

生活垃圾焚烧炉渣集料的胶凝特征

刘 栋^{1,2}, 李立寒¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330200)

摘要: 为研究垃圾焚烧炉渣集料(BAA)的胶凝特征,以强度试验分析 BAA 的水硬性和火山灰活性,并采用 X 射线荧光光谱仪、X 射线衍射仪和扫描电子显微镜分析微观作用机理。结果表明,BAA 含有水泥熟料矿物和活性 SiO_2 、 Al_2O_3 , 体现出水硬性和火山灰活性特征。BAA 中水泥熟料矿物遇水发生水化反应生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 活性 SiO_2 、 Al_2O_3 在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发作用下发生火山灰反应生成 C-S-H 凝胶、水化硅铝酸钙等水化产物;BAA 与水泥、水混合后,除上述反应外,活性 Al_2O_3 在硫酸盐激发下也发生火山灰反应生成钙矾石。BAA 在水泥中的火山灰反应有一定延后性。湿法处理、长时间堆放 BAA 的胶凝活性分别较干法处理、短时间堆放 BAA 低。

关键词: 生活垃圾焚烧炉渣集料; 胶凝特征; 微观机理; 堆放时间; 处理方法

中图分类号: U414

文献标志码: A

Cementitious Properties of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Aggregate

LIU Dong^{1,2}, LI Lihan¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, China)

Abstract: In order to research cementitious properties of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate (BAA), hydraulic activity and pozzolanic activity of BAA were analyzed by strength test, and X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) were also used to study the microscopic mechanism. The results show that BAA consists of cement clinker mineral, active SiO_2 and Al_2O_3 . BAA has hydraulic activity and pozzolanic activity. Cement clinker minerals in BAA react with water to produce calcium silicate hydrate (C-S-H) gel and $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pozzolanic reaction occurs when active SiO_2 and Al_2O_3 are activated by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to form hydration

products like C-S-H gel and calcium silicoaluminate hydrate. When BAA mixes with water and cement, besides the reactions mentioned above, pozzolanic reaction also occurs when active Al_2O_3 is activated by sulfate to form ettringite. Pozzolanic reaction of BAA in cement delays to some extent. Wet-processed BAA shows lower cementitious properties than dry-processed BAA, and BAA with longer weathering time also has lower cementitious properties.

Key words: municipal solid waste incineration bottom ash aggregate; cementitious properties; microscopic mechanism; weathering time; treatment

生活垃圾焚烧炉渣经处理后为垃圾焚烧炉渣集料(BAA),具备一定级配和强度,可用作土木工程材料。BAA 由熔渣、陶瓷、玻璃、砖石、金属和未燃物等多种物质组成,矿物成分复杂^[1],具备一定化学活性^[2-4]。BAA 作为混合材生产水泥的相关研究表明^[2-4],这种生态水泥的工程性能、环境影响均可满足相关要求,具有推广前景。但这需要在应用前对 BAA 进行熔融、磨细等工艺的处理,经济成本较高。BAA 也可直接替代天然碎石用于水泥混凝土^[5]、道路水泥稳定碎石基层^[6]或沥青混合料面层^[7-8]。研究表明^[5-8],偏软弱的 BAA 造成水泥混凝土、沥青混合料和水泥稳定碎石的强度一般低于常规材料,但个别掺量下 BAA 可能对强度存在一定贡献,对沥青混合料的抗水损害性能有利,这均与 BAA 中矿物成分在水、水泥或沥青中的物理化学反应有关。可见,BAA 可能具备一定胶凝活性,并对其资源化应用效果存在影响,有必要对 BAA 胶凝特征及影响因素进行探讨。处理方法、堆放时间对 BAA 的矿物成分、物理力学性质均存在影响^[9-10],可能也是胶凝活性的影响因素。

本文以 BAA 化学成分和矿物成分研究为基础,

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2015C0001,2015C0023); 浙江省住房和城乡建设厅科技项目(2014Z079)

第一作者: 刘栋(1987—),男,工程师,工学博士,主要研究方向为道路工程结构与材料。E-mail: zbyikun@163.com

通讯作者: 李立寒(1957—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为道路工程结构与材料。E-mail: lhli@tongji.edu.cn

