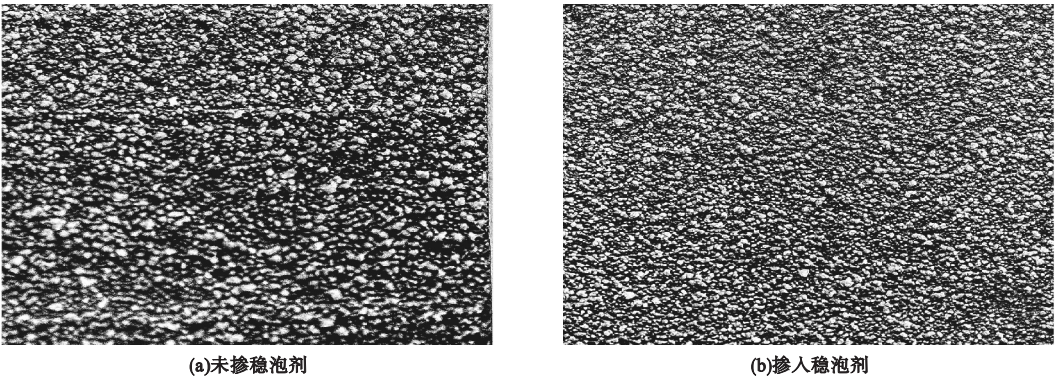


图2 稳泡剂对加气混凝土孔结构的影响

Fig. 2 Effect of foam stabilizer on pore structure of aerated concrete



制备加气混凝土的过程中,铝粉表面存在大量油脂,该油脂使得铝粉颗粒聚集,在发气过程中影响气泡质量,稳泡剂的加入,增加了气泡抵抗破坏的能力,降低气泡膜的表面张力,使气泡膜的韧性增强,气泡变小而均匀,防止合并成大泡<sup>[13]</sup>.随着稳泡剂掺量的增多,试块的抗压强度下降,因为稳泡剂是表面活性剂,分散到胶凝材料之中,会降低胶凝材料的胶凝性.

2.3 掺矿物掺合料对加气混凝土性能影响

2.3.1 掺矿渣对加气混凝土的影响

笔者使用水淬得到急冷后矿渣,此时矿渣处于高能量的状态<sup>[14]</sup>.试验以水料质量比为0.53,扩展度为260 mm,稳泡剂为铝粉掺量的20%作为基准复掺矿渣,掺量按照石灰和水泥质量总和的5%、10%、15%、20%、25%、30%掺入,测试性能结果如图3所示.

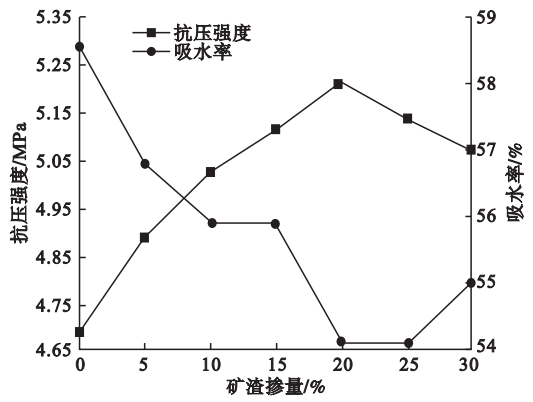


图3 矿渣对加气混凝土的影响

Fig. 3 The influence of slag on compressive strength of aerated concrete

由图3可知,复掺超细矿渣粉后加气混凝土的抗压强度先增加后减少,当矿渣掺量为20%时,其抗压强度可达5.21 MPa,相比未掺矿渣时增长11.2%,可以达到优等品要求.吸水率从59%下降到54%.

由于试验所用矿渣细度较高,可以增加料浆的悬浮性,改善气孔均匀性;矿渣具有较大的潜在活性,可以发挥其火山灰性.矿渣中的SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可以与料浆中的Ca(OH)<sub>2</sub>

生成水化硅酸钙、水化铝酸钙产物,进而提高强度;同时矿粉的微集料效应在水泥水化的过程中也会发挥作用,矿粉均匀分散于孔隙和凝胶体中,起到了填充毛细管以及孔隙裂缝的作用,提高密实度<sup>[15]</sup>.当矿渣掺量增加25%和30%时加气混凝土的抗压强度下降,在试验过程中,矿渣掺量增加到25%和30%时,对强度有一定程度的影响,其原因是钙质材料过量,多余的水泥在水化后不能生成CSH(B)而生成强度较低的C2SH(A)<sup>[16]</sup>.因此矿渣的掺量为20%时效果最佳.

2.3.2 掺偏高岭土对加气混凝土的影响

试验以水料质量比0.53,扩展度为260 mm,稳泡剂为铝粉掺量的20%为基准试样,复掺偏高岭土,掺量为水泥和石灰总和的5%、10%、15%、20%、25%、30%,制备复掺减水剂和矿渣的加气混凝土试件,测试性能结果如图4所示.

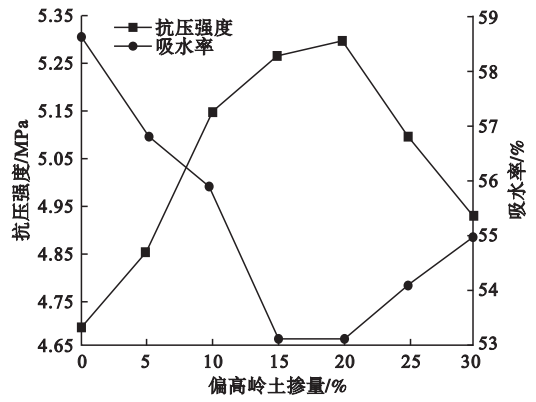


图4 偏高岭土对加气混凝土的影响

Fig. 4 Influence of metakaolin on compressive strength of aerated concrete

由图4可知,掺入偏高岭土的试件抗压强度也在20%时达到最大值,可达5.39 MPa,相比未掺偏高岭土时增长15.2%.质量吸水率先下降后升高,最低可达53%,外掺偏高岭土20%时效果最好.吸水性能也得到明显的改善.加入偏高岭土能够发挥出较高的火山灰活性,改善抗压强度、耐腐蚀性和抗渗性等性能.同时相比矿渣粉来

说,偏高岭土细度更高,微集料效应更强,填充毛细孔效果更好<sup>[17-18]</sup>.当掺量大于20%之后,试件的抗压强度明显下降,当偏高岭土的掺量超过一定值时,因比表面积的增大,结合自由水增多,导致未参与水化反应的偏高岭土增多,而影响强度的改善.同时加入偏高岭土后,氢氧化钙与硅和铝反应过多,导致蒸压过程中钙离子含量降低,水热合成反应生成的托贝莫来石下降,从而导致强度下降<sup>[19]</sup>.

2.3.3 两种矿物掺合料复掺对加气混凝土性能的影响

根据对普通混凝土矿物掺和料的经验和实际经济因素的考虑,各种矿物掺合料复合均比单掺有更好的效果.故此笔者将对这两种矿物掺和料进行复掺,探究最佳配比.以总量为20%为基础,改变两种材料的掺量,测试结果如表8所示.

表8 复掺矿物掺合料的各项性能指标  
Table 8 Performance indexes of compound mineral admixture

矿渣掺量/ %	偏高岭土 掺量/%	干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/ MPa	吸水率/ %
0	20	608	5.39	53
5	15	609	5.55	53
10	10	615	5.62	52
15	5	620	5.36	53
20	0	624	5.21	54

由表8可知,偏高龄土掺量越大,则干密度越小.当矿渣和偏高岭土复掺的情况下,试件的抗压强度明显提高.当矿渣和偏高岭土掺量分别为10%的时候,试件的抗压强度可达5.62 MPa,同比增加20%,吸水率下降到52%,同比下降9个百分点.由于细度不同,所以矿渣与偏高岭土复掺可以使级配更加合理,复掺之后优化了加气混凝土的致密度,提高了其抗渗性,另一方面偏高岭土和矿渣的火山灰效应增加了胶凝产物,提高了早期强

度<sup>[20-21]</sup>.

2.3.4 掺粉煤灰对加气混凝土性能的影响

考虑采用超细粉煤灰代替尾矿砂,制备级配更好的加气混凝土.在掺入两种外加剂与两种矿物掺合料之上复掺粉煤灰,粉煤灰掺量为原材料总量的10%,15%,20%,25%,30%,35%,测试结果见表9.