探讨 BAA 在水、水泥环境中的水硬性和火山灰活性,分析 BAA 胶凝特征的影响因素与作用机理,为 BAA 的资源化应用提供技术参考。

1 试验材料与试验方法

1.1 原材料

BAA 分别取自上海市和杭州市某生活垃圾焚烧发电厂,均采用炉排炉焚烧工艺,共多个生产批次,其中以跳汰摇床工艺^[9]处理得到的为湿法 BAA (S-1),以涡电流分选工艺^[9]处理得到的为干法 BAA,分别以 G-1~G-4 为代号。BAA 在实验室内避雨堆放、自然风干,堆放 90 d 左右时的筛分试验结果见图 1。

水泥:江苏太仓产海螺牌 32.5 级复合硅酸盐水泥。

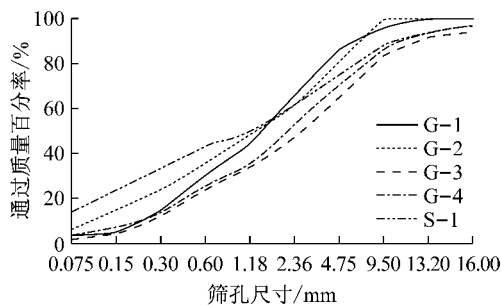


图 1 BAA 筛分试验结果
Fig.1 Grading curves of BAA

1.2 试件准备与试验方法

BAA 烘干、研磨至规定细度后分别采用 X 射线荧光光谱仪、X 射线衍射仪进行 XRF 分析、XRD 分析。

BAA 与水拌合后直接成型试件,试件无侧限抗压强度主要由 BAA 间的粘结力提供,而此粘结力与 BAA 中活性物质在水作用下形成的水化产物种类及数量有关,据此分析 BAA 的水硬性。依据 BAA 重型击实试验确定的最大干密度和最佳含水率(本文省略此数据)静压成型 $\phi 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 圆柱体试件,密封养生至一定龄期时测试无侧限抗压强度,加载速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

BAA 替代标准砂制备炉渣砂浆小梁试件,采用干法 BAA 制备的砂浆为干法炉渣砂浆,湿法 BAA 制备的为湿法炉渣砂浆。依照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》^[11](GB/T 17671—1999)准备试件并测试试件强度,据此分析 BAA 的火山灰活性。

采用扫描电子显微镜对 BAA 和炉渣砂浆的微观形貌进行 SEM 观测。

2 试验结果与分析

2.1 BAA 的化学成分与矿物成分

堆放 90 d 左右、干法 BAA 的 XRF 分析结果见表 1, w 表示各化学成分所占的质量百分率。由表 1 可见, BAA 的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 , 总量均在 70.0% 左右。

表 1 BAA 的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of BAA

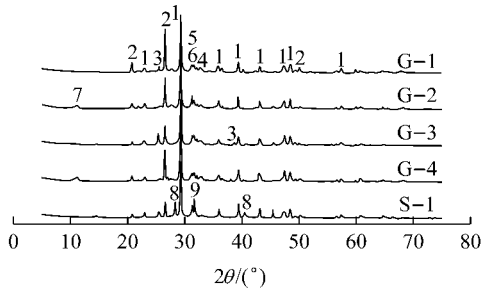
代号	质量百分率 $w/\%$											
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	P_2O_5	Na_2O	K_2O	ZnO	SO_3	Cl	烧失量
G-1	20.7	6.9	38.7	4.1	2.3	5.5	1.7	1.5	0.6	3.8	3.9	9.1
G-2	19.4	6.2	39.0	4.3	2.5	5.8	1.7	1.5	0.6	3.0	3.4	—
G-3	22.5	7.1	36.8	4.5	2.3	4.7	2.0	1.8	0.4	3.2	4.0	5.9
G-4	21.2	6.1	37.8	4.5	2.3	4.7	1.9	1.8	0.5	4.0	4.2	7.3