表9 不同粉煤灰掺量的各项性能指标  
Table 9 Performance indexes of different fly ash content

粉煤灰 掺量/%	尾矿砂 掺量/%	干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/ MPa	吸水率/ %
0	66	615	5.62	52
11	55	612	5.65	52
22	44	607	5.74	50
33	33	605	5.24	51
44	22	598	5.12	53
55	11	576	4.98	53

由表9可知,随着粉煤灰掺量的增加,试块的干密度在逐渐减少,而抗压强度先增加后减少,当粉煤灰掺量达到22%时,抗压强度达到可达5.74 MPa,吸水率下降2个百分点,达到50%.随着粉煤灰掺量的继续增加,吸水率轻微回升.砂灰混合可以很大程度上改善原料的级配,由于粉煤灰相对尾矿砂粒度细,其填充效应增加,使结构更加致密,特别是孔隙率下降,从而使力学强度提高.而且粉煤灰的活性大于尾矿,由于微细颗粒剧增比表面积大,从而使水热反应相界面增大,在较早龄期即参与水泥水化过程可显示火山灰效应,从而使制品力学强度增加<sup>[22]</sup>.粉煤灰掺量超过1/3时,可能由于细度大的粉煤灰含量较多,导致参与反应的原料增多,原来未反应充当骨架作用的原料减少,从而导致强度下降.

2.4 加气混凝土的抗冻性测试

将空白组,内掺外加剂,内掺外加剂与内

掺外加剂与3种矿物掺合料的3类试件进行抗冻性能试验,测试结果如表10所示.

表10 加气混凝土的冻融指标  
Table 10 Freeze-thaw indexes of aerated concrete

试件样式	未掺试件的抗压强度/MPa	未掺试件的质量损失/%	掺入减水剂与稳泡剂的抗压强度/MPa	掺入减水剂与稳泡剂的质量损失/%	掺入矿物掺合料与外加剂的抗压强度/MPa	掺入矿物掺合料与外加剂的质量损失/%
冻融0次	3.88	0	4.68	0	5.74	0
冻融15次	试件破坏	15	2.58	5.8	5.18	1.2
冻融35次	试件破坏	破碎	试件破坏	破碎	4.68	2.5
冻融50次	试件破坏	破碎	试件破坏	破碎	4.08	3.8

由表10可知,采用双掺技术制备的加气混凝土试件在抗冻性能有明显的改善,最佳配比的试件在冻融50次循环后,可以达到平均强度 $\geq 4$  MPa,平均质量损失 $\leq 5\%$ ,说明使用双掺技术能有效地提高加气混凝土的抗冻性能.

2.5 加气混凝土微观分析

2.5.1 X-射线粉末衍射(XRD)分析

试验对标准质量配合比的空白组与内掺

两种外加剂与3种矿物掺合料的试件进行XRD对比(见图5).由图5能看出,空白组和双掺组的XRD衍射图谱大体相似,主要水化产物是托贝莫来石,其余是未反应的石英与硬石膏.对比可以看出,内掺外加剂与矿物掺合料的试件水热生成托勃莫来石晶体较多,相对的石英含量减少.因此可以证明双掺技术后的加气混凝土晶相更加理想.

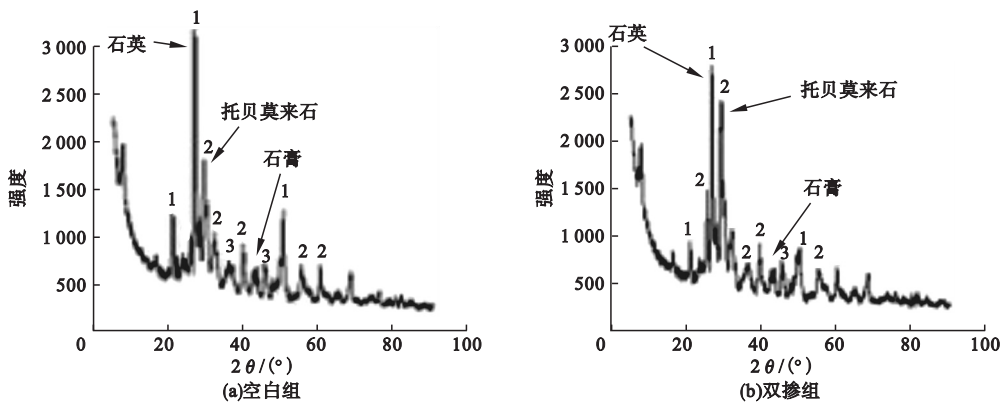
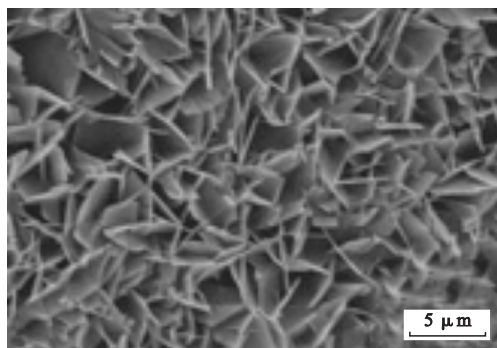


图5 加气混凝土蒸压后XRD分析  
Fig.5 XRD analysis of autoclaved aerated concrete

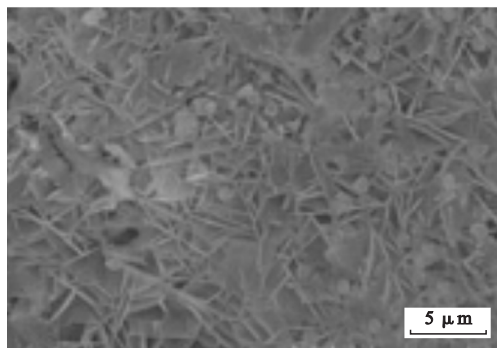
2.5.2 SEM分析

试验对标准配合比的空白组与内掺两种外加剂与3种矿物掺合料的试件气孔间壁部分进行SEM对比(见图6).通过观察显示,经过蒸压养护后,双掺后晶相和空白组相近,

但加气混凝土的孔间壁中可以观察出晶粒间有大量的凝胶相,C-S-H凝胶生长或覆盖于颗粒表面,使得压蒸后的产物更加致密,因此宏观上的抗压强度和抗冻性能明显提升.



(a)空白组



(b)双掺组

图6 加气混凝土蒸压后 SEM 分析

Fig. 6 SEM analysis of autoclaved aerated concrete

### 3 结 论

(1)采用聚羧酸减水剂能有效地改善尾矿砂加气混凝土的初始扩展度,水料质量比为 0.59 的前提下,在初始扩展度为 260 mm 时,抗压强度达到最佳值为 4.26 MPa.降低水料质量比到 0.53 可继续提高抗压强度,达到 4.58 MPa,同时降低吸水率到 61%.

(2)内掺一定量稳泡剂的尾矿砂加气混凝土能有效改善加气混凝土的孔结构,提高抗压强度,降低吸水率,稳泡剂掺量增多副作用明显.

(3)在内掺外加剂的基础之上,内掺矿粉与偏高岭土均能改善加气混凝土的孔壁结构,使孔壁更加密实.内掺水泥石灰总量的 20% 的矿粉可使抗压强度增加到 5.21 MPa,同比增长 11.2%,吸水率下降到 54%.内掺水泥石灰总量的 20% 的偏高岭土可使抗压强度增加到 5.39 MPa,同比增长 15.2%,吸水率下降到 53%.

(4)复掺 10% 矿粉 10% 偏高岭土的加气混凝土抗压强度可达 5.62 MPa,吸水率为 52%.改变原料,采用粉煤灰尾矿砂复合使用,掺量比未 1:2 时抗压强度可达 5.74 MPa,吸水率下降到 50%.

(5)双掺技术从微观角度分析,有利于托贝莫来石的形成,改善了气孔结构,密实了

孔间壁.能满足寒冷环境下冻融循环 50 次的要求,且达到 B06 优等品(A)的冻融标准.