堆放 90 d 左右 BAA 的 XRD 图谱见图 2。由图 2 可见,干法 BAA 的矿物成分相似,主要为 SiO_2 、 CaCO_3 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)、水化硅酸钙 ($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, C-S-H)、Friedel 盐 ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、 CaSO_4 和 KCl 、 NaCl 等。其中衍射角 $2\theta = 26.6^\circ$ 处 SiO_2 特征峰峰形明显、尖锐,结晶程度较高,而 $2\theta = 20.9^\circ$ 和 50.1° 处 SiO_2 特征峰较弱,表明其处于非结晶状态,可能具有活性。少量 C_3S 、 C_2S 及 C_3A 等水泥熟料矿物是由垃圾中 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等化学成

分在高温焚烧过程中反应生成的。与干法 BAA 不同,湿法 BAA 的 XRD 图谱中存在 KCl 、 NaCl 衍射峰,表明其氯盐含量较高。这是因为在跳汰摇床工艺处理过程中,污水溶解并聚集了 BAA 中的氯盐,在长时间浸泡过程中被富含孔隙结构的熔渣吸附。

不同堆放时间 BAA(G-1)的 XRD 图谱见图 3。由图 3 可见,随着堆放时间延长,衍射角 $2\theta = 18.0^\circ$ 和 34.1° 处 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度减弱,而 $2\theta = 29.3^\circ$ 、 39.4° 、 47.4° 和 48.4° 处 CaCO_3 衍射峰增强; $2\theta = 27.6^\circ$ 处 C_3S 衍射峰减弱; $2\theta = 50.1^\circ$ 处活性 SiO_2

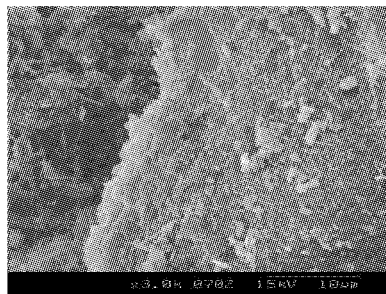
衍射峰减弱,而 $2\theta=26.6^\circ$ 处 SiO_2 衍射峰则没有明显变化. 另外,堆放 1 d BAA 中检测到少量活性 Al_2O_3 ,而在其他 BAA 中未检测到. 这表明,BAA 中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在堆放过程中与空气中 CO_2 发生碳化反应生成 CaCO_3 , C_3S 与水发生水化反应生成 C-S-H 凝胶,活性 SiO_2 和 Al_2O_3 参与生成新生矿物,而非活性 SiO_2 结晶良好、未参与生成矿物. 总体来看,



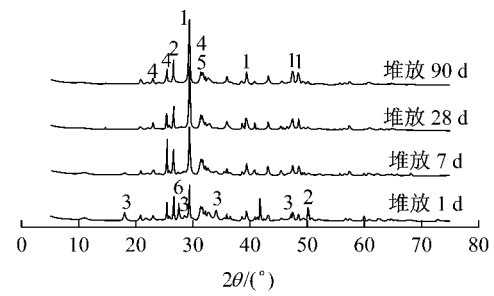
1— CaCO_3 ; 2— SiO_2 ; 3— CaSO_4 ; 4— C_2S ; 5— C_3S ; 6—C-S-H; 7—Friedel 盐; 8—KCl; 9—NaCl; 10— C_3A

图 2 BAA 的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of BAA



a 堆放 7 d



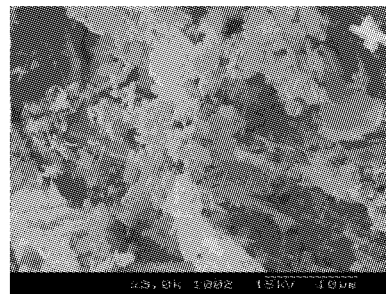
1— CaCO_3 ; 2— SiO_2 ; 3— $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 4— CaSO_4 ; 5— C_3S ; 6— C_2S

图 3 不同堆放时间 BAA 的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of BAA at different weathering time

XRD 图谱中馒头状衍射峰随堆放时间而减少,表明 BAA 中无定形结构矿物减少,结晶良好的矿物增多.

堆放 7 d 和 90 d 熔渣颗粒微观形貌(放大 3 000 倍)见图 4. 可见,堆放 7 d 熔渣颗粒表面覆盖了大量细絮针状 C-S-H 凝胶,堆放 90 d 熔渣颗粒表面覆盖着较大尺寸的 CaCO_3 , 针状钙矾石及其他片状、棒状或颗粒状结晶较好的矿物.



b 堆放 90 d

图 4 不同堆放时间熔渣 SEM 图

Fig.4 SEM photos of BAA at different weathering time

2.2 BAA 的水硬性

2.2.1 强度试验结果与分析

采用堆放 28 d 的 BAA 成型试件,其无侧限抗压强度试验结果(表 2)表明,BAA 试件具备一定强度,且随养生龄期而增大,湿法 BAA 试件的无侧限抗压强度明显低于干法 BAA 试件. 分别采用堆放 7,28,60 和 120 d 的 BAA(G-1)成型试件,其无侧限抗压强度试验结果(表 3)表明,在相同养生龄期下,试件的无侧限抗压强度随 BAA 的堆放时间而降低. 这表明,BAA 加水生成凝胶物质,这些水化产物将松散的 BAA 颗粒粘结成整体,试件形成强度,且养生时间越长,水化产物增多,试件强度提高;湿法 BAA 试件中水化产物较少,其水硬性弱于干法 BAA;BAA 的水硬性随其堆放时间而减弱.

表 2 BAA 试件无侧限抗压强度

Tab.2 Unconfined compressive strength of BAA specimen

试件养生时间/d	试件无侧限抗压强度/MPa				
	G-1	G-2	G-3	G-4	S-1
7	0.75	0.83	0.63	1.04	0.22
28	1.13	1.04	0.98	1.50	0.37

表 3 不同堆放时间 BAA 试件无侧限抗压强度

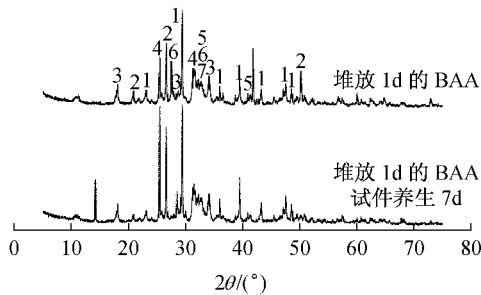
Tab.3 Unconfined compressive strength of BAA specimen at different weathering time

试件养生时间/d	BAA 试件无侧限抗压强度/MPa			
	7 d	28 d	60 d	120 d
7	1.18	0.75	0.37	0.27
28	1.71	1.13	0.63	0.50

2.2.2 水化产物分析

采用堆放 1 d 的 BAA(G-1)成型试件,分别在未养生及养生 7 d 时敲碎,取试件内部颗粒,经磨细后

进行 XRD 分析,结果见图 5. 由图 5 可见,BAA 试件经养生 7 d 后,衍射角 $2\theta=27.4^\circ$ 处 C_2S , 31.6° 处 C_2S 和 C_3S , 20.8° 和 50.1° 处活性 SiO_2 , 18.1° 和 34.1° 处 $Ca(OH)_2$ 的衍射峰强度均降低. 这表明,养生过程中, BAA 中的 C_2S 和 C_3S 在拌合水作用下发生水化反应, 活性 SiO_2 在 $Ca(OH)_2$ 激发下发生火山灰反应.



1— $CaCO_3$; 2— SiO_2 ; 3— $Ca(OH)_2$; 4— Ca_2SO_4 ; 5— C_3S ; 6— C_2S ; 7—C-S-H

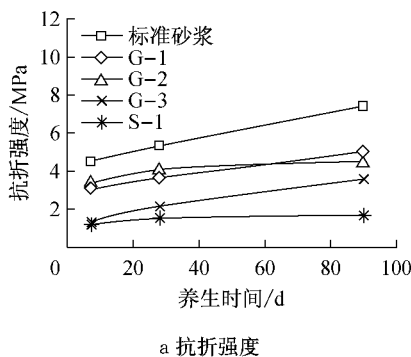
图 5 BAA 的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of BAA