### 参考文献

- [1] 罗梦醒,刘艳涛,刘军.绿色建材现状及发展趋势[J].中国建材科技,2009,18(4):80-83.  
(LUO Mengxing, LIU Yantao, LIU Jun. Development of green building materials[J]. China building materials science & technology, 2009, 18(4):80-83.)
- [2] 马力,曾力,张艳花.加气混凝土节能应用发展现状综述[J].混凝土,2012(5):50-52.  
(MA Li, ZENG Li, ZHANG Yanhua. Overview of the development of the energy saving application of aerated concrete[J]. Concrete, 2012(5):50-52.)
- [3] 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.
- [4] ZUO J. Aerated concrete block in engineering application[J]. Applied mechanics & materials, 2012, 174/177:1056-1059.
- [5] 刘凡.当代建筑节能研究[J].上海建材,2010(4):25-26.  
(LIU Fan. On the modern construction energy conservation[J]. Shanghai building materials, 2010(4):25-26.)
- [6] 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.
- [7] FANG M, WANG Z, SHI F, et al. Analysis on life cycle CO<sub>2</sub> emission of aerated concrete production in china[J]. Materials science forum, 2013, 743/744:509-515.
- [8] 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.
- [8] 黄照明,袁誉飞,陈泽杰,等. 高强轻质粉煤灰加气混凝土发气技术的研究[J]. 混凝土, 2012(1):135 – 137.  
(HUANG Zhaoming, YUAN Yufei, CHEN Zhejie, et al. Research on the air-entraining technology of high-strength and lightweight flyash aerated concrete[J]. Concrete, 2012(1):135 – 137.)
- [9] WALLEVIK J E. Relationship between the bingham parameters and slump [J]. Cement & concrete research, 2006, 36(7):1214 – 1221.
- [10] 孙抱真,李广才,贾传玖. 蒸压加气混凝土的水化产物与强度和收缩的关系[J]. 硅酸盐学报, 1983, 11(1):77 – 84.  
(SUN Baozhen, LI Guangcai, JIA Chuanjiu. relationship between strength and contraction of hydration products of autoclaved aerated concrete[J]. Journal of the chinese ceramic society, 1983, 11(1):77 – 84.)
- [11] 彭军芝. 蒸压加气混凝土中孔的形成、特征及对性能的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.  
(PENG Junzhi. Study on the forming, Characterization and effect of autoclaved aerated concrete pores[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.)
- [12] 吴卫国. 稳泡剂在加气混凝土生产中的作用及机理分析[J]. 砖瓦, 2012(5):57 – 58.  
(WU Weiguo. Function and mechanism analysis of foam stabilizing agent in autoclaved aerated concrete production [J]. Block-brick-tile, 2012(5):57 – 58.)
- [13] ISU N, ISHIDA H, MITSUDA T. Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete(I) tobermorite formation [J]. Cement & concrete research, 1995, 25(2):243 – 248.
- [15] 邱树恒,黄春泉,高建明. 硅灰和矿渣掺合料对高强砼抗渗性的影响[J]. 水泥工程, 2002(6):58 – 59.  
(QIU Shuheng, HUANG Chunquan, GAO Jianming. Effects of volatilized silica and slag as admixture on anti-impermeability of high-strength concrete [J]. Cement engineering, 2002(6):58 – 59.)
- [16] 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 university of technology, 2011, 33(9):41 – 44.)
- [17] 苏彪,王桂明,水中和,等. 偏高岭土在PHC管桩中的应用前景浅析[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(4):27 – 29.  
(SU Biao, WANG Guiming, SHUI Zhonghe, et al. Application prospect on metakaolin in PHC piles industry[J]. China concrete and cement products, 2010(4):27 – 29.)
- [18] 曹征良,李伟文,陈玉伦. 偏高岭土在混凝土中的应用[J]. 深圳大学学报理工版, 2004, 21(2):183 – 186.  
(CAO Zhengliang, LI Weiwen, CHEN Yulun. Application of metakaolin in concrete [J]. Journal of Shenzhen university science and engineering, 2004, 21(2):183 – 186.)
- [19] 张宪圆,林克辉,谢红波. 硅灰对蒸压加气混凝土性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(10):53 – 55.  
(ZHANG Xianyuan, LIN Kehui, XIE Hongbo. The study on the influence of silica fume to autoclaved aerated concrete properties [J]. New building materials, 2016, 43(10):53 – 55.)
- [20] 程书凯,水中和,杨荣辉,等. 复掺偏高岭土-矿渣对轻骨料混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5):1349 – 1355.  
(CHENG Shukai, SHUI Zhonghe, YANG Ronghui, et al. Effect of metakaolin mixed with slag on properties of lightweight concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(5):1349 – 1355.)
- [21] 王立刚. 超细粉煤灰对加气混凝土制造工艺及力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(2):45 – 46.  
(WANG Ligang. The influences of ultra-fine fly-ash on manufactural technology and properties of aerated concrete[J]. China concrete and cement products, 2001(2):45 – 46.)