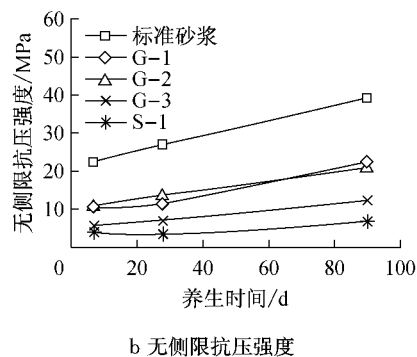
2.3 BAA 的火山灰活性

2.3.1 强度试验结果与分析

采用堆放 90 d 左右的 BAA 配制炉渣砂浆试



a 抗折强度



b 无侧限抗压强度

图 6 炉渣砂浆的强度试验结果

Fig.6 Strength test results of mortar containing BAA

表 4 炉渣砂浆的抗压强度比

Tab.4 Ratio of compressive strength of mortar containing BAA

试件养生时间/d	标准砂浆/%	炉渣砂浆/%			
		G-1	G-2	G-3	S-1
7	100.0	47.3	49.2	25.7	18.4
28	100.0	43.7	51.0	27.1	12.9
90	100.0	56.8	54.3	32.4	17.7

表 5 不同堆放时间炉渣砂浆的强度试验结果

Tab.5 Strength test results of mortar containing BAA at different weathering time

指标	堆放 1 d	堆放 7 d	堆放 28 d	堆放 60 d
抗折强度/MPa	5.14	4.64	3.71	3.65
抗折强度比/%	84.5	76.3	60.1	60.0
抗压强度/MPa	13.98	12.53	12.66	12.06
抗压强度比/%	60.6	54.3	54.9	52.3

2.3.2 水化产物分析

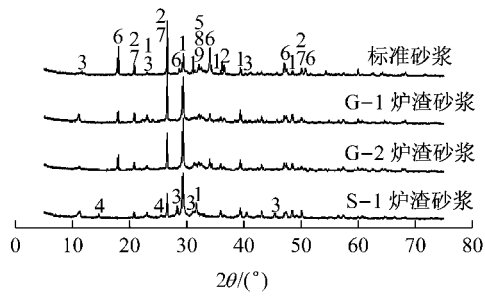
养生 7 d 砂浆敲碎后在研钵中轻轻磨擦,使水泥浆体脱落,经磨细后作 XRD 分析,结果见图 7. 由图可见,干法炉渣砂浆与标准砂浆存在相似衍射峰,矿物成分包含 $Ca(OH)_2$ 、C-S-H 凝胶、水化硅铝酸钙、

件,其强度试验结果见图 6. 分析数据,砂浆抗折强度和无侧限抗压强度由大到小排序均为:标准砂浆 > 干法炉渣砂浆 (G-1, G-2, G-3) > 湿法炉渣砂浆 (S-1). BAA 抗压碎强度较低,部分 BAA 颗粒在强度试验中发生破碎,导致炉渣砂浆试件强度较低. 而湿法 BAA 中氯盐含量高,与水泥水化产物发生反应,对水泥水化、水化产物凝结硬化产生不利影响,抑制炉渣砂浆强度形成.

以不同养生龄期标准砂浆的强度作为 100%, 计算炉渣砂浆试件强度与标准砂浆强度的比值,即抗压强度比和抗折强度比,该指标越大,表明炉渣砂浆与标准砂浆的强度差距越小. 根据图 6b, 计算炉渣砂浆的抗压强度比,见表 4. 可见,随着养生时间延长,干法炉渣砂浆的抗压强度比增大, BAA 越有利于砂浆强度形成.

分别采用堆放 1, 7, 28 和 60 d 的 BAA (G-2) 配制炉渣砂浆试件,其 28 d 强度试验结果见表 5. 由表 5 可见,抗压强度比、抗折强度比均随 BAA 堆放时间而降低. 这表明 BAA 的火山灰活性随其堆放时间而降低.

SiO_2 、Friedel 盐及尚未发生水化反应的 C_3S 和 C_2S . 湿法炉渣砂浆中 Friedel 盐、 $CaSO_4$ 含量较高, C-S-H 凝胶、 $Ca(OH)_2$ 和水化硅铝酸钙均较少. 湿法炉渣砂浆 SEM 观察(图 8, 放大 1 000 倍)发现其表面存在大量的 Friedel 盐晶体, 针状、絮状胶凝物质较少.



1—CaCO₃; 2—SiO₂; 3—Friedel 盐; 4—CaSO₄; 5—C-S-H; 6—Ca(OH)₂; 7—水化硅铝酸钙; 8—C₃S; 9—C₂S

图 7 炉渣砂浆 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of mortar containing BAA



图 8 湿法炉渣砂浆 SEM 图

Fig.8 SEM photos of mortar containing wet-processed BAA

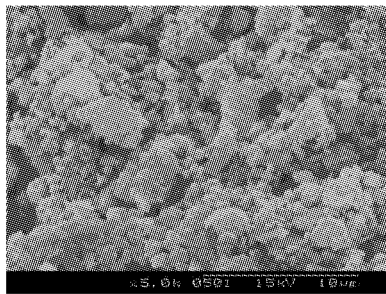
可见,湿法 BAA 中氯盐与水泥水化产物 C-S-H 凝

胶发生了反应生成 Friedel 盐,导致炉渣砂浆中凝胶物质减少、试件强度降低。

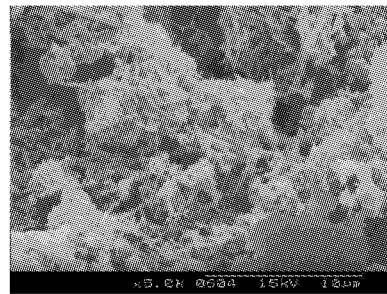
养生 7 d 标准砂浆和干法炉渣砂浆的 SEM 照片(图 9,放大 5 000 倍)表明,养生 7d 两种砂浆的水化产物形貌差异大,标准砂浆表面致密、簇团状 C-S-H 凝胶包裹住 Ca(OH)₂ 晶体,而炉渣砂浆表面疏松,C-S-H 凝胶呈纤维状、交织成网。C-S-H 凝胶形状与砂浆中孔隙数量有关^[12],炉渣砂浆中微孔隙数量较多,对 C-S-H 凝胶生长限制较少,而标准砂浆中孔隙较少,限制了 C-S-H 凝胶的生长。

养生 90 d 两种砂浆表面水化产物(图 10,放大 3 000 倍)致密性均较 7 d 时明显提高,且两者形貌相似,大量针状 C-S-H 凝胶和钙矾石裹附住片状 Ca(OH)₂ 和单硫型水化硫铝酸钙(AFm)。

综合强度试验和微观分析结果,砂浆养生 90 d 时 BAA 火山灰反应的水化产物增加明显,对砂浆表面水泥石结构致密性贡献更大,砂浆试件强度提高。可见,BAA 火山灰活性发挥具有一定延后性,这主要是因为养生初期网状 C-S-H 凝胶覆盖在 BAA 表面,阻碍了水泥水化产物 Ca(OH)₂ 与活性 SiO₂ 和 Al₂O₃ 接触。



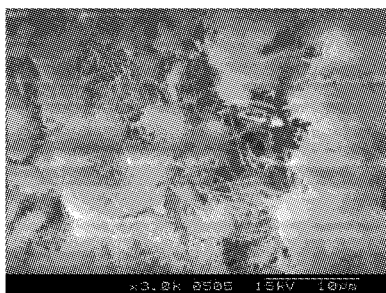
a 标准砂浆



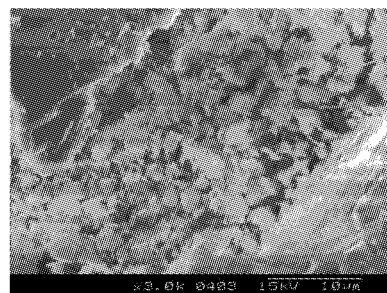
b 干法炉渣砂浆

图 9 养生 7 d 砂浆 SEM 图

Fig.9 SEM photos of mortar curing for 7 days



a 标准砂浆



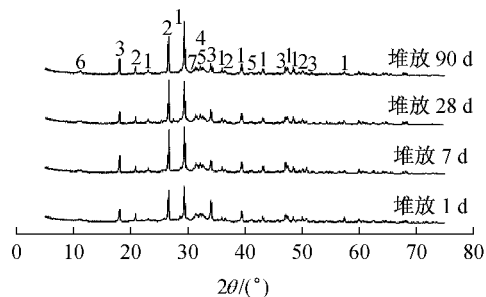
b 干法炉渣砂浆

图 10 养生 90 d 砂浆 SEM 图

Fig.10 SEM photos of mortar curing for 90 days

不同堆放时间 BAA(G-2) 配制的炉渣砂浆试件, 经养生 7 d 后进行 XRD 分析和 SEM 分析. 由 XRD 图谱(图 11) 可见, 各炉渣砂浆中均存在 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 凝胶、 SiO_2 及尚未发生水化的 C_3S 、 C_2S 等矿物. 衍射角 $2\theta = 34.0^\circ$ 处, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度随 BAA 堆放时间而降低, 29.3° 处 CaCO_3 衍射峰强度则提高. 由 SEM 照片(图 12, 放大倍数见各图) 可见, 炉渣砂浆表面水泥石致密性随 BAA 堆放时间而逐渐降低. 堆放 1 d BAA 配制的炉渣砂浆存在更多水化产物, 且交织为致密结构; 堆放 90 d BAA 配制的炉渣砂浆表面水泥石结构较疏松、存在较多空隙. 分析原因, 短期堆放 BAA 中高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量提高了水泥熟料矿物水化环境的碱性, 这将导致 C_3S 、 C_3A 的水化反应速率提高, 且 C_3S 水化反应生成碱性更高的 C-S-H 凝胶, C_3A 生

成更多水化铝酸钙及钙矾石^[12]; 短期堆放 BAA 中 C_2S 、 C_3S 和 C_3A 含量较高, 这相当于增加了水泥用量, 水化产物增多.



1— CaCO_3 ; 2— SiO_2 ; 3— $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 4— C_3S ; 5— C_2S ; 6—Friedel 盐; 7—C-S-H

图 11 不同堆放时间 BAA 配制炉渣砂浆的 XRD 图谱
Fig. 11 XRD patterns of mortar containing BAA at different weathering time

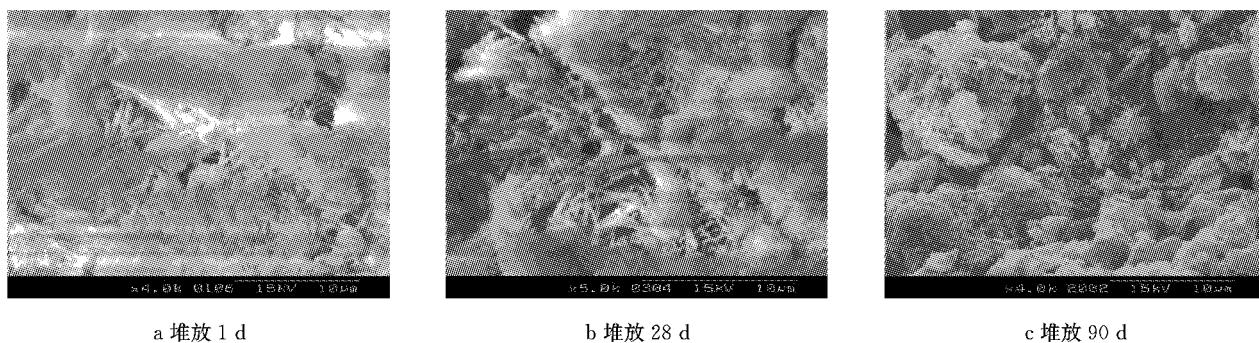


图 12 不同堆放时间 BAA 配制炉渣砂浆的 SEM 图

Fig. 12 SEM photos of mortar containing BAA at different weathering time

3 BAA 使用建议

BAA 具有与天然集料相似的性质, 可用于道路工程的各结构层, 但需根据各结构层性能要求选用合格的 BAA. BAA 可替代部分集料用于沥青混合料面层、沥青稳定基层和无机结合料稳定基层. 沥青混合料对集料性质要求高, 应采用长时间堆放的 BAA, 以降低活性. 建议增加检验 BAA 及 BAA 沥青混合料的膨胀性, 保证混合料的水稳定性. BAA 的胶凝活性影响无机结合料的水化反应, 进而影响无机结合料稳定基层材料的强度和变形特征^[6]. 不宜选用氯盐含量高的湿法 BAA, 可考虑采用水洗等措施除去可溶性氯盐. BAA 用作级配碎石基层或垫层、路基填料时, 其胶凝活性可能对结构层强度形成有利, 可考虑采用短时间堆放的 BAA. 目前 BAA 研究与应用仍不多, 使用时应注意与常规材料的对比, 考虑 BAA 的活性、低强度和高吸水率等特征对工程质量的影响.

4 结论

(1) BAA 化学成分为 SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 体系, 含有 CaCO_3 、水泥熟料矿物、Friedel 盐等复盐、硫酸盐和氯盐等多种矿物. 短期堆放 BAA 含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 且 C_3S 、活性 SiO_2 和 Al_2O_3 等无定形矿物随堆放时间而减少, 湿法 BAA 中氯盐含量高于干法 BAA.

(2) BAA 具备水硬性和火山灰活性. BAA 中 C_3S 、 C_2S 遇水发生水化反应, 活性 SiO_2 、 Al_2O_3 在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发作用发生火山灰反应; BAA 与水泥、水混合后, 仍会发生上述水化反应, 在水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发下发生的火山灰反应更强烈, 活性 Al_2O_3 在掺入硫酸盐的激发下发生火山灰反应生成钙矾石等水化产物.

(3) 在水泥中 BAA 火山灰反应有一定滞后性. 养生初期网状 C-S-H 凝胶裹附在 BAA 表面, 阻碍水泥水化产物与 BAA 中活性矿物成分的接触, 养生

中后期水化产物增多。

(4) 处理方法和堆放时间是 BAA 胶凝特征的关键影响因素,湿法处理、长时间堆放 BAA 的胶凝活性分别较干法处理、短时间堆放 BAA 低。

参考文献:

- [1] Bayuseno A P, Schmahl W W. Understanding the chemical and mineralogical properties of inorganic portion of MSWI bottom ash[J]. *Waste Management*, 2010, 30(8/9):1509.
- [2] Al-Rawas A A, Hago A W, Taha R, *et al.* Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(9): 1261.
- [3] 谢燕,吴笑梅,樊粤明,等. 生活垃圾焚烧炉渣用作水泥混合材的研究[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2009, 37(12): 37.
XIE Yan, WU Xiaomei, FAN Yueming, *et al.* Investigation into incineration bottom ash of municipal solid waste used as cement admixture[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(12): 37.
- [4] Lin K L, Lin D F. Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28(9): 817.
- [5] Siddique R. Use of municipal solid waste ash in concrete[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 55(2): 83.
- [6] 刘栋,李立寒,崔华杰. 水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2015, 43(3): 405.
LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Pavement performance of cement stabilized municipal solid waste incineration bottom ash aggregate and crushed stone[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(3): 405.
- [7] Chen J S, Chu P Y, Chang J E, *et al.* Engineering and environmental characterization of municipal solid waste bottom ash as an aggregate substitute utilized for asphalt concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(6):432.
- [8] 刘栋,李立寒,崔华杰. 炉渣集料对沥青混合料性能影响的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 307.
LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Experimental study on influence of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate on properties of asphalt mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2): 307.
- [9] 邵启超,谢迎洪,汪浩. 生活垃圾焚烧炉渣湿法与干法处理工艺比较[J]. *中国资源综合利用*, 2014, 32(12): 28.
SHAO Qichao, XIE Yinghong, WANG Hao. Comparison between the wet and dry processes of bottom ash from municipal waste incinerator [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2014, 32(12): 28.
- [10] Chimenos J M, Fernández A I, Nadal R, *et al.* Short-term natural weathering of MSWI bottom ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 79(3): 287.
- [11] 国家质量技术监督局. GB/T 17671—1999 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S]. 北京:中国标准出版社, 1999.
State Bureau of Quality Technical Supervision. GB/T 17671—1999 Method of testing cements-determination of strength[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [12] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
SHEN Ai qin. Cement and concrete research [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.